



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – DEPARTAMENTO DE
METEOROLOGIA



**CHUVAS INTENSAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO: ESTUDO DE CASO
DO ESCORREGAMENTO DO MORRO DO BUMBA, NITERÓI, RJ,
UTILIZANDO O MODELO BRAMS**

MARINA AIRES

RIO DE JANEIRO

Maio de 2016

CHUVAS INTENSAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO: ESTUDO DE CASO DO
ESCORREGAMENTO DO MORRO DO BUMBA, NITERÓI, RJ, UTILIZANDO O MODELO BRAMS

MARINA AIRES

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

Orientador: Wallace Figueiredo Menezes

Rio de Janeiro

Maio de 2016

CHUVAS INTENSAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO: ESTUDO DE CASO DO
ESCORREGAMENTO DO MORRO DO BUMBA, NITERÓI, RJ, UTILIZANDO O
MODELO BRAMS

MARINA AIRES

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

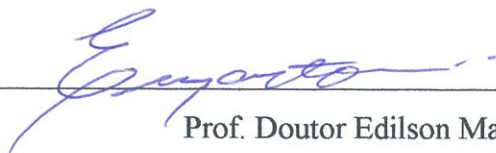
Examinada por:



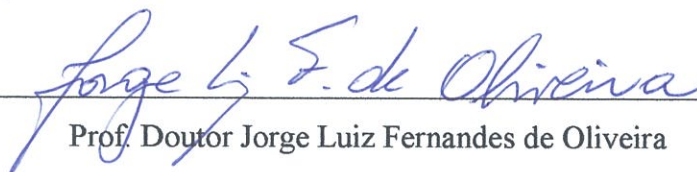
Prof. Doutor Wallace Figueiredo Menezes (Orientador)



Prof. Doutora Claudine Pereira Dereczynski



Prof. Doutor Edilson Marton



Prof. Doutor Jorge Luiz Fernandes de Oliveira

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO 2016

AIRES, MARINA

Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro: Estudo de Caso do Escorregamento do Morro do Bumba, Niterói, RJ, utilizando o modelo BRAMS/ Marina Aires - Rio de Janeiro: UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN, 2016.

Xvi, 120f : il.; 29,7 cm.

Orientador: Wallace Figueiredo Menezes

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

Programa de Pós-graduação Meteorologia, 2016.

1.Morro do Bumba. 2.Sistema Frontal. 3. BRAMS. I. Menezes, Wallace Figueiredo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ, Programa de Pós-graduação em Meteorologia. IV. Título.

“ Se você quer ser alguém na vida, devore os livros! ”

Dón Ramon Valdez

Agradecimentos

Este espaço fica reservado a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este sonho se realizasse.

Primeiramente, agradeço a Deus, à Nossa Senhora e a todos os santos e anjos do Senhor, que sempre intercederam por mim e me deram forças para concluir essa etapa.

Aos meus pais Carla e Eduardo, à minha avó Niti, aos meus irmãos Sabrina e Carlos Eduardo e à madrinha Mitzi que em todos os momentos estiveram perto de mim me apoiando e torcendo por mim, priorizando sempre meus estudos e trabalhos.

Agradeço a Vinícius, meu marido, por toda força e dedicação dispensada nestes últimos anos.

Ao professor Rafael Felipe Ferreira (AJAC), meu eterno mestre, por me mostrar que a Geografia é uma ciência incrível e por sempre acreditar em mim.

Ao professor Wallace Menezes, meu orientador, que me auxiliou bastante para a realização desse trabalho, o meu muito obrigada!

Aos professores Claudine Dereczynski e Edilson Marton por terem aceitado o convite de participar da minha banca de mestrado e por toda a ajuda e o tempo dispensado para a realização da pesquisa.

Ao professor Jorge Luiz Fernandes de Oliveira, meu grande amigo, que em todos os momentos esteve perto de mim, me ajudando a concretizar esse projeto e sendo sempre meu incentivador. Meu muito obrigada por me fazer acreditar em minha capacidade.

Aos professores Pedro Leite da Silva Dias, Cláudio Martins, André Ferrari e Adalberto da Silva por todas as informações sobre o Morro do Bumba e sobre como fazer o refinamento do modelo BRAMS e ao Demerval Moreira (CPTEC/INPE) pela ajuda em alguns scripts do BRAMS. Ao amigo Viliam Silveira por toda a ajuda com a interpretação da reanálise CSFR. Ao amigo muito querido Thiago de Melo pela ajuda na formatação do texto e das figuras.

Aos professores Fábio Ferreira, Rosemary Vieira e Rita Montezuma (IGEO/UFF), ao professor Claudinei Guimarães (EQ/UFRJ) e ao professor Nelson Jesus (INPE) que se tornaram grandes amigos, grandes mestres e grandes incentivadores.

Ao José Maria de Castro Júnior, que esteve sempre colocando os modelos para funcionar corretamente e sempre esteve disposto a ajudar.

A todos os demais professores do Departamento de Meteorologia da UFRJ que de uma maneira ou de outra me orientaram e fizeram com que eu adquirisse conhecimentos complementares que foram importantes para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos que fiz durante essa caminhada. A CAPES pela concessão da bolsa que foi de fundamental importância para o pleno desenvolvimento desta pesquisa. A todos muito obrigada!

RESUMO

CHUVAS INTENSAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO: ESTUDO DE CASO DO ESCORREGAMENTO DO MORRO DO BUMBA, NITERÓI, RJ, UTILIZANDO O MODELO BRAMS

MARINA AIRES

Orientador: Wallace Figueiredo Menezes

Programa: Meteorologia

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.)

No período de 05 a 07 de abril de 2010, um sistema frontal estacionário na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) ocasionou chuvas intensas provocando prejuízos econômicos e perdas de vidas humanas. Na cidade de Niterói, na localidade conhecida como Morro do Bumba, foram registrados oficialmente 50 mortos (ICICT- FIOCRUZ, 2010).

O presente estudo analisa a conjunção de fatores que desencadearam o Escorregamento do Morro do Bumba, como a geomorfologia/geologia do local, a ocupação do depósito de lixo ao longo de 20 anos e o tempo severo registrado no período citado com simulações do *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS), dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), imagens de radar da Rede de Meteorologia da Aeronáutica (REDEMET), dados pluviométricos do Sistema Alerta Rio, dados de METAR (REDEMET), Reanálise do *National Center of Environmental Prediction* (NCEP) / *National Center of Atmospheric Research* (NCAR) e a Reanálise do *Climate Forecast System Reanalysis* (CSFR).

A análise sinótica, utilizando dados da reanálise CSFR, mostrou um ambiente favorável a chuvas intensas, com predomínio de ventos do quadrante sul à superfície e a presença de advecção fria com escoamento no sentido sul para norte. A análise mostrou também a existência de um cavado em níveis médio e alto contribuindo para a condição de tempo severo na RMRJ.

As variáveis taxa de precipitação e precipitação acumulada, simuladas com o BRAMS, confirmaram os resultados observados, quando comparados às imagens de satélite e de radar. O modelo capturou aspectos de mesoescala, associados ao vento e à umidade específica em baixos níveis. Acredita-se que essas variáveis, associadas ao relevo, contribuíram para a intensificação das chuvas.

Apesar de simular nebulosidade rasa para o evento, o BRAMS mostrou uma melhora substancial na precipitação total com alterações nas parametrizações de microfísica e de radiação.

Palavras chave: Morro do Bumba, sistema frontal, chuvas intensas, BRAMS

Rio de Janeiro

MAIO 2016

ABSTRACT

INTENSE RAINFALL IN RIO DE JANEIRO STATE: SLIP CASE STUDY BUMBA HILL, NITERÓI,
RJ, USING THE MODEL BRAMS

MARINA AIRES

Advisor: Wallace Figueiredo Menezes

Department: Meteorology

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

In the period 05-07 of April 2010, a stationary frontal system in the metropolitan area of Rio de Janeiro (RMRJ) caused heavy rainfall causing economic losses and loss of life. In the city of Niterói, in the area known as Morro do Bumba, they were officially registered 50 dead (ICICT- FIOCRUZ, 2010).

This study analyzes the combination of factors that led to the Slipping of Morro do Bumba, as geomorphology / local geology, the occupation of the garbage dump over 20 years and severe weather recorded in the period quoted simulations of Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS), Center data for Weather Forecast and Climate Studies (CPTEC), radar images of the Aeronautical Meteorology Network (REDEMET), rainfall data Alert River System, METAR data (REDEMET), the National Center Reanalysis of Environmental Prediction (NCEP) / National Center for Atmospheric Research (NCAR) Reanalysis and the Climate Forecast System Reanalysis (CSFR).

The synoptic analysis, using data from the reanalysis CSFR, showed a favorable environment for heavy rains, with a predominance of southerly winds at the surface and the presence of cold advection with flow in the south to north. The analysis also showed the existence of a trough in middle and high levels contributing to the severe weather condition in RMRJ.

The variable rate of precipitation and accumulated precipitation simulated with BRAMS, confirmed the results observed when compared to satellite images and radar. The model captured aspects of mesoscale associated with the wind and the specific humidity at low levels. It is believed that these variables associated with relief, contributed to the intensification of rainfall.

Although simulate shallow cloudiness for the event, the BRAMS showed a substantial improvement in overall precipitation changes in parameterization of microphysics and radiation.

Keywords: Morro do Bumba, frontal system, heavy rains, BRAMS

Rio de Janeiro

May 2016

ÍNDICE

RESUMO	viii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xv
LISTA DE SIGLAS.....	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1. DESASTRES NATURAIS	4
2.2. OCUPAÇÃO DAS ENCOSTAS	7
2.3. SISTEMAS ATMOSFÉRICOS QUE ORIGINAM FORTES CHUVAS	9
2.3.1. FRENTES FRIAS	9
2.3.2. SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA.....	11
2.3.3. PESQUISAS FEITAS SOBRE EVENTOS EXTREMOS E MODELAGEM NUMÉRICA	13
3. ÁREA DE ESTUDO	17
3.1. INSTALAÇÃO DO LIXÃO	20
3.2. COMUNICAÇÃO COM O ESPECIALISTA	23
4. DADOS E METODOLOGIA	27
4.1. DADOS	27
4.1.1. DADOS PLUVIOMÉTRICOS DO ALERTA RIO	27
4.1.2. IMAGENS DE SATÉLITE.....	27
4.1.3. IMAGENS DO RADAR DA AERONÁUTICA	27
4.1.4. DADOS DE METAR.....	28
4.1.5. DADOS DE REANÁLISE 1 DO NCEP/NCAR	28
4.1.6. DADOS DO CSFR.....	28
4.2. METODOLOGIA	29
4.3. MODELO BRAMS.....	31
4.3.1. PARAMETRIZAÇÕES DO BRAMS.....	33
4.3.1.1. Parametrisação Radiativa	33
4.3.1.2. Parametrisação Convectiva	34
4.3.1.3. Parametrisação de Microfísica de Nuvens	35
4.3.1.4. Outras Parametrisações do Modelo.....	35
4.4. Teste de Sensibilidade.....	36
5. RESULTADOS	37
5.1. DESCRIÇÃO DO ESCORREGAMENTO DO MORRO DO BUMBA.....	37

5.2.	ANÁLISE SINÓTICA UTILIZANDO DADOS DO CPTEC	41
5.3.	ANÁLISE SINÓTICA COM DADOS DO CSFR	53
5.4.	RADAR METEOROLÓGICO DO PICO DO COUTO (REDEMET).....	64
5.5.	RESULTADOS COM O BRAMS: O TESTE DE SENSIBILIDADE E O EXPERIMENTO ESCOLHIDO.	66
5.6.	VERIFICAÇÃO EM ESCALA SINÓTICA DOS RESULTADOS DO MODELO BRAMS COM DADOS DO CSFR	73
5.7.	RAZÃO DE MISTURA DE ÁGUA DE NUVEM EM 700 HPA	79
5.8.	RAZÃO DE MISTURA DE ÁGUA DE NUVEM EM 600 HPA	82
5.9.	IMAGENS DE RADAR E IMAGENS DO SATÉLITE GOES – 12 VERSUS TAXA DE PRECIPITAÇÃO DO BRAMS	84
5.10.	UMIDADE ESPECÍFICA E VENTO.....	97
5.11.	CONVERGÊNCIA DO FLUXO DE UMIDADE	100
5.12.	TOPOGRAFIA COM O VENTO À SUPERFÍCIE.....	102
6.	CONCLUSÕES.....	110
6.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição mensal dos desastres naturais no Brasil.....	2
Figura 2 - Tipos de desastres ocorridos no Brasil (1900 – 2006).....	5
Figura 3 - Distribuição das ocorrências de desastres naturais por região do Brasil	6
Figura 4 - Instabilidade de Encostas Urbanas e suas Consequências.....	8
Figura 5 - Divisão da América do Sul em bandas.....	11
Figura 6 - O (a) estágio cumulus, (b) estágio de maturação e o (c) estágio de dissipação de uma célula convectiva cumulonimbus	12
Figura 7 - Localização do Município de Niterói.....	17
Figura 8 - Regiões de Planejamento de Niterói.....	18
Figura 9 - Mapa dos Bairros de Niterói, com o bairro de Viçoso Jardim em destaque.....	18
Figura 10 - Local do deslizamento que atingiu o Morro do Bumba	19
Figura 11 - Mapa de suscetibilidade da área do Morro do Bumba.....	22
Figura 12 - Direção do movimento de massa no Morro do Bumba.....	23
Figura 13 - Presença de vidro e plástico no Morro do Bumba.....	24
Figura 14 - Parte do solo antrópico, palco do primeiro escorregamento no dia 05 de abril de 2010, no Morro do Bumba.....	25
Figura 15 - Morro do Bumba após o escorregamento no dia 07 de abril de 2010. Em destaque a rua principal da comunidade, onde várias pessoas foram soterradas e mortas.....	26
Figura 16 - Domínios das Grades utilizadas nas rodadas do BRAMS do presente trabalho, apresentando o campo da topografia utilizada pelo modelo: (a) Grade 1, (b) Grade 2 e (c) Grade 3.....	30
Figura 17 - As três fases de execução do BRAMS	32
Figura 18 - Fotos do Morro do Bumba em Niterói durante o evento de chuvas intensas nos dias 6 e 7 de abril de 2010. (a) Vista aérea do Morro do Bumba após o grande escorregamento de terra; (b) Rastro de lama deixado pela terra no Morro do Bumba; (c) Montanha de lama e terra que escorregou do Morro do Bumba; (d) Equipes de resgate tentam encontrar sobreviventes sob a terra no Morro do Bumba.....	38
Figura 19 - Dados da Defesa Civil sobre prejuízos na RMRJ, para o mês de abril de 2010.....	39
Figura 20 - Distribuição espacial do total pluviométrico, em mm, entre 12Z do dia 5 até 12 Z do dia 6 de abril de 2010 no município do Rio de Janeiro.....	40
Figura 21 - Informações extraídas do METAR das estações do Galeão (SBGL) e Santos Dumont (SBRJ) do período entre a noite de 04/04/2010 e a manhã de 06/04/2010. Em retângulos vermelhos estão ressaltadas as observações de tempo severo.....	41
Figura 22 - Cartas de Superfície para: (a) 00Z de 04/04/2010, (b) 00Z de 05/04/2010, (c) 00Z de 06/04/2010, (d) 00Z de 07/04/2010.....	43
Figura 23 - Cartas de Altitude de 250 hPa para: (a) 00Z de 04/04/2010, (b) 00Z de 05/04/2010, (c) 00Z de 06/04/2010, (d) 00Z de 07/04/2010.....	46
Figura 24 - Imagens do satélite GOES-12, no canal Infravermelho, realçadas, para: (a) 00Z de 05/04/2010, (b) 12Z de 05/04/2010, (c) 00Z de 06/04/2010, (d) 12Z de 06/04/2010, (e) 00Z de 07/04/2010, (f) 12Z de 06/04/2010, (g) 00Z de 07/04/2010 e (h) 12Z de 07/04/2010.....	49
Figura 25 – Campo de Divergência do Fluxo de Umidade para o período do evento: (a) 05/04/2010 – 00Z (b) 05/04/2010 - 12Z; (c) 06/04/2010 – 00Z; (d) 06/04/2010 – 12Z; (e) 07/04/2010 – 00Z; (f) 07/04/2010 – 12Z.....	54
Figura 26 – Campo de advecção de temperatura e vento em 1000 hPa para o período do evento: (a) 05/04/2010 – 00Z (b) 05/04/2010 - 12Z; (c) 06/04/2010 – 00Z; (d) 06/04/2010 – 12Z; (e) 07/04/2010 – 00Z; (f) 07/04/2010 – 12Z.....	56

Figura 27 - Campo de espessura 500/1000 hPa e PNMM para o período do evento: (a) 05/04/2010 – 00Z (b) 05/04/2010 - 12Z; (c) 06/04/2010 – 00Z; (d) 05/04/2010 – 12Z; (e) 07/04/2010 – 00Z; (f) 07/04/2010 – 12Z.	58
Figura 28 - Campo de MSL e vento (em linhas de corrente) em 500 hPa para o período do evento. (a) 05/04/2010 – 00Z, (b) 05/04/2010 - 12Z; (c) 06/04/2010 – 00Z; (d) 06/04/2010 – 12Z; (e) 07/04/2010 – 00Z; (f) 07/04/2010 – 12Z.....	60
Figura 29 - Campo de MSL e vento (em linhas de corrente) em 250 hPa para o período do evento. (a) 05/04/2010 – 00Z, (b) 05/04/2010 - 12Z; (c) 06/04/2010 – 00Z; (d) 06/04/2010 – 12Z; (e) 07/04/2010 – 00Z; (f) 06/04/2010 – 12Z.....	61
Figura 30 - Campo de vento em 250 hPa, destacando a corrente de jato (colorido) para o período do evento. (a) 04/04/2010 – 00Z, (b) 04/04/2010 - 12Z; (c) 05/04/2010 – 00Z; (d) 05/04/2010 – 12Z; (e) 06/04/2010 – 00Z; (f) 06/04/2010 – 12Z;(g) 07/04/2010 – 00Z; e (h) 07/04/2010 – 12Z.	63
Figura 31 - Imagens do radar do Pico do Couto para (a) dia 05/04 às 20:15Z, (b) dia 05/04 às 23:00Z e (c) dia 06/04 às 02:00Z, mostrando um sistema convectivo que provocou o escorregamento do Morro do Bumba.	65
Figura 32- Precipitação Acumulada no primeiro experimento com o BRAMS, simulada na grade 2, nos dias (a) 05/04/2010; (b) 06/04/2010; (c) 07/04/2010; (d) total em 72 horas.	67
Figura 33 - Precipitação Acumulada no primeiro experimento com o BRAMS, simulada na grade 3, nos dias (a) 05/04/2010; (b) 06/04/2010; (c) 07/04/2010; (d) total em 72 horas.	68
Figura 34 - Precipitação Acumulada no segundo experimento com o BRAMS, simulada na grade 2, nos dias (a) 05/04/2010; (b) 06/04/2010; (c) 07/04/2010; (d) total em 72 horas.	71
Figura 35 - Precipitação Acumulada no segundo experimento com o BRAMS, simulada na grade 3, nos dias (a) 05/04/2010; (b) 06/04/2010; (c) 07/04/2010; (d) total em 72 horas.	72
Figura 36 - Campo de vento a 1000 hPa para o período do evento. (a) 05/04/2010 – 12Z, (c) 06/04/2010 - 12Z; (e) 07/04/2010 – 00Z; (g) 07/04/2010 – 00Z; Campo de vento do BRAMS - Grade 1 (b) 05/04/2010 – 12Z; (d) 06/04/2010 – 12Z; (f) 07/04/2010 – 00Z; (h) 07/04/2010 – 12Z.	74
Figura 37 - Campo de vento (linhas de corrente) em 500 hPa para o período do evento. Para os dados do CSFR: (a) 06/04/2010 – 00Z, (c) 07/04/2010 - 00Z; e simulados pelo BRAMS na Grade 1 (b) 06/04/2010 – 00Z; (d) 07/04/2010 – 00Z.	76
Figura 38 - Campo de vento (linhas de corrente) em 250 hPa para o período do evento. Para os dados do CSFR: (a) 06/04/2010 – 00Z, (c) 07/04/2010 - 00Z; e simulados pelo BRAMS na Grade 1 (b) 06/04/2010 – 00Z, e (d) 07/04/2010 – 00Z.....	78
Figura 39 - Campo de razão de mistura da água de nuvem (g/Kg) simulada na Grade 1 do BRAMS no nível de 700 hPa para: (a) 03 Z do dia 05/04, (b) 09 Z do dia 05/04, (c) 12 Z do dia 05/04, (d) 18 Z do dia 05/04, (e) 03 Z do dia 06/04, (f) 09 Z do dia 06/04, (g) 12 Z do dia 06/04, (h) 21 Z do dia 06/04, (i) 03 Z do dia 07/04, (j) 06 Z do dia 07/04, (k) 12 Z do dia 07/04, (l) 15 Z do dia 07/04.	80
Figura 40 - Campo de razão de mistura da água de nuvem (g/Kg) simulada na Grade 1 do BRAMS no nível de 600hPa para: (a) 12 Z do dia 05/04, (b) 21 Z do dia 05/04, (c) 12 Z do dia 06/04, (d) 21 Z do dia 06/04, (e) 03 Z do dia 07/04, (f) 12 Z do dia 07/04.....	83
Figura 41 – Imagens de Radar da REDEMET – (a) 21 Z do dia 05/04, (d) 22 Z do dia 05/04, (g) 00 Z do dia 06/04, (j) 07 Z do dia 06/04, (m) 08 Z do dia 06/04; Taxa de Precipitação – Grade 2 – (b) 21 Z do dia 05/04, (e) 22 Z do dia 05/04, (h) 00 Z do dia 06/04, (k) 07 Z do dia 06/04, (n) 08 Z do dia 06/04; Taxa de Precipitação – Grade 3 – (c) 21 Z do dia 05/04, (f) 22 Z do dia 05/04, (i) 00 Z do dia 06/04, (l) 07 Z do dia 06/04, (o) 08 Z do dia 06/04.	86
Figura 42 – Imagem de Satélite GOES – 12 (a) 12Z do dia 06/04, (d) 18Z do dia 06/04, (g) 21Z do dia 06/04, (j) 03Z do dia 07/04; Taxa de Precipitação (Grade 2) (b) 12Z do dia 06/04, (e) 18Z	

do dia 06/04, (h) 18Z do dia 05/04, (k) 03Z do dia 07/04; Taxa de Precipitação (Grade 3) (c) 12Z do dia 06/04, (f) 18Z do dia 06/04, (i) 21Z do dia 06/04, (l) 03Z do dia 07/04.....	93
Figura 43 - Campos de umidade específica (g/kg - colorido) e vento (vetores) simulados na Grade 2 do BRAMS no nível de 1000 hPa para: (a) 18Z do dia 05/04, (b) 21Z do dia 05/04, (c) 18Z do dia 06/04, (d) 21Z do dia 06/04, (e) 00Z do dia 07/04, (f) 03Z do dia 07/04.	99
Figura 44 - Campo de convergência de umidade (g/Kg*s-1) simulada na Grade 2 do BRAMS, no nível de 1000 hPa para: (a) 18 Z do dia 05/04, (b) 21 Z do dia 05/04, (c) 18 Z do dia 06/04, (d) 21 Z do dia 06/04, (e) 00 Z do dia 07/04, e (f) 03 Z do dia 07/04.	101
Figura 45 – Relevo da Região Metropolitana do estado do Rio de Janeiro.	102
Figura 46 - Campo de Topografia com Vento à Superfície (m/s) simulado na Grade 2 para: (a) 12 Z do dia 05/04, (b) 18 Z do dia 05/04, (c) 21 Z do dia 05/04, (d) 00 Z do dia 06/04, (e) 06 Z do dia 06/04, (f) 12 Z do dia 06/04, (g) 18 Z do dia 06/04, (h) 21 Z do dia 06/04, (i) 00 Z do dia 07/04, (j) 03Z do dia 07/04 e (k) 18 Z do dia 07/04.....	106
Figura 47 - Campo de Topografia com Vento à Superfície (m/s) simulado na Grade 3 para: (a) 12 Z do dia 05/04, (b) 21 Z do dia 05/04, (c) 00 Z do dia 06/04, (d) 21 Z do dia 06/04, (e) 00 Z do dia 07/04, (f) 03 Z do dia 07/04, (g) 12 Z do dia 07/04, (h) 18 Z do dia 07/04.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das Configurações de Grades utilizadas.....	29
Tabela 2 – Parametrizações do BRAMS utilizadas no presente trabalho	36

LISTA DE SIGLAS

BRAMS	BRAZILIAN REGIONAL ATMOSPHERIC MODELING SYSTEM
CFSR	CLIMATE FORECAST SYSTEM REANALYSIS
CINDACTA	CENTRO INTEGRADO DE DEFESA AÉREA E CONTROLE DE TRÁFEGO AÉREO
CPTEC	CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS
DSA	DIVISÃO DE SATÉLITES AMBIENTAIS
GRADS	GRID ANALYSIS AND DISPLAY SYSTEM
GOES- 12	GEOSTATIONARY SATELLITE SERVER
INPE	INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
METAR	METEOROLOGICAL AERODROME REPORT
NCAR	NATIONAL CENTER OF ATMOSPHERIC RESEARCH
NCEP	NATIONAL CENTER FOR ENVIRONMENTAL PREDICTION
PNMM	PRESSÃO AO NÍVEL MÉDIO DO MAR
RAMS	REGIONAL ATMOSPHERIC MODELLING SYSTEM
REDEMET	REDE DE METEOROLOGIA DA AERONÁUTICA
RMRJ	REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO

1. INTRODUÇÃO

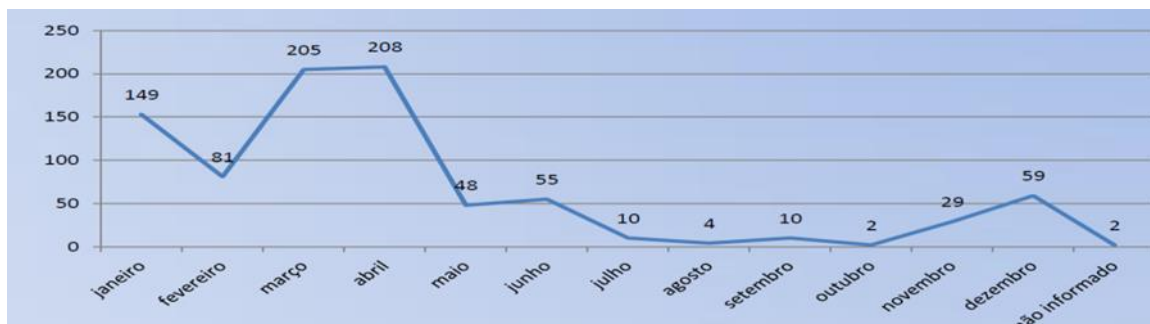
Atualmente, o conceito de desastre natural tem se tornado presente em nosso cotidiano. Eles podem ser provocados por fenômenos como tempestades fortes, escorregamentos, erosão, terremotos, tornados, furacões, entre outros. Além da intensidade desses fenômenos, o acelerado processo de urbanização verificado no último século, em grande parte do mundo, muitas vezes em áreas impróprias à ocupação de pessoas, tem aumentado as situações de perigo e de risco à população (AMARAL *et al.*, 2011).

Dentre os principais fatores que contribuem para desencadear estes desastres nas áreas urbanas destacam-se a impermeabilização do solo, o adensamento das construções, a ocupação das encostas, a ineficiência do processo de coleta de lixo, o acúmulo de calor à superfície e a poluição do ar. Enquanto que nas áreas rurais, destaca-se a compactação dos solos, o assoreamento dos rios, os desmatamentos e as queimadas (BRAZETTI *et al.*, 2006).

No Brasil, os impactos desses fenômenos têm sido tratados de forma segmentada entre os diversos setores da sociedade. Nos últimos anos vem ocorrendo uma intensificação dos prejuízos causados por estes fenômenos devido ao mau planejamento urbano. Ações integradas entre comunidades e universidades são fundamentais para que os impactos dos fenômenos naturais sejam minimizados. As universidades e os centros de pesquisas devem contribuir para a compreensão dos mecanismos de formação dos fenômenos, que causam os desastres naturais, com apoio de técnicas científicas de pesquisa, como por exemplo, a modelagem numérica. Estas informações devem ser repassadas aos tomadores de decisão que, de forma organizada, devem agir para mitigar os danos provocados pelos desastres. Em um contexto local, sugere-se a criação de grupos comunitários capacitados para agir antes, durante e depois do evento, auxiliando assim, os órgãos municipais de defesa civil (BRAZETTI *et al.*, 2006).

Em 2010, foram registrados no Brasil 862 desastres com reconhecimento da União. Observa-se na Figura 1 que em abril o número de ocorrências foi o mais elevado, com 208 registros. Os estados mais afetados por desastres naturais foram Santa Catarina, Rio de Janeiro, Piauí e Rio Grande do Sul totalizando cerca de 58% da ocorrência

nacional, os outros estados somaram aproximadamente 16% do total de ocorrências registradas em 2010 (ANUÁRIO BRASILEIRO de DESASTRES, 2010).



Fonte: Anuário Brasileiro de Desastres (2010)

Figura 1 - Distribuição mensal dos desastres naturais no Brasil.

O Estado do Rio de Janeiro é frequentemente afetado por tormentas meteorológicas que causam transtornos a seus habitantes, por conta de seu relevo acidentado e a ocupação desordenada do solo. Com o passar de anos e com o aprimoramento da tecnologia e da informação foi se tornando possível melhorar a qualidade dos dados e a previsão dessas tempestades. Por outro lado, áreas de risco, antes desabitadas passaram a ser ocupadas pela população mais carente, aumentando a vulnerabilidade da população aos eventos de chuvas intensas, principalmente na estação de verão. No final do verão e começo do outono, apesar de já ter terminado a estação chuvosa, a região está com o solo saturado e conseqüentemente mais vulnerável a escorregamento (COSTA e HACKROTT, 2010).

A chuva associada a este evento provocou escorregamentos que acometeram 50 mortes em Niterói e 66 na cidade do Rio de Janeiro, deixando 3262 desabrigados e 11439 desalojados (ICICT-FIOCRUZ, 2010). A chuva intensa causou também enchentes, quedas de árvores, corte na transmissão de energia elétrica, paralisando a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) nos dias 06 e 07 de abril de 2010.

As 50 mortes registradas em Niterói ocorreram no bairro Viçoso Jardim na localidade conhecida como Morro do Bumba. A área densamente habitada fora um vazadouro de lixo do município de Niterói, instalado em 1971 e desativado em 1986. Com a instalação do “lixão” inicia-se um processo de migração na região, tanto interna (dos moradores que ali residiam), quanto externa (pessoas que foram atraídas para o local). A migração externa se deu principalmente para o uso do mesmo (ferro velho e catadores), iniciando assim a ocupação do solo da área (LOGUERCIO, 2013).

O objetivo principal do presente trabalho é analisar o ambiente sinótico e de mesoescala que gerou o evento conhecido como “Escorregamento do Morro do Bumba”, utilizando o *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS). Como objetivos específicos:

- a) Avaliar se um modelo meteorológico de mesoescala como o BRAMS, realizando rodadas/previsões em alta resolução, poderia ter sido uma ferramenta útil/importante de auxílio à previsão das chuvas associadas ao evento em questão, caso este estivesse sendo rodado operacionalmente com essas configurações (alta resolução, e parametrizações físicas sofisticadas ativadas).
- b) Avaliar que vantagens um modelo de mesoescala, rodando em alta resolução, pode contribuir para o entendimento de fenômenos dessa escala, e de que forma poderia servir de ferramenta de auxílio à previsão.
- c) Identificar os mecanismos e/ou circulações que contribuíram para a persistência da precipitação no local de estudo.
- d) Avaliar como a precipitação e uso do solo no Morro do Bumba contribuíram para o evento.

Uma breve revisão da literatura sobre desastres naturais, ocupação de encostas, sistemas que causam eventos severos no sudeste do Brasil é abordada no Capítulo 2. No Capítulo 3 apresenta uma descrição sobre a área de estudo. O Capítulo 4 apresenta os dados e a metodologia usada no trabalho. No Capítulo 5 constam os resultados propriamente ditos e as discussões pertinentes. O Capítulo 6 aborda as conclusões e as considerações finais e o Capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas utilizadas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. DESASTRES NATURAIS

Segundo AMARAL *et al.* (2009) quando os fenômenos naturais atingem áreas ou regiões habitadas pelo homem, causando-lhe danos, passam a se chamar desastres naturais. O conceito mais consagrado é o da UN-ISDR (2009) que considera desastre como uma grave perturbação do funcionamento de uma comunidade ou de uma sociedade envolvendo perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais de grande extensão, cujos impactos excedem a capacidade da comunidade ou da sociedade afetada de arcar com seus próprios recursos.

A *Emergency Disasters Data Base* (EM – DAT) considera como desastre natural a ocorrência de pelo menos um dos seguintes critérios (Scheuren, *et. al.* 2008):

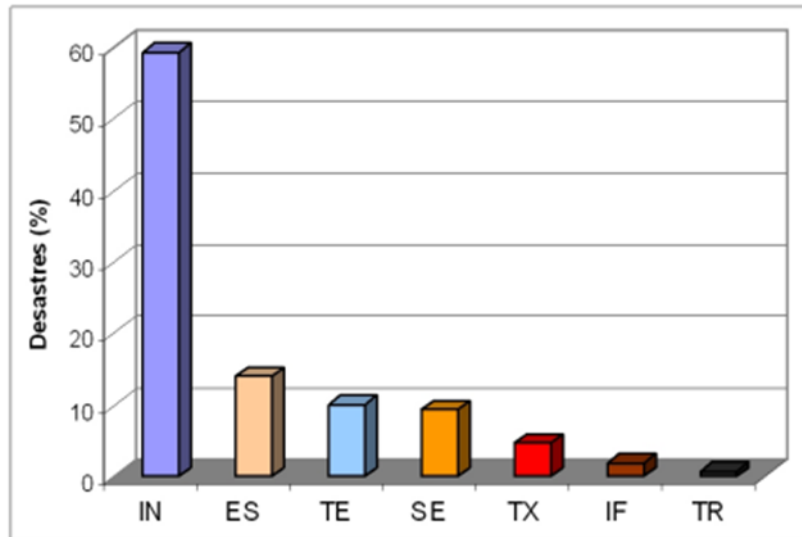
- 10 ou mais óbitos;
- 100 ou mais pessoas afetadas;
- Declaração de estado de emergência;
- Pedido de auxílio internacional.

Os desastres naturais podem ocorrer em qualquer continente ou país, visto que os fenômenos naturais que o desencadeiam, como as tempestades, os terremotos e os vulcões existem em diversas partes do globo. Entretanto, algumas regiões são mais afetadas em função da magnitude e frequência dos fenômenos e da vulnerabilidade do sistema social.

No Brasil, o conceito de desastre natural é tratado como “resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema, causando danos humanos, materiais e/ou ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais. A intensidade de um desastre depende da interação entre a magnitude do evento e o grau de vulnerabilidade do sistema afetado” (CASTRO, 2003; AMARAL *et al.*, 2009).

Apesar das inundações serem os processos que produzem as maiores perdas econômicas e os impactos mais significativos na saúde pública, são os escorregamentos que ocasionam o maior número de vítimas fatais. Este fato justifica a concepção e implantação de políticas públicas municipais específicas para a gestão de risco de escorregamento em encostas (CARVALHO e GALVÃO, 2006).

AMARAL *et al.* (2009) ressalta que os tipos de desastres mais frequentes no Brasil foram as inundações, que representam cerca de 59% dos registros, seguidas por escorregamentos (14%). Grande parte dos desastres no país (mais de 80%) está associada às instabilidades atmosféricas que são responsáveis pelo desencadeamento de inundações, vendavais, tornados, escorregamentos, entre outros (Figura 2).

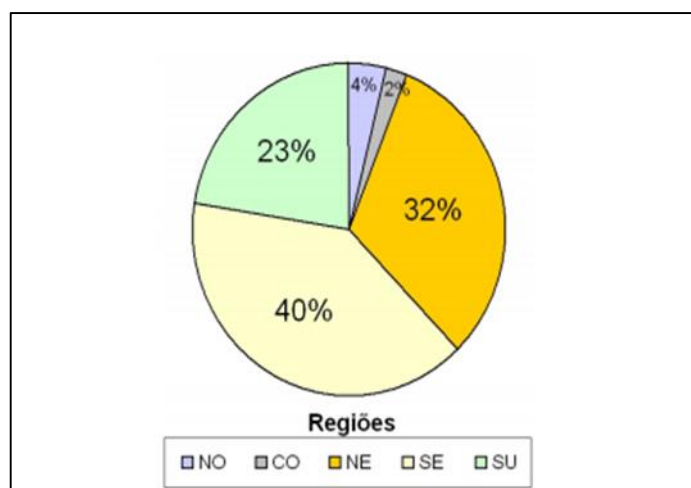


Fonte: Marcelino (2008)

Legenda: IN – Inundação, ES – Escorregamento, TE – Tempestades, SE – Seca, TX – Temperatura Extrema, IF – Incêndio Florestal, TR – Terremoto.

Figura 2 - Tipos de desastres ocorridos no Brasil (1900 – 2006).

Com relação à distribuição espacial, mais de 60% dos casos de desastres ocorreram nas regiões Sudeste e Sul (Figura 3). No Brasil, essa distribuição está associada às características geoambientais mais do que as socioeconômicas das regiões afetadas (MARCELINO, 2008).



Fonte: Marcelino (2008)

Legenda: NO – Norte, CO – Centro Oeste, NE – Nordeste, SE – Sudeste, SU – Sul.

Figura 3 - Distribuição das ocorrências de desastres naturais por região do Brasil

Seguindo a tendência mundial, constata-se também no Brasil um crescimento significativo das ocorrências de desastres naturais a partir de 1960, uma vez que do total de 289 ocorrências registradas pelo EM-DAT, no período de 1900 a 2009 (até o 1º trimestre de 2009), em torno de 70% são posteriores a 1960. Entretanto, os dados do EM-DAT para o Brasil estão longe da realidade, que apontaram discrepâncias nestes dados (MARCELINO *et al.*, 2006). Este aumento na incidência de desastres naturais é considerado por diversos autores como consequência do intenso processo de urbanização verificado no país nas últimas décadas, que levou ao crescimento desordenado das cidades em áreas impróprias à ocupação, devido às suas características geológicas e geomorfológicas desfavoráveis. Quando há um adensamento destas áreas por moradias precárias, os desastres associados aos escorregamentos e inundações assumem proporções catastróficas causando grandes perdas econômicas e sociais (CARVALHO e GALVÃO, 2006; AMARAL *et al.*, 2009).

No estado do Rio de Janeiro, no ano de 2010, segundo o ICICT – Fiocruz (2010), o mês de abril concentrou os maiores números de eventos extremos. Destaca-se o mês de abril, quando ocorreu o Escorregamento do Morro do Bumba, sendo 11.240 desabrigados e cerca de 240 mortos, em todo o estado do Rio de Janeiro.

2.2. OCUPAÇÃO DAS ENCOSTAS

Um dos problemas da atualidade nas metrópoles é o crescimento populacional desordenado e o elevado número de pessoas vivendo em favelas, o que gera impactos significativos para o meio ambiente. De acordo com dados da Organização das Nações Unidas (ONU) (2004), um sexto da população mundial vive em assentamentos informais (ou favelas), ou seja, aproximadamente 924 milhões de habitantes vivem em condições de pobreza (VALLE, 2009).

A ocupação de encostas em áreas de expansão urbana no Brasil resulta em grande parte do processo migratório rumo aos grandes centros urbanos que, por consequência, intensifica o direcionamento dos egressos para as áreas desvalorizadas nos centros das cidades ou periferias de expansão do crescimento horizontal. Estas são marcadas pela exclusão sócio espacial que lhes é característica. Há outros fatores que aumentam ainda mais a frequência dos escorregamentos: a ocupação das encostas por assentamentos precários, favelas, vilas e loteamentos irregulares. A remoção da vegetação, a execução de cortes e aterros instáveis para construção de moradias e vias de acesso, a deposição de lixo nas encostas, a ausência de sistemas de drenagem de águas pluviais e coleta de esgotos, a elevada densidade populacional e a fragilidade das moradias aumentam tanto a frequência das ocorrências como a magnitude dos acidentes (CARVALHO e GALVÃO, 2006).

A necessidade de apropriação de espaço para a moradia, em concomitância à carência de recursos financeiros, leva os recém chegados à cidade para áreas inadequadas à ocupação, sobressaindo-se como locais preferenciais as várzeas de rios e as encostas, o que agrava o risco potencial de instabilidade à dinâmica de tais ambientes a partir da alteração nas características originais das formas e processos dos sistemas de superfície terrestre em questão (CARVALHO e GALVÃO, 2006). É nas áreas urbanas que a ocupação e a concentração humana ocorrem de forma intensa e muitas vezes desordenada. Esses locais são alvos de frequentes desmatamentos, escorregamento, erosão, assoreamento dos canais fluviais, dentre outros problemas relacionados às transformações antrópicas (GUERRA e GONÇALVES, 2001).

A ocupação irregular de espaços vazios de morros, margens de rios e áreas alagadiças torna-se um grave problema em épocas de chuvas torrenciais, que podem provocar episódios de deslizamento e alagamento. Nesses períodos, ocorrem perdas humanas e materiais devido à falta de um planejamento urbano principalmente voltado às classes populares de baixa renda (VALLE, 2009). No caso de encostas ocupadas irregularmente, por exemplo, uma vez ocorrido um deslizamento de terra, seus desdobramentos podem afetar os locais situados a jusante do morro afetado, gerando mortes, problemas de drenagem no entorno da comunidade, doenças de veiculação hídrica, além de prejuízos aos cofres públicos (VALLE, 2009). Todavia, a apropriação de novos espaços, e mesmo a expansão de espaços já ocupados, através de diversas intervenções que o homem realiza no ambiente urbano, tais como: desmatamentos, cortes de talude, aterros, concentrações de águas superficiais, vibrações etc., caracteriza-se como o fator que atua de forma mais extensa e intensa na desestabilização de terrenos de topografia inclinada nas cidades (CARVALHO e GALVÃO, 2006).

Na Figura 4 estão listadas as principais causas e possíveis consequências da intervenção antrópica sobre as encostas urbanas.

Causas Antrópicas	Consequências
Retirada da Cobertura Vegetal e conseqüente exposição dos solos; Concentração de Águas Pluviais e Lançamento de Águas Servidas; Execução Inadequada de Aterro.	Processos Erosivos
Retirada da Cobertura Vegetal e conseqüente exposição dos solos; Concentração de Águas Pluviais e Lançamento de Águas Servidas; Vazamentos na rede de Abastecimento de Água, de Esgotos e de Fossas Sanitárias; Declividade e Altura Excessivas de Cortes; Execução Inadequada de Aterros; Disposição de Lixo.	Movimentos de Massa

Fonte: adaptado de CARVALHO e GALVÃO, 2006

Figura 4 - Instabilidade de Encostas Urbanas e suas Consequências.

2.3. SISTEMAS ATMOSFÉRICOS QUE ORIGINAM FORTES CHUVAS

Segundo CANDIDO *et al.* (2009) a chuva é o principal tipo de precipitação que ocorre na região Sudeste, reflexo de sua posição quase que totalmente intertropical. A distribuição da pluviosidade é fortemente influenciada pela paisagem e pela dinâmica dos sistemas atmosféricos que atuam na área. A variabilidade inter e intra anual e a espacial estão entre as características mais marcantes do ritmo pluvial. A distribuição espacial da pluviosidade é fortemente controlada pela disposição do relevo e pela atuação dos sistemas frontais.

Nos últimos anos, a comunidade acadêmica e científica adquiriu um maior conhecimento sobre fenômenos envolvendo a precipitação. Essa variável, que desencadeia desastres naturais, contribuiu para o aprimoramento da previsão de chuvas moderadas/forte. (DA SILVA, 2014).

A maioria dos estudos sobre tempestades severas envolve as latitudes médias, onde o cisalhamento vertical do vento atinge valores que possibilitam a formação dessas tempestades. Entretanto, diversos estudos sobre tempestades severas em latitudes baixas também já foram realizados, visto que essas tempestades desempenham um papel muito importante no regime pluviométrico nas latitudes tropicais, particularmente nas regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil (VIANELLO e ALVES, 1991).

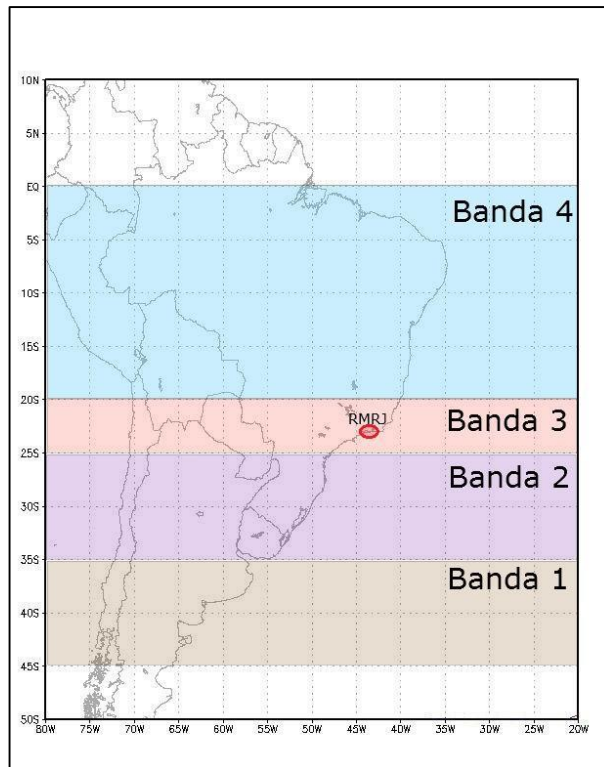
TEIXEIRA e SATYAMURTY (2004) analisaram como uma das consequências mais drásticas da ocorrência de chuvas intensas, as inundações, que podem ser agravadas por fenômenos como ventos fortes e granizo. Os sistemas frontais atuam durante todo o ano no Brasil e afetam mais significativamente as Regiões Sul e Sudeste, e são os responsáveis pelas chuvas intensas e pelo frio (SATYAMURTY *et al.*, 1998).

2.3.1. FRENTE FRIAS

Quando duas massas de ar de densidades diferentes tornam-se vizinhas, tendem a se manter individualizadas. Há entre elas uma camada de transição, normalmente com vários quilômetros de espessura, onde se verifica a mistura. Essa camada é conhecida como superfície frontal. Os seguintes critérios são usados para localizar uma frente fria em uma carta de superfície: i) Forte mudança de temperatura em uma distância relativamente curta; ii) Variações no conteúdo de umidade; iii) Variações na direção do vento e iv) presença de nuvens e precipitação.

As frentes frias afetam o tempo sobre a América do Sul durante todo o ano. Elas são facilmente identificadas em imagens de satélite e geralmente se deslocam de sudoeste para nordeste sobre o continente e oceano Atlântico adjacente (CAVALCANTI e KOUSKY, 2009). Os primeiros estudos sobre a climatologia dos sistemas frontais incluem o trabalho de TALJAARD (1972) que analisou a distribuição desses sistemas em superfície durante o ano de 1958. Nota-se que nos resultados encontrados pelo autor, na América do Sul há uma maior ocorrência de frentes frias sobre o Sul e Sudeste do país no inverno, quando comparado com as outras estações do ano.

OLIVEIRA (1986) analisou durante 10 anos (1975 – 1984) a atuação dos sistemas frontais na América do Sul. A autora dividiu a América do Sul em 4 bandas latitudinais (Figura 5), mostrando que os períodos da primavera e do inverno são os que têm maior frequência de frentes frias, na banda que compreende o estado do Rio de Janeiro, latitudes entre 25°S e 20°S, com a média de ocorrência desses sistemas, no período citado de 4,3 casos por mês na primavera e 4 casos no inverno. Além disso, a autora verificou que nos meses de verão ocorre baixa ocorrência das frentes frias durante o período de verão, tendo 3 casos por mês, em média. ANDRADE (2007) encontrou discrepâncias em relação ao estudo de OLIVEIRA (1986), no período de 1980 e 2002.



Fonte: Oliveira (1986)

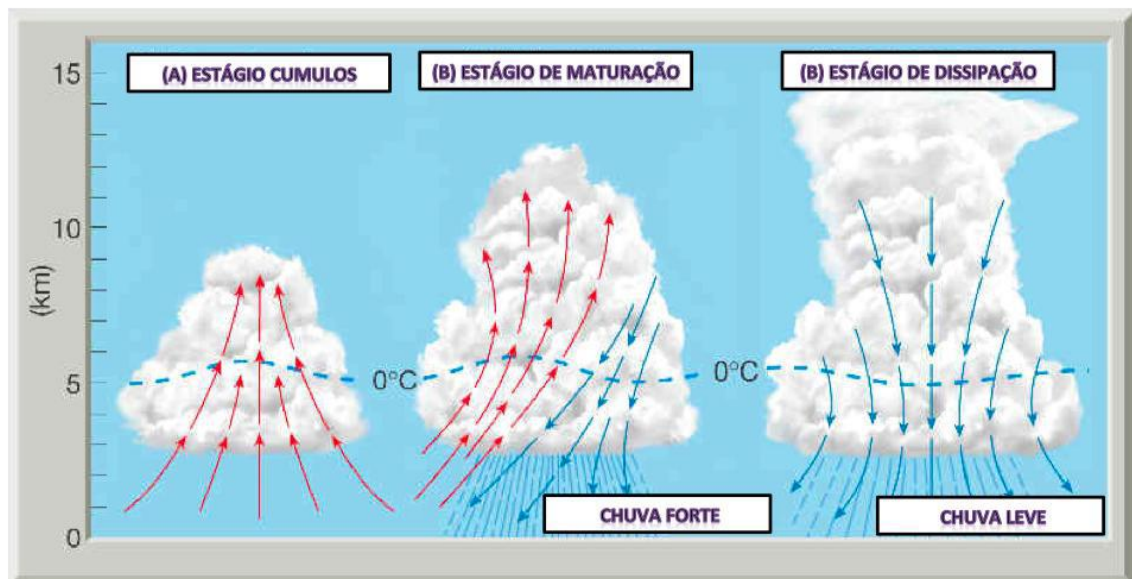
Figura 5 - Divisão da América do Sul em bandas.

NIMER (1989) afirma que apesar de sua notável diversificação climática, o sudeste do Brasil constitui uma unidade climatológica pelo fato de que a região está sob a zona onde mais frequentemente se interagem a alta subtropical do Atlântico Sul e as altas migratórias. Interferindo sob o fator regional, o relevo determina a variabilidade climática, tanto no que se refere à temperatura quanto à precipitação.

2.3.2. SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA

Estudos têm mostrado que células convectivas (nuvens cumulonimbus) observadas por radar frequentemente desenvolvem-se em padrões repetitivos e, com base nessas características, modelos conceituais têm sido propostos para os tipos mais comuns de tempestades observadas por exemplo, o modelo de células convectivas de vida curta (BYERS e BRAHAM, 1949), o modelo de tempestade em multicélulas (MARWITZ, 1972, NEWTON e FRANKHAUSER, 1975), e o modelo para tempestades em supercélulas (BROWNING, 1964; LEMON e DOSWELL, 1979).

COTTON e ANTHES (1989) e BYERS e BRAHAM (1949) identificaram três estágios de evolução de uma nuvem Cumulonimbus ou tempestade convectiva (Figura 6): o estágio cumulus, o estágio de maturação e o estágio dissipativo.



Fonte: Da Silva (2014)

Figura 6 - O (a) estágio cumulus, (b) estágio de maturação e o (c) estágio de dissipação de uma célula convectiva cumulonimbus.

As fases de evolução de uma nuvem cumulonimbus são descritas a seguir.

- **Estágio cumulus:** caracterizado por convergência de umidade em níveis baixos e fortes movimentos ascendentes.
- **Estágio de maturação:** há movimentos ascendentes em toda troposfera e há divergência próxima à tropopausa, resultando topo em forma de bigorna. A liberação de calor latente favorece os movimentos ascendentes dentro da nuvem. O processo de evaporação de gotas de água dentro da nuvem promove o resfriamento e, conseqüentemente, movimentos descendentes que tomam a forma de frente de rajada. O início dessa fase acontece quando as gotas e os meteoros da nuvem atingem a superfície.
 - **Estágio de dissipação:** caracterizado por movimentos descendentes em todos os níveis. Próximo ao solo há divergência e o resfriamento evaporativo do ar alimenta a frente de rajada.

WEISMAN e KLEMP (1986) definiram a tempestade em célula individual como o sistema convectivo mais básico. O estágio de desenvolvimento consiste em uma corrente de ar ascendente que rapidamente alcança a alta troposfera e produz uma grande quantidade de água líquida e gelo. Quando as gotas de chuva ou as partículas de gelo tornam-se muito pesadas para serem suportadas pela corrente ascendente, elas começam

a precipitar, criando uma corrente de ar descendente, dando início ao estágio de maturação. Quando a corrente descendente se torna predominante, a célula entra no estágio de dissipação. O ciclo de desenvolvimento dura 1 hora e podem ocorrer rajadas de vento e granizo.

A tempestade em multicélulas consiste em um aglomerado de células convectivas, no qual as correntes descendentes de ar frio proveniente dessas células se combinam formando uma grande frente de rajada, promovendo áreas de convergência ao longo da margem principal, sendo geralmente mais forte na direção do movimento da tempestade e dando origem a novas células, muitas vezes em sua dianteira (WEISMAN e KLEMP, 1986).

As tempestades em multicélulas são o tipo mais perigoso e destrutivo de tempestades, produzem grande quantidade de granizo, intensos ventos e possivelmente tornados de vida longa, sobre uma grande área. A supercélula consiste de uma corrente de ar ascendente simples, quase estacionária e com rotação, sua duração pode ser de várias horas enquanto propaga-se continuamente para a direita (no Hemisfério Norte.), ou ocasionalmente à esquerda, do vento médio. As supercélulas ocasionalmente desenvolvem-se a partir de sistemas de tempestades em multicélulas (WEISMAN e KLEMP, 1986).

2.3.3. PESQUISAS FEITAS SOBRE EVENTOS EXTREMOS E MODELAGEM NUMÉRICA

MENEZES (1998) utilizou o modelo *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS) para simular um caso de linha de instabilidade que se deslocou sobre a cidade de Itu, estado de São Paulo, alcançando um sistema frontal que já havia passado sobre a região. Aparentemente a linha de instabilidade gerou uma repentina intensificação da convecção sobre o local, provocando a ocorrência de forte tempestade. Ainda em MENEZES (1998) foi simulado o caso de uma supercélula que atingiu a cidade de Ribeirão Preto, em São Paulo. A situação sinótica, em termos termodinâmicos e dinâmicos, favoreceu a amplificação da convecção local. Os prejuízos materiais foram calculados em torno de 11 milhões de dólares, 130 pessoas ficaram feridas e houve três mortes. MENEZES (1998), MENEZES e SILVA DIAS (1998), utilizaram o modelo RAMS para avaliar o tipo de ambiente associado à formação e evolução de alguns casos de tempestades no estado de São Paulo, sejam na forma de linhas de instabilidade ou na forma de tempestade isolada do tipo supercélula. Visando diagnosticar a influência de

certos fatores na simulação dos casos estudados e, tentar descobrir os motivos para as características observadas na simulação, os autores realizaram diversos testes de sensibilidade como: influência da topografia, das parametrizações de microfísica e de convecção, o papel da assimilação de dados nas simulações, assim como da inclusão de grades de maior resolução. Estes experimentos mostraram que a interação entre a forçante sinótica, a topografia e a situação ambiente em mesoescala existente na condição inicial foram fundamentais para explicar o desenvolvimento da tempestade. A possibilidade de utilização de grades de alta resolução de forma interativa com a intervenção do previsor foi apontada como uma possibilidade extremamente vantajosa do ponto de vista da solução do problema físico. Os testes mostraram dependência de grande capacidade de processamento, havendo a necessidade de utilização de máquinas multi processadas e códigos adaptados para redução do tempo de processamento e viabilização da utilização operacional das grades aninhadas com alta resolução.

No trabalho de MENEZES *et al.* (2000) analisou-se quatro casos de chuvas intensas ocorridas no verão de 2000 no estado do Rio de Janeiro, sendo que duas delas conseguiram se propagar e atingir o município do Rio e as outras duas decaíram antes de atingi-lo. Para diagnosticar tais eventos, foram analisadas imagens do satélite GOES-8 e do radar da Rede de Meteorologia da Aeronáutica (REDEMET), localizado no Pico do Couto (RJ). As análises e previsões do modelo regional ETA/Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e as sondagens do aeroporto do Galeão mostraram que linhas de instabilidade associadas à forte instabilidade termodinâmica presente no dia do evento foram os sistemas atmosféricos responsáveis pela ocorrência de chuvas intensas no município do Rio.

MENEZES E SILVA DIAS (2004) realizaram simulações numéricas de alta resolução com o modelo RAMS, buscando um tratamento mais refinado das trocas de energia na atmosfera, em especial a liberação de calor latente, para o “Caso Catarina”. Este trabalho, nas palavras dos autores, apresentou o ganho da qualidade e quantidade de informações relevantes que o modelo de mesoescala RAMS obteve na simulação numérica do evento, em relação aos modelos globais e regionais que se encontram operacionalizados no país, e que tiveram problemas sérios em prever o fenômeno de forma adequada.

MOURÃO E MENEZES (2006) analisaram dois casos de tempestades com valores significativos de pluviosidade e ventos fortes que atingiram o Rio de Janeiro nos dias 31/01/2000 e 21/03/2003. Os autores utilizaram para estudar o comportamento das tempestades alguns índices da instabilidade (K, TT, Gradiente Vertical da Temperatura e CK) sobre a região do Estado do Rio de Janeiro simulado pelo RAMS. De acordo com MOURÃO E MENEZES (2006) os resultados mostraram-se semelhantes entre valores quantitativos dos índices simulados e os lugares de desenvolvimento de tempestades convectivas. Ainda de acordo com os autores, a compreensão do comportamento dos índices pode ajudar muito na previsão do tempo de eventos de pequena escala.

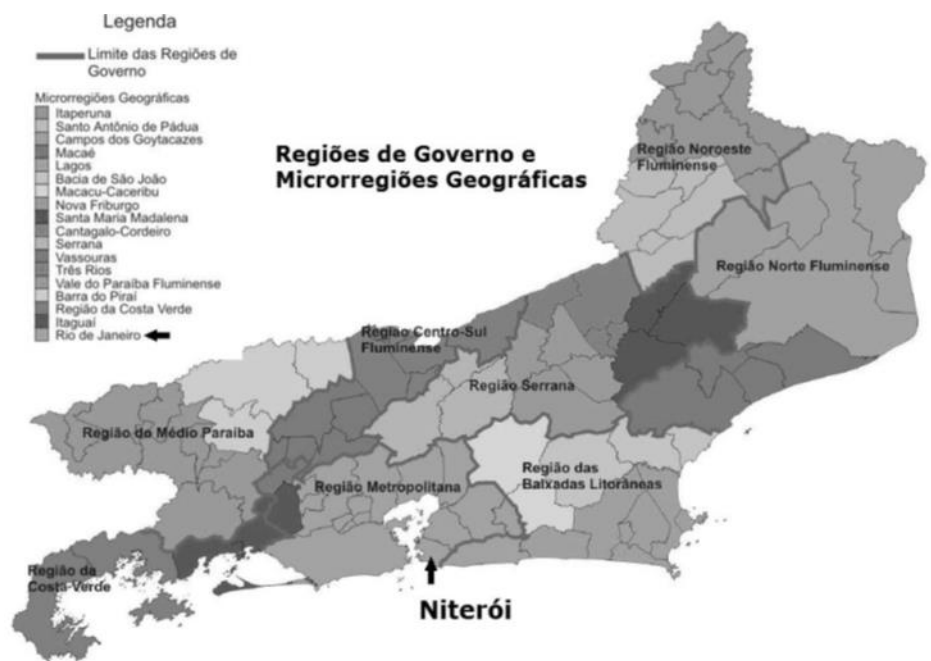
ALONSO E SARAIVA (2007), fazendo uso do BRAMS, compararam os resultados obtidos com os esquemas de parametrização de cumulus de Kuo (KUO, 1974; MOLINARI, 1985) e Grell (GRELL E DEVÉNYÉ, 2002) na simulação de um caso de tempestades severas ocorrido na Região Sul do Brasil. A validação das previsões da precipitação focou-se na comparação de dois aspectos: intensidade e cobertura de área. Também foi analisada a simulação de parâmetros convectivos úteis no auxílio à identificação de ambientes atmosféricos favoráveis a convecção severa. O esquema de Kuo representou melhor a cobertura de área da precipitação, porém subestimou a sua intensidade. Concluiu-se que a melhor opção naquele caso foi a parametrização de Grell, que simulou mais fielmente a intensidade da chuva. Ambos os esquemas simularam os parâmetros convectivos com boa aproximação, com ênfase na parametrização de Grell. Em linhas gerais, os autores também atestaram que o modelo de mesoescala se mostrou uma ferramenta útil na identificação de ambientes atmosféricos favoráveis para o desenvolvimento de tempestades convectivas severas.

MOURA e ESCOBAR (2011) estudaram eventos de chuva intensa na cidade do Rio de Janeiro. Foram encontrados 149 eventos de chuva intensa, com base no banco de dados diários de precipitação da Fundação GeoRio, no período de 1997 até 2010. Os autores analisaram campos de pressão à superfície associados aos eventos de chuva intensa no Rio de Janeiro, usando dados de pressão ao nível médio do mar (PNMM), provenientes do *National Center of Environmental Prediction* (NCEP) e *National Center of Atmospheric Research* (NCAR). Verificou-se que o avanço de frentes frias sobre o estado do Rio de Janeiro está associado à ocorrência de casos de chuvas intensas encontrados no período estudado.

BENDER e FREITAS (2012) analisaram imagens de satélite do canal infravermelho, para casos de linhas de instabilidade que cruzaram a Região Metropolitana de São Paulo entre 2002 e 2009. Os autores encontraram 185 linhas no período analisado e verificaram que apesar de ocorrerem durante todo o ano, possuem maior frequência nos meses de verão, devido à maior atividade convectiva desta estação. As 185 linhas de instabilidade encontradas no período foram classificadas quanto ao sistema atuante da seguinte maneira: pré-frontal (13 casos) quando ocorrem anteriormente à passagem de sistemas frontais; associadas a sistemas frontais ou Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (160 casos), casos em que a própria banda frontal forma a linha de instabilidade ou quando esta se encontra no oceano, porém, com a formação da linha de instabilidade na parte continental, utilizando-se do escoamento de calor e umidade à frente ou de casos embebidos em ZCAS e sistemas isolados (12 casos), quando as linhas são geradas por aquecimento diurno e/ou interação com a brisa marítima. Sendo assim, os autores verificaram que os sistemas de grande escala originaram 94% das linhas de instabilidade encontradas.

3. ÁREA DE ESTUDO

O Município de Niterói está situado na “Região Metropolitana” de Governo e na Microrregião Geográfica “Rio de Janeiro”, conforme a Figura 7.



Fonte: Loguercio (2013)

Figura 7 - Localização do Município de Niterói.

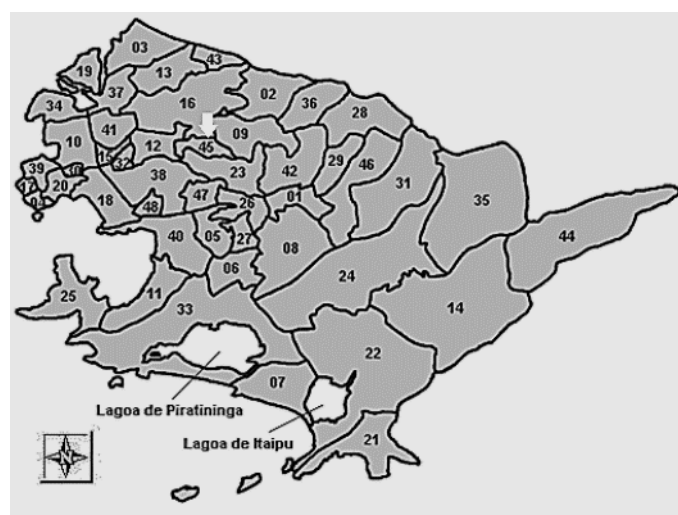
A divisão do município em 5 regiões de planejamento (Praias da Baía, Norte, Pendotiba, Oceânica e Leste) foi criada através do artigo 108, conforme Figura 8, uma das diretrizes do Plano Diretor de Niterói de 1992 (Lei N° 1157 de 29 de dezembro) (PMN, 1996). Desde então, fazem parte da Região Norte, além do Viçoso Jardim e do Cubango, os bairros Ilha da Conceição, Barreto, Santana, São Lourenço, Engenhoca, Fonseca, Tenente Jardim, Baldeador, Caramujo e Santa Bárbara. Os critérios utilizados foram homogeneidade em relação à paisagem, à tipologia, ao uso das edificações e ao parcelamento do solo, considerados, ainda, os aspectos socioeconômicos e físicos, em especial as bacias hidrográficas (PMN, 1992 *apud* LOGUERCIO, 2013).



Fonte: Loguercio (2013)

Figura 8 - Regiões de Planejamento de Niterói

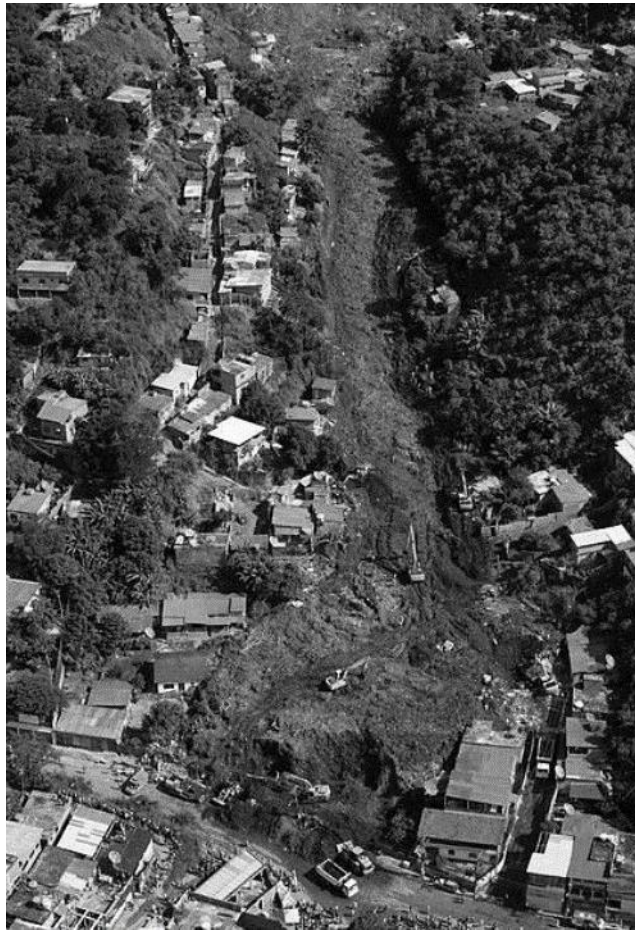
Segundo LOGUERCIO (2013), o bairro Viçoso Jardim (Figura 9), localizado na região norte do Município de Niterói-RJ (geográfica e de planejamento), distante do centro em torno de 6 km e constitui-se como tal somente em 1986, quando é desmembrado do bairro do Cubango.



Fonte: Loguercio (2013)

Figura 9 - Mapa dos Bairros de Niterói, com o bairro de Viçoso Jardim em destaque.

O deslizamento ocorrido no Morro do Bumba vitimou 50 pessoas (ICICT-Fiocruz, 2010) e teve como principal característica a ruptura de um material composto por solo e lixo acumulado ao longo de dezenas de anos (Figura 10). Além deste evento do Morro do Bumba, ocorreram na cidade de Niterói vários escorregamentos planares e rotacionais de menor porte, que geraram danos a residências, estradas e equipamentos públicos. A maioria estava relacionada a cortes de estrada ou para implantação de edificações, com rupturas geradas devido à redução da sucção do solo por consequência das chuvas intensas. Cabe ressaltar, que em Niterói não houve registro de valores de precipitação, uma vez que não havia estação pluviométrica em funcionamento no município (D'ORSI *et al.*, 2011).



Fonte: Loguercio (2013)

Figura 10 - Local do deslizamento que atingiu o Morro do Bumba

3.1. INSTALAÇÃO DO LIXÃO

O primeiro vazadouro de lixo de Niterói, de que se tem notícia, existiu até o início das obras de instalação do Porto da cidade, na Enseada de São Lourenço, por volta de 1924. No entanto, dessa época até o ano de 1971, quando o principal vazadouro da cidade passa a ser o do Viçoso Jardim (LOGUERCIO, 2013).

Na década de 1960 iniciou-se um processo de ocupação mais intensa no local, e o Morro do Bumba, na época um terreno baldio, passou a ser usado como a lixeira de Niterói. Com o tempo a quantidade de lixo jogada no local ganhou proporções gigantescas, transformando-se no grande vazadouro de lixo da cidade. Teve origem então, no início da década de 1970, mais especificamente em 1971, o Lixão do Morro do Bumba, que recebeu centenas de milhares de toneladas de lixo até ser desativado, em meados da década de 1980 (LOGUERCIO, 2013).

Com a instalação do lixão inicia-se um processo de migração na região, tanto interna, dos moradores que ali residiam, quanto externa, de pessoas atraídas ao local. Inicia-se, assim, a “favelização” da área. Vale ressaltar que não houve qualquer tipo de preparação do terreno para receber os resíduos, sendo dispostos diretamente no solo (LOGUERCIO, 2013). Segundo SISINNO (2002), de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os resíduos sólidos são os que estão em estado sólido ou semissólido e de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços, de varrição e os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água. Os resíduos sólidos urbanos ainda podem conter numerosas espécies químicas consideradas perigosas para a saúde humana e ambiental (por exemplo, amostras de chorume de lixo urbano, relacionaram mais de 100 espécies químicas dentre as quais arsênio, tetracloreto de carbono, mercúrio, chumbo etc.). Os metais também aparecem no ambiente, muitas vezes graças à incorreta disposição dos lixos urbanos no solo.

Com relação à contaminação do solo e, principalmente, ao perigo correspondente à disposição de resíduos da forma como ocorreu no Morro do Bumba, as áreas utilizadas para o despejo de resíduos, mesmo depois de desativadas, terão seu uso futuro comprometido devido às muitas consequências da disposição imprópria de toneladas de resíduos durante anos. Muitas destas substâncias podem ser corrosivas para alguns materiais de construção, sendo um risco para edificações erguidas. Além disso, o gás acumulado nestas áreas, pode provocar explosões, incêndios e instabilidade do terreno,

constituindo-se em um problema para a urbanização futura de áreas de despejo desativadas (LOGUERCIO, 2013).

Outro problema do lixo urbano são os vetores encontrados nas áreas de disposição desses resíduos, ou seja, os animais que encontram condições favoráveis para sua proliferação. Muitos destes animais (moscas, baratas, mosquitos, roedores e urubus) são vetores responsáveis pela transmissão de inúmeras doenças ao homem (SISINNO, 2002). Logo, a partir de 1971, a paisagem do entorno ficou vulnerável a todos esses problemas relatados.

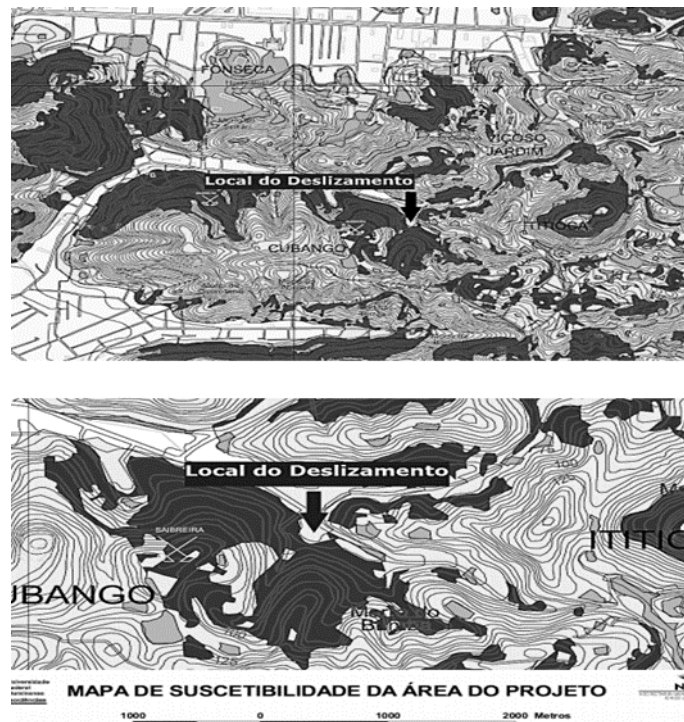
Com relação à data do fechamento do lixão há certa controvérsia, o informativo do Governo do Estado indica que o lixão foi fechado em 1986; a mídia da época (recortes de jornal) mostra que o encerramento das atividades foi em 1982; a publicação da PMN (1996) relata a transferência do lixão do Morro do Bumba para outro local (Morro do Céu) se deu no início da década de 1980 (LOGUERCIO, 2013).

Segundo AZEVEDO (2010) a concentração de lixo, quando o lixão foi fechado, cerca de 1.708.200 t (sendo o número de habitantes, após 13 anos de funcionamento do aterro, cerca de 360.000 e a produção de lixo de 1 kg/dia). Tal concentração de lixo fez com que o terreno do Morro do Bumba fosse “aumentado” em cerca de 5 metros em relação ao terreno original.

Segundo LOGUERCIO (2013) com a desativação do lixão do Morro do Bumba, foi proibida a ocupação do local pelo governo de Waldenir Bragança, mas, aos poucos, por falta de fiscalização, foram construídas pequenas casas de alvenaria na área considerada insalubre e insegura. Contraditoriamente, ao invés de reprimir a ocupação irregular da área do lixão desativado, o poder público acabou por incentivar a invasão. Foi no Morro do Bumba que a CEDAE, no governo de Leonel Brizola, fez sua primeira grande obra de saneamento em Niterói, levando para o local uma grande caixa d’água para atender aos moradores e logo em seguida Brizola levou o programa “Uma Luz na Escuridão”. Anos depois, a prefeitura construiu uma grande quadra poliesportiva, uma creche e o programa “Médico de Família”, além de outros equipamentos públicos.

Para um melhor entendimento da questão da ocupação irregular da encosta do Morro do Bumba, o “Projeto Avaliação das Encostas de Niterói com Vistas aos Fenômenos de Escorregamento – Setor 1 (Zonas Centro, Norte e Sul)” (FERRARI *et al.*, 2004) apresenta o “Mapa de Suscetibilidade da Área do Projeto” (Figura 11), onde as

áreas mais escuras do mapa indicam a vulnerabilidade ao deslizamento, pode-se inferir que a área do Morro do Bumba está inserida em uma região com alto índice de deslizamento.



Fonte: Adaptado de Loguercio (2013)

Figura 11 - Mapa de suscetibilidade da área do Morro do Bumba.

Por fim, há um histórico de ocorrências de deslizamento, assim como os dados apurados pelos órgãos competentes e as iniciativas na busca de prevenção demonstram ter havido preocupação com a possibilidade de que viessem a acontecer. Verifica-se que os índices pluviométricos entre 5 e 7 de abril de 2010 foram considerados extremos em comparação com os valores históricos para a região (LOGUERCIO, 2013).

No dia 5 de abril) houve um primeiro escorregamento no local, bem no alto do morro, que soterrou uma pessoa e onde morreram 3 pessoas da mesma família e uma pessoa atingida com ferimentos leves (LOGUERCIO, 2013).

3.2. COMUNICAÇÃO COM O ESPECIALISTA

Segundo o Geólogo e Professor do Departamento de Geografia da Universidade Federal Fluminense, Claudio Rodrigues Martins, que esteve no Morro do Bumba logo após o escorregamento do dia 07 de abril de 2010, a estrutura geológica primitiva no local era composta de gnaisses e granitoides, que são uma das três feições geológicas predominantes no estado do Rio de Janeiro. O Morro do Bumba está inserido em uma área de vale, fraturada e com uma micro drenagem.

Na década de 1960, com a instalação do lixão houve um “entulhamento de lixo” na área fraturada e segundo ele o local de baixa declividade ($\sim 15^\circ$) reteve o material (lixo). O solo onde o material ficou depositado por mais de 20 anos se tornou um solo antrópico onde o chorume (extremamente ácido) ficou acumulado na base, por causa de fluxos por dentro da estrutura do Morro do Bumba. Com a precipitação extrema, o escorregamento iniciou-se na direção norte/noroeste (Figura 12) e o material entulhado com alto teor de vidro, plástico e matéria orgânica e o lixo escorregou até a Estrada de Viçoso Jardim, tendo direção norte/noroeste.



Fonte: <http://meadd.com/seviero/27077034>

Figura 12 - Direção do movimento de massa no Morro do Bumba.

Para o professor Claudio Martins uma das principais causas do escorregamento do Bumba foi a decomposição do material que estava desagregado. Na época do fechamento do lixão, os tratores empurraram o lixo para aplainar e compactar o terreno para abertura de ruas e construções de casas. Com isso, houve instabilização parcial da encosta, onde a lixiviação e acidificação do solo já estavam em estágio avançado. Com a retirada da vegetação em processo de regeneração houve aceleração da perda de cátions como potássio, cálcio e magnésio e, conseqüente desagregação total do solo.

Em termos político administrativos, destaca-se um erro de planejamento devido ao mau uso do local para implantação do lixão em uma área de micro drenagem. Em seguida houve a urbanização do Morro do Bumba de forma errônea, afinal um solo onde ocorreu a compactação do lixo jamais poderia ter sido urbanizado e asfaltado, com moradias irregulares (Figura 13).



Fonte: <http://meadd.com/seviero/27077034>

Figura 13 - Presença de vidro e plástico no Morro do Bumba.

No dia 05 de abril de 2010, segundo o especialista, antecedendo o evento, houve um desmoronamento a montante do lixão que contribuiu para aumentar o empuxo já instalado por conta da saturação hídrica. Tal desmoronamento deveu-se, em primeira instância, à instabilização da encosta devido a corte para a abertura de uma rua. Um desmoronamento da encosta instabilizada na parte superior, serviu como embolo para

potencializar o escorregamento do lixão, soterrando inicialmente uma família de 5 pessoas (Figura 14).



Fonte: <http://meadd.com/seviero/27077034>

Figura 14 - Parte do solo antrópico, palco do primeiro escorregamento no dia 05 de abril de 2010, no Morro do Bumba.

Para o professor, houve uma solifluxão envolvendo toda massa que evoluiu para uma “avalancha de lixo. Em suma, para o especialista Claudio Martins, no Morro do Bumba ocorreu devido à conjunção de fatores como: acúmulo de lixo em uma região de vale com microdrenagem; grande quantidade de material depositado na região; a alta decomposição na base dos detritos sólidos, pois há presença de água; o incremento da acidez do solo (produção de chorume); a intensa lixiviação do solo pelos ácidos orgânicos formados pela decomposição do lixo; ambiente altamente poroso com grande facilidade de saturação por água, em outras palavras, quatro foram os fatores essenciais: o lixo acumulado, a urbanização e instalação de uma comunidade em local inapropriado, média declividade e a precipitação que caiu durante os dias 05 e 07 de abril de 2010 (Figura 15).



Fonte: <http://meadd.com/seviero/27077034>

Figura 15 - Morro do Bumba após o escorregamento no dia 07 de abril de 2010. Em destaque a rua principal da comunidade, onde várias pessoas foram soterradas e mortas.

4. DADOS E METODOLOGIA

4.1. DADOS

Nesta seção serão apresentados os dados que foram utilizados para a realização do presente estudo.

4.1.1. DADOS PLUVIOMÉTRICOS DO ALERTA RIO

O Alerta Rio é o sistema de alerta de chuvas intensas e de escorregamento em encostas da cidade do Rio de Janeiro. Foi criado em 1996 com o objetivo de emitir boletins de alerta à população sempre que houver previsão de chuvas intensas que possam gerar inundações de vias públicas e/ou acidentes geotécnicos em encostas (escorregamento). O sistema conta com uma rede de 32 estações pluviométricas espalhadas por todas as regiões do município do Rio de Janeiro. Estas estações enviam dados em tempo real, a cada 15 minutos, para a central do Alerta Rio, e estes dados podem ser acessados na página www.sistema-alerta-rio.com.br.

Foram utilizados dados do período de 04 a 07 de abril de 2010.

4.1.2. IMAGENS DE SATÉLITE

Neste trabalho foram utilizadas imagens do satélite GOES-12 no canal infravermelho com temperatura realçada. As imagens foram baixadas da página da Divisão de Satélites Ambientais (DSA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE): <http://satelite.cptec.inpe.br/home/>.

O Satélite Ambiental Operacional Geoestacionário 12 (GOES-12) é administrado pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). O GOES-12 fica posicionado sobre o equador a uma altura de 35.800 km e a 60° de longitude oeste, sendo dedicado ao monitoramento da América do Sul e oceanos adjacentes, provendo imagens a cada 15 minutos. O DSA disponibiliza também imagens setorizadas deste satélite, com domínios abrangendo regiões específicas, sendo que as setorizadas para a Região Sudeste do Brasil foram também aproveitadas neste trabalho.

4.1.3. IMAGENS DO RADAR DA AERONÁUTICA

O radar meteorológico do Pico do Couto é um radar do tipo Doppler instalado no Destacamento de Controle do Espaço Aéreo do Pico do Couto (DTCEA-PCO) no Estado do Rio de Janeiro, subordinado ao 1° Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA I). Está situado nas coordenadas 22°27'51"S e 43°17'50"W

e a uma altitude de 1771,94 m, tendo alcance máximo de 250 km e resolução de 1 km. Suas imagens são disponibilizadas ao público através da página www.redemet.aer.mil.br.

4.1.4. DADOS DE METAR

A palavra METAR é um acrônimo para *METEorological Aerodrome Report* (Relatório Meteorológico de Aeródromo). É um relatório codificado, associado às observações meteorológicas e utilizado para fornecer informações sobre as condições do tempo à superfície. Geralmente, é composto pelos seguintes itens: vento, visibilidade, alcance visual, tempo presente na pista, nebulosidade, temperatura do ar e do ponto de orvalho e pressão ao nível do mar (ajuste de altímetro). (Fonte: REDEMET).

Foram utilizados dados de METAR dos seguintes aeroportos: Aeroporto Internacional Tom Jobim - Galeão (SBGL) e Aeroporto Santos Dumont (SBRJ), para os dias citados.

4.1.5. DADOS DE REANÁLISE 1 DO NCEP/NCAR

Utilizou-se as reanálises (KALNAY *et al.*, 1996) baixadas do NCEP/NCAR, dos dias 05 a 07 de abril de 2010, da PNMM e do campo de vento. Esses dados estão disponíveis para o público em <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/> na forma de informações em quatro horários diários (00, 06, 12 e 18Z), médias diárias e médias mensais. No presente trabalho utilizou-se os 4 horários diários, no período de interesse.

4.1.6. DADOS DO CSFR

A reanálise CFSR do NCEP utiliza um sistema global de assimilação de dados de alta resolução, acoplando atmosfera, oceano, terra, gelo e superfície do mar. Suas séries de dados estão disponíveis nas resoluções horizontais de 0,3°, 0,5°, 1,0° e 2,5° graus de longitude por latitude, a intervalos horários, através da combinação de i) a análise e os prognósticos de até 5 horas, ou ii) os prognósticos de 1 até 6 horas, para cada horário de inicialização (SAHA *et al.*, 2010).

De acordo com as informações disponíveis na página do NCEP, a CFSR inclui em comparação às reanálises anteriores: i) acoplamento atmosfera e oceano na geração do campo de prognóstico de 6 horas, ii) um modelo interativo de gelo marítimo e iii) assimilação de radiancias de satélite através de um esquema de interpolação estatística de pontos de Grade sobre todo o período. A CFSR trabalha com 64 níveis verticais estendendo-se desde a superfície até 0,26 hPa. O oceano é representado com uma resolução de 0,25° no equador, se estendendo a 0,5° através dos trópicos, com 40 níveis

até uma profundidade de 4.737 m. O modelo da superfície de terra possui 4 níveis de solo e o modelo de gelo marinho apresenta 3 níveis. Mais informações sobre os dados, bem como a interface para obtenção dos próprios, encontram-se em <http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr/>.

4.2. METODOLOGIA

Para simular as condições atmosféricas do período de 05 a 07 de abril de 2010 realizou-se um experimento com o modelo BRAMS para gerar as análises e previsões. O modelo foi inicializado com a reanálise do NCEP/NCAR, com o tempo de integração de 120 horas, porém utilizou-se os 3 dias em que ocorreu o escorregamento do Morro do Bumba. Utilizou-se a relaxação Newtoniana, como forma do modelo assimilar os dados, no centro, nas laterais e no topo do domínio (*nudging*). A camada limite foi finamente refinada com taxa de *stretch* (esticamento) de 1.2. Optou-se por utilizar 3 grades aninhadas com resoluções de 40 x 40 km (Grade 1), 10 X 10 km (Grade 2) e 2,5 x 2,5 km (Grade 3), centradas nas coordenadas -22.89S e -43.08W (Figura 16) e *nudging* de 21600 na fronteira lateral, 43200 no centro, 21600 no topo. O modelo gerou os campos de vento, pressão, precipitação (acumulada e taxa), razão de mistura de água de nuvem (cloud), convergência de umidade e umidade específica, nos níveis de 1000 hPa, 850 hPa, 500 hPa e 200 hPa, no período de 05 a 07 de abril de 2010. A Tabela 1 apresenta as configurações das Grades utilizadas na pesquisa.

Tabela 1 - Resumo das Configurações de Grades utilizadas

Número da Grade	Número de pontos em X	Número de pontos em Y	$\Delta x = \Delta y$ (km)	Δt (s)
Grade 1 (G1)	35	35	40	60
Grade 2 (G2)	78	78	10	15
Grade 3 (G3)	34	34	2,5	3,75

As Figuras referentes aos campos de cada variável meteorológica simuladas com o BRAMS foram elaboradas com auxílio do programa *Grid Analysis and Display System* (GrADS) (DOTY, 1995).

A análise sinótica do período do evento foi realizada com dados do CPTEC (cartas de superfície, altitude, imagens de temperatura realçada do satélite GOES – 12), reanálise do CSFR (SAHA *et al.*, 2010). As reanálises CSFR foram utilizadas para análise dos campos de divergência de umidade *versus* pressão ao nível médio do mar, advecção de temperatura e campo de vento à superfície, espessura 500/1000 hPa e PNMM, PNMM e vento (500 e 250 hPa) e corrente de jato em 250 hPa.

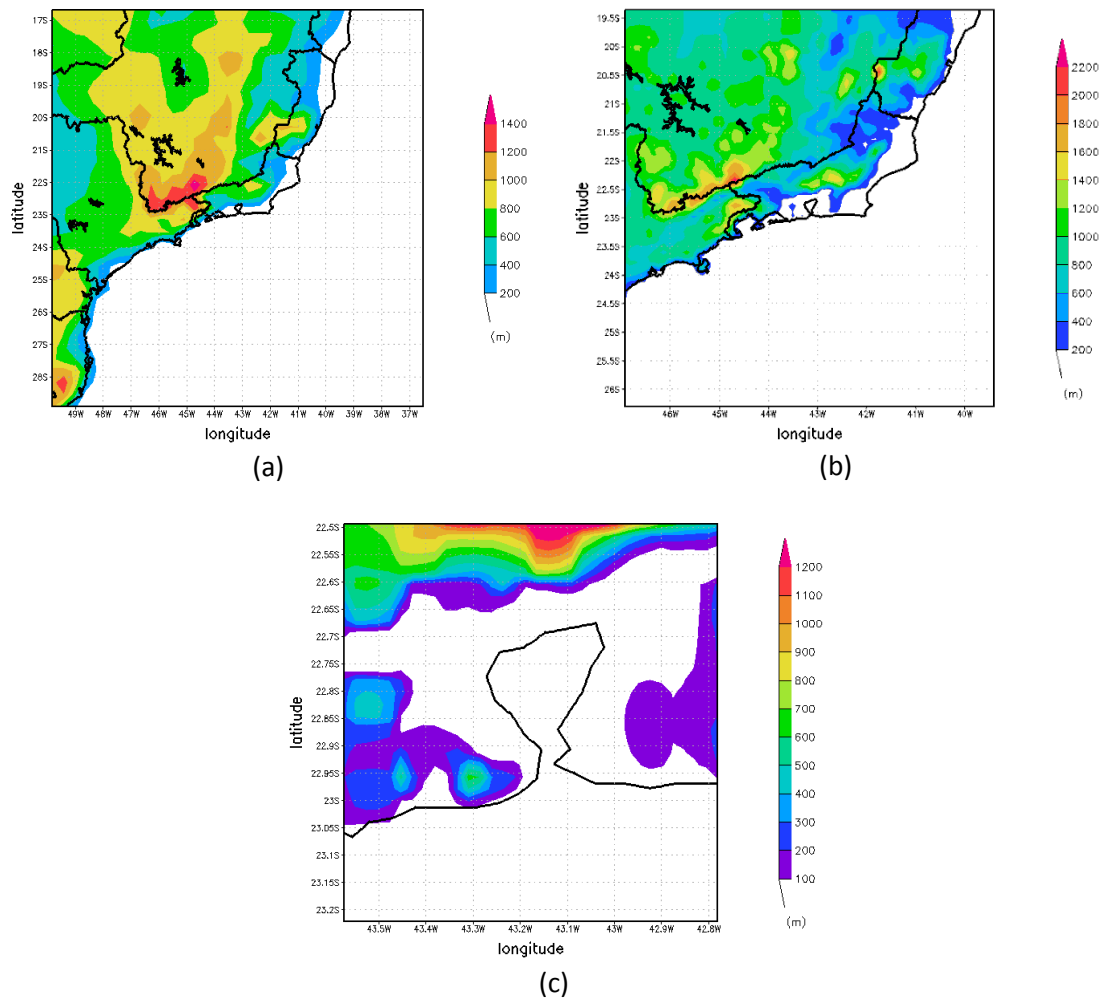


Figura 16 - Domínios das Grades utilizadas nas rodadas do BRAMS, apresentando o campo da topografia utilizada pelo modelo: (a) Grade 1, (b) Grade 2 e (c) Grade 3.

A análise sinótica foi realizada com dados do CPTEC (Cartas de superfície e de altitude e imagens de satélite com temperatura realçada do GOES-12) e com as imagens de radar da REDEMET foram utilizadas para comparação com as simulações do BRAMS, nas grades 2 e 3.

A reanálise do CSFR foi utilizada para analisar os campos de divergência de umidade e PNMM, advecção de temperatura e campo de vento à superfície, espessura 500/1000 hPa e PNMM, PNMM e vento em 250 hPa e 500 hPa e corrente de jato em 250 hPa.

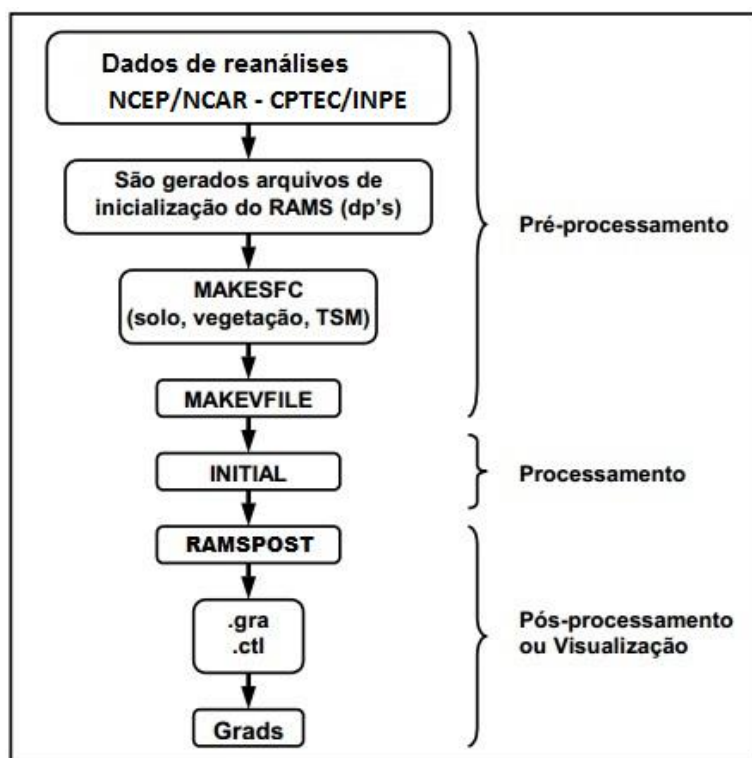
4.3. MODELO BRAMS

O BRAMS é um modelo regional desenvolvido a partir do *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS), sendo um modelo de circulação prognóstico desenvolvido na Universidade do Colorado (EUA), a partir do modelo de mesoescala de PIELKE (1974) e do modelo de nuvens de TRÍPOLI e COTTON (1980). Ele é fundamentado na integração das equações diferenciais, de conservação de momentum, de massa e de energia, com referência a um sistema de coordenadas que segue o terreno. É um modelo complexo que simula qualquer situação de escoamento. O BRAMS possui algumas funcionalidades inéditas e parametrizações especializadas para os trópicos e subtropicos. O modelo é o resultado de um projeto de pesquisa posto em prática nos anos de 2002 e 2003, patrocinado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP, vinculado ao Ministério de Ciência e Tecnologia do Brasil), cuja meta era basicamente produzir uma versão do RAMS adaptada aos trópicos, para ser utilizada por centros de pesquisa e de previsão do tempo no Brasil. Foi aperfeiçoado durante o programa de doutorado de Saulo Ribeiro de Freitas e Karla M. Longo no Instituto de Física da Universidade de São Paulo sob a supervisão da Professora Maria Assunção Faus da Silva Dias e do Professor Paulo Artaxo Neto. Melhorias adicionais foram implementadas no NASA Ames Research Center (ARC) em colaboração com o Dr. Robert Chatfield. Atualmente, o desenvolvimento do modelo está em andamento no CPTEC-INPE em colaboração com a Universidade de Orleans e a Universidade de São Paulo.

A “novidade” do BRAMS está na parametrização convectiva de Grell (GRELL e DEVENYI, 2002) e de Cumulus rasos (SOUZA, 1999), tornando o modelo mais completo para ser utilizado no Brasil. Por essa razão, foi adicionada a letra B, de

Brazilian, ao seu nome, uma vez que o modelo é adaptado para as condições climáticas do Brasil (ALVES, 2006).

As simulações com o BRAMS são realizadas em três fases: a fase de pré-processamento, a de processamento e a de visualização ou pós-processamento (Figura 17).



Fonte: Adaptado de Alves, 2006.

Figura 17 - As três fases de execução do BRAMS

Na fase de pré-processamento os arquivos de reanálises são baixados da base de dados globais do NCEP/NCAR ou do CPTEC/INPE, os quais contêm dados de grande escala com informações coletadas de diversas estações meteorológicas em todo o mundo. Na fase posterior os dados são tratados para as áreas de interesses, para alimentar o modelo, o que basicamente consiste em converter essas informações em um formato de arquivo para o modelo processar. Uma vez completada a fase de pré-processamento, inicia-se a fase de processamento quando o BRAMS faz as integrações no tempo das variáveis, nas Grades selecionadas. Nessa fase, o modelo roda com as informações configuradas no RAMSIN, gerando os arquivos de análise que contém os dados simulados para as grades escolhidas no período selecionado. Na fase de pós-

processamento, os dados contidos nos arquivos de análise são convertidos em arquivos que são visualizados graficamente pelo software GRADS (ALVES, 2006).

4.3.1. PARAMETRIZAÇÕES DO BRAMS

As equações usadas no BRAMS são aquelas para uma atmosfera não hidrostática, descritas por TRIPOLI e COTTON (1980 e 1982) e PIELKE (1984), que permite descrever processos físicos nos quais a velocidade vertical é intensa. Os processos de superfície são representados numericamente de forma bem detalhada e simulam aqueles associados à difusão turbulenta, radiação solar, a formação e interação de nuvens, precipitação de hidrometeoros na fase líquida e gelo, convecção de cúmulos, troca de calor sensível e latente entre a superfície e atmosfera (incluindo o papel da vegetação) e transporte de calor no solo. O BRAMS resolve numericamente as equações governantes da evolução da atmosfera, como: Conservação de Momentum (Segunda Lei de Newton), Conservação da Energia Térmica (Primeira Lei da Termodinâmica), Conservação de Umidade e Conservação de Massa (Equação da Continuidade) (VILHENA, 2010).

Perante o avanço tecnológico observa-se uma grande progressão nas melhorias dos programas computacionais de previsão e simulação de tempo e clima. A necessidade do avanço desses programas é cada vez maior dada à importância de prever fenômenos meteorológicos com uma margem de acertos ainda maior que as atuais. Entende-se que uma boa previsão numérica depende de vários fatores, dentre os quais da parametrização utilizada no modelo (VILHENA, 2010).

De acordo com GRELL (1993) entre outros, comumente, três diferentes métodos são usados para testar esquemas de parametrização: o teste diagnóstico, o semi prognóstico e o prognóstico completo. Os principais fenômenos parametrizados contidos no código do modelo, que podem ser ativados e desativados e, que são descritos por VILHENA (2010) são os seguintes:

4.3.1.1. Parametrização Radiativa

Os efeitos produzidos na atmosfera e no solo devido à radiação solar e terrestre (onda curta e onda longa respectivamente), assim como a interação dessas radiações com os diferentes constituintes da atmosfera (oxigênio, ozônio, dióxido de carbono, vapor d'água, água líquida das nuvens, etc.), seguem duas opções de esquemas de radiação: a proposta por MAHRER e PIELKE (1977) e a descrita por CHEN e COTTON (1983).

O BRAMS possui duas opções de parametrizações de radiação para ondas longas e duas opções para ondas curtas. Os esquemas de MAHRER e PIELKE (1977), para onda curta é mais simples e eficiente, pois avalia o espalhamento pelo oxigênio, ozônio e dióxido de carbono de uma maneira empírica e considera a absorção pelo vapor da água, mas não leva em conta os efeitos das nuvens ou material condensado de nenhuma maneira; já para onda longa considera a emissão infravermelha e a absorção do vapor de água e do dióxido de carbono, sem considerar nuvens ou material condensado de nenhuma maneira, assim, estas parametrizações têm um menor tempo computacional (VILHENA, 2010).

Os esquemas de CHEN e COTTON (1983), que englobam a quantidade de material condensado presente na simulação atmosférica, é uma solução satisfatória para a equação de transferência radiativa, usando uma aproximação de emissividade. O efeito de condensação considerado neste esquema possui um custo computacional mais alto.

4.3.1.2. Parametrização Convectiva

Segundo VILHENA (2010) os esquemas de convecção simulam os efeitos da condensação do vapor de água e os intercâmbios produzidos pelas fortes correntes verticais convectivas (KELNER e TEICHRIEB, 2008). O problema mais complexo em mesoescala, sinótica e modelagem global é a parametrização de convecção. Infelizmente, os termos de convecção são uns dos mais significantes termos de forçantes nas equações que descrevem os movimentos da atmosfera nas grandes escalas. Além disso, o fato de não haver muitos estudos observacionais dos efeitos da convecção sobre as grandes escalas (principalmente nas latitudes médias), combina-se as dificuldades do problema.

Vários tipos de esquemas de parametrização de convecção têm sido apresentados nos últimos anos. Os esquemas mais utilizados atualmente em modelos de mesoescala são o esquema Tipo KUO (1974), o de ARAKAWA e SCHUBERT (1974) e o de FRITSCH e CHAPPELL (1980a). Ambos os esquemas são versões modificadas, implementadas dentro do RAMS na Universidade do Colorado (TREMBACK, 1990) nas décadas passadas (VILHENA, 2010).

A parametrização mais utilizada é a do Tipo Kuo com adaptações descritas por MOLINARI (1982). O esquema Tipo Kuo é baseado no equilíbrio da atmosfera, na qual a convecção atua para eliminar a instabilidade convectiva gerada nas grandes escalas. Diversos fechamentos são usados no esquema Grell de ARAKAWA e SCHUBERT

(1974) para determinar o fluxo de massa na nuvem, a fim de conhecer a localização e início da convecção. Na implementação original de Grell, um dos tipos de fechamentos baseia-se em estabilidade de equilíbrio, por meio da definição da função trabalho da nuvem (VILHENA, 2010).

4.3.1.3. Parametrização de Microfísica de Nuvens

Segundo VILHENA (2010) a parametrização de microfísica no BRAMS, descrita por WALKO *et al.* (1995), aplica-se a qualquer categoria de hidrometeoros, tais como: vapor, chuva, gota de nuvem, granizo, neve, cristais de gelo, etc. São considerados os diferentes processos microfísicos, como: colisão, nucleação, sedimentação, coalescência e conversão de uma categoria para outra. Estes processos microfísicos são detalhados por MEYERS e COTTON (1992).

A parametrização de microfísica descreve a evolução das categorias de hidrometeoros no tempo, os mecanismos de interação entre as mesmas e a permanente troca de vapor e calor com a fase gasosa. Esta parametrização garante que o usuário do modelo tenha certa versatilidade permitindo que o experimento numérico seja conduzido dentro de certas restrições estabelecidas por ele. É possível, por exemplo, que o diâmetro médio de uma das categorias de hidrometeoros seja determinado a partir de um valor padrão encontrado no código do modelo ou sugerido pelo usuário (VILHENA, 2010).

Segundo ANABOR e PIVA (2008) a microfísica de nuvens parametrizada pelo esquema proposto por WALKO *et al.* (1995), no BRAMS, leva em consideração 7 tipos de hidrometeoros, sendo 2 líquidos (nuvem e chuva), 3 sólidos (pristine, neve e agregado) (VILHENA, 2010).

4.3.1.4. Outras Parametrizações do Modelo

Com relação à parametrização de turbulência, no BRAMS há quatro opções distintas para a parametrização dos coeficientes de difusão turbulenta, dividida em duas classes, em função da distribuição do espaçamento de Grade, horizontal ou vertical. Dentre elas, duas das quais baseadas no esquema de SMAGORINSKY (1963) que relaciona o coeficiente de mistura e a tensão no fluido, ou a taxa de deformação, e inclui correções para a influência da frequência de Brunt-Vaisala e o número de Richardson (KELNER e TEICHRIEB, 2008), enquanto as outras duas opções fazem o diagnóstico do coeficiente de mistura turbulenta pela energia cinética turbulenta, prognosticada pelo modelo. Se o espaçamento horizontal da Grade é grande em comparação ao espaçamento vertical, o

esquema de MELLOR e YAMADA (1974) é usado para a determinação do coeficiente de mistura turbulento. Se o espaçamento horizontal da Grade for pequeno e os movimentos convectivos resolvidos, é usado o esquema de DEARDORFF (1980) (VILHENA, 2010).

No BRAMS é possível acoplar modelos para permitir a análise da interação atmosfera-vegetação-solo como o LEAF-3 (*Land Ecosystem-Atmosphere Feedback Model*) (WALKO e TREMBACK, 2000), que realiza o transporte de água na vertical, assim, como é possível mesclar vários outros modelos para efetuar outros tipos de cálculos, de acordo com o interesse do pesquisador. O acoplamento entre estes modelos pode simultaneamente representar, tanto o transporte vertical como o horizontal e suas interações (VILHENA, 2010).

A tabela 2 mostra as parametrizações utilizadas no presente trabalho.

Tabela 2 – Parametrizações do BRAMS utilizadas no presente trabalho

Parametrização de Radiação	CHEN E COTTON (1983)
Parametrização Convectiva	GRELL (1993)
Parametrização de Microfísica de Nuvens	WALKO <i>ET AL.</i> (1995)
Parametrização de Vegetação e Solo	Modelo LEAF-3 (WALKO e TREMBACK, 2001)
Parametrização de Coeficiente de Difusão Turbulenta	MELLOR e YAMADA (1974)

4.4. Teste de Sensibilidade

Para o presente trabalho foram realizados dois experimentos, o que se pode chamar aqui de “testes de sensibilidade” do modelo. O primeiro experimento foi realizado com os parâmetros padrões (“*default*”) de radiação e microfísica de nuvens do BRAMS. Todavia, o modelo subestimou a variável precipitação (taxa e acumuladas simulações referentes à pluviosidade (taxa e acumulada) com os parâmetros padrão. O segundo experimento foi realizado com alterações nas parametrizações de microfísica de nuvens e na radiação. O resultado mais significativo ocorreu com alterações na distribuição dos núcleos de condensação, considerando núcleos de condensação de tamanho maior, típicos de ambiente marinho. As sugestões de modificações nas parametrizações de microfísica

de nuvens e de radiação foram dadas pelo Professor Pedro Leite da Silva Dias (IAG – Universidade de São Paulo). Apenas como um exemplo a ser mencionado e evidenciado, esse teste de sensibilidade englobando as modificações efetuadas nos parâmetros de microfísica do modelo fez com que a precipitação total acumulada sobre Niterói aumentasse de um valor de, em torno de 30 mm (com as opções padrões) para valores superiores a 100 mm (com as opções modificadas sugeridas, priorizando os CCNs de tamanho maior). Mesmo com a permanência da subestimativa do valor de precipitação acumulada, esses resultados mostram uma melhora (aumento) substancial nos valores de precipitação simulados pelo BRAMS para a região de estudo.

Salienta-se também que, por mais que um teste de sensibilidade desse tipo possa parecer um simples teste de tentativa/erro, na verdade ele tem razões e coerência física com o tipo de fenômeno estudado. Como será apresentado no capítulo de resultados fica muito bem caracterizado que o sistema que provocou a precipitação na região de estudo, teve origem oceânica e foi predominantemente alimentado por ar e umidade provenientes do mar. Dessa forma, usar uma distribuição de núcleos de condensação, na parametrização de microfísica, com valores mais representativos dos encontrados sobre o oceano, se caracteriza mais coerente e provavelmente muito mais realístico, do que utilizar as opções padrões do modelo, que priorizam núcleos de condensação de tamanhos menores, mais característicos de regiões continentais.

5. RESULTADOS

5.1. DESCRIÇÃO DO ESCORREGAMENTO DO MORRO DO BUMBA

No final da tarde do dia 5 de abril de 2010 a RMRJ foi atingida por uma tempestade que provocou chuvas inicialmente moderadas, passando a fortes e a seguir muito intensas, acompanhadas por ventos fortes, que atingiram 75 km/h no Forte de Copacabana. Na noite do dia 5 as principais avenidas da cidade (Avenida Brasil, Linha Vermelha, Aterro do Flamengo) já estavam alagadas e o trânsito ficou completamente paralisado. No dia 06/04 a RMRJ amanheceu completamente paralisada, com vários pontos de escorregamento e inundações, árvores caídas e problemas de transmissão na rede elétrica. De acordo com a Defesa Civil, apenas no município do Rio de Janeiro ocorreram 43 mortes, 544 desabrigados e 1410 desalojados (CALADO, 2012).

No dia 7 de abril às 22 h um escorregamento em Niterói, no Morro do Bumba, provocou a morte de 50 pessoas. A região que estava sendo ocupada pela favela, já havia sido um depósito de lixo (lixão) durante 15 anos até ser desativado em 1981. Após o encerramento das atividades do lixão, foram se acumulando resíduos de terra sobre o montante e assim foram sendo construídas habitações. No evento do escorregamento, cerca de 40 casas ficaram soterradas Figura 18.



Fonte: Calado (2012)

Figura 18 - Fotos do Morro do Bumba em Niterói durante o evento de chuvas intensas nos dias 6 e 7 de abril de 2010. (a) Vista aérea do Morro do Bumba após o grande escorregamento de terra; (b) Rastro de lama deixado pela terra no Morro do Bumba; (c) Montanha de lama e terra que escorregou do Morro do Bumba; (d) Equipes de resgate tentam encontrar sobreviventes sob a terra no Morro do Bumba.

Ao final do mês de abril de 2010, a Defesa Civil do Estado do Rio de Janeiro contabilizou na RMRJ, 46.166 desalojados, 12.570 desabrigados, 84 mortos, 6.042.825 pessoas afetadas, 2.553 residências danificadas e 510 residências destruídas. A área do Morro do Bumba, que antes era o centro da rotina de cerca de 150 famílias, somou 50 mortos e se tornou uma grande área de lixo, terra, escombros, esgoto e silêncio. A Figura 19 apresenta um resumo dos valores apresentados pela Defesa Civil para o período do evento.

Local	Desalojados	Desabrigados	Mortos	Afetados	Residências Danificadas	Residências Destruidas
Duque de Caxias	500	808	0	6.128	1.000	100
Itaboraí	397	1.182	-	1.697	253	-
Magé	34	0	1	0	12	-
Mangaratiba	60	-	-	20.000	6	-
Niterói	1.069	1.272	40	3.000	827	312
Rio de Janeiro	1.410	544	43	6.000.000	347	92
São Gonçalo	42.576	8.718	-	-	95	-
Tanguá	120	46	-	12.000	13	6
Total	46166	12570	84	6042825	2553	510

Figura 19 - Dados da Defesa Civil sobre prejuízos na RMRJ, para o mês de abril de 2010.

Na Figura 20 encontra-se a distribuição espacial da precipitação acumulada entre 12 Z de 05/04 até 12 Z de 06/04, onde se notam os maiores valores próximo ao maciço da Tijuca (superior a 300 mm), reduzindo-se em direção à Zona Oeste e ao litoral, com valores superiores a 100 mm em todas as localidades. A chuva ocorreu de maneira forte e contínua, principalmente, durante a noite do dia 5/4/10 (a partir de 21 HL) e a madrugada do dia 6/4/10 (até 9 HL). Segundo o ALERTA RIO (2010) a precipitação máxima no período de 15 minutos foi registrada na estação de Irajá com 24,6 mm e na estação de Madureira com 22,8 mm. Os máximos no intervalo de 30 minutos foram observados nas estações do Sumaré (36,2 mm) e Gericinó (35,4 mm). No período de uma hora, os maiores totais pluviométricos foram registrados no Cachambi (52,2 mm) e Madureira (52,0 mm).

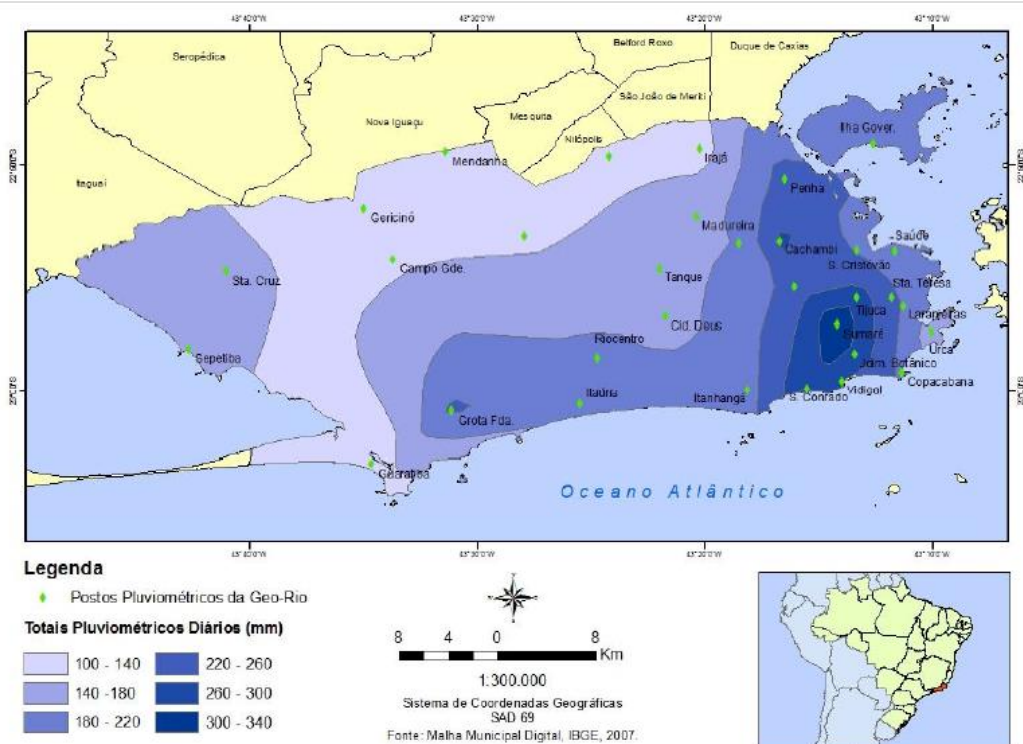


Figura 20 - Distribuição espacial do total pluviométrico, em mm, entre 12Z do dia 5 até 12 Z do dia 6 de abril de 2010 no município do Rio de Janeiro.

Os máximos em 24 horas consecutivas (acumulados em distintos períodos durante o evento), conforme apresentados no sítio do Alerta Rio (<http://www.rio.rj.gov.br/alertario/>) também foram extremamente elevados em várias estações, como por exemplo: 304,6 mm na Rocinha; 303,0 mm no Jardim Botânico; 280,2 mm na Tijuca; 264,6 mm no Vidigal e 257,8 mm no Grande Méier.

Segundo as observações do METAR dos aeroportos Santos Dumont e do Galeão (Figura 21) percebe-se que na manhã do dia 05/04/2010, as condições de tempo observadas passaram a ser influenciadas pelo sistema frontal que estava se deslocando para o estado do Rio de Janeiro, deixando o estado com períodos de chuva leve e céu encoberto. A partir das 18 Z do dia 05/04/2010, esses sistemas convectivos de mesoescala se formaram sobre o Rio de Janeiro e produziram os grandes acumulados de precipitação no estado.

Santos Dummont						
Data	Hora	ventos	tempo presente	Nebulosidade	temperatura	pressão
04/04/2010	00Z	32001KT	CAVOK		27	1013
04/04/2010	12Z	33004KT	CAVOK		28	1012
04/04/2010	18Z	00000KT		FEW030 SCT050 BKN090	30	1009
05/04/2010	00Z	34005KT	-RA	BKN015 OVC080	25	1012
05/04/2010	12Z	04040KT		FEW008 SCT020 BKN070	26	1013
05/04/2010	2120Z	17016KT	+TSRA BR	BKN004 BKN008 FEW025CB OVC070	24	1010
05/04/2010	2235Z	13010KT	+TSRA BR	BKN004 BKN008 FEW025CB OVC070	25	1011
05/04/2010	18Z	19006KT		SCT015 SCT070	28	1010
06/04/2010	00Z	21011G23KT	RA BR	BKN004 BKN008 OVC070	25	1012
06/04/2010	0148Z	17011KT	+RA BR	BKN008 SCT015 OVC070	24	1012
06/04/2010	12Z	20012KT	RA BR	BKN002 BKN008 OVC070	23	1012
06/04/2010	18Z	201007KT	-RA BR	SCT004 BKN006 OVC070	22	1010
06/04/2010	1845Z	21010G30KT	+RA BR	BKN004 BKN007 OVC070	21	1011
07/04/2010	00Z	29010KT		BKN010 OVC070	21	1012
07/04/2010	0040Z	27004KT	-RA BR	BKN010 OVC070	20	1012

Galeão						
Data	Hora	ventos	tempo presente	Nebulosidade	temperatura	pressão
04/04/2010	00Z	12005KT		FEW020 BKN100	26	1013
04/04/2010	06Z	15003KT		FEW012 BKN100	25	1011
04/04/2010	12Z	10003KT		FEW020 BKN090	28	1012
04/04/2010	18Z	15003KT		FEW020 BKN090	29	1009
04/04/2010	1842Z	34005KT	TS	FEW020 FEW025CB BKN080	29	1010
05/04/2010	00Z	34007KT	-RA	BKN009 OVC080	24	1013
05/04/2010	06Z	34003KT		FEW006 SCT015 BKN080	24	1011
05/04/2010	12Z	26006KT		BKN015 BKN050	27	1013
05/04/2010	18Z	25010KT		SCT020 BKN070	28	1010
06/04/2010	00Z	26004KT	-RA	BKN005 OVC010	23	1013
06/04/2010	0020Z	31009KT	+RA BR	BKN004 OVC010	23	1013
06/04/2010	06Z	31003KT	-RA BR	SCT004 BKN008 OVC070	23	1011
06/04/2010	12Z	30011KT	-RA BR	BKN010 OVC030	23	1012
06/04/2010	18Z	24008KT	-RA	SCT006 BKN010 OVC050	22	1010
07/04/2010	00Z	31005KT		SCT008 BKN012 OVC070	20	1013

Fonte: Adaptado de Calado (2012)

Figura 21 - Informações extraídas do METAR das estações do Galeão (SBGL) e Santos Dumont (SBRJ) do período entre a noite de 04/04/2010 e a manhã de 06/04/2010. Em retângulos vermelhos estão ressaltadas as observações de tempo severo.

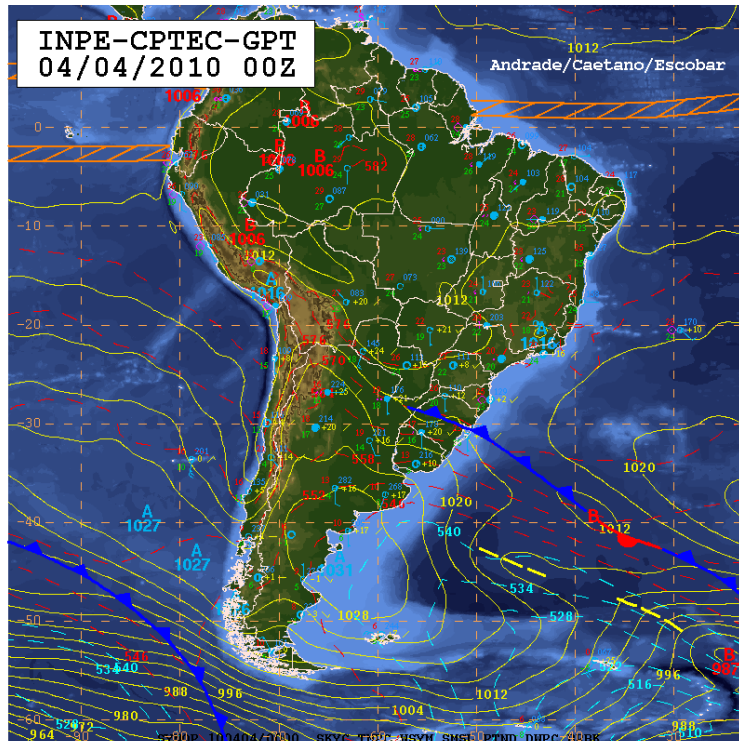
5.2. ANÁLISE SINÓTICA UTILIZANDO DADOS DO CPTEC

Na análise da carta sinótica de superfície da 00Z do dia 04/04/2010 (Figura 22a) do CPTEC, nota-se a presença de uma frente fria no Rio Grande do Sul, seguindo pelo Atlântico até um ciclone de 1012 hPa posicionado em torno de 40S/38W. Na retaguarda deste sistema observa-se um cavado que atua somente no oceano. A Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) está bem ampla e um tanto deslocada de sua posição climatológica, devido ao avanço do sistema frontal sobre o oceano. Este sistema tem núcleo de 1023 hPa a leste de 10W. Uma frente fria desloca-se pelo Pacífico ao sul de 40S.

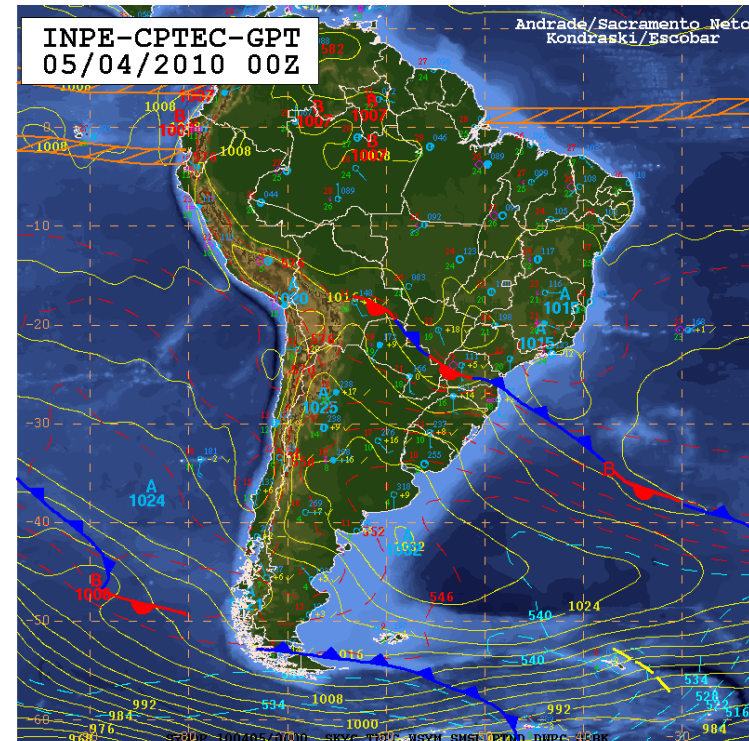
Na carta de superfície do dia 05/04/2010 às 00Z (Figura 22b) nota-se a presença de uma frente fria entre o sul do Paraná e litoral norte de Santa Catarina e Atlântico adjacente, e uma estacionária ao sul do Paraná, passando pelo oeste de Mato Grosso do Sul. Uma área de baixa pressão relativa aparece entre o litoral do Rio de Janeiro e de São Paulo, contribuindo para a atividade convectiva nessa área oceânica.

Na análise da carta sinótica de superfície da 00Z do dia 06/04/2010 (Figura 22c), nota-se a atuação de um sistema frontal estacionário, entre o Acre, Rondônia, Mato Grosso, sul de Goiás, Triângulo Mineiro, norte de São Paulo e sul de Minas Gerais. A partir do sul do Rio de Janeiro até o Atlântico adjacente, este sistema atua de forma fria. O anticiclone migratório pós-frontal está centrado em 42S/49W, com núcleo de 1028 hPa, com características marítimas, e direciona uma pista de ventos de sudeste para a Região Sul do Brasil e para São Paulo, e ventos de sul para o Rio de Janeiro. Esses ventos transportam ar frio e úmido para o continente, provocando declínio de temperaturas no Sul e parte do Sudeste. Também deixam o dia com muitas nuvens e chuva em algumas áreas da faixa leste das regiões citadas. Este padrão, assim como o de altitude descrito anteriormente, provocaram grandes acumulados de chuva e muitos impactos na sociedade, principalmente na RMRJ.

Na carta sinótica do dia 07/04/2010, às 00 Z (Figura 22 d) observa-se o sistema frontal atuando de forma estacionária entre o Mato Grosso, Goiás e norte de Minas Gerais, e de forma fria entre o norte do Espírito Santo e o Atlântico adjacente. O anticiclone migratório pós-frontal está centrado em 40S/48W com núcleo de 1029 hPa. Entre o sistema frontal e o anticiclone observa-se um intenso gradiente de pressão e temperatura, o que gera uma pista de vento, que transporta ar frio e úmido para o continente. Este padrão reforçado pela configuração ciclônica em níveis altos e médios, manteve a condição de chuvas em áreas do Sudeste (leste de São Paulo e no Rio de Janeiro), que embora tenham diminuído, ainda provocam períodos de chuva mais forte e acumulados significativos.



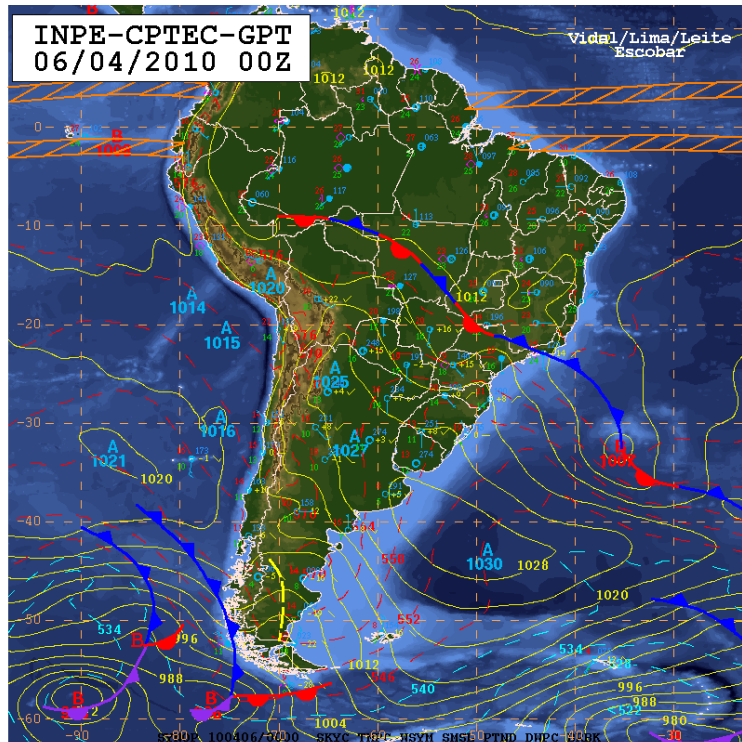
(a)



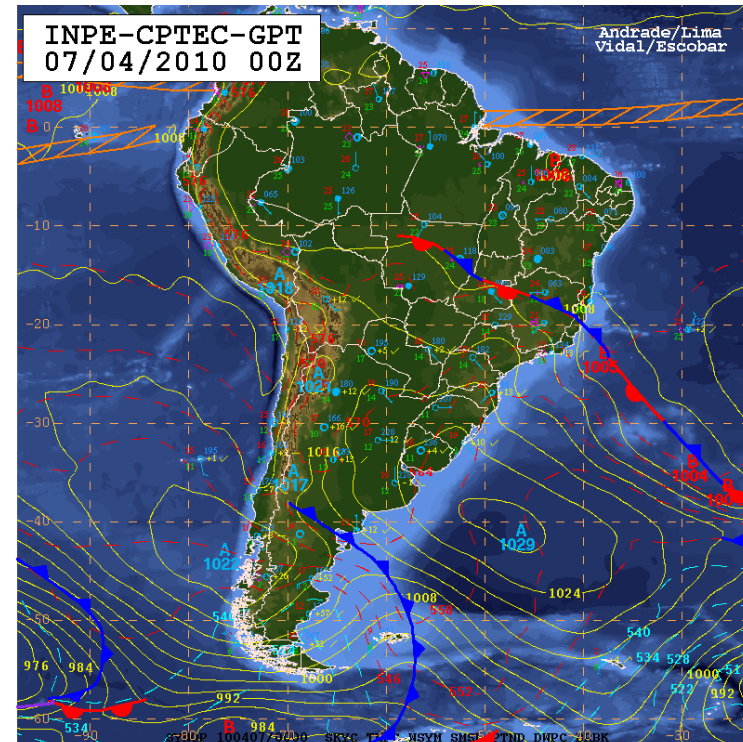
(b)

Fonte: CPTEC (2010)

Figura 22 - Cartas de Superfície para: (a) 00Z de 04/04/2010, (b) 00Z de 05/04/2010, (c) 00Z de 06/04/2010, (d) 00Z de 07/04/2010.



(c)



(d)

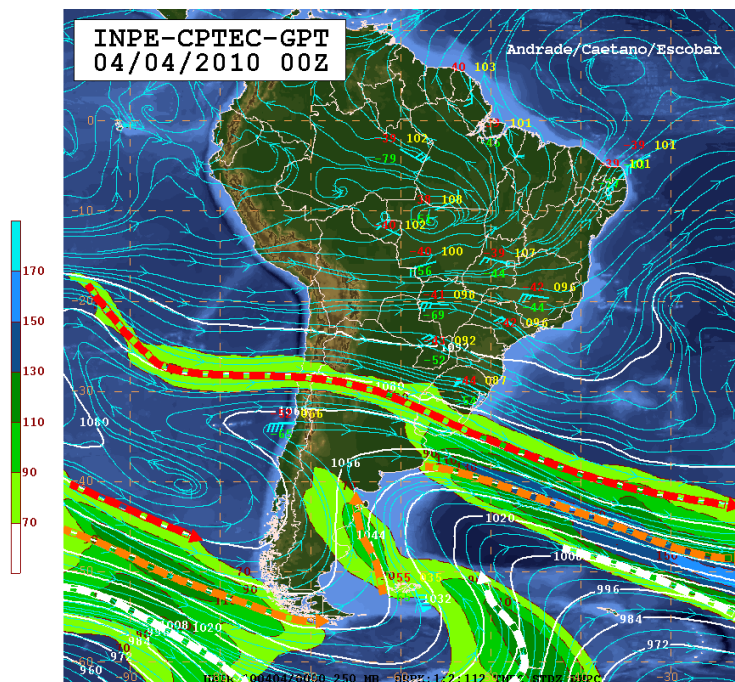
Figura 22 - Continuação.

Na análise da carta sinótica de 250 hPa das 00Z do dia 04/04/2010 nota-se um anticiclone centrado em torno de 11S/57W sobre o norte de Mato Grosso. A circulação associada a este sistema gera significativa difluência no escoamento sobre as Regiões Norte, Nordeste, Sudeste e parte do Centro-Oeste do país. Esta difluência gera divergência, também em altitude, e a conseqüente atividade convectiva nos níveis mais baixos da troposfera sobre grande parte de sua área de atuação. Ao sul de 20S entre SP, MS, Paraguai e Região Sul do Brasil nota-se que a circulação é levemente ciclônica. Um amplo cavado prolonga-se desde o Pacífico, cruza o centro da Argentina e segue pelo Atlântico com eixo no sentido noroeste/sudeste (Figura 23a).

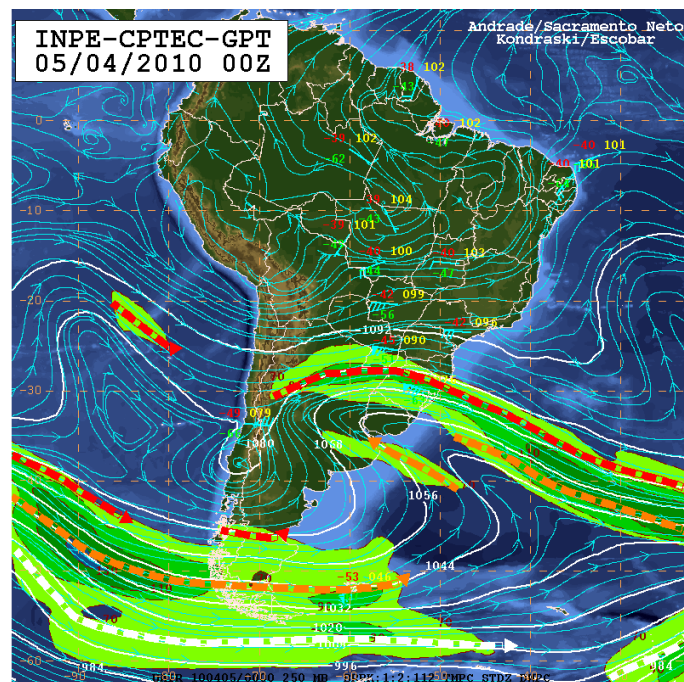
Na análise da carta sinótica de 250 hPa das 00Z do dia 05/04/2010 (Figura 23b) nota-se um cavado que se estende entre o leste da Bolívia, Mato Grosso do Sul, Paraná e nordeste do Rio Grande do Sul. No leste de São Paulo e no norte do Rio de Janeiro há uma difluência no escoamento vindo a dar apoio dinâmico a atividade convectiva nessa área.

Na análise da carta sinótica de 250 hPa das 00Z do dia 06/04/2010 observa-se o reflexo do cavado frontal em altitude com ventos fortes e um núcleo bastante frio (-15°C) no Rio Grande do Sul, gerando um intenso gradiente de temperatura. Ao norte de 20S tem-se um fluxo perturbado, com cavados de ondas curtas em algumas localidades, como por exemplo, entre sudoeste de Minas Gerais. Estas ondas curtas acabam favorecendo alguma instabilidade onde atuam. Um anticiclone centrado em 36S/66W atua no centro da Argentina. Ao sul de 40S nota-se cavados, com fortes baroclinia, ventos e gradiente de temperatura. Estes cavados estão associados aos sistemas frontais observados em superfície (Figura 23c).

Na análise da carta sinótica de 250 hPa das 00Z do dia 07/04/2010 observa-se um anticiclone centrado em torno de 10S/62W. Nota-se um padrão difluente em áreas das Regiões Norte e Nordeste, também no Espírito Santo e Minas Gerais, o que aliado ao padrão termodinâmico e ao fluxo de umidade direcionado mais para norte (associado ao sistema frontal), gera instabilidade em algumas localidades destas regiões. Um cavado frontal amplificado estende-se entre o sul de Minas Gerais, São Paulo e Atlântico adjacente. Este sistema é contornado pelo Jato Subtropical (JST), que além de dar suporte ao sistema frontal em superfície, também instabiliza parte do leste da Região Sul, e principalmente o Sudeste (Figura 23d).



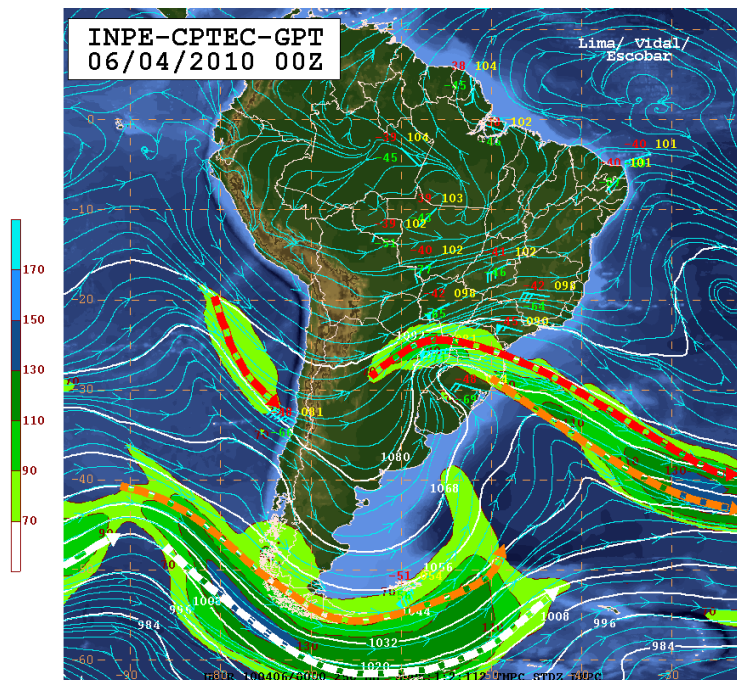
(a)



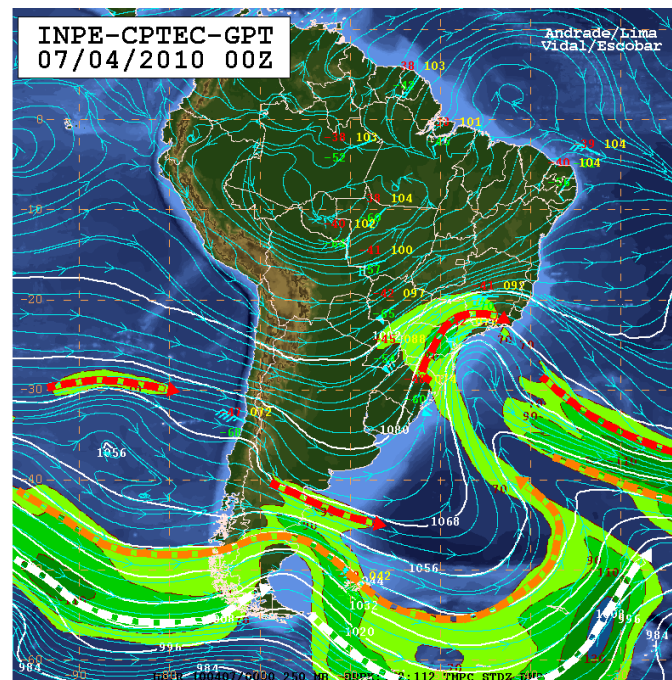
(b)

Fonte: CPTEC (2010)

Figura 23 - Cartas de Altitude de 250 hPa para: (a) 00Z de 04/04/2010, (b) 00Z de 05/04/2010, (c) 00Z de 06/04/2010, (d) 00Z de 07/04/2010.



(c)

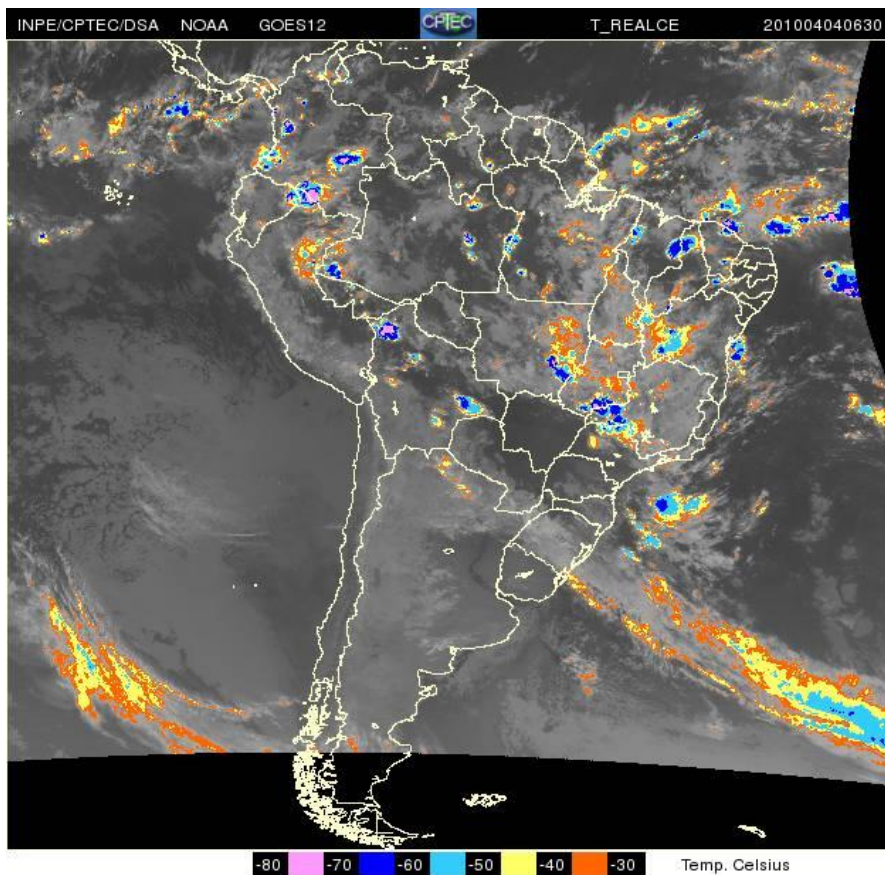


(d)

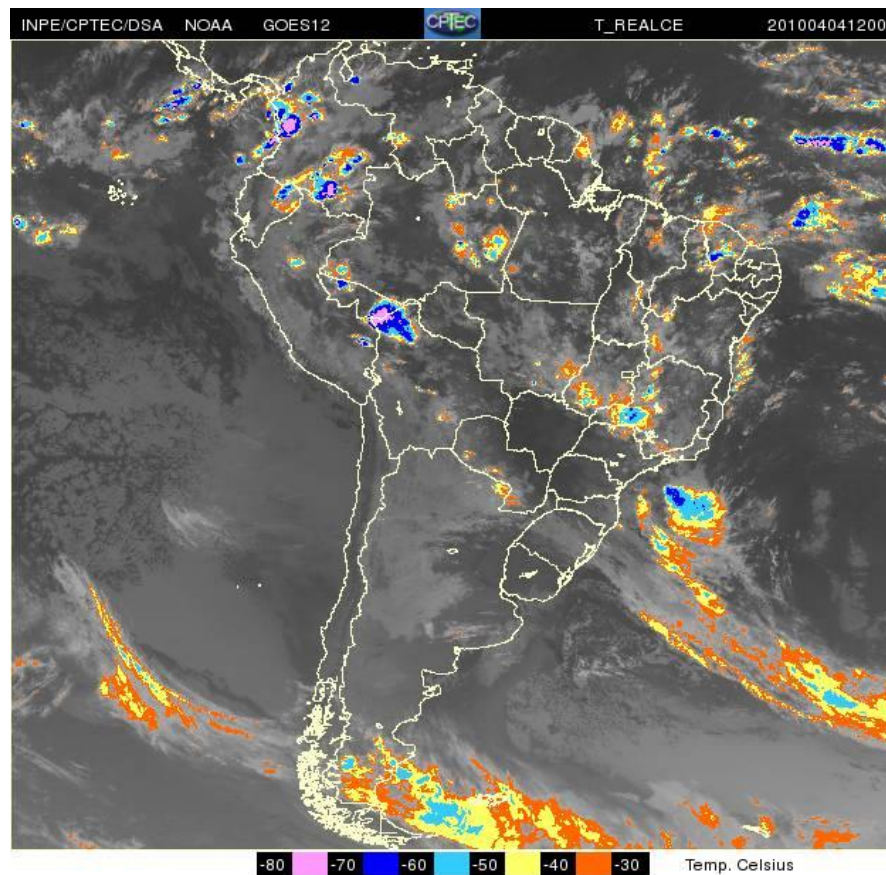
Figura 23 - Continuação

A análise das condições sinóticas do período permite revelar algumas características que favoreceram a ocorrência do distúrbio. Na Figura 23 verifica-se através de imagens de satélite GOES – 12, com a temperatura realçada, que a frente fria se desloca pelo Estado do Rio de Janeiro, causando apenas aumento de nebulosidade e chuva leve no município do Rio de Janeiro. Essa frente fria estava posicionada entre o Norte do Rio Grande do Sul e o Sul de Santa Catarina no dia 04 às 00Z (Figura 24a) e deslocou-se para a Região Sudeste, atingindo o Estado do Rio de Janeiro no dia 05 de abril às 00Z (Figura 24b), onde permaneceu até o dia 06/04/2010 às 12Z (Figura 24c), dando a impressão de não estar coerente com as cartas do CPTEC, da figura anterior, pois nela observa-se a frente fria ainda no estado do Paraná, no dia 05/04/2010 às 00Z.

Essa impressão ocorre porque as marcações de frentes frias em cartas sinóticas por vezes divergem da posição visual da porção mais convectiva da nebulosidade observada em imagens de satélite. A partir desse horário, a porção mais convectiva do sistema frontal se deslocou lentamente para NE, entretanto uma região de nebulosidade rasa permaneceu atuando sobre a costa do estado do Rio de Janeiro, incluindo toda a porção litorânea do estado (Figuras 24d, 24e, 24f, 24g e 24h).



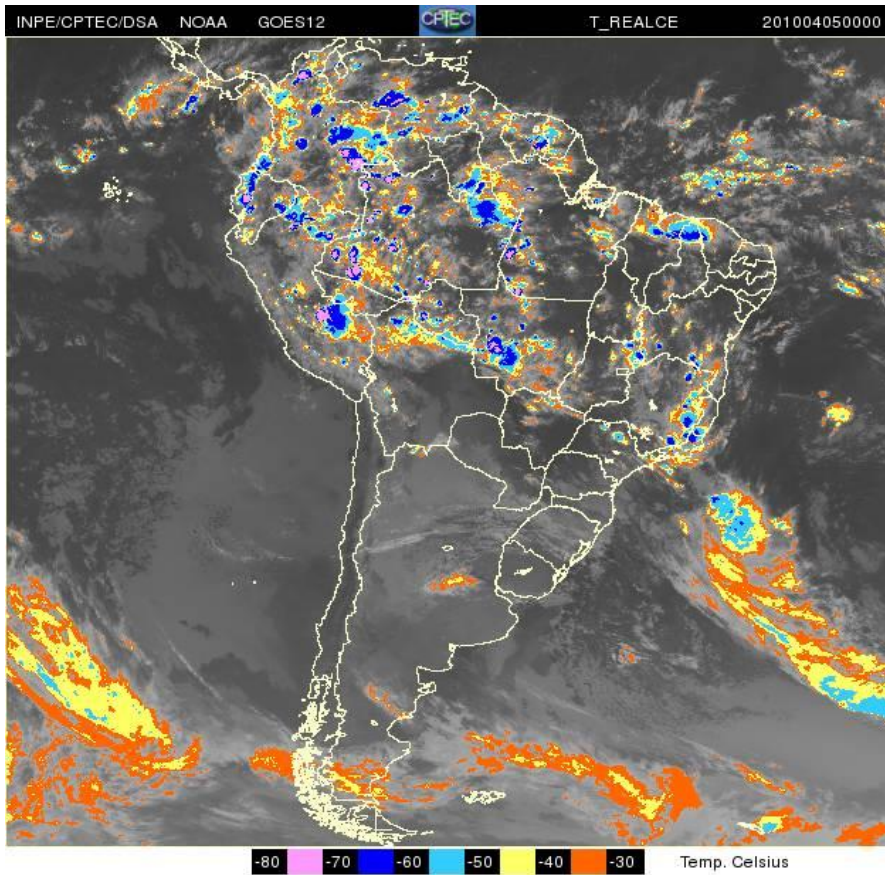
(a)



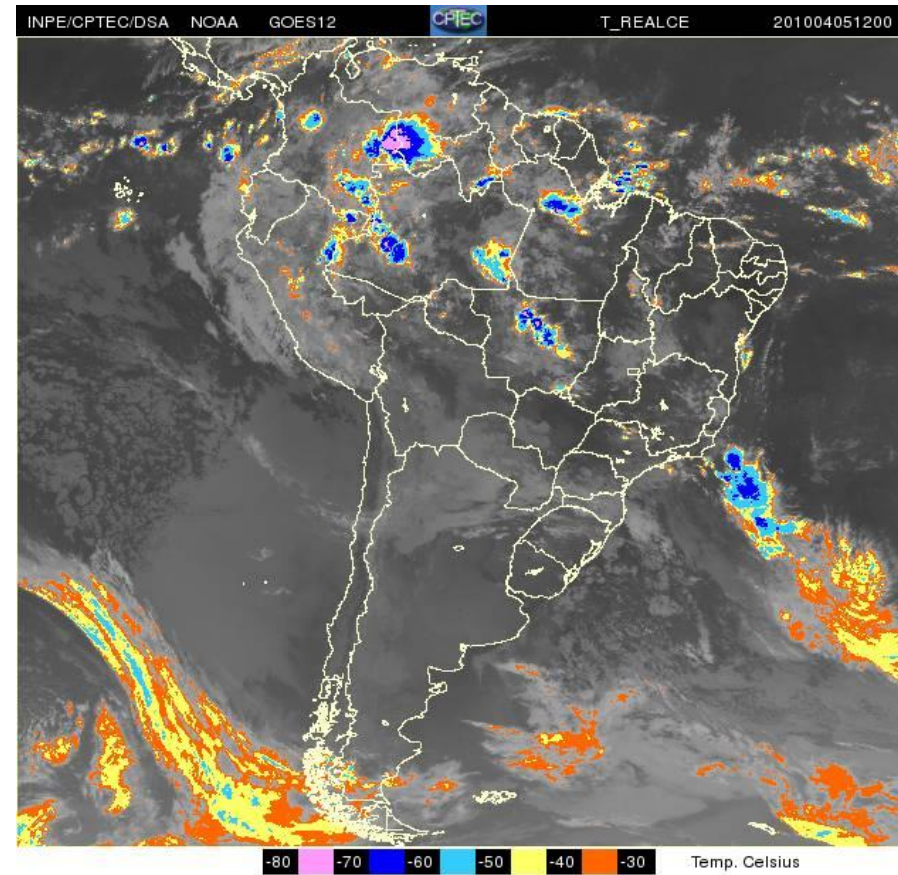
(b)

Fonte: www.cptec.inpe.br/satelite

Figura 24 - Imagens do satélite GOES-12, no canal Infravermelho, realçadas, para: (a) 00Z de 05/04/2010, (b) 12Z de 05/04/2010, (c) 00Z de 06/04/2010, (d) 12Z de 06/04/2010, (e) 00Z de 07/04/2010, (f) 12Z de 06/04/2010, (g) 00Z de 07/04/2010 e (h) 12Z de 07/04/2010.

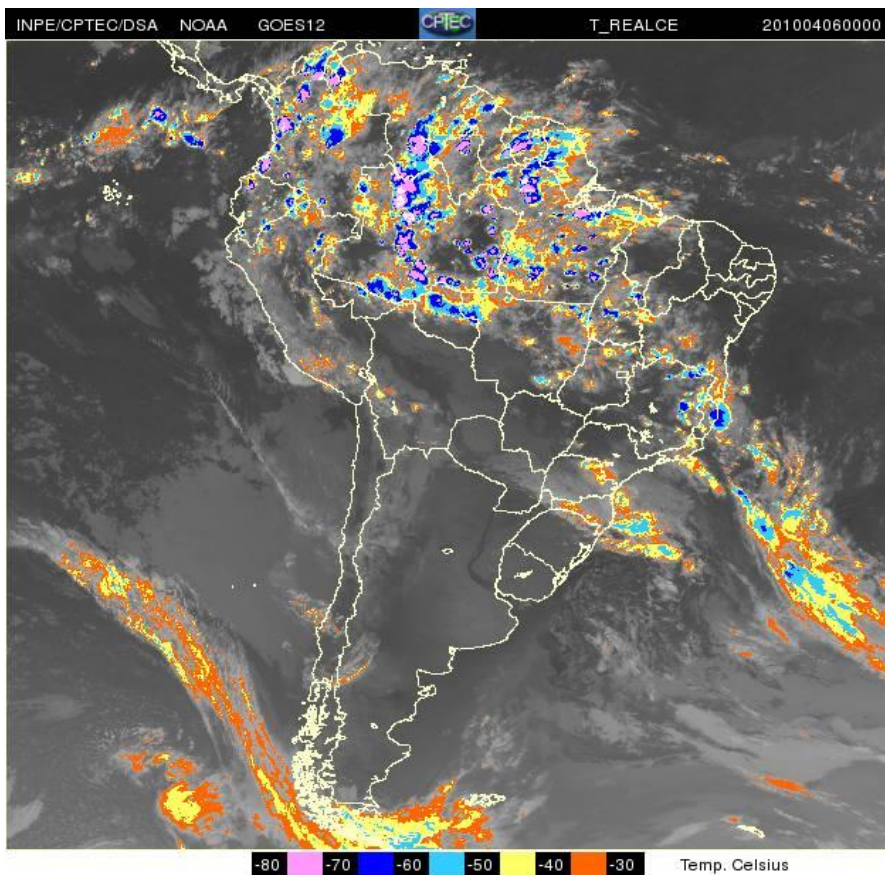


(c)

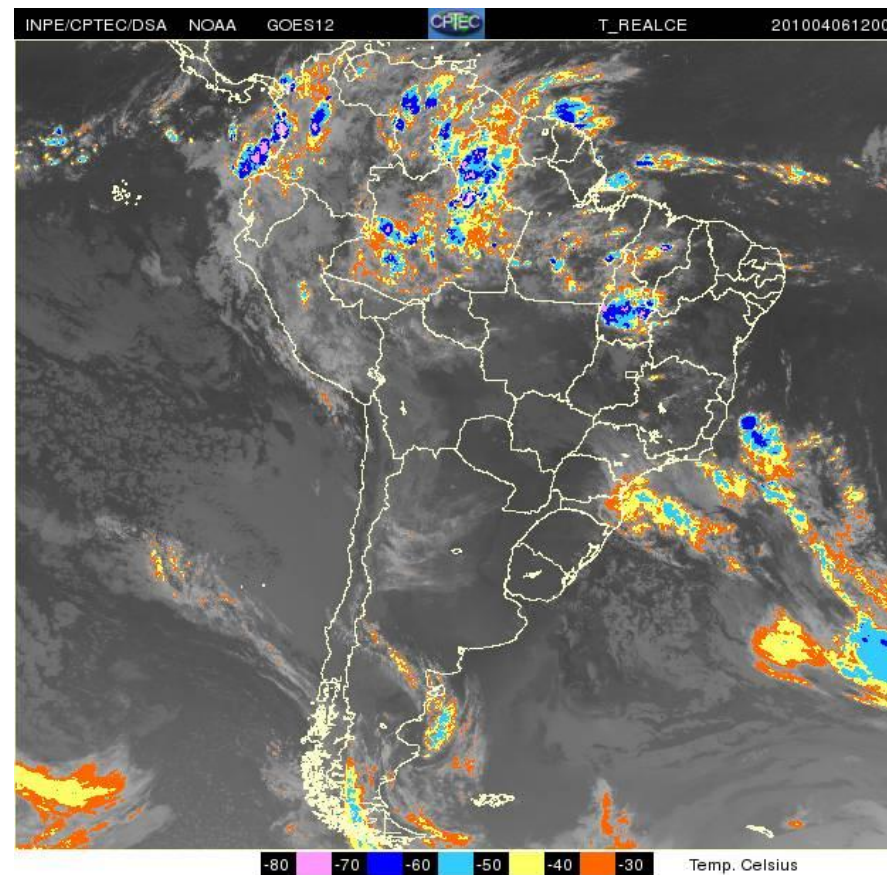


(d)

Figura 24 - Continuação.

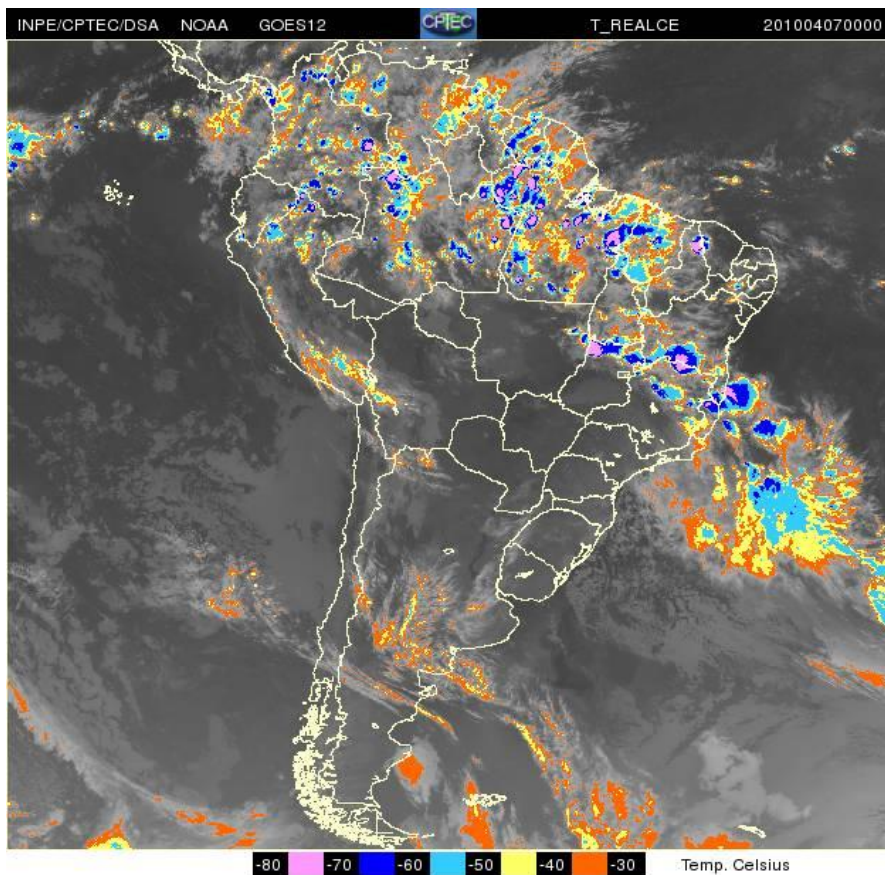


(e)

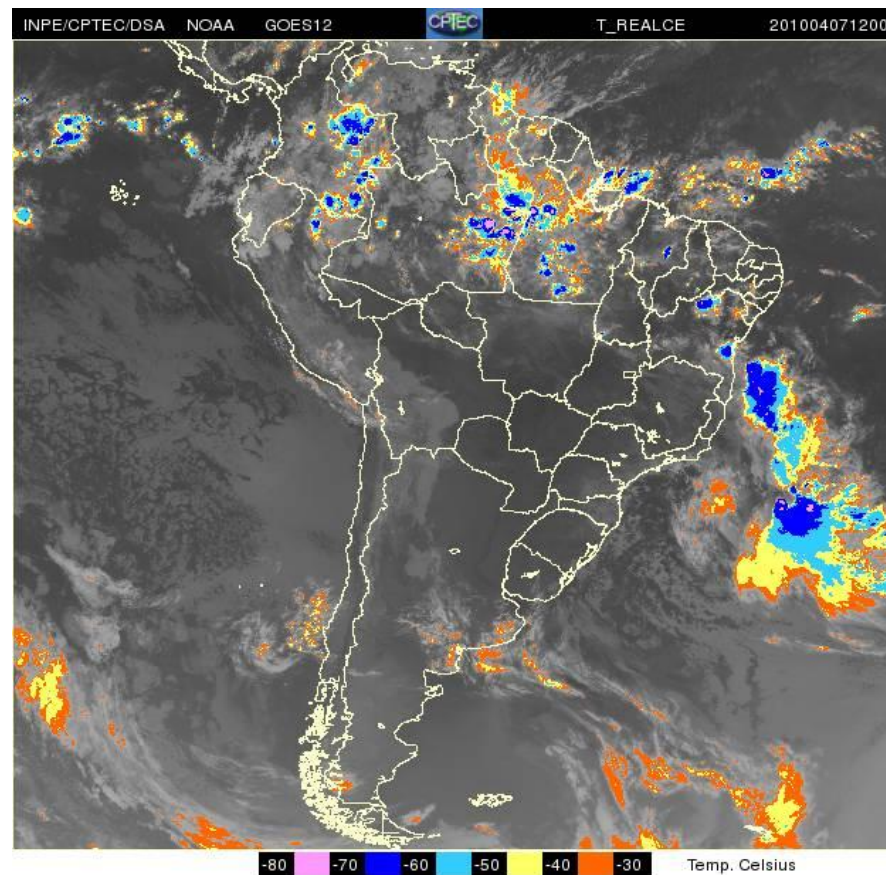


(f)

Figura 24 - Continuação.



(g)

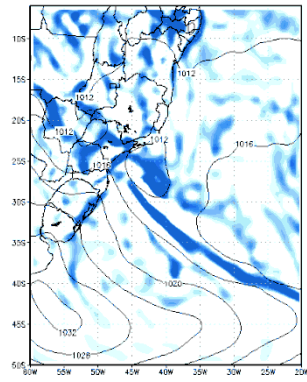


(h)

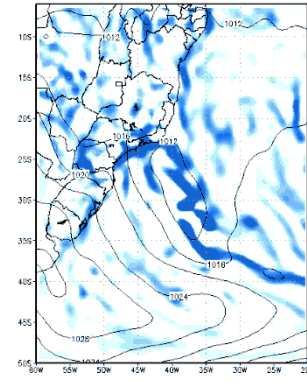
Figura 24 – Continuação

5.3. ANÁLISE SINÓTICA COM DADOS DO CSFR

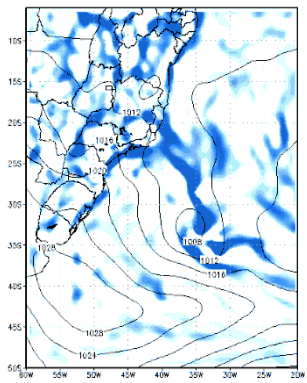
A Figura 25 composta do campo de divergência do fluxo de umidade às 00Z do dia 5 mostra, mais uma vez a atuação de um ciclone no Oceano Atlântico, com pressão de 1004 hPa, junto ao litoral do Rio de Janeiro, como já havia sido mostrado na carta sinótica. A evolução do campo de PNMM mostra que esse centro de baixa pressão se desloca mais para o oceano, em direção à SE, conforme o sistema frontal avança sobre a Região Sudeste do Brasil. Nessa mesma figura, pode-se perceber claramente que, a partir das 12Z do dia 05, configurou-se uma área de convergência de umidade na região costeira do estado do Rio de Janeiro, que permaneceu na região durante todo o período dos principais eventos de chuvas sobre as cidades do Rio de Janeiro e de Niterói (desde o dia 05/04 até o dia 07/04). Tal configuração, certamente, teve um papel importante na longa permanência das chuvas sobre a região de estudo.



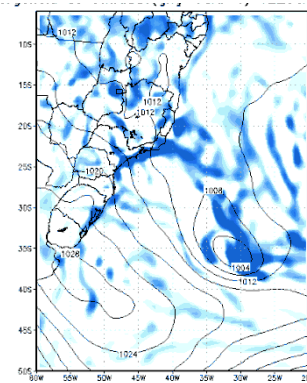
(a)



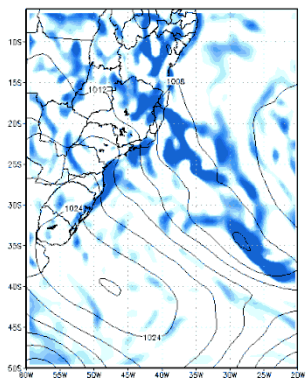
(b)



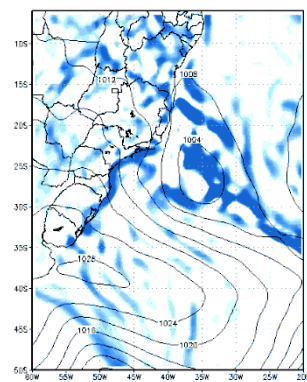
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 25 – Campo de Divergência do Fluxo de Umidade para o período do evento:
 (a) 05/04/2010 – 00Z (b) 05/04/2010 - 12Z; (c) 06/04/2010 – 00Z; (d) 06/04/2010 –
 12Z; (e) 07/04/2010 – 00Z; (f) 07/04/2010 – 12Z.

A Figura 26, composta dos campos de advecção de temperatura e vento em 1000 hPa, mostra que existia uma zona de descontinuidade de advecção de temperatura, relacionada com a presença da frente fria, zona esta que se estendia desde as proximidades do litoral do estado de São Paulo, até boa parte do oceano Atlântico Sul, às 00 Z do dia 05/04 (Figura 26a). A análise conjunta com o campo de vento mostra, coerentemente, a presença de vento de componente sul atuando na região de advecção fria (em azul), e de componente norte na área de advecção quente (em tons de amarelo e avermelhado). Às 12 Z (Figura 26b) pode-se perceber que a região de fronteira entre as advecções fria e quente se deslocou ligeiramente para Nordeste, se aproximando mais do litoral do estado do Rio de Janeiro, onde já se podia observar a presença de advecção fria sobre o Rio. A evolução desses campos nos horários subsequentes (dias 06/04 e 07/04 – Figuras 26c, 26d e 26e) mostra que a advecção fria e a presença de vento de sul se tornam cada vez mais presentes sobre a região Sudeste do Brasil, incluindo os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais, e a descontinuidade frontal no campo de advecção térmica, permanecendo destacada, principalmente sobre o oceano. No horário das 12 Z do dia 07/04 (Figura 26f), apesar de a permanência do vento de componente sul atuando sobre a Região Sudeste, pode-se perceber uma pequena área de advecção quente, presente na costa dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro.

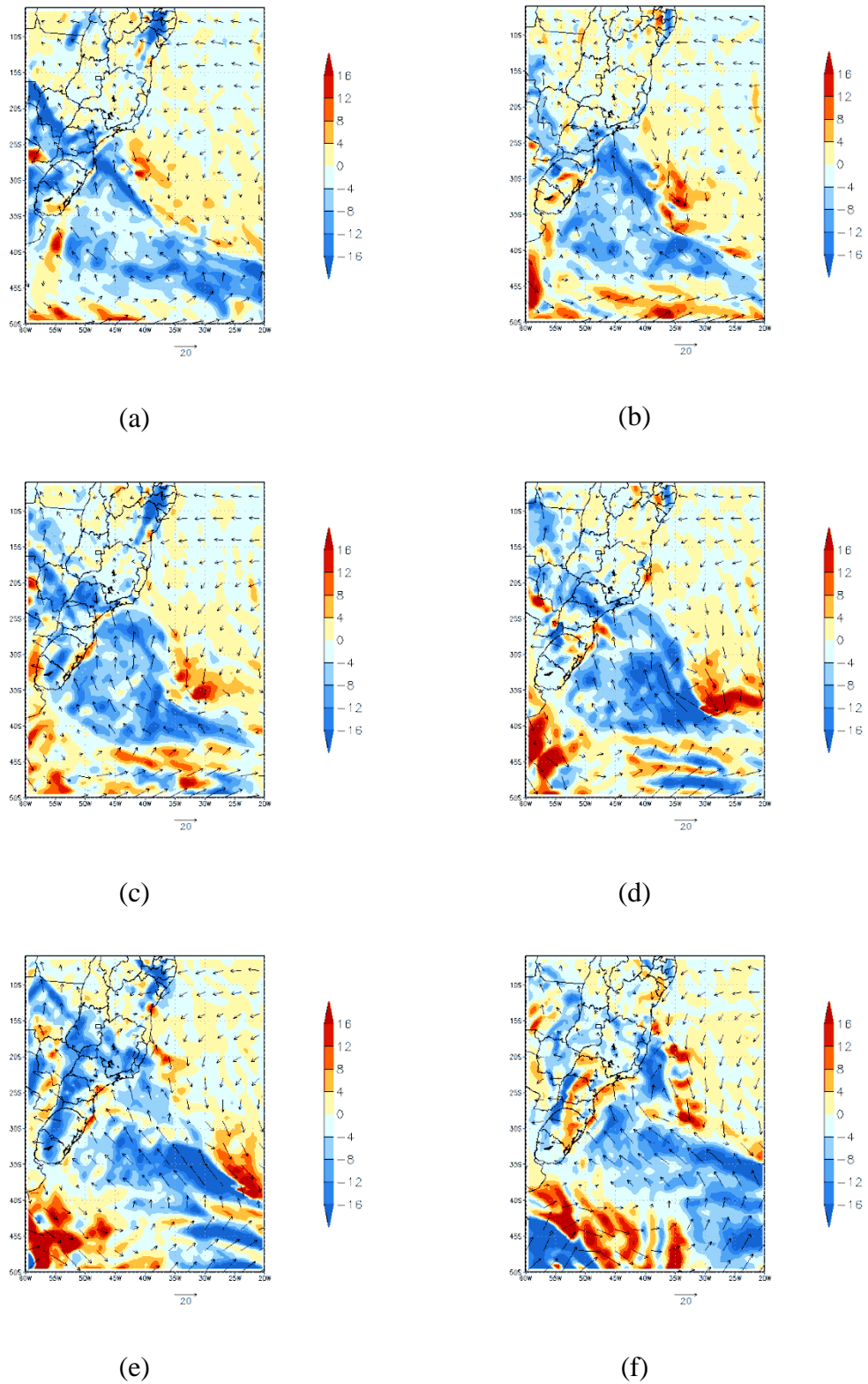
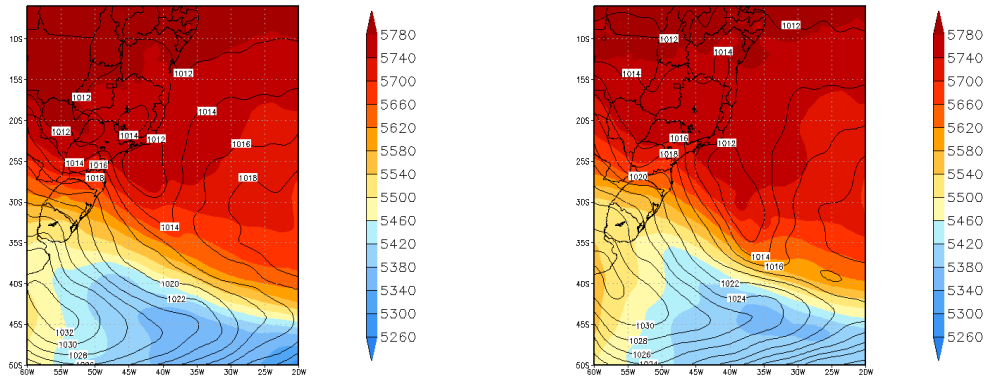


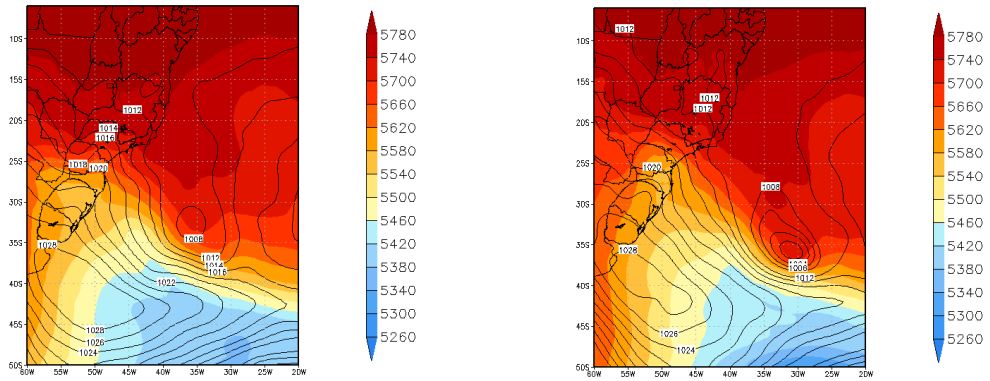
Figura 26 – Campo de advecção de temperatura e vento em 1000 hPa para o período do evento: (a) 05/04/2010 – 00Z (b) 05/04/2010 - 12Z; (c) 06/04/2010 – 00Z; (d) 06/04/2010 – 12Z; (e) 07/04/2010 – 00Z; (f) 07/04/2010 – 12Z.

O campo de espessura entre 1000 e 500 hPa (Figura 27), sobreposto ao campo de PNMM, ajuda a mostrar mais uma vez a aproximação do sistema frontal na região Sudeste, e a chegada de ar mais frio (espessuras menores) sobre o estado do Rio de Janeiro, principalmente a partir das 12 Z do dia 06/04 (Figura 27d). A evolução do campo de PNMM apresentada nesta mesma figura também mostra um aspecto interessante ligado ao caso: a intensificação do ciclone próximo à costa da região Sudeste também teve um papel importante na intensificação e persistência dos ventos de componente sul, que se dirigiram em direção a costa do estado do Rio de Janeiro, e estiveram presentes durante quase todo o período de estudo (como apresentado na Figura 26), estando estes ventos ligados a advecção de ar úmido proveniente do oceano, e certamente também relacionados com a convergência de umidade presente (e também persistente) junto ao litoral dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo (como mostrado na Figura 26).



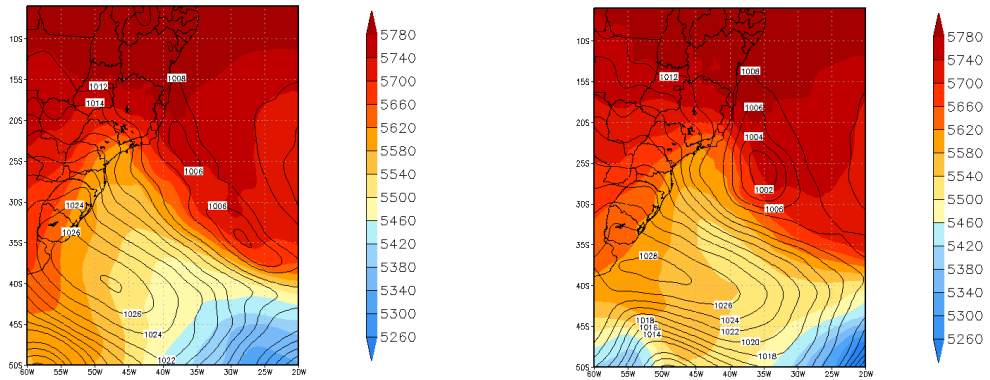
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

Figura 27 - Campo de espessura 500/1000 hPa e PNMM para o período do evento: (a) 05/04/2010 – 00Z; (b) 05/04/2010 - 12Z; (c) 06/04/2010 – 00Z; (d) 05/04/2010 – 12Z; (e) 07/04/2010 – 00Z; (f) 07/04/2010 – 12Z.

O escoamento em 500hPa (Figura 28) sobreposto ao campo de PNMM, mostra que a região sudeste, incluindo o estado do Rio, esteve sob o setor leste de um cavado em 500hPa, principalmente a partir das 00Z do dia 26/04 (Figura 28c). Esse posicionamento em relação ao cavado de níveis médios caracteriza uma região dinamicamente favorável a ocorrência de sistemas de tempo que provocam chuvas (HOLTON, 2004), e pode contribuir para a precipitação nestas áreas. Da mesma forma, a presença deste cavado em níveis médios contribuiu dinamicamente para a intensificação e manutenção do ciclone sobre o oceano, mencionado na análise da Figura 27, por este também estar a leste do eixo deste cavado de níveis médios.

Na análise do escoamento na alta troposfera – 250 hPa – Sobreposto ao campo de PNMM (Figura 29), também é possível observar um cavado bastante pronunciado atuando sobre a região de interesse, e que certamente também contribuiu para a intensificação do ciclone sobre o oceano, observado em superfície, e representou um fator dinamicamente favorável à formação de sistemas de tempo causadores de chuva na região de interesse, uma vez que o centro de baixas pressões de superfície se encontrava posicionado sob o eixo do cavado de altos níveis, também.

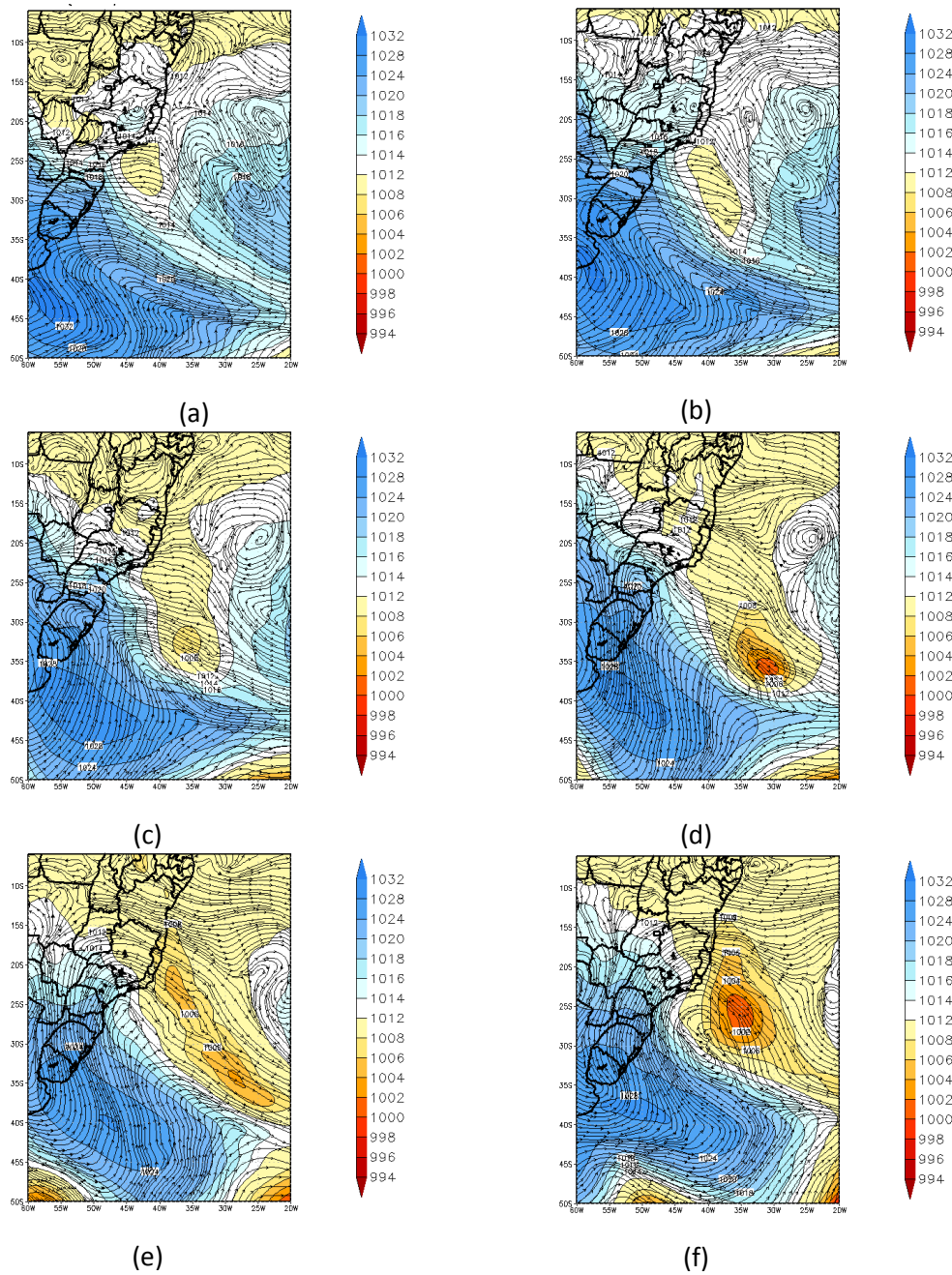


Figura 28 - Campo de MSL e vento (em linhas de corrente) em 500 hPa para o período do evento. (a) 05/04/2010 – 00Z, (b) 05/04/2010 - 12Z; (c) 06/04/2010 – 00Z; (d) 06/04/2010 – 12Z; (e) 07/04/2010 – 00Z; (f) 07/04/2010 – 12Z.

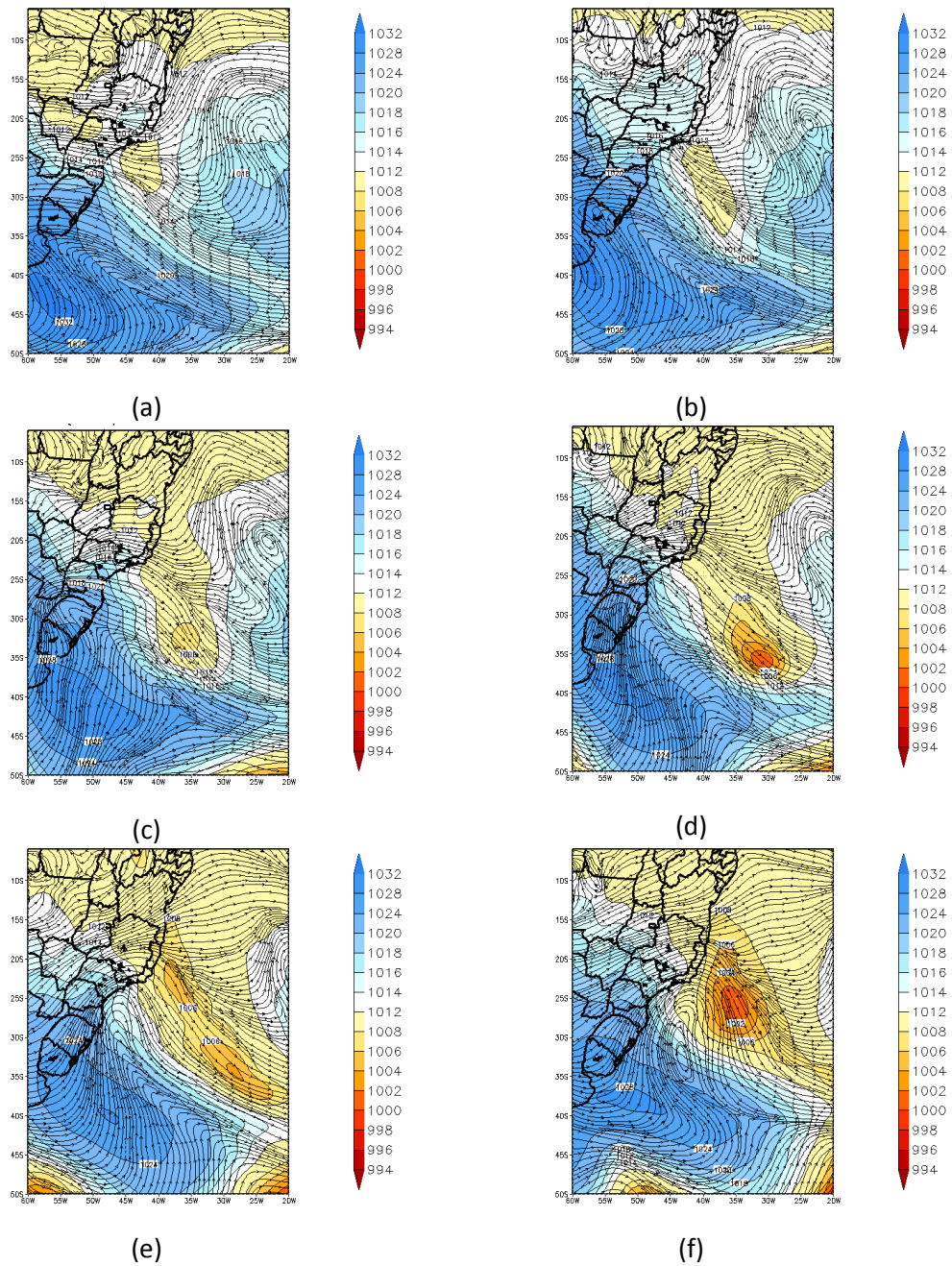


Figura 29 - Campo de MSL e vento (em linhas de corrente) em 250 hPa para o período do evento. (a) 05/04/2010 – 00Z, (b) 05/04/2010 - 12Z; (c) 06/04/2010 – 00Z; (d) 06/04/2010 – 12Z; (e) 07/04/2010 – 00Z; (f) 06/04/2010 – 12Z.

Na Figura 30, nota-se que o jato em 250 hPa acompanha o deslocamento da frente fria. Vale salientar que a região conhecida como “entrada equatorial do jato de altos níveis” possui divergência, e ajuda a induzir a convergência nos baixos níveis (UCCELLINI e JOHNSON, 1979). Nos dias 04 e 05 de abril de 2010 (Figuras 30a, 30b, 30c e 30d) nota-se o citado padrão do jato acompanhando o deslocamento do sistema frontal. Nos dias 06 e 07 (Figuras 30e, 30f, 30g e 30h) o jato posicionou-se de forma que a região da sua entrada equatorial pode ter favorecido à formação de nuvens na área de influência da frente fria, próximo à região de interesse. Nota-se que no dia 07/04/2010 o jato está sobre do estado do Rio de Janeiro, onde sua direção está de noroeste e suas velocidades máximas variando de 30 a 40 m/s.

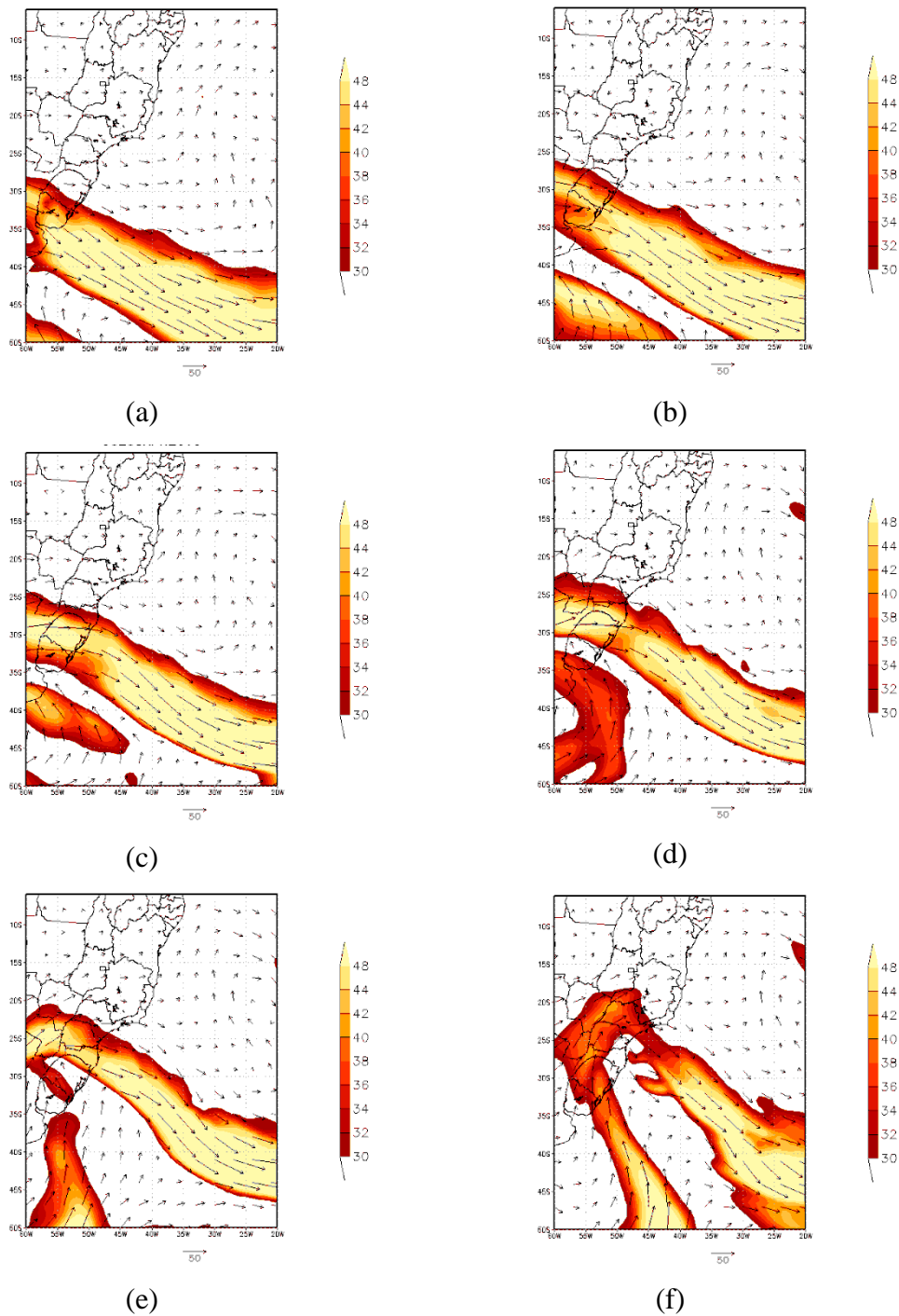


Figura 30 - Campo de vento em 250 hPa, destacando a corrente de jato (colorido) para o período do evento. (a) 04/04/2010 – 00Z, (b) 04/04/2010 - 12Z; (c) 05/04/2010 – 00Z; (d) 05/04/2010 – 12Z; (e) 06/04/2010 – 00Z; (f) 06/04/2010 – 12Z;(g) 07/04/2010 – 00Z; e (h) 07/04/2010 – 12Z.

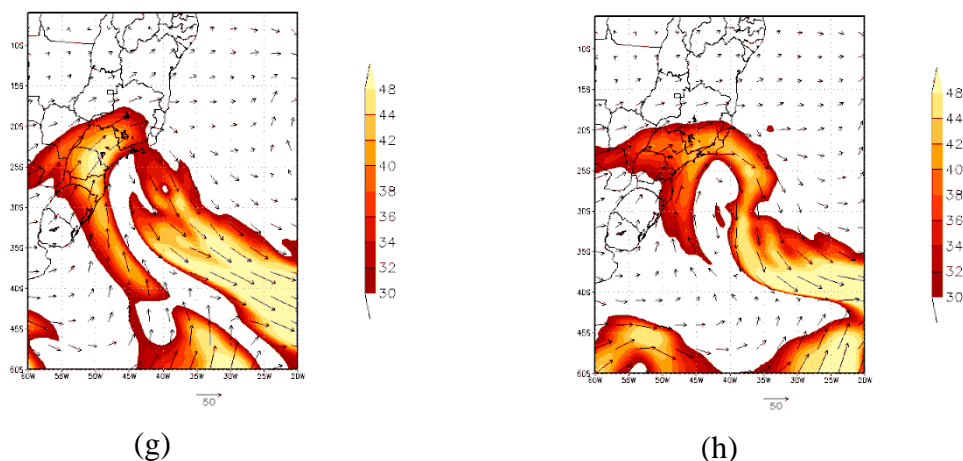
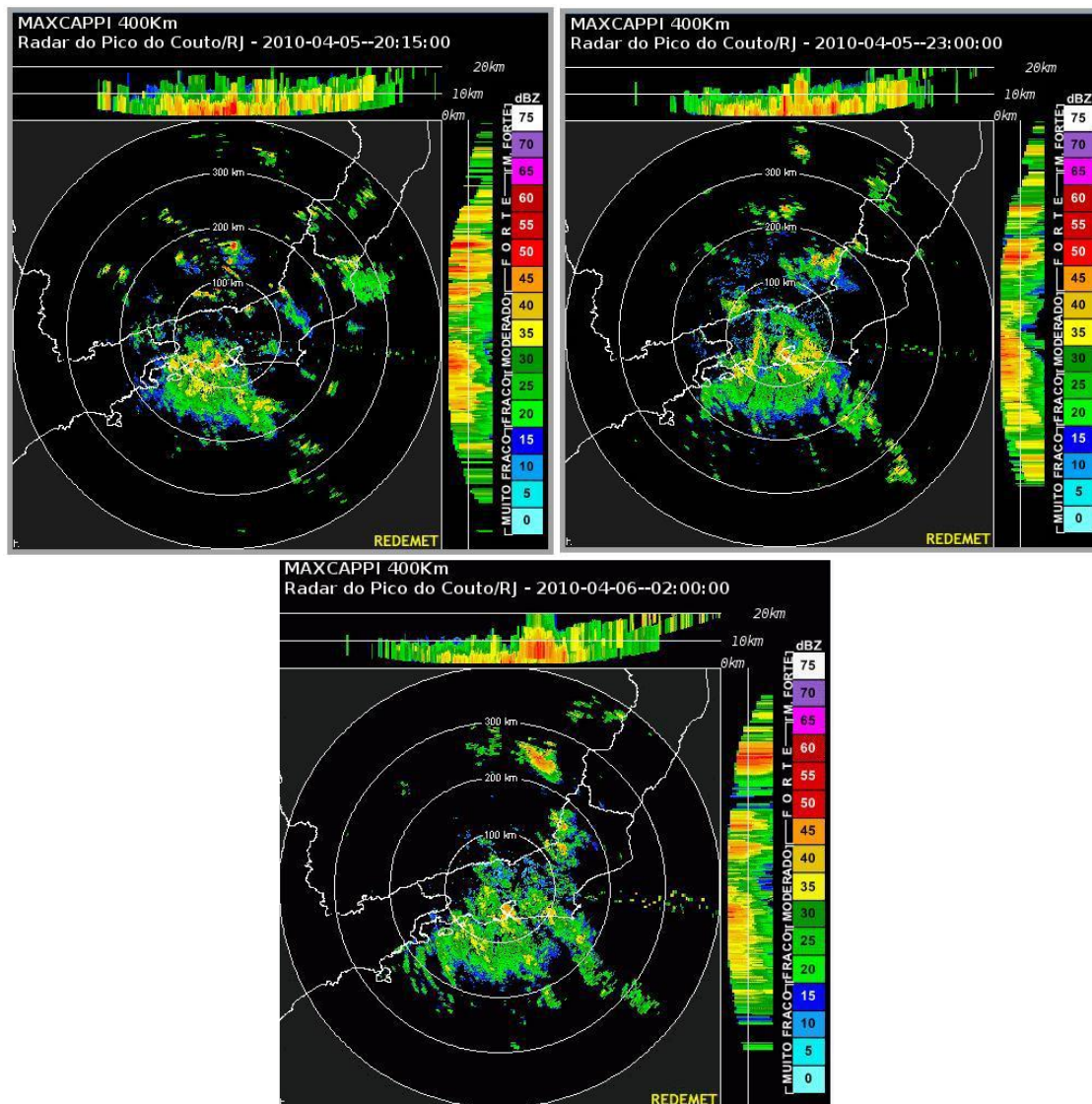


Figura 30 – Continuação.

5.4. RADAR METEOROLÓGICO DO PICO DO COUTO (REDEMET)

Na análise em escala menor, a Figura 31 apresenta as imagens do radar meteorológico do Pico do Couto, onde pode ser observada a precipitação de caráter intenso que atingiu o Rio de Janeiro. Através das imagens, pode ser visto que, a chuva que teve início no fim da tarde do dia 05/04 e se prolongou durante a noite e madrugada, se estendeu até a manhã do dia seguinte, associada à instabilidade frontal. As imagens mostram que a RMRJ foi a mais atingida pela passagem do sistema frontal. O radar detectou a chegada da frente e conseqüentemente a chuva às 20Z do dia 05/04/2010. Durante a madrugada do dia 05/04/2010 até a manhã do dia 06/04/2010, as chuvas permaneceram sobre a RMRJ com caráter de moderado a forte.



Fonte: REDEMET (2010)

Figura 31 - Imagens do radar do Pico do Couto para (a) dia 05/04 às 20:15Z, (b) dia 05/04 às 23:00Z e (c) dia 06/04 às 02:00Z, mostrando um sistema convectivo que provocou o escorregamento do Morro do Bumba.

Essa série de padrões sinóticos apresentados mostrou a existência de condições favoráveis à formação e evolução de sistemas de tempo que produzem chuvas junto ao litoral da região Sudeste, em especial, o estado do Rio de Janeiro, como foi observado no período de 05/04, 06/04 e 07/04/2010. Entretanto, para se entender melhor, e com maior detalhamento, os padrões que possam ter desencadeado as chuvas mais intensas em algumas áreas preferenciais (principalmente nos municípios de Niterói, nos dias 05 e 07/04, e do Rio de Janeiro, na madrugada, manhã e tarde do dia 06/04), e entender também a variação espacial e temporal dessa chuva, em uma escala menor (mesoescala), optou-se, nesse trabalho por realizar experimentos numéricos em alta resolução, com o modelo

de mesoescala BRAMS. Com os resultados destes experimentos foi possível se identificar alguns padrões em mesoescala, principalmente em termos de ventos e de umidade, que podem ter sido responsáveis pelas variações espaciais e temporais das chuvas associadas com o evento estudado. Da mesma forma foi possível avaliar a potencialidade do modelo (com sua maior resolução, e suas equações e parametrizações mais sofisticadas do que se encontra nas reanálises) em simular as chuvas em locais e horários mais realísticos, mantendo sua persistência, de forma que poderia ter sido uma ferramenta de auxílio a previsão do tempo, caso tivesse instalado em caráter operacional na data do evento. Tais aspectos serão discutidos nas sessões subsequentes.

5.5. RESULTADOS COM O BRAMS: O TESTE DE SENSIBILIDADE E O EXPERIMENTO ESCOLHIDO.

Como mencionado no capítulo de “metodologia” do presente trabalho, foram realizados dois experimentos com o modelo. O primeiro experimento foi realizado com os parâmetros padrões (“*default*”) da parametrização microfísica de nuvens do BRAMS (que foram desenvolvidas originalmente para o hemisfério norte, e para regiões de predominância continental). Todavia, as simulações referentes à pluviosidade (taxa de precipitação e precipitação acumulada) não geraram resultados satisfatórios, ou seja, os valores foram extremamente subestimados com essas configurações originais do modelo.

Na análise desse primeiro experimento, a Figura 32 mostra os valores de precipitação acumulada na grade 2 do modelo para os dias 05/04 (Figura 32a), 06/04 (Figura 32b), 07/04 (Figura 32c) e o acumulado total nos 3 dias (Figura 32d). A Figura 33 mostra a mesma variável, nos mesmos dias, mas para a grade 3 do modelo. Nota-se que, neste primeiro experimento, o modelo não consegue simular precipitação na região de interesse no dia 05/04 na grade 2 (Figura 32a), e na grade 3 (Figura 33a) simulou apenas um valor bem pouco significativo sobre Niterói. Para o dia 06/04, o BRAMS consegue simular precipitação próxima à área de interesse, mas com valores bem baixos, comparados com o que aconteceu no período estudado, o que pode ser visto na grade 2 (Figura 32b) e na grade 3 (Figura 33b), onde os valores máximos de precipitação não ultrapassam a 20 mm próximo à área de Niterói e RMRJ. Na análise dos valores acumulados de chuva para o dia 07/04 (Figuras 32c, para a grade 2 e 33c, para a grade 3), e também do acumulado para os 3 dias de estudo (Figuras 32d, para a grade 2 e 33d, para a grade 3), acontece algo

semelhante ao que foi simulado para o dia 06, com o modelo simulando precipitação próxima à região de estudo, mas com valores extremamente baixos, comparando-se com o grande volume de chuvas que ocorreu nas datas do caso em estudo. Detalhando um pouco mais, fica claro que com as opções padrão do BRAMS, os valores máximos de chuva simulada pelo modelo, próximo à região de interesse, ficou em torno de 30 mm, acumulada nos 3 dias estudados (Figura 33d – grade 3).

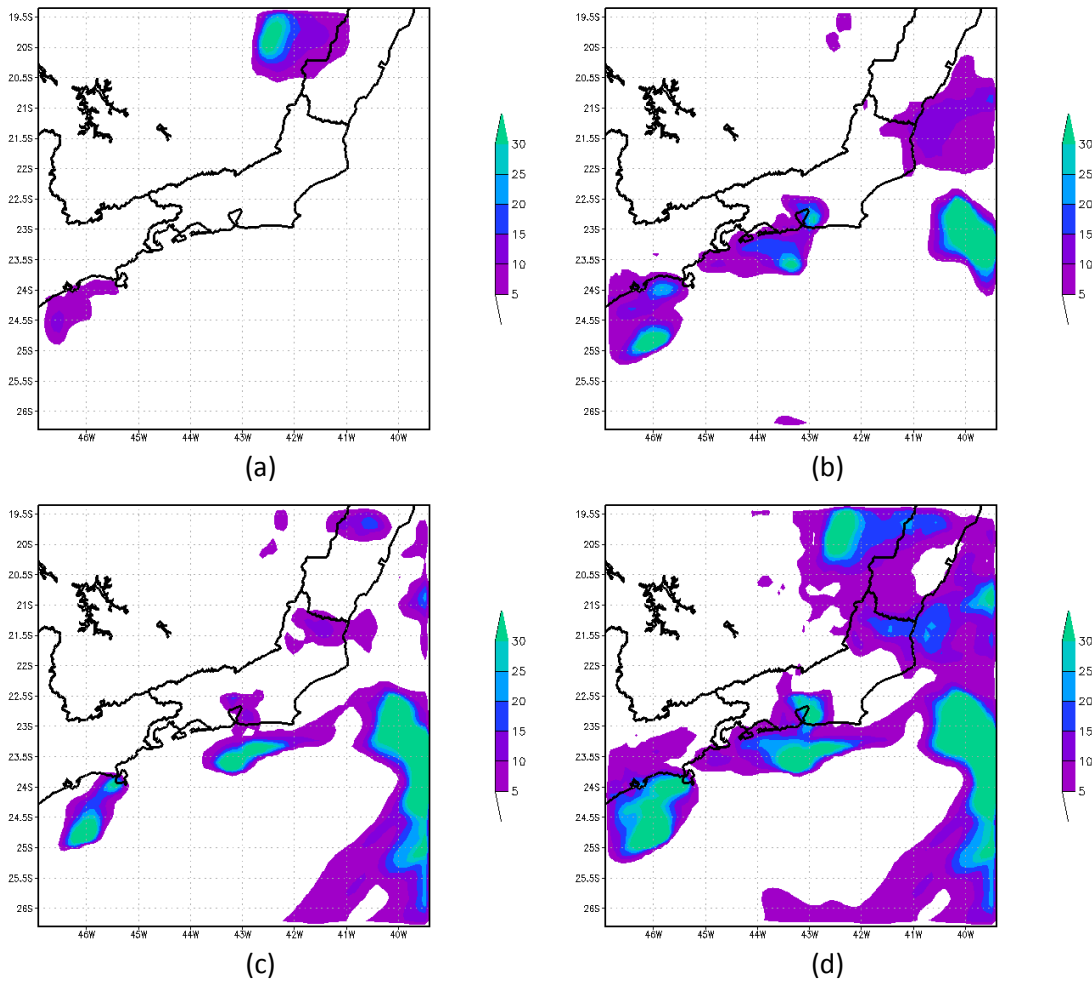
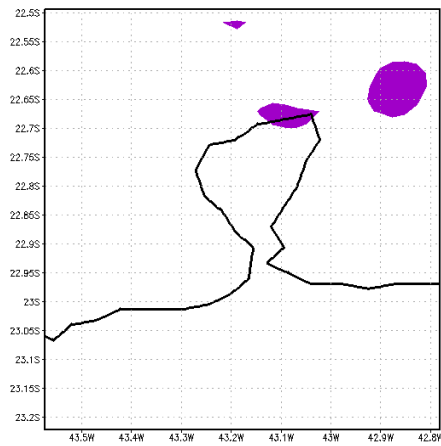
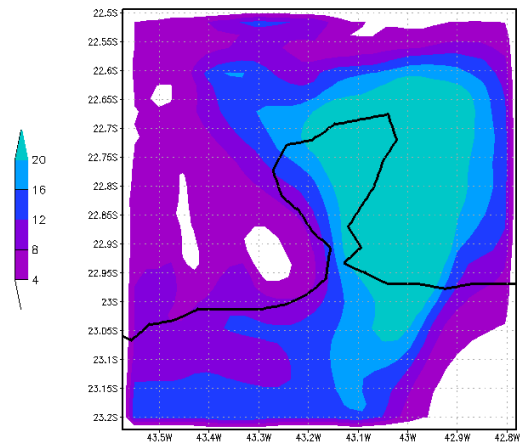


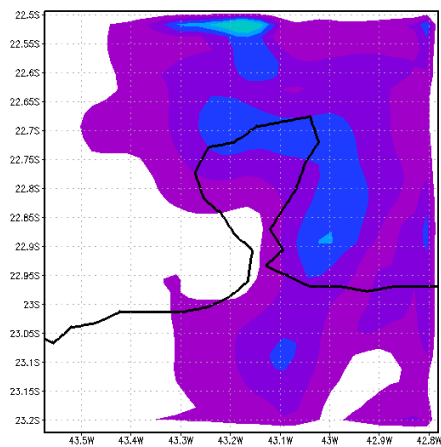
Figura 32 - Precipitação Acumulada no primeiro experimento com o BRAMS, simulada na grade 2, nos dias (a) 05/04/2010; (b) 06/04/2010; (c) 07/04/2010; (d) total em 72 horas.



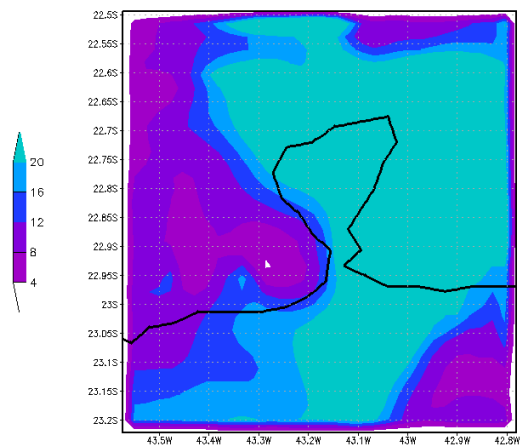
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 33 - Precipitação Acumulada no primeiro experimento com o BRAMS, simulada na grade 3, nos dias (a) 05/04/2010; (b) 06/04/2010; (c) 07/04/2010; (d) total em 72 horas.

O segundo experimento foi realizado com opções diferentes na parametrização de microfísica de nuvens do BRAMS, onde a modificação mais significativa foi a utilização de uma distribuição de núcleos de condensação (CCN – “*Cloud Condensation Nuclei*”) que priorizou núcleos de condensação de tamanho maior (mais compatível com os núcleos de condensação típicos do ar sobre os oceanos) ao invés dos de tamanho menor, que são os que são recomendados para rodadas “padrão” do modelo BRAMS, e tem características mais continentais. As informações a respeito dessas modificações na parametrização de microfísica foram fornecidas via “informação pessoal” pelo Professor Pedro Leite da Silva Dias (IAG – Universidade de São Paulo), e tais modificações foram utilizadas aqui, pela primeira vez em experimentos de pesquisa no Departamento de Meteorologia da UFRJ, no desenvolver desse trabalho de mestrado. Com essas novas opções físicas, o impacto na chuva simulada foi bastante significativo.

No dia 05/04 tanto na grade 2 (Figura 34a) como na grade 3 (Figura 35a) o BRAMS simulou valores de precipitação superiores a 35 mm. Para o dia 06/04, o BRAMS volta a simular precipitação próxima à área de interesse, mas com valores acima de 60 mm, ou seja, um volume de chuvas bastante superior ao encontrado no primeiro experimento que pode ser visto na grade 2 (Figura 34b) e na grade 3 (Figura 35b). Nos acumulados para o dia 07/04 (Figuras 34c, para a grade 2 e 35c, para a grade 3), e também o acumulado para os 3 dias de estudo (Figuras 34d, para a grade 2 e 35d, para a grade 3), acontece algo semelhante ao que foi simulado para o dia 06, com o modelo simulando valores de precipitação próxima à região de estudo acima de 110 mm, ou seja, substancialmente mais altos do que os encontrados no primeiro experimento. Nesse “teste de sensibilidade” englobando as modificações efetuadas nos parâmetros de microfísica do modelo, ficou claro que tais modificações geraram um impacto extremamente significativo no resultado da precipitação acumulada simulada. A evidência mais marcante pode ser exemplificada pelo fato de que a precipitação total acumulada sobre Niterói aumentou de um valor de 14 mm (com as opções padrões) para valores superiores a 100 mm (com as opções modificadas, priorizando os CCNs de tamanho maior). Mesmo com a permanência da subestimativa do valor de precipitação acumulada, esses resultados mostraram valores mais próximos da realidade ocorrida no período de estudo. Como foi apresentado na análise sinótica desse caso, ficou bem caracterizado que o sistema de grande escala que atuou, e contribuiu decisivamente para a precipitação na região de estudo, teve origem oceânica, e foi predominantemente alimentado por ar e umidade provenientes do mar. Por

isso, utilizar uma distribuição de núcleos de condensação, na parametrização de microfísica, com valores mais representativos dos encontrados sobre o oceano, é mais coerente e mais realístico do que utilizar as opções padrões do modelo, que priorizam núcleos de condensação de tamanhos menores, característicos de regiões continentais.

Devido a precipitação mais realística, simulada no segundo experimento, todos os resultados e análises apresentados são referentes ao segundo experimento.

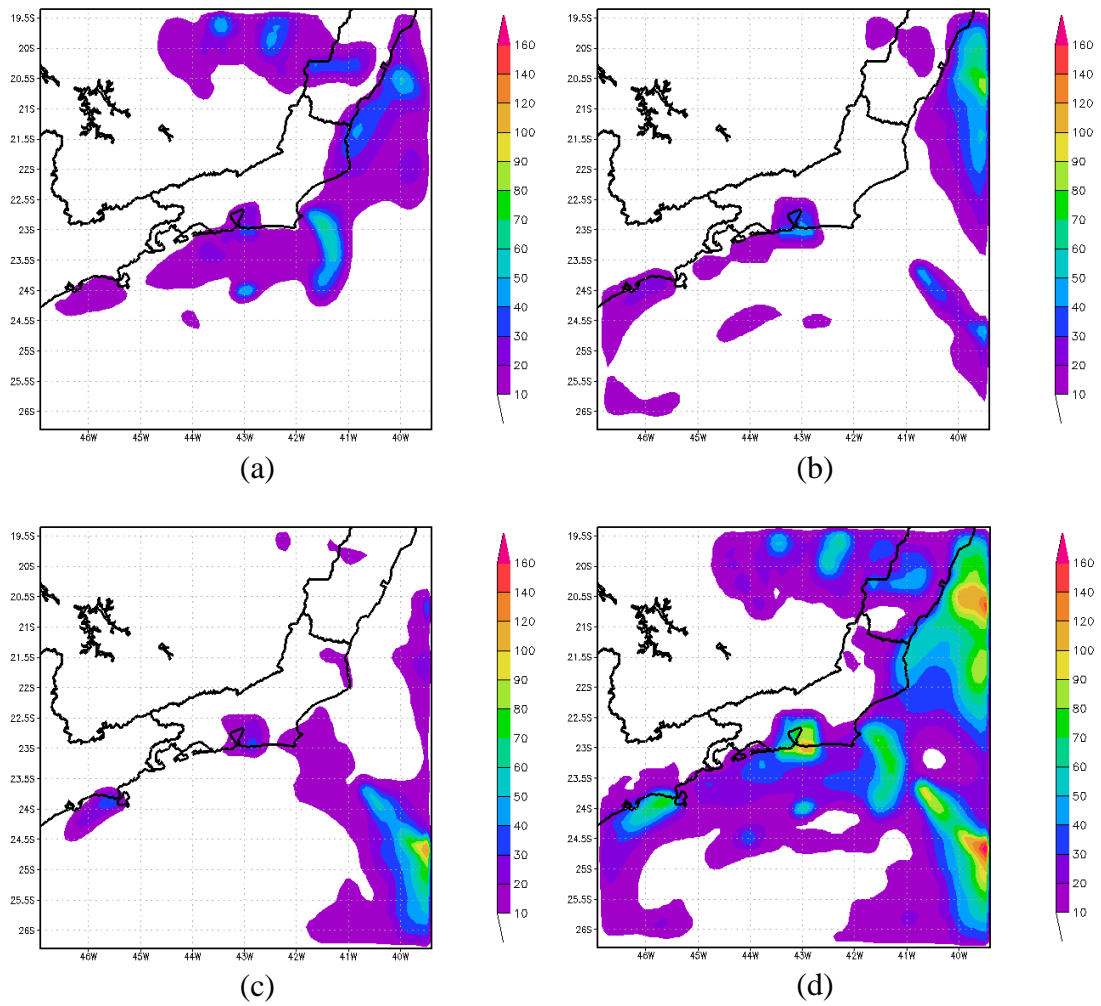


Figura 34 - Precipitação Acumulada no segundo experimento com o BRAMS, simulada na grade 2, nos dias (a) 05/04/2010; (b) 06/04/2010; (c) 07/04/2010; (d) total em 72 horas.

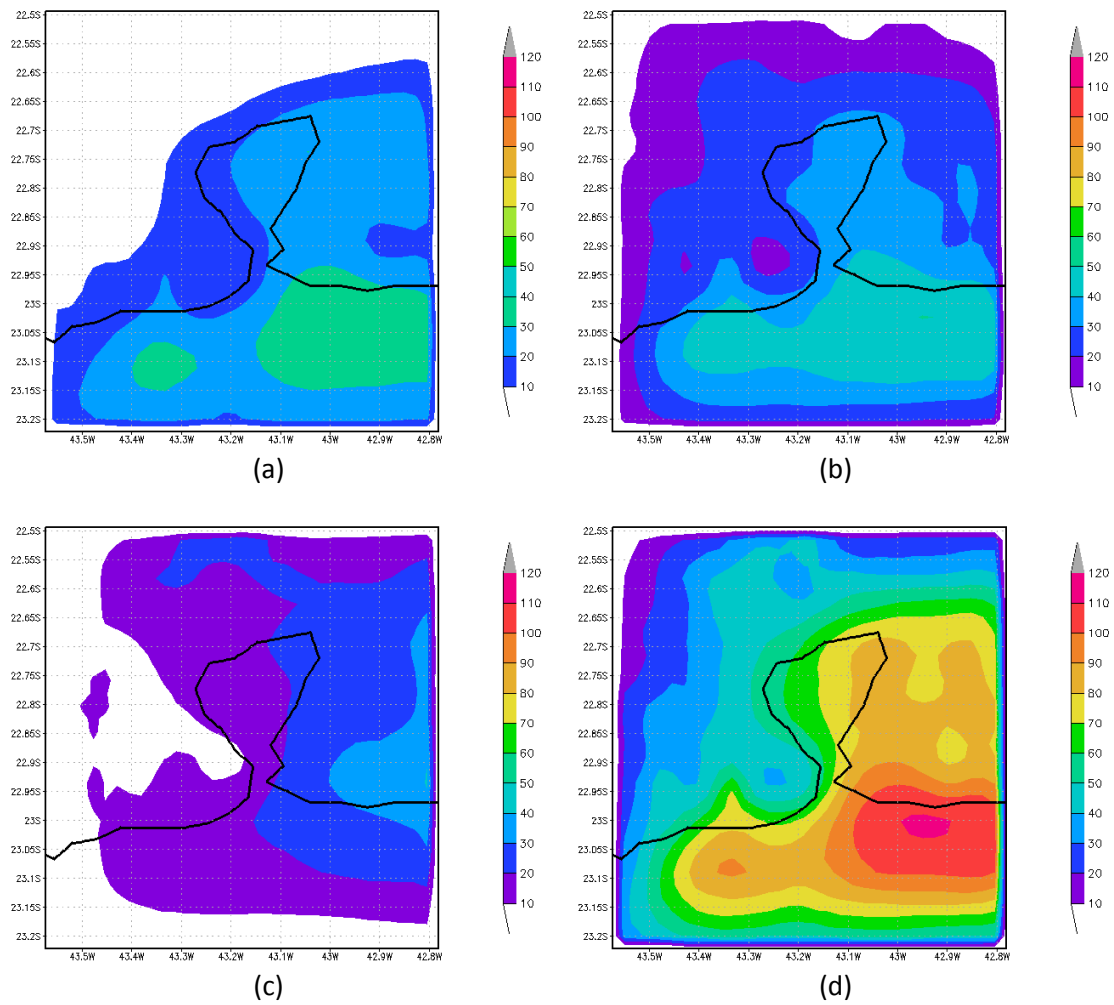


Figura 35 - Precipitação Acumulada no segundo experimento com o BRAMS, simulada na grade 3, nos dias (a) 05/04/2010; (b) 06/04/2010; (c) 07/04/2010; (d) total em 72 horas.

5.6. VERIFICAÇÃO EM ESCALA SINÓTICA DOS RESULTADOS DO MODELO BRAMS COM DADOS DO CSFR

Nesse tópico é apresentada uma comparação de alguns campos simulado na Grade 1 do BRAMS com as reanálises CSFR, de forma a verificar se o modelo de mesoescala conseguiu reproduzir coerentemente alguns padrões em escala sinótica associados ao caso estudado. Foram escolhidos para essa verificação em escala sinótica, os campos de escoamento (vento) nos níveis de 1000 hPa, 500 hPa e 250 hPa, de forma que se pudesse avaliar algumas condições dinâmicas em baixo, médio e alto níveis da troposfera.

Na baixa troposfera (Figura 36) percebe-se a presença e intensificação do escoamento de sul, vindo do oceano, em direção à costa do estado do Rio de Janeiro, que já era observado nos campos do CSFR das 12Z do dia 05/04 (Figura 36a) e na simulação do modelo (Figura 36b). Tal escoamento foi se intensificando ao longo dos dias, tanto nos campos do CSFR, como nos simulados pelo BRAMS. Entretanto, o BRAMS simulou um padrão de convergência de escoamento próximo à costa do Rio de Janeiro, que pode ser verificado principalmente a partir das 12Z do dia 06/04 (Figura 36c), e permaneceu às 00Z (Figura 36e) e 12Z (Figura 36f) do dia 07/04. Esse padrão de convergência em baixos níveis pode ter contribuído para a intensificação da convergência de umidade próxima à costa, que será apresentada, mais a diante, com mais detalhes para as Grades 2 e 3 do BRAMS. De uma forma geral, o BRAMS reproduziu a intensificação do escoamento vindo do oceano ao longo do período de estudo, assim como a organização e intensificação dos ventos associados ao aprofundamento do centro de baixa pressão, próximo ao litoral do estado do Espírito Santo (Figuras 36g, para o CSFR e Figura 36h, para a simulação do BRAMS), sendo que tal aprofundamento contribuiu de forma significativa para o escoamento de sul dirigindo-se para o litoral do Estado do Rio de Janeiro.

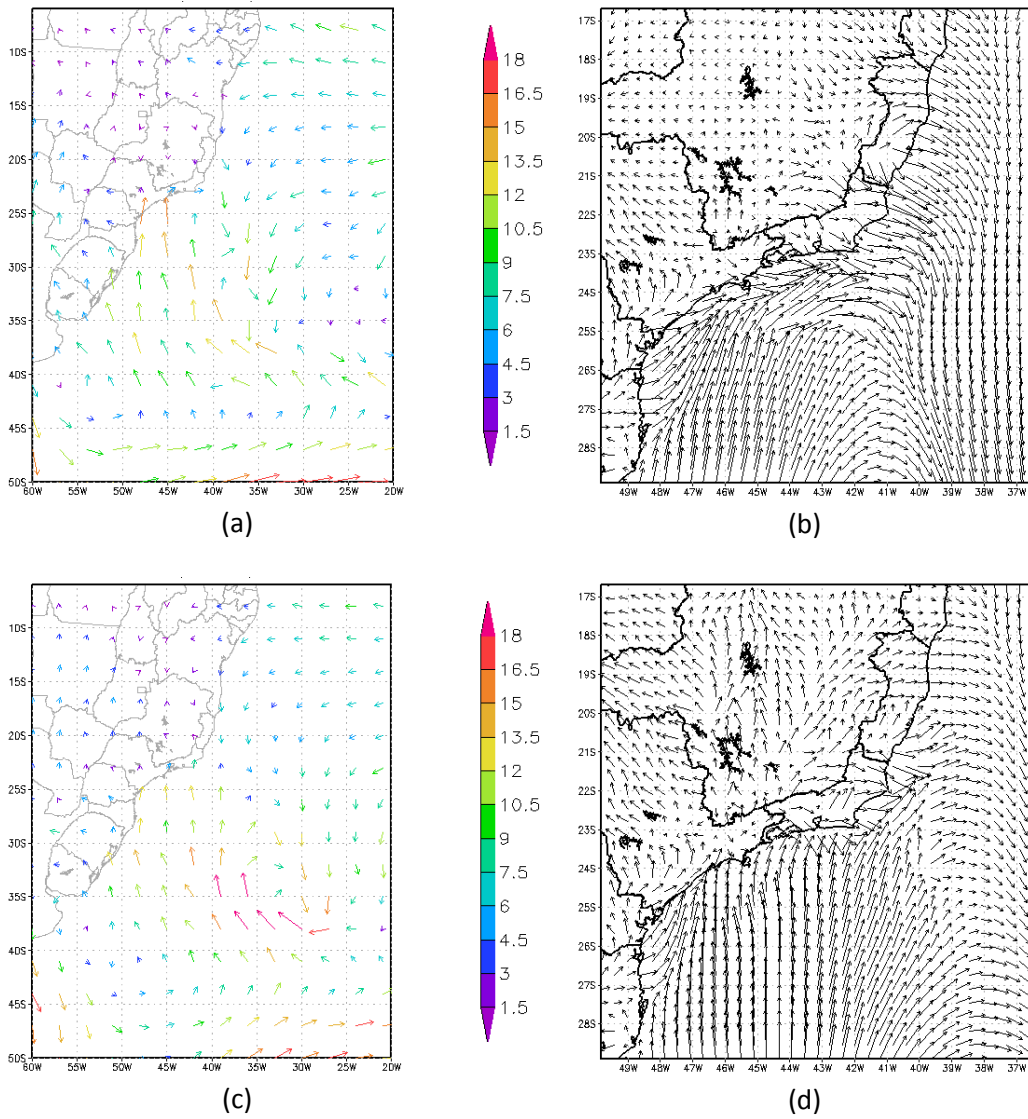


Figura 36 - Campo de vento a 1000 hPa para o período do evento. (a) 05/04/2010 – 12Z, (c) 06/04/2010 - 12Z; (e) 07/04/2010 – 00Z; (g) 07/04/2010 – 00Z; Campo de vento do BRAMS - Grade 1 (b) 05/04/2010 – 12Z; (d) 06/04/2010 – 12Z; (f) 07/04/2010 – 00Z; (h) 07/04/2010 – 12Z.

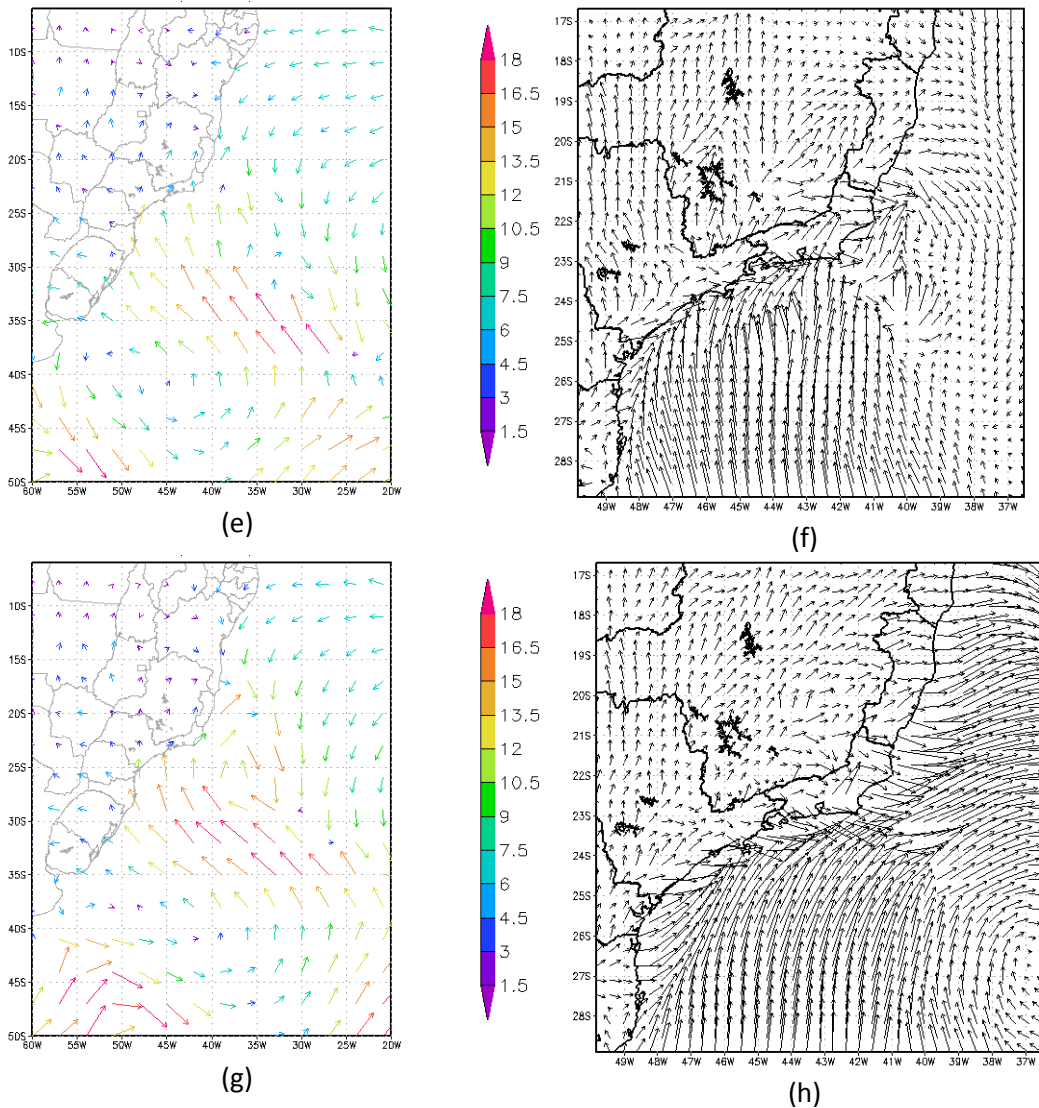


Figura 36 – Continuação.

Ao se avaliar o campo de vento em 500 hPa (Figura 37), percebe-se que o BRAMS, de uma forma geral, conseguiu simular de forma coerente o escoamento em altitude na Grade 1. A Figura 37a mostra o campo de vento gerado a partir das análises do CSFR para as 00Z do dia 06/04. Na simulação do BRAMS para esse mesmo horário (Figura 37b) percebe-se, sobre a região Sudeste pequenas ondulações no escoamento, sendo que o BRAMS mostra uma pequena área de difluência no escoamento na divisa entre os estados de Minas Gerais (MG) e Espírito Santo (ES). Na sequência da simulação, o escoamento encontrado pelo BRAMS sobre a região Sudeste do Brasil, também reproduz coerentemente a chegada e amplificação do cavado em níveis médios, como pode ser observado no dia 07/04 às 00Z (horário em que também ocorria precipitação de

forma contínua sobre a área de estudo). Tais chegadas e ampliações do cavado, no CSFR e no BRAMS, podem ser observadas nas Figuras 37c e 37d.

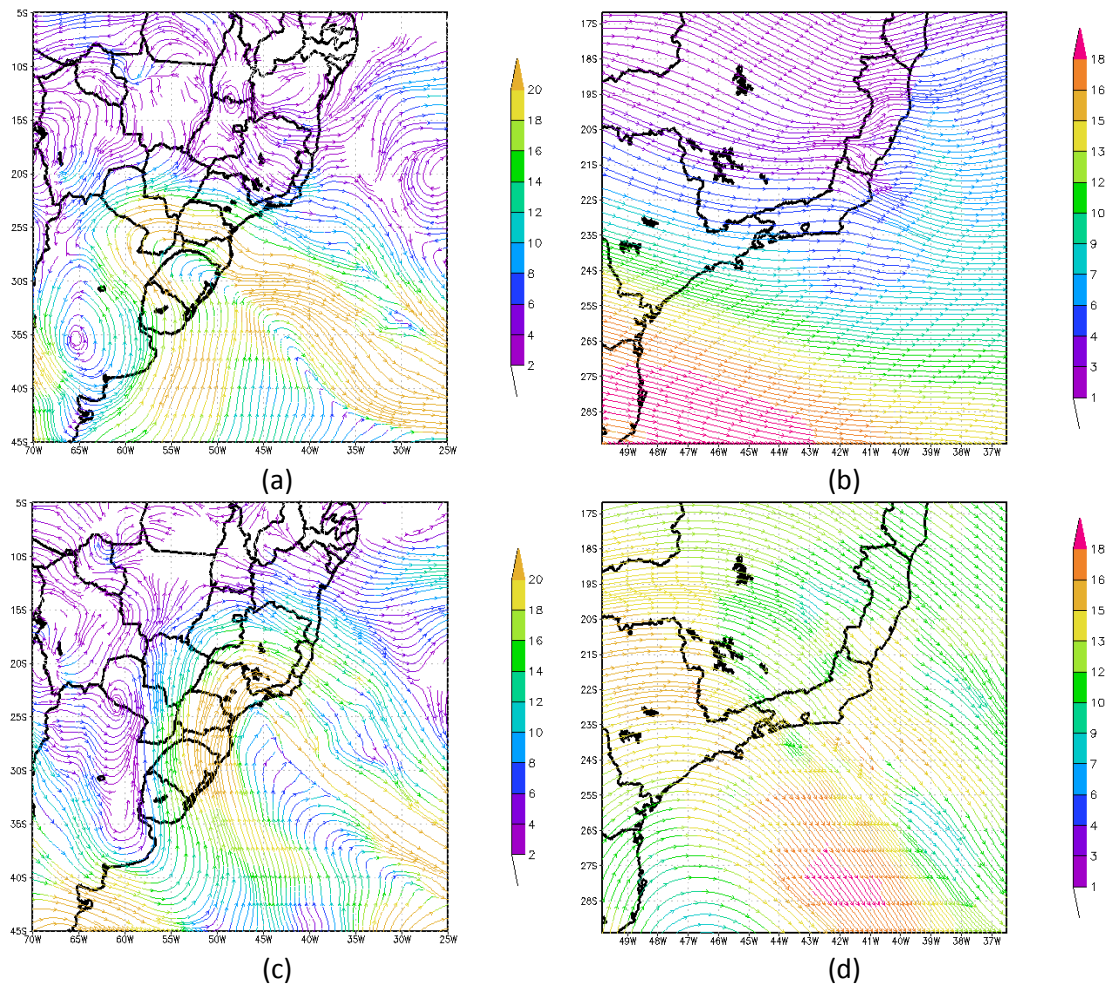


Figura 37 - Campo de vento (linhas de corrente) em 500 hPa para o período do evento. Para os dados do CSFR: (a) 06/04/2010 – 00Z, (c) 07/04/2010 - 00Z; e simulados pelo BRAMS na Grade 1 (b) 06/04/2010 – 00Z; (d) 07/04/2010 – 00Z.

Para o nível de 250 hPa (Figura 38), como mostrado para o nível de 500 hPa, o BRAMS também simulou a escala sinótica de forma semelhante ao que se observa nos campos do CSFR. Nos 2 horários apresentados na Figura 38, inclui-se a chegada e amplificação de um cavado sobre a região Sudeste do Brasil como pode ser visto, principalmente, às 00Z do dia 07/04 (Figuras 38c e 38d). Vale lembrar que a chegada desses cavados (tanto em níveis médios), como em níveis altos, provavelmente deram um suporte dinâmico para o aprofundamento do ciclone em superfície, que contribuiu para a intensificação dos ventos de sul que se dirigiram para o litoral do Estado do Rio de Janeiro, já discutidos na análise sinótica. A reprodução de forma coerente, simulada pelo modelo BRAMS com os campos do CSFR, das características em escala sinótica, indicam um primeiro passo para prosseguir, com um certo grau de confiança, as análises em mesoescala que foram realizadas e estão apresentadas nas sessões subsequentes desse trabalho.

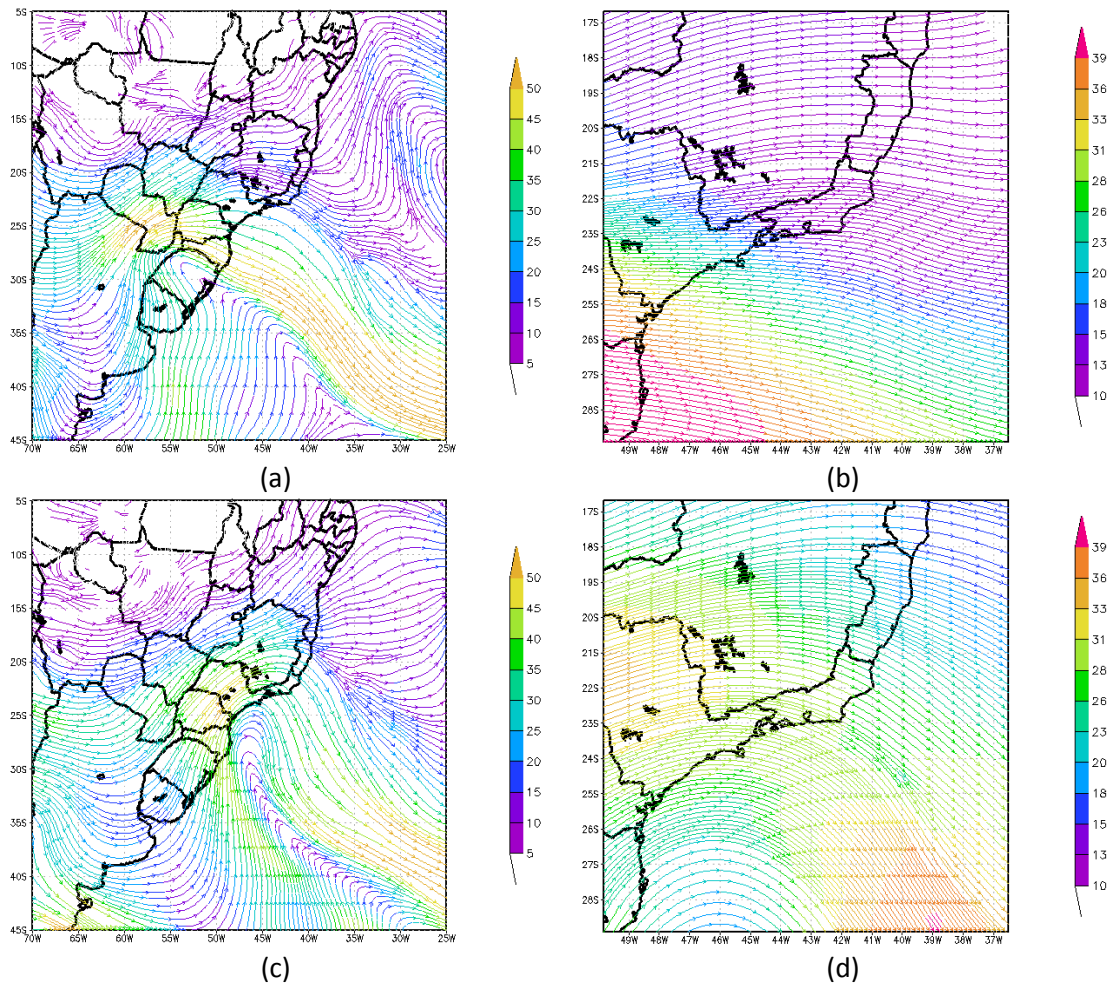


Figura 38 - Campo de vento (linhas de corrente) em 250 hPa para o período do evento. Para os dados do CSFR: (a) 06/04/2010 – 00Z, (c) 07/04/2010 - 00Z; e simulados pelo BRAMS na Grade 1 (b) 06/04/2010 – 00Z, e (d) 07/04/2010 – 00Z.

5.7. RAZÃO DE MISTURA DE ÁGUA DE NUVEM EM 700 HPA

A Figura 39 mostra a evolução do campo de razão de mistura de água de nuvem em 700 hPa simulado pelo BRAMS, em sua Grade 1, para diversos horários ao longo dos 3 dias analisados. Ao longo do dia 05/04 (Figura 39a, 39b, 39c e 39d) é possível perceber que o modelo conseguiu simular um sistema de nebulosidade, associado ao sistema frontal observado, se deslocando desde a porção sul do estado do Rio de Janeiro até atingir a região de interesse, de forma que uma estrutura de nebulosidade de caráter mais local ficou posicionada sobre parte das cidades de Niterói e Rio de Janeiro, às 18 Z do dia 05, como pode ser visto na Figura 39d. Ao longo do dia 06/04 (Figuras 39d, 39e, 39f e 39g) pode-se notar a persistência de nebulosidade, permanecendo na área, com um pequeno deslocamento para oeste, de forma a abranger um pouco mais da região do município do Rio de Janeiro. Tal comportamento persistente deste campo simulado mostrou-se coerente com chuvas contínuas observadas nas cidades de Niterói (principalmente no dia 05/04) e Rio de Janeiro (06/04). Durante o dia 07/04 (Figuras 39h, 39i, 39j e 39k), o BRAMS mantém a estrutura de nebulosidade sobre a área de interesse com a nebulosidade se deslocando ligeiramente para leste, e com valores mais intensos sobre Niterói. Neste dia, ocorreu o escorregamento do Morro do Bumba. Sendo assim, é razoável sugerir que o modelo conseguiu capturar um padrão de nebulosidade persistente, e com valores mais significativos de água de nuvem sobre a região de interesse, de maneira coerente com o que foi observado.

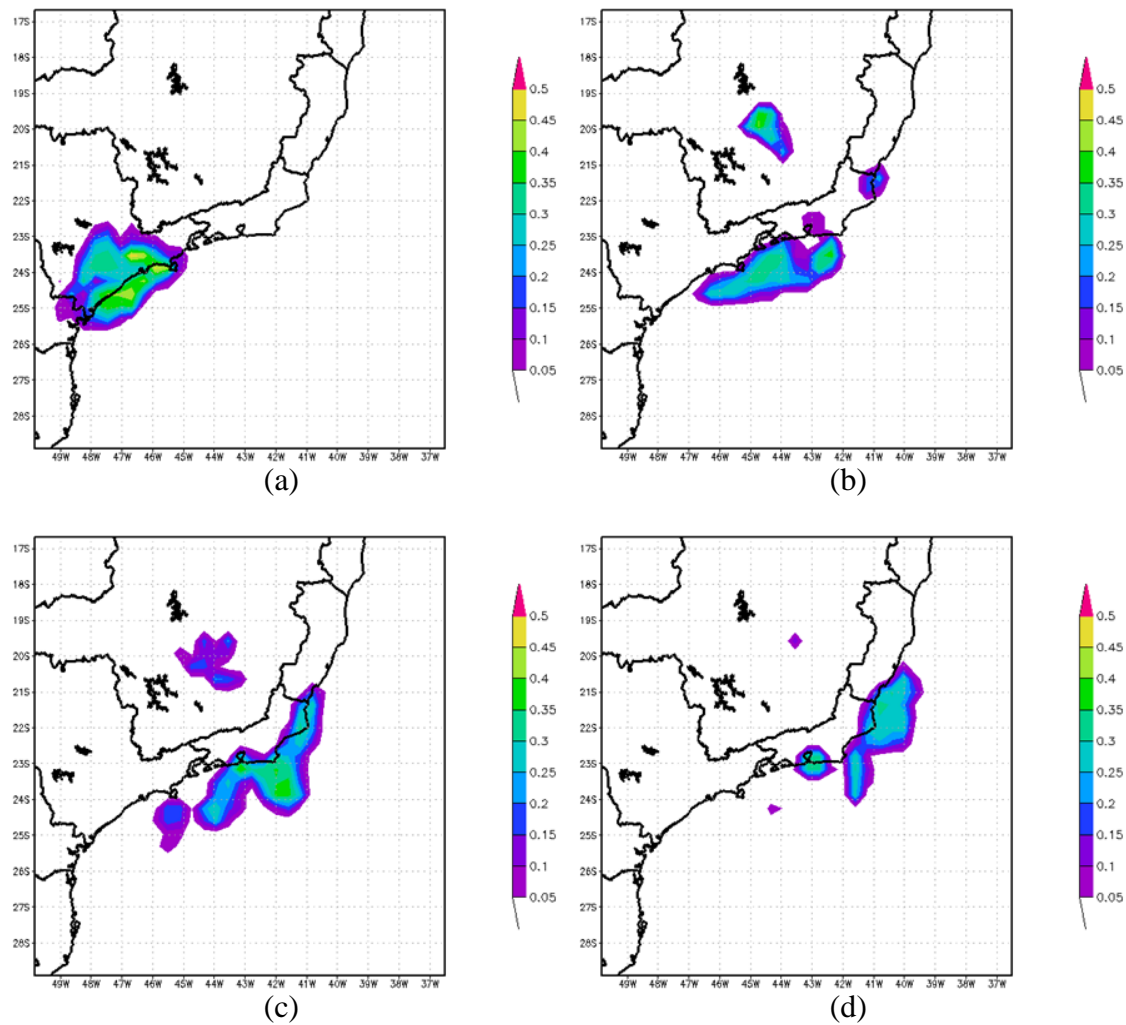
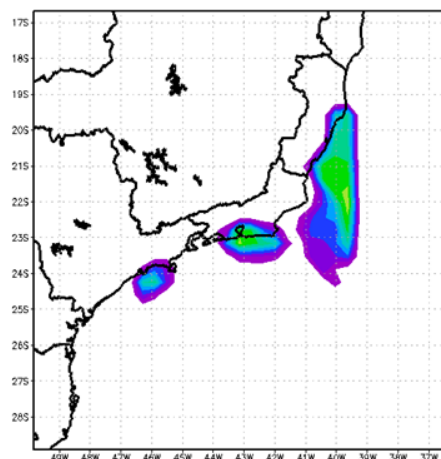
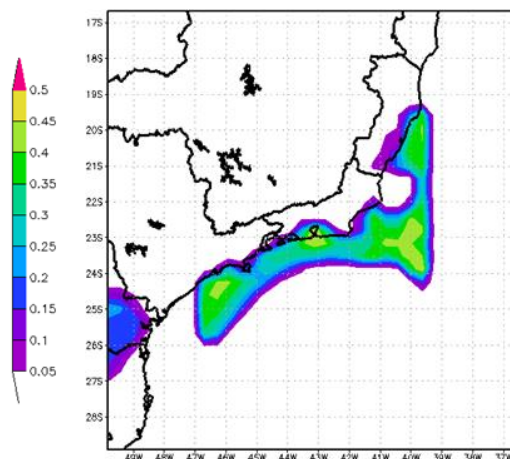


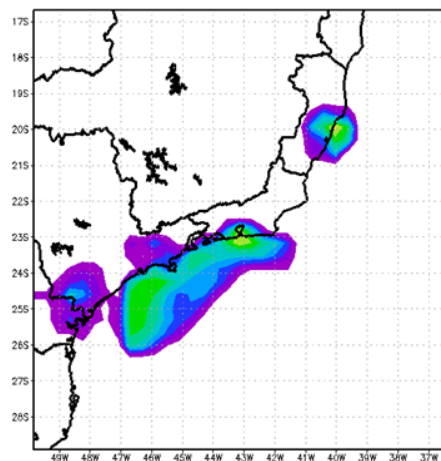
Figura 39 - Campo de razão de mistura da água de nuvem (g/Kg) simulada na Grade 1 do BRAMS no nível de 700 hPa para: (a) 03 Z do dia 05/04, (b) 09 Z do dia 05/04, (c) 12 Z do dia 05/04, (d) 18 Z do dia 05/04, (e) 03 Z do dia 06/04, (f) 09 Z do dia 06/04, (g) 12 Z do dia 06/04, (h) 21 Z do dia 06/04, (i) 03 Z do dia 07/04, (j) 06 Z do dia 07/04, (k) 12 Z do dia 07/04, (l) 15 Z do dia 07/04.



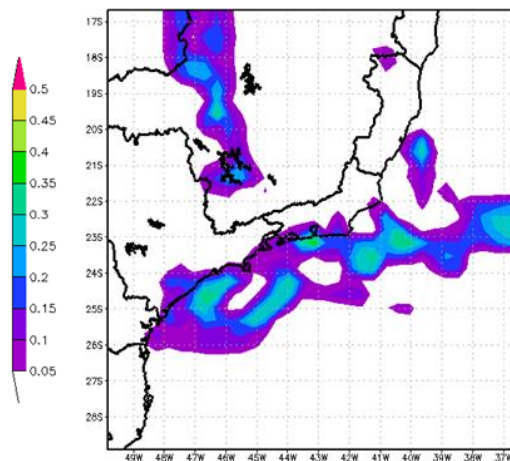
(e)



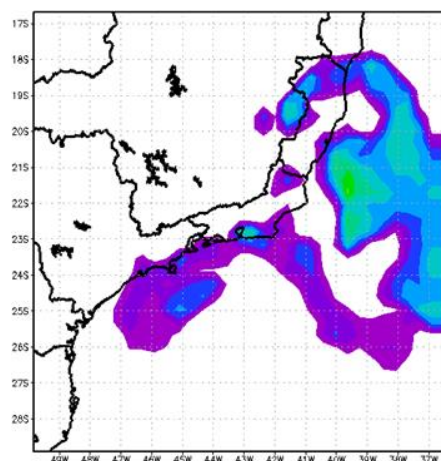
(f)



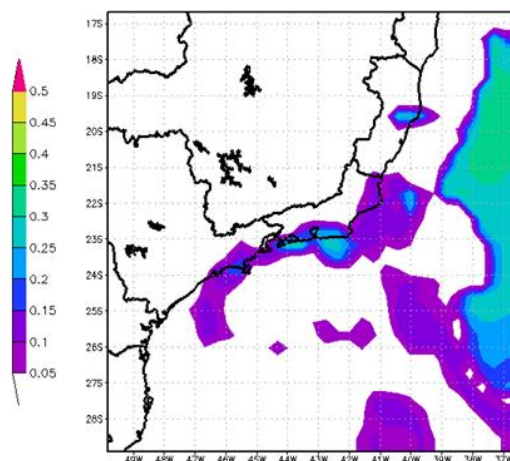
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 39 – Continuação.

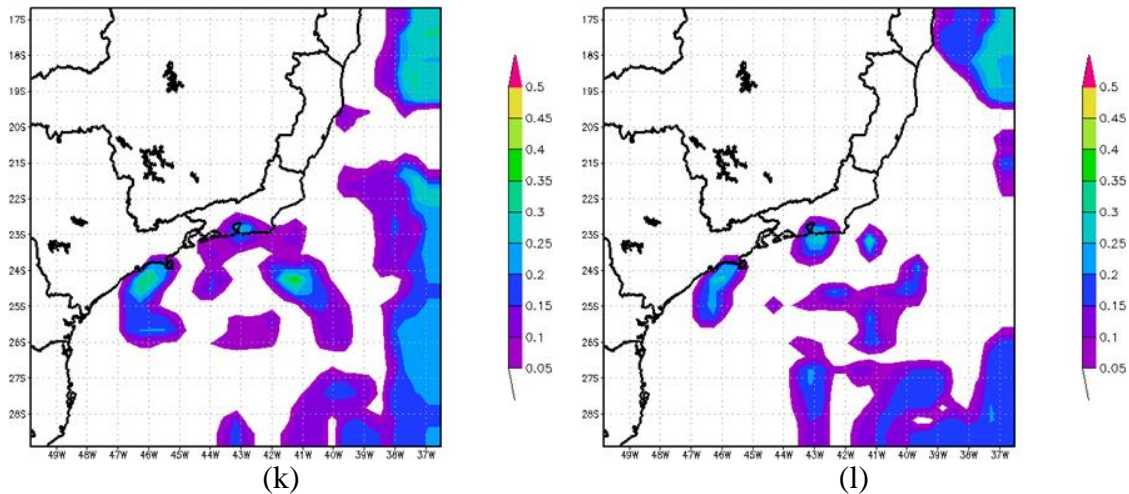


Figura 39– Continuação.

5.8. RAZÃO DE MISTURA DE ÁGUA DE NUVEM EM 600 hPa

Ao se avaliar o campo de razão de mistura de água de nuvem simulado pelo BRAMS para 600 hPa (Figura 40), ao longo dos 3 dias estudados percebe-se um fato interessante: em momento algum o modelo conseguiu simular sobre a região de interesse, valores tão significativos de água de nuvem para esse nível, como havia simulado para o nível de 700 hPa, apresentado na Figura anterior. Para o nível de 600 hPa percebe-se que, no dia 05/04 (Figuras 40a e 40b), o modelo não simula qualquer quantidade de água de nuvem sobre a área em questão. Ao longo do dia 06/04 (Figuras 40c e 40d) existe água de nuvem simulada sobre a região de interesse no horário das 21 Z, entretanto, com valores menos significativos que os encontrados no nível de 700 hPa. No dia 07/04 (Figuras 40e e 40f), o padrão é semelhante. Na verificação de níveis atmosféricos ligeiramente acima de 600 hPa (não mostrado), percebe-se que a água de nuvem simulada é cada vez mais escassa, ou ausente.

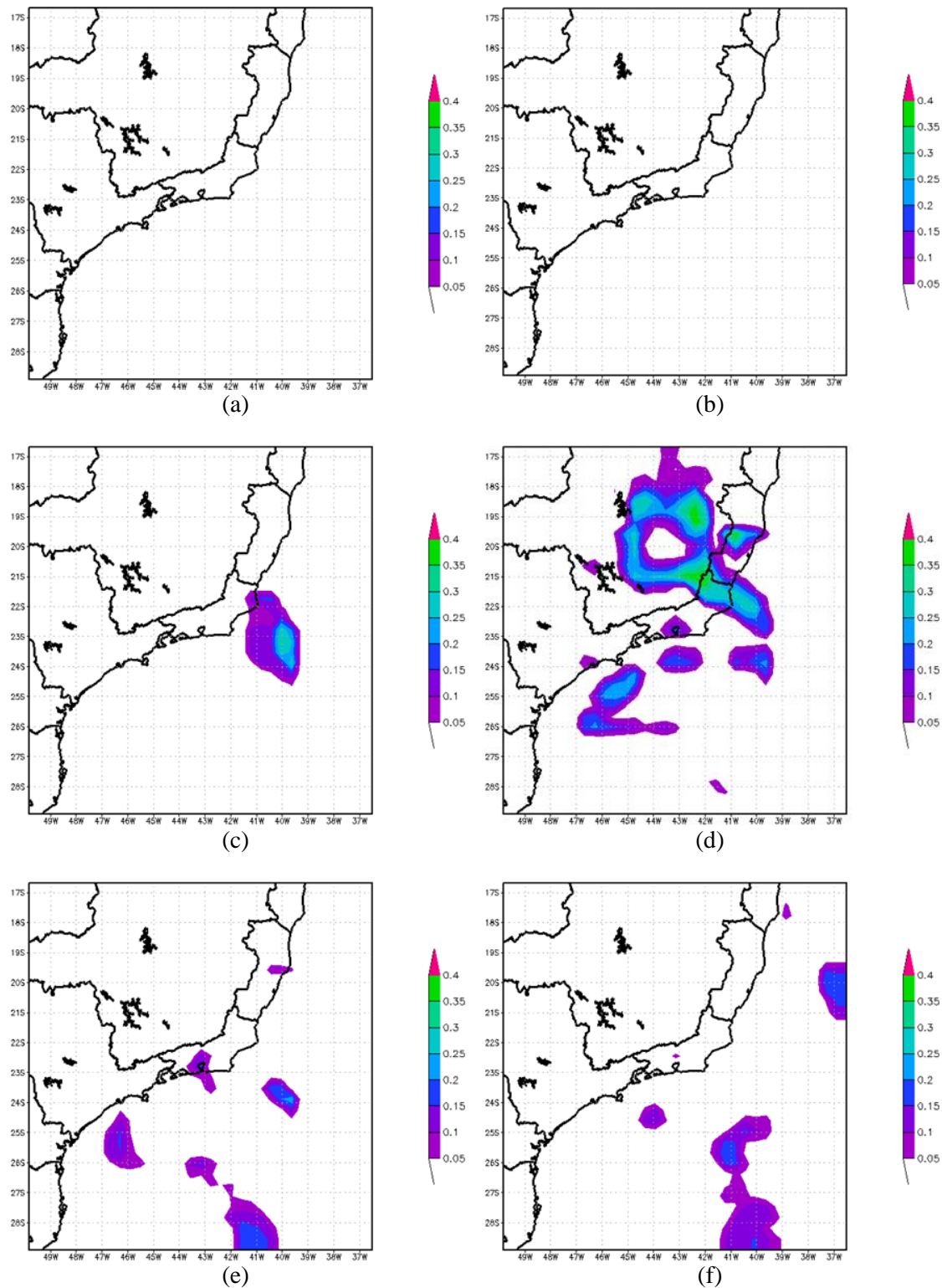


Figura 40 - Campo de razão de mistura da água de nuvem (g/Kg) simulada na Grade 1 do BRAMS no nível de 600hPa para: (a) 12 Z do dia 05/04, (b) 21 Z do dia 05/04, (c) 12 Z do dia 06/04, (d) 21 Z do dia 06/04, (e) 03 Z do dia 07/04, (f) 12 Z do dia 07/04.

5.9. IMAGENS DE RADAR E IMAGENS DO SATÉLITE GOES – 12 VERSUS TAXA DE PRECIPITAÇÃO DO BRAMS

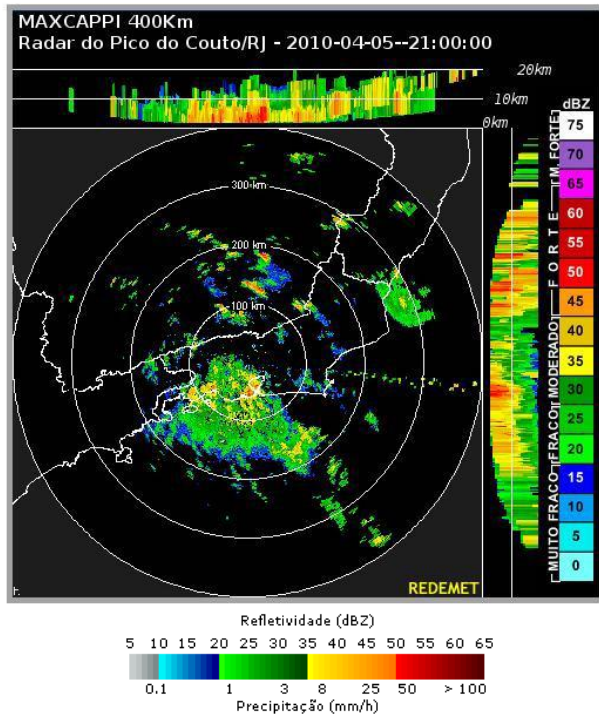
As sessões subsequentes avaliam como o BRAMS simulou a distribuição espacial e temporal da precipitação, nas Grades 2 e 3 do experimento. É feita uma comparação, principalmente qualitativa, da precipitação simulada pela parametrização de microfísica do modelo com imagens de radar (apenas para o período “curto” e que essas imagens estavam disponíveis) e também com imagens de satélite realçadas e setorizadas para a região Sudeste do Brasil (de forma a se observar um melhor detalhamento para o estado do Rio de Janeiro). Primeiramente, compara-se a variável “taxa de precipitação convectiva” (uma medida instantânea, em mm/h) compara-se com as imagens de radar. O objetivo é verificar se o modelo conseguiu detectar simulações de uma distribuição espacial e temporal coerente com a precipitação e/ou nebulosidade presente no período do evento, próximo à região de interesse.

A Figura 41a mostra a imagem de radar da REDEMET do dia 05/04/2010 às 21 Z. Verifica-se que as simulações das Grades 2 (Figura 41b) e 3 (Figura 41c) do BRAMS para às 21 Z estão com um posicionamento relativamente parecido com a precipitação observada pelo radar, com a área de precipitação mais intensa posicionada sobre a RMRJ. Na Figura 41d, 41e, e 41f verifica-se que o núcleo de precipitação máxima observada permanecia sobre Niterói, e o modelo conseguiu representar esse padrão de forma coerente mais uma vez. Para os horários subsequentes, como 00 Z do dia 06/04 (Figuras 41g, 41h e 41i) verifica-se um padrão parecido com os horários anteriores. A partir do horário de 07 Z do dia 06/04 (Figuras 41j, 41k e 41l) observa-se que o BRAMS começa a simular uma quantidade um pouco maior de chuva também sobre o município do Rio de Janeiro, o que pode ser observado também na imagem de radar do mesmo horário. Nesse horário também se percebe que o radar mostra as áreas de precipitação mais intensa ocorrendo sobre o oceano adjacente às costas do Rio de Janeiro e Niterói, coerente com a taxa de precipitação máxima simulada pelo BRAMS sobre o oceano. E para o horário das 08 Z do dia 06/04 (Figuras 41m, 41n e 41o) a taxa de precipitação simulada aumenta sobre o Município do Rio de Janeiro, e se alonga um pouco mais em uma faixa parecida com a precipitação mostrada pelo radar, formando uma faixa de chuva simulada que se estende desde a região de interesse, até a área da Baía de Sepetiba (Figura 41n). No horário das 08 Z, assim como no horário anterior (07 Z), tanto o radar como o BRAMS,

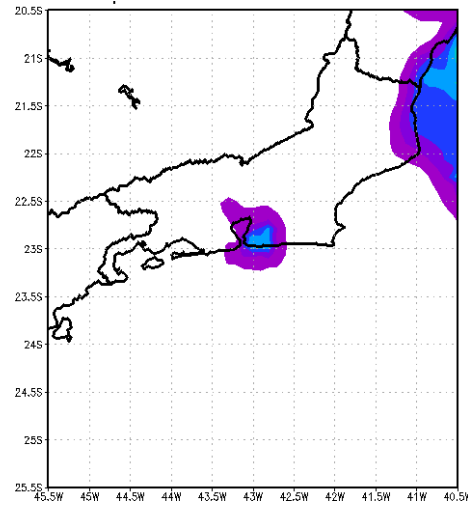
mostram a região de maiores valores de taxa de precipitação posicionada sobre o oceano, junto à costa dos municípios do Rio de Janeiro e Niterói.

Verifica-se, que o modelo subestima a taxa de precipitação, quando comparadas com a observada pelo radar. Mas, de qualquer forma, o resultado foi interessante do ponto de vista de o modelo ter conseguido simular a taxa de precipitação com distribuição espacial relativamente coerente com a observada, persistindo a chuva por várias horas sobre a área de interesse. Essa condição foi uma característica observada no período, contribuindo para saturar o solo na região do Morro do Bumba.

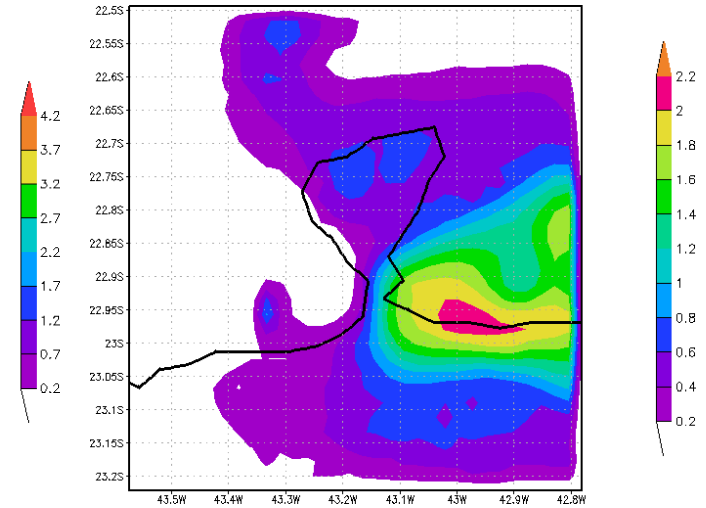
Infelizmente não foi possível obter outras imagens de radar que pudessem cobrir o período da manhã do dia 06/04 até o dia 07/04 de forma que se pudesse observar de forma mais precisa a variação espacial da precipitação ao longo desses 2 dias. Trabalhos anteriores como PADILHA (2011) e CALADO (2012), mostraram um aumento da precipitação sobre o município do Rio de Janeiro, principalmente nos períodos da madrugada e da manhã do dia 06/04. As taxas de precipitação simuladas pelo BRAMS ao longo da tarde do dia 06/04 e madrugada do dia 07/04 serão apresentadas comparando-as com as imagens de satélite setorizadas para a região Sudeste.



(a)

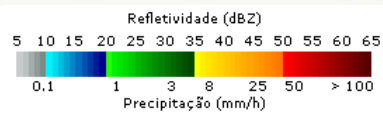
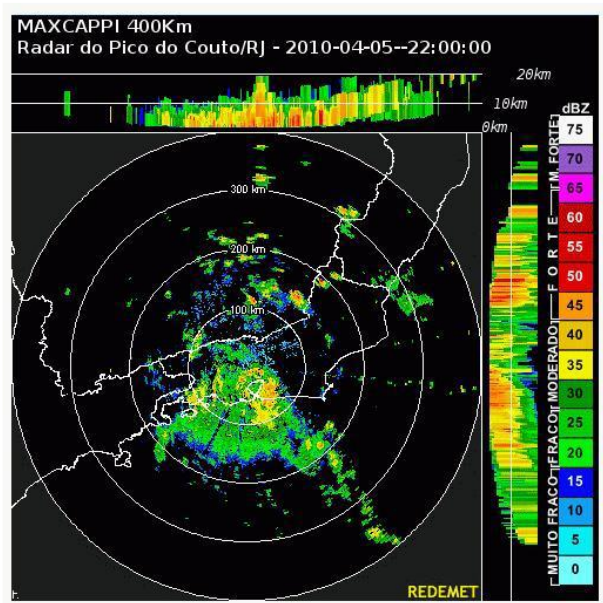


(b)

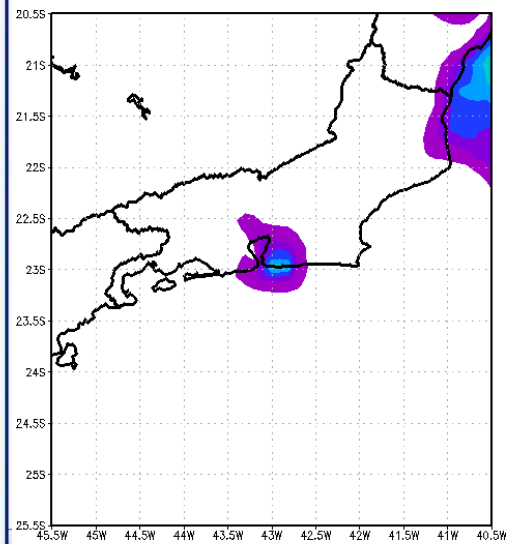


(c)

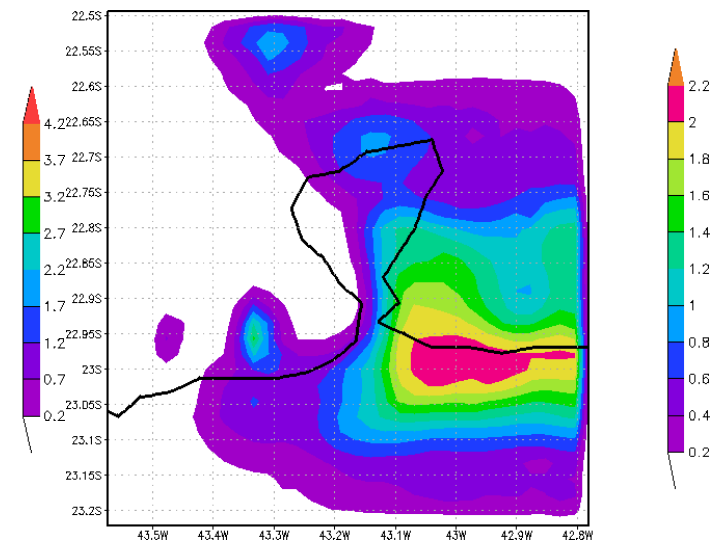
Figura 41 – Imagens de Radar da REDEMET – (a) 21 Z do dia 05/04, (d) 22 Z do dia 05/04, (g) 00 Z do dia 06/04, (j) 07 Z do dia 06/04, (m) 08 Z do dia 06/04; Taxa de Precipitação – Grade 2 – (b) 21 Z do dia 05/04, (e) 22 Z do dia 05/04, (h) 00 Z do dia 06/04, (k) 07 Z do dia 06/04, (n) 08 Z do dia 06/04; Taxa de Precipitação – Grade 3 – (c) 21 Z do dia 05/04, (f) 22 Z do dia 05/04, (i) 00 Z do dia 06/04, (l) 07 Z do dia 06/04, (o) 08 Z do dia 06/04.



(d)

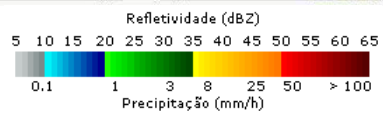
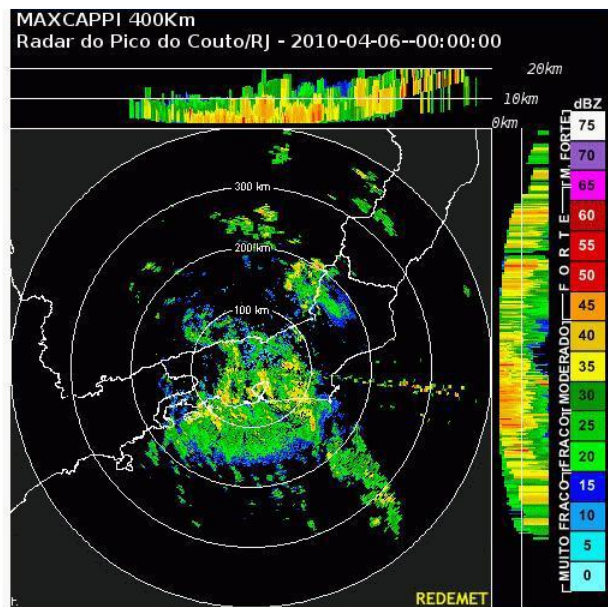


(e)

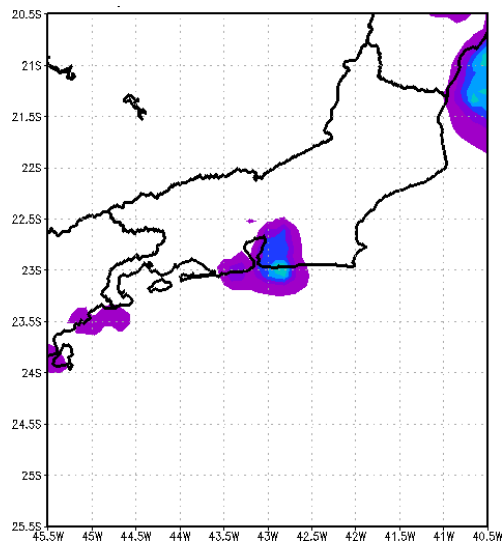


(f)

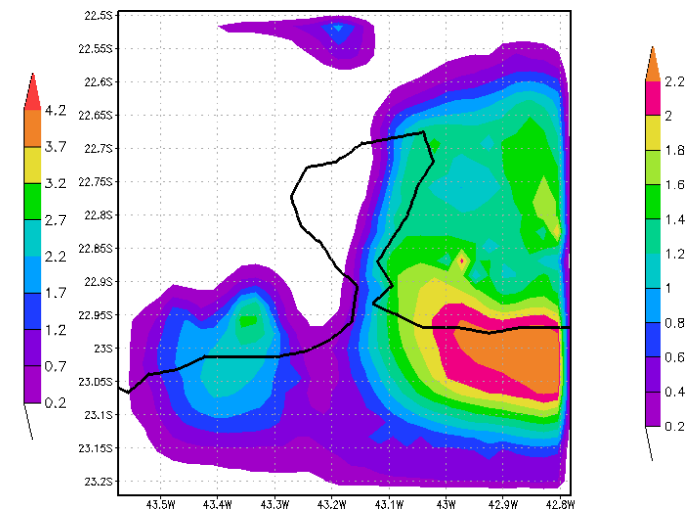
Figura 41– Continuação.



(g)

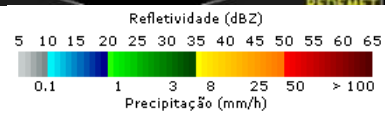
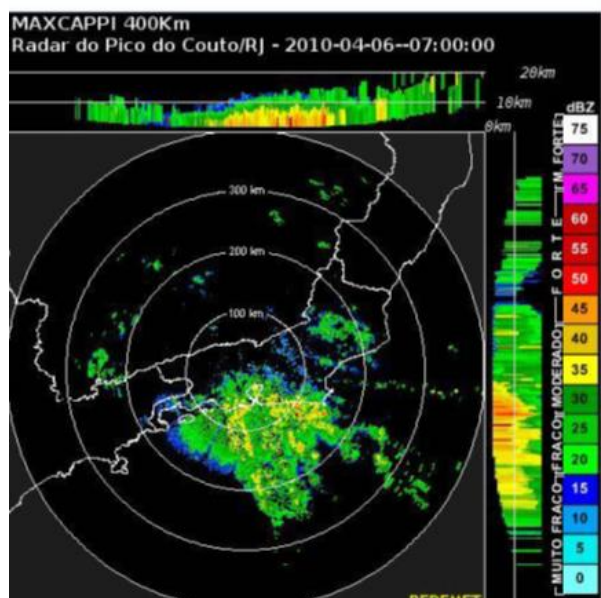


(h)

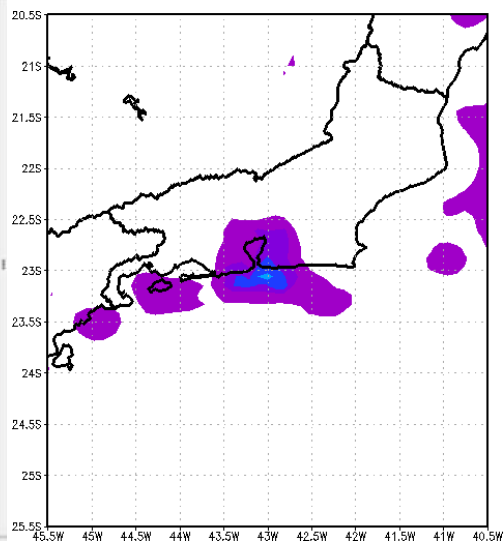


(i)

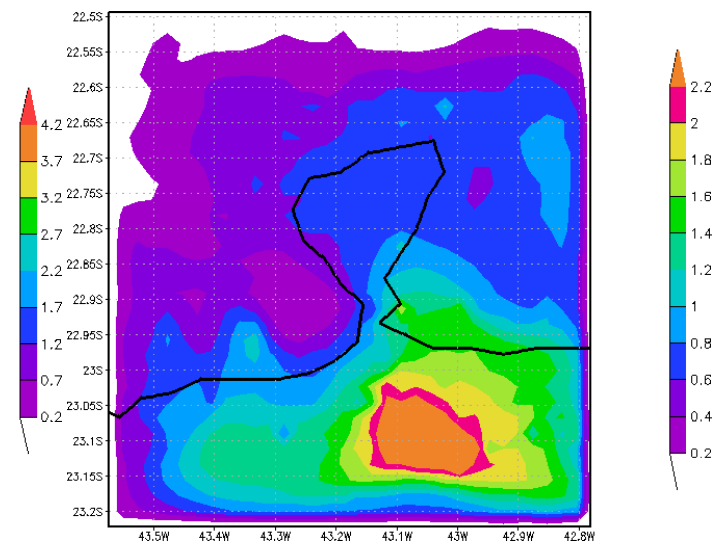
Figura 41 – Continuação.



(j)

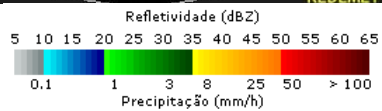
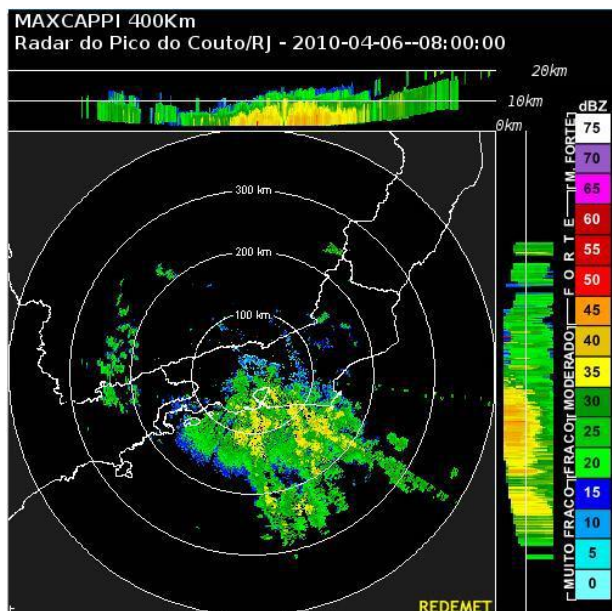


(k)

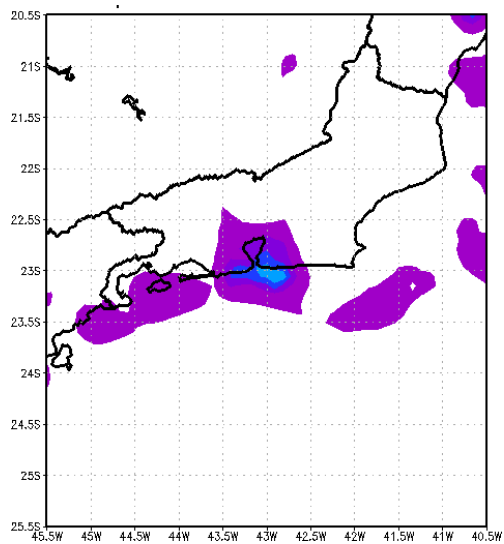


(l)

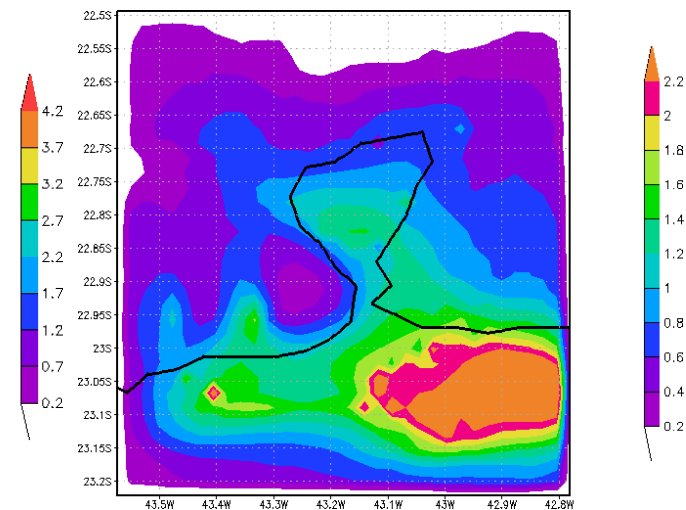
Figura 41 – Continuação.



(m)



(n)



(o)

Figura 41 – Continuação

A Figura 42 compara os campos de taxa de precipitação convectiva, simulada pelo BRAMS, com imagens de satélite setorizadas para a região Sudeste do Brasil, para alguns horários significativos em termos de precipitação observada e simulada. Pode-se perceber que a partir do período da manhã do dia 06/04, o modelo começa a aumentar ligeiramente a taxa de precipitação sobre o município do Rio de Janeiro (Figuras 42b e 42c), enquanto a imagem de satélite das 12 Z (Figura 42a) mostra que a nebulosidade está posicionada próxima ao litoral do Rio de Janeiro.

No horário das 18 Z do dia 06/04 é possível verificar a presença de um núcleo convectivo (realçado na cor amarela) na imagem de satélite (Figura 42d), posicionado próximo ao município do Rio de Janeiro. Neste horário verifica-se que o BRAMS deslocou o seu núcleo de máxima precipitação para o município do Rio de Janeiro, o que pode ser visto na Grade 2 (Figura 42e) e, de forma mais detalhada, na Grade 3 (Figura 42f). Também neste horário, pode-se perceber que na Grade 2 (Figura 42e) o modelo simulou núcleos de máximas taxas de precipitação sobre o oceano, em posições coerentes com áreas convectivamente ativas observadas no realce da imagem de satélite (Figura 42d).

Para o horário das 21 Z do dia 06/04 observa-se na imagem de satélite (Figura 42g) a permanência de uma nebulosidade de caráter pouco profundo (raso) atuando sobre o litoral e costa do estado do Rio de Janeiro. Para esse mesmo horário o modelo simulou um máximo de precipitado sobre o município do Rio de Janeiro, e ainda permaneceu simulando chuva sobre Niterói, em menor quantidade do que no Rio. Este fato indica que o modelo continuou a ter a sensibilidade de simular a persistência da precipitação sobre esta área, o que já vinha sendo destacado desde a análise da Figura 41 (que compreendeu o dia 05/06 e o início do dia 06/04), e também teve a sensibilidade de posicionar áreas de máximos de precipitação em posições coerentes com o que foi mostrado em trabalhos anteriores.

No horário das 03 Z do dia 07/04, a imagem de satélite (Figura 42j) mostra que a porção mais convectiva da nebulosidade estava atuando sobre o estado do Espírito Santo, não influenciando tanto no tempo do estado do Rio de Janeiro. Os resultados do BRAMS mostram que, na região de interesse, a taxa de precipitação máxima simulada voltou a se posicionar sobre a cidade de Niterói, a partir desse horário (Figuras 42k e 42l). Como foi

mencionado anteriormente, a partir do dia 07/04, voltaram a ocorrer chuvas mais significativas sobre Niterói, coincidindo com o escorregamento do Morro do Bumba.

Além dos detalhes apresentados na descrição e análise das Figuras 41 e 42, destaca-se, mais uma vez, que o BRAMS teve sensibilidade para simular a persistência de precipitação sobre a região de interesse nos 3 dias de estudo, o que pode ser visto como mais um resultado positivo da modelagem em mesoescala

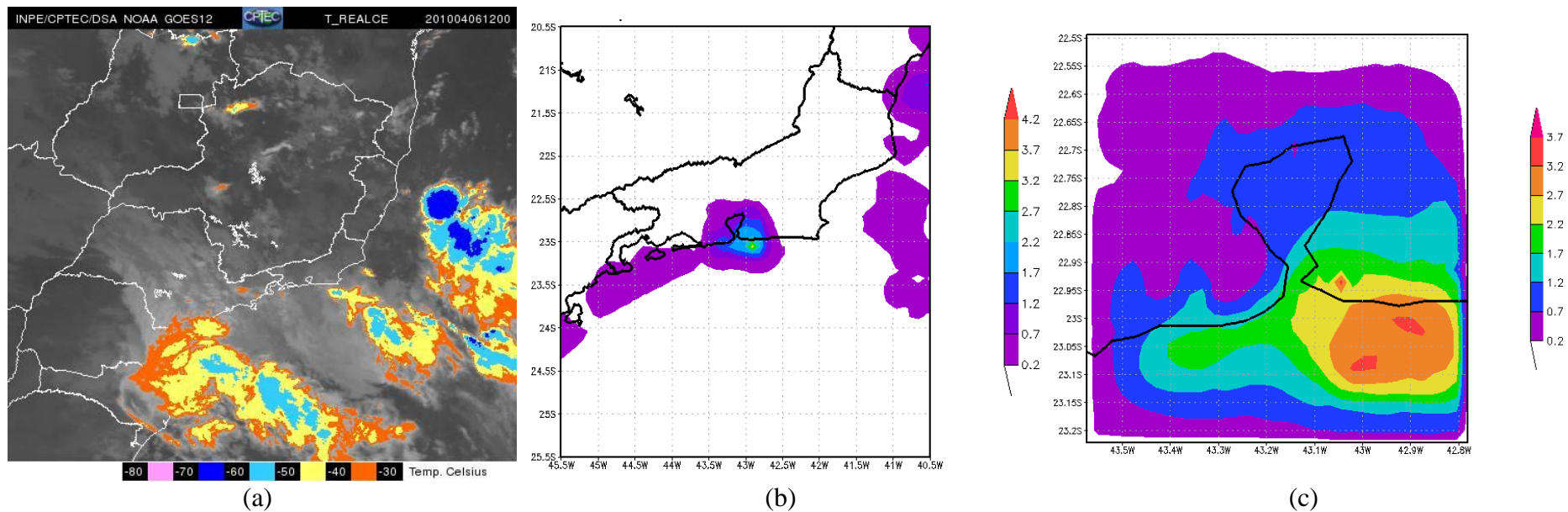
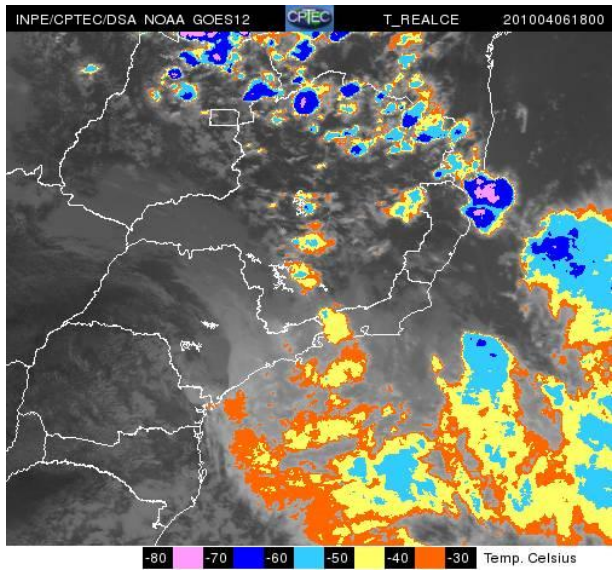
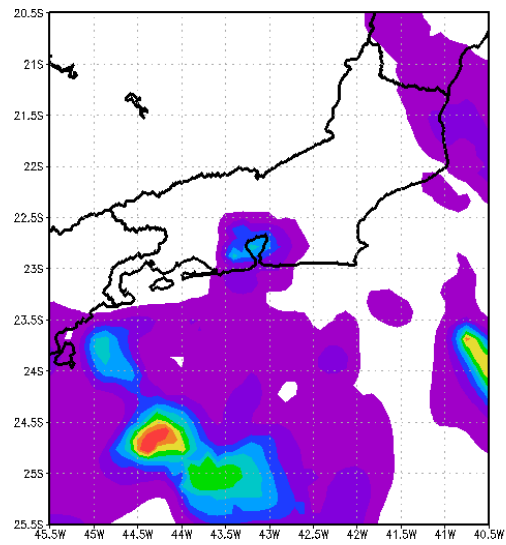


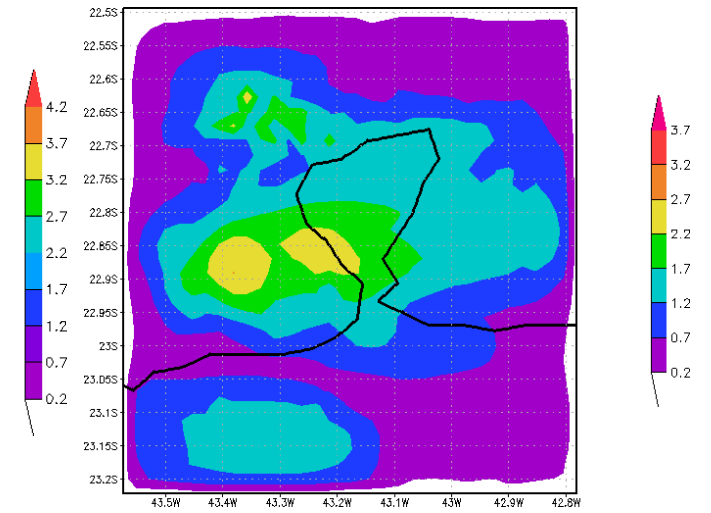
Figura 42 – Imagem de Satélite GOES – 12 (a) 12Z do dia 06/04, (d) 18Z do dia 06/04, (g) 21Z do dia 06/04, (j) 03Z do dia 07/04; Taxa de Precipitação (Grade 2) (b) 12Z do dia 06/04, (e) 18Z do dia 06/04, (h) 18Z do dia 05/04, (k) 03Z do dia 07/04; Taxa de Precipitação (Grade 3) (c) 12Z do dia 06/04, (f) 18Z do dia 06/04, (i) 21Z do dia 06/04, (l) 03Z do dia 07/04.



(d)

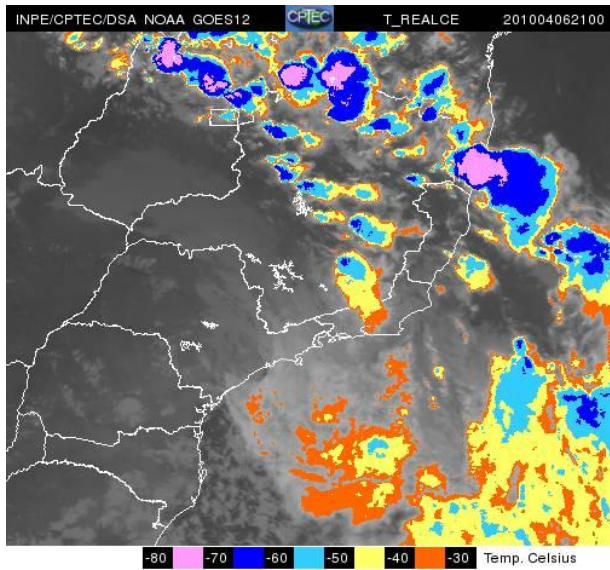


(e)

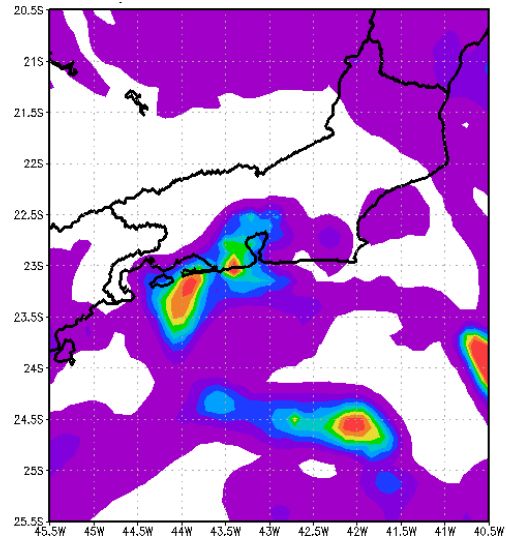


(f)

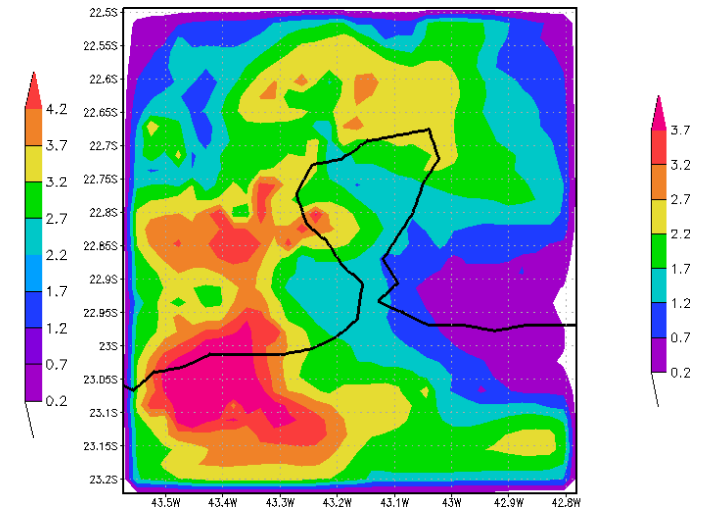
Figura 42 – Continuação.



(g)

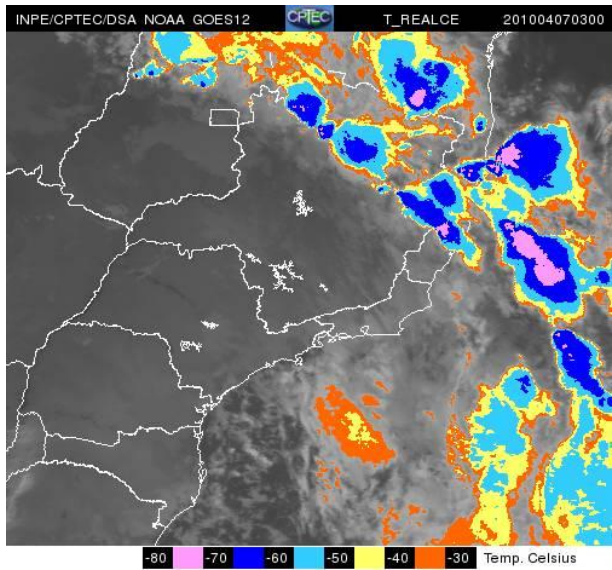


(h)

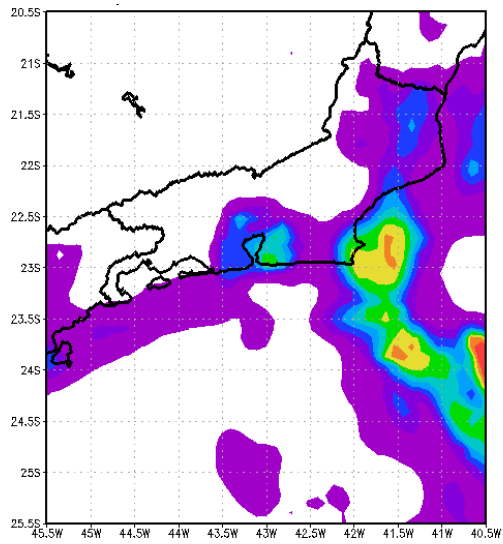


(i)

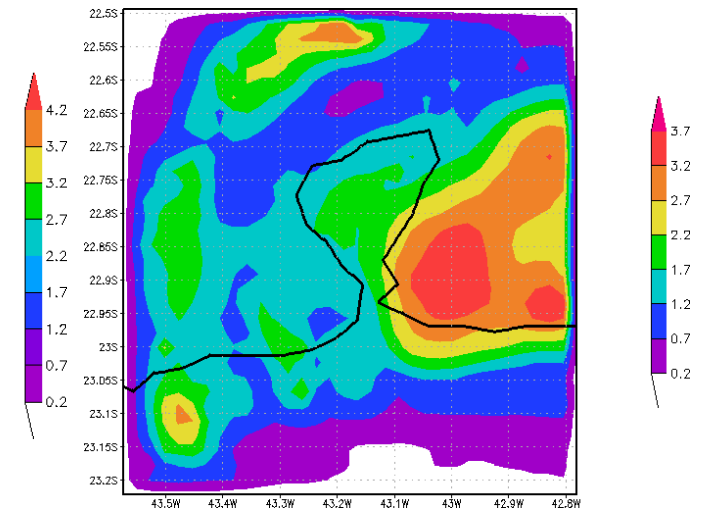
Figura 42 – Continuação.



(j)



(k)



(l)

Figura 42 – Continuação.

5.10. UMIDADE ESPECÍFICA E VENTO

As Figuras 43 (a -f) mostram os campos de umidade específica (colorido) e vento (vetores), em 1000 hPa, simulados na Grade 2 do BRAMS, para os 3 dias de estudo. Durante o período da tarde e início da noite do dia 05/04 (Figuras 43a e 43b) nota-se a presença de uma região de grande oferta de umidade junto a costa do Rio de Janeiro, com valores entre 15 e 17 g.Kg⁻¹. Nessa mesma região, onde a presença de umidade simulada pelo modelo é encontrada, verifica-se a existência de ventos de SW, contribuindo para advectar ar úmido em direção ao litoral das cidades de Niterói e do Rio de Janeiro. Além disso, é possível observar uma pequena área de convergência de ventos exatamente sobre a cidade de Niterói, principalmente no horário das 18 Z (Figura 43a), mas observada também no horário das 21 Z. Esse padrão de convergência de ventos, aliado a presença de umidade nesse nível atmosférico, poderá ser confirmado nos campos de convergência de umidade, a serem apresentados mais a diante (Figura 44). Tal configuração do campo de vento e umidade pode ter um papel muito importante na formação de nebulosidade no litoral da região de estudo. A convergência simulada pelo BRAMS preferencialmente para a cidade de Niterói pode ter contribuído de forma decisiva para a maior precipitação ocorrida na cidade no final da tarde e noite do dia 05/04, estendendo-se por parte da madrugada do dia 06/04. Esse resultado aponta para a possibilidade de o modelo ter apresentado habilidade para simular aspectos em mesoescala, representando ganho importante em relação aos modelos de escala maior e reanálises, como a CSFR.

Para o dia 06/04 (Figura 43c e 43d) o BRAMS mantém uma área relativamente úmida no litoral, e costas das cidades de Niterói e Rio de Janeiro, mas com 3 pequenas diferenças em relação ao dia anterior: primeiramente a maior umidade manteve-se posicionada sobre a cidade do Rio de Janeiro; segundo que o vento próximo ao litoral passou a ser preferencialmente de direção sul; e, terceiro, que a região de convergência de ventos, juntamente com a oferta de umidade, foram levemente deslocadas para se posicionarem mais sobre o município do Rio de Janeiro (esse padrão também poderá ser confirmado nos campos de convergência de umidade a serem apresentados mais a diante). Tal deslocamento das posições de umidade maior, e convergência de ventos, modelados pelo BRAMS se mostra coerente com as chuvas contínuas, de longa duração que continuaram a atuar de forma significativa na cidade do Rio de Janeiro, principalmente

nos períodos da madrugada e manhã do dia 06/04, e que provocaram enormes transtornos na cidade, como foi descrito anteriormente nesse trabalho.

Por fim, no dia 07/04 (data em que aconteceu o escorregamento do Morro do Bumba), os maiores valores de umidade específica, e de convergência de ventos, simulados pelo BRAMS, voltaram, aos poucos, a serem deslocados para a cidade de Niterói (Figura 43e e 43f), de maneira que apontam para uma contribuição para a volta das chuvas mais fortes para o município de Niterói. No dia do escorregamento o solo da região já estava saturado devido ao grande volume de chuvas dos dias anteriores. A chuva adicional do dia 07/04 funcionou como gatilho para desencadear o escorregamento. O modelo conseguiu capturar aspectos em mesoescala relacionados à variação do posicionamento das chuvas mais intensas que atingiram a região de estudo (incluindo-se, Niterói e Rio de Janeiro), confirmando os campos de taxas de precipitação simuladas (Figuras 41 e 42). Essas taxas foram mais significativas sobre toda a RMRJ no dia 05/04, aumentando sobre o município do Rio de Janeiro nos períodos da madrugada e manhã do dia 06/04. Ao longo do dia 07/04 passaram a ser mais intensas sobre a cidade de Niterói.

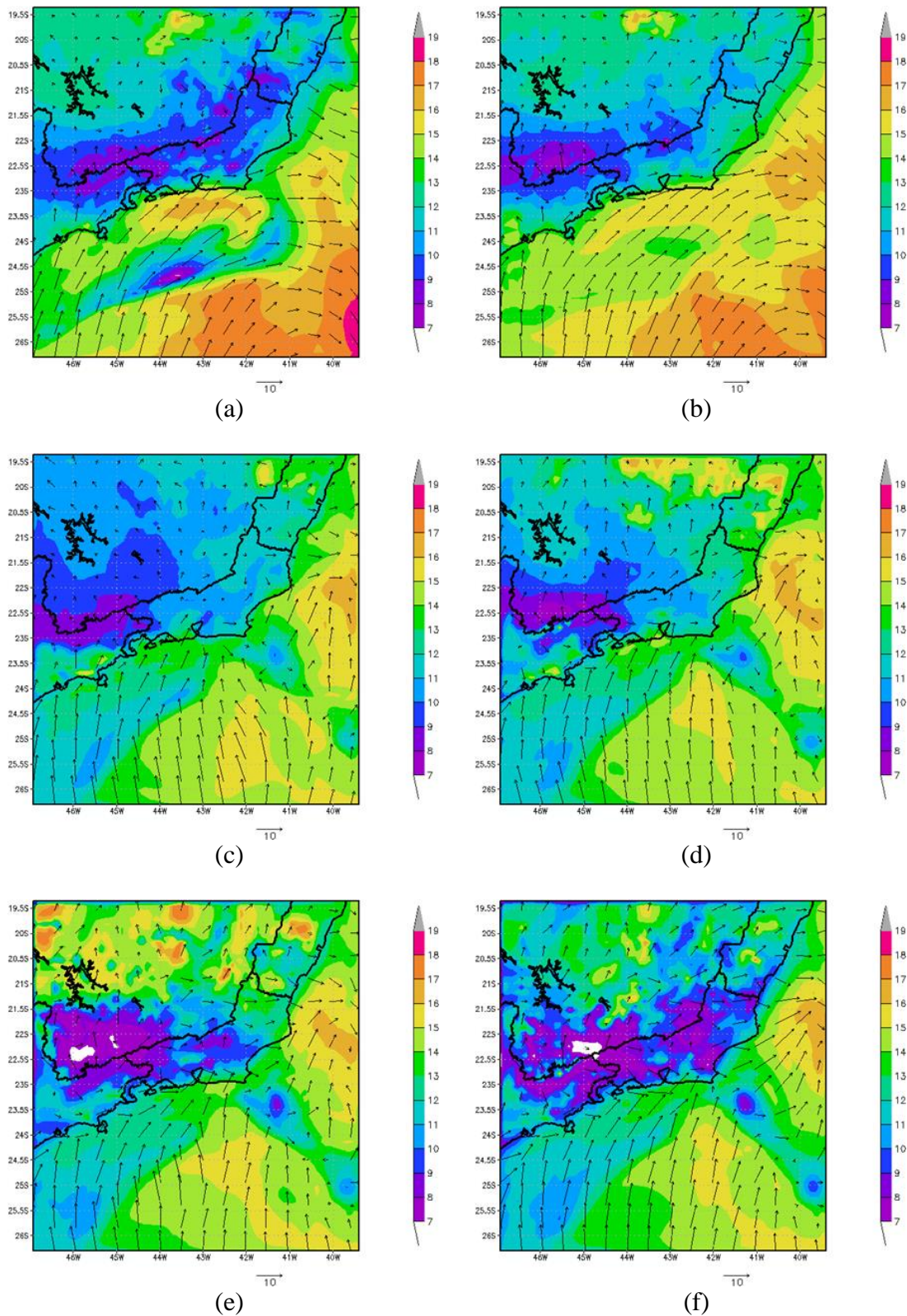


Figura 43 - Campos de umidade específica (g/kg - colorido) e vento (vetores) simulados na Grade 2 do BRAMS no nível de 1000 hPa para: (a) 18Z do dia 05/04, (b) 21Z do dia 05/04, (c) 18Z do dia 06/04, (d) 21Z do dia 06/04, (e) 00Z do dia 07/04, (f) 03Z do dia 07/04.

5.11. CONVERGÊNCIA DO FLUXO DE UMIDADE

Antes de se avaliar e apresentar os campos de convergência do fluxo de umidade é necessário que se dê uma explicação preliminar aqui: como o campo foi chamado, no presente trabalho, de “convergência” de umidade (que representa os valores negativos da “divergência de umidade”), convencionou-se que os valores positivos representam a convergência, ou seja, locais que apresentem valores positivos de convergência de umidade são as regiões onde, de fato, foi simulada “convergência” pelo modelo (ou seja, divergência negativa). Na figura apresentada em relação a este campo (Figura 44), estão representados apenas os valores de convergência (deixando-se as regiões de divergência de fora – em branco – nos campos apresentados), de forma que as figuras ficassem mais “limpas”, sem excesso de cores, permitindo uma melhor visualização dos campos da convergência de umidade.

Ao se avaliar o campo de convergência de umidade simulado na Grade 2 do BRAMS, para o nível de 1000 hPa (Figura 44a), ao longo dos dias estudados, percebe-se a persistência de valores significativos de convergência de umidade ao longo do litoral dos municípios de Niterói e do Rio de Janeiro. Em alguns horários, valores significativos dessa convergência se localizaram sobre a área continental desses municípios e não sobre o mar. Exemplos marcantes ocorreram às 21 Z do dia 05/04 sobre Niterói (Figura 44b); às 18 Z do dia 06/04 sobre o Rio de Janeiro e litoral (Figura 44c); e às 00 Z do dia 07/04, mais uma vez sobre Niterói (Figura 44e). Vale lembrar que as chuvas mais significativas ocorreram nos dias 05 e 07/04 sobre Niterói, e na noite do dia 05/04 e madrugada e manhã do dia 06/04 sobre o município do Rio de Janeiro. Sob esse ponto de vista, é possível que o modelo, em sua Grade 2, tenha conseguindo simular padrões em mesoescala, com algum grau de detalhamento, possibilitando a simulação de uma distribuição de chuvas de forma coerente com o observado, como mostrado nas Figuras 41 e 42. A captura de padrões detalhados, em escala menor, por parte do modelo de mesoescala, pode representar um auxílio interessante à compreensão de chuvas de caráter localizado (inclusive as provenientes de convecção rasa, como ocorreu nos dias 06/04 e 07/04 do caso em estudo), e também um auxílio à previsão de fenômenos desse tipo, caso o modelo esteja sendo executado em caráter operacional.

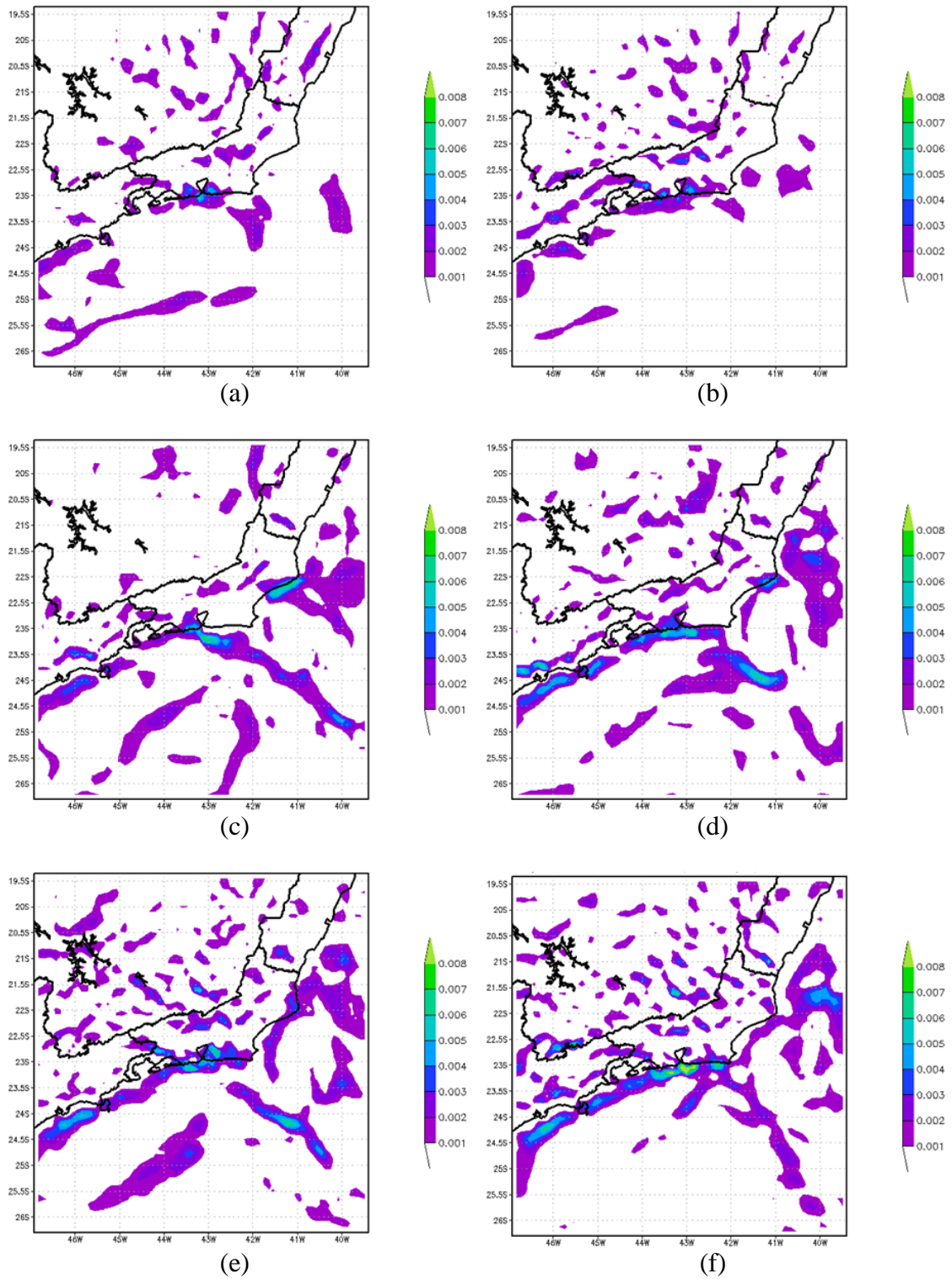


Figura 44 - Campo de convergência de umidade ($\text{g/Kg}\cdot\text{s}^{-1}$) simulada na Grade 2 do BRAMS, no nível de 1000 hPa para: (a) 18 Z do dia 05/04, (b) 21 Z do dia 05/04, (c) 18 Z do dia 06/04, (d) 21 Z do dia 06/04, (e) 00 Z do dia 07/04, e (f) 03 Z do dia 07/04.

regiões de relevo mais elevados, de forma a ter um potencial para gerar chuvas na região de estudo. Além disso, a característica do relevo da região pode modular o padrão de circulação dentro da mesma, de forma a contribuir para explicar a variação espaço-temporal das chuvas nos dias em estudo.

Pelos motivos expostos, optou-se por verificar como o modelo BRAMS simulou a característica da circulação próxima à superfície, principalmente dentro da região cercada pelo relevo mais elevado.

Na Grade 2 do BRAMS (Figura 46) observa-se que ao longo do dia 05/04, o escoamento foi evoluindo de forma que ao longo do dia, o ar marinho, vindo de SW, começou a penetrar na região de estudo (Figuras 46a, 46b, 46c e 46d). Alguns padrões de convergência de escoamento puderam ser observados na Grade 2 do modelo, também nos dias 06 e 07/04, em alguns momentos mais para a porção oceânica, e em outros momentos mais sobre a região de estudo.

Tais características da chegada desse ar marinho na área de estudo e as convergências em mesoescala que o modelo simulou, podem ajudar a explicar a persistência da precipitação, e sua intensificação em alguns momentos, como havia sido discutido nos campos de convergência de umidade (Figura 44). Entretanto, o que também chama atenção, é que a canalização e o confinamento desse ar marinho nessa região, por um período longo, podem ter sido decisivos para as chuvas intensas e persistentes, tanto no município do Rio de Janeiro, como em Niterói.

Para avaliar melhor as chuvas intensas e persistentes a Grade 3 do BRAMS (Figura 44) utiliza informações com resolução bem maior, de forma a se verificar como o modelo capturou a interação do vento de superfície com seu relevo.

Ao longo do dia 05 (Figuras 46a e 46b) percebe-se que o modelo canaliza circulações ao longo dos Maciços da Tijuca e Mendanha - Gericinó, e também proveniente da Serra dos Órgãos, de forma que produz regiões de convergência de ventos, juntamente com o ar oceânico que provém de sul, tanto sobre a RMRJ, como sobre Niterói e São Gonçalo. Essas regiões de convergência coincidem com áreas de maiores taxas de precipitação simuladas nas Figuras 41 e 42.

Ao longo dos dias 06 e 07, permanece um escoamento modelado que sugere a interação de uma circulação em mesoescala modulada pelo relevo, com o vento em escala

sinótica, que persiste vindo de sul. Contudo, as regiões de convergência mais significativa eram deslocadas levemente em sua posição, dependendo do horário. Exemplos disso podem ser observados nos subitens a seguir:

i) no horário de 12 Z do dia 05 (Figura 47a), horário em que o modelo simula, na grade 3, um escoamento canalizado ao longo dos maciços da Tijuca e Mendanha – Gericinó: Este escoamento é de NW, e tal resultado é semelhante com resultados observacionais encontrados por GUIMARÃES (2014), onde nos horários de 12 Z, regularmente um escoamento de NW se intensificava, proveniente do Vale do Paraíba, em direção à RMRJ. Tal fato era observado sistematicamente, e com mais frequência, na estação SBSC (Santa Cruz). GUIMARÃES (2014) verificou que, tomando-se como referência a estação SBSC, é possível notar que, no final da manhã, por volta de 09 h-12 h, há uma intensificação nos ventos de N-NE. Esse fato chama a atenção, pois, no final da manhã, é exatamente o momento em que a circulação de Brisa Terrestre (BT) deveria estar se desacelerando ao se preparar para inverter o sentido do vento de acordo com a circulação de Brisa Marítima (BM) após 12 h. Segundo GUIMARÃES (2014), é importante lembrar que a RMRJ é limitada ao norte/noroeste por topografia mais elevada, em decorrência da Serra do Mar e sua denominação regional da Serra dos Órgãos. Portanto, é possível que o ar mais frio que desce a montanha durante a madrugada/manhã esteja atingindo a RMRJ no final da manhã e se associando ao escoamento previamente estabelecido da BT, ocasionando intensificação dos ventos de componente norte. Esse efeito combinado na circulação local faz com que os ventos de N-NE pela manhã sejam ainda mais intensos e mais frequentes do que os ventos da própria circulação da BM à tarde. ii) no horário de 21 Z do dia 05 (Figura 47b), onde o modelo simula uma região de convergência de ventos sobre a região de São Gonçalo;

ii) no dia 06, nos horários de 00Z (Figura 47c), 06Z e 12Z, o modelo consegue determinar melhor um padrão de convergência ao longo do Maciço da Tijuca (nesse período, madrugada e manhã do dia 06, a precipitação permaneceu persistente e intensificou-se sobre o município do Rio, e o Bairro da Tijuca foi um dos mais atingidos pelas chuvas (CALADO 2012);

iii) a partir da noite do dia 06 e madrugada do dia 07 (Figuras 47d, 47e, 47f, 47g e 47h) o modelo volta a deslocar a região de maior convergência para Niterói e

mais próximo à costa, estando também de acordo com os horários onde o BRAMS voltou a simular as maiores taxas de precipitação sobre essas regiões, e também sendo o dia onde o escorregamento do Morro do Bumba, aconteceu.

Tudo isso sugere que uma forte interação entre o escoamento persistente proveniente do oceano (sua canalização ao entrar no "bolsão de topografia") e o escoamento em mesoescala modulado pelo relevo local pode ter sido um fator muito importante no grande volume de chuvas que atingiu a região de estudo nos dias em questão. Ou seja, uma interação entre um escoamento sinótico (do oceano), com um escoamento em mesoescala, e a influência das condições de relevo, modulando ambos.

PIELKE (1984) já estudava interações entre escoamentos marítimos (incluindo brisas) com o relevo local (da área estudada), para regiões montanhosas próximas a grandes corpos de água (como oceanos, por exemplo). Ele discute sobre como a interação deste tipo de escoamento pode intensificar, ou desintensificar os escoamentos em mesoescala das áreas estudadas, e da mesma forma, como elas podem influenciar nas condições de tempo locais, incluindo a formação de nebulosidade e de precipitação. Entretanto, o autor discute que não há um padrão definido para tal, pois o tipo de impacto vai depender das condições específicas de relevo de cada local em questão, e também da forma com que o escoamento proveniente do mar interage com o relevo, e com as eventuais circulações locais induzidas, ou moduladas, pelo relevo. A orientação da linha e costa também é considerada como um fator relevante a ser levado em conta. Para cada área estudada, portanto, podem ocorrer efeitos diferentes e bem particulares, dependentes desses fatores citados. Isso enfatiza que estudos em mesoescala para cada área de interesse, são fundamentais para se conhecer a "realidade local" dessas interações e efeitos produzidos.

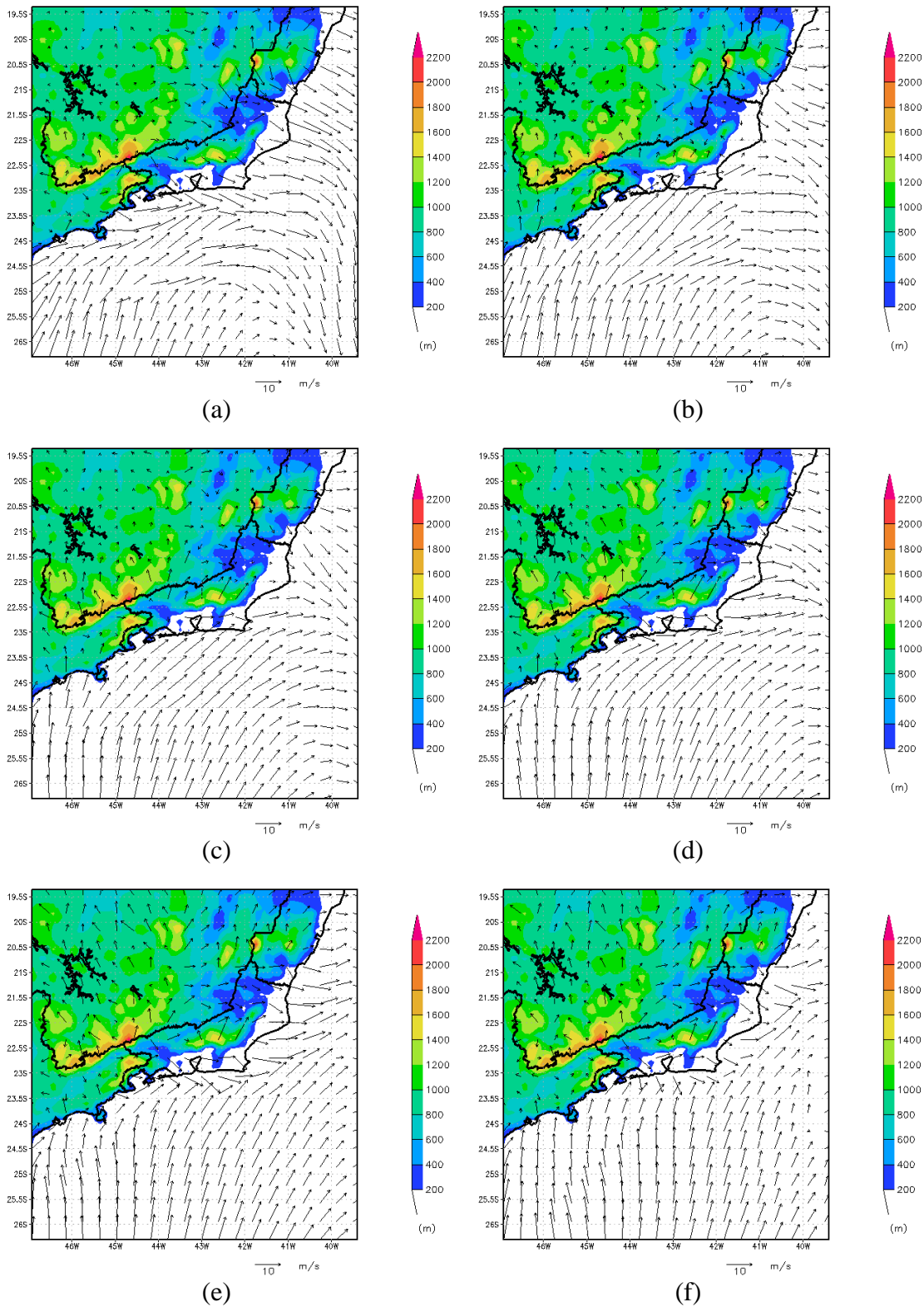
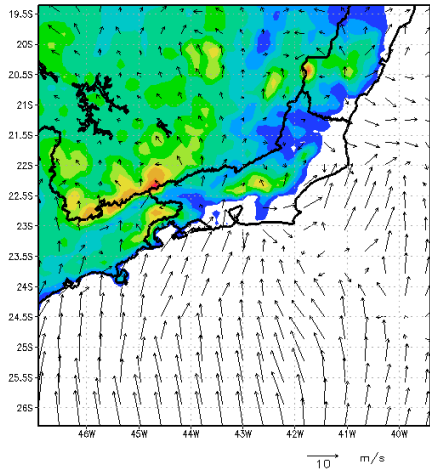
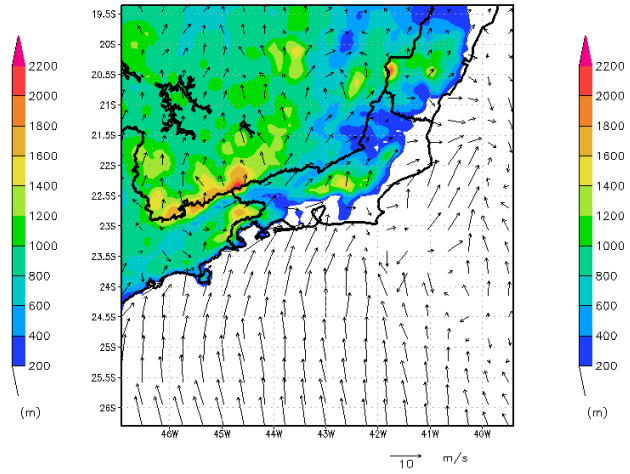


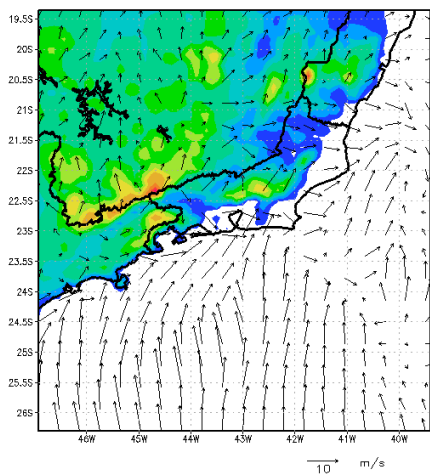
Figura 46 - Campo de Topografia com Vento à Superfície (m/s) simulado na Grade 2 para: (a) 12 Z do dia 05/04, (b) 18 Z do dia 05/04, (c) 21 Z do dia 05/04, (d) 00 Z do dia 06/04, (e) 06 Z do dia 06/04, (f) 12 Z do dia 06/04, (g) 18 Z do dia 06/04, (h) 21 Z do dia 06/04, (i) 00 Z do dia 07/04, (j) 03Z do dia 07/04 e (k) 18 Z do dia 07/04.



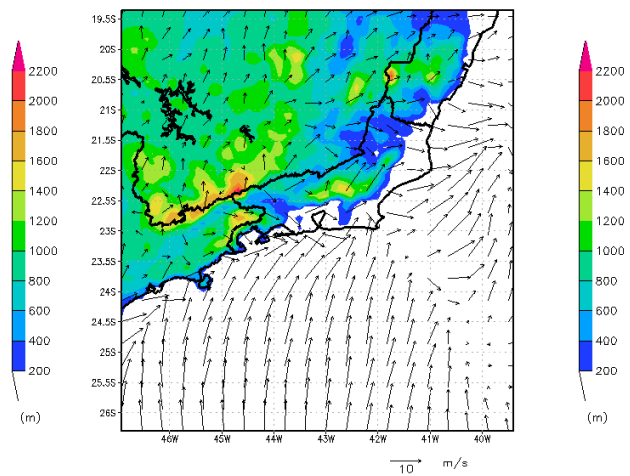
(g)



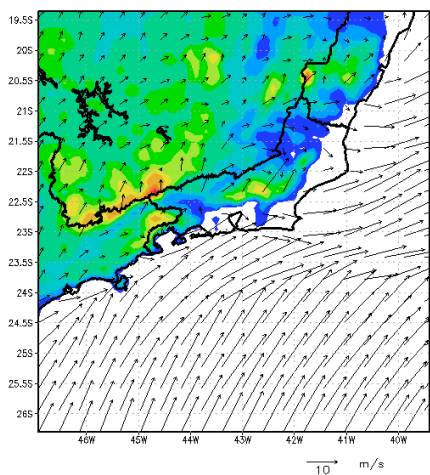
(h)



(i)



(j)



(k)

Figura 46 – Continuação.

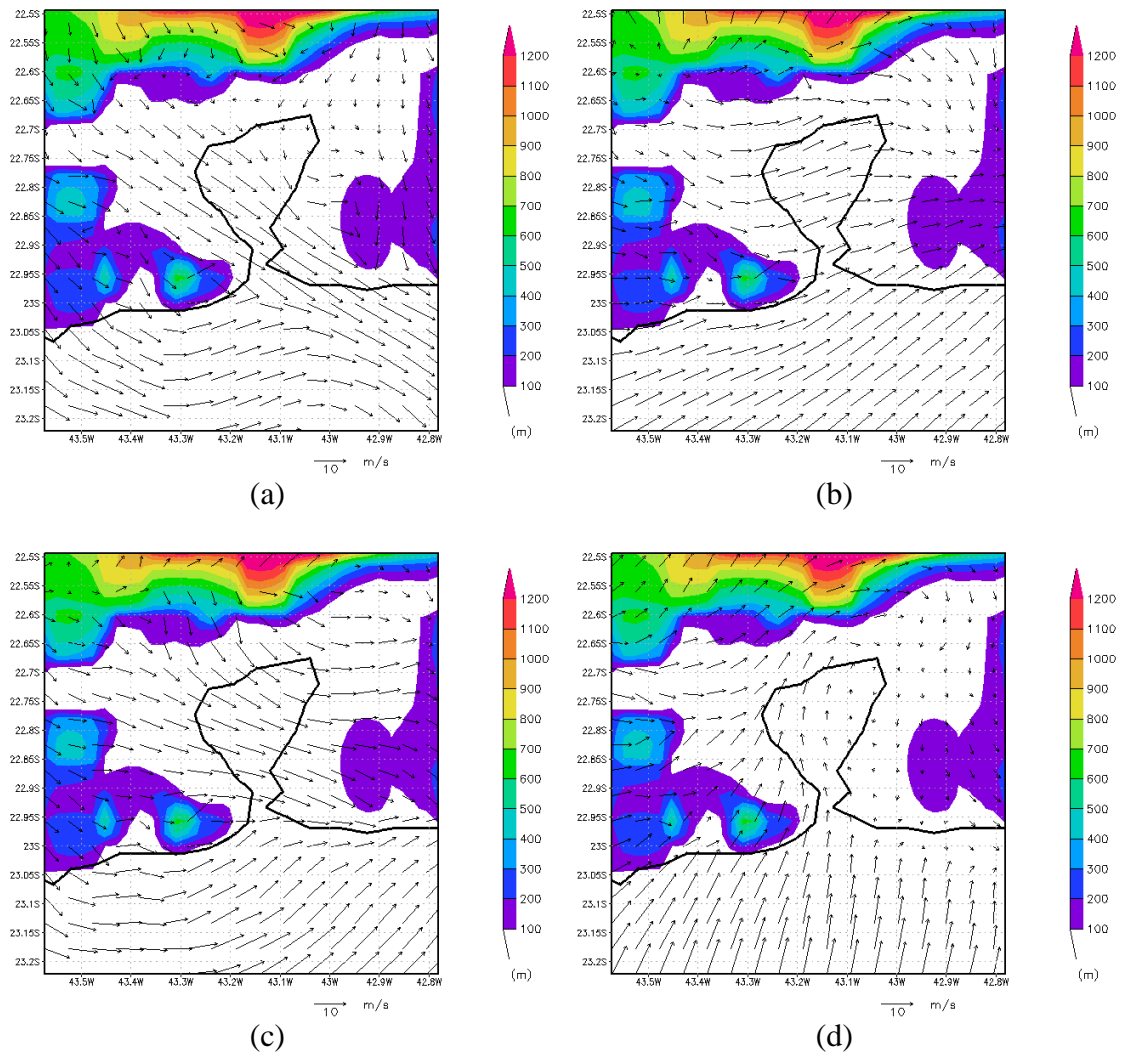
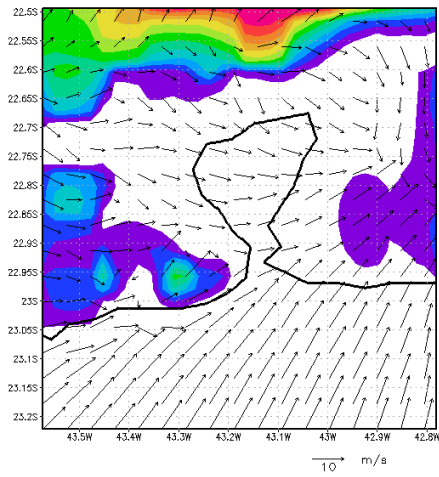
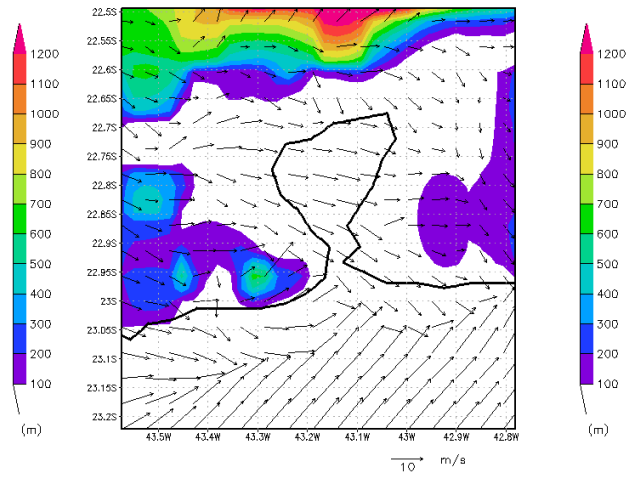


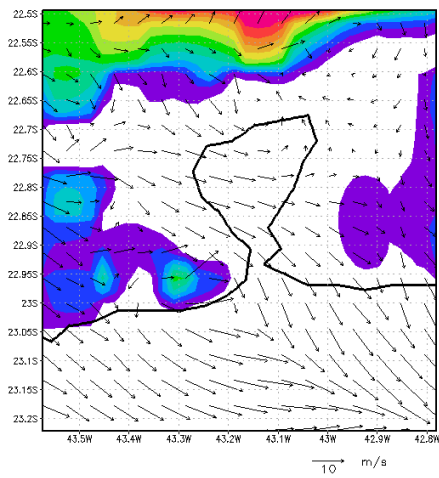
Figura 47 - Campo de Topografia com Vento à Superfície (m/s) simulado na Grade 3 para: (a) 12 Z do dia 05/04, (b) 21 Z do dia 05/04, (c) 00 Z do dia 06/04, (d) 21 Z do dia 06/04, (e) 00 Z do dia 07/04, (f) 03 Z do dia 07/04, (g) 12 Z do dia 07/04, (h) 18 Z do dia 07/04.



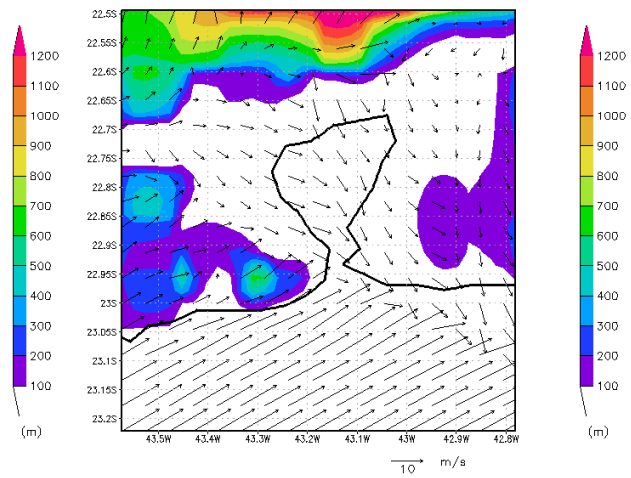
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 47 – Continuação.

6. CONCLUSÕES

Dentre os principais fatores que contribuíram para o escorregamento do Morro do Bumba, quatro foram essenciais: o lixo acumulado, a urbanização em local inapropriado, a média declividade do talude e o volume de água precipitado nos dias 05 a 07 de abril de 2010. Em termos políticos administrativos, destaca-se a negligência do poder público em permitir a construção de moradias em lixo.

A análise sinótica, utilizando dados da reanálise CSFR, mostrou um ambiente favorável a chuvas intensas, com predomínio de ventos do quadrante sul à superfície e a presença de advecção fria com escoamento no sentido sul para norte. A análise mostrou também a existência de um cavado em níveis médio e alto contribuindo para a condição de tempo severo na RMRJ. Esses campos ajudaram a justificar o volume precipitado sobre a RMRJ. Os campos de vento e pressão, nos níveis médios e altos da atmosfera, mostraram um cavado posicionado a oeste do estado do Rio de Janeiro, configurando uma zona de divergência em altitude e convergência à superfície. O posicionamento do cavado favoreceu o desenvolvimento de sistemas convectivos sobre o estado e essa configuração explica a intensificação e manutenção de ventos de componente sul.

O experimento utilizado para a análise do ambiente sinótico e de mesoescala, no período de 05 a 07 de abril de 2010, com os parâmetros padrões (“default”) de radiação e de microfísica de nuvens do BRAMS, subestimou a variável precipitação. Por sua vez, o experimento realizado com alterações das parametrizações citadas apresentou resultados mais próximos aos observados pelos pluviômetros do Sistema Alerta Rio, localizados na cidade do Rio de Janeiro. Porém, cabe a pergunta, o modelo simularia os mesmos resultados somente com alterações em uma parametrização? Apesar de existir a dúvida, somos induzidos a pensar que núcleos higroscópicos marinhos, lançados no continente pelo vento predominante de sul, contribuíram para que a precipitação total acumulada sobre Niterói aumentasse de 14 mm, com a parametrização padrão, para valores superiores a 100 mm com as alterações nas parametrizações de radiação e de microfísica. Apesar de simular a nebulosidade rasa para o evento, o BRAMS mostrou uma melhora substancial na precipitação total com alterações nas parametrizações de microfísica e na radiação no litoral.

Os campos de umidade específica e vento mostraram uma área de oferta de umidade na costa do estado juntamente com o escoamento de sul, o que contribuiu para a advecção do ar úmido próximo à costa do estado do Rio de Janeiro. Esse padrão de convergência de ventos, aliado a presença de umidade desse nível atmosférico contribuiu para a formação de nebulosidade rasa simulada na área de estudo. Já o padrão em mesoescala de convergência de ventos variou ao longo do tempo, sendo mais significativo sobre a cidade de Niterói, contribuindo de forma decisiva para a maior precipitação modelada no final da tarde e noite do dia 05/04, estendendo-se por parte da madrugada do dia 06/04. Na tarde e noite do dia 06/04, o BRAMS simulou uma área úmida no litoral das cidades de Niterói e do Rio de Janeiro. A direção do vento estava de sul e a região de convergência de ventos, juntamente com a oferta de umidade, foram deslocadas e se posicionaram sobre o município do Rio de Janeiro. No dia 07/04, os maiores valores de umidade específica e de convergência de vento, simulados pelo BRAMS, se deslocaram para a cidade de Niterói.

A área de estudo está localizada próximo ao nível do mar e está cercada por áreas onde o relevo é mais elevado. Ao longo dos dias 05 a 07 de abril de 2010, o BRAMS simulou circulação em mesoescala na área de estudo, interagindo com o escoamento de sul, em escala sinótica, proveniente da região oceânica. Isso certamente contribuiu para deslocar as áreas de convergência mais significativas e conseqüentemente, de maiores acumulados pluviométricos nos dias 05 e 07 para Niterói e no dia 06 para a cidade do Rio de Janeiro. Tal padrão de escoamento é confirmado com as simulações em escala menor.

O BRAMS mostrou que é um modelo com potencial para ajudar a entender melhor aspectos como chuvas contínuas e de intensidade variável. Circulações de caráter local, influenciadas pelo relevo, aliadas a escoamentos sinóticos, se mostraram relevantes na análise do ambiente associados às chuvas. Além disso, o BRAMS também mostrou que pode ser usado como uma ferramenta de auxílio à previsão de tempo para fenômenos dessa natureza.

6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar outros casos de interações de circulações de mesoescala presentes na RMRJ, com escoamentos em escala sinótica, para entender melhor como essas interações podem produzir chuvas em maior ou menor quantidade.

Realizar simulações variando parâmetros de microfísica do modelo BRAMS, de forma a melhorar a resposta do modelo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALERTA RIO, 2010 Disponível em: http://alertario.rio.rj.gov.br/?page_id=141 (Acessado em 01/07/2015).
- ALONSO, M. F.; SARAIVA, J. M. B. - Estudo numérico do papel dos esquemas de convecção na simulação de um evento severo nos extratropicos do Brasil. Revista Brasileira de Geofísica. v. 25, n. 3, p. 237-255, 2007 .
- ALVES, S. C. – Avaliação do modelo de Kuo para a previsão de chuvas e tempestades na Região Sul do Brasil: Estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Pelotas (UFPel), 2006.
- AMARAL, R.; SANTORO, J.; TOMINAGA, L.K. – Desastres Naturais: Conhecer para Prevenir. Instituto Geológico – Secretaria do Meio Ambiente, Governo do Estado de São Paulo, 2009.
- ANABOR, V.; PIVA, E. D. – Avaliação do modelo BRAMS na Formação de Nevoeiro de Radiação em Ambiente com Turbulência Pouco Desenvolvida. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 23, ed. 4, p. 417 – 430, 2008.
- ANDRADE, K. Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. Tese (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007.
- ANUÁRIO BRASILEIRO de DESASTRES – Projeto Promoção de Cultura de Riscos de Desastres (PCRD), Ministério da Integração Nacional (MIN), 2010.
- ARAKAWA, A.; SCHUBERT, W. H. Interaction of a cumulus cloud ensemble whit a large-sclae environment. Part I. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 31, n.3, p.674-701, 1974.
- BENDER, A e FREITAS, E. D. - Características das linhas de instabilidade sobre a região metropolitana de São Paulo. In Congresso Brasileiro de Meteorologia, 17. 2012, Gramado, Rio Grande do Sul. In: Anais do XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2012.
- BYERS, H.R.; R.R. BRAHAM, Jr., The Thunderstorm. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 287p, 1949.

BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; GONÇALVES, E. F.; KOBIYAMA, M.; MARCELINO, E. V.; MARCELINO, I. P.V.O; MENDONÇA, M.; MOLLERI, G. S. F.; MORENO, D. A.; RUDORFF, F. M. – Prevenção de Desastres Naturais: Conceitos Básicos – Editora: Organic Trading, 2006.

BROWNING, K. A. - Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds, *Journal of Atmospheric Science.*, v.21, pp. 634-639, 1964.

CALADO, R. N. Estudo de Caso de Tempestade Severa no Rio de Janeiro em Abril de 2010. Monografia (Bacharel em Meteorologia), CCMN/UFRJ, 2012.

CANDIDO, D. H.; NUNES, L. F.; VICENTE, A. K. Clima da Região Sudeste do Brasil. In: Cavalcanti, I, F. A. ...[et al.] organizadores. Tempo e Clima no Brasil. São Paulo. Oficina de Textos, 463p., 2009.

CARVALHO, C. S. e GALVÃO, T. Prevenção de Riscos de Escorregamento em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais. Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, 2006.

CASTRO, A. L. C. de. Manual de Desastres: Desastres Naturais. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003. Disponível em: www.defesacivil.gov.br/publicacoes/publicacoesdesastres-mistos.asp . Acesso em: 21 de abril de 2015.

CAVALCANTI, I.F.A.; KOUSKY, V.E. Frentes frias sobre o Brasil. In: Cavalcanti, I.F.A....[et al.] organizadores. Tempo e Clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 463p., 2009.

CHEN, C.; COTTON, W. R. A one-dimensional simulation of stratocumulus-capped mixed layer. *Boundary Layer Meteor.*, 25,289-321, 1983.

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Chuvas intensas e acumulados significativos causam prejuízos e mortes no Rio de Janeiro em abril de 2010; Instituto de Pesquisas Espaciais, 2010.

COSTA, T. S.; HACKEROTT, J. A. – Estudo de Caso: Evento de precipitação intensa no estado do Rio de Janeiro entre 5 e 10 de abril de 2010. Laboratório de Sinótica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Ambientais (IAG), Universidade de São Paulo, 2010.

- COTTON, W.R.; R.A. ANTHES - Storm and Cloud Dynamics. Academic Press, 883 p. 1989.
- DA SILVA, F. P. – Chuvas Severas no Rio de Janeiro: Avaliação de Indicadores dos Processos Físicos Associados. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). CCMN/UFRJ, 2014.
- DEADORFF, J.W. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. *Boundary Layer Meteor.*, 18, 495-527, 1980.
- D'ORSI, Ricardo N. *et al.* - Megacidades, Vulnerabilidades e Mudanças Climáticas: Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Vulnerabilidades dos Sistemas Naturais: Monitoramento dos Problemas de Encosta na Cidade do Rio de Janeiro Frente às Mudanças Climáticas em Curso e Futuras. Laboratório de Geo-Hidroecologia (GEOHECO) do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro e Alerta Rio, Fundação Instituto de Geotécnica (Geo-Rio) da Prefeitura do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.
- DOTY, B. Grid Analysis and Display System Grads - V.1.5.1.12. 1995.
- EM-DAT - *Emergency Events Database* – Disponível em: www.emdat.be/database
Acesso em: 01/04/2015.
- FARIAS H. S. de. Espaços de risco na região metropolitana do Rio de Janeiro: Um estudo das trajetórias de poluentes do arco metropolitano, CSA e Comperj. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal Fluminense (UFF), 2012.
- FERRARI, A. L.; LUDKA, I.; PENHA, H.M.; SERRANO, B.E. Geologia da Área In: FERRARI, A.L.; SILVA, A. da (Org.) Projeto avaliação das encostas de Niterói com vistas aos fenômenos de escorregamento – Setor 1 (Zonas Centro, Norte e Sul). Instituto de Geociências da Universidade Federal Fluminense e Secretaria Municipal de meio Ambiente e Recursos Hídricos da Prefeitura de Niterói. Niterói, 2004.
- FRITSCH, J. M.; CHAPPELL, C. F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure system. Part I: Convective Parametrization. *J. Atmos. Sci.* 37, 1734-1762, 1980.
- GRELL, G. A. Prognostic Evaluation of Assumptions used by cumulus parametrization. *Mon. Wea. Rev.*, 121,1993.

GRELL, G. A., DEVENYI, D. A generalized approach to parametrizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 14, 2002.

GUERRA, A. J. T.; GONÇALVES, L. F. H. - Impactos Ambientais Urbanos no Brasil. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001 416p.

GUIMARÃES, J. M. Circulações locais na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: Aspectos Observacionais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, 2014.

HOLTON, J., R., 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Ed. 4.

ICICT - Instituto de Comunicação e Informação Científica e Tecnológica em Saúde – Fiocruz, 2010. Disponível em: <http://www.climasaude.iciet.fiocruz.br/desastres/extremos/index.php> Acesso em 25/03/2015.

KALNAY, E., M. KANAMITSUI, R. KISTLER, W. COLLINS, D. DEAVEN, L. GANDIN, M. IREDELL, S. SAHA, G. WHITE, J. WOOLLEN, Y. ZHU, A. LEETMAA, B. REYNOLDS, M. CHELLIAH, W. EBISUZAKI, W. HIGGINS, J. JANOWIAK, K.C. MO, C. ROPELEWSKI, J. WANG, R. JENNE, AND D. JOSEPH, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull.Amer. Meteorol. Soc.*, **77**, 437-472.

KELNER, J.; TEICHRIEB, V. - Técnicas de Interação para Ambientes de Realidade Virtual e Aumentada. *Realidade Virtual e Aumentada: Uma Abordagem tecnológica. Anais do X Symposium on Virtual and Augmented Reality*. João Pessoa: Sociedade Brasileira de Computação (SBC), p. 46-65, 2008.

KUO, H. L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 31, n.5, p. 1232-1240, 1974.

LEMON, L. R.; DOSWELL III, C. A., Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, **107**: 1184-1197, 1979.

LOGUERCIO, J. F. C. – Morro do Bumba, etnografando a transformação de uma paisagem sob múltiplos olhares: da invisibilidade à escorregamento, uma página que não deve ser virada. Dissertação (Mestrado em Antropologia), Universidade Federal Fluminense (UFF), 2013.

MAHRER, Y.; PIELKE, R. A. The Effects of Topography on Sea and Land Breezes in a Two-Dimensional Numerical Model. *Mon. Wea. and Land Breezes in a Two-Dimensional Numerical Model. Mon. Wea. Ver.*, v.105, p. 1151 – 1162, 1977.

MARCELINO, E. V. - Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos. Caderno Didático nº 1. INPE/CRS, Santa Maria, 2008

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBIYAMA, M. - Banco de dados de desastres naturais: análise de dados globais e regionais. Uberlândia: Caminhos de Geografia. Outubro de 2006. Vol. 6, Nº 19, p. 130 -149, 2006.

MARWITZ, J. D. - The structure and motion of severe hailstorms. Part II: Multicell storms, *J. Appl. Meteorol.*, v.11, pp. 180-188, 1972.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. A. A Hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 31, n. 7, p. 1791 – 1806, 1974.

MENEZES, W. F. e M. A. F. SILVA DIAS - Aspectos da estrutura vertical da “baixa fria” profunda associada com as tempestades do caso Ribeirão Preto de 14 de maio de 1994, In: Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza, CE, 2004.

MENEZES, W. F. e M. A. F. SILVA DIAS - Simulação numérica das tempestades ocorridas no estado de São Paulo em 14 de maio de 1994: O caso Ribeirão Preto”, In: Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia, outubro de 1998, Brasília – DF, 1998.

MENEZES, W. F. - Tempestades Severas: Um modelo para latitudes subtropicais. Tese de Doutorado, IAG/USP, São Paulo, SP, Brasil, 1998.

MENEZES, W. F.; SILVA PAIVA, L.M., JUSTI DA SILVA, M. G. A.; BELASSIANO, M. - Estudo do ambiente favorável à propagação de sistemas convectivos de mesoescala sobre o município do Rio de Janeiro. Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro – RJ, 2000.

MEYERS, M. P.; COTTON, W. R. – Evaluation of the potential for wintertime quantitative precipitation forecasting over mountainous terrain with an explicit cloud model. Part I: Two-dimensional sensitivity experiments. *J. Appl. Meteor.*, v. 31, p. 26-50, 1992.

MOLINARI, J. A method for calculating the effects of deep cumulus convection in numerical models. *Monthly Weather Review*, v. 110, n. 11, p. 1527 – 1534, 1982.

- MOLINARI, J. A. - A general form of Kuo's cumulus parametrization, *Monthly Weather Review*, v 113, pp. 1411-1416, 1985.
- MOURA, R. C. W.; ESCOBAR, G. C. J. - Climatologia sinótica de eventos extremos na região metropolitana do Rio de Janeiro. In: Anais IV Simpósio Internacional de Climatologia. 2011, João Pessoa, Paraíba. Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2011.
- MOURÃO, C. E. F.; MENEZES, W. F. - Estudo do comportamento de indicadores de tempo severo em casos de tempestades sobre o Rio de Janeiro. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. Florianópolis-SC, 2006.
- NEWTON, C.W.; FRANKHAUSER, J. C. - Movement and Propagation of Multicellular Convective Storms. *Pure Appl. Geophys.*, v.113, p. 747-764, 1975.
- NIMER, E. – Climatologia do Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 1989.
- OLIVEIRA, A. S. – Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, p. 134, 1986.
- ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Living with Risk, A Global Review of Disaster Reduction Initiatives. Inter-agency - *Internacional Secretary Strategy for Disaster Reduction* (ISDR), Genebra – Suíça, 2004. 398p.
- PADILHA, S. F. - Simulações de Eventos de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro usando o Modelo WRF. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). CCMN/UFRJ, 2011.
- PIELKE, R.E. A three-dimensional Numerical Model off sea Breezes Over South Florida. *Monthly Weather Review*, 102, p. 115 – 139, 1974.
- PIELKE, R. E. A Mesoscale meteorological modeling. Orlando: Academic Press, 612 p., 1984.
- SAHA, S., et al. 2010. *NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFRS) Selected Hourly Time-Series Products, January 1979 to December 2010*. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <http://dx.doi.org/10.5065/D6513W89> Acessado em março de 2016.

SATYAMURTHY, P., NOBRE, C. A., SILVA DIAS, P. L. - Meteorology of the tropics: South America. In KAROLY, D. J., VINCENT, D. G. (eds), Meteorology of Southern Hemisphere. Meteorological Monographs, v. 27, n. 49, chapter 3^a, 1998.

SCHEUREN, J.M.; POLAIN, O.; BELOW, R.; GUHA-SAPIR, D.; PONSERRE, S. - Annual Disaster Statistical Review – The Numbers of Trends 2007. CRED – Center for Research on the Epidemiology of Disasters, Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium. Disponível em: <http://emdat.be/Documents/Publications> (Acessado em 21/03/2015), 2008.

SISINNO, C. L. S. - Destino dos resíduos sólidos urbanos e industriais no Estado do Rio de Janeiro: avaliação da toxicidade dos resíduos e suas implicações para o ambiente e para a saúde humana. Tese (doutorado) – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública. Rio de Janeiro, 2002.

SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations: 1. The basic experiment. Mon. Wea. Rev., 91, 99 – 1964, 1963.

SOUZA, E. P. Estudo Teórico Numérico da Relação entre a Convecção e Superfícies Heterogêneas na Região Amazônica. Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

TALJAARD, J. J. – Tropics: synoptic meteorology of the Southern Hemisphere. Meteor. Monographs, v. 13, n. 35, p. 129 – 213, 1972.

TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P. - Episódios de chuvas intensas na região sul do Brasil. Parte I: configuração sinópticas associadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Fortaleza/Ceará/CE, 2004.

TREMBACK, C. J. Numerical simulation of a mesoscale convective complex: Model development and numerical results. Ph. D. Dissertation, Atmos. Sci. Paper, n. 465, Colorado State University, pp. 247, 1990.

TRÍPOLI, G. J., COTTON, W. R. - A numerical investigation of several factors contributing to the observed variable intensity of deep convection over south Florida. J. App. Meteor. v. 19, p. 1037-1063, 1980.

TRÍPOLI, G. J.; COTTON, W. R. The Colorado University Three- Dimensional Cloud/Mesoscale Model Part I: General Theoretical Framword and Sensivity Experiments. Journal of Research Atmospheric, v. 16, p. 185 – 220, 1982.

UCCELLINI, L. W., AND D. R. JOHNSON - *The Coupling of Upper and Lower Tropospheric Jet Streaks and Implications for the Development of Severe Convective Storms*. MON. WEA. REV., 107, 682-703, 1979.

UN-ISDR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2009). Disponível em: <http://www.unisdr.org/we/inform/publications/10981> Acessado em 25/03/2015.

VALLE, T.F. - Vulnerabilidade e Uso do Solo Urbano em Assentamentos Informais em Áreas de Encosta. Estudo de Caso: Comunidade Sete Cruzes no município de São Gonçalo – RJ. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético), COPPE/UFRJ, 2009.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. - Meteorologia Básica e Aplicações. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 449p, 1991.

VILHENA, J. E. S. - INFLUÊNCIAS DE FRIAGENS NA ESTRUTURA VERTICAL DA ATMOSFERA DA REGIÃO AMAZÔNICA: UM ESTUDO NUMÉRICO E OBSERVACIONAL. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), UFCG, 2010.

WALKO, R. L.; COTTON, W. R.; MEYERS, M.P.; HARRINGTON, J.Y. – New RAMS cloud microphysics parameterization. Part I: the single – moment scheme. Atmospheric Research, v. 38, p. 29 – 62, 1995.

WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J. – Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) version 4.3/4.4 – Model Input Namelist Parameters. In: <http://www.atmet.com>, 2000.

WEISMAN, M. L.; KLEMP, J. B. - Characteristics of Isolated Convective Storms. In: Ray, P. S., ed. Mesoscale Meteorology and Forecasting. Boston, American Meteorological Society, 1986. 331-358. 1986.

SITE PESQUISADO:

<http://meadd.com/seviero/27077034>