

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

ALEXANDRE MAGALHÃES SANTIAGO

**SIMULAÇÃO DA CAMADA LIMITE PLANETÁRIA SOBRE A
REGIÃO METROPOLITANA DA GRANDE VITÓRIA COM O
USO DO MODELO DE MESOESCALA WRF**

VITÓRIA
2009

ALEXANDRE MAGALHÃES SANTIAGO

**SIMULAÇÃO DA CAMADA LIMITE PLANETÁRIA SOBRE A
REGIÃO METROPOLITANA DA GRANDE VITÓRIA COM O
USO DO MODELO DE MESOESCALA WRF**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração em Poluição do Ar.

Orientador: Prof. Dr. Neyval Costa Reis Junior
Co-Orientador: Prof. Dr. Maxsuel Marcos Rocha
Pereira

VITÓRIA
2009

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Luiz Gonzaga de Andrade Santiago e Iracema Magalhães Santiago.

À minha esposa Thatiane Braga Carvalho Santiago.

À minha tia Maria Madalena de Andrade Santiago.

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas diretamente e indiretamente me auxiliaram para realizar este trabalho, não poderia citar todas aqui, porém algumas tiveram um diferencial para que eu pudesse chegar ao fim desta etapa da minha vida, a elas devo a minha profunda e eterna gratidão.

Ao meu orientador Professor Dr. Neyval Costa Reis Junior, agradeço pela confiança em mim depositada logo que comecei meus primeiros passos neste mestrado, e até os dias de hoje.

Ao Professor Dr. Maxsuel Marcos Rocha Pereira pela oportunidade magnífica que representou para mim na aprendizagem com o modelo WRF tanto em sua instalação no andamento deste estudo. Mais ainda, como um profissional exemplar e nas lições de vida passadas a mim nesses quase 4 anos de convivência.

À Professora Dra. Jane Meri Santos, com o seu jeito calmo e simpático de cobrar os trabalhos e fazer com que sempre estudássemos mais. Muito obrigado.

Este trabalho não seria o mesmo sem a colaboração do Doutor Marcelo Romero de Moraes, pela paciência e boa vontade durante a instalação do sistema WRF.

Aos amigos de laboratório Alexsander Barros Silveira, Camila Carnielli Trindade, Geovane Carlos Barbosa, Wesley Gripa e todos os outros alunos do laboratório, pela força nos momentos de necessidade e alegria nos momentos de tristeza.

Não poderia deixar de fora a nossa querida secretária Rose Mary Nunes Leão, que sempre estava pronta para nos ajudar.

Ao apoio da CAPES, na forma de uma bolsa de estudos.

E por fim, agradeço à Universidade Federal do Espírito Santo e ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

*“Princípios da Eficiência:
não temer o futuro nem idolatrar o passado. O insucesso é
apenas uma oportunidade de começar de novo com mais
inteligência. O passado só nos serve para mostrar nossas falhas
e fornecer indicações para o progresso no futuro.”*

(Henry Ford)

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é utilizar o modelo matemático de mesoescala WRF para realizar a simulação do comportamento temporal e espacial da Camada Limite Planetária sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) no Espírito Santo, tendo em vista o conhecimento de suas propriedades dinâmicas e termodinâmicas. Para avaliar os resultados das previsões do modelo WRF, são utilizados dados experimentais de várias estações meteorológicas de superfície bem com dados de radiossondagens. Foram escolhidos dois períodos distintos para a realização deste trabalho: Inverno, (entre 20 de julho de 2008 e 26 de julho de 2008) e verão (entre 01 de março de 2009 a 07 de março de 2009). As comparações com dados experimentais indicam que o modelo WRF consegue melhor ajuste principalmente para o período do verão, a temperatura potencial bem como a temperatura a 2m são bem representadas em todos os períodos, entretanto a velocidade do vento a 10m mostra que em algumas regiões o modelo não conseguiu não obteve um resultado satisfatório.

Palavras-chave: previsão numérica, WRF, campo de vento, temperatura potencial e Camada Limite Planetária.

ABSTRACT

The main objective of this survey is to use the mesoscale WRF (Weather Research and Forecasting) mathematical model to perform the simulation of the temporal and spatial Planetary Boundary Layer behaviour on the Metropolitan Region of *Grande Vitória* (RMGV), *Espírito Santo*, in view of the knowledge of its dynamic and thermodynamic properties as well as the comparison of the results obtained with observational data measured by weather stations present in this region. In order to validate the results of WRF model forecasts, experimental data from various meteorological surface stations and radiosounding data are used. Two distinct periods were chosen to carry out this survey: winter of July 20th to July 26th of 2008 and summer from March 1st to March 07th of 2009. Comparisons with experimental data indicate that the WRF model achieves a better adjust especially for the summer period, the potential temperature and the temperature at 2m are represented very well, however the wind speed at 10m shows that in some regions the model have not achieved a good adjustment.

Key-words: numerical forecast, WRF, field of wind, potential temperature, planetary boundary layer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1– Divisão da troposfera em função da influência da superfície Terrestre, adaptado de Stull, 1988.	20
Figura 2-2 – Evolução temporal da Camada Limite Planetária, adaptado de Stull, (1988)....	22
Figura 3-1 – Níveis eta (η), adaptado do manual do usuário do WRF (Wang <i>et al.</i> , 2008).	35
Figura 3-2 – Malha horizontal (a) e vertical (b) do ARW, adaptado de SKAMAROCK <i>et al.</i> , (2008).	51
Figura 3-3 – Exemplos de aninhamento permitidos pelo WRF para várias grades, adaptado de manual WRF, Skamarock <i>et al.</i> (2008).....	51
Figura 3-4 – Fluxograma dos componentes modelo WRF. Adaptado de SKAMAROCK <i>et al.</i> (2008).	53
Figura 3-5 – Fluxograma dos componentes do pré-processador WPS e como é dado o passo inicial para a simulação com o ARW. Adaptado de SKAMAROCK <i>et al.</i> (2008).....	53
Figura 4-1 – Detalhes topográficos da Região Metropolitana da Grande Vitória e indicação da localização das estações meteorológicas de superfície.....	55
Figura 4-2 – Mapa disponibilizado na página oficial do USGS para escolha da área de estudo. Retirada em Junho, 2009.....	57
Figura 4-3 – Mapa da área escolhida como base de dados de topografia do GTOPO30 para este estudo.	57
Figura 4-4 – Região de estudo. Onde d03 é o foco do estudo.....	58
Figura 4-5 – Elevação e localização das estações meteorológicas da Região Metropolitana da Grande Vitória.....	61
Figura 4-6 – Localização da RAMQar, (a) Carapina, Serra; (b) Enseada do Suá, Vitória; (c) Vila Capixaba, Cariacica; (d) Ibes, Vila Velha; (e) Estação do INMET-UFES, Goiabeiras-Vitória e (f) Ponto de monitoramento. Retiradas do <i>Google Earth</i> em junho, 2009.....	62
Figura 5-1 – Série temporal para a altura da Camada Limite Planetária para os três domínios de simulação (d01, d02 e d03) entre os dias 01 e 07 de março de 2009, sobre o ponto de monitoramento.....	68
Figura 5-2 – (a) altura da CLP e (b) campo de vento a 10m sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória para a quarta-feira (04 de março de 2009) a 01h local ou 04 UTC, simulados pelo WRF.....	71
Figura 5-3 – (a) altura da CLP e (b) campo de vento a 10m sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória para a quarta-feira (04 de março de 2009) a 05h local ou 08 UTC, simulados pelo WRF.....	72
Figura 5-4 – (a) altura da CLP e (b) campo de vento a 10m sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória para a quarta-feira (04 de março de 2009) a 09h local ou 12 UTC, simulados pelo WRF.....	73
Figura 5-5 – (a) altura da CLP e (b) campo de vento a 10m sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória para a quarta-feira (04 de março de 2009) a 13h local ou 16 UTC,	

simulados pelo WRF.....	74
Figura 5-6 – (a) altura da CLP e (b) campo de vento a 10m sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória para a quarta-feira (04 de março de 2009) a 17h local ou 20 UTC, simulados pelo WRF.....	75
Figura 5-7 – (a) altura da CLP e (b) campo de vento a 10m sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória para a quarta-feira (04 de março de 2009) a 21h local ou 00 UTC, simulados pelo WRF.....	76
Figura 5-8 – Perfil da temperatura potencial para o dia 04 de março de 2009 (quarta-feira), sobre o ponto de monitoramento.	78
Figura 5-9 – Perfil vertical da (a) velocidade do vento e (b) direção do vento até 3000m de altura para o dia 04 de março de 2009 (quarta-feira), sobre o ponto de monitoramento.	78
Figura 5-10 – Comparação entre o perfil vertical da temperatura potencial até 14000m com os dados obtidos pela radiossondagem e simulada pelo WRF, sobre o ponto de monitoramento no dia de 01 março de 2009.	79
Figura 5-11 – Comparação entre o perfil vertical da temperatura potencial até 3000m de altura simulada pelo WRF e observada pela radiossondagem, sobre o ponto de monitoramento para os dias (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05, (f) 06 e (g) 07 de março de 2009.	81
Figura 5-12 – Perfis verticais da velocidade e da direção do vento simulados pelo WRF e observados pela radiossondagem sobre o ponto de monitoramento para (a) dia 01, (b) dia 02, (c) dia 03, (d) dia 04, (e) dia 05, (f) dia 06 e (g) dia 07 de março de 2009.	85
Figura 5-13 – Série temporal da temperatura a 2 m sobre as estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, Serra; (b) Vila Capixaba, Cariacica; (c) INMET/UFES, Goiabeiras-Vitória. Todas para a mesma semana do verão.	88
Figura 5-14 – Dispersão dos valores observados e simulados da temperatura a 2m do solo nas estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, (b) Cariacica e (c) INMET/UFES para os de 01 a 07 de março de 2009.....	91
Figura 5-15 – Comparação entre as velocidades do vento zonal (u) e meridional (v) simulados e observados sobre as estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Cariacica e (d) INMET/UFES para os de 01 a 07 de março de 2009.....	93
Figura 5-16 – Dispersão dos valores observados e simulados para a velocidade do vento zonal a 10 m nas estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Cariacica e (d) INMET/UFES e para o vento meridional (e) Carapina, (f) Enseada do Suá, (g) Cariacica e (h) INMET/UFES todos para os de 01 a 07 de março de 2009.	98
Figura 5-17 – Série temporal para a altura da Camada Limite Planetária para os 3 domínios de simulação entre os dias 20 e 26 de julho de 2008, sobre o ponto central do domínio principal d01.	100
Figura 5-18 – Altura da CLP sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (a) e (b) Campo de vento para a quinta-feira às 1h local ou 4 UTC, simulados pelo WRF (dia 20 de julho de 2008).	103
Figura 5-19 – Altura da CLP sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (a) e (b) Campo de vento para a quinta-feira às 5h local ou 8 UTC, simulados pelo WRF (dia 20 de julho de 2008).	104
Figura 5-20 – Altura da CLP sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (a) e (b)	

Campo de vento para a quinta-feira às 9h local ou 12 UTC, simulados pelo WRF (dia 20 de julho de 2008).....	105
Figura 5-21 – Altura da CLP sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (a) e (b) Campo de vento para a quinta-feira às 13h local ou 16 UTC, simulados pelo WRF (dia 20 de julho de 2008).....	106
Figura 5-22 – Altura da CLP sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (a) e (b) Campo de vento para a quinta-feira às 17h local ou 20 UTC, simulados pelo WRF (dia 20 de julho de 2008).....	107
Figura 5-23 – Altura da CLP sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (a) e (b) Campo de vento para a quinta-feira às 21h local ou 00 UTC, simulados pelo WRF (dia 20 de julho de 2008).....	108
Figura 5-24 – Perfil vertical da temperatura potencial medida em Kelvin, até 3000m de altura para a segunda-feira. Simulado pelo WRF sobre o ponto de monitoramento (dia 21 de julho de 2008).....	109
Figura 5-25 – Perfil vertical (a) da velocidade do vento e (b) da direção do vento até 3000m de altura para a segunda-feira, simulado pelo WRF sobre o ponto de monitoramento (dia 21 de julho de 2008).	110
Figura 5-26 – Série temporal da temperatura a 2 m sobre as estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, Serra; (b) Vila Capixaba, Cariacica; (c) INMET/UFES, Goiabeiras-Vitória. Todas para a mesma semana do inverno.	112
Figura 5-27 – Dispersão dos valores observados e simulados para a temperatura a 2m de altura nas estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, (b) Cariacica e (c) INMET/UFES todos para os dias 20 a 27 de julho de 2008 e sobre o ponto de monitoramento.....	113
Figura 5-28 – Comparação entre as velocidades do vento zonal (u) e meridional (v) simulados e observados sobre as estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Cariacica e (d) INMET/UFES para os dias 20 a 27 de julho de 2008...	117
Figura 5-29 – Dispersão dos valores observados e simulados para a velocidade do vento zonal a 10 m nas estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Cariacica e (d) INMET/UFES e para o vento meridional (e) Carapina, (f) Enseada do Suá, (g) Cariacica e (h) INMET/UFES todos para os de 01 a 07 de março de 2009.	120
Figura 8-1 – Comparação entre o perfil vertical da temperatura potencial simulada pelo WRF confrontada com a medida na radiossondagem para os dias (a) 02, (b) 03, (c) 04, (d) 05, (e) 06 e (f) 07 de março de 2009 sobre o ponto de monitoramento (aeroporto de Vitória).....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algumas diferenças entre os modelos MM5 e o WRF.	25
Tabela 2 – Opções de microfísica e suas propriedades.	40
Tabela 3 – Opções de parametrização de <i>cumulus</i> e suas propriedades.....	42
Tabela 4 – Opções de parametrização da camada superficial e suas propriedades	44
Tabela 5 – Opções de parametrização da Camada Limite Planetária e suas propriedades	45
Tabela 6 – Opções de parametrização para radiação.....	47
Tabela 7 – Parâmetros meteorológicos monitorados em cada estação.....	61
Tabela 8 – Localização das estações meteorológicas de superfície e da radiossondagem.	62
Tabela 9 – Parâmetros estatísticos aplicados aos resultados da simulação da temperatura a 2m. para o verão. FS representa o erro fracional, FB o desvio padrão fracional, NMSE o erro quadrático médio normalizado e r representa o coeficiente de correlação.	90
Tabela 10 – Parâmetros estatísticos aplicados aos resultados da simulação da velocidade do vento zonal a 10 m para o verão. . FS representa o erro fracional, FB o desvio padrão fracional , NMSE o erro quadrático médio normalizado e r representa o coeficiente de correlação.....	95
Tabela 11 – Parâmetros estatísticos aplicados aos resultados da simulação da velocidade do vento meridional a 10 m. Para o verão. Onde FS representa o erro fracional, FB o desvio padrão fracional e NMSE o erro quadrático médio normalizado.....	96
Tabela 12 – Parâmetros estatísticos aplicados aos resultados da simulação da temperatura a 2m. Para o inverno. FS representa o erro fracional, FB o desvio padrão fracional, NMSE o erro quadrático médio normalizado e r representa o coeficiente de correlação.	114
Tabela 13 – Parâmetros estatísticos aplicados aos resultados da simulação da velocidade do vento zonal a 10 m. Para o inverno. Onde FS representa o erro fracional r representa ao coeficiente de correlação.	121
Tabela 14 – Parâmetros estatísticos aplicados aos resultados da simulação da velocidade do vento meridional a 10 m. Para o inverno. Onde FS representa o erro fracional, FB o desvio padrão fracional e NMSE o erro quadrático médio normalizado.....	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AERMOD	American Meteorological Society Environmental Protection Agency Regulatory Model
AFWA	Air Force Weather Agency
ARPS	Advanced Regional Prediction System
ARW	Advanced Research WRF
AQM	Modelos de Qualidade do Ar
CALPUFF	California Puff Model
CAPE	Convective Available Potential Energy/ Energia Potencial Convectiva disponível
CAPS	Center of Analysis and Prediction of Storms
CLP	Camada Limite Planetária
CLN	Camada Limite Noturna
CMAQ	Community Multiscale Air Quality
COAMPS	Coupled Ocean/Atmospher Mesoscale Prediction System
DEM	Modelo de Elevação Digital (Digital Elevation Model)
FAA	Federal Aviation Administration
FS	Fractional Standard
FB	Fracional Bias
GDAS	Global Data Assimilation System
GFS	Global Forecast System
GRADS	Grid Analysis and Display System
GRIB	Gridded Binary
GTOPO30	Global Topographic Data
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LSM	Land Surface Model
MAE	Erro Absoluto
MBE	Erro Médio
MCLP	Modelo Numérico Unidimensional da Camada Limite Planetária
MMM	Mesoscale and Microscale Meteorology
MM5	Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model
MRF	Medium Range Forecast model
MYJ	Mellor-Yamada-Janjic
NCAR	National Center for Atmospheric Research

NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NMSE	Erro quadrático médio normalizado (<i>normalized mean square error</i>)
NMM	Nonhydrostatic Mesoscale Model
NETCDF	Network Common Data Form
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRL	Naval Research Laboratory
CLP	Planetary Boundary Layer/Camada Limite Planetária
RAMQAr	Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar
r	Coefficiente de Correlação
TFS	Texas Forest Service
TKE	Energia Cinética Turbulenta
UCM	Noah Land Surface Model and Urban Canopy model
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
USGS	U.S. Geological Survey
U.S. EPA	Agência Americana de Proteção Ambiental
UTC	Universal Time Coordinated
WRF	Weather Research and Forecasting Model
YSU	Yonsei University

SUMÁRIO

Resumo	6
Abstract	7
Lista de Figuras	8
Lista de Tabelas	9
Lista de Abreviaturas e Siglas	10
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	19
2.1. CAMADA LIMITE PLANETÁRIA (CLP)	19
2.2. DADOS METEOROLÓGICOS E SUA APLICAÇÃO EM ESTUDOS DE QUALIDADE DO AR.....	22
2.3. MODELOS METEOROLÓGICOS DE MESOESCALA.....	23
2.4. ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE MESOESCALA.....	25
3 DESCRIÇÃO DO MODELO	32
3.1. MODELO WRF.....	32
3.2. MODELAGEM MATEMÁTICA	34
3.2.1. SISTEMA DE COORDENADAS	34
3.2.2. EQUAÇÕES DE EULER NA FORMA DE FLUXO	35
3.2.3. PARAMETRIZAÇÕES FÍSICAS	39
3.2.3.1 ESQUEMAS DE MICROFÍSICA	40
3.2.3.2 PARAMETRIZAÇÃO DE <i>CUMULUS</i>	41
3.2.3.3 CAMADA LIMITE SUPERFICIAL	43
3.2.3.4 CAMADA SUPERFICIAL DO SOLO.....	43
3.2.3.5 CAMADA LIMITE PLANETÁRIA (CLP).....	44
3.2.3.6 RADIAÇÃO ATMOSFÉRICA.....	46
3.3. MÉTODOS NUMÉRICOS.....	47
3.3.1. DISCRETIZAÇÃO NO TEMPO	47
3.3.1.1 ESQUEMA DE INTEGRAÇÃO RUNGE-KUTTA (RK3).....	48
3.3.1.2 INTEGRAÇÃO ACÚSTICA.....	49

3.3.2.	DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL.....	50
3.3.3.	ANINHAMENTO DE GRADES	51
3.3.4.	ALGORÍTMO COMPUTACIONAL.....	52
4	METODOLOGIA.....	54
4.1.	REGIÃO DE ESTUDO	54
4.2.	CONFIGURAÇÃO INICIAL DO MODELO	56
4.3.	DADOS DE COMPARAÇÃO	59
4.4.	ANALISE DE PRECISÃO DAS SIMULAÇÕES	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
5.1.	CASO 1: VERÃO.....	66
5.1.1.	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	67
5.1.1.1	COMPARAÇÃO COM RADIOSSONDAGEM	79
5.1.1.2	COMPARAÇÕES COM AS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE SUPERFÍCIE E TESTE DE DESEMPENHO.....	86
5.2.	CASO 2: INVERNO.....	99
5.2.1.	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	100
5.2.2.	COMPARAÇÕES COM AS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE SUPERFÍCIE E TESTE DE DESEMPENHO	110
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	124
7	REFERÊNCIAS.....	127
8	ANEXOS.....	134
8.1.	ANEXO A	134
8.2.	ANEXO B.....	135

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o meio ambiente e a saúde humana acarretou um aumento significativo no interesse científico por assuntos relacionados à área de meteorologia e de modelos de qualidade do ar. Os resultados destes estudos podem e devem ser usados em prol da sociedade como ferramentas de monitoramento ambiental, previsão de possíveis impactos ambientais devido à emissão de poluentes ou também na previsão do tempo.

É possível compreender o transporte de poluentes na Camada Limite Planetária (CLP), realizando uma série de observações de parâmetros que influenciam diretamente a capacidade dispersiva da atmosfera. Mas isto exige uma série de experimentos, equipamentos e profissionais especializados; o que acaba elevando os custos das observações e medições. Além disso, a utilização de observações experimentais não permite uma completa previsão de futuros impactos ambientais, tais como os oriundos da implantação de novas fontes emissoras. De modo a resolver este impasse, pesquisadores desenvolveram ferramentas para estimar a concentração de poluentes simulando matematicamente o seu comportamento na atmosfera, de forma que seus resultados pudessem ser utilizados tanto por agências reguladoras do meio ambiente quanto em pesquisas acadêmicas.

Alguns aspectos importantes que devem ser abordados com relação à poluição atmosférica, por exemplo: velocidade e direção do vento, estabilidade atmosférica, radiação solar, altura da camada de dispersão e precipitações pluviométricas que são caracterizantes da capacidade dispersiva da atmosfera. Tais condições meteorológicas, por sua vez, estão relacionadas diretamente à fatores físicos locais como localização geográfica, topografia, cobertura vegetal, massas d'água, estruturas urbanas entre outros. O resultado é uma complexa interação que tem como consequência, variações do potencial de poluição do ar para uma área ou região em um dado intervalo de tempo (GRELL *et al.*, 2005).

Os modelos atuais usados para simular matematicamente a dispersão e concentração de poluentes atmosféricos como o California Puff Model (CALPUFF) e UK-ADMS; *American Meteorological Society Environmental Protection Agency Regulatory Model (AERMOD)*, 2004; *Community Multiscale Air Quality (CMAQ)*, 1998; propostos pela Agência Americana de Proteção Ambiental (US EPA) vem sendo largamente recomendados pela comunidade científica, órgãos reguladores e indústrias. Todos estes modelos requerem dados

meteorológicos como parâmetros de entrada, sendo que alguns deles, tal qual o CMAQ, requerem informações meteorológicas mais complexas. Como o conhecimento da evolução temporal e espacial do campo de vento, temperatura e pressão na região de estudo.

Nos últimos anos vários pesquisadores (GILLIAN *et al.*, 2006; CORRÊA *et al.*, 2006; SRINIVAS *et al.*, 2006; CHANDRASEKEAR *et al.*, 2003) vêm realizando estudos que propõem o acoplamento de modelos de qualidade do ar à modelos tridimensionais que calculam os parâmetros meteorológicos tais como, campo de vento, pressão e temperatura entre outros fatores que são dados de entrada cruciais para os modelos de qualidade do ar (CHENG *et al.* 2008; KESARKAR *et al.*, 2006). A determinação do campo de vento bem como outros parâmetros meteorológicos têm diversos usos distintos, desde a validação de um modelo até a previsão do tempo (GILIAN *et al.*, 2006; CORRÊA *et al.* 2006; SRINIVAS *et al.*, 2006).

As atuais abordagens para a determinação do campo de vento podem ser divididas em duas categorias: (i) prognóstico e (ii) diagnóstico. Modelos diagnósticos utilizam observações meteorológicas ou resultados de simulações de outros modelos para produzir campos de velocidade entre outras variáveis. Os modelos prognósticos também utilizam dados de outros modelos, porém possuem uma característica especial; o avanço no tempo. Podendo assim além de diagnosticar as propriedades de interesse, realizar previsões futuras das mesmas propriedades.

Existem vários modelos meteorológicos prognósticos de mesoescala¹ citados na literatura científica, entre outros o Modelo Numérico Unidimensional da Camada Limite Planetária MCLP (CORREA *et al.*, 2006), *Weather Research and Forecasting* (WRF) (SKAMAROCK, *et al.* 2005; WANG *et al.*, 2004), o *PSU/NCAR Meso-scale Model* (MM5) (DUDHIA *et al.*, 2000; GRELL *et al.*, 1994), o *Regional Atmospheric Modelling System* (RAMS) (PIELKE *et al.*, 1992), tais modelos tem o potencial de fornecer informações detalhadas sobre a estrutura da CLP.

É importante citar que apesar destes modelos incluírem representações bastante detalhadas dos processos físicos que acontecem na atmosfera, eles ainda não conseguem representar com precisão alguns fenômenos atmosféricos; devido à alta complexidade dos processos que ocorrem na atmosfera e a falta de capacidade computacional para resolver todas as equações

¹ Segundo Arya (1999), mesoescala é a escala de fenômenos atmosféricos que variam de 5 à 1000km.

governantes destes processos. Desta forma, são necessárias parametrizações para incorporar alguns fenômenos como turbulência atmosférica, transferência de calor e massa próximos à superfície e perturbações causadas pelo relevo. O que resulta muitas vezes em desvios entre os resultados obtidos experimentalmente e o os resultados obtidos através da modelagem matemática (BORGE *et al.*, 2008; CHALLA *et al.*, 2009).

Nos estudos mais recentes, os modelos frequentemente citados na literatura científica são o MM5 e o WRF. O MM5 apesar de ser amplamente utilizado e já verificado em vários estudos, GILIAN *et al.*, 2006; CORRÊA *et al.*, 2006; SRINIVAS *et al.*, 2006; CHENG *et al.*, 2008, teve a sua última versão atualizada no ano de 2005 e desde então não sofre modificações, indicando uma descontinuidade no seu desenvolvimento e ao mesmo tempo outro modelo. Por outro lado, o WRF que é uma adaptação feita a partir do MM5, é considerado um modelo da nova geração e está assumindo o lugar do MM5 para estudos na área da meteorologia e qualidade do ar (BORGE *et al.*, 2008).

O presente trabalho propõe um estudo semelhante aos realizados por (CHALLA *et al.*, 2009; BORGE *et al.*, 2008; AKYLAS *et al.*, 2007; CORREA *et al.*, 2006; CHEN *et al.*, 2005; PEREIRA, 2004; HANNA & YANG, 2001) que mostram a importância de conhecer a estrutura da Camada Limite Planetária bem como a precisão dos resultados obtidos pelos modelos existentes na literatura.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é realizar a simulação do comportamento temporal e espacial da Camada Limite Planetária sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) no Espírito Santo, tendo em vista o conhecimento de suas propriedades dinâmicas e termodinâmicas bem como a validação do modelo de mesoescala WRF.

Com o intuito de alcançar este objetivo faz-se necessária a realização de alguns objetivos específicos tais como:

- Determinar a estrutura da camada limite atmosférica sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória utilizando o modelo WRF;
- Comparar os resultados obtidos do modelo com dados experimentais obtidos das estações meteorológicas instaladas na região e com dados de radiossondagens;
- Aplicação de testes estatísticos como o erro fracional (FB), erro quadrático

médio normalizado (NMSE), desvio padrão normalizado (FS) e coeficiente de correlação (r) para analisar o desempenho do modelo.

Esta dissertação está dividida da seguinte forma:

- Revisão da Literatura;
- Descrição do Modelo;
- Metodologia;
- Resultados e Discussões;
- Conclusões e Sugestões;
- Referências;
- Anexos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo está dividido em quatro seções: onde a primeira faz um breve resumo sobre a Camada Limite Planetária; a segunda trata dos dados meteorológicos usados em modelos de qualidade do ar; a terceira parte corresponde a uma breve explanação sobre os modelos meteorológicos e por fim, a quarta parte aborda uma série de estudos referentes à modelos matemáticos de mesoescala enfocando seu desempenho na simulação atmosférica.

2.1. CAMADA LIMITE PLANETÁRIA (CLP)

O conhecimento da Camada Limite Planetária (CLP) é de fundamental importância para o entendimento dos processos na baixa troposfera e mais especificamente, para os fenômenos ligados à dispersão de poluentes atmosféricos, pois é nesta região onde localizam-se a maior parte das fontes emissoras de gases e material particulado, sejam elas naturais ou antropogênicas. Em decorrência disso a CLP representa a região onde os gases emitidos transportados pelo vento e sofrem suas primeiras transformações químicas e fotoquímicas (STRAWBRIDGE *et al.* 2004). A Figura 2.1-1 representa a região da troposfera, onde pode-se observar suas divisões como a Camada Limite Planetária (CLP). De acordo com STULL (1998), a CLP é a região da troposfera que é diretamente influenciada pela presença da superfície da Terra e responde as forçantes superficiais tais como forças de atrito, evaporação, emissão de poluentes entre outros em uma escala de tempo inferior a uma hora e sua altura varia de centenas de metros a vários quilômetros.

A CLP é a região onde vivemos e os fenômenos que nela ocorrem influencia diretamente a nossa vida, o conhecimento sobre o escoamento dos gases e o transporte de material particulado na CLP é de suma importância para diversas áreas de pesquisa tais como meteorologia, engenharia mecânica, civil e ambiental, entre outras áreas afins. Por exemplo, localização de turbinas para geração de energia eólica e construção de grandes edifícios e pontes.

A origem da CLP está ligada aos processos turbulentos e radiativos que tem relação direta com a troca de energia entre a superfície terrestre e a baixa atmosfera. Dentre os quais se

destacam o aquecimento devido à energia solar, a absorção dessa energia pelo solo, a transpiração das plantas e ventos locais. A CLP também é influenciada pela topografia e pela rugosidade do terreno (ocupação do solo e cobertura vegetal). Estas condições impõem o ajustamento de variáveis como velocidade e direção do vento, temperatura e umidade aos contornos da superfície que conseqüentemente determinam o processo de transporte vertical na CLP (CHALLA *et al.*, 2009; SEAMAN, 1999).

O processo de transporte vertical (fluxos de calor latente e sensível) determina a estrutura vertical da temperatura e da umidade na atmosfera, enquanto o transporte vertical de quantidade de movimento (fluxo turbulento de *momentum*) condiciona a estrutura dinâmica média da CLP (GRELL *et al.* 2005).

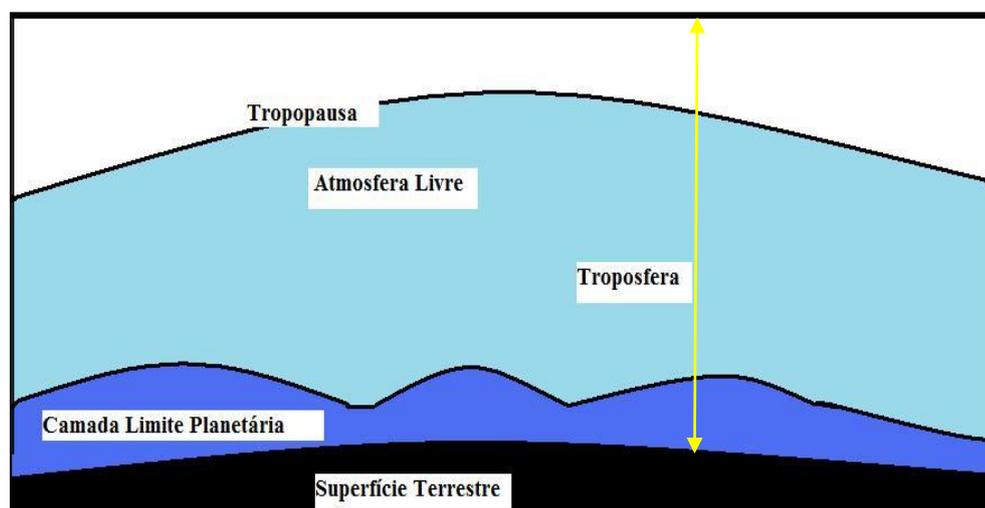


Figura 2-1– Divisão da troposfera em função da influência da superfície Terrestre, adaptado de Stull, 1988.

A CLP é fortemente afetada pelos fluxos turbulentos, mas para estudá-la e entendê-la, faz-se necessário quantificá-la. Ainda hoje, definir turbulência é uma tarefa difícil. Pode-se visualizá-la como uma superposição de vórtices irregulares com diferentes escalas espaciais e temporais (STULL, 1988). Uma de suas características principais é o processo de “cascata de energia”, que é a dissipação da energia cinética em energia interna pela quebra dos vórtices maiores em vórtices menores. A transferência de energia de um vórtice para outro de tamanho diferente ocorre de uma forma não linear. A Energia Cinética Turbulenta (ECT) é difusiva, sendo responsável pelo transporte de propriedades como massa, *momentum* e calor.

Desempenhando um papel fundamental na interação térmica e dinâmica entre a atmosfera e a superfície, bem como na dispersão de poluentes.

Uma das mais importantes características que influenciam o transporte de poluentes na atmosfera é a altura da CLP. A altura da CLP pode ser determinada através de várias maneiras: uso de radares (STRAWBRIDGE *et al.* 2004), radiossondagem ou com formulações disponíveis na literatura (STULL, 1998; ARYA 1999; TENNEKES, 1972). Com o incremento na tecnologia e no conhecimento, os novos modelos matemáticos tornaram-se ferramentas interessantes para o estudo da CLP em regiões distintas devido ao seu baixo custo em comparação às campanhas necessárias para tais observações. Os modelos matemáticos evoluíram no sentido de acrescentar ao seu código algumas características específicas dos terrenos, por exemplo, no MM5 (GRELL *et al.*, 1994) e no WRF (SKAMAROCK *et al.* 2008) foi incorporado um sistema de referência que acompanha a topografia do terreno.

Pode-se observar na Figura 2.1-2 a evolução temporal da CLP, onde se verifica que o seu início é aproximadamente a partir das 6h e a medida que a superfície da Terra é aquecida ocorre um aumento na sua altura. Seus valores máximos são atingidos entre os períodos da manhã e da tarde. A camada de mistura é uma porção da atmosfera que vai da superfície da Terra até altura onde ocorre a inversão térmica. É caracterizada por uma forte mistura vertical impulsionada pelos fluxos de calor, umidade e de massa. Sua altura sofre uma grande variação diária e influencia diretamente a dispersão atmosférica, é depende notadamente da diferença entre a temperatura superficial e atmosférica.

As condições meteorológicas em regiões costeiras são claramente distintas de regiões interiores. O padrão de escoamento atmosférico em regiões litorâneas é determinado pelo contraste da temperatura entre a terra e o mar causado pela forma do litoral e pela heterogeneidade da ocupação do solo o que causa variação na temperatura influenciando diretamente os fluxos de calor latente e calor sensível gerando fluxos turbulentos que são os responsáveis pela transferência de energia e transporte na atmosfera (GRELL *et al.* 2005).

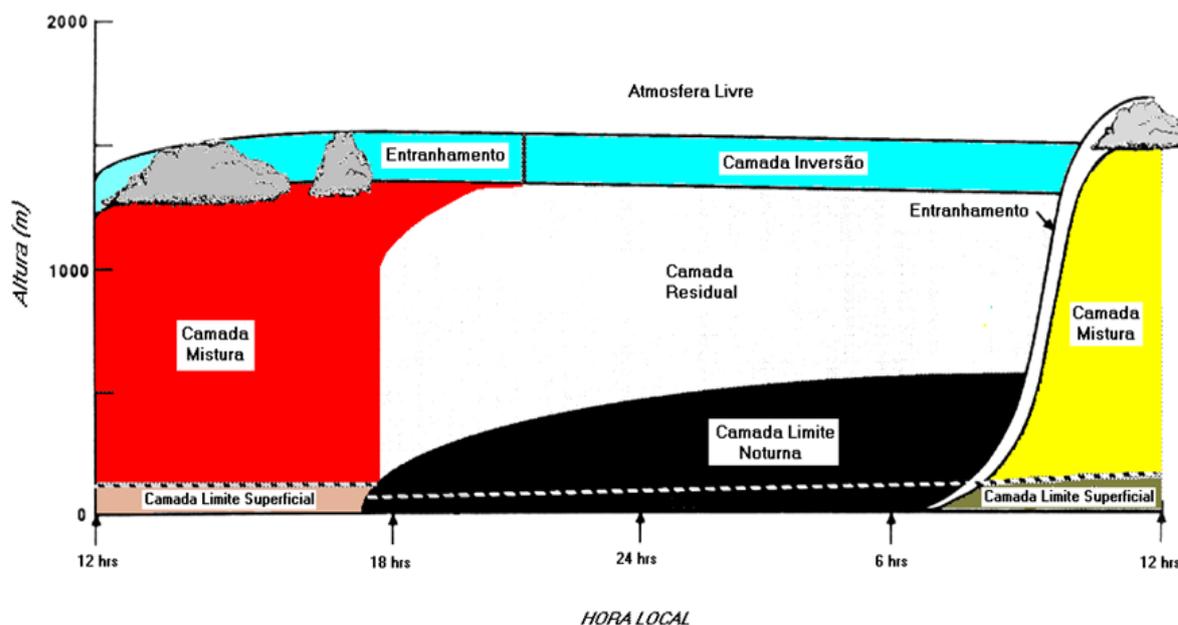


Figura 2-2 – Evolução temporal da Camada Limite Planetária, adaptado de Stull, (1988).

2.2. DADOS METEOROLÓGICOS E SUA APLICAÇÃO EM ESTUDOS DE QUALIDADE DO AR

Os modelos de qualidade do ar foram desenvolvidos para o uso em investigações científicas e também para fornecer suporte técnico às políticas de gerenciamento da qualidade do ar. Estes modelos estão cada vez mais complexos, porém seus resultados dependem da precisão e acurácia de uma extensa gama de parâmetros externos e internos. Apesar da evolução da tecnologia dos computadores, da quantidade de dados disponíveis e técnicas de modelagem seus resultados podem conter erros importantes (SEAMAN, 1999).

Os dados meteorológicos utilizados com dados de entrada para os de modelos de qualidade do ar são a componente horizontal e vertical da velocidade do vento, a temperatura, fração de nuvens e quantidade de água disponível, precipitação, intensidade de radiação solar, pressão ao nível do mar, intensidade de turbulência (energia cinética turbulenta ou coeficiente de difusão vertical), fluxos superficiais de calor e *momentum* entre outros. Tais dados podem ser obtidos de maneiras diferentes, sendo que as mais comuns são observações em estações meteorológicas e modelagem matemática. A primeira abordagem gera resultados confiáveis, porém seu custo ainda é um fator limitante, visto que requer grandes investimentos na compra das estações meteorológicas e sua manutenção. Com relação a segunda abordagem, já existem no mercado modelos matemáticos tais como o WRF (SKAMAROCK *et al.*, 2008) e o

MM5(GRELL *et al.*, 1994) entre outros que são capazes de fornecer tais dados. Os modelos matemáticos ficam sempre restritos pela sua capacidade de representar a realidade de maneira adequada, isto é, sua capacidade de reproduzir corretamente os padrões de circulação e demais parâmetros da CLP necessários para os Modelos de Qualidade do Ar. De maneira geral, a abordagem mais adequada baseia-se na utilização conjunta de observações com estações meteorológicas e modelos matemáticos.

O maior problema para o uso destes modelos é que como dito anteriormente, eles dependem dos dados meteorológicos para dar início em suas simulações. De acordo ainda com SEAMAN, (1999) existem três categorias para as fontes dos erros com relação a obtenção e geração destes dados meteorológicos: (i) aquisição dos dados, (ii) modelos numéricos e (iii) parametrizações físicas. Mas podemos incluir outra fonte, o acoplamento dos modelos de qualidade do ar à modelos meteorológicos.

O acoplamento entre modelos de qualidade do ar e modelos meteorológicos vem sendo realizado por vários pesquisadores, a exemplo de WRF-CMAQ (KESARKAR *et al.*, 2007), WRF-AERMOD (CHANDRASEKAR *et al.*, 2003).

Este tipo de acoplamento é conhecido como acoplamento *off-line*, onde os dados meteorológicos são simulados e depois incorporados aos modelos de qualidade do ar. Atualmente, os modelos meteorológicos MM5 e WRF já possuem dentro do seu código, implementações provenientes de alguns destes modelos de qualidade do ar para que possam realizar os mesmos cálculos de forma *on-line*, ou seja, resolvem ao mesmo tempo os dados meteorológicos e de dispersão de poluentes atmosféricos. Alguns estudos neste sentido já estão sendo divulgados, a exemplo de Chapman *et al.*, 2009; Geng *et al.*, 2007; Jorba *et al.*, 2007; Grell *et al.*, 2005.

2.3. MODELOS METEOROLÓGICOS DE MESOESCALA

A meteorologia também chamada de ciência atmosférica é a ciência que investiga os fenômenos da atmosfera Terrestre e de outros planetas, com foco nos processos físicos que envolvem múltiplas escalas e na previsão do tempo. Atualmente, este estudo é realizado com a ajuda de modelos matemáticos. Existe grande variedade de modelos meteorológicos disponíveis que resolvem escalas diferentes de tempo e espaço. Os modelos de larga escala ou

escala sinótica (GFS, Eta) (WEDAM *et al.*, 2009; JONES *et al.*, 2007) e aqueles de mesoescala (WRF, MM5, RAMS, NAM, BRAMS entre outros).

Um dos modelos mais citados na literatura científica para estudos de mesoescala meteorológica é o MM5 (GRELL *et al.* 1994), principalmente quando ligados à qualidade do ar (ZHAO *et al.*, 2009). O sistema MM5 é um modelo de simulação numérica desenvolvido no final da década de 70 pela *Penn State University* (PSU) em conjunto com o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Encontra-se na 5ª geração e possui como principais características a capacidade de múltiplos aninhamentos de grade, dinâmica não hidrostática e assimilação de dados em quatro dimensões além de várias parametrizações físicas e portabilidade em diversas plataformas computacionais incluindo o sistema LINUX.

Apesar do código do MM5 não ter sofrido atualizações desde 2005, este modelo ainda é utilizado em simulações apresentadas na literatura (ZHAO *et al.*, 2009; CHENG *et al.* 2008). Atualmente, o modelo mais estudado é o WRF que vem sendo desenvolvido ano a ano com novas parametrizações e corresponde ao estado da arte de modelos meteorológicos de mesoescala para simulações climáticas, previsões numéricas do tempo e em monitoramento da qualidade do ar.

O modelo *Weather Research Forecasting* (WRF) (SKAMAROCK *et al.*, 2008) foi desenvolvido para a pesquisa, previsão do tempo, modelagem da qualidade do ar, modelagens climáticas em escala regional, pesquisa de furacões entre outras. Seu desenvolvimento teve parceria colaborativa entre vários centros de pesquisa, principalmente entre o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), *the National Oceanic and Atmospheric Administration* (*the National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) and *the Forecast Systems Laboratory* (FSL)), *Air Force Weather Agency* (AFWA), *Naval Research Laboratory*, *Oklahoma University*. Suas principais características são: sistema de assimilação de dados em 3 dimensões variáveis (3DVAR), arquitetura de software que permite a sua execução em paralelo e a extensibilidade do sistema que permite o programa funcionar para escalas variáveis de poucos metros até centenas de quilômetros. A Tabela 1 mostra algumas diferenças entre os modelos MM5 e WRF.

ZHAO *et al.*, 2008; KUSAKA *et al.*, 2005 realizaram estudos para verificar qual dos dois modelos representa de melhor forma os dados observados, porém seus estudos foram realizados em diferentes condições atmosféricas. Os estudos comprovaram que apesar de não serem muito extremas, existem diferenças entre os resultados obtidos pelos dois modelos.

Principalmente com relação ao campo de vento, já que os autores são categóricos em afirmar que o campo de vento gerado pelo WRF é claramente melhor detalhado quando comparado à simulação realizada pelo MM5. Como o campo de vento é de suma importância para os modelos de qualidade do ar, o modelo WRF foi selecionado para o presente estudo. No próximo capítulo, o modelo WRF será descrito mais detalhadamente.

Tabela 1– Algumas diferenças entre os modelos MM5 e o WRF.

Modelo	MM5	WRF
Equações Básicas	Totalmente compressíveis	Totalmente compressíveis
Coordenadas verticais	<i>Terrain following</i> para a altura (sigma-z)	<i>Terrain following</i> para a altura e pressão.
Projeção do mapa	Polar stereographic; Lambert, Mercator.	Polar stereographic, Lambert; Mercator, Lat-lon.
Estrutura horizontal da grade	Arakawa-B	Arakawa-C
Método de integração	1ª ordem “leapfrog”	3ª ordem Runge-Kutta
Equações	Formulação advectiva (sem propriedade conservativas).	Conservação da massa, <i>momentum</i> e escalares usando equações prognósticas na forma de fluxo
Advecção	Diferenças centradas de 2ª ordem para advecção.	Diferenças centradas de 6ª ordem ou 5ª ordem “ <i>upwind</i> ”.

Fonte: manual do WRF, SKAMAROCK *et al*, 2008 e manual do MM5, GRELL *et al*. 1994.

2.4. ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MODELOS MATEMÁTICOS DE MESOESCALA

Vários estudos vem sendo realizados com diferentes modelos matemáticos para simular as propriedades dinâmicas e termodinâmicas da CLP, estes são importantes para o conhecimento do seu desenvolvimento diário. Neste contexto, percebe-se a importância da aplicação de alguns parâmetros estatísticos para comprovar a competência destes modelos em realizar tais simulações. Os trabalhos científicos descritos nesta seção mostram a importância da simulação da CLP e da aplicação de parâmetros estatísticos nos resultados simulados frente a dados medidos por estações meteorológicas.

SCOLAR *et al.* (2000) estudaram a CLP sobre a região de Iperó-SP usando simulações numéricas baseadas em um modelo unidimensional com fechamento de segunda ordem numa versão modificada do Modelo Numérico Unidimensional da Camada Limite Planetária (MCLP) para a região tropical proposto por Oliveira (1990). Para considerar as características do solo no cálculo dos fluxos da superfície, foi incluído um modelo de duas camadas no subsolo de acordo com DEARDORFF (1978). Utilizou-se também o esquema de transferência radiativa desenvolvido por KATAYAMA (1972) para o cálculo da radiação solar que atinge a superfície. As simulações incluíram, o efeito de cobertura de nuvens através da distribuição vertical de umidade relativa de modo a possibilitar oito configurações possíveis para nuvens.

Os resultados indicaram que os fluxos verticais turbulentos, em resposta ao aquecimento solar, de calor sensível e latente têm valores máximos próximo à superfície decrescendo linearmente com a altura, favorecendo assim os transportes de calor e umidade para os níveis mais altos da atmosfera. No período noturno a turbulência térmica praticamente cessa e conseqüentemente os fluxos turbulentos são pequenos em toda extensão vertical da CLP. Em resposta a isto, os perfis verticais médios de temperatura e umidade são melhor simulados durante o dia. Por outro lado, os fluxos na superfície e o saldo de radiação simulada estão em quase perfeita concordância com os observados durante todo o período, e o ciclo diurno da temperatura do ar próximo à superfície foi satisfatoriamente simulado.

No estudo realizado por GILLIAN *et al.* (2006), o modelo MM5 foi utilizado para testar a performance de algumas variáveis e processos que podem afetar diretamente os resultados de modelos de dispersão de poluentes como campo e perfil vertical da velocidade do vento, umidade relativa, razão de mistura, temperatura a 2m do solo entre outras. Para isso, os autores utilizaram testes estatísticos básicos como erro absoluto, erro quadrático médio entre outros. Os dados para comparação foram extraídos de 12 pontos diferentes da região leste dos Estados Unidos. Eles verificaram que o modelo tende a fornecer valores maiores de umidade relativa, mas com apresenta bons resultados para a taxa de mistura. Os perfis verticais de velocidade do vento foram comparados com os dados observados da estrutura vertical da CLP e verificou-se que em baixas altitudes o modelo os subestimava valores da velocidade, mas com o aumento da altura estes valores se aproximam dos valores observados. Já para o campo de vento a 10 metros não foi verificada uma diferença significativa entre os valores da média

anual de 2002 para os domínios de simulação. Fato que também percebido para a temperatura a 2m.

CORRÊA *et al.* (2006) realizaram diversas simulações com o modelo de mesoescala MM5 com o objetivo de analisar a capacidade de prognóstico deste modelo para campo de vento, temperatura e umidade relativa do ar em diversos níveis da atmosfera na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Com o intuito de verificar a acurácia do modelo, seus resultados foram comparados a dados de observação meteorológica na região do aeroporto do Galeão. Este estudo mostrou que a direção do campo de vento a 10 m é razoavelmente bem representada embora ocorrendo uma tendência em subestimar sua intensidade nos períodos analisados.

Os melhores resultados foram obtidos para a faixa de velocidade do vento de 1 a 3 m/s. O campo de vento em média e elevadas alturas foi simulado corretamente. Os perfis verticais simulados apresentaram maior concordância com os dados observados nos primeiros níveis da atmosfera. Os resultados obtidos com o modelo apresentaram uma tendência a superestimar a umidade em alturas elevadas. Os resultados deste trabalho apontaram alguns padrões de comportamentos do modelo para as situações estudadas, compatíveis com resultados já verificados anteriormente por Costa & Souza (2002), Atmet (2002), Arellano *et al.* (2002) e Bright & Mullen (2002).

O estudo realizado por Srinivas *et al.* (2006) teve como objetivo estudar a sensibilidade das simulações utilizando-se o MM5 frente à circulação de brisas terrestres e marinhas, no sul da costa leste da região de Chennai na Índia, em relação às parametrizações usadas no modelo. Estas parametrizações estão disponíveis e devem ser usadas de acordo com a resolução a ser usada. A parametrização Blackadar (BK) é usada em previsões de médio alcance, (MRF) é usada para 1ª ordem não local e 2ª ordem e os outros dois, MELLOR-YAMADA (MY) *Eta planetary boundary layer* (CLP) e o GAYNO-SEAMAN (GS) são mais complexos uma ordem e meia que incluem um prognóstico da equação da energia cinética turbulenta.

Os dados usados neste estudo incluem dados da radiossondagem feita no observatório meteorológico do aeroporto de Chennai, dados micrometeorológicos provenientes de uma torre de observação e fluxos superficiais medidos através de anemômetro sônico do campo experimental na costa de Kalpakkam. Todas as parametrizações utilizadas produziram bons resultados para a temperatura, razão de mistura de vapor de água próximos da superfície.

Independente da parametrização escolhida, o fluxo de calor foi subestimado pelo modelo. O estudo mostra que não há melhoria drástica para o resultado da variável média e das propriedades turbulentas quando são usadas parametrizações mais complexas.

AKYLAS *et al.* (2007) conduziram um estudo sobre a região de Atenas (Grécia) para verificar como o MM5 reage à mudanças em suas parametrizações (BLACKADAR, MRF E ETA) para a Camada Limite Planetária. O estudo foi realizado em um período de 36h no mês de outubro de 2002 e as variáveis escolhidas para este estudo foram a temperatura a 2m e a velocidade e direção do vento a 10m. Seu domínio principal foi dividido em 2 sub-domínios com resoluções de grade de 8km e 2km.

Os autores mostraram através de testes estatísticos aplicados aos resultados das simulações que a temperatura a 2m foi melhor representada quando utilizado o esquema MRF e teve a sua pior representação com o ETA, mas nos dois casos todos os intervalos de confiança permaneceram dentro da margem de 95%. Já para os valores da velocidade do vento a 10m de altura, os melhores resultados ocorreram quando o esquema usado foi o ETA em domínio com espaçamento de malha de 2x2 km. Já para o domínio com espaçamento de malha de 8x8km a parametrização que obteve os melhores resultados foi a Blackadar (BK) enquanto o esquema MRF superestima os valores da velocidade principalmente no período noturno. Foi percebida também uma variação entre os resultados quando aplicada a mesma parametrização, mas em locais com topografia diferente. Devido aos resultados não conclusivos, os autores planejam realizar novos estudos com o intuito de investigar como os esquemas de parametrização do modelo influenciam a precisão do modelo.

CHENG *et al.* (2008) realizaram um estudo na região metropolitana de Houston-Galveston (EUA), sobre os efeitos de diferentes tipos de cobertura do solo (LC) e do uso do solo (LU) que são características de cada área de estudo, nas simulações meteorológicas. De acordo com os autores, outros estudos mostraram que os dados de LU e LC afetam significativamente os resultados das simulações (LAM *et al.* 2006; Lo & QUATTROCHI, 2003; CIVEROLO *et al.* 2005). Os dados de LU e LC usados foram gerados pelo *Texas Forest Service* (TFS) com a ajuda de imagens de satélite (LANDSAT) e dados auxiliares, com resolução de 30x30m. A versão utilizada pelos autores foi a MM5v3.60 (GRELL *et al.*, 1994) e o período foi entre 22 de agosto a 01 de setembro de 2000. Foram utilizados 4 domínios com grade horizontal de 108 km, 36 km, 12 km e 4 km, já os dados de inicialização do modelo foram fornecidos pelo

modelo Eta/NCEP. A adição de dados observacionais foi aplicada ao primeiro domínio e as variáveis utilizadas no “*nudging*²” foram “*upper-air wind*”, temperatura e vapor de água.

Para efeito de comparação, as simulações foram realizadas em diversas localizações sobre a região, sendo assim influenciadas de formas diferentes pela topografia e proximidade a grandes massas d’água. O autor mostrou que as modificações na LU, modificam a distribuição da energia melhoram de forma substancial as predições da temperatura e do campo de vento na superfície. A comparação dos perfis de velocidade e da altura da CLP com dados observacionais mostrou que o modelo tende a superestimar estas variáveis. Quando a comparação foi realizada entre o MM5-TFS e o MM5-USGS (default), os autores verificaram que para a velocidade e direção do vento, os resultados para as áreas interiores são melhores definidos do que os resultados de áreas costeiras (baía de Galveston) ocorrendo um incremento na altura da CLP. A conclusão do estudo mostra os benefícios do uso de dados ocupação e cobertura do solo com maior resolução, pois claramente os resultados encontrados nas simulações onde foi usado o default USGS-LULC foram superestimados por não conseguirem uma caracterização ideal do solo. Os dois modelos mostraram não estar totalmente adaptados ainda para simulações sobre regiões costeiras.

BORGE *et al.*, (2008) fizeram uma análise quanto à sensibilidade do WRF para o uso dos seus resultados como dados de entrada para modelos de qualidade do ar, sobre a Península Ibérica. Seu domínio foi dividido em 3 grades. Onde o enfoque é dado ao domínio 03 (D03) que possui 468x396 pontos com 3x3 km de espaçamento em sua malha horizontal. De acordo com os autores outros estudos (SEAMAN, 2000; PIELK & ULIASZ, 1998) identificaram a importância da qualidade dos dados de entrada em modelos de qualidade do ar. Sendo assim, seus testes visavam analisar qualidade dos resultados gerados pelo WRF para o uso em modelos de dispersão, mais especificamente o *Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model* (BYUN & CHING, 1999; BYUN & SCHERE, 2006). Para isso, parâmetros como viés de erro e erro quadrático médio foram aplicados em seus resultados para determinar as melhores parametrizações a serem usadas. Neste estudo foram utilizados dados de duas semanas, uma no inverno e outra no verão para comparação com os resultados das simulações. Foram utilizados para verificação os resultados da temperatura e umidade relativa a 2m de altura, velocidade e direção do vento a 10m de altura.

² Nudging é o termo utilizado para descrever a assimilação de dados experimentais como dados de entrada para o modelo. Por exemplo temperatura, campo de vento e umidade.

Após várias simulações com várias parametrizações os autores verificaram que raramente os esquemas produzem melhores resultados em todas as variáveis observadas. Porém o melhor ajuste para o modelo foi conseguido utilizando-se uma combinação específica para o WRF, sobre a Península Ibérica. Este estudo mostra que melhorando os resultados das simulações dos modelos meteorológicos que fornecem os dados iniciais aos modelos de qualidade do ar, estes podem sim apresentar resultados também cada vez melhores. Entretanto outros estudos devem ser realizados para verificar a real evolução do modelo.

Em 2009, CHALLA *et al.* conduziram um estudo sobre a região do Delta do rio Mississippi nos Estados Unidos da América para verificar sensibilidade do modelo WRF em relação a dois diferentes esquemas de parametrização da Camada Limite Planetária. Para isso, foi utilizado modelo de mesoescala WRF com o núcleo de processamento não-hidrostático ARW. O período escolhido foi uma semana do verão de 2006 onde ocorreu a ação de forçantes sinóticas sobre a região. As parametrizações escolhidas foram a *Yonsey University* (YSU) CLP não-local de primeira ordem e a TKE *Mellor-Yamada-Janjik* (MYJ) que consiste em uma formulação mais complexa.

O resultado do estudo demonstrou que a circulação acima dos 2km de altura não é tão influenciada pelos efeitos topográficos do terreno e é melhor definida pelos fluxos de larga escala. Foi mostrado ainda que a circulação associada à brisa marítima prevalece por volta dos 1000m no MYJ e 1200m no YSU, se estendendo até 2000m no MYS e 1500m no YSU. Com relação à temperatura e umidade, suas distribuições verticais foram bem simuladas nas duas parametrizações durante a manhã (condição estável). Foi também evidenciado que existe um incremento da temperatura potencial, um acréscimo dos valores da velocidade do vento e decréscimo da umidade com a altura.

Ainda no mesmo estudo, os autores comprovaram a existência de um pequeno acréscimo dos valores da velocidade e decréscimo da temperatura para as primeiras horas de simulação. A aplicação dos testes estatísticos mostrou claramente a alta correlação e baixo erro quadrático médio (RMSE) entre a simulação com MYJ e as radiossondagens da temperatura potencial, velocidade, direção do vento e umidade. As análises mostraram ainda que os 2 esquemas superestimaram a temperatura, velocidade e direção do vento e a umidade, mas subestimaram os valores da direção do vento. De acordo com os autores em geral, a parametrização YSU, que é mais simples no ponto de vista computacional, conseguiu resultados melhores para as variáveis selecionadas sobre a região de estudo. Estes resultados corroboram o estudo

realizado por BORGE *et al.* (2008), onde foi verificado que nenhum dos esquemas representa de forma precisa todas as variáveis investigadas.

Prabha & Hoogenboom (2009) estudaram dois eventos de geadas com o uso do modelo WRF com o intuito de verificar a na predição deste tipo de evento com foco na influência das opções de parametrizações físicas e dos processos da superfície da Terra. Dois períodos foram escolhidos, de 3 a 9 de dezembro de 2006 e 3 a 11 de abril de 2007. Os resultados foram comparados com observações realizadas pela rede automática de monitoramento ambiental da Georgia. As variáveis estudadas foram a temperatura de bulbo úmido, temperatura de ponto de orvalho, umidade relativa, velocidade e direção do vento. Testes estatísticos como erro médio (MBE), erro absoluto (MAE), erro médio quadrático (RMSE) e coeficiente de correlação (r) foram aplicados de forma a obter uma melhor visualização dos resultados obtidos.

Para a primeira situação onde havia a ocorrência de geadas intermitentes, a temperatura foi bem representada, mas o seu valor máximo foi subestimado. Já a temperatura de bulbo úmido e a direção do vento foram bem representadas. Na segunda metade do estudo, que está relacionada à fortes geadas ocorridas no mês de abril, o modelo conseguiu representar melhor os resultados. Em algumas das estações de observação o modelo conseguiu 100% de precisão em seus resultados. De acordo ainda com os autores, a precisão do modelo para temperaturas baixas chegou a 90% na maioria das estações. Os resultados mostram que a escolha certa das parametrizações físicas bem como o uso de dados com alta resolução para topografia e uso do solo ajuda o modelo a representar as variáveis de superfície com boa precisão, mas de acordo com os autores outros eventos e outras comparações ainda são necessárias.

Conforme descrito anteriormente, o objetivo principal deste trabalho é avaliar o desempenho das predições do modelo WRF para a Região Metropolitana da Grande Vitória, de maneira análoga aos estudos reportados acima. Uma descrição detalhada da metodologia empregada é apresentada no Capítulo 4.

3 DESCRIÇÃO DO MODELO

O núcleo dinâmico do WRF-ARW é capaz de resolver as equações não-hidrostáticas e compressíveis de Euler. Estas equações são expressas na forma de fluxo usando variáveis que possuem propriedades conservativas e são escritas utilizando a coordenada vertical η que acompanha o relevo (LAPRISE, 1992). Neste capítulo, serão mostradas as principais equações governantes do modelo, escritas na forma de fluxo para o plano cartesiano, um resumo das coordenadas η , sua discretização temporal, espacial e o aninhamento das grades.

Este capítulo está dividido em 3 seções principais. A Seção 3.1 apresenta uma breve descrição do modelo WRF, abordando principalmente sua origem. A Seção 3.2 descreve a formulação matemática empregada apresentando de maneira sucinta as equações governantes e as parametrizações empregadas. Finalmente, a Seção 3.3 descreve os métodos numéricos empregados para solução das equações governantes. Informações mais detalhadas sobre todas as formulações e algoritmos empregados no WRF podem ser encontradas em (*Ncar Technical Note*, SKAMAROCK *et al.*, 2008).

3.1. MODELO WRF

O modelo de mesoescala *Weather Research and Forecasting model* (WRF) é um sistema de modelagem numérica da atmosfera de última geração. O seu desenvolvimento é fruto dos esforços de vários centros de investigação e agências governamentais como o *Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM) Division do National Center for Atmospheric Research (NCAR)*, *National Oceanic and Atmospheric Administration*, *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)*, *Forecast Systems Laboratory (FSL)*, *Air Force Weather Agency (AFWA)*, *Naval Research Laboratory*, *Oklahoma University*, *Federal Aviation Administration (FAA)*, o *Center of Analysis and Prediction of Storms (CAPS)* e pesquisadores de várias outras universidades.

O sistema WRF é de domínio público e está disponível gratuitamente na página oficial do modelo (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>). É um instrumento flexível, portátil, já preparado para executar em sistemas de processamento paralelo e em várias plataformas de

computação. Está preparado para ser utilizado em diversas escalas de comprimento que variam de metros a milhares de quilômetros. Oferece uma diversidade de opções físicas e um sistema avançado para assimilação de dados vem sendo desenvolvido em paralelo ao modelo. As aplicações incluem previsões numéricas do tempo (operacionais ou não) voltadas para a pesquisa, pesquisas de parametrizações físicas e assimilação de dados, aplicações na previsão da qualidade do ar, acoplamento com modelos de previsões oceânicas e de dispersão de poluentes atmosféricos e simulações idealizadas.

O WRF representa o estado da arte de modelos de simulação atmosférica de mesoescala. Ele possui dois núcleos dinâmicos de processamento: ARW (*Advanced Research WRF*) e NMM (*Nonhydrostatic Mesoscale Model*). O NMM foi desenvolvido pelo NCEP a partir do modelo operacional hidrostático ETA, o ARW foi desenvolvido a partir do MM5 e é mantido pelo NCAR.

A primeira versão do WRF-v.1 foi lançada em dezembro de 2000. Desde janeiro de 2009 já está disponível a versão v.3.1, porém este estudo irá utilizar a versão v.3.01, pois era a disponível no início desta dissertação de mestrado. A versão do WRF utilizada neste estudo tem como características as equações não hidrostáticas inteiramente compressíveis, coordenada vertical de pressão do tipo que acompanham o relevo (η), malha do tipo Arakawa C, esquema de integração no tempo do tipo Runge-Kutta de terceira ordem, esquema de advecção de quinta e terceira ordem nas direções horizontal e vertical entre outras.

Algumas das principais características do WRF-ARW são:

- Equações não-hidrostáticas e totalmente compressíveis;
- Termos de curvatura da Terra e Coriolis;
- Domínio simples e com aninhamento (*nesting*);
- Coordenadas $\eta = (p_h - p_h(top)) / (p_{hs} - p_h(top))$, onde p_h é a pressão hidrostática;
- Malha vertical com espaçamento variável com a altura;
- Malha horizontal do tipo ARAKAWA-C;
- Vários fatores de projeção de mapa;
- Opções de passo de tempo Runge-Kutta 2ª e 3ª ordem;
- Opções para advecção de 2ª a 6ª ordem tanto na horizontal quanto na vertical;
- Pequeno passo de tempo para a resolução de ondas rápidas;

- Pequenos passos horizontais explícitos e verticais implícitos;
- Opção de *nudging* em todos os domínios.

3.2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Esta seção é destinada a apresentar um resumo de todas as características presentes no modelo matemático de mesoescala WRF. Mostrando suas principais equações bem como algumas de suas parametrizações presentes na versão 3.01 que será utilizada neste estudo.

3.2.1. SISTEMA DE COORDENADAS

O WRF suporta quatro projeções cartográficas que devem ser escolhidas de acordo com a latitude, são elas a Mercator, Cônica Conforme de Lambert, Polar Estereográfica e Latitude-longitude.

No WRF, cada um dos níveis verticais é definido por um valor discreto da coordenada η que é definida em relação à componente hidrostática da pressão e proporcional à massa da coluna de ar desde a superfície até o topo da fronteira superior do modelo. Este sistema de coordenadas que na superfície acompanham o relevo do terreno foi proposto por Laprise (1992). As equações do WRF-ARW são formuladas utilizando este sistema de coordenadas, também chamada de coordenadas vertical de massa, onde p_h é a componente hidrostática da pressão, p_{hs} e p_{ht} são os valores da pressão ao longo da superfície e no topo da camada. Seus valores variam de 1 na superfície à zero no topo do domínio vertical do modelo, conforme mostrado na equação 1 e na Figura 3.2-1.

$$\eta = \frac{(p_h - p_{ht})}{p_{hs} - p_{ht}}; \quad (1)$$

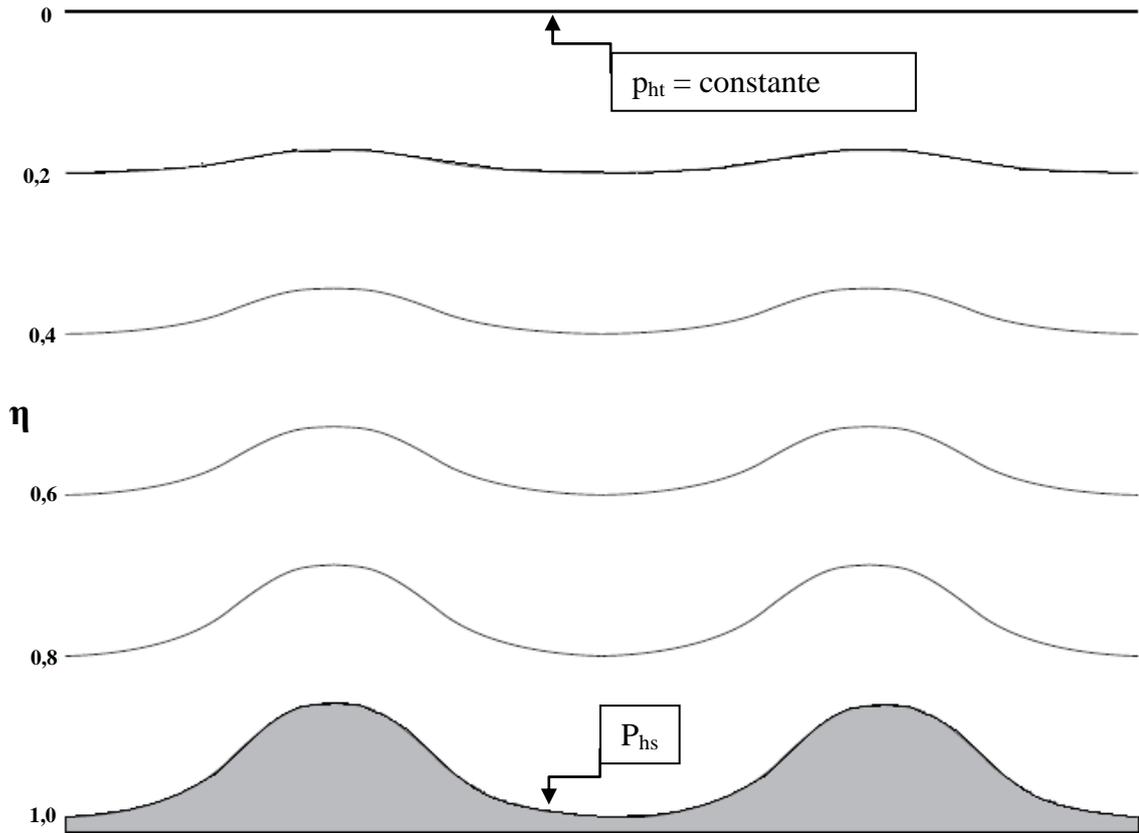


Figura 3-1 – Níveis eta (η), adaptado do manual do usuário do WRF (Wang *et al.*, 2008).

3.2.2. EQUAÇÕES DE EULER NA FORMA DE FLUXO

Todos os cálculos que são executados pelo WRF com o intuito de simular a atmosfera, são baseados em um conjunto de equações que governam todo o comportamento atmosférico. Este sistema de equações ainda não pode ser resolvido analiticamente sem as aproximações comumente feitas. Usando as variáveis já definidas na seção 3.2-1, as Equações de Euler podem ser escritas da seguinte forma:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot Vu) - \partial_x(p\phi_\eta) + \partial_x(p\phi_x) = F_U \quad (2)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot Vv) - \partial_y(p\phi_\eta) + \partial_y(p\phi_y) = F_V \quad (3)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot Vw) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_w \quad (4)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot V\theta) = F_\Theta \quad (5)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V\theta) = 0 \quad (6)$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1} [(V \cdot \nabla \phi) - gW] = 0 \quad (7)$$

$$\partial_\eta \phi = -\alpha \mu \quad (8)$$

$$p = p_0 \left(\frac{R_d \theta}{p_0 \alpha} \right)^\gamma \quad (9)$$

Sendo $\mu(x,y)$ representa a massa por unidade de área dentro da coluna do domínio (x,y) do modelo. As formas apropriadas para variáveis de fluxo são

$$\begin{aligned} V &= \mu v = (U, V, W); \\ \Omega &= \mu \dot{\eta}; \\ \Theta &= \mu \theta. \end{aligned} \quad (10)$$

Sendo $v = (u,v,w)$ a covariância das duas velocidades horizontais e na direção vertical respectivamente, enquanto $w = \dot{\eta}$ é a contravariância da velocidade vertical. A temperatura potencial é descrita como θ . Também aparecem nas equações governantes do WRF-ARW termos não conservativos com $\phi = gz$ chamado de geopotencial, pressão (p) e $\alpha = 1/\rho$ que é o inverso da densidade.

A temperatura potencial é denominada θ , $\phi = gz$ é o geopotencial, p é a pressão, $\alpha = 1/\rho$ é o inverso da densidade, $\gamma = cp/cv$, R_d é a constante do gás para ar seco, p_0 é a pressão de referência, $V = \mu v = (U, V, W)$, $\Theta = \mu \theta$ e $\Omega = \mu \dot{\eta}$. Os termos F_U , F_V , F_W e F_Θ representam respectivamente os termos forçantes devido à física do modelo, mistura turbulenta, projeções esféricas e a rotação da Terra.

As Equações 2 a 8 estão expressas na forma conservativa com exceção da equação 8 que é derivada da definição de geopotencial. Esta equação pode ser escrita na forma de fluxo, mas não seria interessante, pois o termo $\mu\phi$ não guarda propriedade conservativa alguma. A conservação da quantidade de movimento é representada pelas Equações 2 a 4, a conservação da energia (Eq. 5) a conservação da energia termodinâmica (Eq. 6) a conservação da massa (Eq. 7).

Com a introdução da umidade nas equações prognósticas de Euler, é mantido o acoplamento da massa de ar seco com as variáveis prognósticas, mantendo a equação de conservação para ar seco (Eq. 6) introduzindo um termo de fonte na equação de conservação da massa. Além disso, os termos da coordenada são definidos em função da massa de ar seco. Baseado nestes princípios, a coordenada vertical η será escrita da seguinte forma:

$$\eta = \frac{(p_{dh} - p_{dht})}{p_{hs} - p_{dht}}; \quad (11)$$

Definindo μ_d como $\mu_d = p_{hs} - p_{dht}$; onde μ_d representa a massa de ar seco de e p_{dh} e p_{dht} representam a pressão hidrostática na atmosfera seca e pressão hidrostática no topo da atmosfera seca.

Aplicando as projeções de mapa, Coriolis e os termos de curvatura nas equações acima, tem-se uma nova relação entre as equações, onde as variáveis acopladas as equações U , V , W e Ω passam a ser escritas em função de μ_d e em função do fator de escala de mapa. Sendo que m_x e m_y são definidos como a taxa que a distância no espaço computacional corresponde a distância na superfície da Terra. Ficando da seguinte forma

$$\begin{aligned} U &= \mu_d u / m \\ V &= \mu_d v / m \\ W &= \mu_d w / m \\ \Omega &= \mu_d \dot{\eta} / m \end{aligned} \quad (12)$$

Entretanto, na forma apresentada acima, as equações são aplicáveis apenas para situações idealizadas. O sistema realmente utilizado pelo WRF possui termos que levam em

consideração o efeito da força de Coriolis, umidade do ar e a projeção cartográfica que está sendo utilizada. Para reduzir o erro de truncamento e no arredondamento nos cálculos do gradiente vertical da pressão vertical e horizontal, usam-se novas variáveis que são definidas como perturbações provenientes do estado de referência hidrostaticamente balanceados estritamente escritos em função de \bar{z} . Desta maneira, $p = \bar{p}(\bar{z}) + p'$, $\phi = \bar{\phi}(\bar{z}) + \phi'$, $\alpha = \bar{\alpha}(\bar{z}) + \alpha'$ e também $\mu_d = \bar{\mu}_d(x, y) + \mu'_d$. Sendo os termos hidrostaticamente balanceados são denotados por $(\bar{})$. Devido ao fato de que as coordenadas de superfície η geralmente não são horizontais, os perfis de \bar{p} , $\bar{\phi}$ e $\bar{\alpha}$ são função de (x, y, η) .

Os termos do gradiente da pressão, hidrostaticamente balanceados podem ser removidos com algumas aproximações nas equações, usando as perturbações das variáveis. Aplicando este procedimento às equações descritas acima, tem-se a sua forma final na seguinte forma:

$$\begin{aligned} \partial_t U + m_x [\partial_x(Uu) + \partial_y(Vu)] + \partial_\eta(\Omega u) + (\mu_d \alpha \partial_x p' + \mu_d \alpha' \partial_x \bar{p}) \\ + (\alpha / \alpha_d) (\mu_d \partial_x \phi' + \partial_\eta p' \partial_x \phi - \mu'_d \partial_x \phi) = F_U \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \partial_t V + m_y [\partial_x(Uv) + \partial_y(Vv)] + \left(\frac{m_y}{m_x} \right) \partial_\eta(\Omega v) + (\mu_d \alpha \partial_y p' + \mu_d \alpha' \partial_y \bar{p}) \\ + (\alpha / \alpha_d) (\mu_d \partial_y \phi' + \partial_\eta p' \partial_y \phi - \mu'_d \partial_y \phi) = F_V \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \partial_t W + (m_x m_y / m_y) [\partial_x(Uw) + \partial_y(Vw)] + \partial_\eta(\Omega w) \\ - m_y^{-1} g \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) [\partial_\eta p' - \bar{\mu}_d (q_v + q_c + q_r)] + m^{-1} \mu'_d g = F_W \end{aligned} \quad (15)$$

Da equação da conservação da massa (eq. 6) e da equação do geopotencial, tem-se

$$\partial_t \Theta + m^2 [\partial_x(U\Theta) + \partial_y(V\Theta)] + m \partial_\eta(\Omega \theta) = 0 \quad (16)$$

$$\partial_t \phi' + \mu_d^{-1} [m^2 (U\phi_x + V\phi_y) + m \Omega \phi_\eta - gW] = 0 \quad (17)$$

a partir da equação 8 que representa a relação hidrostática da perturbação no sistema, tem-se

$$\partial_{\eta}\phi' = -\bar{\mu}_d\alpha'_d - \alpha_d\mu'_d \quad (18)$$

As equações de conservação para a temperatura potencial e escalares são representados pelas Equações 19 e 20, permaneceram sem mudanças.

$$\partial_t\Theta + m_x m_y [\partial_x(U\theta) + \partial_y(V\theta)] + m_y \partial_{\eta}(\Omega\theta) = F_{\Theta} \quad (19)$$

$$\partial_t Q_m + m_x m_y [\partial_x(Uq_m) + \partial_y(Vq_m)] + m_y \partial_{\eta}(\Omega q_m) = FQ_m \quad (20)$$

3.2.3. PARAMETRIZAÇÕES FÍSICAS

Nesta seção estão descritas algumas das parametrizações disponíveis para o WRF-ARW. Com enfoque será para as parametrizações utilizadas no presente estudo. A física deste modelo está dividida em 5 categorias distintas, (1) micro-física, (2) parametrização de nuvens, (3) parametrização da CLP, (4) modelos de ocupação do solo e (5) radiação. Estas opções de esquemas físicos foram sendo incorporados ao WRF com a intenção de produzir um único sistema de modelagem assim, o maior problema enfrentado consiste em escolher um grupo de parametrizações que seja adequado às condições da região a ser estudada e também à capacidade computacional disponível.

Utilizando todas as combinações de parametrizações disponíveis no WRF, é possível identificar pelo menos 300.000 de combinações Também de acordo com CHALLA *et al.*, (2009), BERGE *et al.*, (2008) existem várias possibilidades de combinação entre estas parametrizações, porém nenhuma delas ainda consegue representar de forma exata os fenômenos atmosféricos. Neste estudo, o foco é a simulação e comparação dos resultados obtidos com algumas estações de observação meteorológicas e radiossondagem. Desta maneira, este estudo limita-se a utilizar as configurações padrão para as parametrizações físicas disponíveis para o WRF.

Para todos os esquemas de parametrização que serão descritos nestas sub-seções, uma descrição mais detalhada sobre cada um deles pode ser obtida em (http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf).

3.2.3.1 ESQUEMAS DE MICROFÍSICA

O WRF-ARW resolve de forma implícita os processos envolvendo vapor de água, nuvens e processos de precipitação. Nesta versão do ARW, a micro-física é resolvida no final do passo de tempo como um processo de ajustamento. A razão para que isto seja feito é garantir que o balanço final da saturação seja mais preciso para incrementar a temperatura e a umidade. Entretanto, isto também se faz importante para ter a forçante do calor latente para a temperatura potencial durante os sub-passos dinâmicos e isso é feito através do acúmulo desse calor para o próximo passo de tempo.

A variável que designa a opção de micro-física escolhida é a *mp_physics*. Neste estudo a opção utilizada é a opção Purdue Lin, dentro do *namelist.input* esta variável é encontrada da seguinte forma: *mp_physics = 2,2,2*. Lembrando que não houve mudança em relação ao default do modelo.

A Tabela 4 mostra as opções de parametrização disponíveis para esta versão do WRF-ARW, explicitando o número de variáveis, processos de fase do gelo e fases mistas.

Tabela 2 – Opções de microfísica e suas propriedades.

Esquema	Número de Variáveis	Processos fase de gelo	Processos de fase mista
Kessler	3	N	N
Purdue Lin	6	Y	Y
WSM3	3	Y	N
WSM5	5	Y	N
WSM6	6	Y	Y
Eta GCP	2	Y	Y
Thompson	7	Y	Y
Goddard	6	Y	Y
Morrison 2-Moment	10	Y	Y

Fonte: Manual do usuário disponível na página oficial do modelo (Skamarock *et al.*, 2008).

O esquema PURDUE *et al.*, foi selecionado para este trabalho. Nele são feitos cálculos de sedimentação de gelo a cada passo de tempo e estão incluídas seis classes de

“hidrometeoros”: vapor de água, água de nuvens, chuva, gelo de nuvem, neve e *graupel*³. Sendo os mais importantes para a região deste estudo o vapor de água, nuvens e chuva.

Todos os termos de parametrização são baseados em LIN *et al.* (1983) e RUTLEDGE & HOBBS (1994). Com algumas modificações, incluindo o ajustamento de saturação proposta por TAO *et al.* (1989) e sedimentação do gelo. Este é um esquema de micro-física relativamente sofisticado, porém este esquema se mostra mais adequado para o uso em estudos de investigação. O esquema PURDUE de nuvens é mais detalhado em CHEN & SUN (2002).

3.2.3.2 PARAMETRIZAÇÃO DE *CUMULUS*

Este esquema é responsável pelos efeitos de escala de sub-malha para nuvens rasas e/ou convectivas e são destinados para representar as nuvens convectivas com os “*updrafts e downdrafts*”, e movimentos compensatórios fora delas. A parametrização de *cumulus* é somente válida para domínios com espaçamento de malha maiores que 5 km, onde elas são necessárias para calcular os perfis verticais de calor latente numa escala de tempo realística e dentro de uma coluna convectiva. O esquema é iniciado e agora operando em colunas individuais fornece os perfis verticais de calor e umidade.

Este esquema é útil em aplicações para o espaçamento da malha entre 5 a 10 km. Geralmente não utilizam-se parametrizações para *cumulus* em domínios com espaçamento de grade menor ou igual a 5 km, isto deve-se ao fato que o modelo pode resolver os vórtices convectivos de forma implícita em grades com este espaçamento.

A Tabela 3 mostra as várias opções de esquemas para parametrização de *cumulus*, como ela resolve as nuvens, esquema utilizado e o tipo de fechamento. A variável utilizada para escolher o esquema de parametrização de *cumulus* é a *cu_physics*. Para este trabalho, foram mantidas as configurações default do modelo, sendo 1 para o primeiro e segundo domínios e 0 para o terceiro, logo no namelist.input esta variável está assim: *cu_physics* = 1,1,0.

³ Graupel é uma espécie de floco de neve com diâmetro médio um pouco superior ao de um floco de neve comum e em formato cilíndrico.

Tabela 3 – Opções de parametrização de *cumulus* e suas propriedades.

Esquema	nuvem Detrainment⁴	Tipo do esquema	Fechamento
Kain-Fritsch	Y	Fluxo de massa	CAPE removal
Betts-Miller-Janjic	N	Ajustamento	Sounding adjustment
Grell-Devenyi	Y	Fluxo de massa	Vários
Grell-3	Y	Fluxo de massa	Vários

Fonte: Manual do usuário disponível na página oficial do modelo (Skamarock *et al*, 2008).

A versão modificada do esquema KAIN-FRITSCH (KF-Eta), utilizado neste trabalho, é baseada em KAIN & FRITSCH, 1990 e KAIN & FRITSCH, 1993; porém esta modificação foi baseada em testes com o modelo Eta. Este esquema foi criado para assegurar a conservação de massa. O esquema original KF, utiliza um modelo simples para nuvem com corrente de umidade ascendente e descendente de umidade, incluindo os efeitos de troca e entranhamento e micro-física simples. A diferença entre o esquema original da seguinte maneira:

- A taxa mínima de entranhamento é imposta para suprimir convecção generalizada marginalmente instável em ambientes relativamente secos;
- A convecção rasa (sem precipitação) é permitida para qualquer corrente ascendente que não atinge a profundidade mínima para nuvens de chuvas; esta profundidade mínima varia em função da temperatura da base da nuvem;
- Permite variar a taxa de entranhamento em função do baixo nível de convergência.
- Escolhas para correntes descendentes:
 - A mais profunda logo acima da base da nuvem (150 a 200 mb) a fonte da camada;
 - O fluxo de massa é definido como a fração de massa ascendente na base da nuvem.
 - O *detrainment* é especificado para ocorrer nas correntes ascendentes dentro camada fonte e abaixo.

⁴ Inverso do entranhamento (tradução livre)

3.2.3.3 CAMADA LIMITE SUPERFICIAL

O esquema de camada superficial calcula a velocidade de fricção e o coeficiente de troca que permitem o cálculo dos fluxos superficiais de calor e umidade da superfície, pelos modelos de camada superficial e tensão superficial no esquema de Camada Limite Planetária. Acima da superfície da água, os fluxos superficiais e campos de diagnósticos superficiais são calculados pelo próprio esquema de camada superficial. A variável que denota a escolha deste esquema de parametrização é *sf_sfclay_physics*. Portanto no *namelist.input*, a variável em questão é mostrada da seguinte forma *sf_sfclay_physics = 1,1,1*. Ou seja, para todos os domínios o esquema utilizado é o mesmo: modelo de Camada Limite Superficial baseado na Teoria da Similaridade - MM5.

Este esquema foi adotado neste trabalho para resolver a camada superficial. Ele utiliza funções estáveis provenientes de PAULSON (1970), DYER & HECKS (1970) e WEBB (1970) para calcular os coeficientes superficiais de calor, umidade e *momentum*. A velocidade convectiva (BELJAARS, 1994) é usada aumentar a acurácia dos fluxos superficiais de calor e umidade. Vale lembra que nesta versão não está incluída a parametrização para o comprimento de rugosidade térmica. Existem 4 regimes de estabilidade que seguem (ZHANG & ANTHES, 1982) para a relação entre o comprimento de rugosidade para a velocidade de fricção acima da água. Este esquema pode ser utilizado em conjunto com as parametrizações MRF e YSU CLP.

3.2.3.4 CAMADA SUPERFICIAL DO SOLO

Os modelos de camada superficial do solo utilizam informações provenientes dos esquemas de camada superficial tais como: forçantes radiativas vindas dos esquemas de radiação; forçantes de precipitação provenientes dos esquemas de micro-física e convectivos. Juntando isso com informações internas de variáveis de solo, são capazes de fornecer os fluxos de calor e de umidade para pontos acima do solo e da superfície congelada do mar (caso ocorra na região de estudo). São estes fluxos que fornecem as condições para o transporte vertical na baixa atmosfera encontrados nos esquemas de CLP ou quando no lugar destes esquemas, são executados esquemas de difusão vertical.

Os esquemas de camada superficial do solo possuem vários graus de sofisticação diferentes no tratamento dos fluxos de calor e umidade em várias camadas do solo e podem manipular diferentes tipos de vegetação, cobertura do solo e predição de cobertura de neve.

A tabela 4 mostra as opções de parametrização da camada superficial bem como as variáveis de solo, número de camadas de solo resolvidas pelo esquema e mostra se há a presença de sub-rotinas para cálculo de neve. Para este estudo o esquema escolhido novamente é o default do modelo. A variável que denota a escolha para esta parametrização é a *sf_surface_physics*. Então no arquivo namelist.input, a variável em questão é mostrada da seguinte forma *sf_surface_physics= 1,1,1*. Ou seja, para todos os domínios o esquema utilizado é o de 5 camadas (5-layers).

Tabela 4 – Opções de parametrização da camada superficial e suas propriedades

Esquema	Processos de Vegetação	Variáveis do Solo (camadas)	Esquemas de Neve
5-layers	N	Temperatura (5)	Ausente
Noah	Y	Temperatura, água+gelo, água (4)	Uma camada, fracional
RUC	Y	Temperatura, gelo, água+gelo (6)	Várias camadas
Pleim-Xiu	Y	Temperatura, umidade (6)	Somente entrada

Fonte: Manual do usuário disponível na página oficial do modelo (Skamarock *et al*, 2008).

Esta parametrização é considerada simples. As camadas possuem espessura variando de 1, 2, 4, 8 e 16 centímetros. Abaixo destes níveis, a temperatura passa a ser fixa. O balanço de energia inclui fluxo de calor sensível e latente e radiação. Este esquema também permite adicionar a cobertura do solo por neve, porém este fator é fixo no tempo. A umidade do solo também é fixa, dependente de constantes que variam com o tipo de ocupação do solo e estação do ano e não há efeitos explícitos da vegetação.

3.2.3.5 CAMADA LIMITE PLANETÁRIA (CLP)

O esquema de Camada Limite Planetária é responsável pela escala de sub-malha vertical devido ao transporte turbulento em toda a coluna da atmosfera. Sendo assim, quando algum destes esquemas de parametrização é acionado, o esquema de difusão vertical é desligado, pois o esquema de CLP assume este processo. As escolhas mais apropriadas para a difusão horizontal são aquelas baseadas na deformação horizontal ou valores de K_h constantes onde a

mistura horizontal e vertical são tratadas de forma independentes. Os fluxos superficiais são provenientes do esquema de camada superficial e superfície do solo.

Os esquemas de CLP determinam os perfis dos fluxos dentro da camada limite e na camada estável, proporcionando assim as tendências da temperatura, umidade (incluindo nuvens) e *momentum* horizontal em toda a coluna atmosférica. A maior parte destes esquemas é capaz de considerar a “mistura seca”, mas se for desejado pode-se também incluir os efeitos da saturação na estabilidade vertical. Estes esquemas são unidimensionais, assumindo de forma bem clara a separação entre as escalas dos turbilhões de sub-malha e os resolvidos. Isso pode tornar os turbilhões de tamanhos abaixo de algumas centenas de metros menos visíveis, na região onde a o esquema de camada limite começaria a resolvê-los. Mas isto pode ser resolvido alterando o esquema por outro totalmente tri-dimensional com o de difusão da Energia Cinética Turbulenta. (ECT).

A variável que mostra o esquema de Camada Limite Planetária escolhido é a *bl_pbl_physics* onde neste estudo está sendo adotada a configuração 1, 1, 1. Isto mostra que em todos os domínios será utilizado o mesmo esquema. A tabela 5 mostra os possíveis esquemas a serem adotados e algumas de suas características básicas.

Tabela 5 – Opções de parametrização da Camada Limite Planetária e suas propriedades

Esquema	Mistura Instável CLP	Tratamento de Entranhamento	Topo da CLP
YSU	Perfil de K mais termo de contra-gradiente	Termo explícito	Do perfil de flutuabilidade
MRF	Perfil de K mais termo de contra-gradiente	Parte da mistura da CLP	Do Bulk crítico
MYJ	K proveniente do Prognóstico da TKE	Parte da mistura da CLP	Da TKE
ACM2	" <i>Transilient mixing up, Local K down</i> "	Parte da mistura da CLP	Do Bulk crítico

Fonte: Manual do usuário disponível na página oficial do modelo (Skamarock *et al*, 2008).

Para este trabalho foi escolhido o esquema de desenvolvido por HONG *et al.*, 2006 na Universidade de Yonsei, denominado de YSU. Consiste um uma evolução do esquema de previsão de médio alcance (MRF) (HONG & PAN 1986). É um esquema não local de K com camada de entranhamento explícita e perfil parabólico de K na camada de mistura instável que usa termos de contragradiente para representar os fluxos devido a gradientes não locais. Este esquema adiciona ao MRF o tratamento explícito da camada de entranhamento no topo da CLP. O entranhamento é proporcional à flutuabilidade do fluxo superficial de acordo com

resultados de estudos de modelos com turbilhões de larga escala. O topo da CLP é definido a partir do número de Richardson Bulk crítico igual a zero, o que difere do modelo anterior onde este número era definido como 0,5. Isso é muito eficaz dependendo do perfil de fluabilidade. Neste esquema, o topo da Camada Limite Planetária é definido como o maior valor para a altura da camada de entranhamento.

3.2.3.6 RADIAÇÃO ATMOSFÉRICA

Os esquemas de radiação prevêm o aquecimento da atmosfera devido a radiação descendente de ondas longas e de ondas curtas responsáveis pelo acúmulo de calor no solo. As ondas longas incluem radiação térmica ou infravermelha e radiação emitida ou absorvida por gases e pela superfície terrestre. O fluxo radiativo de ondas longas ascendentes vindas do solo é determinado pela emissividade da superfície e depende de cada categoria de ocupação do solo bem como do seu perfil de temperatura. A radiação de ondas curtas que incluem a luz e ondas com comprimento da mesma ordem de grandeza fazem parte do espectro solar. Logo, a sua única fonte é o Sol, mas os processos incluem absorção, reflexão, espalhamento na atmosfera e nas superfícies. Para a radiação de ondas curtas, o fluxo ascendente é a reflexão devido ao albedo.

Dentro da atmosfera, a radiação está diretamente ligada aos processos de predição de nuvens, distribuição de vapor de água bem como a especificação do dióxido de carbono, ozônio e opcionalmente concentração de gases-traço. Todos os esquemas de radiação no WRF são do tipo coluna (uni-dimensional), logo cada coluna é tratada de forma independente e os fluxos são correspondentes a infinitos planos horizontais uniformes. O que pode ser muito bom se a espessura da camada vertical do modelo for muito menor que o comprimento da malha horizontal.

A tabela 8 mostra as opções de escolha para parametrização da radiação bem como algumas de suas propriedades básicas. Para esta parametrização, a variável correspondente é a *ra_lw_physics*. Neste estudo, esta variável é configurada como *ra_lw_physics=1,1,1* o que indica que o sistema de parametrização utilizado em todos os domínios é o RRTM *Rapid Radiative Transfer Model*.

Tabela 6 – Opções de parametrização para radiação

Esquema	Ondas Longas Ondas curtas	Banda espectral	CO ₂ , O ₃ , nuvens
RRTM	LW	16	CO ₂ , O ₃ , nuvens
GFDL LW	LW	14	CO ₂ , O ₃ , nuvens
CAM3 LW	LW	2	CO ₂ , O ₃ , nuvens
GFDL SW	SW	12	CO ₂ , O ₃ , nuvens
MM5 SW	SW	1	Nuvens
Goddard	SW	11	CO ₂ , O ₃ , nuvens
CAM3 SW	SW	19	CO ₂ , O ₃ , nuvens

Fonte: Manual do usuário disponível na página oficial do modelo (Skamarock *et al*, 2008).

O esquema RRTM de parametrização é baseado em MLAWER *et al.* (1997) e sua banda espectral utiliza o método correlacionado-k. Ele usa tabelas pré-definidas para aumentar a precisão dos processos que representam as ondas longas, ozônio, CO₂ e gases-traço, bem como a contabilização de nuvens em profundidade óptica.

Algumas outras parametrizações utilizadas neste estudo, podem ser verificadas a partir do `namelist.input` que está disponibilizado no ANEXO 1.

3.3. MÉTODOS NUMÉRICOS

Esta seção apresenta os métodos numéricos empregados na discretização das equações descritas na seção anterior.

3.3.1. DISCRETIZAÇÃO NO TEMPO

O núcleo de processamento ARW utiliza o esquema de integração conhecido como “*time-split*”, divisão do passo de tempo. Desta forma, é possível resolver separadamente os fenômenos meteorológicos e os acústicos por serem de natureza distinta. Os fenômenos meteorológicos, que são representados por ondas de baixa frequência ou ondas longas E são integrados usando o método de Runge-Kutta de terceira ordem (RK3).

Já os modos acústicos e ondas gravitacionais são integrados em pequenos passos de tempo dentro do passo de tempo maior. Sua função é manter a estabilidade numérica, porém são integrados com um intervalo de tempo muito pequeno. Este intervalo de tempo não é utilizado para as frequências mais baixas devido ao seu alto custo computacional e temporal. Algumas técnicas foram criadas para resolver este problema de integração, o WRF-ARW utiliza-se de uma destas técnicas, a chamada *forward-backward*.

Desta forma, propagação acústica horizontal e as ondas gravitacionais são resolvidas utilizando o esquema de integração no tempo *forward-backward*. Os termos acústicos de propagação vertical e a flutuabilidade das oscilações são integrados utilizando um esquema vertical implícito e estes termos acústicos são utilizados como uma correção para o esquema de integração RK3. Para resolvê-lo fazem-se necessários 3 passos de tempo.

3.3.1.1 ESQUEMA DE INTEGRAÇÃO RUNGE-KUTTA (RK3)

Este esquema também utiliza o método de diferença finita para sua resolução. Este esquema de integração foi descrito por WICKER & SKAMAROCK (2002) e integra as equações diferenciais utilizando uma formulação preditora-corretora. As variáveis prognósticas definidas no núcleo de processamento ARW $\Phi = (U, V, W, \Theta, \phi', \mu', Q_m)$ e as equações do modelo são representadas $\Phi_t = R(\Phi)$, onde Φ_t representa todos os termos derivados no tempo e $R(\Phi)$ o restante dos termos.

Como dito anteriormente, são necessários 3 passos para ir de $\Phi(t)$ até $\Phi(t + \Delta t)$.

$$\Phi^* = \Phi^t + \frac{\Delta t}{3} R(\Phi^t) \quad (21)$$

$$\Phi^{**} = \Phi^t + \frac{\Delta t}{2} R(\Phi^*) \quad (22)$$

$$\Phi^{t+\Delta t} = \Phi^t + \Delta t R(\Phi^{**}) \quad (23)$$

onde Δt é o passo de tempo para os modos de baixa frequência que será aplicado às Equações 15 a 22. Porém, este método não é verdadeiramente de terceira ordem, isto só será realmente válido para equações lineares onde oferece maior acurácia. Para equações não lineares, sua

precisão será apenas de segunda ordem. Este método também mostra-se estável para esquemas de advecção centrados e de corrente ascendente.

3.3.1.2 INTEGRAÇÃO ACÚSTICA

As altas frequências apesar de serem insignificantes do ponto de vista meteorológico podem causar uma séria limitação no Δt explicitado nas Equações 21 a 23. Para contornar este problema, é utilizada uma aproximação para este passo de tempo descrita por WICKER & SKAMAROCK (2002). Para aumentar a acurácia desta divisão do passo de tempo, é feita a integração das equações governantes na forma de perturbação usando os pequenos passos de tempo das ondas de alta frequência (sonoras ou gravitacionais) dentro da sequência dos maiores passos de tempo no método RK3. Com o intuito de escrever as equações de perturbação para a integração acústica na divisão do tempo no método RK3, são definidas variáveis para os pequenos passos de tempo que são derivadas do preditor mais recente do RK3. Denotadas pelo sobrescrito t^* e representadas por Φ' , Φ^* ou Φ^{**} (Eq. 21 a 23).

$$\begin{aligned} V'' &= V - V^{t^*}, & \Omega'' &= \Omega - \Omega^{t^*}, & \Theta'' &= \Theta - \Theta^{t^*}, \\ \phi'' &= \phi' + \phi^{t^*}, & \alpha''_d &= \alpha'_d - \alpha'^{t^*}_d, & \mu''_d &= \mu'_d - \mu'^{t^*}_d. \end{aligned}$$

Da relação hidrostática, ou seja, da definição de coordenada vertical vem a seguinte equação:

$$\alpha''_d = -\frac{1}{\mu_d^{t^*}} (\partial_\eta \phi'' + \alpha_d^{t^*} \mu''_d) \quad (24)$$

Também pode ser incluída a versão da equação de estado, porém esta está linearizada por t^* :

$$p'' = \frac{c_s^2}{\alpha_d^{t^*}} \left(\frac{\Theta''}{\Theta^{t^*}} - \frac{\alpha''_d}{\alpha_d^{t^*}} - \frac{\mu''_d}{\mu_d^{t^*}} \right) \quad (25)$$

onde $c_s^2 = \gamma p^{t^*} \alpha_d^{t^*}$ representa o quadrado da velocidade do som. Fazendo a substituição de todas estas variáveis nas Equações de prognóstico 13 a 20, com exceção da equação 18, levará à equações com o passo de tempo acústico, que são representadas como

$$\delta_\tau U'' + \mu^{t*} \alpha^{t*} \partial_x p'' + (\mu^{t*} \partial_x \bar{p}) \alpha''^\tau + (\alpha / \alpha_d) \left[\mu^{t*} \partial_x \phi'' + (\partial_x \phi^{t*}) (\partial_\eta p'' - \mu''^\tau) \right] = R_U^{t*} \quad (26)$$

$$\delta_\tau V'' + \mu^{t*} \alpha^{t*} \partial_y p'' + (\mu^{t*} \partial_y \bar{p}) \alpha''^\tau + (\alpha / \alpha_d) \left[\mu^{t*} \partial_y \phi'' + (\partial_y \phi^{t*}) (\partial_\eta p'' - \mu''^\tau) \right] = R_V^{t*} \quad (27)$$

$$\delta_\tau \mu''_d + m_x m_y + [\partial_x U'' + \partial_y V'']^{\tau+\Delta\tau} + m_y \partial_\eta \Omega''^{\tau+\Delta\tau} = R_\mu^{t*} \quad (28)$$

$$\delta_\tau \Theta'' + m^2 [\partial_x (U'' \theta^{t*}) + \partial_y (V'' \theta^{t*})]^{\tau+\Delta\tau} + m \partial_\eta \Omega''^{\tau+\Delta\tau} \theta^{t*} = R_\Theta^{t*} \quad (29)$$

$$\delta_\tau W'' + m^{-1} g \left[(\alpha / \alpha_d)^* \left[\partial_\eta (C \partial_\eta \phi'') + \partial_\eta \left(\frac{c_s^2}{\alpha^{t*}} \frac{\Theta''}{\Theta^{t*}} \right) \right] - \mu''_d \right]^\tau = R_W^{t*} \quad (30)$$

$$\delta_\tau \phi'' + \frac{1}{\mu''_d} + \left[m \Omega''^{\tau+\Delta\tau} \phi''_\eta - \overline{g W''^\tau} \right] = R_\phi^{t*} \quad (31)$$

3.3.2. DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL

A discretização espacial utilizada pelo núcleo de processamento ARW é do tipo C (ARAKAWA & LAMB, 1977), conhecido como arranjo deslocado pode ser verificada na Figura 3.3-2. As velocidades (U, V, W) são calculadas na metade do comprimento da malha e as outras propriedades termodinâmicas (θ) são calculadas no centro da malha, chamado de ponto de massa.

Neste esquema de discretização espacial é resolvido com a utilização do método matemático de diferenças finitas com *upwind* de 5ª ordem ou diferenças finitas de 6ª ordem.

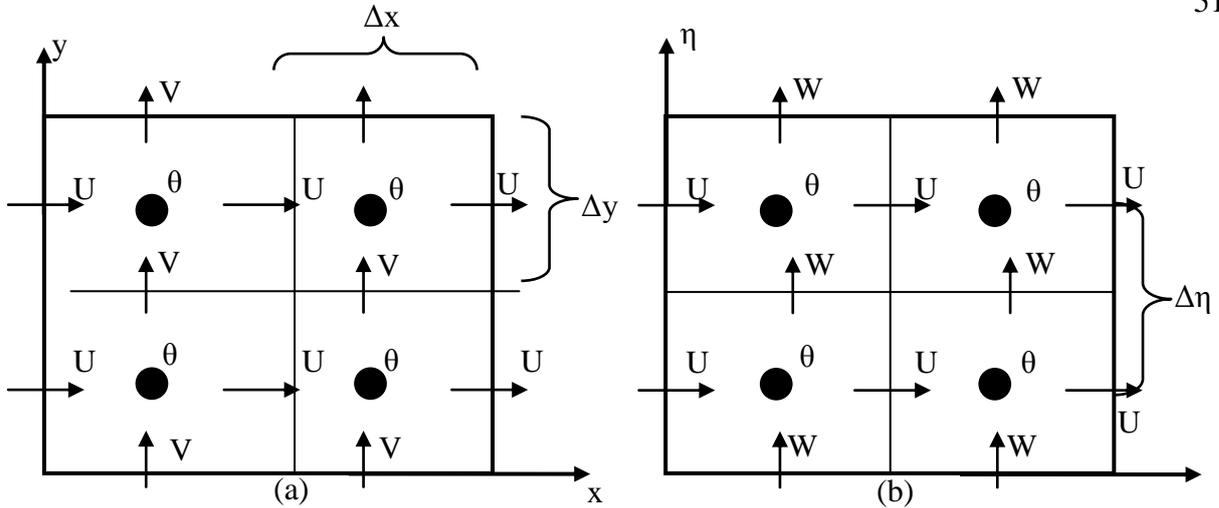


Figura 3-2 – Malha horizontal (a) e vertical (b) do ARW, adaptado de SKAMAROCK *et al*, (2008).

3.3.3. ANINHAMENTO DE GRADES

O aninhamento de grades é utilizado quando se deseja ter uma visão mais detalhada de uma região específica, isto é, utilizar uma malha com maior resolução em uma determinada região. A vantagem desta técnica consiste da possibilidade da utilização de maior resolução em áreas especificadas diminuindo assim o custo computacional.

Existem duas formas de executar os cálculos, na primeira os dados calculados pelo domínio maior são utilizados pelos domínios menores simplesmente como condições de contorno (*one way*); na segunda forma, ocorre o mesmo processo, porém os pontos do maior domínio que estão dentro do domínio menor, os seus valores passam a ser aqueles simulados pelo domínio menor (*two-way*). As Figuras 3-3a e 3-3b mostram exemplos de domínios menores dispostos dentro do domínio maior.

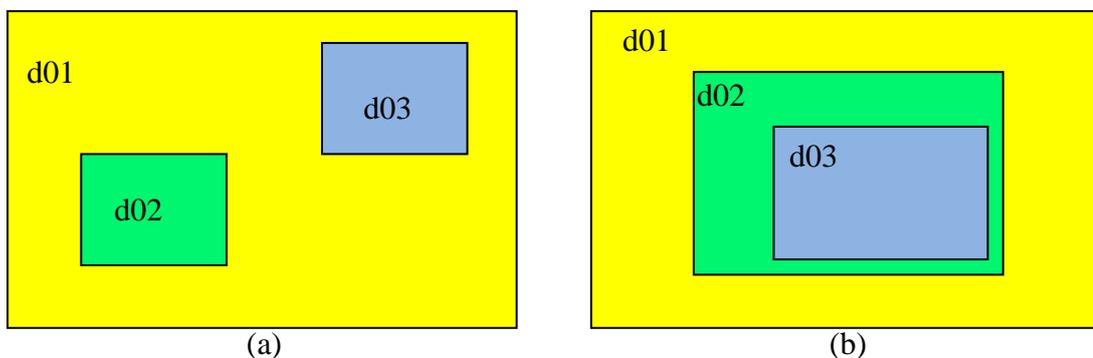


Figura 3-3 – Exemplos de aninhamento permitidos pelo WRF para várias grades, adaptado de manual WRF, Skamarock *et al* (2008).

3.3.4. ALGORÍTMO COMPUTACIONAL

A Figura 3-4 mostra o fluxograma do algoritmo do WRF. Onde é possível perceber as formas de assimilação dos dados de entrada para o modelo, os tipos de pré-processadores, os núcleos de processamento (a escolha destes núcleos depende do tipo de simulação desejada) bem como os programas de pós-processamento dos dados (geração de imagens). Os dados das estações meteorológicas não são resolvidos pelo WPS, eles são introduzidos em uma rotina diferenciada. No entanto, os dados de superfície bem como os provenientes de outros modelos meteorológicos devem invariavelmente ser processados pelo WPS.

O WPS recebe os dados terrestres e meteorológicos (normalmente no formato GriB) e os transforma em dados de entrada para o núcleo de processamento ARW. Neste primeiro passo, o WPS define a malha física, onde é incluído o tipo de projeção cartográfica, localização no globo, número de pontos da malha, localização das sub-malhas e distância entre os pontos da malha. Após isso, é realizada a interpolação dos campos estáticos para o domínio prescrito. O arquivo de saída gerado pelo WPS contém a completa caracterização da atmosfera para a malha desejada e para o dia de início da simulação. A Figura 3-5 mostra o fluxograma e os componentes do pré-processador do WRF e exibe a ordem de solução e ainda o nome de cada um dos programas que compõe o sistema WPS. O GEOGRID é responsável por criar o domínio do modelo e gerar os arquivos estatísticos dos dados terrestres. O UNGRIB é responsável por decodificar os dados meteorológicos de iniciação do modelo que podem estar no formato GriB1 ou GriB2. Por fim, o METGRID é o programa responsável por interpolar os dados gerados pelo UNGRIB, para todo o domínio criado pelo programa GEOGRID. Esta etapa é o ponto inicial para que o núcleo de processamento ARW dê início à simulação.

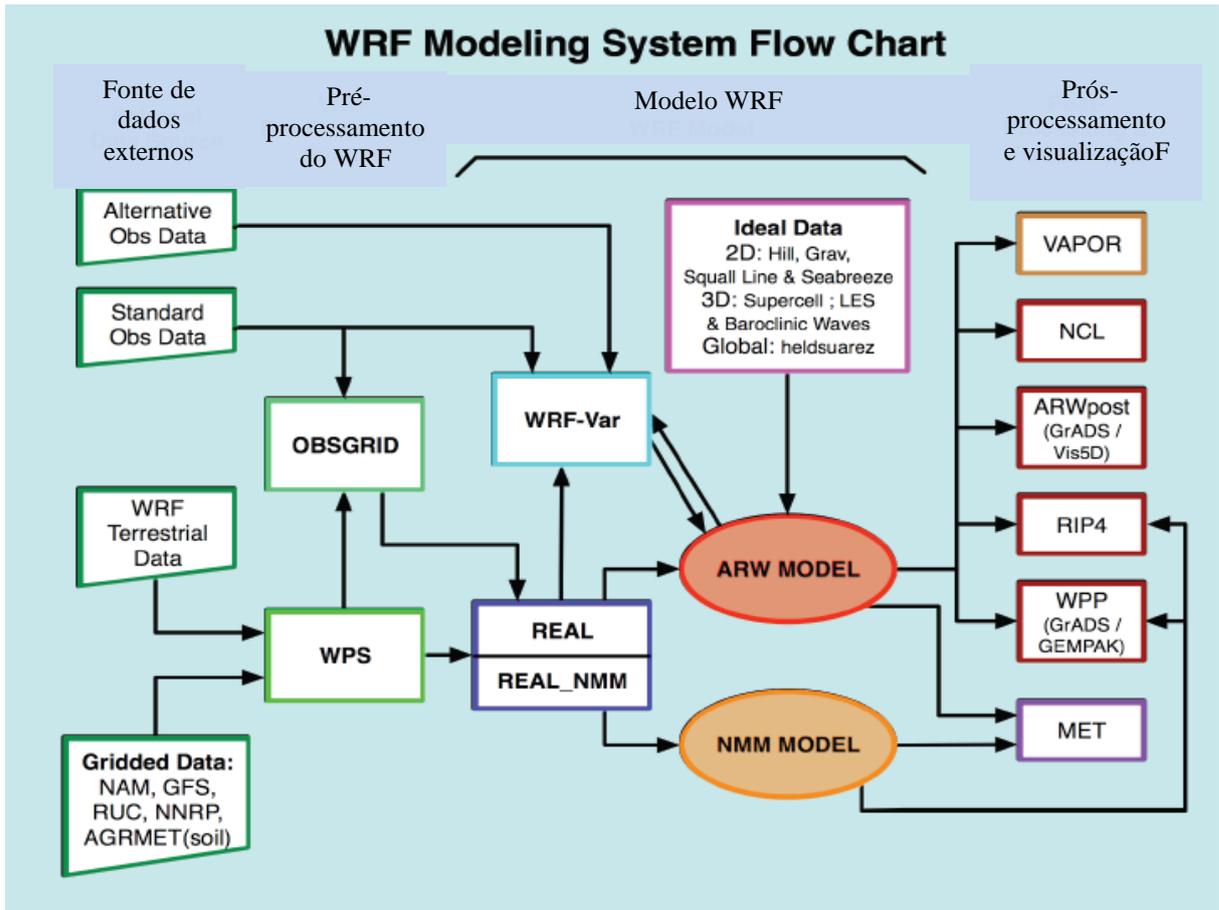


Figura 3-4 – Fluxograma dos componentes modelo WRF. Adaptado de SKAMAROCK *et al.*(2008).

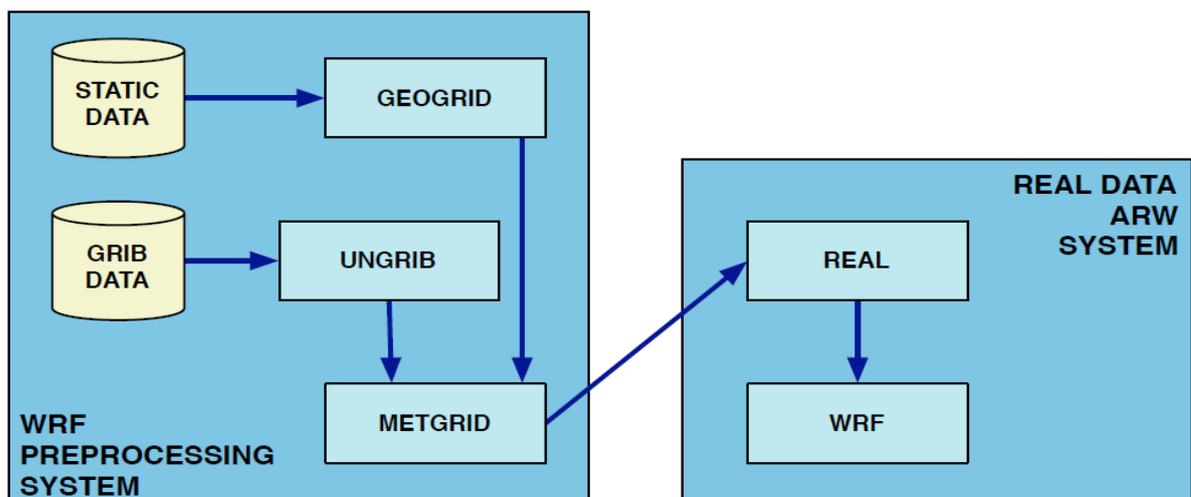


Figura 3-5 – Fluxograma dos componentes do pré-processador WPS e como é dado o passo inicial para a simulação com o ARW. Adaptado de SKAMAROCK *et al.*(2008).

4 METODOLOGIA

Este capítulo está dividido em quatro seções onde a primeira descreve a região de estudo. Na segunda parte é abordada a necessidade dos dados de inicialização do modelo tais como os dados topográficos, meteorológicos entre outros. Já na terceira parte é tratada a obtenção dos dados de comparação. Dados estes que são provenientes das estações de monitoramento da qualidade do ar (RAMQar), estação automática de monitoramento meteorológico do INMET e os dados das radiossondagens. A quarta e última parte discute a verificação do modelo e alguns métodos de avaliação de seu desempenho na simulação das variáveis meteorológicas em relação a dados observacionais.

4.1. REGIÃO DE ESTUDO

A Figura 4-1 mostra a Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), área de estudo. Esta região compreende uma área formada por uma topografia complexa. Seu relevo varia desde uma planície litorânea à colinas com destaque para o Mestre Álvaro com 833 metros de altura no município de Serra, a reserva de Duas Bocas no município de Cariacica que possui picos com altura variando de 200 metros até 800 metros, maciços costeiros destacando-se entre eles o Maciço Central no município de Vitória que ocupa quase toda a região da cidade com altura estimada em 293 metros até a sua fronteira leste com o oceano Atlântico.

A ocupação do solo é variada, desde extensas áreas com cobertura vegetal variada até a grande presença de pavimentação nas cidades e alguns entornos. A sua proximidade com o oceano, bem como a sua topografia controlam as condições meteorológicas e a circulação atmosférica. Onde a presença de efeitos de mesoescala é bem representada (brisa marinha e terrestre, formação de chuva, ilhas de calor entre outros).

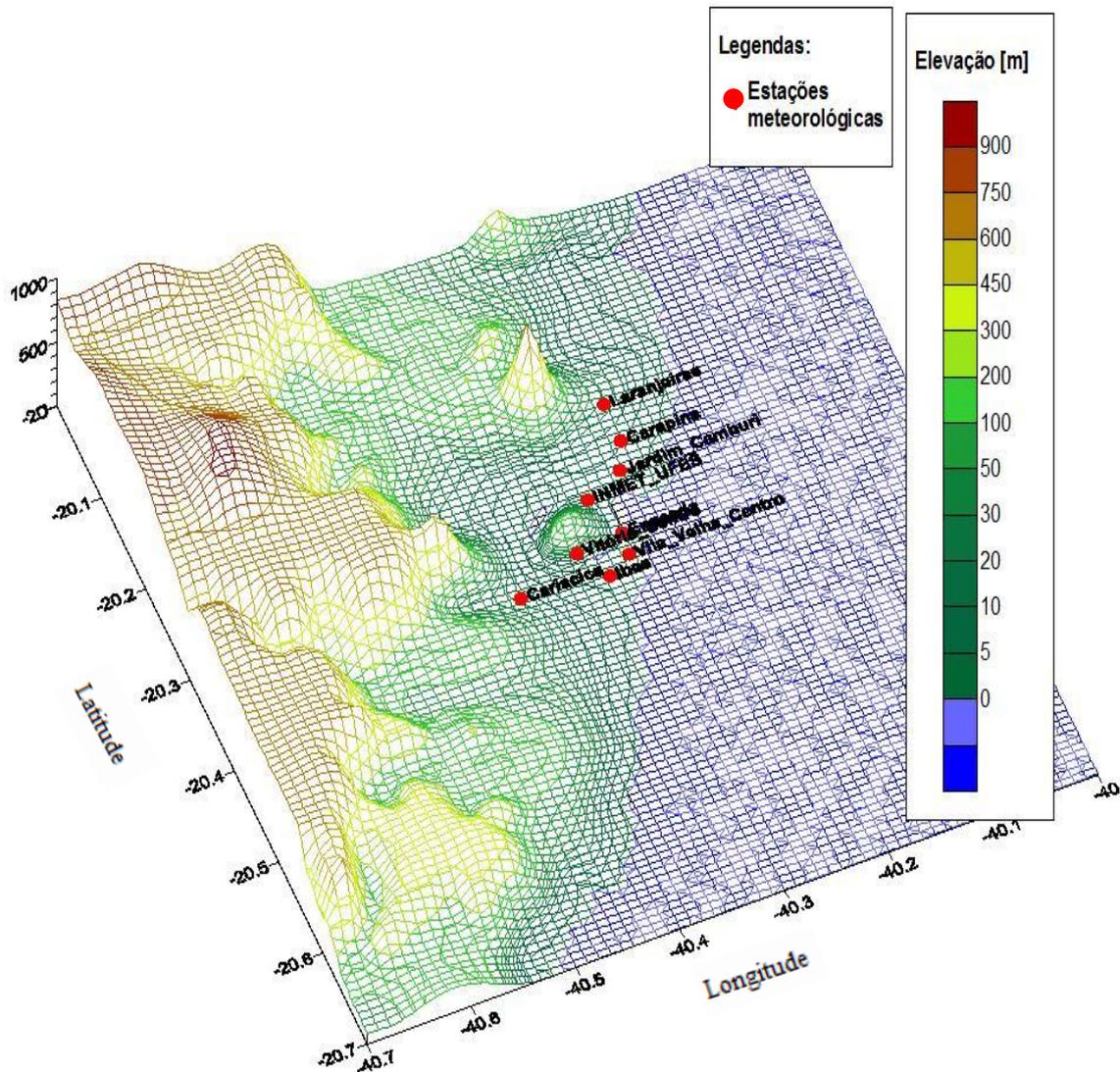


Figura 4-1 – Detalhes topográficos da Região Metropolitana da Grande Vitória e indicação da localização das estações meteorológicas de superfície.

De acordo com o relatório anual do IEMA (2007), a Região Metropolitana da Grande Vitória possui clima tropical quente e úmido. No período do inverno é comum a ocorrência de temperaturas por volta de 18°C , onde a sensação de frio é verificada na presença de frentes frias esporádicas devido ao anticiclone polar. O verão mostra-se extenso (aproximadamente entre outubro e abril) com maior ênfase normalmente entre dezembro e janeiro. Os principais sistemas de circulação atmosférica são o anticiclone subtropical do Atlântico Sul que é o responsável pelos ventos com direção meteorológica Oeste e Sudoeste, provocando alta

intensidade de radiação solar e temperaturas. Já o anticiclone polar móvel é o responsável pelos ventos oriundos da região Sul, baixas temperaturas e nebulosidade.

4.2. CONFIGURAÇÃO INICIAL DO MODELO

Para a inicialização do modelo faz-se necessária a obtenção de alguns dados, por exemplo, elevação do terreno, cobertura vegetal, ocupação do solo e dados meteorológicos.

Os dados de elevação do solo são provenientes do GTOPO30. O GTOPO30 (*Global Topographic Data*) é um modelo global de elevação digital (DEM) desenvolvido pelo *U.S. Geological Survey* (USGS), cobrindo toda a parte continental da Terra e seu espaçamento de malha é de 30 segundos de arco (30" de arco) ou aproximadamente 0,925 km. A Figura 4-2 representa o mapa disponível na página oficial do USGS onde deve ser escolhida a região de interesse para o estudo. A parte em destaque quadriculada foi a escolhida para o presente estudo (W060S10). Já a Figura 4-3 mostra com maior detalhe a área em questão.

Também do USGS são utilizados dos dados de solo e vegetação; sendo que os dados de vegetação possuem 24 categorias e os dados de solo com 16 categorias todos avaliados com 30 segundos de resolução. A previsão feita pelo GFS é realizada sempre nos horários (00 UTC, 06 UTC, 12 UTC e 18 UTC) para um período de 384 horas. A sua resolução espacial é aproximadamente 55 km até 84 horas, 80 km até 180 horas e 110 km a partir de 180 horas até 384 horas. Os dados para iniciar o modelo são pegos diretamente da página oficial do NCEP/NOAA, possuindo resolução espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ e resolução temporal de 6h e 47 níveis verticais de pressão.

Os domínios de integração são, respectivamente para d01, d02 e d03 com a opção de aninhamento *two-way*. O domínio principal (d01) tem coordenadas -40.20 de latitude, -20.19 de longitude para o seu ponto central. A Figura 4-4 mostra os 3 domínios utilizados no presente estudo, onde o primeiro domínio d01 possui 80x80 pontos com 15km de espaçamento entre seus pontos, o segundo domínio (d02) possui 51x51 pontos com espaçamento de 5km e por fim o d03 que possui 25x25 pontos com espaçamento de 1km entre cada ponto todos para a malha horizontal. O foco deste estudo é o domínio d03 que pode ser observado com maior detalhe na Figura 4-1 e Figura 4-4 da sub-seção 4.1.

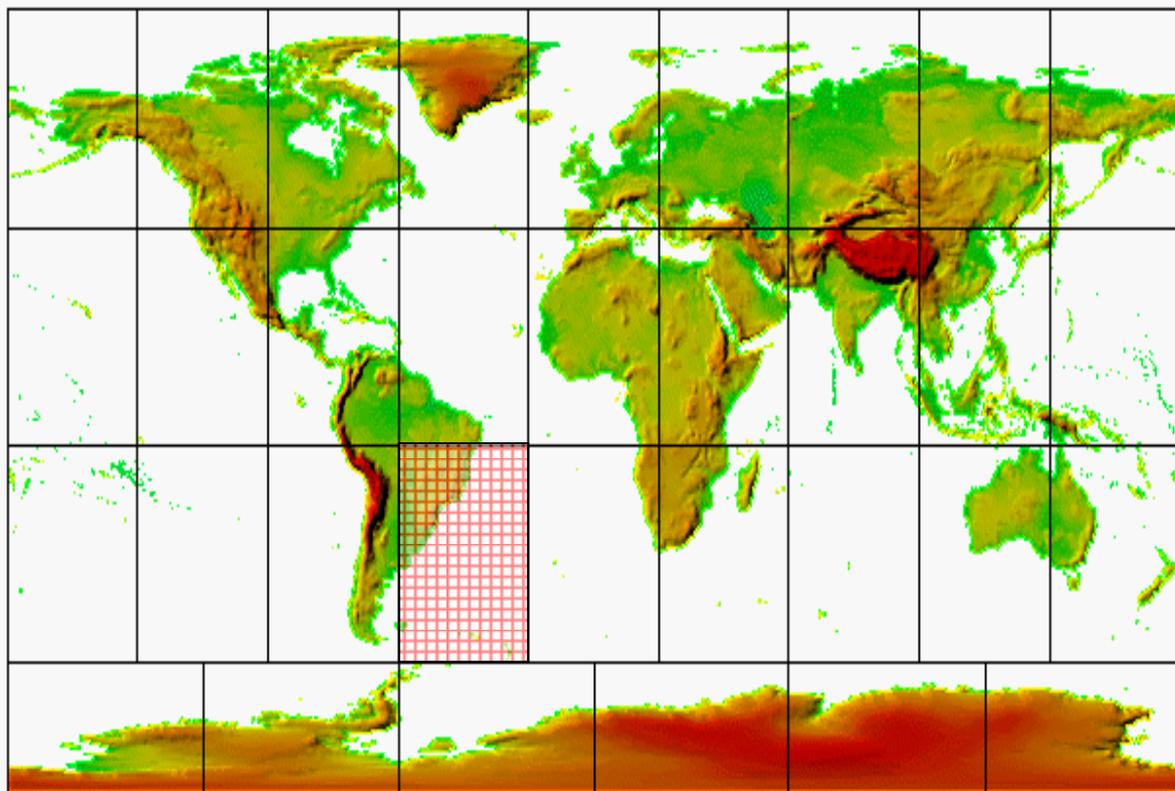


Figura 4-2 – Mapa disponibilizado na página oficial do USGS para escolha da área de estudo. Retirada em Junho, 2009.

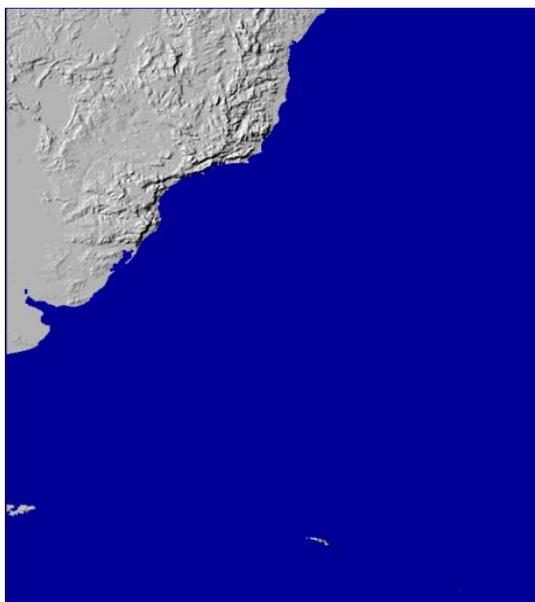


Figura 4-3 – Mapa da área escolhida como base de dados de topografia do GTOPO30 para este estudo.

A estrutura vertical de cada um dos três domínios possui 31 camadas em toda troposfera, o que corresponde aos níveis η , neste estudo foram escolhidos desta forma: 1.0000, 0.9975, 0.9953, 0.9931, 0.9888, 0.9837, 0.9779, 0.9715, 0.9643, 0.9566, 0.9482, 0.9393, 0.9298, 0.9198, 0.9093, 0.8982, 0.8746, 0.8490, 0.8215, 0.7923, 0.7613, 0.7286, 0.6942, 0.6582, 0.5815, 0.4987, 0.4101, 0.3157, 0.2158, 0.1105, 0.0000,

O domínio d01 engloba grande parte da região Sudeste, abrangendo todos os seus estados e principalmente o Espírito Santo, Rio de Janeiro porção norte de São Paulo, sul da Bahia, grande parte do estado de Minas Gerais e uma porção do oceano Atlântico (Figura 4-4). O domínio de estudo possui uma pequena área, porém com alta definição. Sua abrangência é local e engloba a cidade de Vitória e parte das cidades de Cariacica, Serra e Vila Velha. A escolha desta região deve-se ao fato de que somente elas possuíam pelo menos uma estação de monitoramento da qualidade do ar (RAMQar) pertencente ao Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA), a estação meteorológica de observação de superfície automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e também o local onde foram realizadas as radiossondagens, o aeroporto Eurico de Aguiar Salles. A intenção do uso destas estações é a comparação dos resultados simulados pelo WRF com os dados observados em cada uma das estações (Figuras 4-6 a-f).

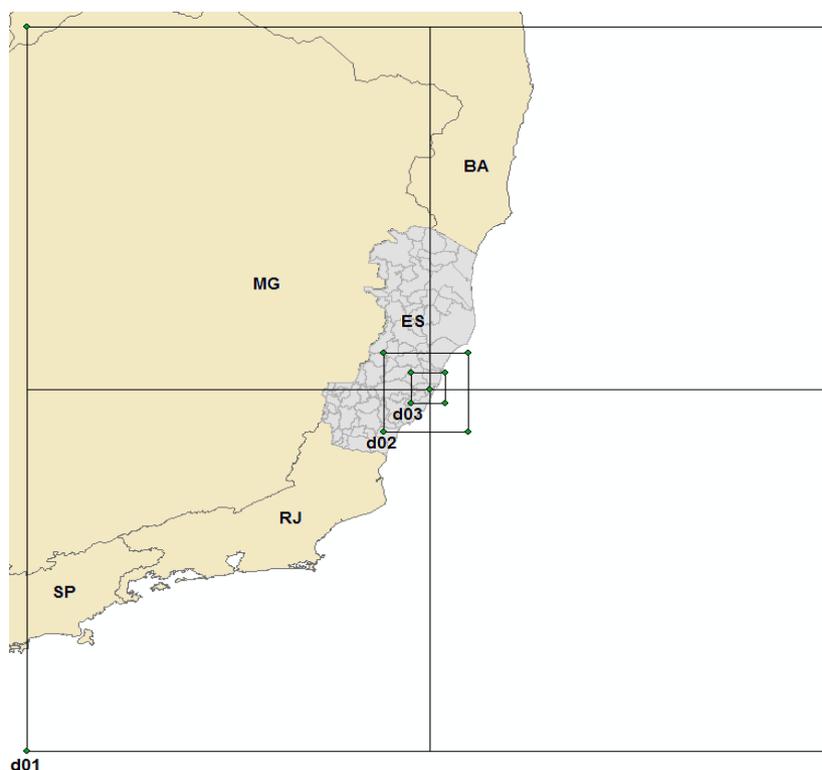


Figura 4-4 – Região de estudo. Onde d03 é o foco do estudo.

4.3. DADOS DE COMPARAÇÃO

Esta seção descreve o tratamento dos dados obtidos através das observações feitas pelas estações de monitoramento da qualidade do ar (RAMQar), estação superficial automática do INMET e os dados das radiossondagens, utilizados neste estudo para o confronto entre os dados simulados pelo WRF com o intuito de fazer uma verificação da performance do WRF sobre cada um dos pontos de medição.

Nesta mesma figura estão representadas as localizações das estações meteorológicas de superfície, porém nem todas elas serão utilizadas no presente estudo devido ao fato de que nem todas elas medem os parâmetros utilizados neste estudo. Também foi percebido que em algumas estações os dados necessários não estavam disponíveis para os períodos selecionados, portanto de um total de nove estações somente cinco estações foram utilizadas no presente estudo. Também foi incluída a radiossondagem realizada pelo aeroporto Eurico de Aguiar Salles em Vitória. Os dados das radiossondagens estão disponíveis em <<http://unidata.ucar.edu/software/idd/>>. Os dados que foram utilizados de cada estação podem ser observados na Tabela 1. Já a Tabela 2 mostra a localização geográfica de cada uma das estações e do ponto de radiossondagem.

A Figura 4.6, que foram extraídas do *Google Earth*, mostram com mais detalhes a localização de todos os pontos onde são medidos os parâmetros utilizados no presente estudo. Onde a Figura 4.6a representa a estação localizada no bairro de Carapina, município de Serra. A Figura 4.6b mostra a estação localizada na Enseada do Suá em Vitória. Localizada no bairro de Vila Capixaba em Cariacica, fica a estação mostrada na Figura 4.6c. A estação pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada dentro do campus Universitário da Universidade Federal do Espírito Santo (INMET/UFES) é mostrada na Figura 4.6d. Já a Figura 4.6e mostra o ponto onde são lançadas as radiossondagens, ponto de monitoramento. As estações representadas na Figura 4.6(a-c) pertencem ao Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA).

A escolha do período de simulação foi feita de forma que este período se adequasse a alguns critérios simples, tais como:

- O período de estudo deveria ter pelo menos uma semana de dados;
- A semana em questão teria que representar de forma satisfatória uma semana típica de

verão na região de estudo. Onde durante este período é comum a ocorrência de alta intensidade de radiação solar provocando temperaturas elevadas durante todos os dias, ação de ventos moderados e com direção meteorológica predominante sudoeste e ausência de chuva por um longo período;

- A outra semana deveria representar de forma também satisfatória uma semana típica de inverno na região. Onde tipicamente neste período há a ocorrência de baixa intensidade de radiação solar provocando baixas temperaturas durante todos os dias, ação de ventos moderados provenientes da região Sul do Brasil, alto índice de umidade relativa e chuvas ocasionais;
- De acordo com esta necessidade de representação, a semana escolhida para representar o verão foi de 01 a 07 de março de 2009 e para representar o inverno a semana escolhida foi de 20 a 26 de julho de 2008.

Para cada uma das estações de monitoramento da qualidade do ar, estação meteorológica do INMET e para as radiossondagem, gerou-se uma planilha contendo todos os dados medidos por elas durante os dois períodos escolhidos. Tomou-se o cuidado de verificar dos dados com erro, porém no período de inverno algumas das estações apresentaram problemas com os dados em todas as semanas escolhidas para a simulação, devido a este fato esta semana foi a que melhor representou o inverno neste ano. Os dados de radiossondagem não estavam disponíveis para este período.

Deve-se lembrar que os dados de radiossondagem tem o seu início a uma altura de 4 metros em relação ao solo e só terminam quando o balão meteorológico (não cativo) cessa suas medidas. Isso causa uma pequena variação na altura final dos dados durante as medições diárias, porém este fato é desconsiderado a baixa altura de interesse neste estudo quando comparada à altura final das medições do balão.

Este erro que é reconhecido pelo número (-999,99) pode ser proveniente de alguma falha do equipamento, inoperância do mesmo, presença de pássaros sobre os equipamentos ou até como já visto; objetos lançados sobre os equipamentos de medição. Nestes casos onde pelo menos uma das medidas era inválida, por medida de segurança, todas as outras medidas na mesma linha da planilha foram invalidadas também. Sendo assim em alguns casos principalmente durante o inverno os gráficos apresentam períodos com ausência de dados.

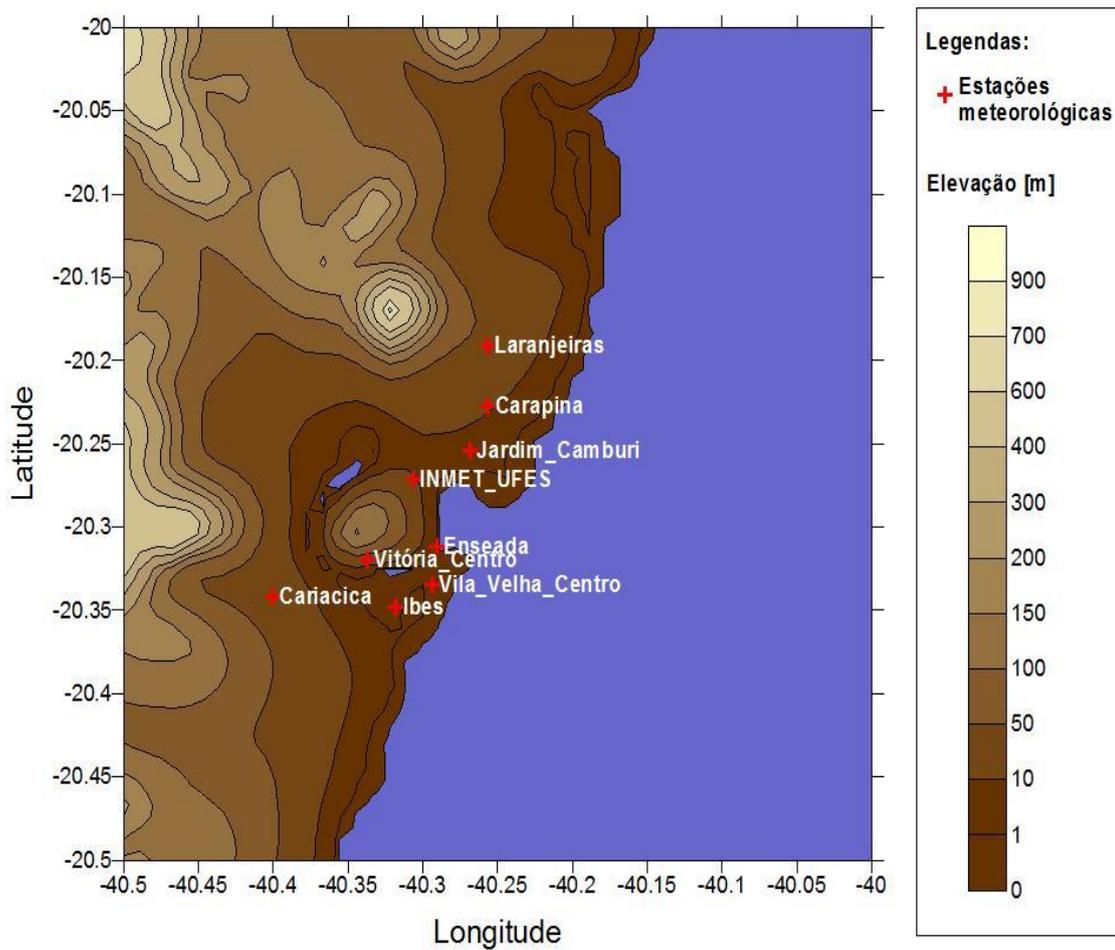


Figura 4-5 – Elevação e localização das estações meteorológicas da Região Metropolitana da Grande Vitória.

Tabela 7 – Parâmetros meteorológicos monitorados em cada estação.

Estações \ Parâmetros medidos	Velocidade do Vento	Direção do Vento	Pressão	Temperatura
Carapina	a 10m	a 10m	Nível do mar	a 2m
Enseada do Suá	a 10m	a 10m		
Vila Velha/Ibes	a 10m	a 10m		
Cariacica	a 10m	a 10m		a 2m
INMET/UFES	a 10m	a 10m	Nível do mar	a 2m
Radiosondagem	Toda atmosfera	Toda atmosfera	Toda atmosfera	Toda atmosfera

Fonte: Relatório de qualidade do ar anual do IEMA (2007) e página oficial do INMET, 2009.

Tabela 8 – Localização das estações meteorológicas de superfície e da radiossondagem.

Coordenadas Estações	X_UTM	Y_UTM	LAT	LON
Carapina	368.6700	7.766.879	-20.19155	-40.25612
Enseada do Suá	36528	7.753.434	-20.31228	-40.29087
Vila Velha/Ibes	362.433	7.749.409	-20.34844	-40.31794
Cariacica	353.808	7.750.062	-20.34190	-40.40050
INMET/UFES	395.390	7.788.206	-20.27111	-40.30611
Radiosondagem	395.561	7.759.738	-20.25722	-40.288611

Fonte: Relatório de qualidade do ar anual do IEMA (2007), página oficial do INMET

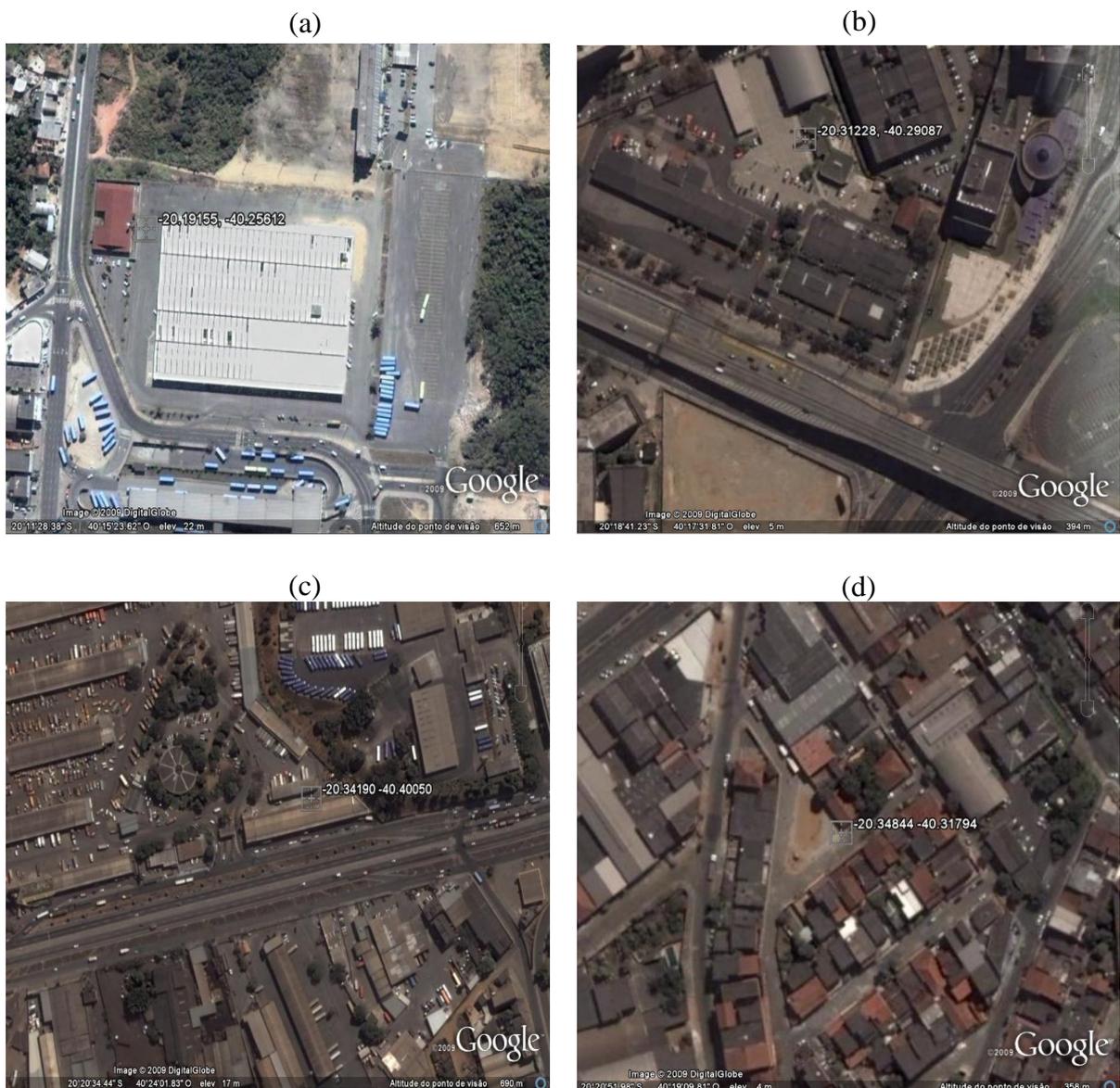


Figura 4-6 – Localização da RAMQar, (a) Carapina, Serra; (b) Enseada do Suá, Vitória; (c) Vila Capixaba, Cariacica; (d) Ibes, Vila Velha; (e) Estação do INMET-UFES, Goiabeiras-Vitória e (f) Ponto de monitoramento. Retiradas do *Google Earth* em junho, 2009.



Figura 4-6 – Continuação.

4.4. ANÁLISE DE PRECISÃO DAS SIMULAÇÕES

Até o momento não existe na literatura uma normatização para procedimentos de avaliação do desempenho dos modelos matemáticos para que seja possível julgar o desempenho de tais modelos. Modelos que são considerados seguros e que tem seu comportamento já caracterizado e bem estudado em outros países, podem não funcionar de forma satisfatória aqui no nesta região, pois as condições são diferentes para cada local de estudo mesmo que as regiões apresentem padrões semelhantes de ocupação do solo entre outras características. Com o aumento da capacidade de processamento dos computadores e a melhoria nas técnicas de programação, os modelos matemáticos estão cada vez mais próximos da realidade, mas ainda assim seus resultados não são totalmente precisos (PRABHA & HOOGENBOM, 2009; BERGE *et al.*, 2008; CHALLA *et al.*, 2008; AKYLAS *et al.*, 2007).

De forma geral o que é feito antes de divulgar os resultados de um modelo é realizar a sua verificação. Isto é feito comparando os resultados simulados por ele para um determinado período com valores observacionais de fontes seguras como redes de monitoramento da qualidade do ar, redes de monitoramento meteorológico ou até mesmo uma campanha intensiva das medidas organizadas com este propósito, por exemplo, radiossondagens. Desta forma podemos verificar de forma observacional os resultados da comparação, mas para

termos um maior garantia da eficácia do modelo, aplicam-se alguns parâmetros estatísticos aos resultados simulados e aos observados a fim de termos um parâmetro de comparação entre ambos. Neste estudo os parâmetros aplicados para descrever o desempenho do modelo WRF em relação aos dados observacionais são o erro fracional, desvio padrão fracional, erro médio quadrático normalizado e o coeficiente de correlação (HANNA, 1988). Estes parâmetros foram aplicados à concentração, porém neste estudo estes parâmetros foram aplicados à todas as variáveis aqui discutidas.

Sendo ε é a variável em questão (pressão, temperatura, pressão, etc.), e ε_{obs} e ε_{sim} representam os valores observados e simulados, respectivamente.

- Erro fracional (*fractional bias*),

$$FB = 2 \frac{\varepsilon_{obs} - \varepsilon_{sim}}{(\varepsilon_{obs} + \varepsilon_{sim})};$$

Os valores negativos de FB mostram que o modelo está superestimando a média dos valores observados e para valores positivos de FB e para FB negativo o modelo subestima tal média. O valor ótimo esperado para este teste é zero. Os maiores valores assumidos por este erro são -2 e +2.

- Desvio padrão fracional (*fractional standard*),

$$FS = 2 \frac{(\sigma_{\varepsilon_{obs}} - \sigma_{\varepsilon_{sim}})}{(\sigma_{\varepsilon_{obs}} + \sigma_{\varepsilon_{sim}})};$$

Confronta as variáveis, simuladas com as observadas, mostrando se essa variável média simulada superestimada ou subestimada, em torno da variável média. O valor ótimo para esse desvio é zero. Os valores de FS podem variar de -2 a 2. Quando $\varepsilon_{obs} > \varepsilon_{sim}$ a variável é simulada com um acréscimo nos seus valores e se $\varepsilon_{obs} < \varepsilon_{sim}$ mostra um decréscimo nos valores simulados. Porém devemos olhar isto com restrições, pois podem ocorrer casos onde $\varepsilon_{sim} \neq \varepsilon_{obs}$ e os desvios $\sigma_{\varepsilon_{sim}} = \sigma_{\varepsilon_{obs}}$;

- Erro quadrático médio normalizado (*normalized mean square error*),

$$NMSE = \frac{\overline{(\mathcal{E}_{obs} - \mathcal{E}_{sim})^2}}{\overline{\mathcal{E}_{obs}} \overline{\mathcal{E}_{sim}}};$$

O erro quadrático médio normalizado é a média quadrática da diferença entre os valores das propriedades observadas e simuladas, quando normalizado, apresenta valores de 0 a infinito, tendo como valores ideais, os menores erros e próximos a zero.

- Coeficiente de correlação,

$$r = \frac{\overline{(\mathcal{E}_{obs} - \overline{\mathcal{E}_{obs}})(\mathcal{E}_{sim} - \overline{\mathcal{E}_{sim}})}}{\overline{\mathcal{E}_{obs}} \overline{\mathcal{E}_{sim}}};$$

O coeficiente de correlação (r) mede a qualidade do ajuste à verdadeira reta, ou seja, a intensidade da relação linear existente entre as variáveis observadas e simuladas. Quanto maior a qualidade do ajuste linear, o sinal deste coeficiente será positivo se a propriedade simulada tender a crescer com o aumento da propriedade observada e negativo se a variável simulada tender a decrescer com o aumento da propriedade observada. Seu valor pode variar de +1 a -1, porém seu melhor valor é o +1. Quando não houver relação linear entre as variáveis, o valor de r será zero.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos pela simulação numérica para a região de estudo e comparações com dados observacionais. Os resultados e análises estão divididos em duas seções. A seção 5 aborda os resultados obtidos pela simulação para a semana de verão que compreende os dias 01 a 07 de março de 2009, enquanto a seção 5 trata da semana do inverno que compreende os dias 20 a 26 de julho de 2008. A escolha destas semanas teve o intuito de representar duas semanas típicas do inverno e do verão. Para os dois casos de comparação com dados experimentais, os horários foram escolhidos de acordo com o período dos lançamentos das radiossondagens realizadas no ponto de monitoramento afim de facilitar a comparação entre os resultados obtidos para os dois períodos de simulação. Por estes motivos os horários escolhidos são 9h e 21h. Para os casos onde somente são mostrados os resultados da simulação realizadas pelo modelo WRF, os horários utilizados são diferenciados com o intuito de abranger melhor os fenômenos acontecidos no dia escolhido para representar este estudo.

5.1. CASO 1: Verão

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos na simulação realizada para o período de verão. Nestes resultados foram aplicados os parâmetros estatísticos descritos no Capítulo 3 desta dissertação. Alguns destes parâmetros não foram aplicados à velocidade, pois para determinados períodos os valores médios da velocidade foram iguais a zero e em alguns testes isso causa um erro. Como dito anteriormente, o período foi escolhido de forma aleatória, porém era necessário que a semana em questão representasse de forma satisfatória uma semana típica de verão na região de estudo. Portanto, deveria ocorrer uma alta intensidade de radiação solar provocando temperaturas elevadas durante todos os dias, ação de ventos moderados e com direção predominante sudoeste. De acordo com esta necessidade de representação, a semana escolhida para este período foi de 01 a 07 de março de 2009.

O material apresentado está dividido em três subseções, a seção 5.1 apresenta o campo de vento e as variações da estrutura da CLP (perfis verticais de velocidade, direção, temperatura e evolução temporal e espacial da altura da CLP) ao longo do período de estudo somente para

a simulação realizada pelo WRF. A seção 5 apresenta comparações entre os dados de radiossondagem, a simulação com o WRF e os dados observados pelas estações meteorológicas de superfície. A terceira e última seção (5.3) apresenta a comparação entre as simulações realizadas pelo WRF e os dados experimentais obtidos pelas estações meteorológicas superficiais descritas no Capítulo 3. Os parâmetros estatísticos foram aplicados e são mostrados na forma de tabelas com suas médias diárias.

5.1.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Esta subseção apresenta os resultados obtidos pela simulação com o WRF, sobre a região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV). A Figura 5-1 representa a série temporal para altura da Camada Limite Planetária em cada um dos domínios de simulação, sobre o ponto de monitoramento. Nesta figura a linha vermelha representa os dados referentes à simulação sobre o domínio principal (d01), a azul representa os dados referentes à simulação sobre o domínio secundário (d02) e a preta representa os dados obtidos na simulação sobre o domínio (d03) que representa o foco deste estudo. O ponto escolhido para esta representação foi o mesmo local onde são realizadas as radiossondagens.

Verifica-se que o modelo consegue simular a altura da CLP em cada um dos domínios com pouca variação entre seus resultados, com exceção do dia 06 (intervalo Juliano 65 a 66) onde é observada uma variação de aproximadamente 300 m entre a altura simulada sobre os domínios d02 e d03. Espera-se o melhor resultado para esta simulação sobre domínio d03 onde a malha utilizada possui maior resolução, cerca de 15 vezes maior do que no domínio principal (d01). Neste domínio, a maior altura encontrada no período foi de cerca de 2200 metros entre os dias julianos 63 e 64 (04 de março) e o seu menor resultado é pouco maior que 1400 metros entre os dias julianos 65 e 66 (06 de março).

Conforme descrito por STULL (1988) a CM tem início por volta das 6 horas e aproximadamente às 18 horas chega ao seu fim, com o aparecimento da Camada Limite Noturna (CLN), Figura 2-2. Pode-se observar que os resultados gerados exibem este ciclo, tanto na Figura 5-1 quanto nas Figuras 5-2a a 5-7a da presente seção.

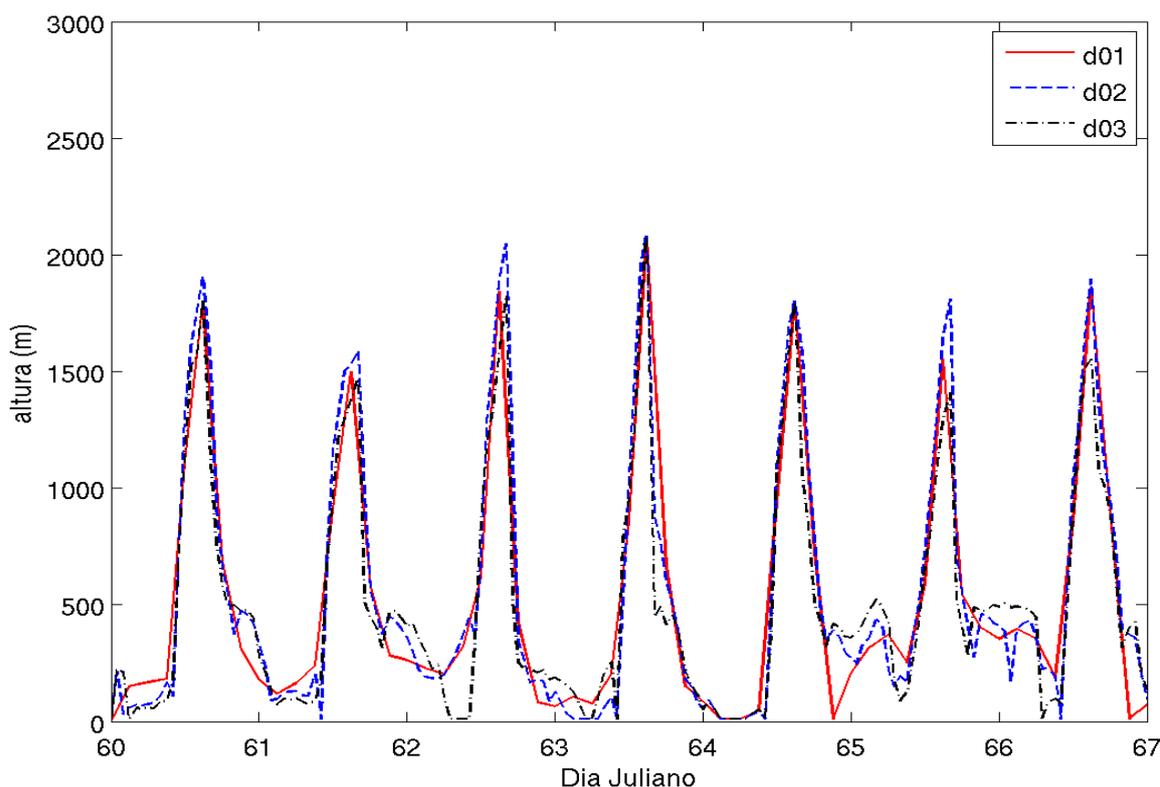


Figura 5-1 – Série temporal para a altura da Camada Limite Planetária para os três domínios de simulação (d01, d02 e d03) entre os dias 01 e 07 de março de 2009, sobre o ponto de monitoramento.

Durante a noite, a atmosfera está estável e estratificada devido ao fato de que o solo está mais frio que o ar; com o nascer do sol, sua radiação aquece o solo e o oceano dando início ao fluxo de calor vertical no sentido ascendente. Este fato gera um aumento na espessura da camada sob os efeitos convectivos que aumentam enquanto a superfície da Terra é aquecida. No período entre a tarde e a noite quando a temperatura da atmosfera vai se tornando mais alta do que a do solo tem início o fluxo de calor no sentido do solo tornando a atmosfera estável.

Pode-se observar através das Figuras 5-1 a 5-7 a evolução temporal da altura da CLP e do campo de vento para o dia 04 de março de 2009. Os horários escolhidos para esta representação são 1 hora, 5 horas, 9 horas, 13 horas, 17 horas e 21 horas do dia 04 de março de 2009 (quarta-feira). A escolha deste dia deve-se ao fato do modelo ter previsto a maior altura da CLP durante todo o período analisado. Foi escolhido um intervalo de tempo de 4 h para que o dia fosse bem representado. As figuras aqui citadas serão discutidas somente para

o domínio (d03), que abrange apenas a Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV). Figuras (4-1 e 4-4).

A Figura 5-2 mostra a altura da CLP e o campo de vento a 10m para o primeiro intervalo de tempo (1h) do dia 04 de março de 2009. Verifica-se, na Figura 5-2a, que neste horário a altura da CLP é menor que 200m na grande parte da região com apenas alguns pontos isolados onde a altura ultrapassa este valor. Isto deve-se ao fato de que a CM só começa a progredir pouco antes das 6h, quando os primeiros raios solares atingem a superfície terrestre. Neste horário existe apenas a Camada Limite Noturna (CLN) (STULL, 1988).

Na Figura 5-3a percebe-se um aumento significativo das regiões onde a altura da CLP é maior que 200m indicando que a CLN está desacoplando para dar início a Camada de Mistura (CM), fato descrito por STULL (1988) e percebido ao observar a Figura 2.2. As 9h da manhã, não existe mais a CLN. A CM agora já atinge valores da ordem de 1400m em algumas regiões (Figura 5-4a). Logo no início do período da tarde (13h) a temperatura já está perto do seu maior valor e percebe-se que a altura da CLP atinge valores por volta de 2400m (Figura 5-5a) na região interna do continente. Nota-se claramente que sobre o oceano não há variação expressiva na altura da CLP.

Ao atingir a faixa das 17h, nota-se que a altura da CLP já apresenta uma grande queda em seus valores (Figura 5-6a) quando a sua altura máxima não ultrapassa os 800m. A partir deste horário, ocorre naturalmente uma diminuição da intensidade dos raios solares que atingem a Terra, a atmosfera começa a ficar mais aquecida do que a superfície terrestre devido ao fluxo de calor ascendente, conseqüentemente é gerada a inversão térmica. Este fenômeno aumenta no início da noite e algumas vezes atravessa toda a noite, como resultado da divergência do fluxo radiativo e de calor sensível.

Os processos de mistura na chamada Camada Residual geralmente são muito fracos. O forte cisalhamento do vento pode gerar turbulência intermitente ou esporádica (ARYA, 1999; STULL, 1988). Isso é comprovado pela queda na altura da CLP. Na Figura 5-7a nota-se em uma pequena faixa do mar alturas de até 400m para a CLN, mas na grande parte da região fica abaixo de 200m, este comportamento não deve sofrer grandes variações durante a noite.

Na Figura 5-2b onde está representado o campo de vento a 10m sobre a região, verifica-se que a maior velocidade do vento está na ordem de 7m/s. Observa-se ainda nesta figura, uma

convergência do vento devido a existência de uma cadeia de montanhas no centro da região. Isto causa a aceleração do vento entre elas, porém na maior parte do continente a velocidade do vento a 10m está entre zero e 3m/s. Na Figura 5-3b, observa-se pouca variação na direção predominante do vento, mas a velocidade máxima atingida aumentou significativamente, atingindo valores da ordem de 9m/s e também aumentou a velocidade média dos ventos superficiais. Verifica-se também há a ocorrência de uma grande área onde a velocidade do vento está entre 3m/s e 6m/s.

Na Figura 5-4b, a velocidade máxima do vento sofreu um pequeno decréscimo em seu valor. Neste momento a topografia quase não influencia o comportamento do vento e a velocidade média está entre 3m/s e 6m/s na maior parte da região. A direção predominante do vento não sofre alterações. Nota-se, claramente, na Figura 5-5b a mudança na direção do vento que antes era predominantemente de direção Norte agora tende a mudar para direção Sudeste, este é mais um fator que provoca o aumento da altura da CLP sobre a região de convergência do vento. Percebe-se um leve aumento na velocidade máxima do vento, porém a velocidade média do vento na grande maioria da região não ultrapassa os 6m/s.

Não é percebida alguma mudança drástica no campo de vento (Figura 5-6b), porém nota-se uma tendência a diminuição da velocidade do vento, neste momento as velocidades não ultrapassam os 5m/s. Também não percebe-se alteração em sua direção de propagação. Já na Figura 5-7b nota-se uma alteração na direção de propagação do vento. As 21h o vento está predominantemente de direção Sudeste, sua velocidade é baixa na grande maioria da região e novamente percebe-se que está sendo acelerado pela topografia da região o que altera o padrão da dispersão dos poluentes atmosféricos (LEE *et al.*, 2008).

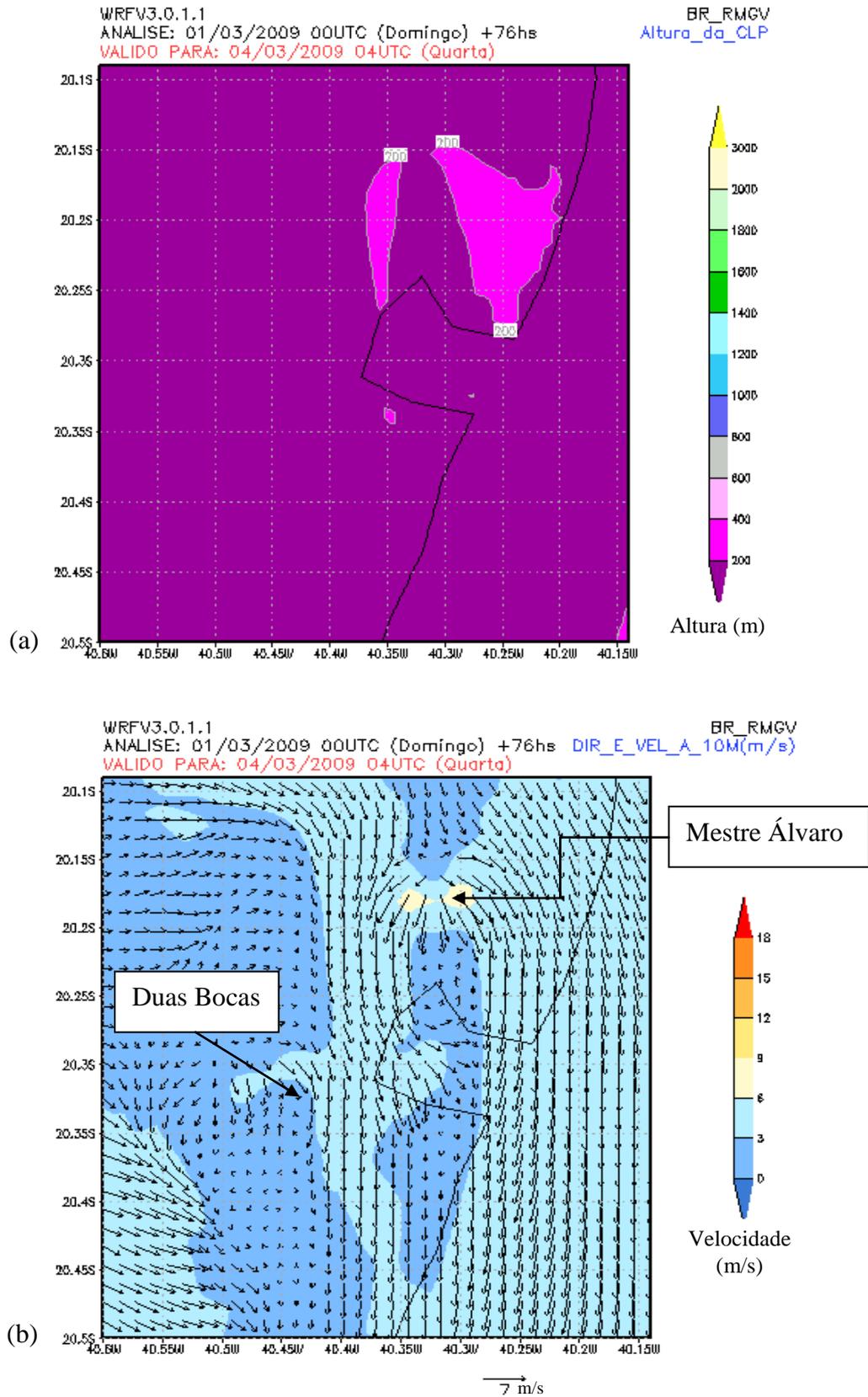


Figura 5-2 – (a) altura da CLP e (b) campo de vento a 10m sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória para a quarta-feira (04 de março de 2009) a 01h local ou 04 UTC, simulados pelo WRF.

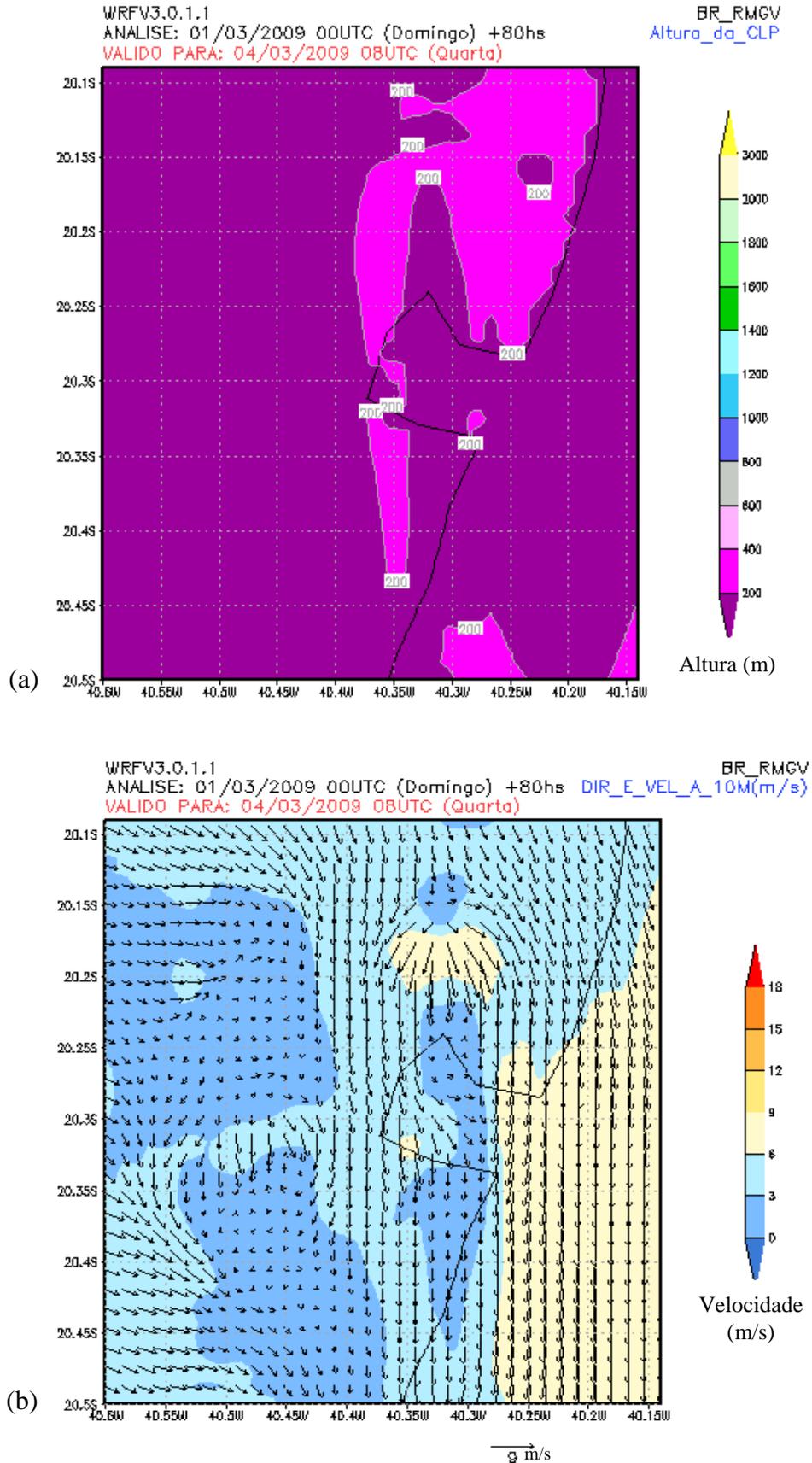


Figura 5-3 – (a) altura da CLP e (b) campo de vento a 10m sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória para a quarta-feira (04 de março de 2009) a 05h local ou 08 UTC, simulados pelo WRF.

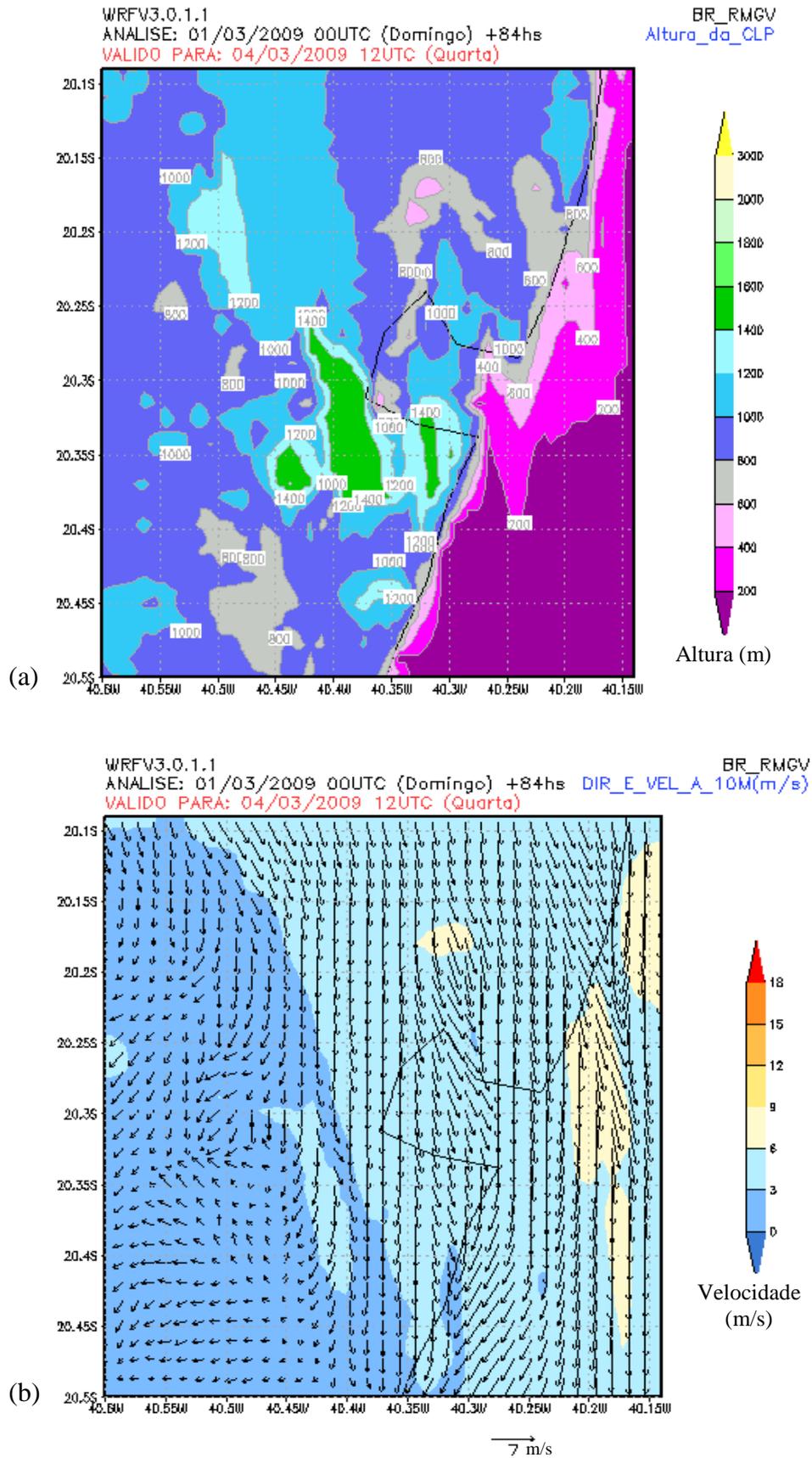


Figura 5-4 – (a) altura da CLP e (b) campo de vento a 10m sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória para a quarta-feira (04 de março de 2009) a 09h local ou 12 UTC, simulados pelo WRF.

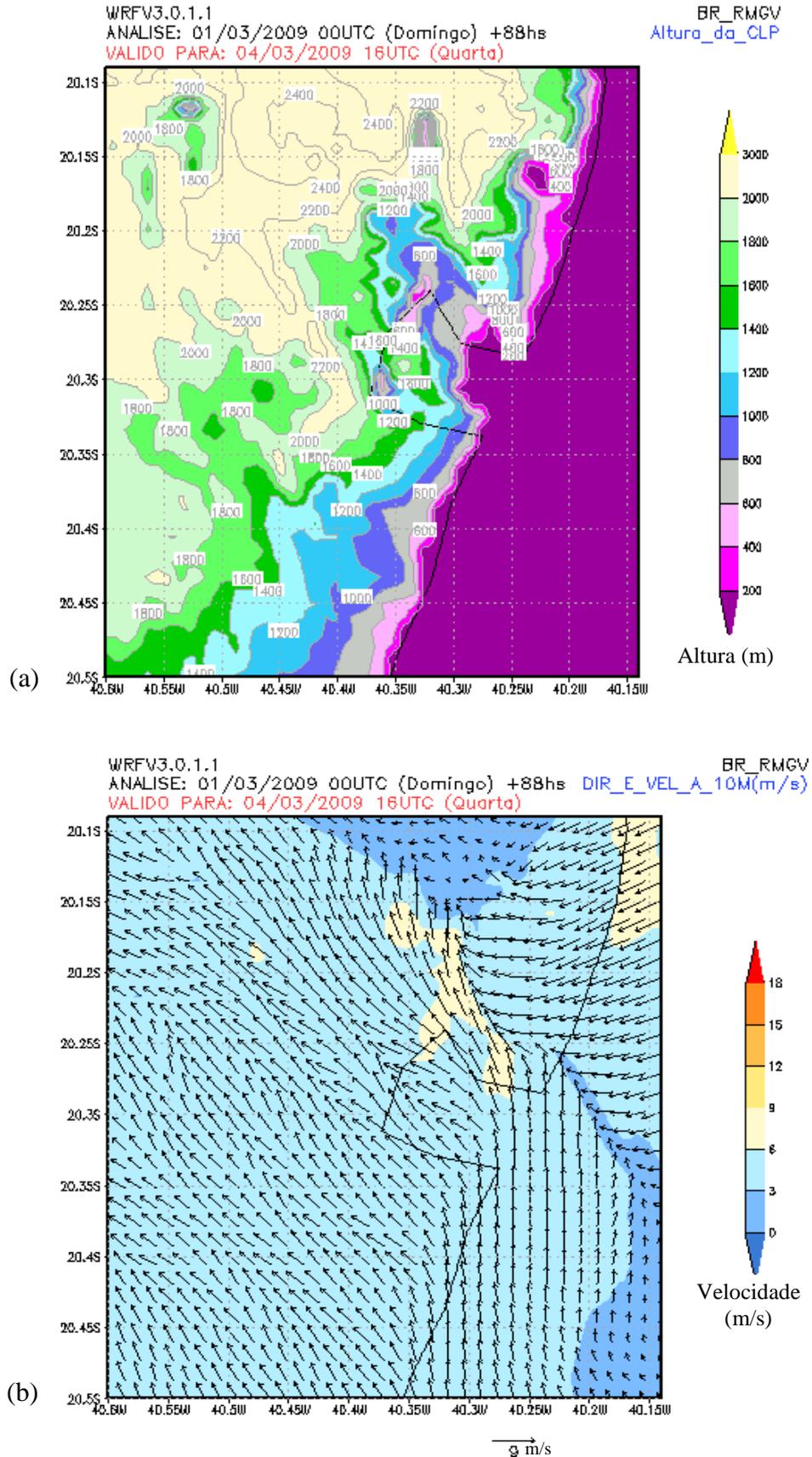


Figura 5-5 – (a) altura da CLP e (b) campo de vento a 10m sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória para a quarta-feira (04 de março de 2009) a 13h local ou 16 UTC, simulados pelo WRF.

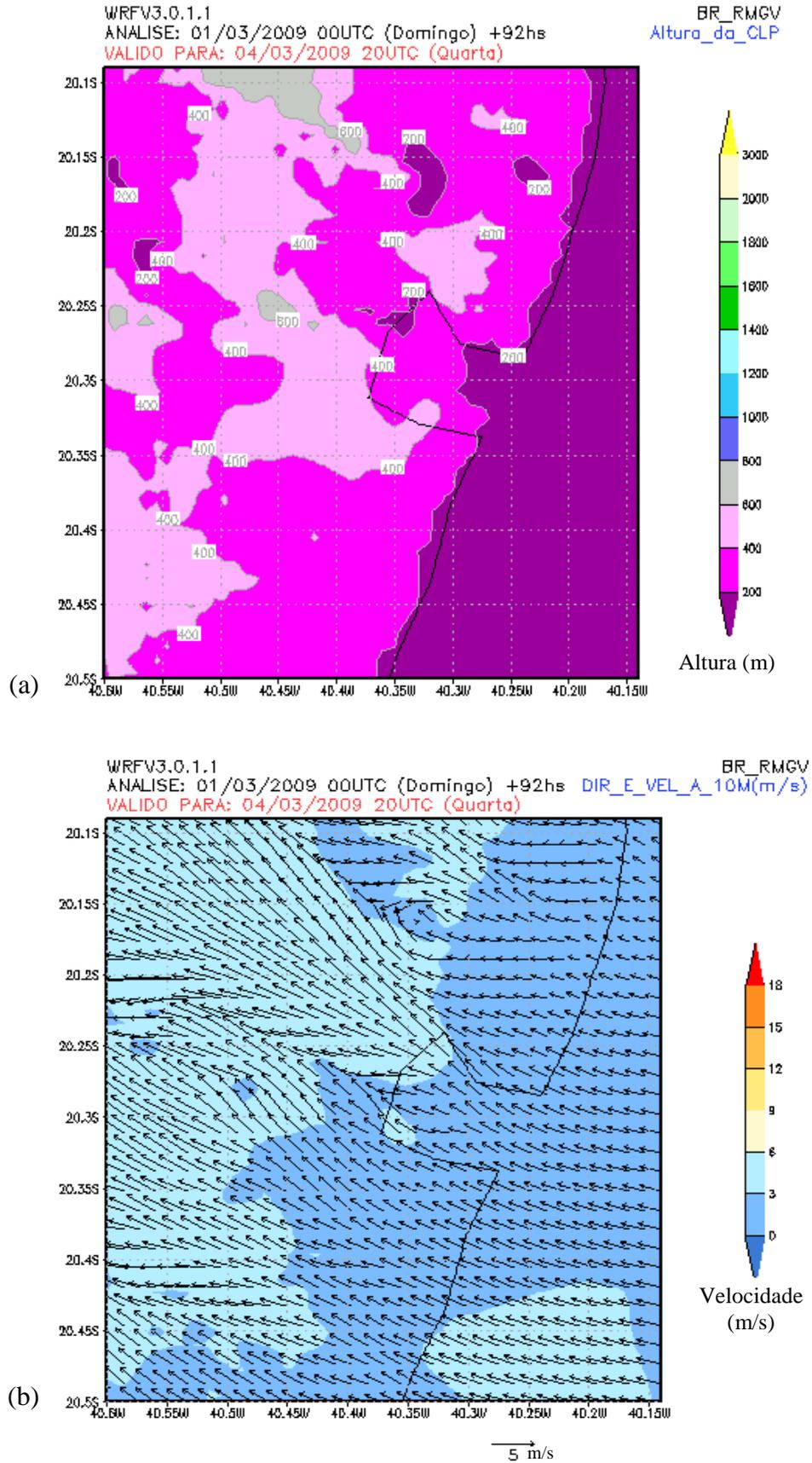


Figura 5-6 – (a) altura da CLP e (b) campo de vento a 10m sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória para a quarta-feira (04 de março de 2009) a 17h local ou 20 UTC, simulados pelo WRF.

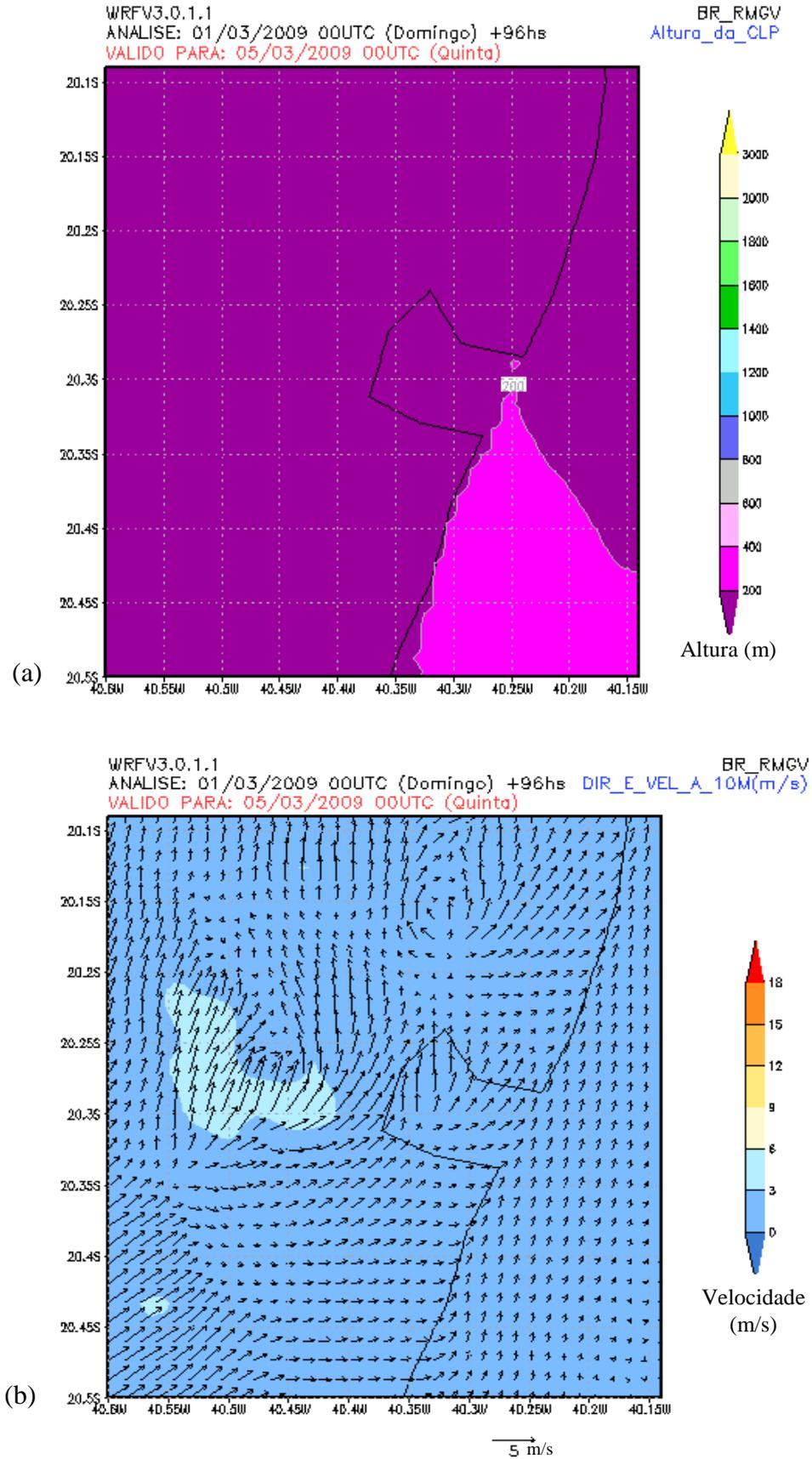


Figura 5-7 – (a) altura da CLP e (b) campo de vento a 10m sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória para a quarta-feira (04 de março de 2009) a 21h local ou 00 UTC, simulados pelo WRF.

A Figura 5-8 apresenta o perfil da temperatura potencial sobre o ponto de monitoramento, onde o horário de 1h é representado pela linha vermelha, 5h representada pela linha tracejada azul, 9h pela linha preta, 13h pela linha rosa, 17h linha amarela e por fim, 21h, pela linha pontilhada azul claro.

Observa-se na Figura 5-8 que para os horários de 1h, 5h e 21h o perfil da temperatura potencial é semelhante nestes casos, indicando condições de estratificação estável e pequenas diferenças são percebidas. Observando a mesma figura, porém para o perfil das 9h, verifica-se que a atmosfera encontrava-se neutra até aproximadamente 900m de altura, a partir desta altura seu perfil sofre uma alteração indicando estabilidade atmosférica até o fim da representação. No perfil da temperatura potencial, no horário das 17h, observa-se uma pequena instabilidade até a faixa dos 200m de altura, a partir daí até por volta dos 400m a atmosfera mostrou-se neutra, desta altura em diante assume um perfil de estabilidade como os outros. Às 13h, o perfil da temperatura potencial mostra-se instável até aproximadamente 200m de altura e também assume o perfil estável até o fim da representação. Este comportamento ilustra claramente a variação das condições de estabilidade atmosférica durante o ciclo diário.

A Figura 5-9 representa a simulação do perfil vertical da velocidade e da direção do vento sobre o ponto de monitoramento para o dia 04 de março de 2009 (quarta-feira). Nesta forma, cada uma das linhas representa um dos horários escolhidos para a simulação. Na Figura 5-9a, onde está representado o perfil vertical da velocidade do vento, percebe-se que entre zero e 500m ocorre uma grande variação da velocidade entre os horários escolhidos para este estudo. Às 5h da manhã observa-se as maiores velocidades do vento, como dito anteriormente até 9 m/s. Entre 500m e 1000m as velocidades não apresentam variação tão relevante. A partir dos 1000m até a altura analisada, novamente observa-se uma grande variação onde o desvio máximo é encontrado entre os períodos de 5h e 17h para a altura de aproximadamente 2200m, o valor do desvio foi da ordem de 6m/s.

Observa-se que na Figura 5-9b, a variação da direção do vento é bem pequena para alturas acima de 2000m, porém para baixas alturas é percebida grande variação da direção. A maior variação é percebida para o horário das 13h, entre 1000m e 1100m verifica-se variação de 200° em sua direção. As menores variações são percebidas no período matutino. Desta forma, é verificado a grande influência da superfície da Terra na direção do vento devido ao fato de que a maior parte desta variação ocorre entre zero e 1000m de altura.

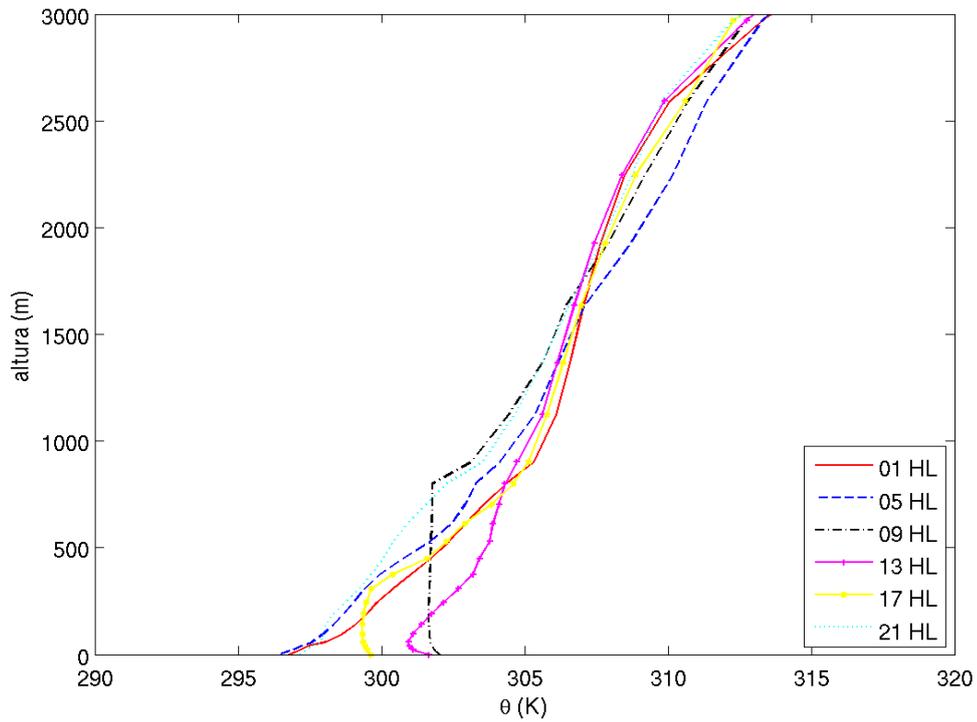


Figura 5-8 – Perfil da temperatura potencial para o dia 04 de março de 2009 (quarta-feira), sobre o ponto de monitoramento.

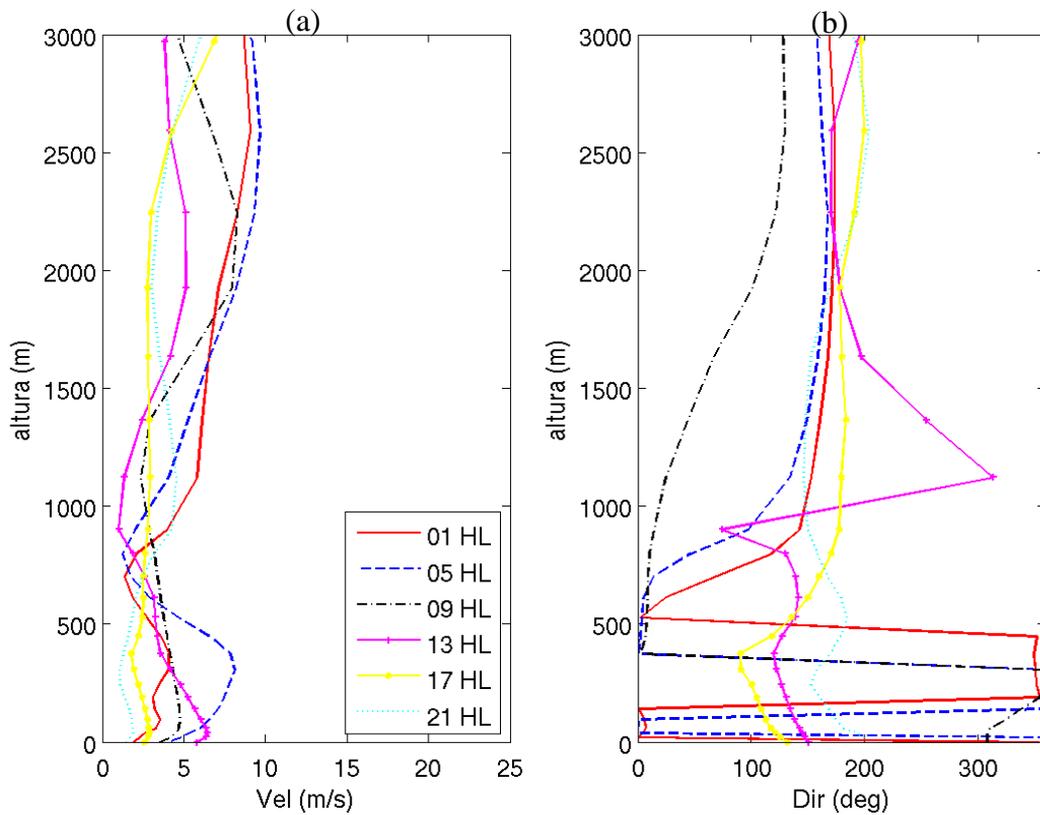


Figura 5-9 – Perfil vertical da (a) velocidade do vento e (b) direção do vento até 3000m de altura para o dia 04 de março de 2009 (quarta-feira), sobre o ponto de monitoramento.

5.1.1.1 COMPARAÇÃO COM RADIOSSONDAGEM

Nesta seção, serão discutidos os resultados da simulação dos perfis verticais de temperatura, velocidade e direção do vento realizada pelo WRF, confrontados com os dados obtidos através da radiossondagem (lat. -20,25722 e lon. -40,288611) para ao período de Verão.

A Figura 5-10 apresenta a comparação entre o perfil vertical da temperatura potencial simulada pelo WRF e observada pela radiossondagem realizada sobre o ponto de monitoramento, para o dia 01/03/2009. Pode-se perceber que o modelo consegue representar de forma coerente os valores da temperatura, porém para médias (4000m a 8000m) e elevadas (10000m a 14000m) altitudes, as temperaturas previstas são superestimadas de forma evidente pelo modelo. O maior desvio encontrado nesta figura foi da ordem de 21K quando o modelo simula a temperatura em altitudes elevadas.

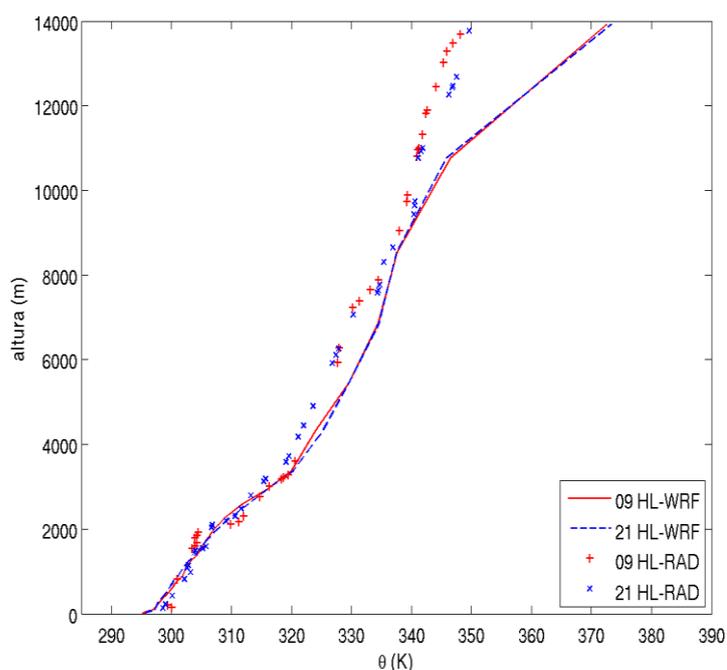


Figura 5-10 – Comparação entre o perfil vertical da temperatura potencial até 14000m com os dados obtidos pela radiossondagem e simulada pelo WRF, sobre o ponto de monitoramento no dia de 01 março de 2009.

Um desvio desta ordem representa um erro significativo, entretanto como este estudo está focado na estrutura da CLP. A altura máxima mostrada será de 3000 m e neste intervalo de altura os desvios encontrados são significativamente menores.

O comportamento da temperatura é semelhante durante todos os dias desta semana, conforme apresentado na Figura 1 do Anexo 1. Será dada maior ênfase na estrutura vertical da temperatura até 3000m por se tratar da região onde a temperatura sofre a maior influência da superfície terrestre. Nesta região, os desvios são da ordem de 2 a 5K.

A Figura 5-11 (a-g) representa comparação entre o perfil vertical da temperatura potencial para todos os dias da semana de estudo até a altura de 3000m, obtido pela radiossondagem e simulado pelo WRF. Pode-se observar na Figura 5-11a que para o às 9h, o modelo superestimou todas as observações da radiossondagem, já para alturas até 500m e no horário das 21h o modelo subestima os valores da temperatura potencial. Este comportamento era esperado para o primeiro dia, para os outros dias o modelo conseguiu um melhor ajuste dos seus resultados, fato observado na Figura 5-11b onde se verifica que a distância entre os pontos da radiossondagem à curva do modelo é menor. Entretanto, observa-se que os dados de radiossondagem indicam um perfil de temperatura decrescente para os primeiros metros da CLP (atmosfera instável), às 9h. Este comportamento não é adequadamente predito pelo modelo.

Na Figura 5-11c é possível verificar que para alturas até 1500m o modelo obteve um bom resultado em suas previsões principalmente às 9h, porém entre 1500m e 2000m a temperatura potencial e seu gradiente foram fortemente subestimados pelo modelo para o horário das 9h. No quarto dia de simulação (Figura 5-11d) o modelo subestimou para os dois horários de observações, quase todos os valores da temperatura potencial. Este fato foi inesperado, pois esperava-se uma melhora ou constância dos seus resultados no decorrer da simulação. Entretanto, apesar desta subestimação a forma do perfil de temperaturas é razoavelmente bem representada. O gradiente vertical de temperaturas é aproximadamente similar ao obtido por radiossondagem.

A partir do quinto dia (Fig. 5-11e) o modelo voltou a apresentar resultados coerentes com o esperado, onde as temperaturas preditas se aproximaram mais das observadas e obteve-se uma média entre as temperaturas subestimadas e superestimadas para os dois horários de observação. Este comportamento se manteve constante até o fim da simulação como pode ser observado na Figura 5-11e, 5-11f e 5-11g. Entretanto, novamente pode-se observar que o modelo não representou adequadamente o gradiente vertical de temperaturas próximo à superfície em vários instantes. No quinto dia (Figura 5-11e) o modelo indicou um gradiente positivo de temperaturas para os perfis de 9h e 21h, enquanto os dados de radiossondagem

mostram um perfil tendendo à neutralidade (gradiente vertical próximo de zero) ou negativo. No sexto dia, apesar da representação adequada para o perfil de 9h, o perfil obtido pelo modelo para 21h mostra um gradiente vertical próximo de zero até aproximadamente 1000m de altitude (atmosfera neutra), enquanto que os dados de radiossondagem mostram um gradiente vertical positivo nesta região (atmosfera estável). Por outro lado, no sétimo dia os gradientes verticais de temperatura parecem ser bem representados, mesmo em regiões próximas ao solo.

De maneira geral, pode-se dizer que o modelo consegue representar razoavelmente bem o perfil vertical da temperatura para altitudes abaixo de 3000m. Entretanto, o gradiente vertical de temperaturas em baixas altitudes (abaixo de 500m) não é adequadamente representado em alguns intervalos de tempo. Este comportamento também foi observado nas simulações reportadas por SIRINIVAS *et al.*(2006) para a CLP na costa de Chennai na Índia, usando o MM5. Como referência a magnitude dos desvios obtidos em estudos anteriores é possível citar CHALLA *et al.* (2009) que obteve desvios entre os resultados de radiossondagem e simulações com o WRF de aproximadamente 2K para altitudes inferiores a 3000m, em estudo da CLP sobre o Golfo do Rio Mississippi (EUA). SIRINIVAS *et al.* (2007) obteve desvios máximos de aproximadamente 3K para a sua simulação.

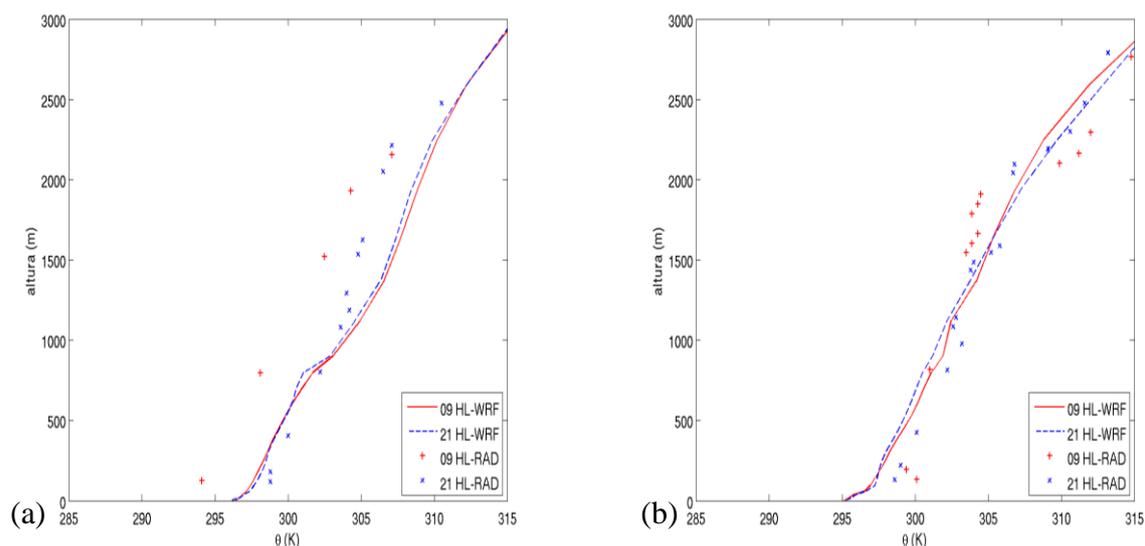


Figura 5-11 – Comparação entre o perfil vertical da temperatura potencial até 3000m de altura simulada pelo WRF e observada pela radiossondagem, sobre o ponto de monitoramento para os dias (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05, (f) 06 e (g) 07 de março de 2009.

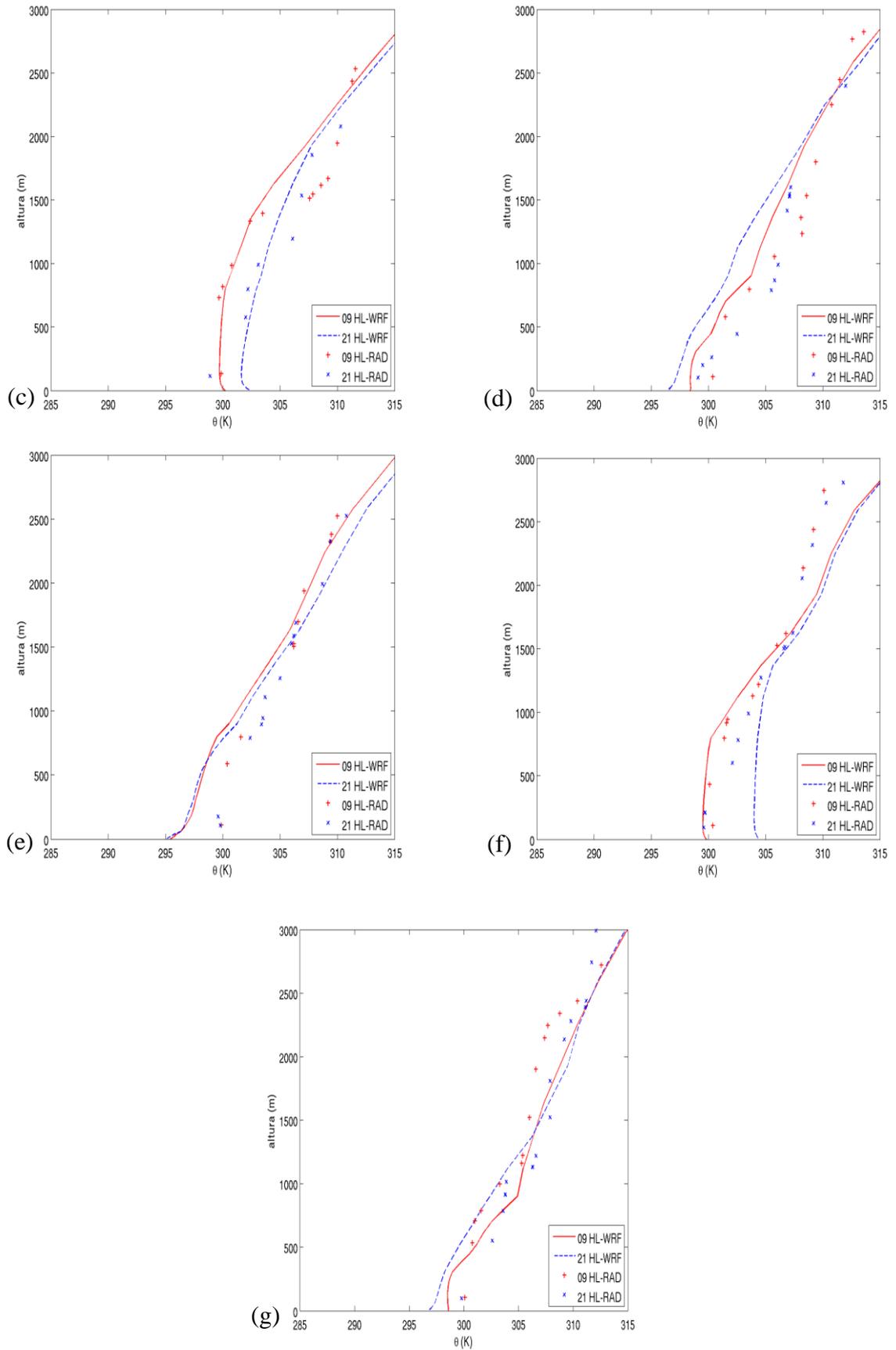


Figura 5-11 – Continuação.

A Figura 5-12 mostra os perfis verticais da velocidade e direção do vento sobre o ponto de monitoramento, entre os dias 01 e 07 de março de 2009. Nesta figura estão representados os dados simulados pelo WRF confrontados com os dados observados pelas radiossondagens.

Verifica-se na Figura 5-12a que o modelo obteve uma boa representação dos valores no período matutino (9 HL) os valores simulados pelo WRF foram um pouco maiores do que os observados até a altura de 1000m, a partir daí o modelo consegue um melhor ajuste e passa a representar a velocidade de forma mais consistente. Para o período noturno, o modelo subestima as velocidades em baixa altitude e a partir de 1500m de altura tais velocidades passam a ser simuladas com um acréscimo em seus valores, porém o modelo acompanha de forma satisfatória sua variação. Os maiores desvios são encontrados no período matutino e seu maior valor é da ordem de 5 m/s. Ainda observando a Figura 5-12a verifica-se que a direção do vento para baixas altitudes, em torno de 1000m, o modelo não conseguiu uma boa representação da direção do vento sobre o aeroporto. Para este parâmetro os desvios chegaram a alcançar valores em torno de 180°.

Para o segundo dia de simulação (Fig. 5-12b), observa-se uma melhora significativa do modelo tanto na simulação da velocidade nos dois períodos quanto na simulação da direção do vento no período matutino. Para o período noturno o modelo não conseguiu um bom ajuste na simulação dos dados da direção do vento. Para este dia foram encontrados desvios na ordem de 80° para o período noturno. Ao observar a Figura 5-12c, percebe-se que o modelo consegue uma boa predição da velocidade do vento, atingindo seu maior desvio em relação aos dados experimentais, por volta dos 1000 m de altura; onde este desvio foi da ordem de 5 m/s. A direção do vento continuou a mostrar um padrão de erros da ordem de 100° em relação aos dados experimentais principalmente durante o período noturno.

Na Figura 5-12d o WRF consegue uma boa representação para a velocidade do vento principalmente para alturas maiores que 1000 m e no período matutino. A noite o modelo voltou a gerar dados com desvios de até 5 m/s, mas em pelo menos um caso o WRF conseguiu simular exatamente o valor da velocidade do vento. A direção do vento para alturas abaixo de 1000 m mostrou-se superestimada novamente. Para os dias 05 a 07 (Fig. 5-12 e-f) nota-se um comportamento semelhante, onde o modelo consegue uma boa representação para a velocidade do vento tanto no período matutino quanto no noturno, porém a direção do vento continua a ser representada de forma inconsistente principalmente no período noturno, onde desvios da ordem de 200° foram encontrados. Este fato sugere uma investigação futura. Para

determinar se devem ser testadas outras formas de avaliar a direção do vento ou se realmente o modelo não conseguiu acompanhar esta variável de forma satisfatória.

Na verdade a maioria dos perfis indica que a direção para altitudes elevadas (acima de 2000m) é aproximadamente predita e que a direção do vento próximo ao solo também é razoavelmente simulada. Entretanto as direções do vento para as altitudes medianas parecem não estar muito adequadas, indicando que a transição das altitudes mais baixas para as mais elevadas não é representada corretamente. Por exemplo, no dia 04 a direção do vento para os dois horários na superfície é próxima de 0° , enquanto que em altas altitudes a direção é de aproximadamente 150° . Este comportamento pode ser também observado nos dados experimentais, porém a transição de 0° (superfície) para 150° (2000m) ocorre no sentido anti-horário nos dados experimentais (200° a 1500m, 300° a 1000m e 350° a 500m) e no sentido horário nas previsões do modelo (100° a 1500m, 70° a 1000m e 50° a 500m).

No estudo realizado por CHALLA *et al.* (2009), o autor obteve desvios para a velocidade do vento na ordem de 90° para a direção do vento. Isto mostra que esta propriedade não foi bem simulada pelo WRF no presente estudo, visto que foram encontrados desvios na ordem de 150° .

No estudo realizado por CHALLA *et al.* (2009), o autor obteve desvios para a velocidade do vento na ordem de 0,5 a 2 m/s. No presente estudo a ordem dos desvios para a velocidade do vento mostrou-se um pouco superior aos encontrados por CHALLA. É possível encontrar desvios da ordem de 5m/s em todos os dias da simulação. Os melhores resultados foram encontrados no segundo dia de simulação (02 de março) onde o desvio foi da ordem de 1 a 2m/s e os maiores desvios foram encontrados nos dias 03 e 05 para o horário das 9h. No período noturno (21h) foram encontrados bons resultados para os dias 02 e 03 de março e os maiores desvios deram-se nos dias 01 e 04 do mesmo mês.

Os cálculos dos parâmetros estatísticos (FB, FS, NMSE e r) não foram aplicados à estes resultados devido a dificuldade de encontrar dados de radiossondagem na mesma altura para que pudessem ser comparados aos dados simulados pelo modelo. Visto que para dias diferentes as alturas obtidas de forma experimental não coincidem. Uma solução futura seria realizar uma interpolação de valores da altura obtida nas radiossondagens para assim confrontá-las com os dados simulados

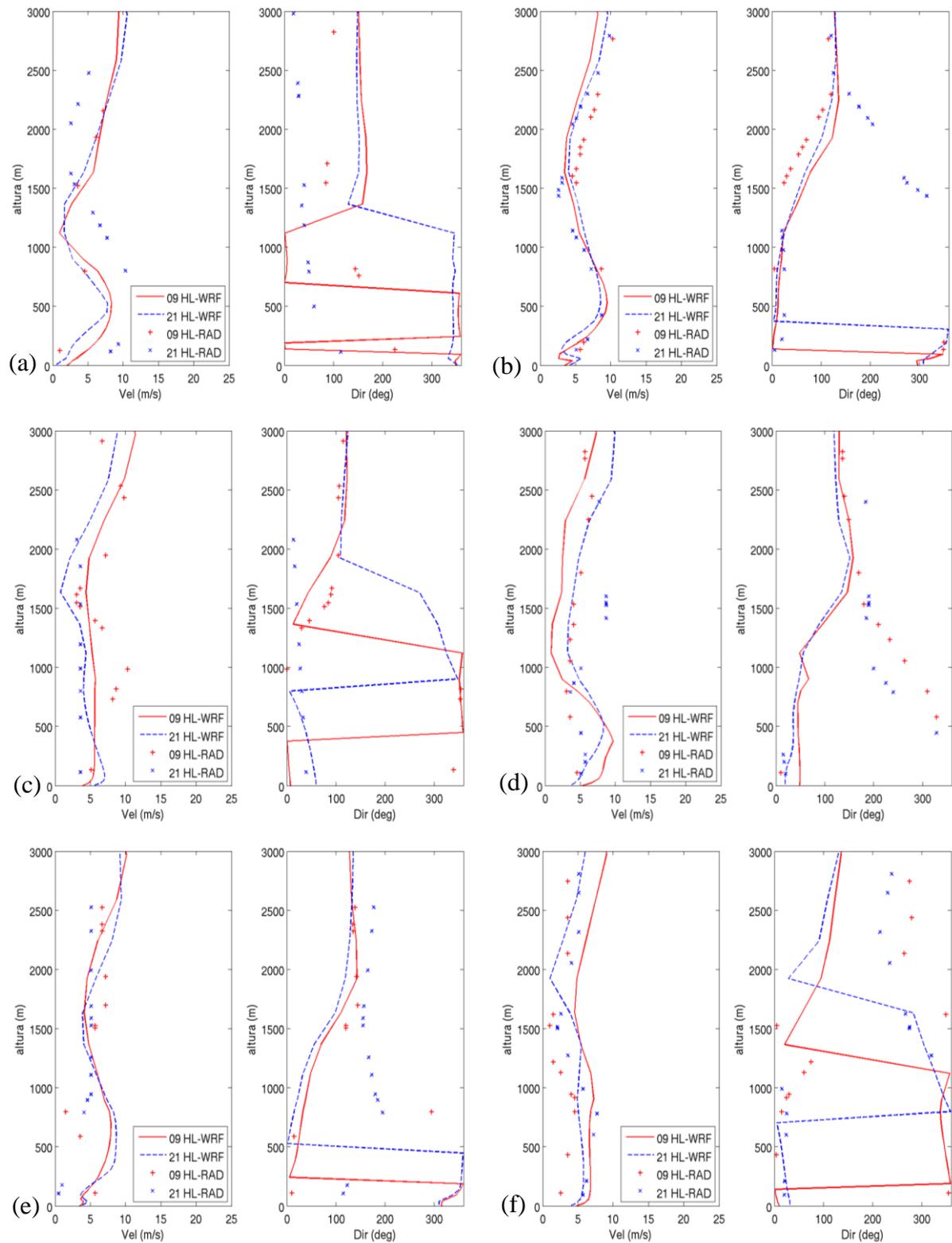


Figura 5-12 – Perfis verticais da velocidade e da direção do vento simulados pelo WRF e observados pela radiossondagem sobre o ponto de monitoramento para (a) dia 01, (b) dia 02, (c) dia 03, (d) dia 04, (e) dia 05, (f) dia 06 e (g) dia 07 de março de 2009.

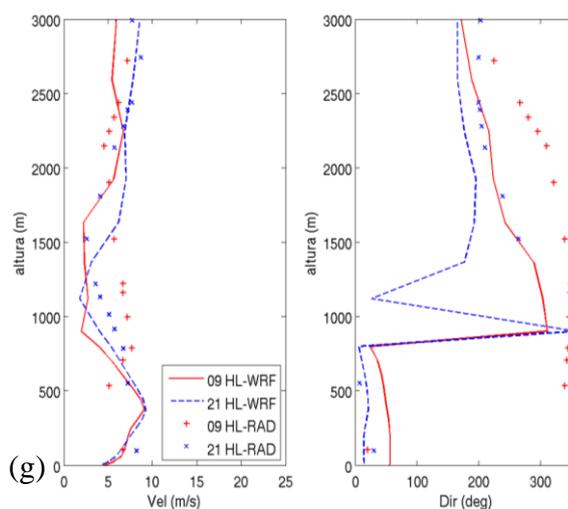


Figura 5-12 – Continuação

5.1.1.2 COMPARAÇÕES COM AS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE SUPERFÍCIE E TESTE DE DESEMPENHO

Nesta subsecção são apresentados e discutidos os resultados das comparações entre os dados observacionais obtidos pelas estações meteorológicas de superfície e os resultados obtidos pelo WRF. Para a verificação da qualidade dos dados gerados pelo WRF, alguns parâmetros estatísticos foram aplicados aos seus resultados, porém em alguns casos os valores das propriedades médias no período é zero o que impossibilita a aplicação de alguns destes testes.

A Figura 5-13 mostra a série temporal para a temperatura a 2 m simulada pelo WRF e comparada com os valores experimentais obtidos pelas estações meteorológicas de superfície. A Figura 5-13a apresenta a comparação entre os dados simulados e observados para a temperatura a 2m de altura para a RAMQar de Carpina. Pode-se observar nesta figura, que o modelo conseguiu representar de forma consistente a variação diária (ciclo diurno) dos valores da temperatura nesta região. Os valores máximos e mínimos foram bem representados e não observa-se pontos com valores discrepantes em nenhum dos dias de simulação para esta estação.

Nesta região o maior valor da temperatura foi de aproximadamente 36°C obtido entre os dias julianos 62 e 63, que representa a terça-feira (03). A temperatura mínima foi de aproximadamente 23°C para a terça-feira e quarta-feira. Para esta propriedade o desvio máximo encontrado foi de 2°C, entre os dias 66 e 67 (07 de março de 2009).

Na Figura 5-13b, observa-se que o modelo também conseguiu representar de forma consistente a sazonalidade dos valores da temperatura nesta região. Os valores máximos foram bem representados apesar de apresentar valores acima dos observados em 3 dias. Somente entre os dias julianos 62 e 63 a temperatura apresenta-se significativamente acima do valor observado. As temperaturas mínimas apresentam-se destacadamente menores do que as observadas para este período; fato que ainda não havia sido observado nos resultados de outras estações. O maior valor para a temperatura sobre esta região também foi de aproximadamente 37°C e a menor 23°C na segunda-feira (intervalo juliano de 61-62). O maior desvio foi de cerca de 5°C entre os dias julianos 64 e 65 (sexta-feira 05 de março de 2009).

Já sobre a estação do INMET/UFES (Figura 5-13c) o maior valor observado para a temperatura está por volta dos 35°C. Sobre esta estação os dados simulados apresentam-se coerentes com os dados medidos e sem grandes extremos tanto para a temperatura máxima quanto para a temperatura mínima. O maior desvio encontrado foi da ordem de 3°C para o domingo (intervalo Juliano de 66 a 67). Com relação a temperatura a 2m do solo, pode-se dizer que o modelo prediz de forma satisfatória o ciclo diurno dos dados bem como os seus valores mínimos e máximos. Uma análise mais aprofundada dos dados pode ser observada na Tabela 9, onde alguns parâmetros estatísticos foram aplicados aos seus resultados. Observando-se esta tabela podemos perceber que o modelo subestima os valores da temperatura a 2m.

A Tabela 9 apresenta o erro fracional (FS), desvio padrão fracional (FB), o erro quadrático médio normalizado (NMSE) e o coeficiente de correlação (r) para os resultados da simulação para a temperatura a 2m, realizada pelo WRF comparados aos das estações RAMQar Carapina, Cariacica e a estação do INMET/UFES.

Para a RAMQar localizada em Carapina, observa-se que os valores de FS, FB e NMSE são relativamente pequenos, indicando que o modelo conseguiu uma boa representação da temperatura média simulada em torno da temperatura média observada. De maneira geral, o valor de FS é positivo, isto indica que o modelo está subestimando estes valores este fato não é verificado nos dias 05 e 07 onde o valor negativo de FS indica que o modelo superestimou as temperaturas médias o pior resultado foi percebido no dia 06 onde o desvio atingiu mais alto deste teste.

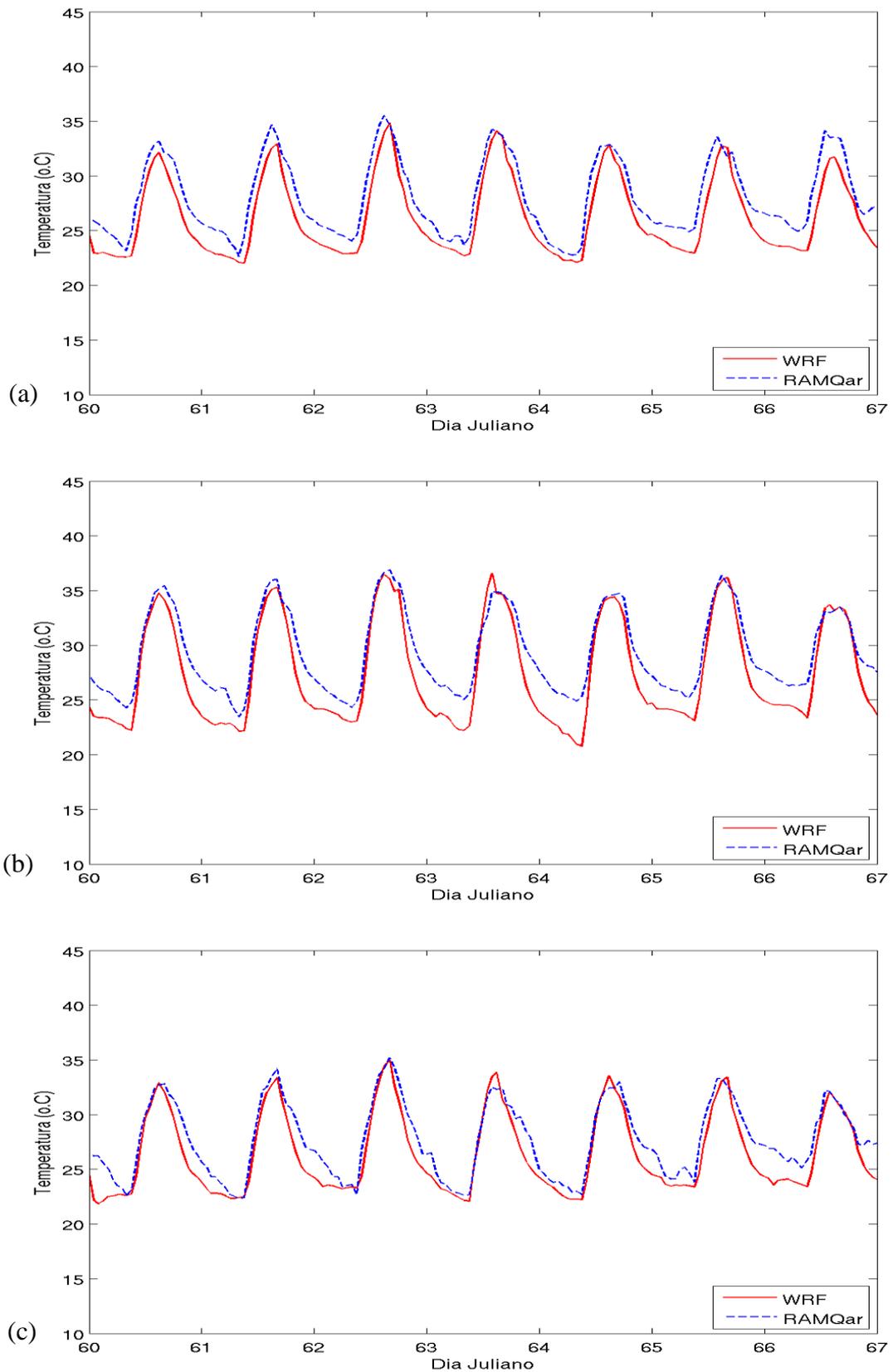


Figura 5-13 – Série temporal da temperatura a 2 m sobre as estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, Serra; (b) Vila Capixaba, Cariacica; (c) INMET/UFES, Goiabeiras-Vitória. Todas para a mesma semana do verão.

Ainda para Carapina, o erro fracional (FB), mostra que as temperaturas médias simuladas pelo modelo em todos os dias da semana são subestimadas pelo WRF. Verifica-se ainda uma forte correlação entre os resultados da simulação e os medidos, pois o valor deste teste se aproxima do valor excelente para este teste que é +1. Isto comprova que o modelo consegue representar de forma muito coerente a variação diária da temperatura a 2m nesta região. Mostrando que mesmo subestimando tais valores ele representa de forma satisfatória a ciclo diurno destes valores bem como os seus valores médios para o período do verão.

Analisando agora os dados para a RAMQar de Cariacica é possível verificar que os valores de FS também estão próximos do valor ótimo para este teste, porém com um acréscimo positivo em relação ao zero mostrando que o modelo subestima os valores da temperatura média. Os piores resultados são obtidos nos dias 04 e 07 onde o maior desvio se aproxima de 0,36. Analisando os valores de FB, percebe-se uma aproximação de zero pelo lado negativo, isto mostra que o modelo subestima as temperaturas médias comparadas às temperaturas médias observadas. Como dito para a outra RAMQar, é possível verificar uma forte correlação positiva entre os valores simulados e os observados, mostrando mais uma vez que o modelo consegue acompanhar as variações da temperatura a 2 m com boa precisão.

Analisando a Tabela 9 para a estação do INMET/UFES, nota-se que os valores do desvio padrão normalizado estão próximos do valor ótimo para este teste (FS=0), porém com um acréscimo positivo em relação ao zero mostrando que o modelo subestima os valores da temperatura. Os piores resultados são obtidos nos dias 04 e 07. O erro fracional se aproxima de zero pelo lado negativo, indicando que o modelo subestima as temperaturas médias, porém com um pequeno erro. Da mesma forma que as outras estações, o coeficiente de correlação indica uma forte correlação positiva entre os valores simulados e os observados para a temperatura a 2m sobre a estação do INMET.

Com relação ao erro quadrático médio normalizado (NMSE) observa-se que este erro está muito próximo de zero mostrando que o modelo mesmo subestimando os valores da temperatura, conseguiu uma ótima representação do comportamento da temperatura quando comparado aos valores observados para todos os dias da semana.

Como referência da magnitude dos valores encontrados para o coeficiente de correlação em estudos anteriores, é possível citar CHALLA *et al.* (2009) que os valores médios para o coeficiente de correlação da ordem de 0,985 com o esquema (YSU CLP) e 0,941 com o

esquema (MYJ CLP). Para altitudes menores que 5000m. Neste sentido os resultados encontrados no presente estudo mostram-se de acordo com o que já foi realizado, indicando uma boa representação dos resultados obtidos.

Tabela 9 – Parâmetros estatísticos aplicados aos resultados da simulação da temperatura a 2m. para o verão. FS representa o erro fracional, FB o desvio padrão fracional, NMSE o erro quadrático médio normalizado e r representa o coeficiente de correlação.

Estações	Parâmetro estatístico	Dia 01	Dia 02	Dia 03	Dia 04	Dia 05	Dia 06	Dia 07
Carapina	FB	-0,0705	-0,0764	-0,0650	-0,0494	-0,0472	-0,0665	-0,0869
	FS	0,0250	-0,0069	0,0203	0,0378	-0,0432	0,0742	-0,0508
	NMSE	0,0056	0,0065	0,0049	0,0030	0,0030	0,0056	0,0084
	r	0,9391	0,9407	0,9429	0,9436	0,9387	0,9156	0,9266
Cariacica	FB	-0,0745	-0,0748	-0,0559	-0,0652	-0,0855	-0,0590	-0,0610
	FS	0,1401	0,1494	0,0956	0,3447	0,2973	0,1710	0,3606
	NMSE	0,0067	0,0070	0,0045	0,0080	0,0095	0,0044	0,0057
	r	0,9419	0,9410	0,9438	0,9302	0,9529	0,9504	0,9449
INMET UFES	FB	-0,0601	-0,0473	-0,0464	-0,0291	-0,0295	-0,0524	-0,0604
	FS	0,1254	-0,0277	0,0170	0,0795	0,0726	0,0580	0,3440
	NMSE	0,0058	0,0032	0,0034	0,0026	0,0016	0,0037	0,0053
	r	0,9030	0,9345	0,9299	0,9133	0,9413	0,9262	0,9213

A Figura 5-14 representa a distribuição dos valores simulados e medidos para a temperatura a 2 m do solo sobre as estações meteorológicas de superfície. Os melhores resultados são os dados sobre a reta principal, onde os pontos sobre esta reta indicam que o modelo conseguiu prever exatamente o valor medido para esta propriedade sobre a estação observada. Os pontos abaixo desta reta representam os dados subestimados pelo modelo e os pontos acima os dados superestimados.

Observa-se que para todas as figuras, a grande maioria dos pontos está abaixo desta reta principal. Isto indica que os dados simulados pelo modelo realmente estão sendo subestimados. Esta figura vem corroborar com a análise feita anteriormente, mostrando que apesar do modelo subestimar os valores da temperatura a 2 m ele conseguiu representá-la de forma satisfatória, pois a distribuição dos valores encontra-se coesa. Os valores simulados estão em sua maioria próximos um do outro, mostrando que houve pouca variação entre os dados simulados e principalmente os dados encontram-se próximos à reta principal.

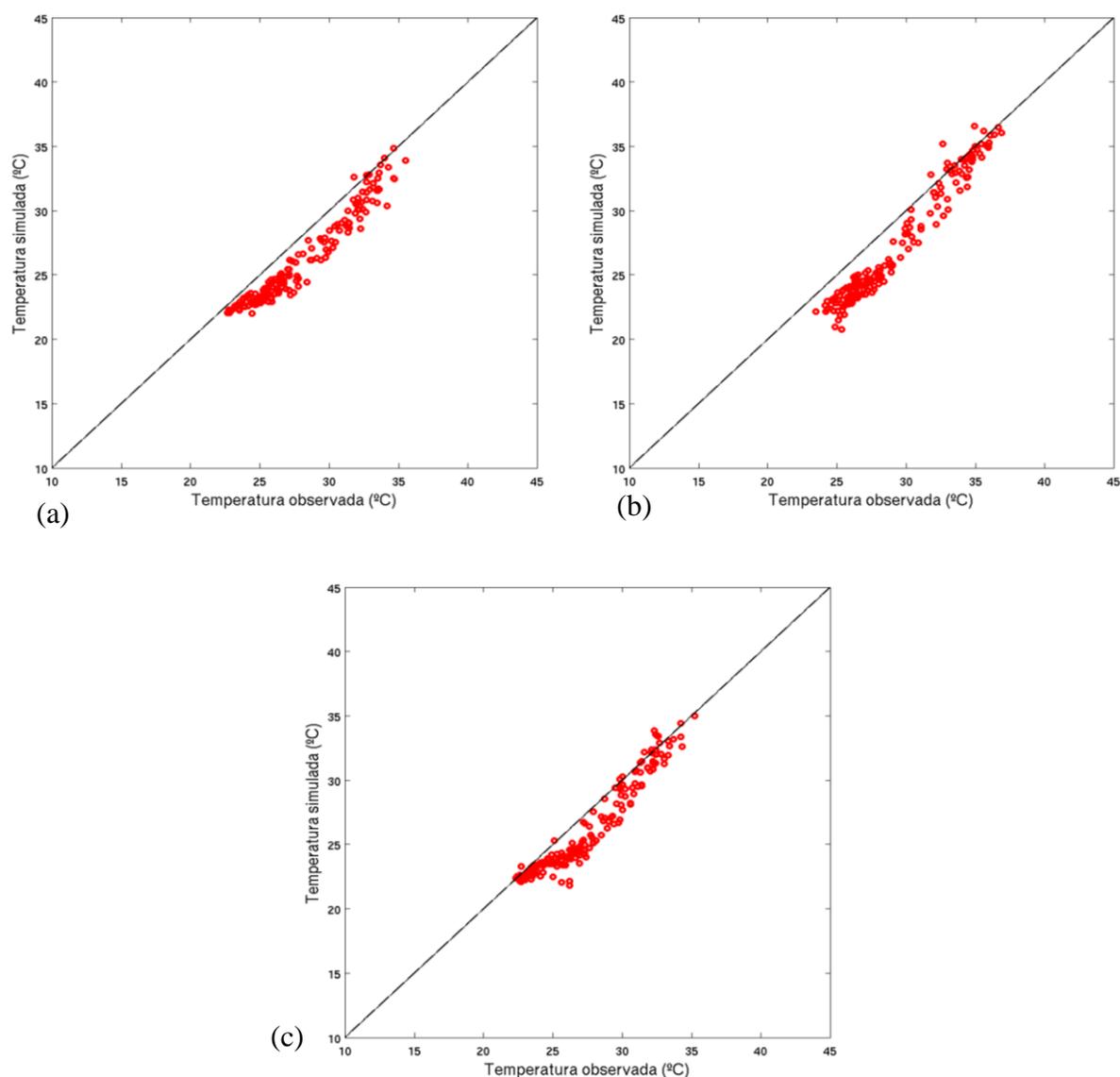


Figura 5-14 – Dispersão dos valores observados e simulados da temperatura a 2m do solo nas estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, (b) Cariacica e (c) INMET/UFES para os dias de 01 a 07 de março de 2009.

A Figura 5-15 representa a comparação entre os valores simulados e observados das velocidades do vento zonal (u) e do vento meridional (v) a 10m de altura em relação ao solo, sobre as estações meteorológicas de superfície RAMQar localizadas em Carapina na Serra, Enseada do Suá em Vitória, Vila Capixaba em Cariacica e Goiabeira em Vitória. O vento zonal é representado pela componente do vento na direção Leste ou Oeste, ou seja, representa o vento que vem do oceano para o continente ou vice-versa. Já o vento meridional representa a componente do vento que vem da direção Norte para o Sul ou vice-versa. Neste estudo, foi adotado o referencial de forma que os ventos positivos se deslocam do continente para o

oceano (direção meteorológica Oeste), desta forma os ventos negativos se deslocam em do oceano (direção meteorológica Leste) para o continente quando falamos do vento zonal. Para o vento meridional quando seu deslocamento é da direção Norte para Sul seus valores são negativos e positivos no sentido contrário.

Observando-se a Figura 5-13a é possível verificar que o modelo conseguiu seguir de forma satisfatória a sazonalidade dos dados observados pela estação tanto para o vento zonal quanto para o vento meridional. Verifica-se que os valores máximos do vento zonal foram superestimados e os valores mínimos subestimados para todos os dias da simulação. Este fato não é verificado para a velocidade meridional onde apenas no dias 03 e 04 o modelo superestimou esta velocidade, em todos os outros dias ela foi subestimada. O maior valor simulado foi de aproximadamente 2,5 m/s enquanto o medido foi de aproximadamente 1m/s. para o vento na direção Leste. Já os ventos vindos do oceano, direção Oeste, o maior valor simulado foi aproximadamente 6 m/s e o medido 3,5 m/s. Para o vento meridional na direção Oeste, as maiores velocidades encontradas foram 2,5 m/s aproximadamente tanto para a simulação quanto para a medição, porém estes valores foram encontrados em dias diferentes.

O comportamento do modelo foi o mesmo em todas as outras estações. Para o vento zonal, o modelo superestima os valores do vento na direção Oeste e subestima os valores na direção Leste. Para o vento meridional, o modelo segue subestimado os seus valores em ambas as direções, salvo algumas exceções onde em um ou dois dias isolados o modelo superestima os valores do vento proveniente do Norte. Uma observação faz-se necessária com relação a Figura 5-15c. Observa-se que para os valores do vento meridional (v), a estação mostra que praticamente não há mudança em sua direção durante todos os dias da semana. Este fato deve ser investigado com mais cautela, pois quando foi discutido o campo de vento sobre a RMGV na seção 5.1.1, Figuras 5(2-7)b, Figura 5-9b e Figura 5-12 (a-f) em todas as figuras percebe-se claramente várias mudanças na direção do vento. Isto pode indicar problema de funcionamento nesta estação.

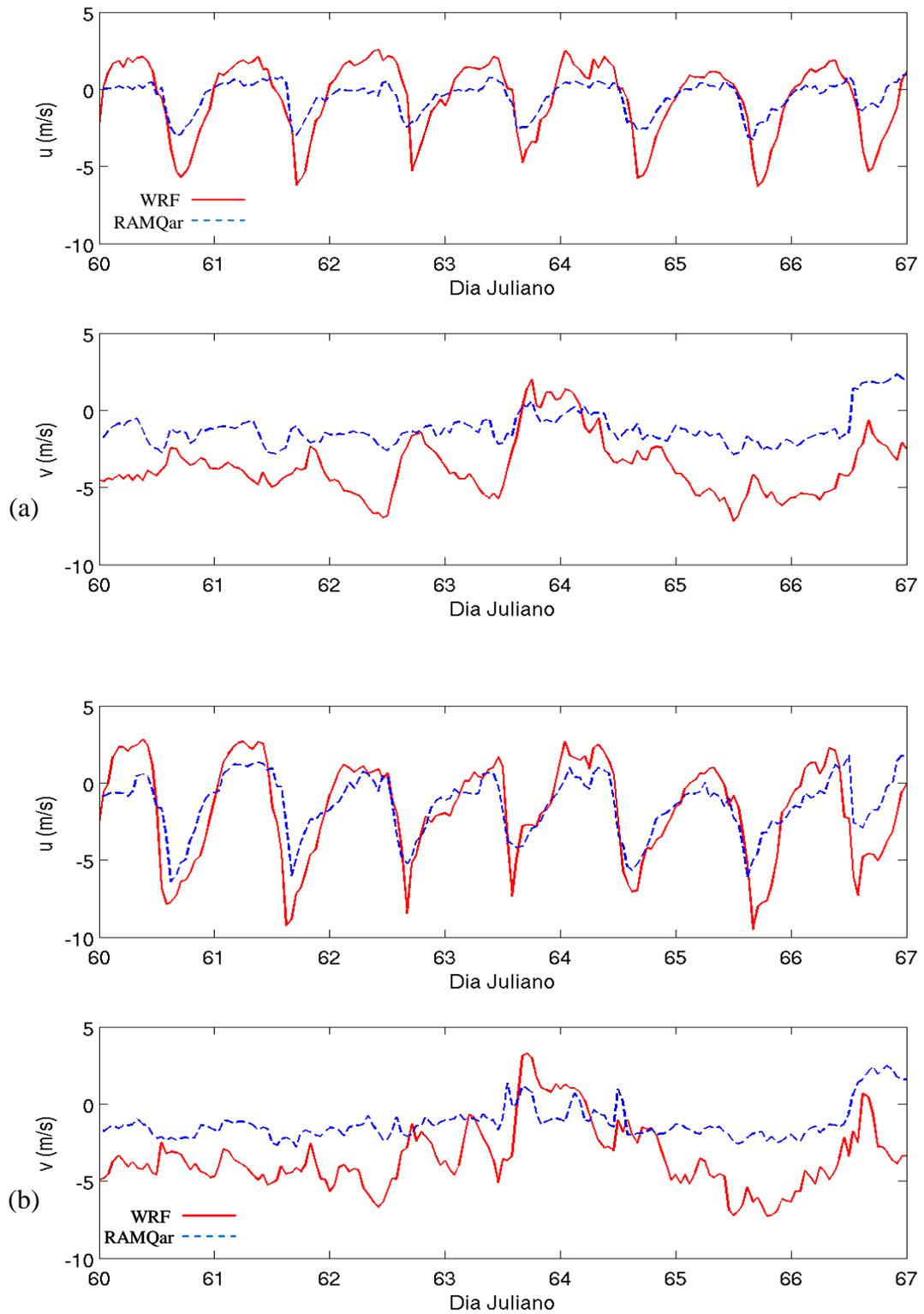


Figura 5-15 – Comparação entre as velocidades do vento zonal (u) e meridional (v) simulados e observados sobre as estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Cariacica e (d) INMET/UFES para os de 01 a 07 de março de 2009.

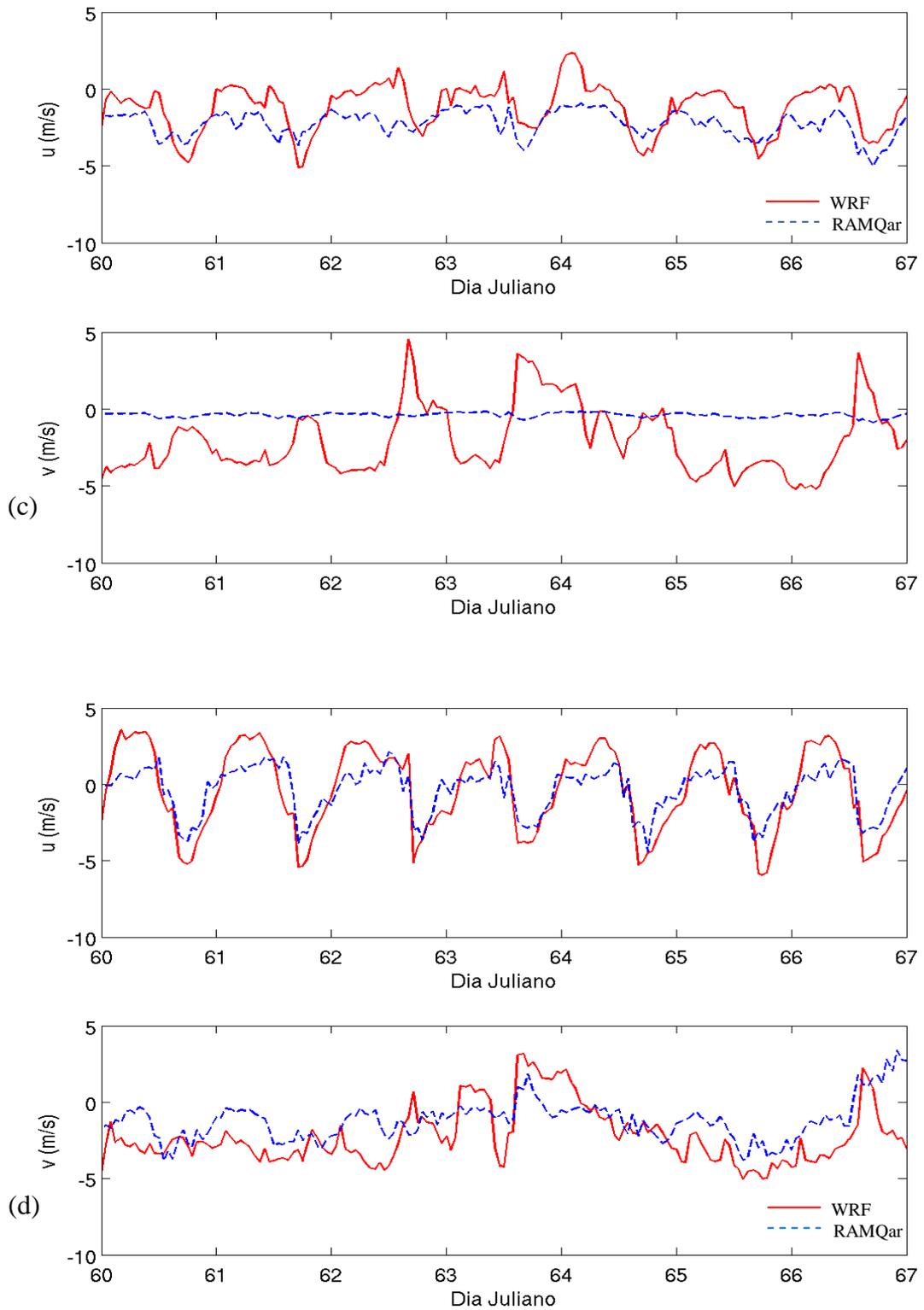


Figura 5-15 – Continuação.

É necessário lembrar que em alguns dos casos não foi possível aplicar todos os parâmetros estatísticos. Este fato é devido ao uso de vetores para a velocidade do vento o que em alguns

casos pode provocar valores da média igual a zero, impedindo a aplicação dos testes.

A Tabela 10 apresenta o desvio padrão fracional (FB), erro fracional (FS), o erro quadrático médio normalizado (NMSE) e o coeficiente de correlação (r) para os resultados da simulação para a velocidade do vento zonal a 10m realizada pelo WRF comparados aos das estações RAMQar Carapina, Enseada do Suá, Cariacica e a estação do INMET/UFES. Já a Tabela 11 apresenta os mesmos parâmetros sobre as mesmas estações, porém para a velocidade do vento meridional.

Tabela 10 – Parâmetros estatísticos aplicados aos resultados da simulação da velocidade do vento zonal a 10 m para o verão. . FS representa o erro fracional, FB o desvio padrão fracional , NMSE o erro quadrático médio normalizado e r representa o coeficiente de correlação.

Estações	Parâmetro estatístico	Dia 01 domingo	Dia 02 segunda	Dia 03 terça	Dia 04 quarta	Dia 05 quinta	Dia 06 sexta	Dia 07 sábado
Carapina	FB	-0,3100	-0,7999	4,7688	0,4081	0,1299	-0,3855	-1,2185
	FS	-0,8154	-0,7343	-0,9341	-0,6879	-0,7760	-0,7208	-1,0644
	r	0,8745	0,8396	0,7202	0,8903	0,8895	0,8104	0,6277
Enseada do Suá	FB	-0,0992	-0,6886	0,1995	0,1563	0,1836	-0,1552	-0,7779
	FS	-0,6276	-0,5823	-0,3028	-0,3320	-0,4042	-0,6940	-0,0604
	NMSE	1,5110	3,9740	0,7036	0,7021	0,7273	0,8866	4,7896
	r	0,8153	0,8741	0,8671	0,7989	0,9313	0,7805	0,4678
Cariacica	FB	0,2129	0,4695	1,0927	0,8241	0,5924	0,4632	0,7781
	FS	-0,6542	-0,8779	-0,8360	-0,1023	-0,9939	-0,6622	-0,2203
	NMSE	0,3672	0,8733	2,8712	1,3173	1,5881	0,5371	0,8813
	r	0,5320	0,4618	0,0826	0,5530	0,8895	0,5747	0,7850
INMET UFES	FS	-0,6242	-0,5144	-0,4165	-0,5077	-0,5623	-0,5671	-0,5262
	r	0,8186	0,8228	0,8226	0,8263	0,8502	0,7936	0,7917

Analisando a Tabela 10, percebe-se que para a estação de Carapina os valores de FB para o meio da semana (dias 03, 04, e 05) são positivos, indicando que as velocidades médias previstas pelo modelo estão acima da média observada na estação, para os outros dias da semana o modelo subestimou tais médias. Este fato se repetiu na estação da Enseada do Suá. Em Cariacica todos os valores de FB são positivos, mostrando que nesta estação o modelo prevê a média desta propriedade sempre acima da medida na estação. Para a estação do INMET não foi possível realizar esta comparação. Verifica-se uma variação para os valores do NMSE, porém seus valores estão relativamente próximos de zero, valor esperado para este teste. Isto indica que o modelo conseguiu representar de forma satisfatória a velocidade do vento zonal nas estações

De acordo com o coeficiente de correlação (r), em todas as estações é possível encontrar uma boa correlação entre os resultados simulados e os medidos. Isto mostra que mesmo subestimando ou superestimando a velocidade do vento nas estações. O modelo WRF conseguiu prever de forma satisfatória os valores da velocidade do vento zonal. Novamente podemos comparar estes resultados com o trabalho supra-citado (CHALLA *et al.* 2009) onde foi verificado que os valores encontrados para r mostram-se pouco abaixo dos padrões encontrados pelo autor.

Analisando a Tabela 11, percebe-se que para as estações de Carapina, Enseada do Suá e Cariacica os valores de FB são negativos, indicando que as velocidades preditas pelo modelo estão abaixo da média do valor da velocidade observada na estação. Para a estação do INMET/UFES este fato não pode ser verificado, pois este parâmetro estatístico deixou de ser realizado com os dados desta estação.

Tabela 11 – Parâmetros estatísticos aplicados aos resultados da simulação da velocidade do vento meridional a 10 m. Para o verão. Onde FS representa o erro fracional, FB o desvio padrão fracional e NMSE o erro quadrático médio normalizado.

Estações	Parâmetro estatístico	Dia 01 domingo	Dia 02 segunda	Dia 03 terça	Dia 04 quarta	Dia 05 quinta	Dia 06 sexta	Dia 07 sábado
Carapina	FB	-0,8763	-0,8341	-0,9044	-0,9776	-0,6266	-0,9482	-1,7782
	FS	-0,0635	-0,0901	-1,2547	-1,1675	-0,7433	-0,4019	0,1021
	r	-0,0986	0,2096	0,6378	0,6603	0,7690	0,6563	0,8732
Enseada do Suá	FB	-0,7718	-0,8168	-0,9215	-0,7669	-0,3153	-0,9802	-1,7837
	FS	-0,4119	-0,3131	-1,1301	-1,0533	-0,6032	-0,9965	-0,0149
	NMSE	0,8091	0,8582	1,4304	8,0634	1,4012	1,3417	17,8967
	r	-0,3891	0,3960	0,0921	0,4077	0,4754	0,6898	0,7080
Cariacica	FB	-1,4938	-1,4761	-1,2939	-0,6935	-0,7981	-1,5869	-1,3194
	FS	-1,5701	-1,6291	-1,8726	-1,7710	-1,6475	-1,3048	-1,7265
	NMSE	6,1415	6,0069	13,6182	31,7742	7,2881	7,0094	9,1150
	r	-0,5006	-0,3732	-0,4099	-0,6307	-0,3389	-0,0657	-0,7206
INMET UFES	FS	0,4724	0,4087	-0,6984	-0,9808	-0,5394	0,1596	0,1345
	r	0,0497	0,3892	-0,1191	0,6276	0,5535	0,7233	0,5919

O parâmetro estatístico FS, pode ser calculado em todas as estações e dá uma noção do que está acontecendo com a velocidade média do vento meridional nos pontos onde estão localizadas essas estações. Em Carapina somente no sábado este parâmetro deu um valor positivo, na estação da Enseada do Suá e em Cariacica todos os dias foram encontrados valores negativos para FS. E na estação do INMET/UFES, os valores negativos foram encontrados somente no meio da semana. Como o valor esperado para este teste é zero,

percebe-se então que em quase todas as estações o valor médio da velocidade do vento meridional predito pelo modelo está abaixo do valor médio medido pelas estações. Com exceção da estação do INMET/UFES onde em alguns dias o modelo superestimou a velocidade média do vento meridional.

Para a estação da Enseada do Suá, verifica-se que os valores do NMSE estão relativamente próximos de zero, valor esperado para este teste. A exceção fica com a terça-feira e o sábado onde este parâmetro atingiu valores altos. Isto indica que o modelo conseguiu representar de forma satisfatória a velocidade do vento meridional para esta estação em quase todos os dias da semana. Já o coeficiente de correlação (r), indica que em todas as estações existe uma fraca correlação entre os resultados simulados e os medidos. O valor esperado para este teste era de +1. Estatisticamente falando, para uma boa correlação entre os resultados espera-se valores de r maiores do que 0,8. De modo geral, o modelo WRF consegue prever de forma pouco satisfatória os valores da velocidade do vento zonal.

A Figura 5-16 representa a dispersão dos valores da velocidade do vento zonal, simulados e observados em torno da reta principal. Observa-se uma divisão entre os dados superestimados e subestimados pelo modelo. Na Figura 5-16a observa-se que há uma tendência do modelo a superestimar os valores positivos da velocidade do vento e subestimar os valores negativos. Isto também pode ser observado na Figura 5-16b e 5-16d. Já para a estação de Cariacica observa-se que o modelo superestima a grande maioria dos dados da velocidade do vento.

Verifica-se a partir da Figura 5-16(e-h) que representa a dispersão dos valores da velocidade do vento meridional simulada e observada em relação à reta principal. Percebe-se que em todas as estações o modelo subestimou de forma acentuada a velocidade do vento meridional em todas as estações meteorológicas.

De forma geral, o modelo superestima a maioria dos valores da velocidade do vento que se deslocam do continente em direção ao oceano e subestima no sentido contrário. Para os ventos provenientes do Norte, o modelo também superestima os seus valores e subestima os ventos vindos da região Sul.

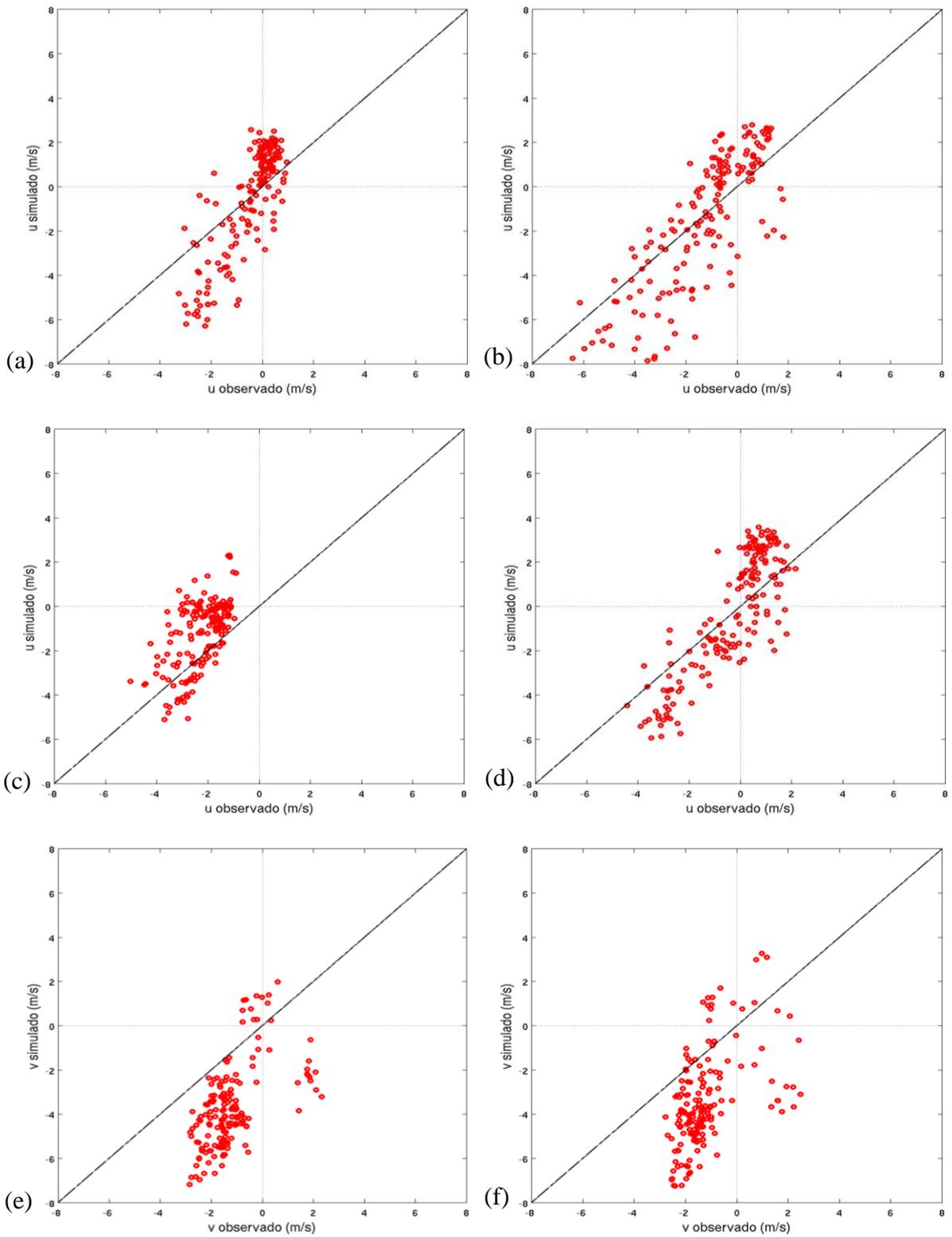


Figura 5-16 – Dispersão dos valores observados e simulados para a velocidade do vento zonal a 10 m nas estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Cariacica e (d) INMET/UFES e para o vento meridional (e) Carapina, (f) Enseada do Suá, (g) Cariacica e (h) INMET/UFES todos para os de 01 a 07 de março de 2009.

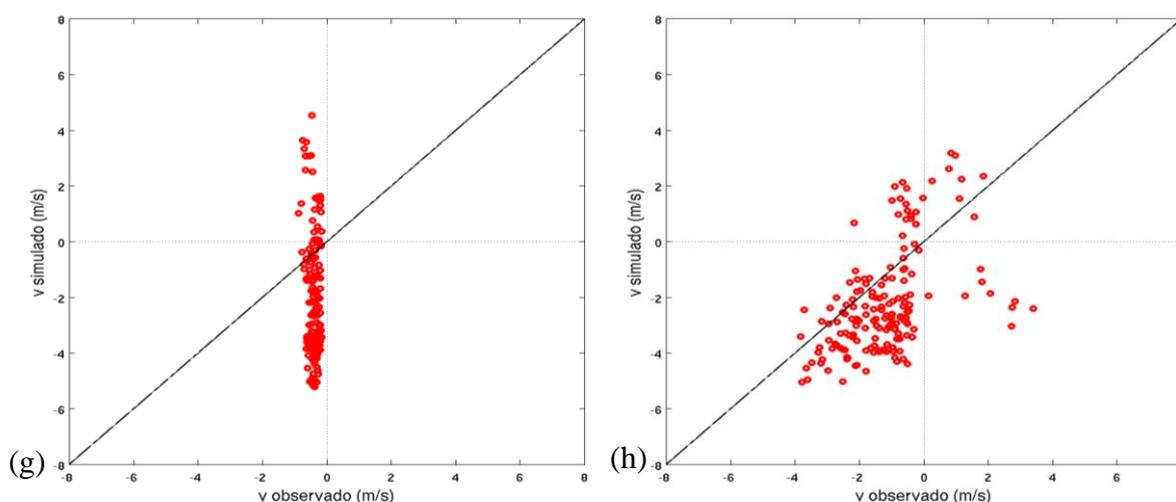


Figura 5-16 – Continuação.

5.2. CASO 2: INVERNO

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos na simulação realizada para o período de inverno. Para estes resultados foram aplicados os testes estatísticos conforme já explicado no Capítulo 3 deste estudo. Alguns destes testes não foram aplicados à velocidade, pois em vários momentos os cálculos de sua média para um determinado período foram iguais a zero e em alguns testes isso causa inconsistência em seus resultados. Conforme citado anteriormente, o período foi escolhido de forma aleatória, porém era necessário que a semana em questão representasse de forma satisfatória uma semana típica de inverno na região de estudo. Portanto deveria ocorrer uma baixa intensidade de radiação solar provocando baixas temperaturas durante todos os dias, ação de ventos vindos da região Sul do Brasil, alto índice de umidade relativa e chuvas ocasionais. De acordo com esta necessidade de representação, a semana escolhida para este período foi de 20 a 26 de julho de 2008.

Para a comparação dos resultados das simulações com o WRF, foram utilizados dados experimentais das estações meteorológicas de superfície (RAMQar). A estação meteorológica do INMET ainda não estava em funcionamento e os dados das radiossondagens não estavam disponíveis.

5.2.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A Figura 5-17 representa a série temporal para altura da Camada Limite Planetária em cada um dos domínios de simulação. Verifica-se uma grande diferença entre os valores simulados para os três domínios de simulação do WRF. No último dia de simulação são encontrados os piores resultados das simulações, pois a diferença entre a altura da CLP simulada chega a mais de 300 m entre os domínios d02 e d03 e mais de 400m entre dos domínios d01 e d03. Também espera-se o melhor resultado para esta simulação no domínio d03 onde a malha utilizada possui maior resolução, cerca de 15 vezes maior do que no domínio principal (d01). Neste domínio, a maior altura encontrada no período foi de cerca de 1600 metros entre os dias julianos 203 e 204 (21 de julho de 2008) e o seu menor resultado em torno de 900 metros entre os dias julianos 207 e 208 (25 de julho de 2008).

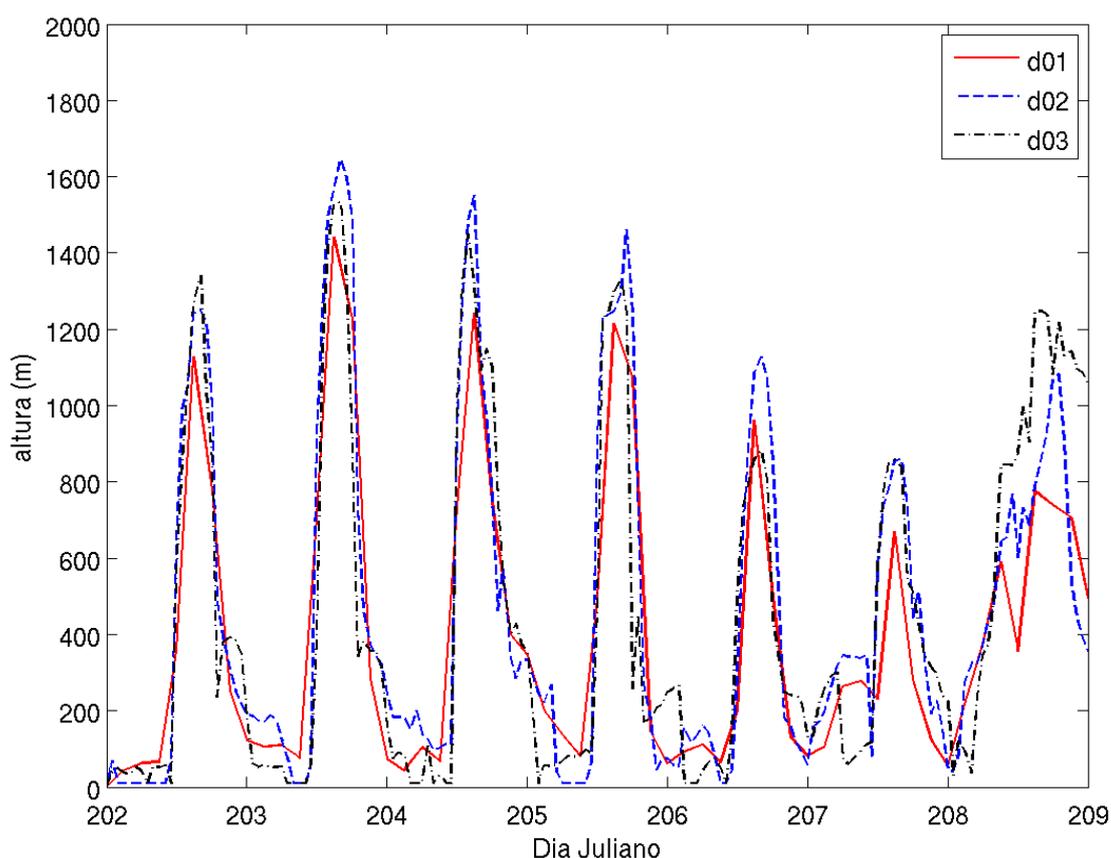


Figura 5-17 – Série temporal para a altura da Camada Limite Planetária para os 3 domínios de simulação entre os dias 20 e 26 de julho de 2008, sobre o ponto central do domínio principal d01.

As Figuras 5-18 a 5-23 representam respectivamente a altura da CLP (a) e o campo de vento sobre a RMGV (b), a Figura 5-24 representa o perfil vertical da temperatura potencial e a Figura 5-25 mostra o perfil vertical da velocidade do vento e de sua direção. Todos os dados aqui discutidos são referentes ao dia 21 de julho de 2008 (segunda-feira) e para horários diferentes. Como no caso do verão, as figuras aqui citadas serão discutidas somente para o domínio (d03), que abrange apenas a Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV). Os horários escolhidos são os mesmos utilizados no caso 1 para facilitar a comparação entre as duas estações do ano. São eles 1 hora, 5 horas, 9 horas, 13 horas, 17 horas e 21 horas (hora local).

A escolha deste dia também foi devido ao fato de que neste dia específico foi encontrada pelo modelo a maior altura da CLP. O intervalo de tempo de 4 h entre os horários é o mesmo utilizado no caso 1, novamente para facilitar a comparação entre os resultados das diferentes estações do ano. O ponto escolhido para esta representação foi o mesmo local onde são realizadas as radiossondagens no período do verão.

É possível verificar na Figura 5-18a que no horário de 1h não é percebido aumento significativo na altura da CLP, mostrando que a CLN ainda está em processo de desacoplamento. Neste momento a altura máxima da CLP está em torno de 400 m. Na Figura 5-18b, observa-se que os ventos sobre a região propagam-se predominantemente na direção Sul. Seus valores médios estão variando entre 3 m/s e 6m/s, porém percebe-se em um ponto específico que sua velocidade máxima chega a 7 m/s. Observa-se na Figura 5-19b que representa o horário de 5h, ocorre uma variação na velocidade do vento onde agora predominam ventos com velocidade entre 3m/s e 6 m/s. Percebe-se na Figura 5-19a um aumento significativo na altura da CLP principalmente próximo à reserva de Duas Bocas (Cariacica) e ao Mestre Álvaro (Serra)

Para o horário das 9h (Figura 5-20a) nota-se que a altura da CLP já está em torno de 1200m em algumas regiões. Os ventos mostram-se com baixa intensidade, entre zero e 3m/s com direção predominante Sul (Figura 5-20b). Ao observar a Figura 5-20a nota-se que a CLP já atinge o seu valor máximo em alguns pontos da região. O horário onde foi encontrada a maior altura da CLP foi às 14h20min aproximadamente. Observa-se uma grande mudança no comportamento do vento (Figura 5-21b) onde neste horário (13h) os ventos estão fortes e com direção predominantemente Nordeste. Neste momento o vento tem velocidade média entre 3m/s e 6m/s e quase não estão sendo influenciados pela topografia da região.

A partir das 17 h (Figura 5-22a) nota-se uma diminuição drástica da altura da CLP, ficando sempre menor que 600m. Isso vem a confirmar o fato de que aproximadamente neste horário dá-se início ao desacoplamento da CLP para a formação da CLN (STULL, 1988). A velocidade do vento permanece forte na maior parte da região, atingindo a velocidade máxima de 7m/s, porém sua velocidade média continua entre 3m/s e 6m/s. Não percebe-se mudança em sua direção de propagação (Figura 5-22b). Na Figura 5-23a observa-se que no horário noturno a CLN chega a atingir 600m de altura. Na região costeira verifica-se claramente a influência da topografia sobre o comportamento do vento (Figura 5-23b).

A velocidade máxima do vento neste momento é de 6m/s sobre o oceano e em alguns pontos da região onde o relevo montanhoso acelera o vento nesta região. A cadeia de montanhas existente na região altera o padrão de escoamento em suas redondezas acelerando-o sobre as montanhas. Isto altera também o padrão da dispersão dos poluentes atmosféricos, já que estes também são influenciados pela topografia da região (LEE *et al.*, 2008).

A Figura 5-24 representa o perfil vertical da temperatura potencial sobre o ponto de monitoramento em diferentes horários de simulação. Percebe-se que para alturas acima dos 1000m não ocorrem desvios significativos. Porém para baixas alturas percebe-se uma grande variação principalmente próxima à superfície, onde a temperatura máxima ficou em torno de 297K (algo em torno de 24°C) para o horário de 13h e a temperatura mínima foi atingida no período da madrugada deste dia (5h). Seu valor mínimo foi da ordem de 287K (aproximadamente 14°C). Nota-se que nos horários de 1h, 5h, 21h o perfil da temperatura apresenta-se semelhante nestes horários, indicando condições de estratificação estável. Apenas pequenas diferenças são percebidas principalmente próximo ao solo.

Para o horário de 9h a atmosfera encontrava-se instável próxima a superfície, passando para estável por volta dos 100m de altura comportando-se desta forma até a altura máxima simulada. Já no período de 13h, próximo à superfície nota-se um comportamento instável da atmosfera, porém para alturas entre 100m e 1000m o perfil vertical da temperatura potencial indica que para este intervalo a atmosfera tem o comportamento neutro e que para alturas acima de 1000m ela se comporta de forma estável como em todos os outros horários. Isto mostra que o gradiente da temperatura é menor que zero até aproximadamente 100m, permanece próximo de zero até por volta de 1000m e assume um valor positivo a partir desta altura.

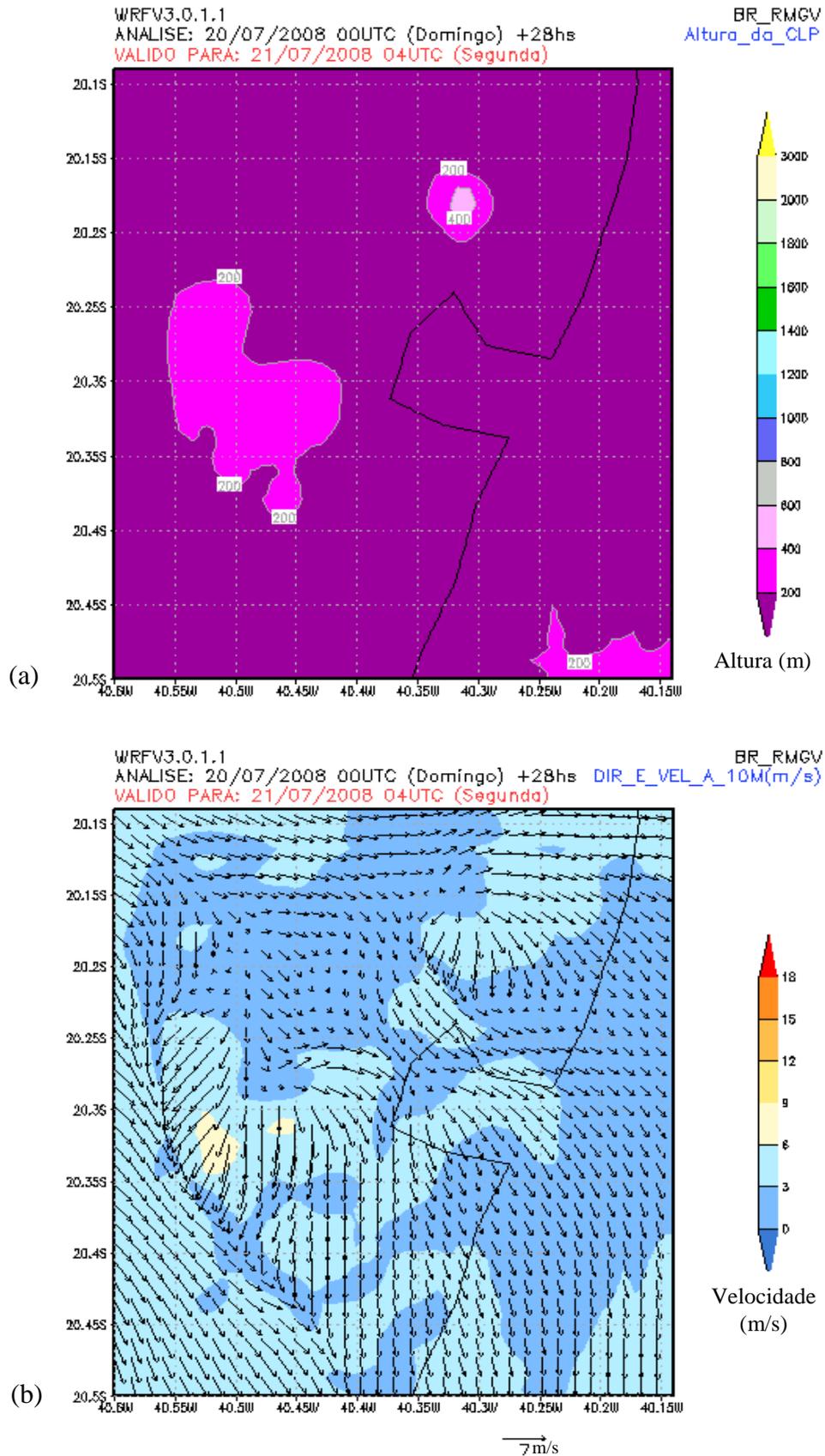


Figura 5-18 – Altura da CLP sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (a) e (b) Campo de vento para a quinta-feira às 1h local ou 4 UTC, simulados pelo WRF (dia 20 de julho de 2008).

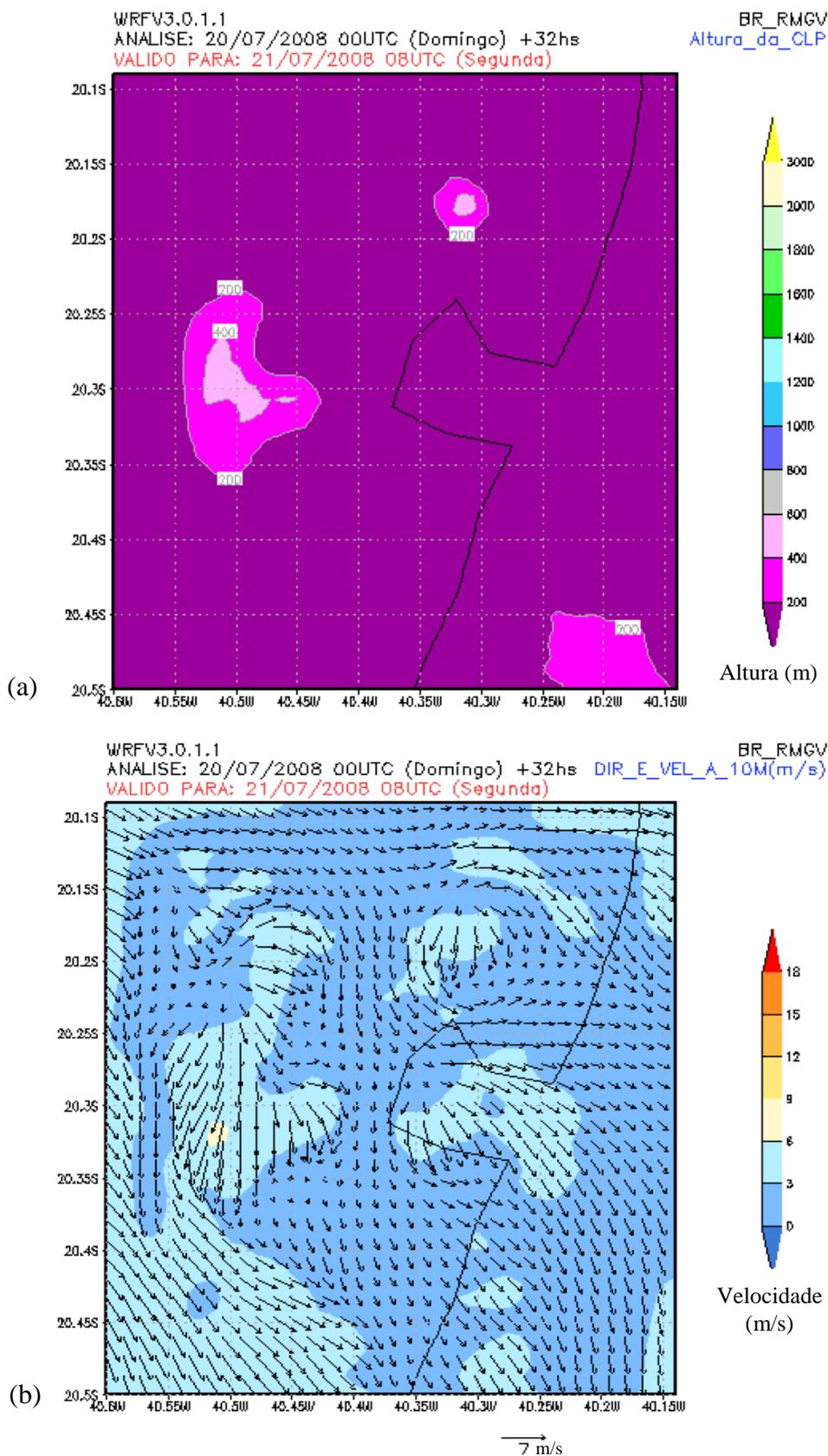


Figura 5-19 – Altura da CLP sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (a) e (b) Campo de vento para a quinta-feira às 5h local ou 8 UTC, simulados pelo WRF (dia 20 de julho de 2008).

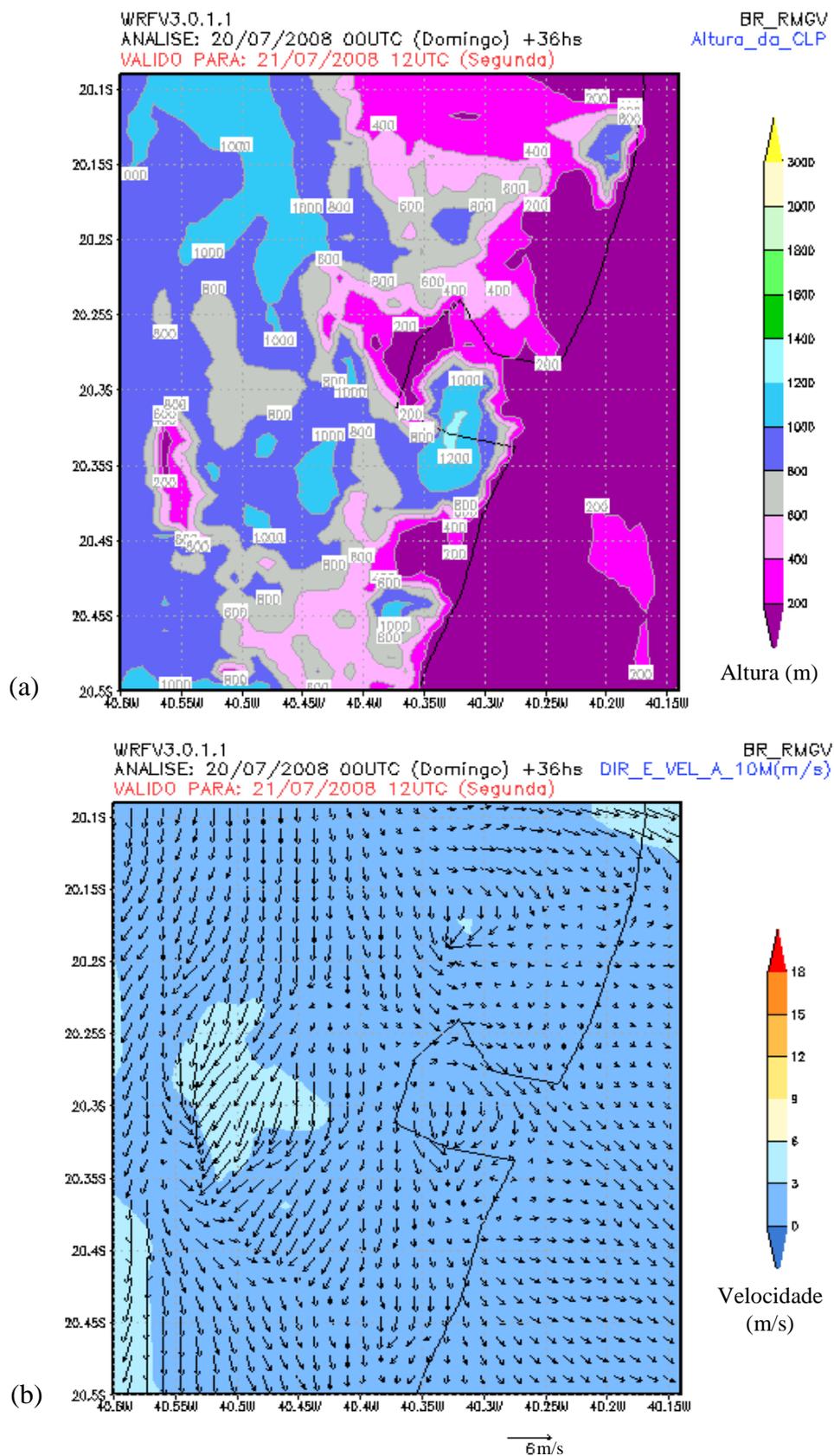


Figura 5-20 – Altura da CLP sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (a) e (b) Campo de vento para a quinta-feira às 9h local ou 12 UTC, simulados pelo WRF (dia 20 de julho de 2008).

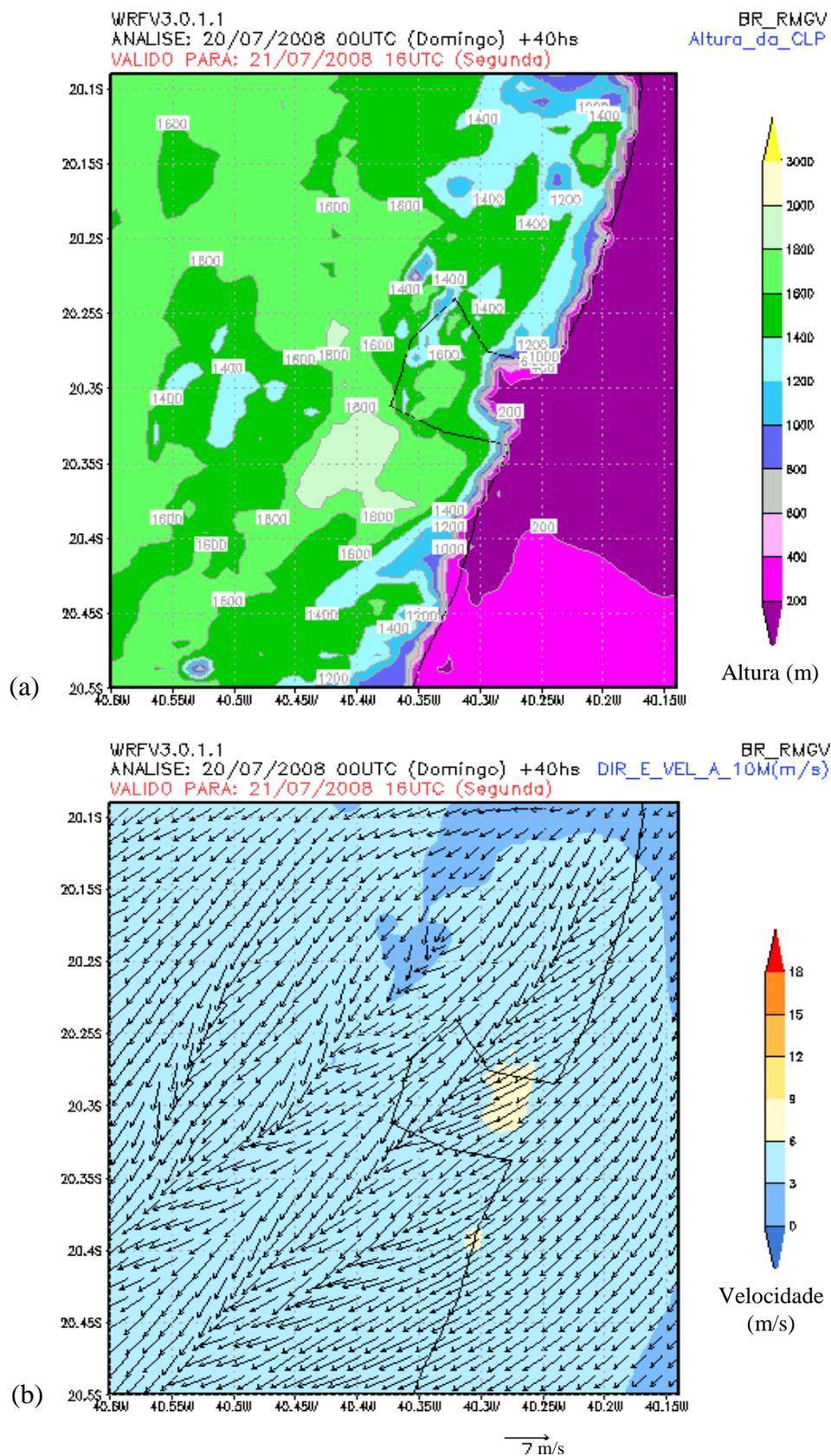


Figura 5-21 – Altura da CLP sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (a) e (b) Campo de vento para a quinta-feira às 13h local ou 16 UTC, simulados pelo WRF (dia 20 de julho de 2008).

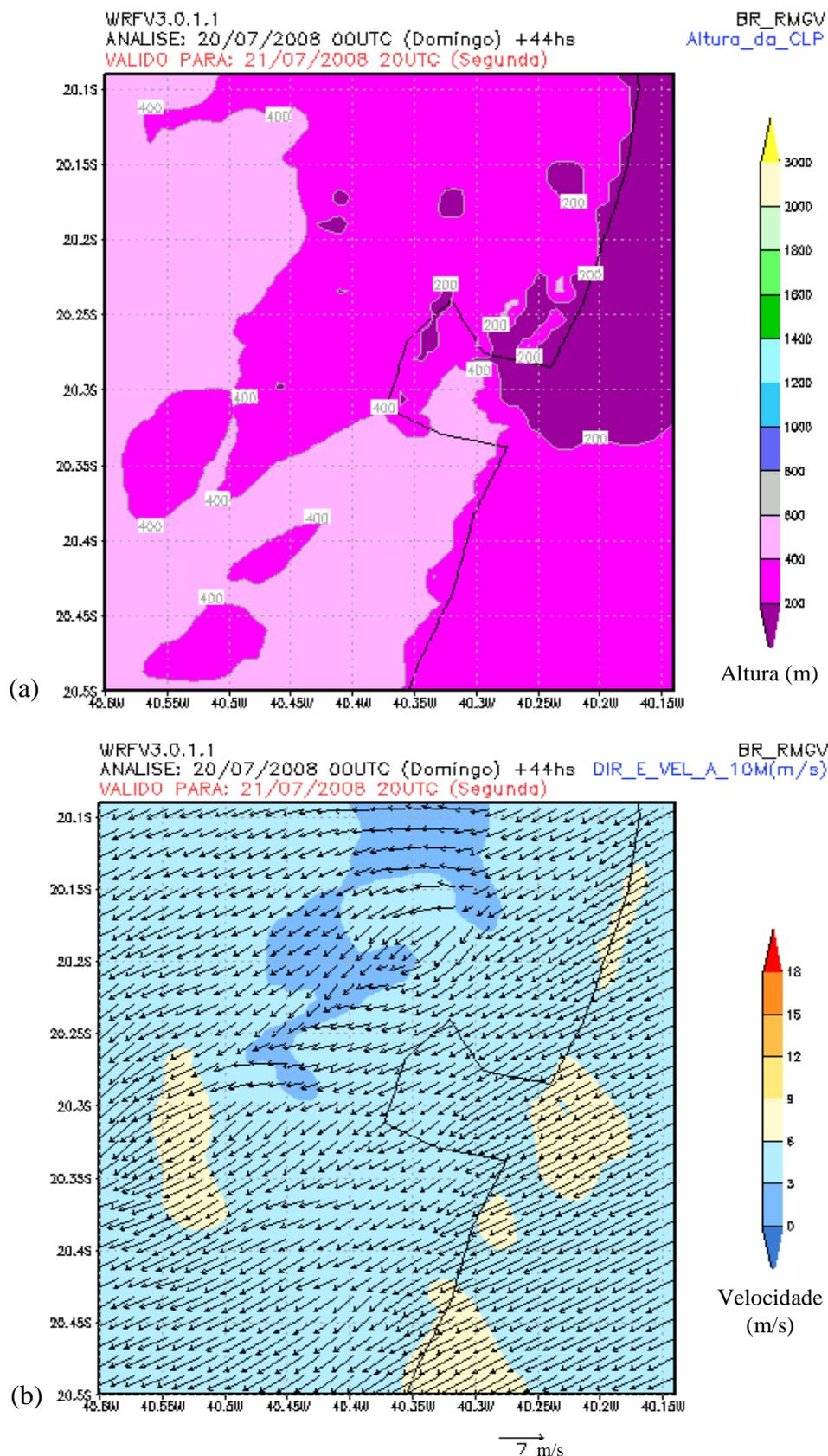


Figura 5-22 – Altura da CLP sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (a) e (b) Campo de vento para a quinta-feira às 17h local ou 20 UTC, simulados pelo WRF (dia 20 de julho de 2008).

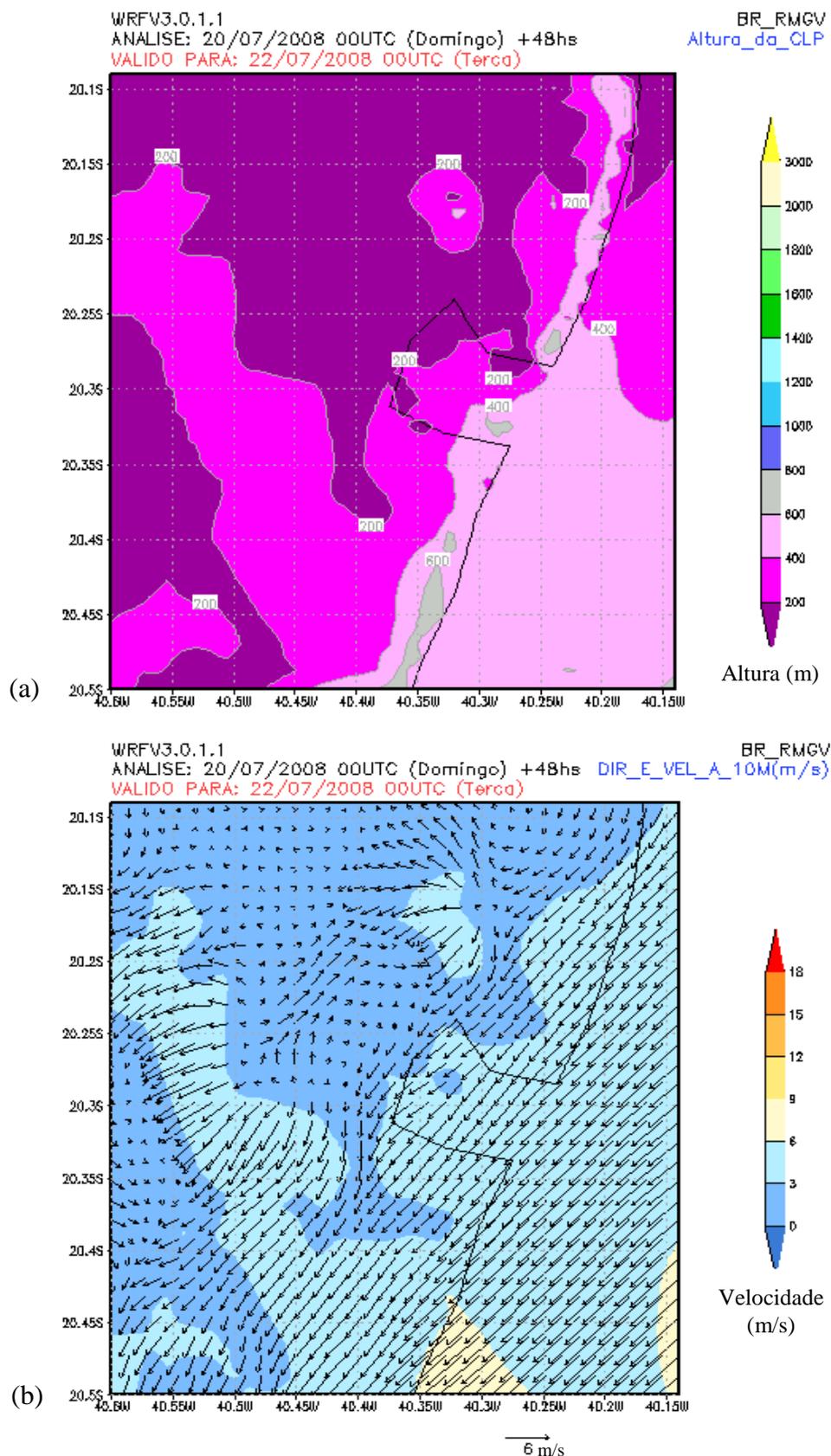


Figura 5-23 – Altura da CLP sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (a) e (b) Campo de vento para a quinta-feira às 21h local ou 00 UTC, simulados pelo WRF (dia 20 de julho de 2008).

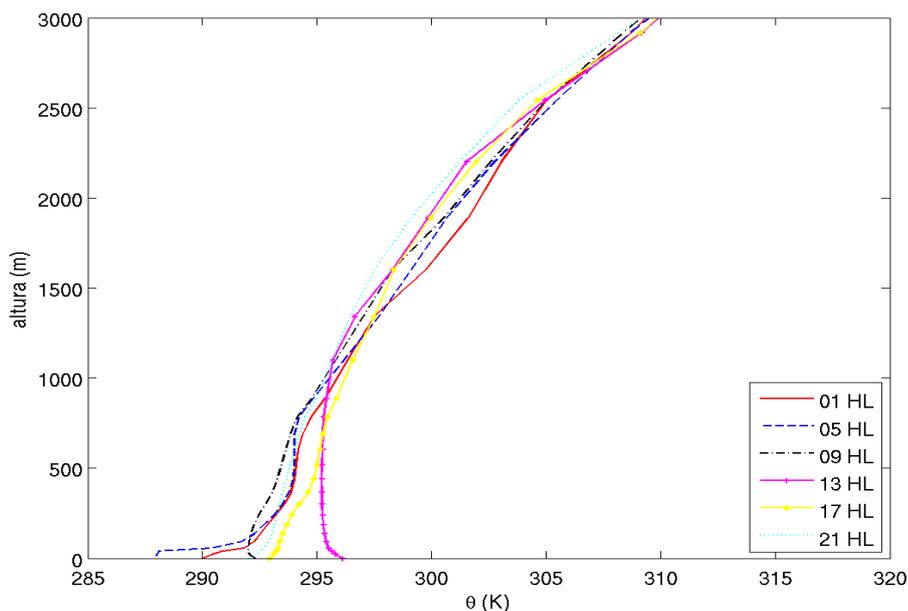


Figura 5-24 – Perfil vertical da temperatura potencial medida em Kelvin, até 3000m de altura para a segunda-feira. Simulado pelo WRF sobre o ponto de monitoramento (dia 21 de julho de 2008).

A Figura 5-25 mostra os perfis verticais da velocidade do vento e da direção do vento em função da altura. Para os horários de simulação já destacados. Da mesma forma que já observado para a temperatura potencial, para o perfil vertical da velocidade do vento (Figura 5-25a) é percebida uma grande variação da velocidade em baixas alturas. Acima dos 1000m de altura a velocidade tem um comportamento semelhante independente do horário simulado.

Para alturas abaixo de 500m nota-se uma grande variação da velocidade do vento. Onde a maior diferença entre elas aparece entre os períodos matutino (9h) e o vespertino (17h), esta diferença está na ordem de 6m/s à aproximadamente 250m do solo. A velocidade para o horário das 13h é a que sofre menor variação do seu valor com relação a altura, seu perfil segue quase sem inclinação até por volta dos 2000m, este comportamento não foi observado em nenhum outro horário simulado. A partir da Figura 5-25b nota-se que para altitudes abaixo de 500m a variação da direção do vento é pequena, não passando de 30°. De 500m a 1000m em todos os horários simulados o WRF mostra que a direção do vento é praticamente a mesma em todos os horários. Somente a partir de 1100m observa-se uma alteração em sua direção. Para o horário de 1h verifica-se que este desvio do vento é da ordem de 100°, o maior observado neste período. Novamente o modelo prediz que a direção do vento é a mesma para todos os horários simulados, quando a altura atinge aproximadamente 2900m.

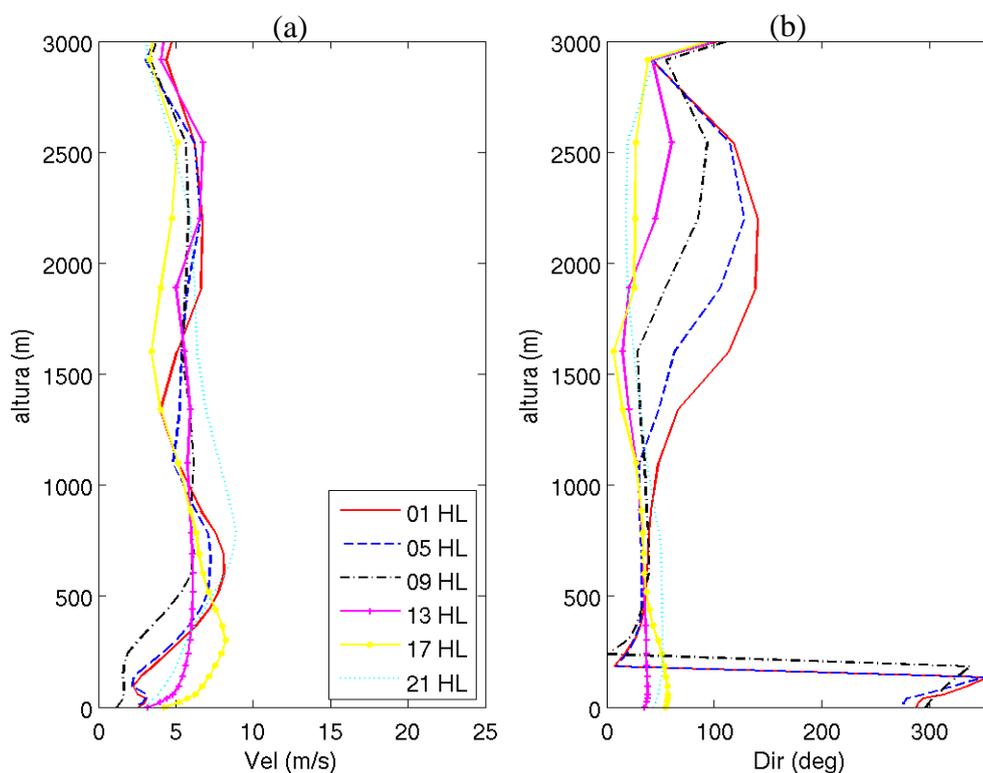


Figura 5-25 – Perfil vertical (a) da velocidade do vento e (b) da direção do vento até 3000m de altura para a segunda-feira, simulado pelo WRF sobre o ponto de monitoramento (dia 21 de julho de 2008).

5.2.2. COMPARAÇÕES COM AS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE SUPERFÍCIE E TESTE DE DESEMPENHO

Nesta subseção serão mostrados e discutidos os resultados obtidos através da simulação com o WRF e confrontados com os dados experimentais obtidos pelas estações meteorológicas superficiais. Para a verificação da qualidade dos dados gerados pelo WRF, alguns parâmetros estatísticos foram aplicados aos seus resultados. Porém em alguns casos, por se tratarem de dados vetoriais, os valores obtidos para suas médias é zero. Impossibilitando a aplicação de alguns destes testes para o período do inverno (20 a 27 de julho de 2008).

A Figura 5-26 mostra a série temporal da temperatura a 2m sobre as estações meteorológicas de superfície confrontada com os resultados obtidos pela simulação usando o WRF.

Observando a Figura 5-26a nota-se que a temperatura simulada pelo WRF é subestimada em todos os dias da semana em questão, porém verifica-se que o modelo conseguiu prever de

forma satisfatória a sazonalidade dos dados. Os valores de máximo e mínimo estão bem representados, mas as temperaturas máximas são estimadas com um decréscimo em todos os seus valores durante a semana estudada. O maior valor simulado para a temperatura sobre esta estação foi encontrada nos dias 24 e 25 de julho de 2008 (intervalo Juliano entre 2006 e 2008), com valor aproximado de 26°C, porém o valor medido pela estação de Carapina foi de cerca de 30° e ocorreu entre o intervalo juliano de 205 a 206 correspondente ao dia 23 de julho de 2008.

Já sobre a estação de Cariacica (Figura 5-26b) observa-se que o modelo também conseguiu representar de forma consistente os dados sobre esta estação. Os valores máximos e mínimos foram bem representados mesmo que em cinco dos sete dias da semana, o WRF subestimou a temperatura a 2m sobre esta estação. Para os dias 25 e 27 (intervalo juliano de 206 a 207 e 208 a 209) desta semana a temperatura predita pelo WRF acabou sendo maior do que o esperado. A maior temperatura medida na semana sobre esta estação foi de aproximadamente 33°C no dia 23 (intervalo juliano 205 a 206) quarta-feira, enquanto a simulação mostra que a maior temperatura atingida foi de 30°C na sexta-feira (intervalo juliano 207 a 208). As menores temperaturas foram 24°C para a estação e 25°C para o WRF, ambas para o sábado.

Novamente o WRF conseguiu uma boa representação dos valores da temperatura a 2m, mas desta vez foi sobre a estação do INMET/UFES. O modelo conseguiu captar de forma muito satisfatória a sazonalidade dos dados durante este período. Os valores máximos e mínimos estão condizentes com os dados medidos (Figura 5-26c). Nota-se nesta figura um grande desvio entre os dados experimentais e simulados, da ordem de 5°C. Este fato ocorreu na quinta-feira (intervalo juliano de 205 a 207). Sobre esta estação, os pontos de máximo foram superestimados enquanto os menores valores são aproximadamente 20°C.

A Figura 5-27 representa a dispersão dos valores simulados e observados, sobre as estações meteorológicas de superfície. Quando os valores simulados são superestimados pelo modelo, sua representação está acima da reta principal e quando o modelo subestima as sua representação está abaixo da linha principal. Nota-se claramente que na estação de Carapina o modelo subestima a grande maioria dos valores da temperatura a 2m (Figura 5-27a), neste caso o maior desvio encontrado foi da ordem de 10°C. Na Figura 5-27b observa-se nesta estação a maioria dos valores simulados também estão abaixo da reta principal, indicando que os valores da temperatura sobre a estação de Cariacica estão sendo subestimados em sua maioria. O maior desvio encontrado foi da ordem de 10°C para esta estação. Sobre a estação

do INMET/UFES (Figura 5-27c) nota-se a melhor distribuição dos resultados onde apesar de estarem subestimados estão bem próximos da reta principal, fato que indica pequeno desvio entre os resultados simulados e observados.

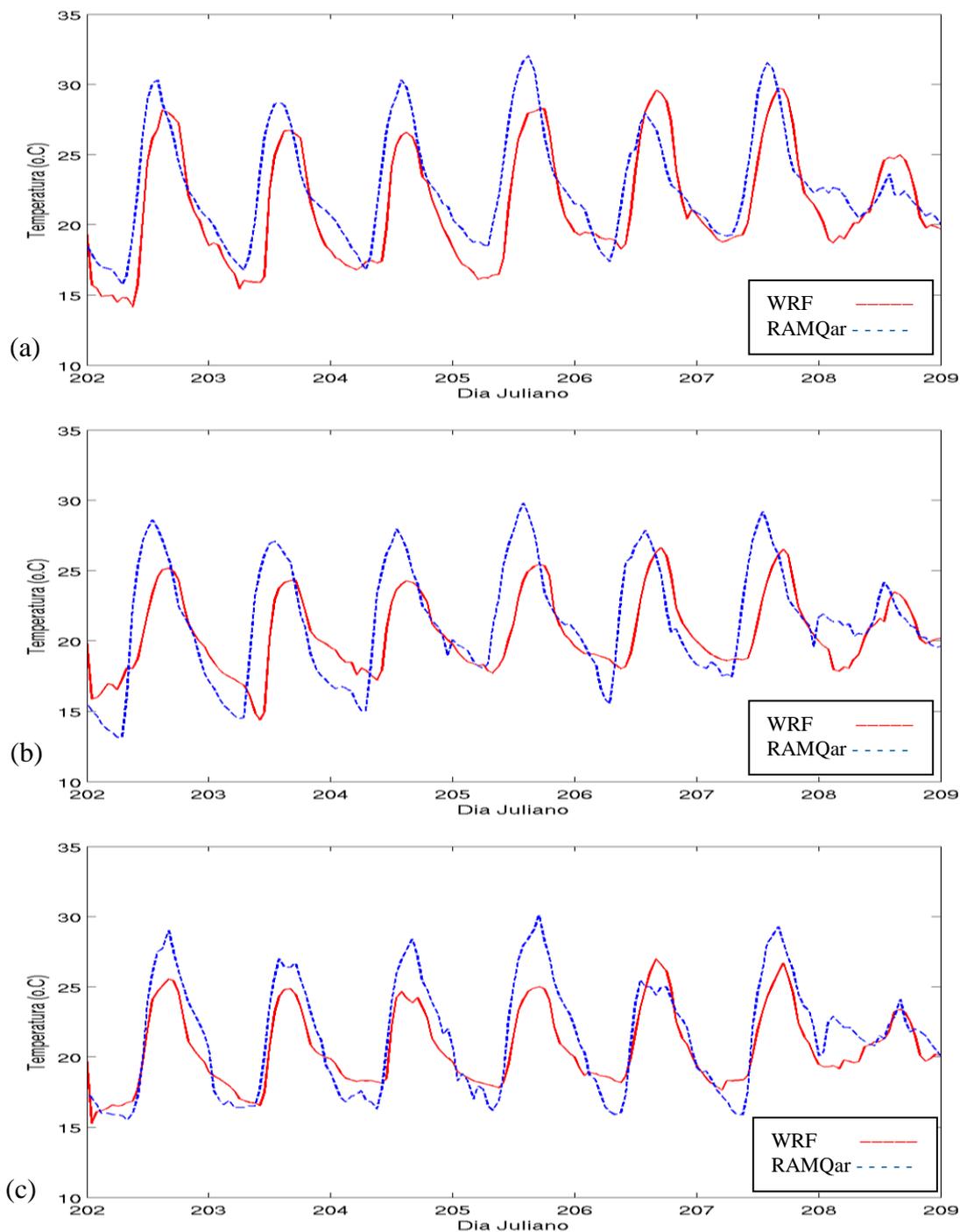


Figura 5-26 – Série temporal da temperatura a 2 m sobre as estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, Serra; (b) Vila Capixaba, Cariacica; (c) INMET/UFES, Goiabeiras-Vitória. Todas para a mesma semana do inverno.

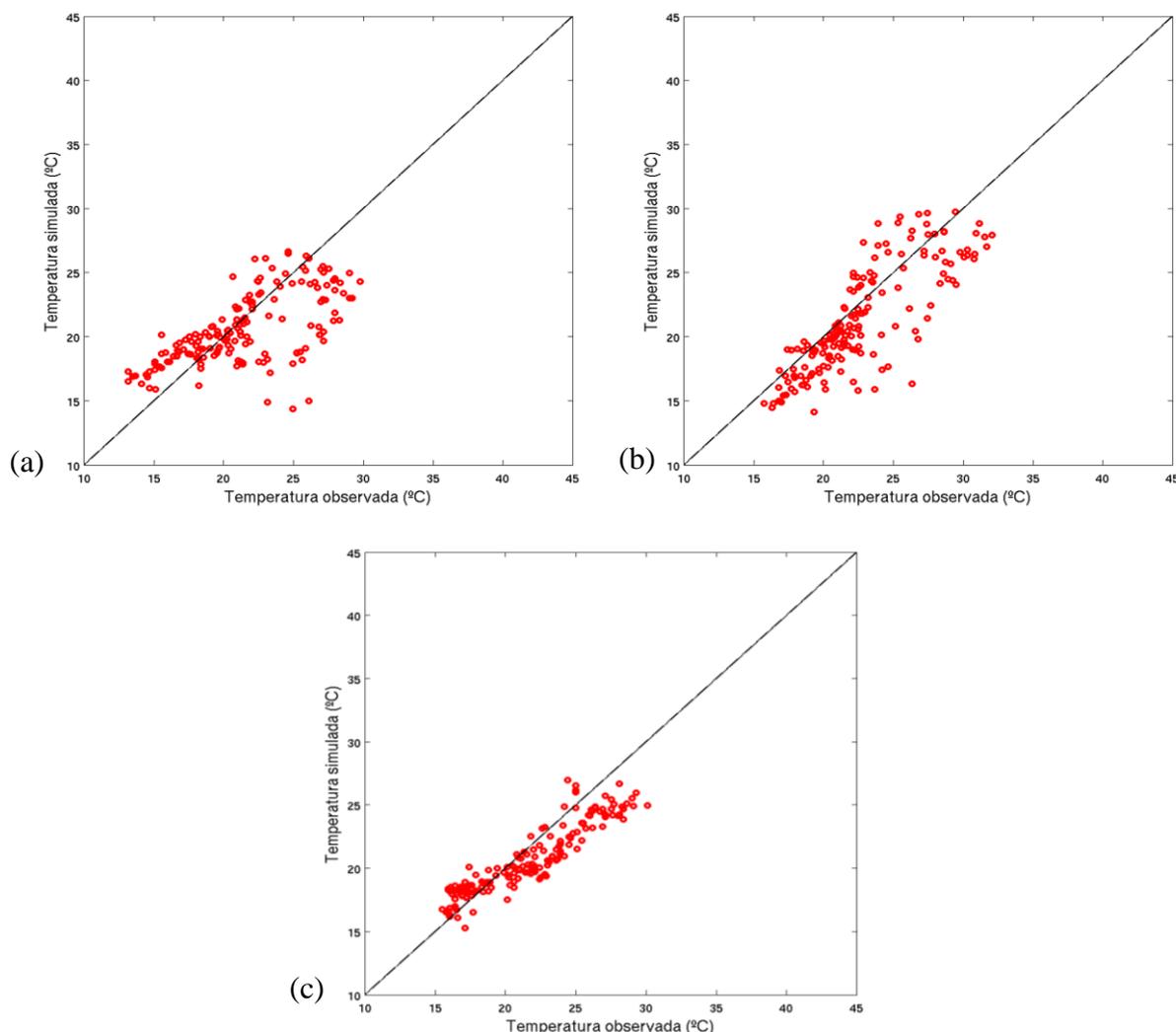


Figura 5-27 – Dispersão dos valores observados e simulados para a temperatura a 2m de altura nas estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, (b) Cariacica e (c) INMET/UFES todos para os dias 20 a 27 de julho de 2008 e sobre o ponto de monitoramento.

A Tabela 12 apresenta o desvio padrão fracional (FB), erro fracional (FS), o erro quadrático médio normalizado (NMSE) e o coeficiente de correlação (r) para os resultados da simulação para a temperatura a 2m realizada pelo WRF comparados aos das estações RAMQar Carapina, Cariacica e a estação do INMET/UFES.

Analisando-se a Tabela 12, nota-se que as temperaturas médias simuladas pelo modelo estão de acordo com as observadas sobre a estação de Carapina, fato verificado na Tabela 12 onde verifica-se que os valores de FB estão próximos do valor ótimo esperado para este teste. Os valores de FB aproximam-se do zero pelo lado negativo indicando que o modelo tem uma pequena tendência a subestimar os valores médios da temperatura simulada em relação à

observada. A média da temperatura é levemente superestimada pelo WRF sobre Carapina, pois os valores de FS variam de -0,5 a 0.

Tabela 12 – Parâmetros estatísticos aplicados aos resultados da simulação da temperatura a 2m. Para o inverno. FS representa o erro fracional, FB o desvio padrão fracional, NMSE o erro quadrático médio normalizado e r representa o coeficiente de correlação.

Estações	Parâmetro estatístico	Dia 01 domingo	Dia 02 segunda	Dia 03 terça	Dia 04 quarta	Dia 05 quinta	Dia 06 sexta	Dia 07 sábado
Carapina	FB	-0,0075	-0,0405	-0,0255	-0,0894	-0,0225	-0,0405	-0,0403
	FS	-0,5358	-0,3769	-0,5518	-0,3294	-0,2779	-0,3582	0,3429
	NMSE	0,0285	0,0471	0,0212	0,0232	0,0241	0,0223	0,0069
	r	0,7751	0,4120	0,7043	0,6686	0,5107	0,5779	0,4198
Cariacica	FB	-0,0799	0,0955	-0,1036	-0,1160	0,0017	-0,0390	-0,0187
	FS	0,0722	0,0304	-0,1513	0,0071	0,2567	-0,0514	0,8592
	NMSE	0,0187	0,0248	0,0183	0,0243	0,0121	0,0101	0,0077
	r	0,8532	0,7430	0,8532	0,8431	0,7580	0,8165	0,3968
INMET UFES	FB	-0,0466	-0,0400	-0,0332	-0,0782	0,0098	-0,0416	-0,0542
	FS	-0,3062	-0,3327	-0,5328	-0,5482	0,0969	-0,4214	0,3073
	NMSE	0,0084	0,0070	0,0097	0,0158	0,0056	0,0092	0,0062
	r	0,9279	0,9168	0,9182	0,9346	0,8423	0,9214	0,4134

Ainda para a estação de Carapina, nota-se que o modelo subestima a temperatura média apenas para o último dia de simulação. O erro quadrático médio normalizado quase assume o valor ótimo esperado para este teste, indicando que o modelo consegue representar de forma coerente a temperatura a 2m sobre esta estação. Porém o coeficiente de correlação entre os dados observados e simulados se mantém próximo de +0,5 indicando que existe uma correlação entre estes valores, mas com intensidade moderada.

Para a estação de Cariacica nota-se que em dois dias da semana, nestes dias a média dos valores da temperatura está sendo predito com um pequeno acréscimo em seus valores enquanto para todos os outros dias o WRF os subestima, pois os valores de FB são negativos. Este fato também é percebido para a temperatura média, já que o teste FS assume valores positivos para os mesmos dias. O pior desempenho do modelo foi para o último dia de simulação (sábado). Os valores de NMSE e r estão próximos dos valores esperados para este teste, indicando que mesmo subestimando ou superestimando a temperatura em alguns dias, ela foi bem representada pelo modelo e existe uma forte correlação entre os resultados simulados e observados sobre a estação de Cariacica.

A estação onde o modelo apresentou um melhor desempenho foi a do INMET/UFES, visto que seus testes de desempenho, FS e FB estão próximos dos valores esperados. As temperaturas médias para a semana são previstas pelo modelo, com um acréscimo muito pequeno em seus valores visto que o teste FB se aproxima do zero pelo lado negativo com exceção apenas do dia 05 onde este teste mostra-se positivo, mas muito próximo de zero. O NMSE muito próximo de zero indica também que o modelo consegue se ajustar aos valores medidos sobre a estação com muita precisão e existe uma forte correlação entre seus resultados e os da estação, pois os resultados deste teste estão próximos de +1.

Como referência da magnitude dos valores obtidos em estudos anteriores, é possível citar CHALLA *et al.* (2009). Onde os valores médios encontrados para o coeficiente de correlação (r) variou entre 0,985 para a parametrização YSU e 0,941 utilizando a MYJ. De acordo com estes resultados pode-se dizer que apenas a estação do INMET/UFES conseguiu um resultado próximo ao já simulado.

A Figura 5-28 representa a série temporal da velocidade do vento zonal (u) e do vento meridional (v) a 10m de altura sobre as estações meteorológicas de superfície utilizadas no presente estudo para o caso do inverno. Para este parâmetro foram comparados os resultados das simulação realizadas pelo WRF com os dados medidos por quatro estações (Carapina, Enseada do Suá, Cariacica e INMET/UFES).

Observa-se que a velocidade do vento zonal (u), representada pela Figura 5-28a foi representada de forma coerente com relação à sazonalidade dos dados e percebe-se que os valores máximos e mínimos estão de acordo com os dados medidos, porém superestimados pelo modelo WRF. Da mesma forma, a velocidade do vento meridional consegue uma boa representação de sua sazonalidade, mas ao contrário dos valores de u ela está sendo subestimada na maioria dos dias.

Fica claro ao observar-se a Figura 5-28b, que o modelo não conseguiu uma boa representação dos dados sobre a estação da Enseada do Suá. Neste período a estação apresentou problemas técnicos e não estavam disponíveis todos os valores da velocidade do vento. De forma geral o modelo superestimou grande parte dos dados da velocidade do vento zonal e subestimou a maioria dos dados de velocidade do vento meridional. Sobre a estação de Cariacica (Figura 5-28c), os resultados para o inverno são semelhantes ao verão, onde a velocidade do vento zonal foi bem representada pelo modelo. O WRF conseguiu representar de forma coerente a

sazonalidade dos dados do vento meridional, porém o vento zonal apresenta a mesma tendência de manter a sua velocidade constante e muito próxima de zero. De maneira análoga aos resultados obtidos para o verão, estes dados são significativamente diferentes das outras estações e resultados do modelo, podendo indicar problemas de funcionamento da estação.

Novamente este fato deve ser investigado com mais cuidado analisando outras semanas a fim de verificar se o erro realmente está nas medidas da estação de Cariacica ou se realmente este é um fato comum sobre a região onde esta estação está localizada. Necessitando assim a mudança de sua localização, já que a mesma encontra-se dentro de uma área onde há a existência de algumas construções ao seu redor que podem estar influenciando nas medidas por ela realizadas.

A Figura 5-29d representa a série temporal das velocidades do vento zonal (u) e meridional (v) sobre a estação meteorológica do INMET/UFES novamente mostrou-se como sendo a estação onde o WRF consegue o melhor ajuste de seus dados. Neste caso, tanto para a velocidade do vento zonal quanto para o vento meridional, o modelo consegue representar de forma muito satisfatória a sazonalidade dos dados. Mas assim como nas outras estações o WRF tem a tendência de superestimar os valores positivos do vento zonal. Entre todas as estações nesta o WRF consegue representar a velocidade do vento meridional de forma mais coerente.

Para ter uma melhor visão da acurácia dos resultados deve-se analisar as Tabelas 13 e 14 onde são mostrados os parâmetros estatísticos aplicados aos resultados da simulação frente aos resultados medidos nas respectivas estações. A Tabela 13 mostra os resultados dos testes aplicados à velocidade do vento zonal e a Tabela 14 mostra os mesmos parâmetros, porém aplicados aos resultados para a velocidade do vento meridional.

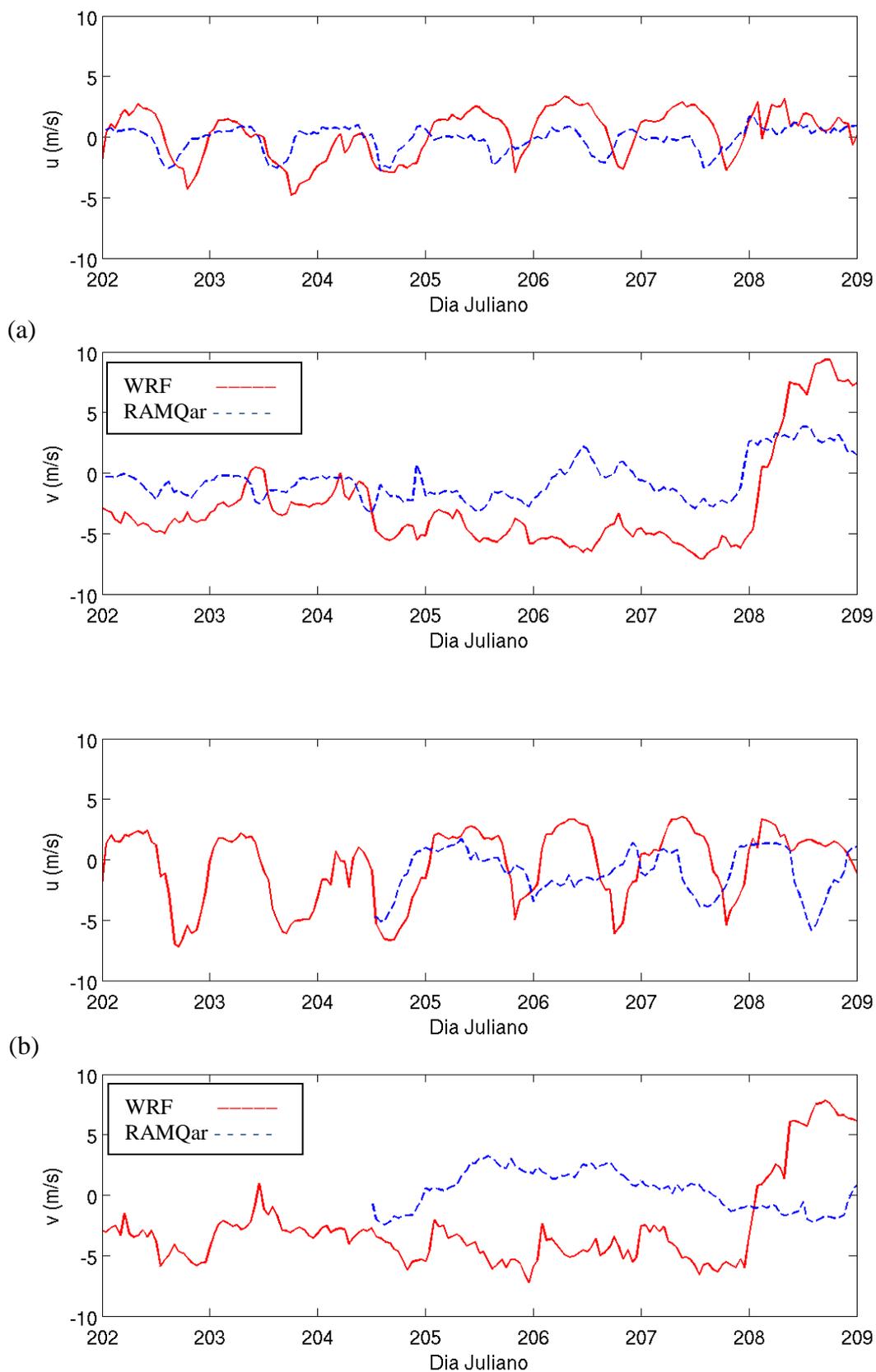


Figura 5-28 – Comparação entre as velocidades do vento zonal (u) e meridional (v) simulados e observados sobre as estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Cariacica e (d) INMET/UFES para os dias 20 a 27 de julho de 2008.

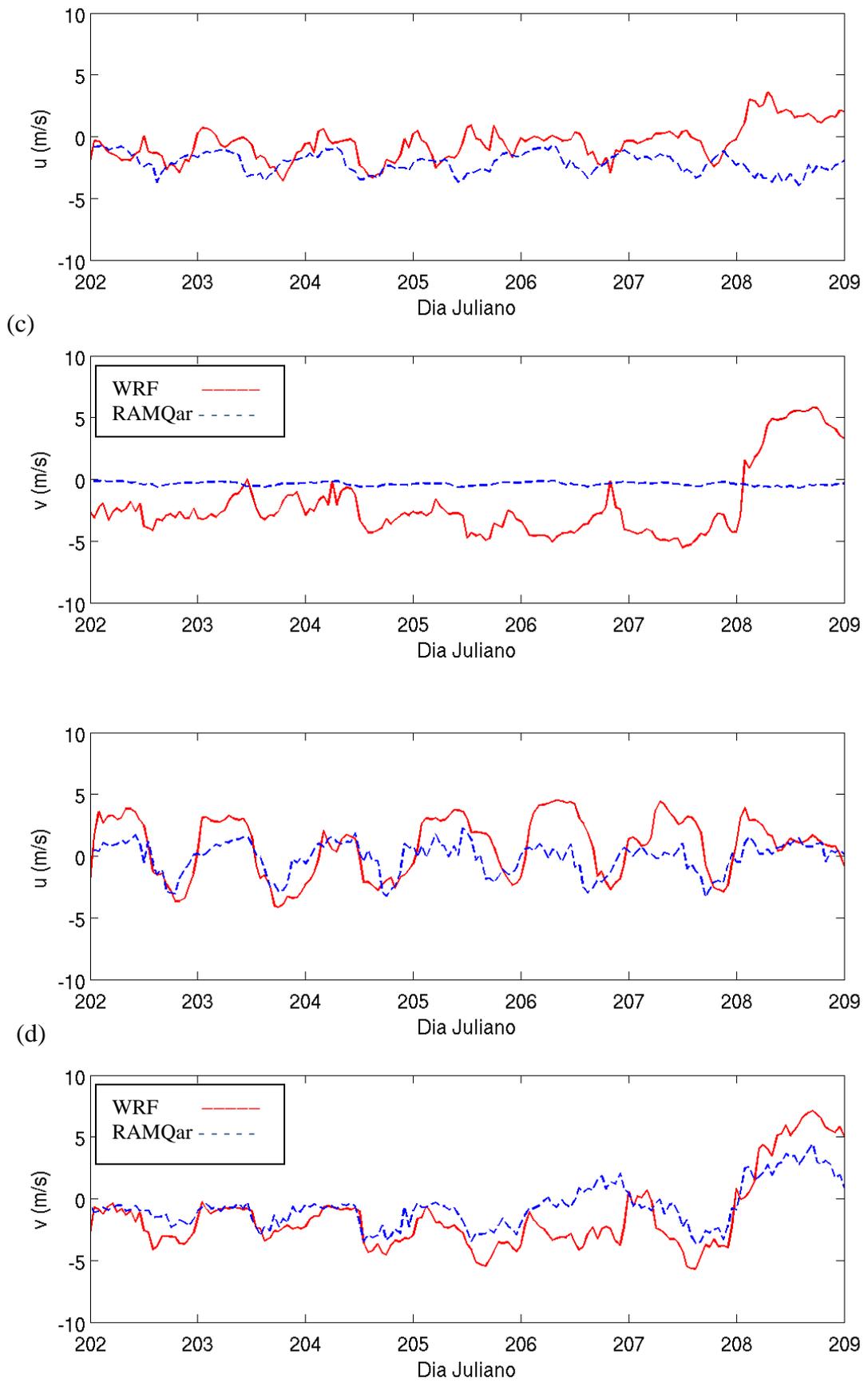


Figura 5-28 – Continuação.

A Figura 5-29 representa a dispersão dos valores da velocidade do vento zonal e vento meridional para sobre as estações meteorológicas de superfície utilizadas neste estudo de caso. Observa-se uma divisão entre os dados superestimados e subestimados pelo modelo. Na Figura 5-29a observa-se que há uma divisão quase igual entre a quantidade de dados superestimados e subestimados sobre a estação de Carapina. Sobre a estação da Enseada do Suá em Vitória (Figura 5-29b) percebe-se um grande espalhamento dos dados, indicando que o modelo além de não conseguir representar os dados na estação ainda prediz seus resultados com um desvio acentuado. Em alguns casos o desvio na velocidade do vento zonal atinge valores de 7m/s para este período.

Ao observar a Figura 5-29c nota-se que sobre a estação de Cariacica o modelo praticamente superestimou todos os valores para a velocidade do vento zonal, porém mostra-se uma grande coesão dos resultados. Para a estação do INMET/UFES (Figura 5-29d) nota-se uma variação entre dados subestimados e superestimados, mas também é percebida uma tendência em seus dados. Fato não verificado nas outras estações.

As Figuras 5-29 (e-h) representam o espalhamento para a velocidade do vento meridional (v) em relação à reta principal, onde os valores ideais são representados sobre ela. Verifica-se nas Figuras 5-29e e 5-29f a existência de um grande espalhamento dos dados, este fator mostra que os valores simulados para esta variável não condizem com os dados medidos sobre as estações de Carapina e Enseada do Suá, respectivamente.

Para a estação de Cariacica, assim como no verão, a distribuição dos valores segue um padrão que mostra algum problema com a estação (Figura 5-16h). Já para a Figura 5-29h que representa a distribuição sobre a estação do INMET/UFES, verifica-se uma tendência do modelo a subestimar velocidades negativas e superestimar as velocidades positivas. Vale ressaltar que velocidades negativas são relacionadas com a direção em que o vento se propaga, sendo assim, negativo é representado pelo vento que se propaga em direção ao Sul e positivo em direção ao norte geográfico.

De forma geral, o modelo superestima a maioria dos valores da velocidade do vento que se deslocam do continente em direção ao oceano e subestima no sentido contrário. Para os ventos provenientes do Norte, o modelo também superestima os seus valores e subestima os ventos vindos da região Sul. Para termos maior clareza nos resultados, mais testes e mais simulações devem ser realizadas para obter-se resultados mais conclusivos.

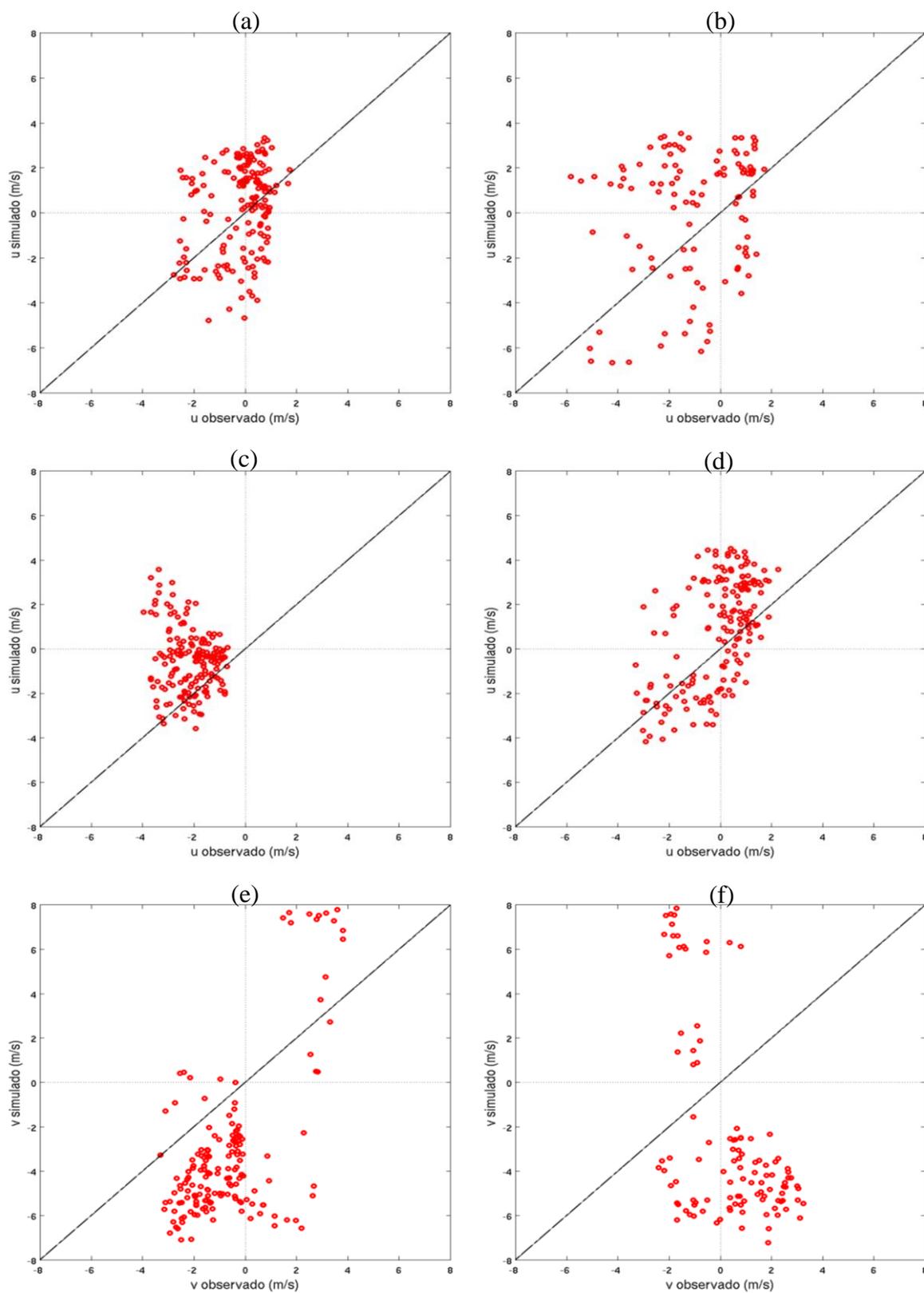


Figura 5-29 – Dispersão dos valores observados e simulados para a velocidade do vento zonal a 10 m nas estações meteorológicas de superfície (a) Carapina, (b) Enseada do Suá, (c) Cariacica e (d) INMET/UFES e para o vento meridional (e) Carapina, (f) Enseada do Suá, (g) Cariacica e (h) INMET/UFES todos para os de 01 a 07 de março de 2009.

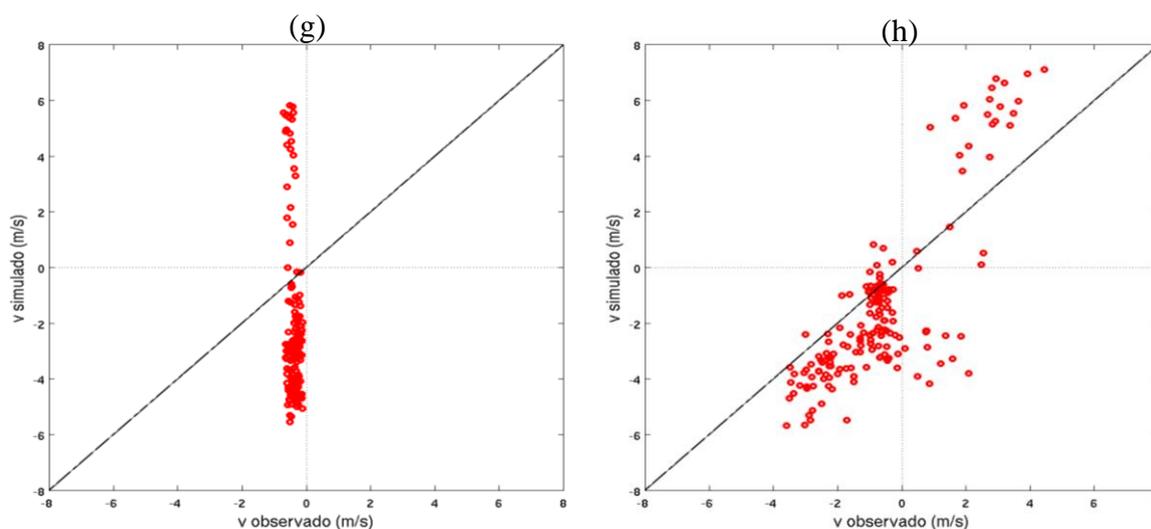


Figura 5-29 – Continuação.

É válido lembrar que a não aplicação de alguns parâmetros estatísticos aos resultados desta simulação é devido ao fato que em alguns casos a média bem como o desvio dos resultados em algum momento assumiu o valor zero, impossibilitando a conclusão dos testes.

Tabela 13 – Parâmetros estatísticos aplicados aos resultados da simulação da velocidade do vento zonal a 10 m. Para o inverno. Onde FS representa o erro fracional r representa ao coeficiente de correlação.

Estações	Parâmetro estatístico	Dia 01 domingo	Dia 02 segunda	Dia 03 terça	Dia 04 quarta	Dia 05 quinta	Dia 06 sexta	Dia 07 sábado
Carapina	FS	-0,7026	-0,5614	0,0645	-0,6304	-0,6591	-0,6756	-0,8593
	r	0,4021	0,4218	0,6374	0,0989	0,0869	0,0446	0,1158
Enseada Do Suá	FS	1,9833	1,9836	1,9742	-0,8357	-0,9214	-0,3770	0,5839
	r	0,4841	-0,7038	-0,0753	0,5684	-0,4146	-0,0657	-0,0545
Cariacica	FS	0,0773	-0,4106	-0,3490	-0,3705	-0,1298	-0,3049	-0,5004
	r	0,1143	0,4281	0,6975	-0,1138	0,3238	-0,1895	-0,6477
INMET UFES	FS	-0,6414	-0,6921	-0,0750	-0,4167	-0,7429	-0,6487	-0,6842
	r	0,8016	0,8156	0,6597	0,5997	0,3406	0,5615	0,3302

Analisando a Tabela 13, percebe-se que para a estação de Carapina os valores de FS são negativos para quase todos os dias da semana, indicando que a média da velocidades do vento zonal preditas pelo modelo está acima da média observada na estação, com exceção do dia 03 onde esta média foi predita com um pequeno decréscimo em seu valor. Este fato repete-se

para a estação de Cariacica, porém o dia onde a média da velocidade do vento zonal é superestimada é o dia 01. Sobre a estação da Enseada do Suá, FS tem seus resultados negativos para os dias 04, 05 e 06. Já sobre a estação do INMET/UFES, para todos os dias foi encontrado valor negativo para FS, mostrando que durante a simulação o WRF sempre superestimou a velocidade do vento zonal.

De acordo com o coeficiente de correlação (r), as estações de Carapina e Cariacica apresentam pouca correlação entre os seus dados e os simulados pelo WRF. Onde o valor ótimo esperado para este teste é +1. Para a estação da Enseada do Suá, encontrou-se uma correlação negativa entre seus resultados em quase todos os dias; indicando que quando os valores da estação aumentam, o WRF prediz que eles diminuem. Este teste comprova que a estação do INMET/UFES, mesmo não possuindo uma forte correlação entre dados medidos e os simulados para todos os dias, é a região onde o WRF consegue o melhor ajuste dos seus dados.

Tabela 14 – Parâmetros estatísticos aplicados aos resultados da simulação da velocidade do vento meridional a 10 m. Para o inverno. Onde FS representa o erro fracional, FB o desvio padrão fracional e NMSE o erro quadrático médio normalizado.

Estações	Parâmetro estatístico	Dia 01 domingo	Dia 02 segunda	Dia 03 terça	Dia 04 quarta	Dia 05 quinta	Dia 06 sexta	Dia 07 sábado
Carapina	FS	0,1642	-0,5288	-0,5031	-0,5281	0,3308	0,1868	-1,3375
	r	0,4467	-0,4874	0,1340	0,5180	-0,2379	0,6107	0,5065
Enseada do Suá	FS	1,9848	1,9804	1,9896	-0,2847	-0,3526	-0,5490	-1,4954
	r	0,0159	-0,5808	0,6475	-0,5475	0,1798	0,4919	-0,3620
Cariacica	FS	-1,2704	-1,4796	-1,5666	-1,5499	-1,5653	-1,4835	-1,8721
	r	0,4778	-0,1166	0,5901	0,3516	-0,2966	0,5326	-0,5751
INMET UFES	FS	-0,7373	-0,1918	-0,2294	-0,2803	0,3115	-0,4734	-0,6430
	r	0,6743	0,7102	0,8201	0,8622	-0,1794	0,7182	0,8111

Ao analisar a Tabela 14 onde estão representados os parâmetros estatísticos aplicados aos resultados da simulação realizada pelo WRF e comparada com as mesmas estações meteorológicas de superfície do teste anterior, percebe-se que a sobre a estação de Carapina, a velocidade média do vento meridional simulado pelo WRF apresenta-se um pouco maior que as média desta velocidade medida sobre esta estação em 4 dos 7 dias simulados. Para a estação da Enseada do Suá isto também é verificado, porém para os três primeiros dias da semana e para o último dia é percebido um grande decréscimo nos valores desta média, enquanto para os outros dias um pequeno acréscimo é verificado. Na estação de Cariacica em

todos os dias da semana a velocidade média simulada é superestimada pelo modelo. Novamente a estação do INMET/UFES mostra-se a estação onde o modelo melhor se ajusta, mesmo que a velocidade média do vento meridional seja predita com valores acima da medida, o valor de FS mostra-se pequeno durante toda a semana.

O coeficiente de correlação (r) mostra-se sempre abaixo de 0,7 para as estações de Carapina, Enseada do Suá e Cariacica. Isto indica que sobre estas estações o modelo não consegue uma forte correlação entre os dados medidos e simulados mesmo que em alguns casos seu resultado seja positivo. Mais uma vez os testes comprovam que o WRF consegue ajustar os seus resultados de forma mais satisfatória sobre a região onde está localizada a estação do INMET/UFES, pois novamente os valores de r são maiores nesta estação do que nas outras. Com exceção apenas do dia 05. Mesmo mostrando um bom ajuste para algumas propriedades, faz-se necessária a simulação de outros períodos e consequentemente a aplicação novamente dos parâmetros estatísticos aqui apresentados para a comprovação dos testes e melhor entendimento do comportamento da CLP sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O principal objetivo deste trabalho foi usar o modelo matemático de mesoescala WRF para realizar a simulação do comportamento temporal e espacial da Camada Limite Planetária sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) no Espírito Santo, tendo em vista o conhecimento de suas propriedades dinâmicas/termodinâmicas bem como a comparação dos resultados obtidos com dados observacionais medidos pelas estações meteorológicas presentes nesta região.

Foram realizadas simulações em dois períodos distintos: (i) inverno, de 20 de julho de 2008 a 26 de julho de 2008 e (ii) verão, de 01 de março de 2009 a 07 de março de 2009. As simulações do modelo foram empregadas para estudar a evolução temporal da altura da CLP, campo de vento, temperatura potencial e temperatura a 2m. Estes resultados foram comparados à medições realizadas por várias estações meteorológicas de superfície presentes na região de estudo e à dados de radiossondagens.

Os resultados obtidos indicam que o modelo conseguiu prever razoavelmente os padrões de variação da CLP analisados, mas alguns desvios significativos entre as predições e observações experimentais foram encontrados.

O modelo conseguiu representar adequadamente o ciclo diário de temperaturas a 2 m na região, as comparações com os dados das estações meteorológicas de superfície indicaram boa concordância entre modelo e dados experimentais, contendo desvios de grandeza similar a outros estudos apresentados na literatura. Adicionalmente, verificou-se que no período do verão o modelo obteve um melhor ajuste de seus resultados comparados com as estações meteorológicas. As comparações dos perfis verticais de temperatura com dados de radiossondagem também indicaram um razoável nível de concordância com os dados experimentais, porém o modelo em várias vezes não conseguiu prever bem o gradiente vertical de temperatura. Em vários momentos as predições do modelo não se mostravam condizentes com o perfil da temperatura potencial medido nas radiossondagens, porém os desvios encontrados são grandeza aproximadamente semelhantes a outros estudos apresentados na literatura.

As comparações com dados de radiossondagem indicaram desvios significativos nas predições de direção do vento, principalmente em altitudes medianas, visto que os ventos em altas altitudes (acima de 2000m) e de superfície foram razoavelmente preditos. As comparações com dados das estações meteorológicas indicaram que as séries temporais para a velocidade do vento a 10m indicam que o modelo não conseguiu representar de forma satisfatória o vento médio a 10m sobre algumas regiões específicas e também no período de inverno. Apesar desta imprecisão das previsões sobre algumas regiões, o coeficiente de correlação entre os dados simulados e medidos mostra que em algumas regiões e principalmente no período do verão, o modelo prevê a velocidade de forma razoável. Isto mostra que a investigação de outras parametrizações do modelo bem como o uso de dados com maior precisão podem melhorar de forma significativa os resultados das simulações.

Fazendo uma breve comparação entre os resultados obtidos no período de inverno com os resultados no período de verão, é possível verificar que o modelo WRF conseguiu uma melhor simulação no período do verão, onde os dados simulados estão mais próximos aos observados, fato verificado facilmente comparando as Tabelas que contém os parâmetros estatísticos dos dois casos.

Ao analisar os dados tanto de velocidade e direção do vento quanto os de temperatura a, percebe-se que os melhores resultados da simulação do WRF, tanto para o verão quanto para o inverno são sobre a estação meteorológica superficial pertencente ao INMET e localizada no campus universitário da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). E o pior resultado, principalmente para a velocidade do vento, foi encontrado sobre a estação pertencente ao IEMA e localizada em Vila Capixaba, Cariacica. Este fato deve ser melhor estudado e pode vir mostrar a necessidade de alteração da localização desta estação.

Uma possível explicação para o fato de que o WRF consegue uma melhor representação do vento zonal de Leste é em virtude da topografia plana e ocupação do solo homogênea. Nessa condição, o modelo se ajusta melhor, pois trata-se de um campo de vento uniforme e com poucas variações, tanto na escala temporal quanto espacial. Tal fato não é verificado no caso contrário, pois o vento desloca-se sobre uma extensa cadeia de montanhas e sobre toda a região Metropolitana da Grande Vitória, que é complexa tanto do ponto de vista da orografia, quanto da ocupação do solo.

Como sugestões para a continuidade dos estudos realizados neste trabalho é possível destacar os seguintes tópicos:

- I. Avaliar as combinações entre as parametrizações físicas que estão disponíveis no WRF, com o intuito de definir quais poderiam ser melhor aplicadas visando o custo operacional e a correta simulação dos sistemas meteorológicos;
- II. Avaliar o uso de métodos de assimilação de dados *nudging*, como forma de melhorar os resultados das simulações;
- III. Avaliar o uso de dados de uso e ocupação do solo com maior precisão, na tentativa de melhorar os resultados das simulações;
- IV. Avaliar outros parâmetros estatísticos para a análise da performance do modelo;
- V. Aumentar o número de pontos nodais para diminuir os efeitos da zona de relaxamento nos resultados das simulações;
- VI. Implementação do pacote químico presente nesta versão do WRF para a simulação da dispersão de gases e material particulado.

7 REFERÊNCIAS

AERMOD implementation Guide. EPA, 19. Disponível em <http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm#aermod>. Acessado em janeiro, 2009.

ARYA, S. P. **Air pollution meteorology and dispersion**. New York, Oxford University Press, 1999.

AKYLAS, E., KOTRONI, V., LAGOUVARDOS, K. **Sensitivity of high-resolution operational weather forecasts to the choice of the planetary boundary layer scheme**. *Atmospheric Environment*. V. 84, p. 49-57, 2007.

BORGE, R.; ALEXANDROV, V.; JOSE´ DEL VAS, J.; LUMBRERAS, J.; RODRI´GUEZ, E. **A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula**. *Atmospheric Research*. V. 42, p. 8560–8574, mai-2008.

CHALLA, V.S.; INDRACANTI, J.; RABARISSON, M.K.; PATRICK, C. *et al.* **A simulation study mesoscale coastal circulation in Mississippi Gulf coast**. *Atmospheric Research*, v. 91, p. 9-25, 2009.

CHANDRASEKAR, A., PHILBRICK, C. R., CLARK, R. DODDRIDGE, B., GEORGOPLULOS, P. **Evaluating the performance of a computationally efficient MM5/CALMET system for developing wind field inputs to air quality models**. *Atmospheric Environment*. V. 37, p. 3267-3276, 2003.

CHEN, C., BEARDSLEY, R. C, HU, S., XU, Q., LIN, H. **Using MM5 to Hindcast the Ocean Surface Forcing Fields over the Gulf of Maine and Georgers Bank Region**. *Journal of the Atmospheric and Oceanic Technology*, 22, 131-145, 2005.

CHENG, F-Y.; BYUN, D. W. **Application of high resolution land use and land cover data for atmospheric modeling in the Houston-Galveston metropolitan area, Part I: Meteorological simulation results.** *Atmospheric Environment*, v. 42, p. 7795-7811, 2008.

COMMUNITY MULTISCALE AIR QUALITY, *CMAQ 4.6 Operational Guidance Document*. Disponível em: < <http://www.cmaq-model.org> > Acesso em janeiro, 2009.

CORRÊA, E. B.; CATALDI, M.; PIMENTEL, L. C. G. **Análise Comparativa das Simulações do Modelo de Mesoescala MM5 e Dados Meteorológicos Observados para a Região do Galeão/RJ.** *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, v. 29 – 2, p. 66-86, issn 0101-9759, 2006.

FAST, J. D., W. I. GUSTAFSON, Jr., R. C. EASTER, R. A. ZAVERI, J. C. BARNARD, E. G. CHAPMAN, G. A. GRELL, PECKHAM, S. E. **Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model,** *Journal of Geophys. Research.*, **111**, D21305, doi:10.1029/2005JD006721, 2006.

GENG, F., ZHAO, C., TANG, X., LU, G., TIE, X. **Analysis of ozone and VOCs measured in Shanghai: A case study.** *Atmospheric Environment*, v. 41, p. 989-1001, 2007.

GILLIAN, C. R.; HOGREFE, C.; RAO, S.T. **New methods for evaluating meteorological models used in air quality applications.** *Atmospheric Environment*, v.40, p. 5073-5086, jan-2006.

GRELL, G. A.; DUDHIA, J.; STAUFFER, D. R. *A description of the fifth Generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5)*. 1994.

GRELL, G. A., PECKHAM, S. E., SCHIMTZ, R., MCKEEN, S. A., FROST, G. **Fully coupled “online” chemistry within the WRF model.** *Atmospheric Environment*, v.39, i. 37, p. 6957-6975, 2005.

JONES, M. S.; COLLE, B. A.; TONGUE, J. S. **Evaluation of a mesoscale short-range ensemble forecast system over northeast United States.** *Weather and Forecasting*. v. 22, p. 36-55, fev-2007.

JORBA, O.; LORIDAN, T.; JIMÉNES-GERRERO, P.; PÉREZ, C.; BALDASANO, J.; M. **Linking the advanced research WRF meteorological model with the CHIMERE chemistry-transport model.** *Environment Modeling & Software*. v. 23, p. 1092-109, 2008.

HANNA, S. R. **Híbrido Plume Dispersion Model (HPDM) Development and Evaluation.** *Journal of applied Meteorology*. v. 28, p. 206-223, 1988.

HANNA, S. R., MACDONALD, C. P., LILLY, M., KNODERER, C., HUANG, C. H. **Analysis of three years of boundary layer observations over the Gulf of Mexico and its shores.** *Estuarine, Coastal and Shelf science*, v. 70, p. 541-550, 2006.

HONG, S. -Y.; NOH, Y; DUDHIA, J. **A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes.** *Monthly Weather Review*, v. 134, no 9, p. 2342 – 2353, 2006.

Instituto Estadual do Meio Ambiente (IEMA). **Relatório da qualidade do ar na região da grande vitória 2007.** Disponível em < <http://www.meioambiente.es.gov.br/>>. Acessado em outubro de 2008.

KESARKAR, A. P., DALVI, M., KAGINALKAR, A., O. **Coupling of the Weather Research and Forecasting Model with AERMOD for pollutant dispersion modeling. A case study for PM10 dispersion over Pune, India.** *Atmospheric Environment*, v. 41, p. 1976-1988, 2007.

KUSAKA, H.; CROCK, A.; DUDHIA, D.; WADA, K. **Comparison of the WRF and MM5 models for simulation of heavy rainfall along the Baiu front.** *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, v. 1, p. 197-200, doi:10.2151/sola.2005-051, 2005.

LACASSE, K. M.; SPLITT, M. E.; LAZARUS, S. M.; LAPENTA, W. M.. **The impact of high-resolution sea surface temperatures on the simulation nocturnal Florida marine boundary layer.** *Monthly Weather Review*, v. 136, no 4, p. 1349 – 1372, Apr-2008.

LAPRISE, R. **The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as independent variable.** *Monthly Weather Review*, v. 120, p. 197-207, 1992.

LEE, H. W.; CHOI, H.-J.; LEE, S.-H.; KIM, Y.-K.; JUNG, W.-S. **The impact of topograph and urban building parametrization on the photochemical ozone concentration of Seoul, Korea.** *Atmospheric Environment*, v. 42, , p. 4232 – 4246, jan-2008.

MM5 COMMUNITY MODEL WEB SITE, Disponível em: < <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/overview.html>>. Acesso em junho, 2008.

NCAR/TN-475+STR, 2008: A description of the Advanced Research WRF Version 3. Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research , Boulder, Colorado, U.S.A., Jun. 2008. Disponível em: < <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>>

NCEP/NOAA, Página oficial <<http://nomads.ncep.noaa.gov>>. Acesso em outubro de 2008.

Página oficial do INMET, Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>>. Acesso em julho, 2008 e março, 2009.

PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY / NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH, *Numerical model home page.* Disponível em: <<http://www.mmm.ucar.edu/mm5>>. Acesso em maio, 2008.

PEREIRA, M. M. R. ; OLIVEIRA, A. P. ; MARQUES FILHO, E. P. ; Reis Júnior, N. C. . **Evolução da Camada Limite Planetária Sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória por Meio de um Modelo Meteorológico de Mesoescala.** *In: XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Guarapari, 2005.*

PRABHA, T. & HOOGENBOOM, G. **Evaluation of the Weather Research and Forecasting model for two frost events.** *Computers and Electronics in Agriculture.* v. 64, p. 234-247, mai-2008.

SEAMAN, N. L. **Meteorological modeling for air-quality assessments.** *Atmospheric Environment*, v. 34, p. 2231-2259, 2000.

SCOLAR, J.; CAETANO NETO, E. S.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J., 2000, **Simulação Numérica da Camada Limite Planetária na Região de Iperó, SP-Brasil**, *Brasilian Journal of Geophisycs*, vol. 18, 2000.

SHEM, W., SHEPHERD, M.. **On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta: Two numerical model case studies**. *Atmospheric Research*. V. 92, p. 172–189, 2009.

SRINIVAS, C. V.; VENKATESAN, R.; SINGH, B. A. **Sensitivity of mesoscale simulations of lan-sea breeze to boundary layer turbulence parametrization**. *Atmospheric Environment*, v. 41, p. 2534-2548, nov-2006.

STRAWBRIDGE, K. B.; SNYDER, B. J. **Planetary boundary layer height determination during Pacific 2001 using the advantage of a scanning lidar instrument**. *Atmospheric Environment*. v. 38, p. 5861-5871, 2004.

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Kluwer Academic Press, Dordrecht, The Netherlands, 670pp, 1988.

SKAMAROCK, W. C., KLEMP, J. B., DUDHIA, J. *et al.* 2008. **Description of the Advanced Research WRF Version 3**. *National Center for Atmospheric Research Boulder, Colorado, USA*.

SKAMAROCK, W. C., KLEMP, J. B., **A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications**. *Journal of Computational Physics*, vol 227, p. 3465 -3485, 2008.

STABEN, J. P.; CAMPOS VELHO, H. F.; FREITAS, S. R.. **Simulação Numérica da Camada Limite Planetária Utilizando duas Parametrizações de Turbulência no Modelo B-RAMS para o Estado de Rondônia**. *Anais do V WORCAP, INPE, São José dos Campos*, dias 26 e 27, out-2005.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; HUANG, X-Y; WANG, W.; POWERS, J. G. **A Description of the Advanced Research WRF Version 3**. NCAR/TN-475+STR, june-2008. Disponível em <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf>. Acesso em outubro, 2008.

TENNEKES, H. & LUMLEY, J. L. **A First Course in Turbulence**. Cambridge, Massachusetts, England, The MIT Press, 1972.

THE EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE (EROS). Disponível em: <<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/gtopo30.html>>. Acesso em março, 2008

US EPA, 2009. **Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling**. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/scram/dispersion_prefrec.htm#aermod>. Acesso em Janeiro, 2009.

US EPA, 2009. **Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling**. Disponível em: <http://www.epa.gov/scram001/dispersion_alt-.htm#isc3>. Acesso em março,. 2009.

US EPA, 2009. **Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/AMD/CMAQ/CMAQscienceDoc.html>>. Acesso em março, 2009.

USGS, Página oficial <<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/gtopo30.html>>. Acesso em outubro de 2008.

WALLACE J. M. & HOBBS P. V. **Atmospheric science: an introductory survey**. ISBN-13:978-0-12-732950-5.

WANG, W., BARKER, D.; BRUYÈRE, C.; DUDA, M.; DUDHIA,J.; GILL, D.; MICHALAKES,J.; RIZVI, S. **WRF Version 3 Modeling System User's Guide**. Disponível em <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3>. Acesso em outubro de 2008.

WEDAM, G. B.; McMURDIE, L. A.; MASS, C. F. **Comparison of Model Forecast Skill of Sea Level Pressure along the East and West Coasts of the United States**. *Weather and Forecasting*, v. 24, p. 843-854, jun-2009.

WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF) Modeling System User's Guide VERSION 3. . **Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, U.S.A.** Disponível em: <<http://www.mmm.ucar.edu./wrf/users/>>. Acesso em junho, 2008.

ZHANG, Y. **Online-coupled meteorology and chemistry models: history, current status, and outlook.** *Atmospheric Chemistry and Physics*. v. 8, p. 2895-2932, 2008.

ZHAO, Y. W.; CHOI, Y.; ZENG, T. **Summertime impact of convective transport and lightning NO_x production over North America: modeling dependence on meteorological simulations.** *Atmospheric Chemistry and Physics*. v. 9, p. 4315-4327, jul-2009.

8 ANEXOS

8.1. ANEXO A

A Figura 8-1 mostra a o perfil de temperatura potencial para o período do verão. Sendo que o primeiro dia da semana (01 de março de 2009) já foi mostrado (Figura 5-8)

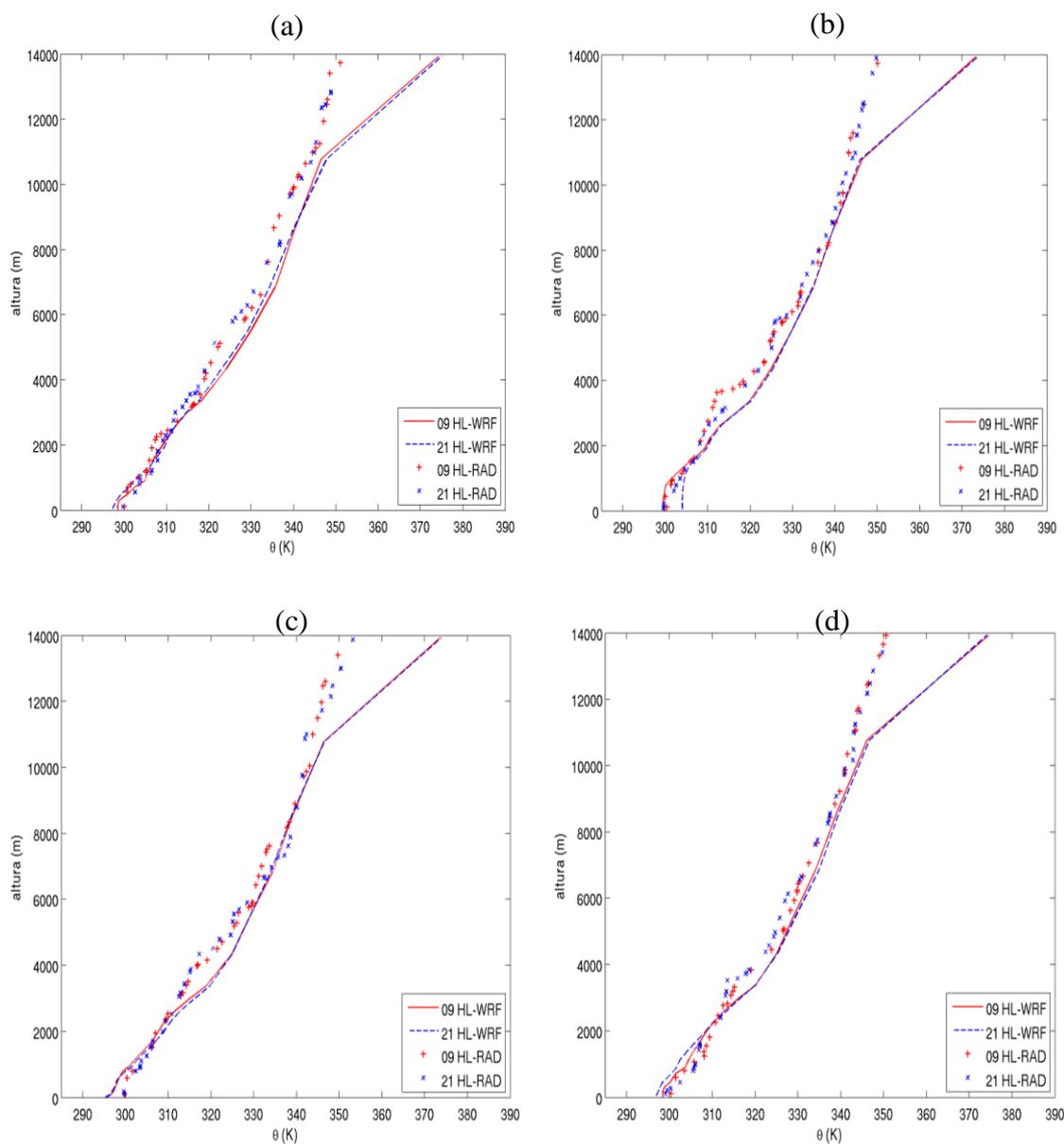


Figura 8-1 – Comparação entre o perfil vertical da temperatura potencial simulada pelo WRF confrontada com a medida na radiossondagem para os dias (a) 02, (b) 03, (c) 04, (d) 05, (e) 06 e (f) 07 de março de 2009 sobre o ponto de monitoramento (aeroporto de Vitória).

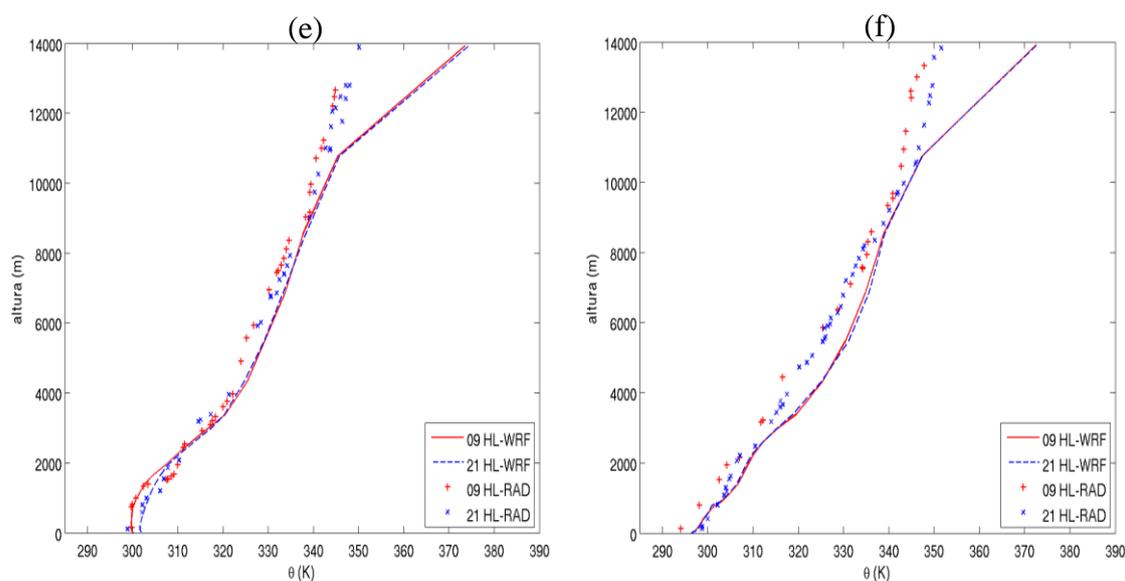


Figura 8-1 – Continuação.

8.2. ANEXO B

Os dados abaixo representam o name.input utilizado neste estudo. A diferença entre o namelist do inverno e do verão é apenas o dia em que foi realizada a simulação.

Namelist.input

```
&time_control
run_days           = 0,
run_hours          = 0,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2009, 2009, 2009,
start_month        = 03, 03, 03,
start_day          = 01, 01, 01,
start_hour         = 00, 00, 00,
start_minute       = 00, 00, 00,
start_second       = 00, 00, 00,
end_year           = 2009, 2009, 2009,
end_month          = 03, 03, 03,
end_day            = 08, 08, 08,
end_hour           = 00, 00, 00,
end_minute         = 00, 00, 00,
end_second         = 00, 00, 00,
interval_seconds   = 10800
input_from_file    = .true.,.true.,.true.,
history_interval   = 180, 60, 60,
```

```

frames_per_outfile      = 1000, 1000, 1000,
restart                 = .false.,
restart_interval        = 5000,
io_form_history         = 2
io_form_restart        = 2
io_form_input          = 2
io_form_boundary       = 2
debug_level            = 0
/

```

&domains

```

eta_levels = 1.0000, 0.9975, 0.9953, 0.9931, 0.9888,
             0.9837, 0.9779, 0.9715, 0.9643, 0.9566,
             0.9482, 0.9393, 0.9298, 0.9198, 0.9093,
             0.8982, 0.8746, 0.8490, 0.8215, 0.7923,
             0.7613, 0.7286, 0.6942, 0.6582, 0.5815,
             0.4987, 0.4101, 0.3157, 0.2158, 0.1105,
             0.0000,
time_step              = 90,
time_step_fract_num   = 0,
time_step_fract_den   = 1,
max_dom                = 3,
s_we                  = 1, 1, 1,
e_we                  = 80, 25, 51,
s_sn                  = 1, 1, 1,
e_sn                  = 80, 25, 51,
s_vert                = 1, 1, 1,
e_vert                = 31, 31, 31,
num_metgrid_levels    = 31,
dx                    = 15000,5000,1000,
dy                    = 15000,5000,1000,
grid_id               = 1, 2, 3,
parent_id              = 0, 1, 2,
i_parent_start        = 1, 36, 6,
j_parent_start        = 1, 36, 7,
parent_grid_ratio      = 1, 3, 5,
parent_time_step_ratio = 1, 3, 5,
feedback              = 1,
smooth_option         = 0
/

```

&physics

```

mp_physics            = 2, 2, 2,
ra_lw_physics         = 1, 1, 1,
ra_sw_physics         = 1, 1, 1,
radt                  = 15, 5, 1,
sf_sfclay_physics    = 1, 1, 1,
sf_surface_physics   = 1, 1, 1,
bl_pbl_physics        = 1, 1, 1,
bldt                  = 0, 0, 0,

```

```

cu_physics           = 1,  1,  0,
cudt                 = 5,  5,  5,
isfflx               = 1,
ifsnow               = 0,
icloud               = 1,
surface_input_source = 1,
num_soil_layers      = 5,
ucmcall              = 0,
mp_zero_out          = 0,
maxiens              = 1,
maxens               = 3,
maxens2              = 3,
maxens3              = 16,
ensdim               = 144,
/

&fdda
/

&dynamics
w_damping            = 0,
diff_opt             = 1,
km_opt               = 4,
base_temp            = 290.
damp_opt             = 0,
zdamp                = 5000., 5000., 5000.,
dampcoef             = 0.01, 0.01, 0.01
khdif                = 0,  0,  0,
kvdif                = 0,  0,  0,
smdiv                = 0.1, 0.1, 0.1,
emdiv                = 0.01, 0.01, 0.01,
epssm                = 0.1, 0.1, 0.1
time_step_sound      = 4,  4,  4,
h_mom_adv_order      = 5,  5,  5,
v_mom_adv_order      = 3,  3,  3,
h_sca_adv_order      = 5,  5,  5,
v_sca_adv_order      = 3,  3,  3,
non_hydrostatic      = .true., .true., .true.,
pd_moist              = .true., .true., .true.,
pd_scalar             = .true., .true., .true.,
pd_chem              = .true., .true., .true.,
pd_tke                = .true., .true., .true.,
/

&bdy_control

spec_bdy_width       = 5,
spec_zone             = 1,
relax_zone            = 4,
specified              = .true., .false., .false.,

```

```
periodic_x           = .false.,.false.,.false.,
symmetric_xs        = .false.,.false.,.false.,
symmetric_xe        = .false.,.false.,.false.,
open_xs             = .false.,.false.,.false.,
open_xe             = .false.,.false.,.false.,
periodic_y          = .false.,.false.,.false.,
symmetric_ys        = .false.,.false.,.false.,
symmetric_ye        = .false.,.false.,.false.,
open_ys             = .false.,.false.,.false.,
open_ye             = .false.,.false.,.false.,
nested              = .false., .true., .true.,
/
```

```
&grib2
/
```

```
&namelist_quilt
nio_tasks_per_group = 0,
nio_groups = 1,
/
```