sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.08.14.40-TDI

SENSIBILIDADE DO MODELO MM5 NO PROGNÓSTICO DO VENTO ÀS DIFERENTES PARAMETRIZAÇÕES DE CAMADA LIMITE PLANETÁRIA NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA

Elizabeth Diane de Jesus Reuter

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Gilberto Fernando Fisch, aprovada em 28 de março de 2013.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DMA8UH>

INPE
São José dos Campos
2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GB)
Serviço de Informação e Documentação (SID)
Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/6921
Fax: (012) 3208-6919
E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)
Drª Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)
Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)
Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)
Drª Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação
Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)

sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.08.14.40-TDI

SENSIBILIDADE DO MODELO MM5 NO PROGNÓSTICO DO VENTO ÀS DIFERENTES PARAMETRIZAÇÕES DE CAMADA LIMITE PLANETÁRIA NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA

Elizabeth Diane de Jesus Reuter

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo Dr. Gilberto Fernando Fisch, aprovada em 28 de março de 2013.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DMA8UH>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

R319s

Reuter, Elizabeth Diane de Jesus.
Sensibilidade do modelo MM5 no prognóstico do vento às diferentes parametrizações de Camada Limite Planetária no Centro de Lançamento de Alcântara / Elizabeth Diane de Jesus Reuter . – São José dos Campos : INPE, 2013.
xxxii + 188 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.08.14.40-TDI)

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.
Orientador : Dr. Gilberto Fernando Fisch.

1. Centro de Lançamento de Alcântara(CLA). 2. parametrizações de PBL. 3. MM5. I.Título.

CDU 551.509.313.4(812.1)

Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de *Doutor(a)* em

Meteorologia

Dra. Chou Sin Chan

Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Gilberto Fernando Fisch

Orientador(a) / IAE/DCTA / SJCampos - SP

Dr. Marcos Daisuke Oyama

Membro da Banca / IAE/DCTA / SJCampos - SP

Dr. Cleber de Souza Correa

Convidado(a) / DECEA / São José dos Campos - SP

Dr. Claudio de Castro Pellegrini

Convidado(a) / UFSJ / São João Del Rei - MG

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

Aluno (a): *Elizabeth Diane de Jesus Reuter*

São José dos Campos, 28 de Março de 2013

Ao povo do Norte,

filhos da Amazônia brasileira,

brasileiros patriotas de outras longitudes e latitudes,

que por muitas vezes,

é mutilado pela consciência nacional...

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre esteve comigo.

Ao Fred, meu amado companheiro, pela enorme paciência e amor que teve comigo durante estes cinco anos e a sua colaboração durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu inestimável orientador, Dr. Gilberto Fisch, pela enorme compreensão, incentivo e aprendizado durante todas as fases do doutorado.

À minha família, em especial à minha querida mãe Emília e à minha irmã Cristina, pelo incondicional apoio psicológico.

Ao amigo, Marcos Yoshida, pela grande ajuda no desenvolvimento deste trabalho, especialmente no suporte estatístico e muito mais pelas valiosas horas de discussão sobre os resultados.

Ao caríssimo Capitão da Força Aérea Brasileira (FAB), Gerson L. Camillo, pela enorme ajuda prestada (física e remotamente) no suporte e na utilização do modelo numérico empregado neste trabalho.

Ao Paulo Geovani Iriart pela grande ajuda durante as simulações numéricas.

Ao Dr. Jorge Conforte pelo suporte na utilização das *wavelets* neste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, aos Docentes pelos cursos ministrados. À Coordenadora do curso de Pós-Graduação em Meteorologia, Dra. Paulete, pelo apoio, incentivo e compreensão. Às secretárias Simone e Luana pela dedicação aos alunos. Ao César pelo suporte técnico em informática.

Aos membros da banca examinadora: Dra. Chou Sin Chan, Dr. Marcos Daisuke Oyama, Dr. Cleber de Souza Correa e Dr. Claudio de Castro Pellegrini pelas valiosas sugestões e correções que acrescentaram neste trabalho.

Ao Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), na pessoa do Ten. Cel. Cléber, Ten. Cel. Gisler e Cap. Miguel pelo consentimento da utilização do modelo MM5 e também, ao apoio dado pelo Suboficial Tadeu, Sgt. Jonas e analistas Mauro e Richard.

À Divisão de Ciências Atmosféricas – ACA pelas instalações e aos Técnicos Jorge e Evandro pela disponibilidade e concessão dos dados.

À Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária - INFRAERO pelo consentimento de afastamento durante três meses para a dedicação à tese. À Coordenadora Márcia, ao Gerente de Meteorologia, Marcos Andrade, e aos colegas Previsores do Centro Meteorológico de Guarulhos pelo apoio.

Ao amigo Rodrigo pelo grande encorajamento ao meu ingresso no Doutorado e apoio durante este trabalho.

Aos meus ortopedistas Dr. Cristiano Horsi e Dr. César e as minhas fisioterapeutas Lilian e Briana, que me ajudaram muito no tratamento do joelho durante os últimos dois anos.

Aos amigos Mário, Zeni, Vanda, Viviane de Oliveira, Marisa, Nádia, Leandro, Rosário, Suelen e Viviane Algarve pela amizade e apoio durante todo o curso de doutorado.

RESUMO

O regime de vento e as condições da Camada Limite Planetária (PBL) no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) são estudados a fim de propor um melhor desempenho da previsão do vento. Os resultados observacionais obtidos neste estudo estiveram de acordo com os estudos observacionais anteriores da região do CLA. A sensibilidade das simulações para ajustes de parametrizações da PBL é investigada usando a quinta geração Pennsylvania State University-NCAR Modelo de Mesoescala (MM5). Três parametrizações de camada limite utilizadas, além da parametrização de referência, foram selecionadas para avaliação, das quais duas [esquemas de Blackadar (BLK) e Previsão de Médio Alcance (MRF)] são esquemas simples de primeira ordem e não locais, ETA e BT que são esquemas de ordem de fechamento de 1,5 e 2, respectivamente e difusão vertical local. Os dados utilizados foram dos experimentos ocorridos durante os períodos seco (Murici2008) e chuvoso (GPM2010) no CLA, no Maranhão. As comparações são feitas entre as médias das componentes zonal e meridional do vento observadas e simuladas. Os esquemas de MRF e BLK produziram melhores resultados que aqueles de ETA e BT. Apesar disso, MRF e BLK subestimam em torno de 16% no período chuvoso e o superestimam em média 18% no período seco as componentes zonal e meridional. Os resultados sugerem uma pequena melhoria na precisão geral das previsões a partir dos ajustes de velocidade de fricção e comprimento de rugosidade climatológicos do CLA, implementados nas parametrizações de MRF e BLK, respectivamente. Efetivamente, houve uma melhora na previsão do vento no CLA para o período chuvoso. Em contrapartida, para o período seco os ajustes propostos ainda não foram bem definidos em termos de ganho, sendo necessários novos ajustes nas parametrizações MRF ou BLK combinado às outras opções físicas, principalmente de radiação, do modelo MM5.

SENSITIVITY OF WIND FORECASTS WITH THE MM5 MODEL TO DIFFERENT PLANETARY BOUNDARY LAYER PARAMETRIZATIONS AT THE ALCÂNTARA LAUNCH CENTER

ABSTRACT

The wind regime and conditions of the Planetary Boundary Layer (PBL) in Alcântara Launch Center (ALC) are studied in order to offer better performance in wind forecasting. The observational results obtained in this study were in agreement with previous observational studies of the CLA. The sensitivity of simulations to changes in the planetary boundary layer (PBL) parameterization is investigated using the modified fifth generation Pennsylvania State University-NCAR Mesoscale Model (MM5) and observations from two field campaigns in distinct periods. Three boundary layer parameterizations, in addition to the current parameterization, were selected for evaluation, of which two (Blackadar (BLK) and Medium Range Forecast (MRF) schemes) are simple non-local first order schemes, ETA and BT are schemes of closure order 1.5 and 2, respectively, and local vertical diffusion. The data are from two experiments which occurred during the dry (Murici2008) and wet (GPM2010) seasons at the ALC, in Maranhão. The comparisons are made among the means of the zonal and meridional components of observed and simulated winds. The MRF and BLK schemes produced better results than the ETA and BT schemes. Nevertheless, MRF and BLK underestimate the zonal and meridional wind components by around 16% in the rainy season and overestimate them by on average 18% in the dry season. The results suggest that there is a small improvement in the general accuracy of the predictions with the adjustments of friction velocity and climatological roughness of the ALC implemented in the MRF and BLK parameterizations, respectively. Effectively, there was an improvement in the wind prediction at the ALC for the rainy season. On the other hand, for the dry season, gains from the changes proposed in this work were not clear, and new adjustments in the MRF or BLK parameterizations combined with other physics options, principally radiation, are needed in the MM5 model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	**Mapa de localização geográfica e vista aérea do Centro de Lançamento de Alcântara, praia, e mar da Baía de São Marcos-MA.....**	**6**
Figura 2.2	**Média do vetor vento período 2000-2010 (m/s) para o mês de março.....**	**7**
Figura 2.3	**Média do vetor vento período 2000-2010 (m/s) para o mês de setembro.....**	**7**
Figura 2.4	**Esquema do escoamento do vento na região de transição oceano-continente.....**	**9**
Figura 3.1	**Vista panorâmica do Centro de Lançamento de Alcântara.....**	**17**
Figura 3.2	**Precipitação média mensal observada (estação de superfície) versus estimada (GPCP) no período de 16 anos (1993-2008) para a região do CLA.....**	**18**
Figura 3.3	**Estação meteorológica automática de superfície, instalada junto ao Setor de Meteorologia no CLA.....**	**19**
Figura 3.4	**Fluxograma de funcionamento do modelo de mesoescala MM5 instalado no ICEA.....**	**23**
Figura 3.5	**Domínio das grades de resolução horizontal 18 km (G1) e 6 km (G2); domínio das grades de resolução horizontal 9 km (G1), 3 km (G2) e 1 km (G3) e domínio da grade de resolução horizontal de 3 km (G1).....**	**35**
Figura 4.1	**Carta sinótica de superfície e imagem de satélite no canal infravermelho para os dias 16, 19 e 24 de setembro de 2008 no horário das 12:00 UTC.....**	**38**
Figura 4.2	**Nebulosidade predominante durante o período de 16 a 26/set/2008 (seco) no CLA.....**	**40**
Figura 4.3	**Séries temporais de temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), pressão atmosférica (hPa), radiação solar (W/m2) e velocidade do vento (m/s) para o período de 16 a 26/09/2008.....**	**44**
Figura 4.4	**Séries temporais de pressão atmosférica (hPa) no período de 17 a 24 de set/2008.....**	**46**
Figura 4.5	**Wavelet da pressão atmosférica no período de 17 a 24 de set/2008.....**	**47**

Figura 4.6 Cone de influência para pressão atmosférica..... 47

Figura 4.7 Wavelet da componente meridional do vento (v) no período de 16 a 25 de set/2008..... 48

Figura 4.8 Cone de influência para o componente v do vento..... 48

Figura 4.9 Imagens do satélite GOES-10, no canal infravermelho, (a) dia 21/03 às 21:00 UTC e (b) dia 24/03 às 21:00 UTC..... 55

Figura 4.10 Série temporal de chuva no período de 19 a 25 de mar/2010..... 55

Figura 4.11 Nebulosidade predominante durante o período de 19 a 25/mar/2010 (chuvoso) no CLA..... 57

Figura 4.12 Séries temporais de temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), pressão atmosférica (hPa), radiação solar (W/m2) e velocidade do vento (km/h) para o período de 19 a 25/03/2010..... 58

Figura 4.13 Diagramas termodinâmicos Skew T-Log p das sondagens realizadas no CLA às 12:00 e 18:00 UTC nos dias 16, 17 e 18/set/2008..... 64

Figura 4.13 Diagramas termodinâmicos Skew T-Log p das sondagens realizadas no CLA às 12:00 e 18:00 UTC nos dias 19, 20, 21 e 22/set/2008 (continuação)..... 65

Figura 4.13 Diagramas termodinâmicos Skew T-Log p das sondagens realizadas no CLA às 12:00 e 18:00 UTC nos dias 22, 23, 24 e 25/set/2008 (conclusão)..... 66

Figura 4.14 Perfis verticais da velocidade e direção do vento para o período diurno (12:00 e 18:00 UTC) e Perfis verticais da velocidade e direção do vento para o período noturno (00:00 e 06:00 UTC) a partir de sondagens de 16 a 26/09/2008..... 68

Figura 4.15 Perfis verticais da velocidade e direção do vento para o período diurno (12:00 e 18:00 UTC) e Perfis verticais da velocidade e direção do vento para o período noturno (00:00 e 06:00 UTC) a partir de sondagens de 19 a 25/03/2010..... 70

Figura 4.16 Diagramas termodinâmicos Skew T-Log p das sondagens realizadas no CLA às 12:00 e 18:00 UTC nos dias 19, 20 e 21/mar/2010..... 72

Figura 4.16 Diagramas termodinâmicos Skew T-Log p das sondagens realizadas no CLA às 12:00 e 18:00 UTC nos dias 22, 23 e 24/mar/2010 (continuação)..... 73

Figura 4.16 Diagramas termodinâmicos Skew T-Log p das sondagens realizadas no CLA às 12:00 UTC nos dia 25/mar/2010 (conclusão).... 74

Figura 5.1 Esquema utilizado nas análises gráficas e estatísticas..... 77

Figura 5.2 Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 17set2008 às 00:00UTC a 20set2008 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 81

Figura 5.3 Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 17set2008 às 00:00UTC a 20set2008 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 81

Figura 5.4 Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 17set2008 às 00:00UTC a 20set2008 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 82

Figura 5.5 Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 17set2008 às 00:00UTC a 20set2008 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 82

Figura 5.6 Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 17set2008 às 12:00UTC a 20set2008 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 83

Figura 5.7 Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 17set2008 às 12:00UTC a 20set2008 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 83

Figura 5.8 Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 17set2008 às 12:00UTC a 20set2008 às 12:00UTC - Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 84

Figura 5.9 Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 17set2008 às 12:00UTC a 20set2008 às 12:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 84

Figura 5.10 Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 18set2008 às 00:00UTC a 21set2008 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 85

Figura 5.11 Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 18set2008 às 00:00UTC a 21set2008 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 85

Figura 5.12 Figura 5.12 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 18set2008 às 00:00UTC a 21set2008 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 86

Figura 5.13 Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 18set2008 às 00:00UTC a 21set2008 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 86

Figura 5.14 Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 18set2008 às 12:00UTC a 21set2008 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 87

Figura 5.15 Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 18set2008 às 12:00UTC a 21set2008 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 87

Figura 5.16 Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 18set2008 às 12:00UTC a 21set2008 às 12:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 88

Figura 5.17 **Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 18set2008 às 12:00UTC a 21set2008 às 12:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 88**

Figura 5.18 **Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 19mar2010 às 00:00UTC a 22mar2010 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 93**

Figura 5.19 **Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 19mar2010 às 00:00UTC a 22mar2010 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 93**

Figura 5.20 **Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 19mar2010 às 00:00UTC a 22mar2010 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 94**

Figura 5.21 **Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 19mar2010 às 00:00UTC a 22mar2010 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 94**

Figura 5.22 **Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 19mar2010 às 12:00UTC a 22mar2010 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 95**

Figura 5.23 **Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 19mar2010 às 12:00UTC a 22mar2010 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 95**

Figura 5.24 **Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 19mar2010 às 12:00UTC a 22mar2010 às 12:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 96**

Figura 5.25 **Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 19mar2010 às 12:00UTC a 22mar2010 às 12:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 96**

Figura 5.26 **Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 20mar2010 às 00:00UTC a 23mar2010 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 97**

Figura 5.27 **Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 20mar2010 às 00:00UTC a 23mar2010 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 97**

Figura 5.28 **Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 20mar2010 às 00:00UTC a 23mar2010 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 98**

Figura 5.29 **Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 20mar2010 às 00:00UTC a 23mar2010 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 98**

Figura 5.30 **Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 20mar2010 às 12:00UTC a 23mar2010 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 99**

Figura 5.31 **Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 20mar2010 às 12:00UTC a 23mar2010 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 99**

Figura 5.32 **Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 20mar2010 às 12:00UTC a 23mar2010 às 12:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 100**

Figura 5.33 Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 20mar2010 às 12:00UTC a 23mar2010 às 12:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF..... 100

Figura 5.34 Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 20set2008 às 00:00UTC com as parametrizações ETA; BLK; B-T e MRF e a observação da radiossondagem na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas..... 102

Figura 5.35 Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 20set2008 às 12:00UTC com as parametrizações ETA; BLK; B-T e MRF e a observação da radiossondagem na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas..... 103

Figura 5.36 Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 21set2008 às 00:00UTC com as parametrizações ETA; BLK; B-T e MRF e a observação da radiossondagem na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas..... 104

Figura 5.37 Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 21set2008 às 12:00UTC com as parametrizações ETA; BLK; B-T e MRF e a observação da radiossondagem na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas..... 105

Figura 5.38 Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 22mar2010 às 00:00UTC com as parametrizações ETA; BLK; B-T e MRF e a observação da radiossondagem na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas..... 107

Figura 5.39 Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 22mar2010 às 12:00UTC com as parametrizações ETA; BLK; B-T e MRF e a observação da radiossondagem na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas..... 108

Figura 5.40 Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 23mar2010 às 00:00UTC com as parametrizações ETA; BLK; B-T e MRF e a observação da radiossondagem na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas..... 109

Figura 5.41 Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 23mar2010 às 12:00UTC com as parametrizações ETA; BLK; B-T e MRF e a observação da radiossondagem na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas..... 110

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	**Esquemas de parametrização de PBL incluídos no MM5.....**	**23**
Tabela 3.2	**Configuração das grades usadas para simulações e opções de parametrizações.....**	**29**
Tabela 4.1	**Análise da nebulosidade na região do CLA em Set/2008.....**	**41**
Tabela 4.2	**Critérios de classificação para jatos de baixos níveis.....**	**50**
Tabela 4.3	**Critérios de classificação para vento máximo (VM).....**	**51**
Tabela 4.4	**JBNs detectados no período seco – 16 a 26/09/2008.....**	**51**
Tabela 4.5	**Ventos máximos detectados no período seco – 16 a 26/09/2008.....**	**53**
Tabela 4.6	**JBNs detectados no período chuvoso – 19 a 25/03/2010.....**	**60**
Tabela 4.7	**Ventos máximos detectados no período chuvoso – 19 a 25/03/2010.**	**61**
Tabela 4.8	**Valor do índice CAPE.....**	**63**
Tabela 5.1	**Fontes de dados observados e critérios para comparação do vento**	**75**
Tabela 5.2	**Definição da CONF I.....**	**76**
Tabela 5.2.1	**Critério de avaliação adotado para Willmott.....**	**111**
Tabela 5.2.2	**Critério de avaliação adotado para o RMSE.....**	**112**
Tabela 5.3	**Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 00:00UTC para o período do dia 17 às 00:00UTC ao dia 21set2008 às 00:00UTC, considerando-se os dois domínios.....**	**115**
Tabela 5.4	**Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 12:00UTC para o período do dia 16 às 12:00UTC ao dia 21set2008 às 12:00UTC, considerando-se os dois domínios.....**	**117**
Tabela 5.5	**Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 00:00UTC para o período do dia 20 às 00:00UTC ao dia 25 mar2010 às 00:00UTC, considerando-se os dois domínios.....**	**119**

Tabela 5.6 Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 12:00UTC para o período do dia 20 às 12:00UTC ao dia 25mar2010 às 12:00UTC, considerando-se os dois domínios..... 121

Tabela 5.7 Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) para o dia 21set2008 às 12:00UTC, considerando-se somente um domínio..... 124

Tabela 5.8 Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) para o dia 22mar2010 às 00:00UTC, considerando-se somente um domínio..... 125

Tabela 5.9 Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) para o dia 21set2008 às 12:00UTC, considerando-se três domínios..... 127

Tabela 5.10 Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) para o dia 22mar2010 às 00:00UTC, considerando-se três domínios..... 128

Tabela 5.11 Índices estatísticos obtidos para as componente zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) para o dia 21set2008 às 12:00UTC, considerando-se dois domínios e dados FNL..... 130

Tabela 5.12 Índices estatísticos obtidos para as componente zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) para o dia 22mar2010 às 00:00UTC, considerando-se dois domínios e dados FNL..... 131

Tabela 5.13 Definição da CONF II..... 133

Tabela 5.14 Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 00:00UTC para o período do dia 17 às 00:00UTC ao dia 21set2008 às 00:00UTC, considerando-se os dois domínios..... 135

Tabela 5.15 Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 12:00UTC para o período do dia 16 às 12:00UTC ao dia 21set2008 às 12:00UTC, considerando-se os dois domínios..... 136

Tabela 5.16 Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 00:00UTC para o período do dia 20 às 00:00UTC ao dia 25mar2010 às 00:00UTC, considerando-se os dois domínios..... 137

Tabela 5.17 Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 12:00UTC para o período do dia 20 às 12:00UTC ao dia 25mar2010 às 12:00UTC, considerando-se os dois domínios..... 138

Tabela 5.18 Definição da CONF III..... 139

Tabela 5.19 Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 00:00UTC para o período do dia 17 às 00:00UTC ao dia 21set2008 às 00:00UTC, considerando-se os dois domínios..... 140

Tabela 5.20 Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 12:00UTC para o período do dia 16 às 12:00UTC ao dia 21set2008 às 12:00UTC, considerando-se os dois domínios..... 141

Tabela 5.21 Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 00:00UTC para o período do dia 20 às 00:00UTC ao dia 25mar2010 às 00:00UTC, considerando-se os dois domínios..... 142

Tabela 5.22 Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 12:00UTC para o período do dia 20 às 12:00UTC ao dia 25mar2010 às 12:00UTC, considerando-se os dois domínios..... 143

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACA	Divisão de Ciências Atmosféricas
CALMET	Californian Meteorological Model
CAPE	Convective Available Potential Energy
CDC	Climate Diagnostics Center
CINE	Convective Inhibition Energy
CIT	Confluência Intertropical
CLA	Centro de Lançamento de Alcântara
CLC	Camada Limite Convectiva
CLP	Camada Limite Planetária
CLS	Camada Limite Superficial
CMA-GR	Centro Meteorológico de Aeródromo de Guarulhos
CNMA	Centro Nacional de Meteorologia Aeronáutica
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
ENOS	El Niño Oscilação Sul
FNL	Final Analysis
GFS	Global Forecast System
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GPCP	Global Precipitation Climatology Program
GPM	Global Precipitation Measurement
GPS	Sistema de Posicionamento Global
GrADS	Grid Analysis and Display System

GRIB	Gridded Binary or General Regularly distributed Information in Binary form
GWS	Global Wavelets Power Spectrum
HL	Hora Local
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IAG/USP	Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo
ICEA	Instituto de Controle do Espaço Aéreo
INFRAERO	Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária
JBN	Jatos de Baixos Níveis
LPM/UFRJ	Laboratório de Prognósticos em Mesoescala, Universidade Federal do Rio de Janeiro
LI	Linhas de Instabilidade
MAD	Desvio medido
MAE	Erro Médio Absoluto
MM5	Modelo de mesoescala de quinta geração
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NEB	Nordeste Brasileiro
NOAH	National Oceanic and Atmospheric Administration
NORAPS	Navy Operational Regional Atmospheric Prediction System
PBL	Boundary Layer Planetary
P, D&I	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
PNT	Previsão Numérica do Tempo
PSU	Pennsylvania State University
REDEMET	Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica

RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RMSE	Root Mean Square Error
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SF	Sistemas Frontais
SLP	Setor de Preparação e Lançamento
TKE	Turbulent Kinetic Energy
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VLS	Veículo Lançador de Satélites
VSB	Foguetes de sondagem
VCAN	Vórtice Ciclônico em Altos Níveis
WPS	Weather Prediction System
WRF	Weather Research and Forecasting
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....1

1.2 Objetivos 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....5

2.1. Aspectos Meteorológicos na Região de Estudo.....5

2.2. Estudos Observacionais do Vento no CLA.....8

2.3. Estudos de Modelos de PNT.....10

3 DADOS E METODOLOGIA.....17

3.1. Área de Estudo.....17

3.2. Dados Meteorológicos Coletados no CLA.....18

3.2.1. Estação Meteorológica de Superfície.....18

3.2.2. Dados de Altitude.....19

3.3. Dados de Análises e Previsões Globais do National Centers for Environmental Prediction (NCEP).....20

3.4. Dados de FNL do NCEP.....20

3.5. Descrição do Modelo MM5.....21

3.5.1. Descrição dos Experimentos.....26

3.6. Metodologia.....30

3.6.1. Séries Temporais.....30

3.6.2. Análise por Wavelets ou Ondeletas.....30

3.6.3. Validação do Modelo Numérico MM5.....32

3.6.4. Avaliação do Modelo MM5.....33

4 RESULTADOS OBSERVACIONAIS.....37

4.1. Condições Atmosféricas Durante os Experimentos.....37

4.1.1. Período Seco (Setembro 2008).....37

4.1.1.1. Aspectos Sinóticos.....37

4.1.1.2. Séries Temporais dos Elementos Meteorológicos de Superfície.....42

4.1.2. Período Chuvoso (ano 2010).....54

4.1.2.1. Aspectos Sinóticos.....54

4.1.2.2. Séries Temporais dos Elementos Meteorológicos de Superfície.....57

4.2. Perfil Termodinâmico e Cinemático da Atmosfera Durante as Campanhas Murici2008 (Período Seco) e GPM2010 (Período Chuvoso.....61

4.2.1. Campanha Murici (Set/2008 – Período Seco).....62

4.2.2. Campanha GPM (Mar/2010 – Período Chuvoso).....69

5 RESULTADOS.....75

5.1. Dados para Verificação.....75

5.2. Experimento CONF I.....76

5.3. Desempenho da CONF I.....76

5.3.1. Perfis de Velocidade e Direção do Vento.....101

5.4. Análise de Willmott.....111

5.4.1. Discussão dos Resultados da CONF I Considerando-se Inicializações das 00:00 e 12:00UTC.....122

5.5. Testes de Resolução de Grade.....123

5.6. Testes de Sensibilidade de Dados de Reanálise.....129

5.7. Ajustes dos Parâmetros de Micrometeorologia.....132

5.7.1. Ajuste de u_* na parametrização MRF de PBL.....132

5.7.1.2. Desempenho da CONF II.....133

5.7.1.2.1. Discussão dos Resultados da CONF II Considerando-se Inicializações das 00:00 e 12:00UTC.....139

5.7.2. Ajuste de u_* e Z_0 na parametrização BLK de PBL.....139

5.7.2.1. Discussão dos Resultados da CONF III Considerando-se Inicializações das 00:00 e 12:00UTC.....145

6 CONCLUSÃO.....147

6.1. Sugestão para trabalhos futuros.....152

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....153

APÊNDICE A.....159

ANEXO A.....181

1 INTRODUÇÃO

Há pouco mais de sessenta anos teve início a era moderna de Previsão Numérica de Tempo (PNT) através da criação do *Joint Numerical Weather Prediction Unit*, mais tarde denominado de U. S *National Weather Service* (MOURA, 1996). No Brasil a PNT tem sido cada vez mais utilizada como uma ferramenta de obtenção de informação estratégica de planejamento e acompanhamento para diversas áreas de atividade econômica e social.

Nos dias atuais, no campo da Meteorologia Aeroespacial[1], a modelagem atmosférica e a simulação numérica estão necessariamente presentes no planejamento operacional e logístico dos lançamentos de veículos espaciais, visando garantir uma maior segurança das atividades em superfície e em voo e contribuindo assim, o sucesso dos lançamentos.

Um número grande de diferentes modelos de PNT tem sido utilizado nos setores operacionais de Meteorologia como ferramenta de trabalho. Entretanto, as limitações de cada um deles fazem com que, para cada problema particular, seja necessário elaborar ou ajustar um código de acordo com as necessidades específicas desejadas. No caso dos lançamentos de foguetes no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), a busca de um modelo capaz de prever com antecedência o escoamento do vento numa ampla área de transição oceano-continente é muito importante dada à necessidade operacional de se conhecer os ventos para a determinação de trajetória do veículo e/ou para estudos de dispersão de gases liberados pelos processos de combustão dos foguetes. Em alguns lançamentos, também é necessário realizar-se a recuperação da carga útil no mar, próximo à costa do CLA, sendo que esta recuperação é feita por helicópteros e requer um planejamento prévio com precisão.

---

[1] **Meteorologia Aeroespacial:** É a Meteorologia aplicada a problemas espaciais, a qual está permanentemente dedicada a acompanhar os avanços por meio de novas pesquisas, determinantes para a segurança de voo. No Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), ela apoia as missões de observação e análise dos elementos climáticos de superfície e de altitude e a elaboração da previsão do tempo.

De acordo com Fisch (1999) os foguetes são projetados e construídos para suportarem uma determinada carga pela ação do vento, além do fato de que sua trajetória, controle e guiagem são determinados pelo perfil do vento. Até uma altitude de 1000m, 88% das correções nas trajetórias dos foguetes, ao ascenderem verticalmente, são devido ao vento, enquanto que, acima de 5000m, a influência do vento na trajetória é de apenas 3%. Daí a necessidade de simular numericamente o campo de escoamento do vento para aumentar a segurança dos lançamentos.

Segundo Garrat e Pielke (1989), a comparação entre as saídas de modelos numéricos e observações é crucial para aceitação dos esquemas de parametrização física utilizado nos modelos. Entretanto, a rede de estações observacionais em algumas regiões não é densa suficiente para fazer uma comparação correta. Portanto, diversos experimentos de campo têm sido realizados com objetivo de extrair, através das observações coletadas de forma intensiva, as características e os parâmetros descritores da atmosfera, especialmente de camada limite de certa localidade.

A fim de melhorar o aspecto operacional em um nível cada vez mais adequado**,** deve-se investir em P, D&I para tentar responder a questões difíceis, tal como: o modelo consegue simular satisfatoriamente e acertadamente as condições atmosféricas? Se não, qual o motivo e/ou causa? Que parâmetros (ou pelo menos quais os mais importantes) no código do modelo que interferem nos resultados? O que precisa e pode ser ajustado mantendo a coerência física?

1.2 Objetivos

Em face à dificuldade do problema colocado, o objetivo desta pesquisa é de estudar e compreender melhor o regime de ventos na região do CLA e conseguir representar esta variação através de um modelo numérico de PNT. Para tanto, será utilizado a quinta geração do Modelo de Mesoescala da Penn State University denominado MM5 (GRELL et al., 1994; DUDHIA et al., 2003). Conseguir extrair evidências que caracterizam o comportamento da Camada Limite Planetária (CLP) e introduzir tais características da atmosfera local no modelo MM5 a fim de melhorar a previsão do vento.

Neste contexto, os objetivos específicos desta pesquisa são:

1) Estudar o comportamento cinemático da CLP no CLA a partir de dados coletados em períodos distintos do ano (épocas seca e chuvosa).

2) Entender e testar os esquemas de parametrizações de camada limite disponíveis no modelo MM5, ressaltando a vantagens e deficiências de cada um deles, a fim de encontrar aquele que melhor representa ou que mais se aproxima das características da CLP observada no CLA.

3) A partir da melhor opção encontrada de parametrização de camada limite para Alcântara, ajustar no código do modelo o valor da velocidade de fricção (u_*) e do comprimento de rugosidade correspondentes para Alcântara, juntamente com o refinamento de grades (melhor resolução).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos meteorológicos na região de estudo

A região nordestina está associada a temperaturas elevadas o ano todo, com amplitudes térmicas máximas em torno de 6°C. Mas a relativa homogeneidade térmica contrasta-se com a grande variabilidade espacial e temporal das chuvas. A distribuição da precipitação mensal no decorrer do ano sugere que mais de um fator relevante seja envolvido na sua produção em todo o Nordeste (KOUSKY, 1979).

Hastenrath e Lamb (1997) observaram que o escoamento de sudeste em baixos níveis do Hemisfério Sul, cruzando a linha do Equador, encontra os alísios de nordeste ao longo de um eixo de confluência no Hemisfério Norte, na mesma região do cavado equatorial, situado a algumas centenas de quilômetros ao norte da zona de máxima convergência. Foi observada também uma correspondência positiva entre as posições em latitude do eixo da Confluência Intertropical (CIT) e da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), e entre a posição e a intensidade desta zona, tanto intrasazonalmente como interanualmente.

Vários fenômenos atmosféricos atuam na região, isolados ou combinados entre si; tais como as Circulações de Hadley-Walker, ZCIT, Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL),Vórtice Ciclônico em Altos Níveis(VCAN), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS),Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), Linhas de Instabilidade (LI), penetração de Sistemas Frontais (SF), anomalias de temperaturas das águas oceânicas do Atlântico e do Pacífico, mecanismos de brisas marítimas e terrestres e tempestades isoladas, (HASTENRATH; LAMB,1977; FERREIRA et al., 2009; MACHADO et al. 2009). Também a própria topografia da região parece ser um fator determinante em escala local. Segundo Kayano e Andreoli (2009) entre os principais fatores climáticos que determinam a distribuição dos elementos climáticos no NEB e sua variação sazonal, estão sua posição geográfica, seu relevo, a natureza da sua superfície incluindo o albedo e os sistemas de pressão atmosférica atuantes na região.

A região específica de interesse deste estudo no Nordeste Brasileiro (NEB) é o Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), localizado no extremo norte do estado

do Maranhão, nas cercanias da cidade de Alcântara (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Mapa de localização geográfica e vista aérea do Centro de Lançamento de Alcântara, praia, e mar da baía de São Marcos – MA.
Fonte: Agência Espacial Brasileira (2010).

Estudos realizados por Fisch (1999) a partir de radiossondagens mostram que o regime de ventos apresenta características distintas entre as épocas chuvosas e secas. Na época chuvosa o vento é predominante de leste até 5.000 m de altitude, com velocidade de 7,0 – 8,0 m/s entre os níveis de 1.000 e 3.000 m. Na época chuvosa (mês característico março) o vento é mais fraco tendo a predominância dos ventos alísios na região do CLA. Na estação seca a predominância do vento é de leste até 8.000 m de altitude, tendo velocidade de 7,0 – 9,0 m/s, sendo mais intensos (mês característico setembro), devido à sobreposição dos ventos alísios e a brisa marítima. Observa-se que na camada mais baixa, até aproximadamente 2.000 m, o vento é mais intenso, com velocidade entre 10,0 e 10,5 m/s, apresentando uma pequena rotação para sudeste.

As Figuras 2.2 e 2.3 mostram o vetor médio do vento na superfície para mês de março (mês característico da época chuvosa) e de setembro (mês característico da época seca) a partir de médias mensais de reanálises do National Centers for

Environmental Prediction (NCEP)/ National Center for Atmospheric Research (NCAR). Observa-se que a direção é de leste / nordeste com velocidade entre 4,0 e 5,0 m/s na época chuvosa e na época seca a velocidade aumenta para em torno de 5,0 a 7,0m/s. Nota-se ainda, na Figura 2.2 que os ventos mais intensos estão confinados a região litorânea, e na Figura 2.3 observa-se que a atuação do vento de maior velocidade é percebida agora em uma faixa mais abrangente no interior do continente.

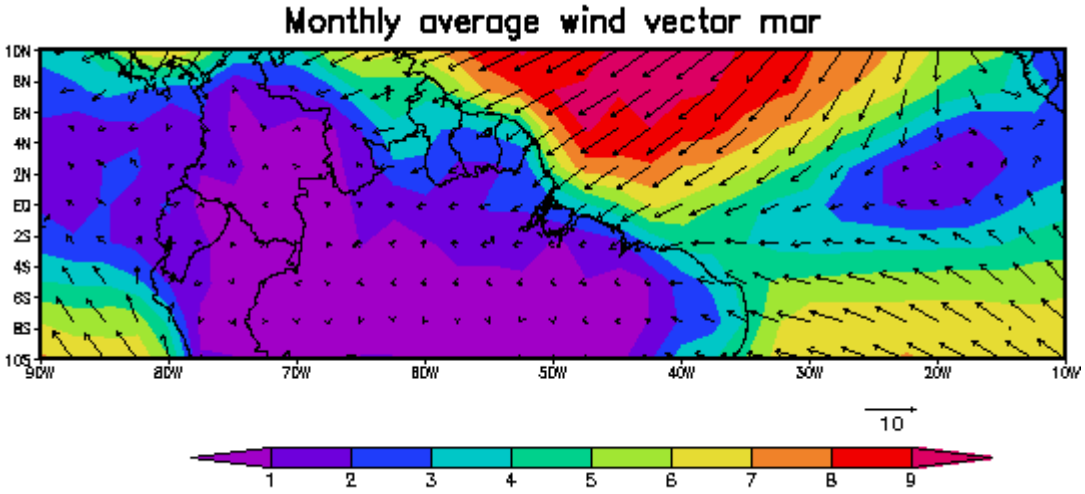


Figura 2.2 – Média do vetor vento período 2000-2010 (m/s) para o mês de março.

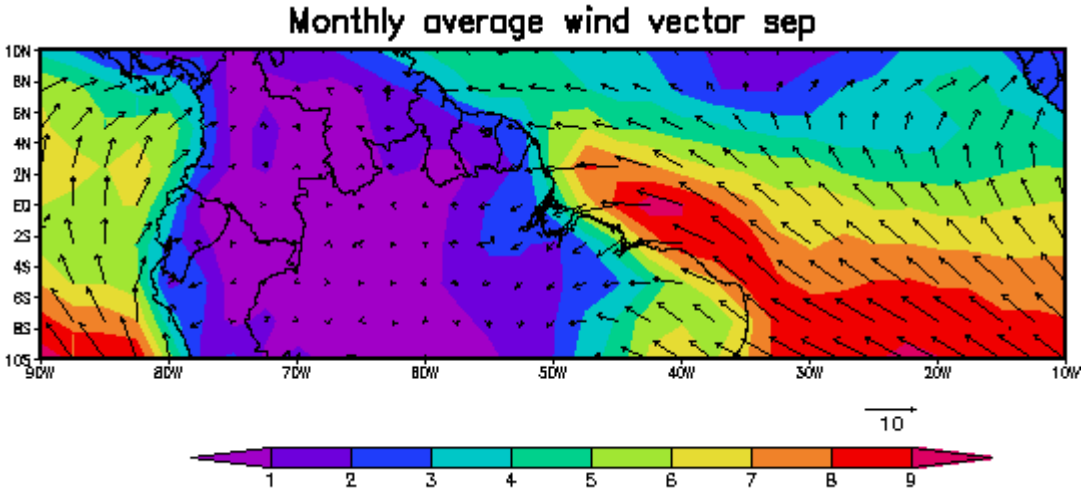


Figura 2.3 – Média do vetor vento período 2000-2010 (m/s) para o mês de setembro.

2.2 Estudos observacionais do vento no CLA

Muitos estudos observacionais na região do CLA têm sido realizados, dentre eles destacam-se: o estudo das características atmosféricas e ocorrência de DOLs (COUTINHO, 1999), o estudo das camadas limites planetárias marinha e continental (REUTER, 2002), perfil vertical do vento na camada limite superficial através de análise observacional (ROBALLO, 2007) e comparações em ensaios em túnel de vento (PIRES, 2009), estudo da camada limite interna desenvolvida em falésias com aplicação para o CLA (PIRES, 2009), estudo observacional da incursão de SF no NEB e sua influência na atmosfera do CLA (TAVARES, 2007), estudo estatístico do perfil de vento na camada limite superficial (GISLER, 2009).

Os experimentos de campo ocorridos na região do CLA impulsionaram várias pesquisas, sendo que, em uma delas, por exemplo, é abordado o escoamento do vento no CLA: Os autores Pires et al (2006), Roballo e Fisch (2008) citam que o vento proveniente do oceano apresenta um perfil inicialmente em equilibrio com a superfície lisa, entretanto, ao encontrar uma mudança brusca de rugosidade superficial (escoamento atinge a falésia) entra em desequilíbrio, posteriormente e de forma gradual, um novo equilíbrio é estabelecido. Estes estudos têm analisado a questão observacional, de modelagem numérica e de ensaios experimentais em túnel de vento. Devido ao fato desta interação mais complexa entre as condições favoráveis ao desenvolvimento do cisalhamento do vento (turbulência), é que existe o interesse de estudá-lo, uma vez que os foguetes sofrem intensa turbulência ao ascenderem na atmosfera.

Pires e Fisch (2006) observaram que o escoamento do vento em transição entre as superfícies oceânica e litorânea no Centro de Lançamento de Alcântara na camada limite superficial é complexo que, além da influência de troca de rugosidade e de fluxos térmicos de superfície, também é acentuado devido à existência de falésias. A velocidade e direção do vento variam no tempo e no espaço, em virtude da situação geográfica do local, da rugosidade da superfície, do relevo, da vegetação e do clima. No caso específico do CLA, os foguetes são lançados do Setor de Preparação e Lançamento – SPL que se situa junto à costa litorânea, e as radiossondagens operacionais são realizadas do Setor de Meteorologia, distante 5,7 km do SPL.

No CLA o vento é proveniente do oceano e seu perfil está inicialmente em equilíbrio com a superfície lisa. Ao ocorrer uma mudança brusca (escoamento atingir a falésia) e também uma mudança de rugosidade superficial há uma modificação do perfil do vento e um novo equilíbrio é obtido de forma gradual (Figura 2.4). Nesta interação ocorre o deslocamento vertical do nível zero da superfície devido à falésia e a vegetação arbustiva do local. Como a rampa de lançamento está numa localização próxima à costa litorânea, os foguetes sofrem a influência de intensa turbulência ao ascenderem verticalmente (ROBALLO, 2008).

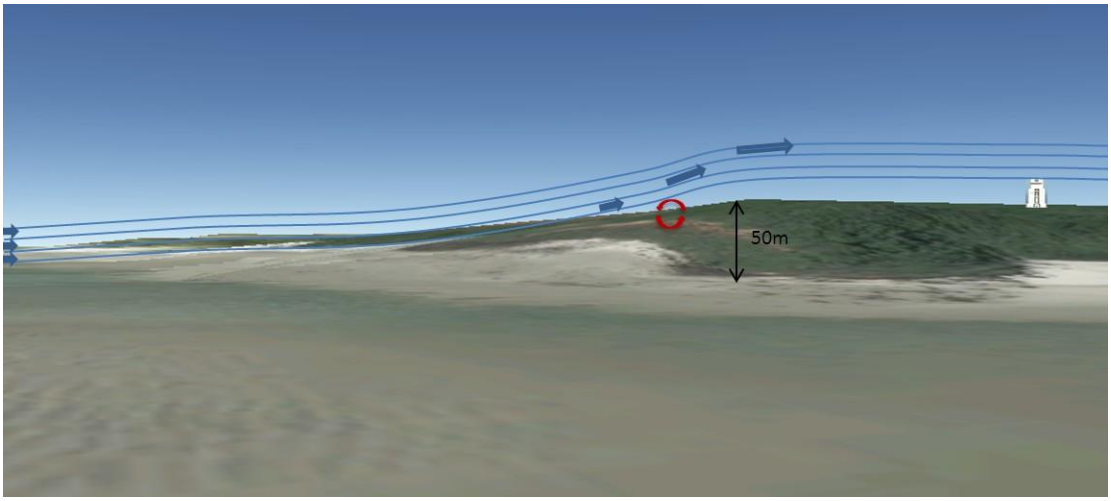


Figura 2.4 – Esquema do escoamento do vento na região de transição oceano-continente. Os esboços das curvas (setas) ilustram a redução da velocidade e a provável turbulência ocasionada pela barreira natural existente (falésia em torno de 50m).

Na região de estudo o vento é muito intenso independente da hora do dia (FISCH, 1999). De acordo com Loredo-Souza et al. (2004), para ventos com médias horárias acima de 10 m/s, o escoamento é turbulento o suficiente para suprimir os efeitos térmicos, podendo a atmosfera ser considerada neutra do ponto de vista de estabilidade térmica.

Roballo e Fisch (2008) estudaram o escoamento atmosférico no CLA (Alcântara-MA) a partir de dados coletados de uma torre anemométrica no período de 1995-1999 e 2004-2005. Eles analisaram os parâmetros meteorológicos que caracterizam o escoamento atmosférico na região próxima ao CLA e estudaram perfis de velocidades locais através das variáveis ($\boldsymbol{u}_*$ e Z_0) que compõem a equação do perfil logarítmico do vento. Os resultados por eles encontrados mostraram que a

velocidade de fricção ($\boldsymbol{u}_*$) foi igual a 0,32 m/s (0,46 m/s) para os meses de chuvosos (seco), enquanto que o parâmetro de rugosidade (Z_0) foi igual a 0,19 m (0,06 m) para os meses de chuva (seco), mostrando a sazonalidade destes parâmetros. Estes resultados serão utilizados no capítulo 5 desta pesquisa.

Marciotto e Fisch (2012) estudaram a turbulência e rajadas de vento com medições feitas por meio de aerovanes na taxa de amostragem de 0,5 Hz durante a estação seca de 2008 no CLA. Eles avaliaram a intensidade de turbulência (desvio padrão sobre a velocidade média), o fator de rajada (velocidade máxima de excesso de velocidade média), e amplitude de rajada (velocidade máxima menos a velocidade média). Encontraram que o ciclo diurno da direção média do vento de todos os aerovanes foi fortemente marcado, variando de 45 a 75 graus. Também, que as velocidades máxima e mínima foram de 3,0 e 9,0 m/s, respectivamente. A partir de séries temporais constataram que as rajadas e turbulências são intensificadas entre 08:00 e 13:00 Hora Local HL (11:00 e 16:00 UTC), segundo os mesmos, provavelmente devido à interação entre a brisa do mar e o vento da grande escala. No estudo eles observaram que a intensidade de turbulência, o fator de rajada, e amplitude de rajada estiveram fortemente correlacionados entre si, sendo que os valores máximos ocorreram cerca de 10:00 HL (13:00 UTC). Os valores de intensidade da turbulência ficaram entre 0,13 e 0,27 m/s, enquanto que fatores de rajada e de amplitude rajada foram entre 1,3 e 1,8 m/s, e entre 2,2 e 4,3 m/s, respectivamente.

2.3 Estudos de modelos de PNT

Muitas pesquisas são dedicadas a avaliar e/ou validar de que modo os modelos de PNT conseguem representar as condições atmosféricas. Nos últimos anos, alguns modelos têm sido desenvolvidos com o propósito de simular a CLP, variando de simples parametrizações a problemas sofisticados de fechamento das equações de segunda ordem ou maiores (MELLOR; YAMADA, 1982; DEGRAZIA et al., 1997), estes contribuindo para representação da turbulência atmosférica.

Um grande avanço no estudo da atmosfera foi possível a partir da introdução da modelagem numérica no século XX. É incontestável a importância da inclusão realística (bem representada) dos processos existentes na Camada Limite Planetária (CLP) e Superficial (CLS) nos modelos meteorológicos, principalmente nos modelos de mesoescala. Segundo Stull (1988), é na região inferior da atmosfera (por exemplo, CLP), onde existe contato com a superfície e os efeitos da viscosidade e da turbulência devem ser considerados, que se inicia ou ocorre a maior parte dos fenômenos meteorológicos.

A inclusão de processos físicos de transferência de energia e quantidade de movimento, tais como os fluxos da camada limite, a mistura vertical pela convecção úmida e seca, a formação de nuvens, precipitação, a interação dos campos de nuvens e a radiação, requer que os processos relevantes de escala subgrade sejam representados em termos de parametrização.

As parametrizações da CLP são formulações mais simples dos complexos processos físicos que ocorrem nas camadas mais próximas à superfície terrestre. O principal processo é a turbulência, que é a responsável pela distribuição vertical das propriedades oriundas dos fluxos de superfície (calor, umidade e *momentum*) dentro da camada limite planetária.

Na parametrização dos processos de transporte turbulento de quantidade de movimento, calor e massa na camada de ar imediatamente acima de vegetações é fundamental conhecer o valor da rugosidade aerodinâmica da superfície. A rugosidade é descrita pelo comprimento de rugosidade (Z_0) e deslocamento do plano zero (d). Estes parâmetros são essenciais em modelos baseados no método aerodinâmico (fluxo-gradiente) e em correções de medidas obtidas por correlação de vórtices turbulentos (LYRA ; PEREIRA, 2007).

Não há dúvida que os modelos numéricos são importantes ferramentas para representar os fenômenos atmosféricos que ocorrem em todas as escalas meteorológicas. Como contrapartida, os modelos possuem limitações, uma das quais é a utilização de parametrizações na modelagem dos processos da CLP. Deve ser considerado que a maioria dessas parametrizações foi desenvolvida a partir de medidas e estudos realizados em locais de latitude médias do hemisfério norte

(principalmente nos Estados Unidos e na Europa). Por isso, existe a necessidade do estudo da influência desses esquemas na simulação de variáveis meteorológicas em outras regiões, particularmente na região equatorial. São relativamente poucos os estudos de validação de modelos numéricos para a região equatorial.

Os modelos de mesoescala atualmente são usados para simular e para prever fenômenos meteorológicos de curto prazo. Para estas escalas de comprimento e de tempo, tais modelos somente produzem resultados precisos se eles representarem realisticamente as principais características e as variáveis da camada limite atmosférica.

Estudos anteriores (SEAMAN et al. 1989; RAO, 1999; TAO, 2000) investigaram o uso do modelo MM5 quanto a sua capacidade em simular as principais variáveis e o desenvolvimento da camada de mistura da atmosfera baixa. Entretanto, estes estudos de camada limite ocorreram em situações meteorológicas com alto grau de complexidade: área urbana, zona costeira, camada limite atmosférica em um furacão e etc..

No modelo MM5, podem-se classificar as parametrizações de PBL em dois grupos. O primeiro grupo inclui esquemas de PBL com base na camada superficial e nas variáveis da camada inteira (bulk) desenvolvidos por Blackadar (1976) e aquele conhecido como previsão média - MRF (Troen e Mahrt, 1986 e Holtslag e Boville,1993). No outro grupo, os fluxos turbulentos são funções da energia cinética turbulenta (com ordem de fechamento de 1,5), sendo conhecidos como o implementado no modelo ETA (JANJIC, 1994) e o desenvolvido por Burk Thompson (1989).

Reuter (2002) estudou o escoamento do vento sobre a região de abrangência do CLA, em um estudo de caso, através do modelo de mesoescala RAMS, o qual conseguiu obter uma simulação satisfatória. Entretanto, os resultados sugeriram que o modelo deveria ser melhorado nas parametrizações da radiação e de microfísica, especialmente para o oceano onde não ocorreu o fechamento do balanço de energia.

Por outro lado, Peréz et al. (2003) testaram o modelo MM5 para a previsão de vento em um local de terreno complexo no Vale do Ebro, na Espanha. O objetivo do estudo era avaliar dois modelos numéricos: REMO e MM5**,** para aperfeiçoar àquele modelo com melhores resultados, de modo a ser avaliada a sua possível utilização e aplicação prática, nomeadamente no planejamento de parques eólicos e estimativas de produção de energia eólica. Tal utilização está, obviamente, dependente da avaliação e validação do modelo no que toca à sua capacidade de simulação do regime local de ventos em uma determinada área. Eles testaram a influência de diferentes combinações de parametrizações e estratégias de aninhamento de grades para fornecer previsões realistas e eficientes, adaptadas às características da região. Segundo os autores o modelo MM5 foi capaz de fazer uma previsão de vento precisa em complexo terreno. A velocidade e direção do vento foram bem previstos pelo modelo.

Oyama (2003) implementou o modelo MM5 na ACA/IAE e vem utilizando-o em estudos de modelagem para a região do CLA: Oyama (2004) avaliou a sensibilidade do modelo MM5 às parametrizações de convecção profunda em grade reduzida; Oyama (2005) investigou as consequências climáticas da desertificação do Nordeste brasileiro por meio do modelo MM5; Oyama e Giarolla (2006) simularam linhas de instabilidade na costa norte do Brasil através do modelo MM5; Barros (2008) analisou o desempenho do modelo MM5 em simular os eventos de precipitação ocorridos nos anos de 2005 e 2006. Pereira Neto (2010) propôs ajustes no esquema de parametrização de convecção profunda Kain-Fritsch (KF2) com intuito de melhorar a previsão de precipitação sobre o CLA, particularmente para as estações chuvosa e seca; Nogueira (2010) comparou o uso de aproximação híbrida (uso simultâneo de esquemas de convecção implícita e explícita) e de esquema explícito somente em alta resolução para verificar qual estratégia traria ganho para a previsão de precipitação na região do CLA; Carvalho (2011) realizou ajustes no esquema KF2 com o intuito de reduzir os erros sistemáticos relacionados à precipitação da ZCIT na região central do Atlântico tropical. Todos estes estudos contribuíram para o melhor entendimento de como utilizar a modelagem atmosférica (em particular o modelo MM5) na região do CLA. Este conjunto de trabalhos mostra a capacidade do modelo em representar adequadamente as características da precipitação na região equatorial, em particular no CLA.

Chen et al. (2005) utilizaram o modelo MM5 para estudar o comportamento das parametrizações em áreas costeiras, entre Estados Unidos e Canadá, na região de separação entre o Golfo Maine e o oceano Atlântico, durante um período longo (quase dois meses) em relação aos dados de vento e fluxos de superfície. Constataram que o modelo MM5 prevê o vento melhor em condições de tempo mais estáveis enquanto que, durante passagens frontais, produz erros grandes na direção do vento.

Akylas et al. (2006) avaliaram a capacidade de previsão de temperatura e velocidade do vento perto da superfície, a partir de três parametrizações da camada limite planetária do modelo MM5 sobre a área de Atenas (Grécia) durante o período de verão de2002. As previsões de temperatura perto da superfície e do vento em um incremento de grade de 8 e 2 km sobre um terreno complexo de Atenas foram estatisticamente analisadas e correlacionadas às observações. Os resultados da análise mostraram que o aumento da resolução horizontal (de 8 a 2 km) aumenta a precisão das previsões, especialmente para a temperatura. No que diz respeito à destreza das previsões de cada sistema, parece que o esquema de parametrização MRF (Medium Range Forecast) produziu as melhores previsões que diz respeito à temperatura perto da superfície, enquanto que para o vento próximo à superfície, a parametrização ETA (Janjic, 1994) dá os melhores resultados. O esquema de Blackadar apresentou um comportamento consistentemente bom tanto para a temperatura e previsões de vento.

Corrêa et al.(2006) compararam as simulações do modelo MM5 e dados meteorológicos observados para a região do Aeroporto do Galeão, no Rio de Janeiro, para avaliar as variáveis direção e intensidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar em superfície e em altitude. Eles realizaram simulações em dois períodos distintos com condições sinóticas diferentes. Em geral, encontraram que as direções do vento a 10 m foram razoavelmente bem representadas, embora tenha ocorrido uma tendência nos prognósticos do modelo em subestimar sua intensidade para os dois períodos analisados.

Em outro estudo, Corrêa et al. (2007) utilizou o modelo atmosférico MM5 em conjunto com o Californian Meteorological Model - CALMET (Scire et al., 1997), na simulação da circulação de superfície na Região Metropolitana de Rio de Janeiro

(RMRJ) utilizando os dois modelos combinados. A RMRJ é caracterizada por uma alta densidade demográfica e um elevado grau de industrialização. Como consequência de sua configuração geográfica, podem surgir circulações locais na região que conduzem às situações de bloqueio e calmarias, dificultando a dispersão de poluentes na região. Através dos resultados eles encontraram que o sistema combinado de modelos MM5 e CALMET conseguiram reproduzir adequadamente o comportamento de circulações locais na RMRJ, levando em considerações as formações topográficas que influenciam a região de estudo, bem como os mecanismos de brisas terrestre e marítima que predominam na região.

Lyra (2007) em seu estudo para região do Nordeste do Brasil a partir do modelo de mesoescala ETA realizou testes de sensibilidade no modelo de mesoescala para uma avaliação das previsões da velocidade do vento feita por esse modelo próximo à superfície. Foram realizados experimentos numéricos com resoluções horizontais de 5 e 10 km, resoluções verticais com 38 e 50 níveis, mudanças na relação dos comprimentos de rugosidade, de calor e *momentum e* nas funções de Paulson do esquema de parametrização da camada limite superficial. Também foram realizados testes de sensibilidade com a estimativa da altura da camada limite atmosférica e com a substituição da cobertura do solo. Os resultados foram comparados com observações em cinco sítios observacionais, inclusive com dados obtidos da torre anemométrica do CLA. Os testes com 5km de resolução horizontal obtiveram um melhor desempenho que a versão de 10km. Os resultados do vento a 10 e 50m de altura modelado mostraram alguma sensibilidade aos parâmetros testados, embora pequena. Dos cinco sítios estudados, o modelo ETA5L38 tende a subestimar sistematicamente o vento no horário de maior intensidade e atrasa em poucas horas o aumento da velocidade do vento nas primeiras horas do dia. A exceção foi os resultados obtidos no CLA, onde os experimentos apresentam ventos mais intensos em relação às observações.

Oliveira et al. (2009) testaram a sensibilidade do modelo MM5 no sentido de verificar o desempenho do modelo em captar o campo de escoamento atmosférico na região de Angra dos Reis, no Rio de Janeiro, através de dois níveis de aninhamento de grade. As simulações com a grade de 3 e 1 km conseguiram captar o campo de escoamento. A simulação do modelo MM5 através das configurações topográficas

com resolução de 1 e 3 km conseguiu mostrar os efeitos do contraste entre oceano-continente e da topografia complexa, sendo ambos influenciadores do regime de escoamento na região de Angra dos Reis, em particular, causaram a formação de inúmeros processos de micro e mesoescala.

Camilo (2011) investigou as influências das parametrizações da CLP do modelo MM5 na previsão de ventos em níveis baixos para Porto Alegre. O estudo de caso considerou cinco dias em condições de nevoeiro, caracterizado pela presença de uma camada estável em níveis baixos. Os esquemas Blackadar, Burk-Thompson, MY2.5, Hong-Pan e Gayno-Seaman foram avaliados. Ele encontrou que as parametrizações Blackadar e Hong-Pan foram as que influenciaram o modelo MM5 de forma a produzir os resultados de magnitude de vento mais próximos aos dados observacionais. Quanto à direção do vento, a maior parte dos esquemas obteve bons resultados, exceto Burk-Thompson, que divergiu a partir de 300 m.

No que diz respeito a estudos que incidam sobre o uso de modelos numéricos de simulação atmosférica, no contexto de avaliação da sensibilidade do modelo à variação de alguns esquemas de parametrizações físicas, pode-se considerar que todas as atenções estão focadas nos esquemas que parametrizam os processos físicos e dinâmicos que ocorrem na camada limite. Esta orientação parte do pressuposto de que, uma vez que o objeto de estudo está centrado na análise dos campos de vento da baixa atmosfera, ou seja, mais próximos da superfície, deve-se considerar que as parametrizações físicas escolhidas para a camada limite planetária assumem importância fundamental no processo de simulação.

Apesar de Lyra (2007) ter estudado numericamente o vento na região de Alcântara por meio do modelo ETA, o objetivo daquele estudo era a investigação do potencial eólico na região Nordeste a partir de dados de torres anemométricas de alturas próximas a 50m, exceto de Alcântara, a qual possuía 70m de altura. Neste estudo, além do modelo ser diferente (MM5), os dados observacionais para a comparação com o MM5 foram radiossondagens realizadas a cada 6 horas e o objetivo é melhorar a previsão do vento (velocidade e direção) dentro da PBL durante os lançamentos de foguetes no CLA.

3 DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo apresentam-se os métodos pelos quais os dados foram coletados por meio de medidas diretas de instrumentos. A partir destes dados faz-se o estudo observacional do regime de vento no CLA. Também, faz-se uma descrição dos dados utilizados para verificação dos resultados do modelo MM5, a descrição do modelo utilizado e por fim, os experimentos numéricos que foram realizados.

3.1 Área de Estudo

O sítio experimental de coleta de dados é o Setor de Meteorologia do Centro de Lançamento de Alcântara - MA.O Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) localiza-se na costa litorânea do estado do Maranhão, com coordenadas geográficas de 2°19’ de latitude e 44°22’ W de longitude. O CLA está localizado a 49 m de altitude, distante 30 km em linha reta da cidade de São Luiz do Maranhão. A Figura 3.1 mostra uma visão panorâmica do CLA-MA.

Figura 3.1 – Vista panorâmica do Centro de Lançamento de Alcântara.
FONTE: APOLO11.COM (2009).

A restinga é a vegetação característica na região do CLA, com altura média em torno de 2,0 – 3,0 metros. Esta vegetação é bem fechada, sendo o dossel bem

homogêneo em termos de altura (FISCH, 1999). O clima de Alcântara apresenta um regime de precipitação dividido em dois períodos: chuvas intensas durante os meses de janeiro a junho, sendo os meses de março e abril os mais chuvosos, com total mensal superior a 300 mm; e período seco de julho a dezembro, com precipitação inferior a 15 mm por mês (FISCH, 1999, PEREIRA et al., 2002 e BARROS, 2008).

A Figura 3.2 mostra a precipitação média mensal no período de 16 anos (1993 a 2008) para a região do CLA, apresentando dados observacionais e do Global Precipitation Climatology Program - GPCP (www.gewex.org/gpcp.html). O GPCP possui uma tendência em superestimar os valores de chuva no período chuvoso (DEZ – MAI), inclusive no mês mais chuvoso (MAR) observa-se que a diferença entre a observação e a estimativa fica em torno de 47 mm e, no mês mais seco (SET), o GPCP superestima a precipitação em 4,2 mm.

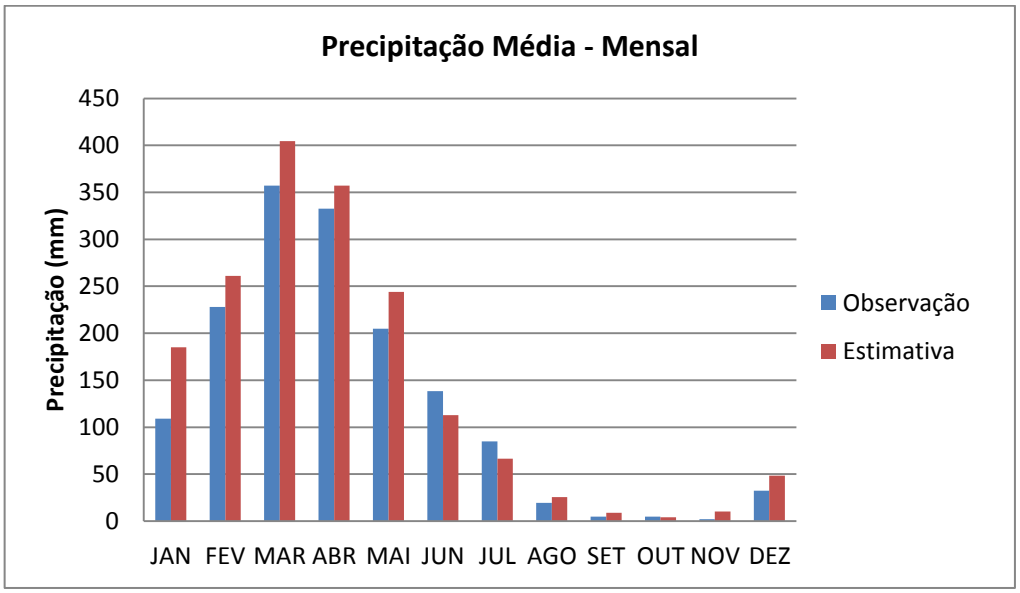


Figura 3.2 – Precipitação média mensal observada (estação de superfície) versus estimada (GPCP) no período de 16 anos (1993-2008) para a região do CLA.

3.2 - Dados Meteorológicos Coletados no CLA

3.2.1 – Estação Meteorológica de Superfície

A partir da estação meteorológica automática (Figura 3.3), instalada junto ao Setor de Meteorologia do Centro de Lançamento de Alcântara foram obtidos os dados de

superfície no período de 11 dias em setembro de 2008 (Operação Murici 2008 - período seco) e de 25 dias em março de 2010 (Experimento GPM2010 - período chuvoso). A estação automática forneceu dados de pressão atmosférica, temperatura e umidade do ar, direção e velocidade do vento. Também foram utilizadas informações horárias de METAR (***MET****eorological* ***A****erodrome* ***R****eport* - Informe Meteorológico Regular de Aeródromo) de Alcântara, o qual é um informe codificado, associado às observações meteorológicas à superfície, e utilizado para fornecer informações sobre condições do tempo naquele aeródromo específico, como: vento, visibilidade, tempo presente, nuvens, além das informações de temperaturas do ar e do ponto de orvalho e pressão atmosférica da estação reduzida ao nível médio do mar.

Figura 3.3 – Estação meteorológica automática de superfície, instalada junto ao Setor de Meteorologia no CLA.

3.2.2 Dados de Altitude

Os perfis verticais das características do ar superior foram obtidos através de sistemas de radiossondagens. Estas fornecem informações de altitude (m), temperatura do ar (ºC), umidade específica (gkg^{-1}), pressão atmosférica (hPa),

direção (graus) e velocidade (m/s) do vento. As radiossondagens sondagens foram realizadas utilizando equipamento modelo Vaisala OY (Digicora) com o uso da sonda RS80-15G, que faz uso da técnica do GPS para a determinação do vento. Os dados utilizados foram obtidos a partir de duas campanhas: Operação Murici 2008 e GPM2010 no Centro de Lançamento de Alcântara. Estas radiossondagens foram disponibilizadas pela Divisão de Ciências Atmosféricas (ACA) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). As sondas foram lançadas nos horários das 00, 06, 12 e 18 UTC coletando informações meteorológicas a cada 10 s, durante o período de 16 a 26 de setembro de 2008 (seco) e durante o período de 19 a 25 de março de 2010 (chuvoso). Os dados foram separados em períodos diurno (12 e 18 UTC), noturno (00 e 06 UTC) e ciclo diário (00, 06, 12 e 18 UTC) com objetivo de caracterizar a Camada Limite Planetária.

3.3 Dados de Análises e Previsões Globais do National Centers for Environmental Prediction (NCEP)

A inicialização, condição inicial e de contorno das simulações com o modelo MM5, ocorreu a partir dos dados do modelo global *Global Forecast System* (GFS), que foram armazenados no laboratório do ICEA. A resolução horizontal desses dados é de 0,5º × 0,5º, interpolados para as resoluções do modelo a serem simulados. As análises globais do NCEP possuem uma resolução temporal de 6 horas (liberados as 00 e 12 UTC). Os níveis verticais são interativos com pressão no topo da atmosfera 100hPa.

3.4 Dados FNL do NCEP

Os dados FNL (Final Analysis – FNL from GFS) são dados oriundos do NCEP, gerados a partir de uma análise operacional que passa por algumas modificações/processos e posteriormente ficam como uma análise final. Possuem resolução temporal de 6 h e resolução espacial de 1° de latitude/longitude, que representa aproximadamente 111km, cobrindo todo o globo terrestre, com 17 níveis na vertical (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 e10 hPa). Maiores detalhes sobre os dados encontram-se em Kalnay et al. (1996). Os dados estão disponíveis na página da internet do Climate Diagnostics

Center/ National Oceanic and Atmospheric Administration (CDC / NOAA) a saber: www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html.

3.5 Descrição do modelo MM5

Neste trabalho, utiliza-se o modelo de mesoescala MM5 (Dudhia et al., 2003). O modelo serve para simulação numérica da atmosfera e foi desenvolvido no final da década de 70 pela Penn State University, em conjunto com o National Center for Atmospheric Research (PSU/NCAR). O MM5 é a 5ª geração desse modelo e inúmeras modificações e melhorias foram feitas nos seus 30 anos de existência.

Algumas características gerais do modelo são: não-hidrostático, uso da coordenada vertical sigma, portável (pode ser instalado e executado em diversas plataformas e sob os sistemas operacionais Linux e Unix), possibilidade de uso em altas resoluções horizontais, aninhamento de grades (permite até nove domínios que podem ao mesmo tempo interagir entre si), assimilação de dados quadridimensional e disponibilidade de variados esquemas de parametrização de processos físicos (6 opções de convecção profunda, 6 de microfísica de nuvens, 4 de radiação, 6 de camada limite e 7 de superfície).

No Brasil, o Laboratório de Prognóstico em Mesoescala (LPM) do Departamento de Meteorologia da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) fornece previsões para o estado do Rio de Janeiro com resolução de 20 km. O Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), por sua vez, em parceria com o Centro Nacional de Meteorologia Aeronáutica (CNMA), ambos subordinados ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e o IAE-CTA, usam o modelo MM5 com objetivos de pesquisa e operacionais da modelagem numérica para fins aeronáutico e espacial.

As principais vantagens do modelo regional MM5 são o baixo custo (GARRANA, 2001) e a habilidade das previsões efetuadas sobre uma determinada região, além de ser um modelo estável e bem conhecido pela comunidade meteorológica. A previsão numérica do modelo MM5, disponibilizada por meio da página da REDEMET do Comando da Aeronáutica, também é utilizada como ferramenta

operacional na previsão aeronáutica do Centro Meteorológico de Aeródromo de Guarulhos (CMA-GR) da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária – INFRAERO.

O modelo MM5 representa os dados (variáveis meteorológicas) de forma discreta, ou seja, em pontos de grade. Quanto ao modo de solução dos movimentos verticais da atmosfera, o MM5 classifica-se como um modelo não-hidrostático, pois resolve a equação do movimento vertical, característica que torna esse modelo adequado a previsões de escala meteorológica abrangidas por formações de brisas, trovoadas, linhas de tempestade, complexos convectivos, dentre outras.

Desenvolvido para simular ou prever a circulação atmosférica, o modelo é apoiado por programas de pré e pós-processamento, que no seu conjunto são designados como sistema de modelagem MM5. O modelo MM5 como um modelo de área limitada, necessita de condições de fronteira laterais que representem, dentro do possível, o estado real da atmosfera vizinha ao domínio de simulação ao longo do tempo de integração das equações dinâmicas. Essas condições de fronteira são obtidas através de um modelo de simulação atmosférica de escala global, por exemplo, o Global Forecast System (GFS).

Os testes de simulações numéricas desta pesquisa foram realizados no setor de pesquisa e desenvolvimento do ICEA/DECEA, que se situa dentro do complexo do DCTA (Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial).

O sistema instalado no ICEA compreende um conjunto de componentes necessário para executar o modelo, sendo que primeiramente, usa-se o pacote WPS, o qual é o pacote de pré-processamento do modelo WRF, que realiza uma interpolação horizontal das variáveis meteorológicas (altura do geopotencial, vento, temperatura, razão de mistura) em cada nível isobárico, e das variáveis da superfície (pressão atmosférica, temperatura) e dos níveis do subsolo (temperatura e umidade do solo). Desta maneira, a versão do modelo MM5 instalada no ICEA pode ser considerada híbrida no formato GRIB2. Seguidamente, o REGRID (interpola horizontalmente as análises e previsões), INTERPF (interpola verticalmente as coordenadas de pressão para coordenadas sigma e gera condições iniciais e de contorno), MM5 (definição

dos esquemas de parametrização, períodos de integração e assimilação de dados, e execução do modelo) e MM5toGrADS (gera saídas convertidas para o formato do GrADS, pós-processamento), conforme a Figura 3.4.

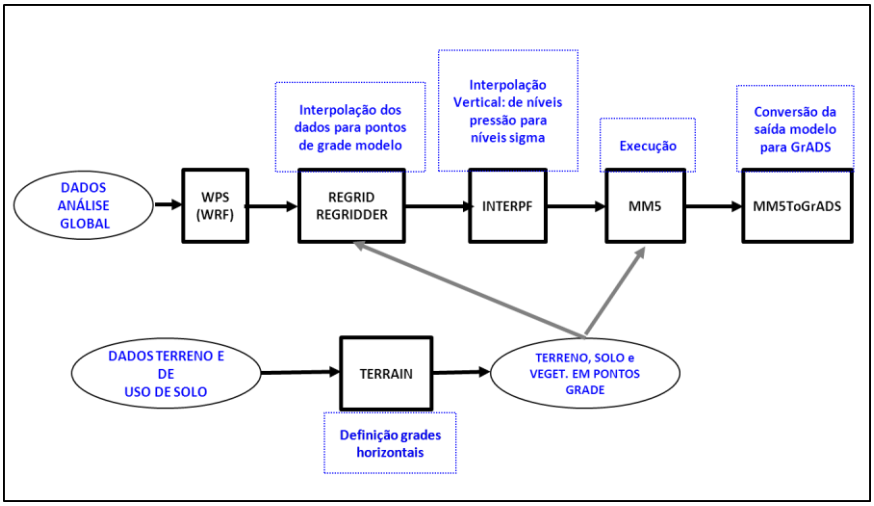


Figura 3.4 – Fluxograma de funcionamento do modelo MM5 híbrido instalado no ICEA.

Os esquemas de Camada Limite Planetária ou Planetary Boundary Layer (PBL) disponíveis no modelo MM5 são: Bulk, Blackadar (BLK), Burk-Thompson (B-T), Mellor-Yamada fechamento 2.5 (MY2.5), Hong-Pan (MRF), Gayno-Seaman (G-S) e Pleim-Chang. As características gerais das parametrizações estudadas são apresentadas na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – Esquemas de parametrização de PBL incluídos no MM5.

NOME	Abrev.	Esquema originário	Ordem de fechamento	Teoria para a difusão vertical turbulenta	Difusão vertical	Similaridade da camada superficial
Blackadar	BLK	Blackadar	primeira ordem	K-teoria	não-local	Monin-Obhukov
Burk-Thompson	B-T	Mellor-Yamada	segunda ordem	ECT	Local	Louis
Mellor-Yamada Eta	MY2.5	Mellor-Yamada	1.5 ordem	ECT	Local	Monin-Obhukov
Hong-Pan	MRF	Troen-Mahrt	primeira ordem	K-teoria	não-local	Monin-Obhukov

Fonte: Adaptada de Camilo (2011).

Conforme a Tabela 3.1, a seguir faz-se uma descrição sucinta das opções de parametrizações da CLP selecionadas neste estudo.

- **High-resolution Blackadar (BLK)**

  Adequado para simulações com alta resolução vertical da PBL, por exemplo, cinco camadas nos quilômetros mais baixos, camada superficial menor que 100m de espessura. O esquema da camada limite de alta resolução baseado em Blackadar (1976, 1978) e Zhang and Anthes (1982) é usado para prever a mistura vertical do vento horizontal, temperatura potencial, razão de mistura, água em nuvem, gelo em nuvem e *graupel.* O regime noturno estável e o regime de convecção livre são tratados diferencialmente. No regime noturno, a atmosfera é estável (ou ligeiramente instável) e a turbulência é o resultado de processos mecânicos, enquanto o regime de convecção livre na atmosfera é instável e a turbulência é o resultado da convecção livre das térmicas de ar quente ascendendo. No regime noturno, o fechamento de primeira ordem aproximadamente baseado na teoria K é usado para determinar os fluxos turbulentos. Considerando o regime noturno como um esquema local, a mistura é assumida ocorrer somente entre camadas adjacentes do modelo, o regime de convecção livre emprega uma aproximação não local onde plumas de flutuabilidade de ar quente são assumidas para mistura de calor, umidade e momentum até cada nível da camada de mistura.

- **Burk-Thompson (BT)**

  Este esquema de parametrização foi desenvolvido por Burk e Thompson (1989) disponível no MM5 é baseado na sua implementação inicial na NORAPS. O esquema baseia-se nas fórmulas de Mellor e Yamada (1974) de nível 3. Tem uma ordem de fechamento de turbulência de 1.5, considerando as equações de previsão para a energia cinética turbulenta e para a temperatura. Adequado para alta e baixa resolução PBL. Prevê a energia cinética turbulenta para uso na mistura vertical. No modelo MM5, o esquema é usado para prever a mistura vertical do vento horizontal, temperatura potencial, razão de mistura, água de nuvem a água de chuva

através de equações prognósticas para a energia cinética turbulenta, para a temperatura e para umidade e uma da covariância de temperatura-umidade. Todos outros fluxos são obtidos diagnosticamente. Sua inclusão de equações prognósticas para momentos estatísticos maiores permite a simulação de PBLs bem misturadas, mas de aumento computacional grande.

De acordo com os resultados apresentados por Burk e Thompson (1989) a PBL simulada por este modelo apresenta um comportamento bastante realista em diferentes situações nomeadamente no Mediterrâneo, num deserto no Norte da África e no oceano Atlântico Norte durante a passagem de uma frente quente.

- **ETA**

Esta parametrização está baseada na modelação desenvolvida por Janjic (1994), a qual será denominada daqui em diante como ETA, usando as equações definidas por Mellor-Yamada (1974) que consideram o fecho de turbulência de 2ª ordem para a energia cinética turbulenta e calculam os fluxos turbulentos como sendo função da energia cinética turbulenta.

De acordo com Janjic (1994) este modelo considera duas camadas distintas na PBL: uma camada fina e viscosa acima da superfície onde o transporte vertical é determinado pela difusão molecular e uma camada turbulenta acima, onde o transporte vertical é dominado pelos fluxos turbulentos. A espessura da camada viscosa é diferente para a temperatura, a umidade específica e o vento, e depende da velocidade de atrito, das difusividades moleculares respectivas de cada uma das variáveis, do número de Reynolds. Adicionalmente as camadas viscosas para a temperatura e para a umidade dependem respectivamente do número de Prandtl e do número de Schmidt. Estas camadas são muito mais finas do que a camada superficial.

Os fluxos turbulentos das diferentes variáveis na camada superficial acima da camada viscosa são iguais aos da camada viscosa e função do

gradiente destas variáveis e de coeficientes de troca de calor e de momento definidos por Mellor-Yamada.

No modelo MM5, o esquema é usado para prever a mistura vertical do vento horizontal, temperatura potencial e razão de mistura.

- **Medium Range Forecast (MRF) ou Hong-Pan**

É um esquema não local de primeira ordem desenvolvido por Hong e Pan (1996) baseado em Troen e Mahrt (1986).

A difusividade na PBL está formulada de acordo com os resultados de investigação em LES – Large Eddy Simulation (Wyngaard and Brost,1984), obtido por Troen e Mahrt (1986). A altura da PBL é obtida a partir do número global de Richardson e, em seguida, especifica o perfil do coeficiente de difusividade em função da altura da PBL e determina os valores dos coeficientes em função dos fluxos à superfície. Os fluxos de calor sensível e calor latente são calculados neste esquema de acordo com a teoria de Monin Obukhov. Nesta esquema existe uma parametrização dos fluxos contrários ao gradiente, a qual depende da velocidade convectiva e dos fluxos à superfície. Este esquema é adequado para alta resolução na PBL (como para o esquema Blackadar). Ele tem sido usado nos modelos de circulação geral e modelos de previsão numérica devido a sua eficiência computacional. No modelo MM5, o esquema é usado para prever a mistura vertical do vento horizontal, temperatura potencial, razão de mistura, água em nuvem e gelo em nuvem.

3.5.1 Descrição dos experimentos

As integrações do modelo se iniciam com a análise de 00:00 UTC e de 12:00 UTC e estendem-se por 72 h. As primeiras 12 horas de simulação não são avaliadas (resultados descartados como "*spin-up*" - tempo necessário para que o modelo entre em equilíbrio). As componentes u e v do vento simuladas pelo modelo MM5 são obtidas para a localização do ponto de grade mais próximo do CLA (2,23039°S;

44,4617°W) e comparadas com as observações (radiossondagens) realizadas no experimento.

Serão realizados vários experimentos para testar a sensibilidade do modelo MM5 às parametrizações da CLP para o CLA, considerando quatro opções de esquemas de pamarametrizações da CLP: Blackadar, Burk-Thompson, ETA e MRF. A escolha destas quatro opções de parametrizações da CLP em relação às demais se deve à pesquisa realizada (estado da arte do uso destas parametrizações) para definir quais são aquelas mais usadas nos modelos numéricos, tanto para fins operacionais quanto de pesquisas.

Além disso, avaliou-se também o performance do modelo em relação ao tamanho e aninhamento de grades. Para isso utilizaram-se três tipos de domínios: D1, D2 e D3. O primeiro considera o domínio atualmente utilizado na Previsão Numérica do Tempo (PNT) para o CLA feita pelo ICEA; o segundo emprega-se o domínio semelhante àquele utilzado por Reuter (2004) e por último, um aninhamento de grade de 9, 3 e 1km considerando-se uma maior resolução espacial. Os três tipos de domínios utilizados são apresentados na Figura 3.5. O domínio das simulações é aproximadamente centrado no CLA. A pressão no topo da atmosfera é de 100 hPa ajustado no programa INTERPF.

Sobre as forçantes:

1) Frequência das condições de contorno são aquelas estabelecidas pelos arquivos de análise e previsão obtidas do sítio do NCEP. Para o MM5 foram obtidos arquivos a cada 6 horas.
2) Informações atmosféricas (condições iniciais): análise e previsões do GFS. O programa WPS (do sistema WRF) é usado para ler arquivos GFS no formato GRIB2, pois o programa responsável por essa tarefa no MM5 somente lê no formato GRIB1.
3) TSM (condições de contorno): A questão da temperatura da superfície do mar (SST) é um aspecto que ainda falta ser implementado no MM5. No arquivo de log do REGRIDER (No real SST data found, but we can use the skin temperature instead) há o registro dessa situação. Para tanto foi utilizado a

temperatura superficial no lugar da SST, dado este que vem dos arquivos GFS e, é processado pelo WPS.

4) Umidade e temperatura do solo (condições de contorno): Essas condições foram obtidas dos arquivos GFS.

A descrição da configuração das grades é apresentada na Tabela 3.2. A resolução vertical compreende 26 a 31 níveis sigma, com pressão de topo 100 hPa. As parametrizações físicas do modelo são as seguintes: c*loud radiation scheme* para radiação; *multilayer* para processos de superfície; Grell (Grell, 1995) para convecção implícita, o qual considera uma nuvem única de tamanho grande bidimensional com parametrização dos movimentos verticais descendentes e ascendentes, considera que somente existe mistura de ar saturado com ar ambiente no topo e na base da nuvem; Simple Ice (Dudhia, 1989) para microfísica de nuvens, o qual refere que os processos associados à fase de gelo são mais importantes numa camada entre os 0°C e os -20°C, onde os movimentos verticais de ascensão são forçados pela liberação de calor latente que resulta da deposição de vapor de água na neve. A respeito do *nudding* manteve-se o padrão do ICEA.

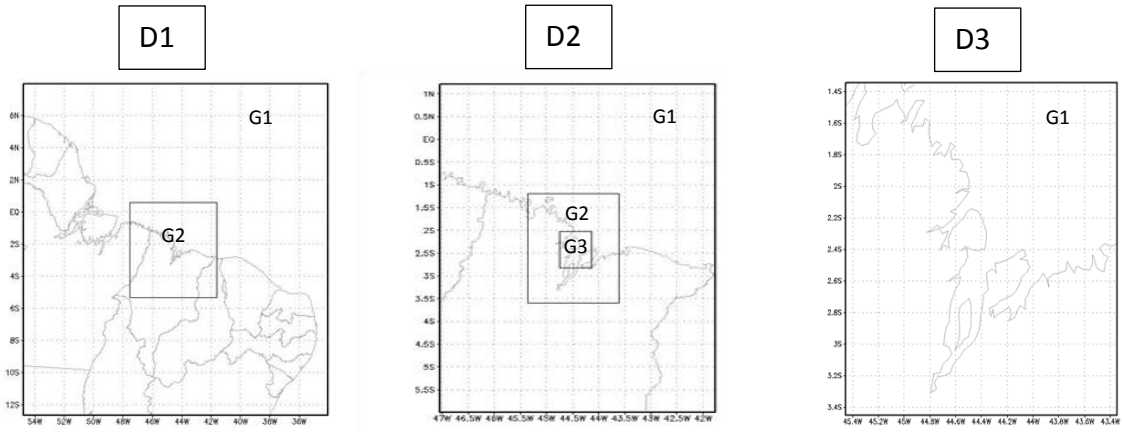


Figura 3.5 - (Da esquerda para direita) Domínio das grades de resolução horizontal 18 km (G1) e 6 km (G2); domínio das grades de resolução horizontal 9 km (G1), 3 km (G2) e 1 km (G3) e domínio da grade de resolução horizontal de 3 km (G1).

Tabela 3.2 – Configuração das grades usadas para simulações e opções de parametrizações de CLP.

N° PONTOS ZONAL	N° PONTOS MERIDIONAL	DOMÍNIO (km)	RESOLUÇÃO DAS GRADES (km)	ESQUEMA DE PARAMETRIZAÇÃO DA CLP
130 121	130 121	**D1** 2340 X 2340 726 X 726	18 6	•Blackadar •Burk-Thompson •Eta •MRF
80	80	**D2** 240 X 240	3 (não considera grade aninhada)	•Blackadar •Burk-Thompson •Eta •MRF
91 91 91	67 67 67	**D3** 819 X 603 273 X 201 91 X 67	9 3 1	•Blackadar •Burk-Thompson •Eta •MRF

3.6 - Metodologia

3.6.1 Séries Temporais

Com objetivo de extrair as características e parâmetros descritores da atmosfera e também, a fim de se estudar as evoluções temporais serão feitas gráficos que mostrem as séries temporais de algumas variáveis meteorológicas, desta maneira, contribuir para correção das previsões do modelo MM5, em especial o vento.

3.6.2 Análise por *Wavelets* ou Ondeletas

Durante o estudo observacional aplicou-se a técnica das w*avelets,* também conhecidas como *ondeletas* (Bolzan, 2006) à série temporal de dados horários de superfície dos elementos meteorológicos de pressão atmosférica e das componentes zonal e meridional do vento.

Wavelets, ou ondeletas, são funções matemáticas que separam o dado em componentes de diferentes frequências. A ideia fundamenta-se na superposição de funções que se faz capaz de uma análise em diferentes escalas. As propriedades das matrizes envolvidas na ondeleta são similares às usadas na transformada de Fourier (muito utilizada para extrair informações de sinais periódicos), porém com funções básicas mais complexas, Graps (1995).

A técnica de w*avelets* é uma ferramenta que permite detectar, analisar e caracterizar as escalas temporais de oscilações não estacionárias. Ela tornou-se uma ferramenta muito utilizada para a análise de variações locais de energia dentro de uma série temporal, decompondo-a no domínio de tempo e frequência simultaneamente. Assim, podem-se obter informações tanto da amplitude de qualquer sinal “periódico” dentro da série e como esta amplitude varia com o tempo. O termo ondeleta refere-se a um conjunto de pequenas ondas formadas por dilatação e translação de uma única função, ψ (t) e variável real t.

$$\psi_{ab} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

em que ψ (t) refere-se a ondeleta mãe e as funções derivadas são chamadas de ondeletas filhas. O termo “a” (>0) refere-se à escala temporal da perturbação e

durante a contração (dilatação), “a” aumenta (diminui). O termo “b” corresponde aos diferentes instantes ao longo do tempo.

Se a janela é grande, não se detecta pequenas feições, mas se é pequena sim. As janelas da ondeleta são flexíveis, e com esta ferramenta é possível notar tanto as feições gerais quanto as mais finas. O procedimento consiste em adotar uma função-mãe, e a partir de sua compressão ou expansão, observar, respectivamente, as altas e baixas frequências, Graps (1995).

A transformada em ondeleta contínua da função f (t) é definida pela seguinte equação:

$$\left(W_\psi\, f\right)(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f\,(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

onde $f\,(t)$ é a função que constitui a série de dados a ser analisada. O termo $1/\sqrt{a}$ é utilizado para normalizar a energia de cada ondeleta.

A ondeleta aqui utilizada é a de Morlet, que visa analisar a variação temporal brusca ou suave. A função de Morlet é dada pela seguinte expressão:

$$\psi\,(t) = e^{i w_0 t}\, e^{-t^2/2},$$

As ondeletas geradas utilizam $w_0 = 6$ e são calculadas da seguinte maneira:

$$\psi_{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{a}}\, e^{iw_0\left(\frac{t-b}{a}\right)}\, e^{\frac{-\left(\frac{t-b}{a}\right)^2}{2}}$$

O espectro de potência é uma medida da variância da série temporal em cada tempo b e em cada escala a e seus picos apresentam a concentração da potência (variância) no domínio tempo-período. O espectro global da ondeletas (*Global Wavelets Power Spectrum* - GWS) pode ser obtido a partir da variância do valor absoluto ao quadrado do coeficiente de ondeleta, da série temporal em cada escala de tempo, o qual determina o período de maior variabilidade na energia de uma série temporal.

O pacote utilizado está disponível na página da internet A Practical Guide to Wavelet Analysis With significance and confidence testing (Torrence and Compo, 1998), a saber: www.paos.colorado.edu/research/wavelets/.

Não houve procedimento de pré-processamento, somente foi feito um programa para ler e processar as ondeletas usando IDL para plotar os resultados.

3.6.3 Validação do modelo numérico MM5

A validação de um modelo atmosférico numérico pode ser vista segundo vários ângulos (PIELKE, 2002)**,** que se complementam:

1) Comparação de resultados do modelo com soluções conhecidas de um modelo analítico análogo;

2) Verificação dos balanços que exprimem a conservação de massa e de energia;

3) Comparação com resultados de modelos numéricos diferentes na concepção;

4) Comparação entre resultados de formulações alternativas do mesmo modelo;

5) Comparação das previsões do modelo com as observações.

Neste contexto, os testes de sensibilidade referem-se ao 4º item combinado ao 5º item. O princípio é o de comparar entre si, ou testar um a um contra as observações, os resultados de um modelo quando se faz variar uma parte do mesmo: um algoritmo numérico, uma equação, uma constante de uma parametrização, ou mesmo a troca de um esquema de parametrização por outro. Obter resultados (quase) iguais com diferentes formulações do modelo não garante a sua validade no sentido da capacidade de realizar previsões acertadas; se, pelo contrário, forem grandes as diferenças entre os resultados, não poderão estar todos certos por igual. A avaliação da prestação frente às observações é a etapa decisiva de validação.

3.6.4 Avaliação do modelo MM5

Com objetivo de apresentar um índice refinado de concordância, Willmott (2011) desenvolveu um novo índice ampliando a variação entre os limites inferior e superior, sendo estes de -1,0 a 1,0. O novo índice proposto por Willmott está relacionado a aumentos e diminuições no Erro Médio Absoluto.

Para analisar o ajuste dos dados da simulação em relação à média das observações será utilizado o coeficiente de Willmott $\boldsymbol{d_r}$ (WILLMOTT, 2011), sendo calculado como:

Se:

$$\sum_{i=1}^{n}|\boldsymbol{P}_i - \boldsymbol{O}_i| \leq c\sum_{i=1}^{n}|\boldsymbol{O}_i - \bar{\boldsymbol{O}}|$$

$$\boldsymbol{d_r} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}|\boldsymbol{P}_i - \boldsymbol{O}_i|}{c\sum_{i=1}^{n}|\boldsymbol{O}_i - \bar{\boldsymbol{O}}|}$$

Se:

$$\sum_{i=1}^{n}|\boldsymbol{P}_i - \boldsymbol{O}_i| > c\sum_{i=1}^{n}|\boldsymbol{O}_i - \bar{\boldsymbol{O}}|$$

$$\boldsymbol{d_r} = \frac{c\sum_{i=1}^{n}|\boldsymbol{O}_i - \bar{\boldsymbol{O}}|}{\sum_{i=1}^{n}|\boldsymbol{P}_i - \boldsymbol{O}_i|} - 1$$

Onde,

P_i = valor estimado de uma variável de ordem i.

O_i = valor observado de uma variável de ordem i.

O = média dos valores estimados de uma variável.

n = número de eventos.

c = 2.

A interpretação do d_r é relativamente simples. Ela indica a soma das magnitudes das diferenças entre os desvios do modelo e observado sobre a média observada em relação à soma das magnitudes do modelo perfeito (Pi=Oi, para todo i) e os desvios observados sobre a média observada.

Um valor de d_r = 0,0 significa que a soma das magnitudes dos erros e a soma das magnitudes de desvio do modelo perfeito e o desvio observado são equivalentes. Quando d_r = -0,5 indica que a soma das magnitudes de erro é duas vezes a soma das magnitudes de desvio do modelo perfeito e o desvio observado.

Valores de d_r próximos à -1,0 podem significar que os desvios do modelo estimado aproximadamente Ō fracas estimativas dos desvios observados, mas também pode significar que simplesmente há pouca variabilidade. À medida que o limite inferior de d_r é abordado, as interpretações devem ser feitas com cautela.

Além de considerar o índice refinado de Willmott também, de forma a avaliar quantitativamente o desempenho do modelo MM5 nas suas simulações irão ser considerados dois tipos de erro médio, que refletem o afastamento entre os valores simulados e os valores observados relativamente à variável meteorológica em questão, o vento. O primeiro tipo de erro médio usado será o valor médio quadrático do erro, *RMSE*, conforme a equação abaixo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P - O)^2}{n}}$$

E o outro tipo de erro médio considerado será o erro médio, Viés, ou ainda, BIAS. O viés permite avaliar a tendenciosidade dos dados: se for positivo, significa que os valores simulados tendem a superestimar os valores reais, enquanto que se for negativo significa que existe uma tendência do modelo em subestimar os mesmos valores reais.

$$BIAS = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(P - O)$$

Estes parâmetros ou métricas são calculados a cada 12 horas de previsão totalizando uma simulação de 72 horas (3 dias), permitindo uma avaliação da qualidade dos resultados com a evolução do tempo e em situações meteorológicas diferentes.

Cada experimento numérico foi definido conforme a seguinte nomenclatura:

CONF I: é o experimento utilizando a parametrização MRF de PBL do modelo MM5 como referência (controle) e variando três outras opções de parametrizações de PBL (BLK, ETA, BT) para comparação dos resultados.

CONF II: é o experimento utilizando a parametrização MRF de PBL do modelo MM5 como referência (controle), substituindo o valor de u_* inferido pelo modelo pelo valor de u_* observado para o CLA.

CONF III: é o experimento utilizando o melhor resultado de parametrização da CONF I com os valores de u_* e comprimento de rugosidade observados para o CLA.

4 RESULTADOS OBSERVACIONAIS

4.1 – Condições atmosféricas durante os experimentos

Conhecer e analisar o comportamento da atmosfera nos aspectos termodinâmicos e dinâmicos é o primeiro passo para compreender a modelagem numérica, haja vista a necessidade de conhecimento dispensado, não somente sobre as características climatológicas, mas também do aspecto do tempo presente. Para isso, será dedicada parte da atenção à fonte primária – os dados coletados nas campanhas seca, denominada MURICI (2008), e chuvosa, denominada GPM (2010). Neste contexto, são apresentados alguns resultados do estudo observacional para campanhas seca (16 a 26/09/2008) e chuvosa (19 a 25/03/2010) da região de interesse, através do padrão estatístico das principais variáveis meteorológicas.

4.1.1 Período seco (setembro 2008)

4.1.1.1 – Aspectos sinóticos

Para ajudar na análise observacional da atmosfera, além do estudo termodinâmico, faz-se necessário conhecer as condições sinóticas presentes da região. A Figura 4.1 mostra os sistemas atmosféricos atuantes entre os dias 16 a 26 de setembro de 2008.

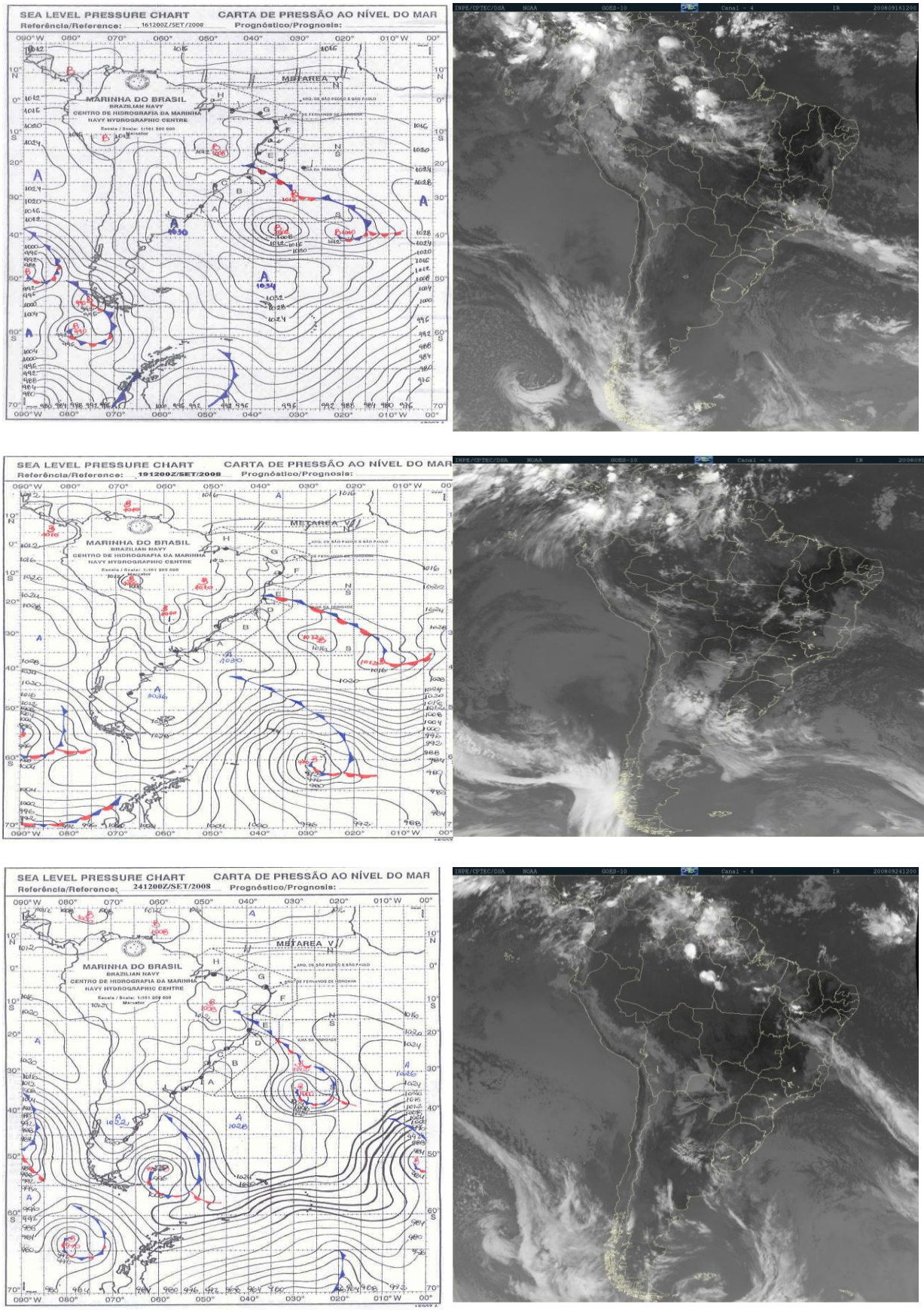


Figura 4.1 – Carta sinótica de superfície e imagem de satélite no canal infravermelho para os dias 16, 19 e 24 de setembro de 2008 no horário das 12:00 UTC.

Durante o período foi observado à passagem de três sistemas atmosféricos (ciclone extratropical / frentes frias) atingindo o sudeste e nordeste Brasileiro, considerando o critério de análise de incursão de sistemas frontais proposto por KOUSKY (1979) e utilizados por ANDRADE (2005) e TAVARES (2008). Apesar da nebulosidade associada às passagens de frentes frias sobre parte do Nordeste Brasileiro chegar ao sul do estado do Maranhão, estas frentes não chegaram a atingir a região de estudo. Através das cartas sinóticas (Figura 4.1) observa-se que a ZCIT está localizada bem ao norte do CLA, entre 5º e 10ºN, e, apesar de apresentar-se com moderada atividade convectiva, não influenciou diretamente a região.

Durante o período de coleta de dados não ocorreu nenhuma precipitação. Segundo dados do GPCP (ver Cap. 3), os meses de fevereiro a maio (setembro a novembro) são os meses em que os máximos (mínimos) de precipitação são atingidos. Do ponto de vista tradicional divisão do ano em períodos de estação do ano (DJF, MAM, JJA e SON), o trimestre mais chuvoso (seco) é MAM (SON), ou seja, a ausência de chuva no período estudado está em concordância com a climatologia local.

A quantidade de nuvens, em média, foi maior no final da madrugada se estendendo até quase o final da manhã (das 08:00 às 14:00 UTC). As nuvens predominantes no período seco (16 a 26 de setembro de 2008) foram nuvens *cumulus congestus* quase sempre acompanhadas de *cirrustratus* e, algumas vezes por *altostratrus*. Em alguns poucos dias, havia nuvens *stratus* em horários noturno (Figura 4.2). Para análise da nebulosidade, considerou-se o período diurno das 09:00 às 20:00 UTC e o período noturno das 21:00 às 08:00 UTC. A nebulosidade total durante o dia ficou em torno de 3/8 e a noite 1/8. As nuvens TCU (*cumulus congestus*) que predominaram no período seco têm a máxima frequência sobre a terra de dia e sobre a água de noite.

2008	NEBULOSIDADE TOTAL	1ª CAMADA	2ª CAMADA
		TCU	CS
PERÍODO NOTURNO	1/8		
		1ª CAMADA	2ª CAMADA
		TCU	CS
PERÍODO DIURNO	3/8		

Figura 4.2 – Nebulosidade predominante durante o período de 16 a 26/set/2008 (seco) no CLA.

Tabela 4.1 – Análise da nebulosidade na região do CLA em SET/2008

DATA	NEBULOSIDADE E OU SISTEMA ATMOSFÉRICO ATUANTE
16/09/08	Maior quantidade de nuvens (4 a 6/8) entre 08:00 e 14:00 UTC, dissipando boa parte das nuvens após este horário e, a partir daí, com 1 a 3/8 de nuvens no céu. Não foi observado nenhum sistema de grande escala atuante na região.
17/09/08	Às 06:15UTC observa-se uma linha de nebulosidade associada à ZCIT no norte do Maranhão, Pará e Piauí, incluindo a região do CLA. Esta nebulosidade é predominantemente estratificada, onde a mesma é dissipada rapidamente devido ao aquecimento diurno.
18/09/08	Maior quantidade de nuvens (5 a 6/8) entre 10:00 e 13:00 UTC, dissipando boa parte das nuvens após este horário e, a partir daí, com 1 a 4/8 de nuvens no céu. Não foi observado nenhum sistema de grande escala atuante na região.
19/09/08	Uma linha de instabilidade formada na linha costeira do Pará e oeste do Maranhão associada à brisa marítima é observada às 18:00 UTC. Sua evolução é mantida no decorrer da tarde, porém, não provoca chuva no CLA. Ela fica limitada no nordeste do Pará.
20/09/08	No dia seguinte há pouca nebulosidade sobre o CLA. Nos horários das 12:00 e 18:00 UTC a nebulosidade é cumuliforme (nuvens *cumulus humilis* e/ou *mediocris*).
21/09/08	Sem nebulosidade significativa. A ZCIT encontra-se em posição média em torno de 10°N (12:00 e 18:00UTC).
22/09/08	Banda de nebulosidade associada à ZCIT; observa-se um deslocamento meridional. A partir de observação local (CLA) estimou-se a nebulosidade total entre 10:00 e 14:00 UTC, de 6 e 4 oitavos, respectivamente.
23/09/08	Das 13:00 às 19:00 UTC com muita nebulosidade (4 a 6/8), que tende a dissipar somente a partir das 20:00 UTC.
24/09/08	Das 05:00 às 16:00 UTC com muita nebulosidade (4 a 6/8). A partir das 17:00 UTC com pouca nebulosidade até o final do dia.
25/09/08	Poucas nuvens durante a maior parte do dia, sendo a nebulosidade total de 4/8 somente entre os horários das 12:00 às 15:00 UTC.
26/09/08	Pouca nebulosidade e nenhum sistema atmosférico de grande escala atuante sobre a região.

4.1.1.2 Séries Temporais dos Elementos Meteorológicos de Superfície

Na ausência ou pouca quantidade de nuvens e chuvas, a curva de temperatura mostra-se bem comportada, podendo, teoricamente, ser representada como uma função senoidal. Como se pode constatar nos extremos superiores da Figura 4.3 (a), as temperaturas máximas ocorrem, em geral, entre 14:00 e 16:00 UTC ou 11:00 e 13:00 hora local e as mínimas entre 02:00 e 07:00 UTC. A amplitude térmica é pequena, em torno de 5ºC. A maior temperatura observada é de 30,3ºC (no dia 21/09 às 16:00 UTC) e a menor é de 24,1ºC (dia 26/09 às 03:00 UTC). O valor médio da temperatura do ar no período foi de 27,2 ºC.

A maior amplitude térmica reflete-se também nos valores de umidade relativa sobre o continente. A maior amplitude da umidade relativa observada (29%) ocorre também no dia 21/09. Durante o período os valores máximos e mínimos observados foram de 90% e 60%, os quais ocorreram nos dias 22/09 e 26/09 para os máximos e 21/09 e 24/09 para os mínimos, respectivamente (Figura 4.3 (b)), sendo o valor médio para o período de 77%. O maior valor da umidade relativa (90%) ocorre quando se observou grande quantidade de nuvens sobre o continente, principalmente no lado oeste do estado do Maranhão. O comportamento da pressão atmosférica apresenta dois máximos e dois mínimos diários e variou entre 1003,5 (dia 18) a 1009,0 hPa (dia 21) no período estudado (Figura 4.3.(c)). Observa-se que a pressão atmosférica média do período é de 1006,1 hPa.

A análise da radiação solar incidente para o CLA mostra um comportamento dentro do padrão climatológico com o máximo de radiação ocorrendo entre 14:00 e 16:00 UTC.

A maior quantidade de radiação incidente observado no continente foi de 952 $W.m^{-2}$ no dia 24 às 14:00 UTC. Comparando-se à média do período, no dia 23 ocorre uma diminuição significativa da radiação para 757 $W.m^{-2}$(Figura 4.3 (d)) que pode ser explicado pela grande quantidade de nuvens existente. Durante o período seco foi observado que a máxima quantidade de nuvens (5 a 6 oitavos de cobertura total) ocorria entre 08:00 e 14:00 UTC, dissipando após este horário, porém no dia 23 a cobertura total de nuvens era de 5 a 6/8 de TCU até às 17:00 UTC e a máxima radiação ocorreu no horário entre 14:00 e 15:00, ou seja, houve uma redução em

função da quantidade de nuvens.

Na Figura 4.3 (e) pode-se observar que, em média, a direção do vento foi de NE (72,9%) e de E (27,1%) e, em média, a velocidade do vento foi de 4,1 m/s (quando o vento era predominante de NE) e de 5,3 m/s (quando o vento era predominante de E). As velocidades do vento máxima, mínima e média foram de 6,8, 1,3 e 4,1m/s, respectivamente. No continente o vento intensifica-se entre os horários das 15:00 e 18:00 UTC, sugerindo o surgimento de uma circulação do tipo brisa marítima.

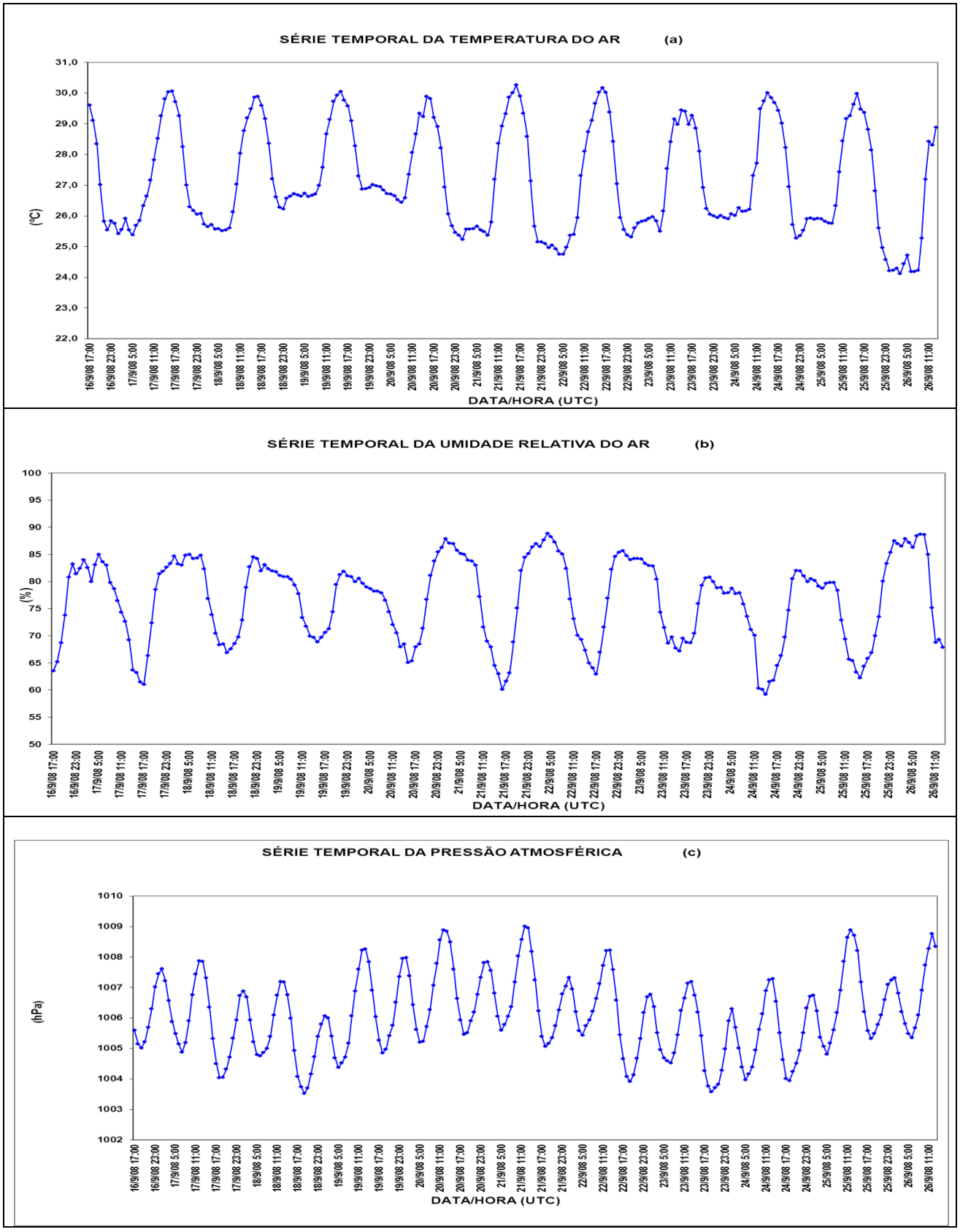


Figura 4.3 – (a) Séries temporais de temperatura do ar (°C), (b) umidade relativa do ar (%), (c) pressão atmosférica (hPa), (d) radiação solar (W/m2) e (e) velocidade do vento (m/s) para o período de 16 a 26/09/2008.

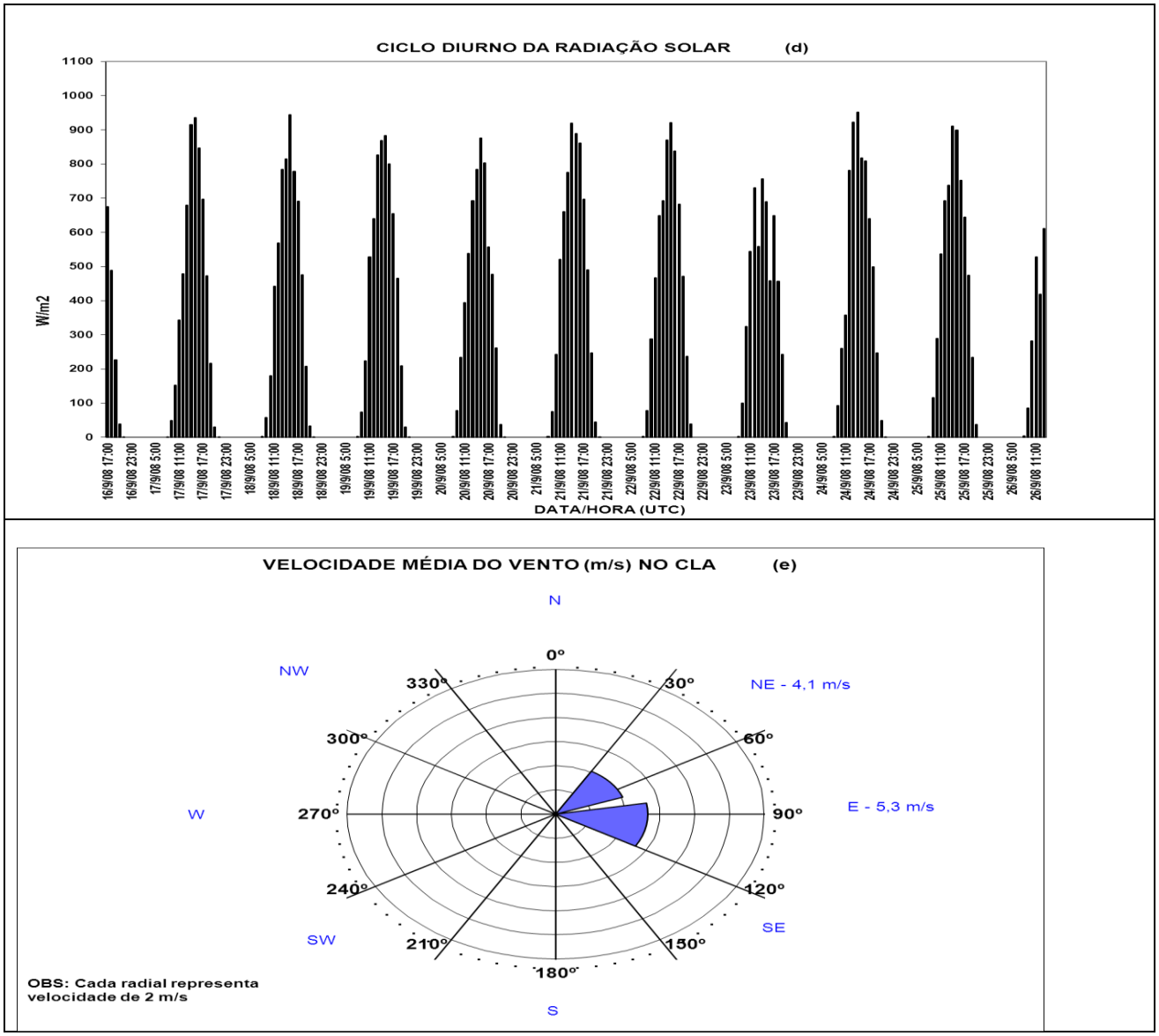


Figura 4.3 – (a) Séries temporais de temperatura do ar (°C), (b) umidade relativa do ar (%), (c) pressão atmosférica (hPa), (d) radiação solar (W/m2) e (e) velocidade do vento (m/s) para o período de 16 a 26/09/2008 (conclusão).

Durante o período analisado foi observada uma alteração no campo de pressão entre os dias 19, 20 e 21, que sugere alguma perturbação atmosférica, conforme pode ser visto na série temporal da pressão atmosférica (Figura 4.4). A fim de checar a possibilidade de ocorrência de algum fênomeno atmosférico pela região, foi feito uma avaliação por meio da técnica das *wavelets*.

As séries temporais utilizadas foram construídas a partir de dados de superfície das variáveis de pressão atmosférica (microbarógrafo) e das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento de superfície. A série temporal de pressão atmosférica é de 8 dias (Figura 4.5), filtradas a cada 1 hora, ao passo que foi utilizado uma série temporal de 10 dias para as componentes u (não mostrada) e v do vento (Figura 4.7). O eixo horizontal (abcissas) representa a escala temporal em dias, no eixo vertical (ordenadas) são os períodos presentes na série, em horas.

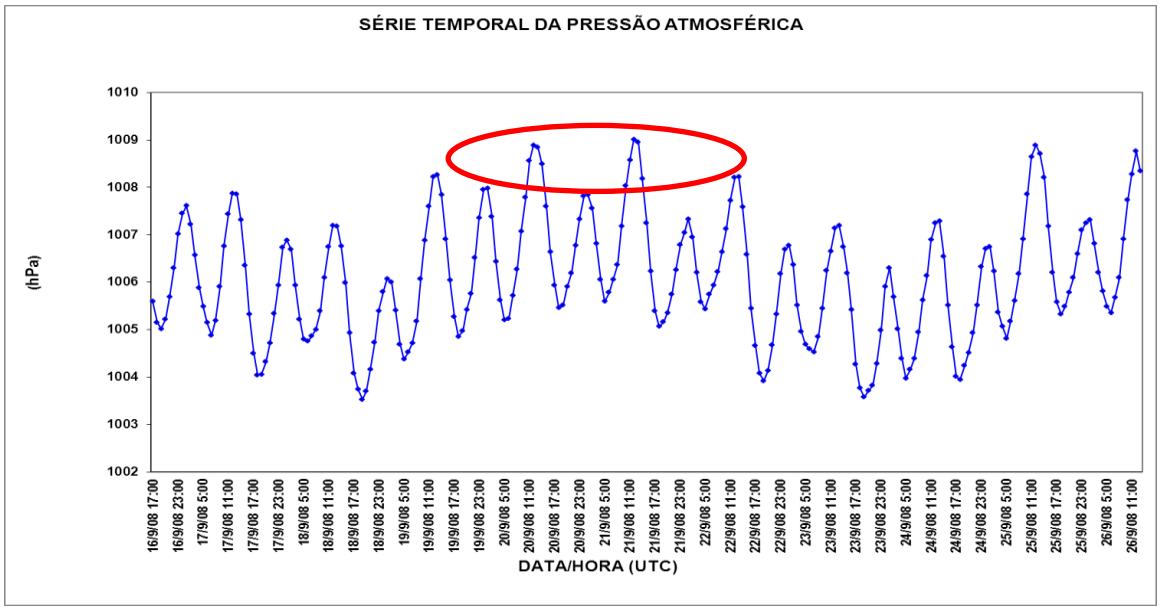


Figura 4.4 – Séries temporais de pressão atmosférica (hPa) no período de 17 a 24 de set/2008.

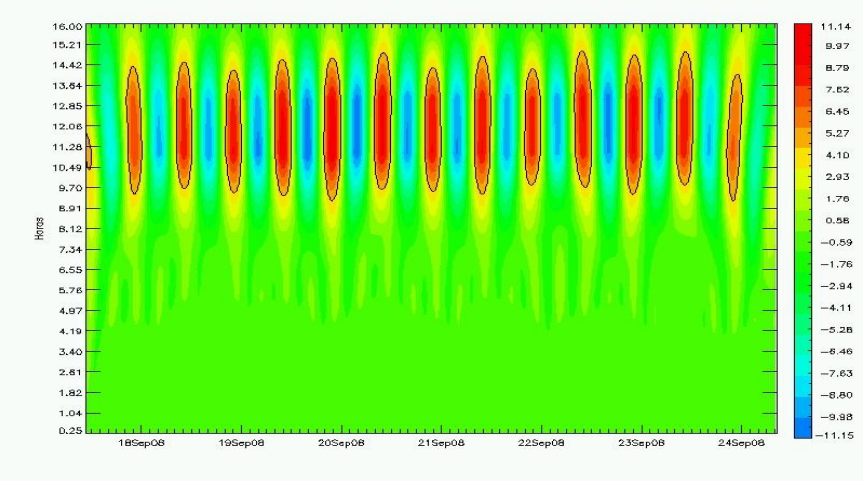


Figura 4.5 – Wavelet da pressão atmosférica no período de 17 a 24 de set/2008.

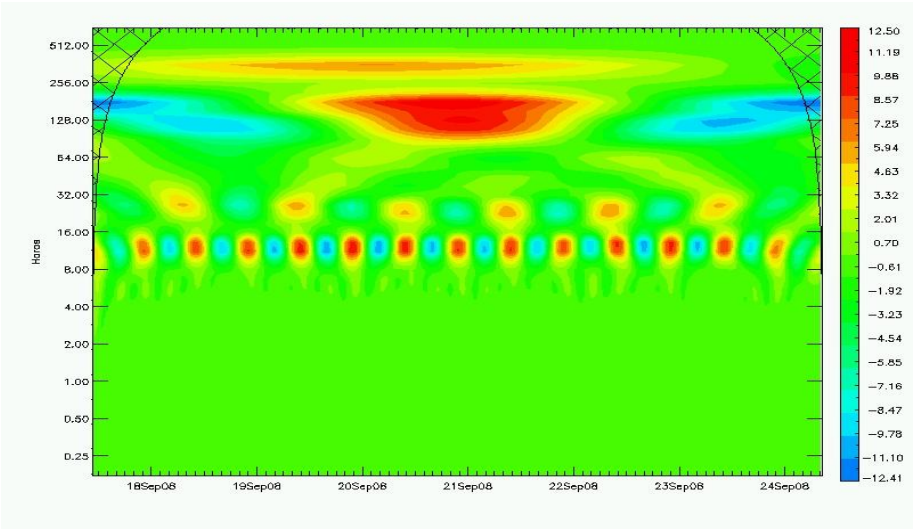


Figura 4.6 Cone de influência para pressão atmosférica.

Para o espectro de energia, a linha preta contínua no períodograma chama-se cone de influência e os períodos fora desse cone devem ser negligenciados por não possuírem confiança estatística. No cone de influência (semicírculo preto) destacam-se as escalas de variabilidade que apresentam significância estatística (Figuras 4.6 e 4.8). Observa-se uma grande variabilidade na energia entre os dias 19 e 22 de set/2008 (Figura 4.6). O espectro de potência global de ondeletas (GWS) determina o período de maior variabilidade na energia de uma série temporal. Para a componente v do vento, o GWS mostra um pico de energia bem intenso com valor por volta de 10 unidades para a energia. As Figuras 4.5 e 4.7 correspondem ao

zoom nas regiões de maior variabilidade de energia das Figuras 4.6 e 4.8, respectivamente.

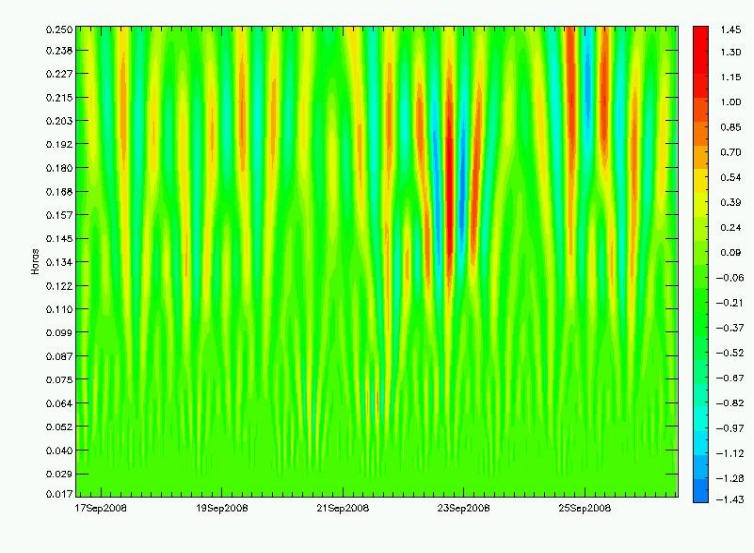


Figura 4.7 – Wavelet da componente meridional do vento (v) no período de 16 a 25 de set/2008.

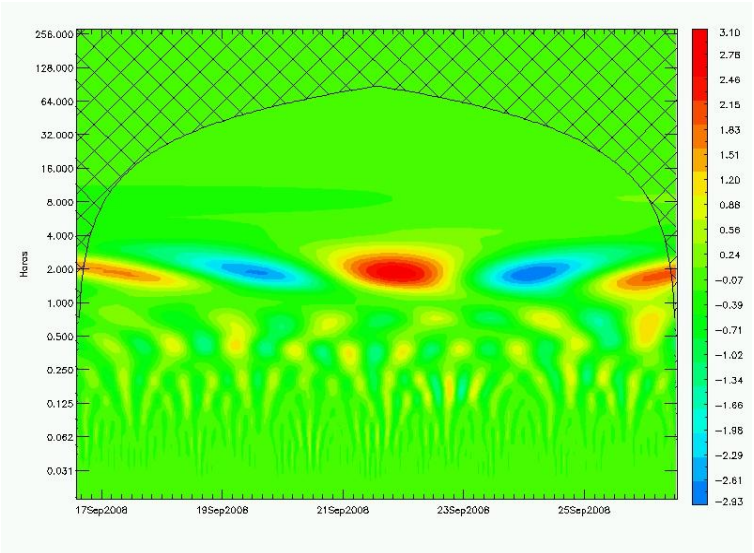


Figura 4.8 - Cone de influência para a componente v do vento.

O resultado encontrado poderia revelar a ocorrência de jatos de baixos níveis (JBN) sobre o CLA. Para tanto, analisou-se a ocorrência de JBN durante o período. Os jatos de baixos níveis são classificados como um movimento de escala meso-β, com características espaciais entre 20 e 200 km (largura) ou até mais de 500 km de comprimento (MARENGO; SOARES, 2002), que ocorrem dentro dos dois primeiros

quilômetros da atmosfera, associados a uma forte oscilação diurna do vento na camada limite planetária (WU; RAMAN, 1997).

Os JBN são reconhecidos como uma complexa resposta da Camada Limite Planetária (CLP) ao ciclo diurno da forçante térmica e apresentam uma região de máxima velocidade bem definida. Neste sentido, o jato pode ser definido por uma camada atmosférica de pequena espessura na qual o escoamento de ar apresenta uma intensa velocidade (Wippermann, 1973). A formação dos JBN ocorre em razão da aceleração do escoamento associada à: (a) oscilação inercial; (b) canalização topográfica; (c) bloqueio topográfico; (d) efeito baroclínico causado por contrastes térmicos na superfície; (e) forçante de escala sinótica (Wu e Raman, 1997).

Estudos numéricos mostram que o contraste térmico gerado pela heterogeneidade da superfície é um dos principais mecanismos responsáveis pela geração de JBN (Wu e Raman, 1997). No caso do CLA esta última condição pode ser bem satisfeito dado o contraste existente na região (oceano-continente).

Para selecionar os casos de ocorrência de JBN analisaram-se os perfis do campo do vento das radiossondagens, utilizando os critérios de classificação propostos por Bonner (1968), e posteriormente modificados por Whiteman et al (1997) e Stivari (1999), os quais sugerem dois critérios de classificação que devem ser satisfeitos simultaneamente: (a) o primeiro especifica o valor máximo da velocidade do vento “núcleo do jato”, e (b) o segundo especifica a diminuição do valor da velocidade do vento acima do seu núcleo máximo até atingir a velocidade mínima abaixo de 3 km. Além destes critérios agregou-se também uma nova categoria (JBN Fraco) proposta por Corrêa et al. (2001) (Tabela 4.2).

TABELA 4.2 – Critérios de classificação para jatos de baixos níveis

TIPO	CRITÉRIO DE CLASSIFICAÇÃO	REFERÊNCIA
J FRACO	$V_{max} > 6$ m/s e $(V_{max} - V3km) \geq 5$m/s	Corrêa et al. (2001)
J 0	$V_{max} \geq 10$ m/s e $(V_{max} - V3km) \geq 5$m/s	Whiteman et al. (1997)
J I	$V_{max} \geq 12$ m/s e $(V_{max} - V3km) \geq 6$m/s	Bonner (1968)
J II	$V_{max} \geq 16$ m/s e $(V_{max} - V3km) \geq 8$m/s	Bonner (1968)
J III	$V_{max} \geq 20$ m/s e $(V_{max} - V3km) \geq 10$m/s	Bonner (1968)
J IV	$V_{max} \geq 10$ m/s e $(V_{max} - V3km)$ pelo menos a metade da V_{max}	Stivari (1999)

Fonte: Adaptado de Karam (2002).

Reiter (1963) argumenta que os jatos que têm significativo ciclo diário e estão associados com o desenvolvimento de inversão noturna deveriam ser nomeados de vento máximo de inversão, embora apresentando pequeno cisalhamento horizontal. Somente aqueles jatos com apreciável cisalhamento vertical e horizontal deveriam ser denominados JBN. Contudo, o termo vento máximo de inversão não tem sido usado na literatura e o termo JBN tem sido usado extensivamente para jatos na baixa troposfera de todos os tipos.

Para as situações que não caracterizam JBN utiliza-se uma classificação para Ventos Máximos (VM) proposta por Corrêa (2005) que é apresentada na Tabela 4.3.1, utilizando-se de uma classificação semelhante à anterior, entretanto sem considerar o critério do cisalhamento vertical associado às situações de jato e também, sem considerar a classe de JBN Fraco.

TABELA 4.3 – Critérios de classificação para vento máximo (VM)

VM CATEGORIA	CRITÉRIO DE CLASSIFICAÇÃO
VM-0	$V_{max} \geq 10$ m/s
VM-1	$V_{max} \geq 12$ m/s
VM-2	$V_{max} \geq 16$ m/s
VM-3	$V_{max} \geq 20$ m/s

Fonte: Corrêa (2005).

Adotando o critério da tabela acima, a ocorrência de JBN no período seco é mostrada na Tabela 4.4. Foram identificadas as seguintes características dos JBNs durante o período:

1) Jatos do tipo J I;

2) Ocorrência acima de 500 m, tanto para as sondagens diurnas (12:00 e 18:00 UTC) quanto para as noturnas (00:00 e 06:00 UTC);

3) Velocidades máximas acima de 13m/s.

TABELA 4.4 – JBNs detectados no período seco - 16 a 26/09/2008

DIA	TIPO	HORA (UTC)	$V_{MÁX}$ (m/s)	ALTITUDE(m)
16	J II	00:00	16,2	1.000
16	J I	12:00	14,6	950
16	JII	18:00	16,0	2.100
17	J I	00:00	13,5	750
17	JI	06:00	15,3	2.450
17	J I	12:00	14,3	650
18	J I	06:00	17	800
18	J I	12:00	13,3	950
20	J I	12:00	**18,8**	1.250
24	J0	00:00	17,5	2.350

O JBN mais baixo (alto) ocorreu no dia 17 (dia 17) às 12:00 UTC (06:00 UTC) em 650m (2.450m). O JBN ocorrido no dia 20 às 12:00 UTC foi o mais intenso do período, com velocidade de 18,8 m/s. Neste dia a análise de *wavelet* de pressão também aponta uma variação da pressão atmosférica em superfície que pode estar associada, enquanto a *wavelet* da componente meridional do vento não aponta um sinal expressivo para este mesmo dia.

Os VM apresentam-se, em média, mais intensos e mais altos. A Tabela 4.5 apresenta 32 ocorrências de VM no período seco (2008). Destas, somente 2 ocorrências do tipo VM-0, 20 do tipo VM-1, 9 do tipo VM-2 e 1 do tipo VM-3. Durante o período, 62,5% dos casos de VM foram classificados com VM-1, seguido de 28,1% casos de VM-2. Pode-se observar que entre os dias 19 a 21 ocorreram os VM em altitudes inferior ou igual a 1.500m, enquanto que, nos outros dias eles foram encontrados em altitudes superiores a 2.000m.

No dia 22, em todos os horários (00:00; 06:00; 12:00 e 18:00 UTC) ocorreram VM-1 em altitudes superiores a 2.000m. Apesar disso, não é possível associar a ocorrência destes VM à variabilidade de energia observada nas wavelets, haja vista que, nos dias posteriores a este (23, 24, 25 e 26) também foi observada a ocorrência de VM.

TABELA 4.5 – Ventos máximos detectados no período seco - 16 a 26/09/2008

DIA	TIPO	HORA (UTC)	VM (m/s)	ALTITUDE (m)
17	VM0	18:00	10,3	2.500
18	VM1	00:00	14,1	2.700
18	VM1	18:00	13,7	3.000
19	VM1	00:00	15,5	2.800
19	**VM2**	**06:00**	**16,0**	**1.200**
19	**VM2**	**12:00**	**17,4**	**750**
19	**VM1**	**18:00**	**15,2**	**700**
20	**VM1**	**00:00**	**15,8**	**1.050**
20	**VM2**	**06:00**	**18,2**	**1.050**
20	**VM1**	**18:00**	**12,8**	**1.400**
21	**VM1**	**00:00**	**12,8**	**1.500**
21	VM2	06:00	16,1	2.900
21	**VM1**	**12:00**	**13,1**	**1.050**
21	**VM0**	**18:00**	**11,6**	**600**
22	VM1	00:00	13,3	3.000
22	VM1	06:00	15,3	2.550
22	VM1	12:00	13,9	2.050
22	VM1	18:00	12	2.250
23	VM2	00:00	17,9	2.800
23	VM1	06:00	15,9	3.000
23	VM1	12:00	14,1	2.250
23	VM1	18:00	14,5	2.600
24	VM1	06:00	13,7	2.800
24	VM2	12:00	16,3	2.700
24	VM1	18:00	15,4	2.950
25	VM3	00:00	20,7	2.900
25	VM2	06:00	17,9	3.000
25	VM2	12:00	17,9	2.850
25	VM1	18:00	13,2	3.000
26	VM1	00:00	15,5	2.550
26	VM2	06:00	16	2.350
26	VM1	12:00	15	2.600

O sinal mais forte (energia) da componente meridional foi verificado no dia 22, mas não foi identificado nenhum JBN neste dia. De fato, talvez não haja associação direta entre a ocorrência de JBN e a componente meridional do vento em superfície. É provável que o sinal observado por meio das *wavelets* seja de alguma "perturbação" atmosférica, como por exemplo: um distúrbio ondulatório acima de 3.000m (limite superior da atmosfera aqui estudada), a aproximação de uma frente, a própria ZCIT ou ainda, ondas de leste. A variabilidade de valores máximos e

mínimos realmente existe, porém, analisar uma escala com somente cinco dias se torna um pouco difícil confirmar que esta perturbação esteja associada a um determinado tipo de fenômeno meteorológico.

4.1.2 Período Chuvoso (ano 2010)

4.1.2.1 Aspectos Sinóticos

No mês de março, esperavam-se fortes atividades convectivas, devido à posição climatológica da ZCIT. Contudo, devido à atuação dos eventos El Niño Oscilação Sul (ENOS) e, no Atlântico Norte, as anomalias positivas de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) foram favoráveis ao posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ao norte de sua posição climatológica (Boletim Climanálise, 2010). Consequentemente, predominou uma anomalia negativa de precipitação em praticamente toda faixa norte do Nordeste na primeira metade do mês. Durante o período de interesse (19 a 25/03) ocorreram linhas de instabilidade, associadas à brisa marítima e ao padrão de ventos de norte difluentes em altitude juntamente com o fortalecimento dos ventos de norte/nordeste em baixos níveis (Figura 4.9), responsáveis pela ocorrência de chuva totalizando 171,2 mm no CLA. As quantidades de chuvas mais significativas ocorreram nos dias 21, 23 e 24 sendo observados valores de 56,4 mm, 26,6 mm e 48,3 mm, respectivamente (Figura 4.10).

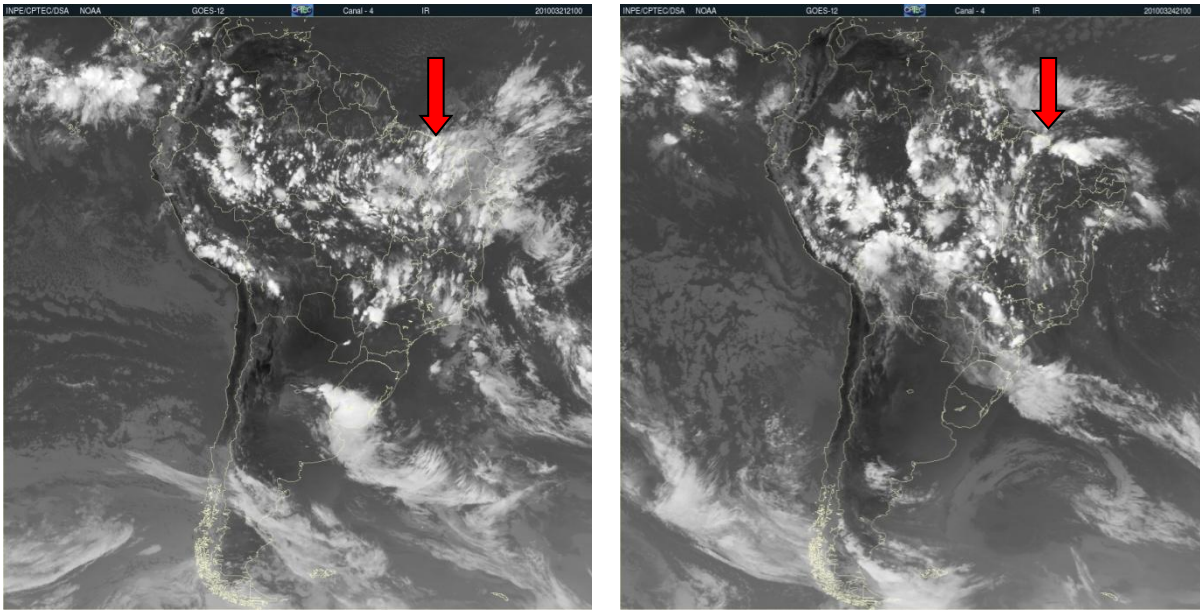


Figura 4.9 – Imagens do satélite GOES-10, no canal infravermelho, (a) dia 21/03 às 21:00 UTC e (b) dia 24/03 às 21:00 UTC.

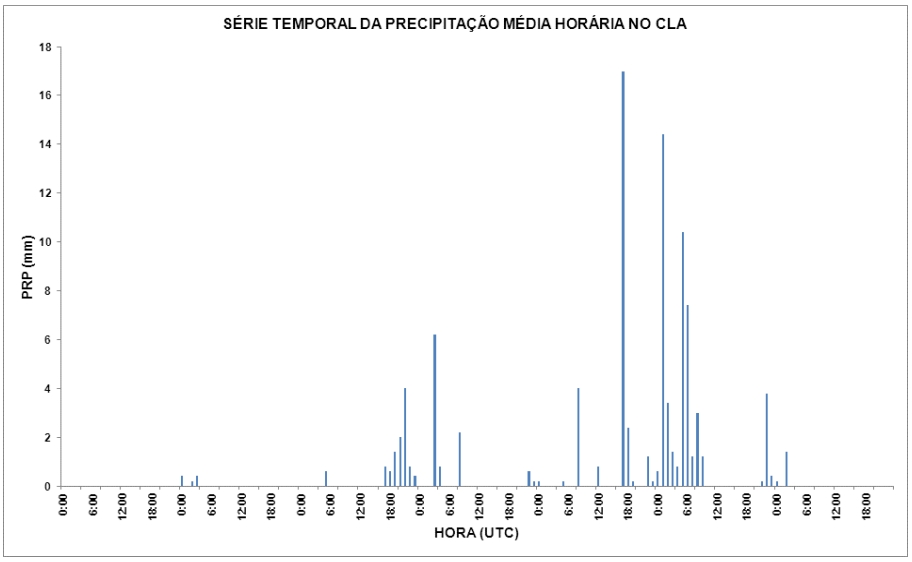


Figura 4.10 – Série temporal de chuva no período de 19 a 25 de mar/2010.

Na época chuvosa (19 a 25 de março de 2010) a nebulosidade total, em média, observada foi de 4 a 7/8, sendo que, o período de maior quantidade de nuvens (7/8) ocorria das 09:00 às 12:00 UTC e, o restante do período diurno em torno de 4/8.

Durante a noite o céu permanecia nublado a encoberto, sendo observado totalmente encoberto de nuvens *stratus*, *cumulus congestus* e *altostratus* a partir das 23:00 até 07:00 UTC do dia seguinte e, nublado de *cumulus congestus* e *altostratus* (6 a 7/8) às 21:00 e 22:00 UTC e, novamente a partir das 08:00 UTC (Figura 4.11). Nuvens *nimbostratus* e *cumulonimbus* também ocorreram neste período, porém, com menor frequência. Em ambos os períodos (diurno e noturno) a direção de onde vêm as nuvens foi de leste.

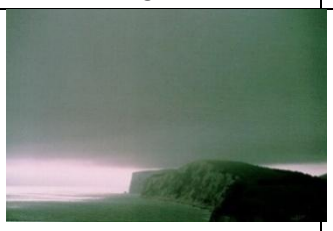
2010	NEBULOSIDADE TOTAL	1ª CAMADA	2ª CAMADA	3ª CAMADA
		ST	TCU	AS
PERÍODO NOTURNO	8/8			
		1ª CAMADA	2ª CAMADA	3ª CAMADA
		TCU	AS	
PERÍODO DIURNO	7/8			

Figura. 4.11 – Nebulosidade predominante durante o período de 19 a 25/mar/2010 (chuvoso) no CLA.

4.1.2.2 Séries Temporais dos Elementos Meteorológicos de Superfície

A Figura 4.12 (a) apresenta a série temporal da temperatura do ar e apresenta uma mudança significativa a partir do dia 21, em decorrência das chuvas e pela diminuição da quantidade de radiação solar que chega a superfície do CLA. A umidade relativa ultrapassa os 90% (Figura 4.12 (b)), sendo que o valor médio observado no ficou em torno de 85%.

Quanto à série temporal de pressão atmosférica não houve nenhuma flutuação significativa durante o período (Figura 4.12 (c)). A Figura 4.12 (d) mostra a série temporal da radiação solar para o período de estudo. Examinando-se a série, constata-se que o valor máximo de 926 W/m² ocorreu no dia 19 e, o aumento da quantidade de nebulosidade existente sobre Alcântara refletiu na redução gradativa da radiação solar nos dias 23 (639 W/m²) e 24 (518 W/m²), respectivamente.

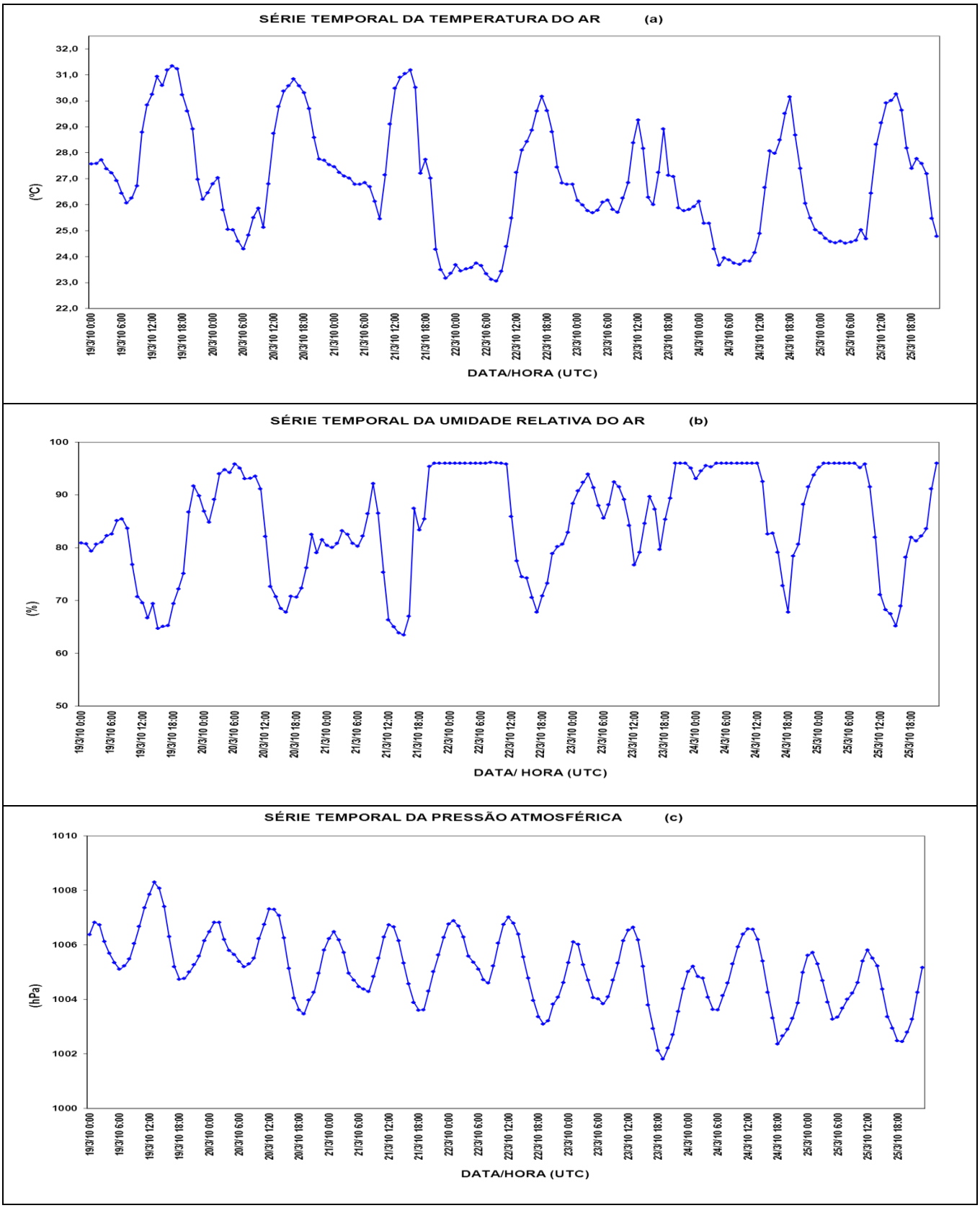
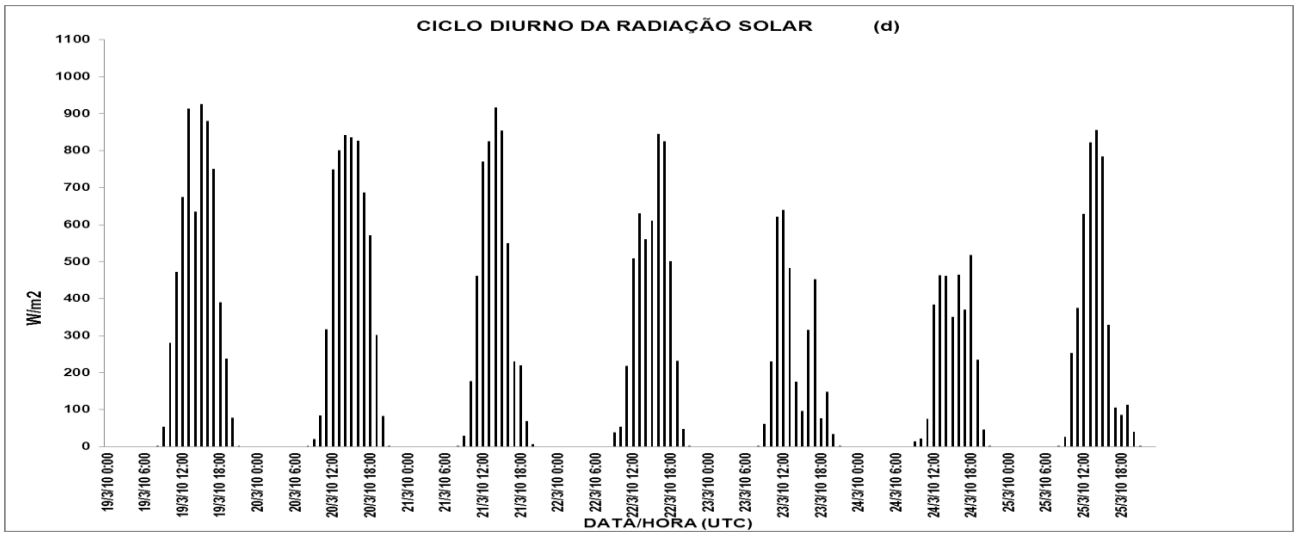


Figura 4.12 – (a) Séries temporais de temperatura do ar (°C), (b) umidade relativa do ar (%), (c) pressão atmosférica (hPa),(d) radiação solar (W/m2) e (e) velocidade do vento (m/s)para o período de 19 a 25/03/2010.



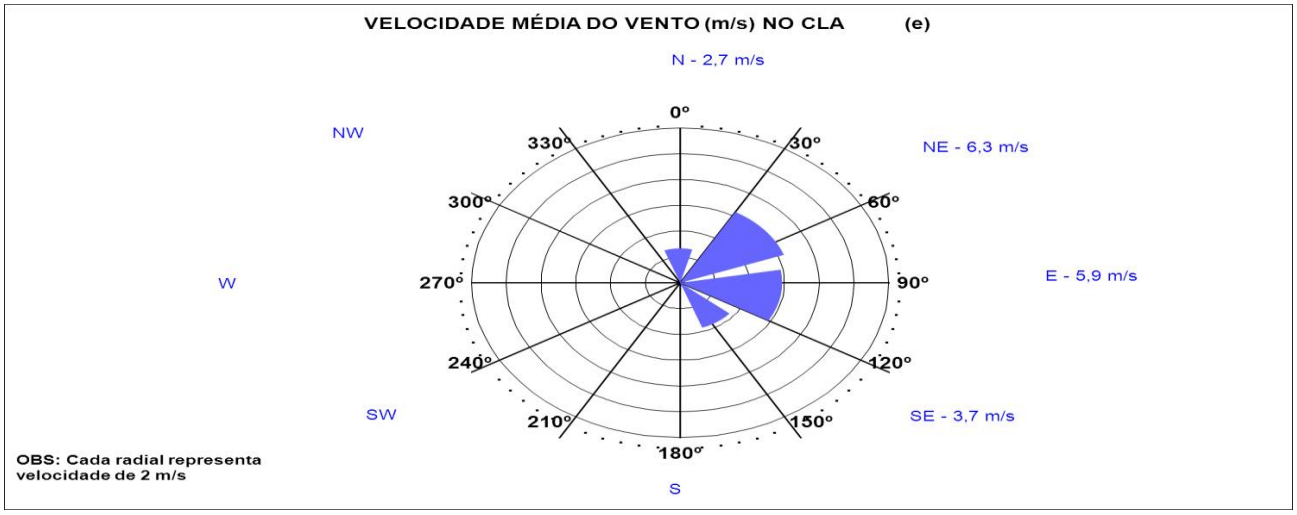


Figura 4.12 – (a) Séries temporais de temperatura do ar (°C), (b) umidade relativa do ar (%),(c) pressão atmosférica (hPa), (d) radiação solar (W/m2) e (e) velocidade do vento (m/s)para o período de 19 a 25/03/2010 (continuação).

A Figura 4.12(e) mostra as velocidades médias para cada direção do vento correspondente. A velocidade média de 6,3 m/s foi observada quando o vento soprava de NE e, de 2,7m/s para o vento de direção N.

Com relação à JBN, a Tabela 4.6 mostra a ocorrência de cinco jatos durante o período. Das cinco ocorrências, quatro foram do tipo J0 e somente um do tipo JI e suas velocidades máximas variaram de 11 (1.550m) a 14m/s (400m).

TABELA 4.6 – JBNs detectados no período chuvoso - 19 a 25/03/2010

DIA	TIPO	HORA (UTC)	$V_{MÁX}$ (m/s)	ALTITUDE(m)
20	J 0	12:00	14	400
22	J 0	00:00	11,6	900
22	J 0	18:00	11	1.550
23	J 0	00:00	13,2	1.650
23	J 1	06:00	13,7	1.900

Os VMs apresentam-se, em média, mais altos em relação aos JBNs. A Tabela 4.7 apresenta 14 ocorrências de VMs no período chuvoso (2010), sendo estes divididos em: 8 casos de VM1 e 6 casos de VM0. Nesta pequena amostra, observa-se que a ocorrência de VMs mais intensos ocorre no período da noite/madrugada.

Na literatura existe a associação da ocorrência de JBNs com o sinal de precipitação no período da manhã entre 09:00 e 13:00 UTC, e consequentemente o aumento da nebulosidade (Cbs/trovoadas) (Bonner, 1966). No CLA, a ocorrência de máximos significativos de precipitação (Figura 4.10) provavelmente esteve associada às ocorrências de JBNs e VMs nos dias 21, 23 e 24.

TABELA 4.7 – Ventos máximos detectados no período chuvoso - 19 a 25/03/2010

DIA	TIPO	HORA (UTC)	VM (m/s)	ALTITUDE (m)
19	VM1	00:00	14,4	2.450
19	VM1	06:00	13,7	2.550
19	VM0	12:00	11,6	2.050
19	VM0	18:00	10,3	1.150
20	VM1	00:00	12,7	2.500
20	VM1	06:00	12,5	2.850
20	VM0	18:00	11,6	2.250
21	VM1	00:00	12,3	1.250
21	VM1	06:00	12,2	2.150
22	VM1	06:00	12,4	2.600
22	VM1	12:00	11,8	1.050
23	VM1	12:00	13	1.650
23	VM0	18:00	11,8	2.200
24	VM0	06:00	11,3	2.600

4.2 – Perfil Termodinâmico e Cinemático da Atmosfera durante as Campanhas Murici2008 (Período Seco) e GPM2010 (Período Chuvoso)

O diagrama termodinâmico *Skew-t Log p* das sondagens realizadas às 12:00 e 18:00 UTC no CLA durante as campanhas Murici (2008) e GPM (2010) são apresentadas nas Figuras 4.13 a 4.16. A partir destes são feitos os cálculos dos índices de instabilidade, os perfis verticais de vento e estimativa da altura da camada limite (por meio do perfil de temperatura potencial). A combinação entre os perfis do vento (direção e velocidade) e temperatura potencial é fundamental para o estudo do vento e a estrutura da CLP.

4.2.1 Campanha Murici (Set/2008 – Período Seco)

Quanto à caracterização da atmosfera, em geral, o período seco pareceu pouco instável, entretanto, com condições favoráveis à formação de nuvens cúmulos rasos. Foi observado que possivelmente o cisalhamento vertical proporcionou a baixa eficiência de precipitação, induzindo convecção isolada, não organizada. Também, é observada a existência de uma camada de ar seco em níveis acima de 700 hPa, acima de uma camada úmida e quente em níveis baixos, quase sempre com uma inversão que inibe o levantamento espontâneo do ar (Figura 4.13).

Os índices termodinâmicos utilizados foram: o índice CAPE (Convective Available Potential Energy) e o CINE (termo em inglês) foram calculados a partir do *software* GrADS. O índice CAPE pode ser utilizado como variável diagnóstica da condição da atmosfera. No entanto, Doswell e Schultz (2006) mostram que esta variável apresenta problema de interpretação física quando usada como variável prognóstica. Por exemplo, altas quantidades de CAPE são observadas onde há disponibilidade de umidade em baixos níveis da atmosfera e na presença de taxas de variação vertical da temperatura (ou *lapse rate*) condicionalmente instáveis nas camadas mais baixas da média troposfera. Contudo, estes dois constituintes de CAPE podem se desenvolver quase independentemente e podem ser superpostos por processos advectivos. A presença de CAPE, portanto, indica quando esta superposição ocorre e não quando esta superposição irá ocorre no futuro. Inversamente, a ausência de CAPE num certo momento não pode ser usada como indicativo de que no futuro não poderá haver maiores valores de CAPE.

Tendo em vista a consideração acima foi observado um valor médio da CAPE de 1477,6 Jkg^{-1}, o que segundo a Tabela 4.8 define uma atmosfera moderadamente instável e, o CINE com valor médio de 7,7 Jkg^{-1} para o período seco de 2008. Em alguns dias, como pode ser visto na sondagem do dia 24 (12:00 UTC), por exemplo, o índice CAPE teve seu valor reduzido (795Jkg^{-1}) associado a uma camada isotérmica entre 900 e 840hPa (zona de entranhamento) e o valor de CINE aumentado (16Jkg^{-1}) em associação com cisalhamento vertical.

TABELA 4.8: Valor do índice CAPE

Valor do CAPE	Potencial Convectivo
0 a 1000	Marginalmente Instável
1000 a 2500	Moderadamente Instável
2500 a 4000	Acentuadamente Instável
> 4000	Extremamente Instável

Fonte: Dias, 2008.

As sondagens dos dias 16 (18:00 UTC), 17 (12:00 e 18:00 UTC), 18 (12:00 UTC), 22 (12:00 e 18:00 UTC) e 25 (12:00 UTC) apresentaram aquecimento entre os níveis de 600 e 500hPa o que favoreceu a formação de nuvens *altostratus* sobre a região do CLA.

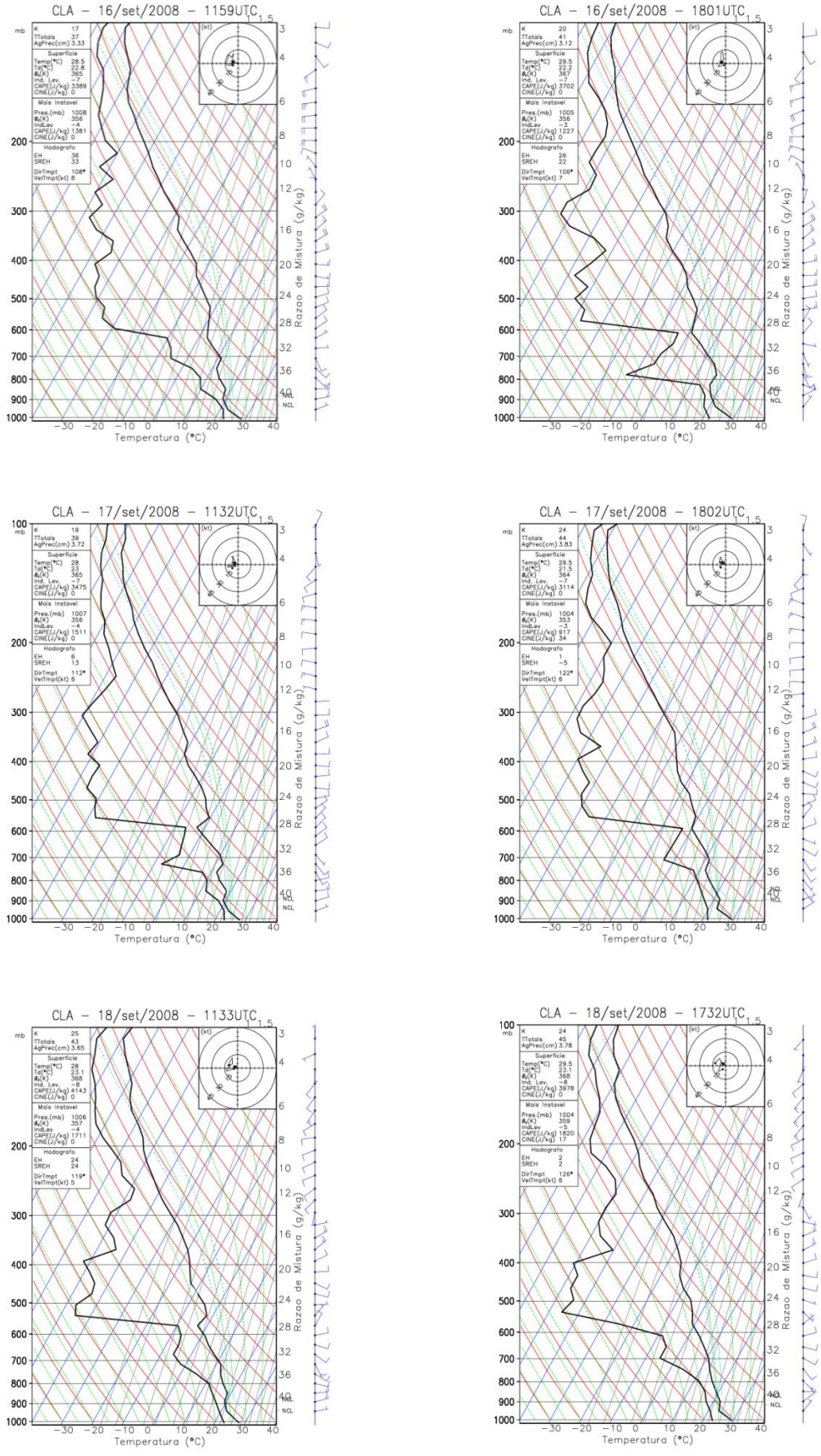


Figura 4.13 – Diagramas termodinâmicos Skew T-Log p das sondagens realizadas no CLA às 12:00 e 18:00 UTC nos dias 16, 17 e 18/set/2008.

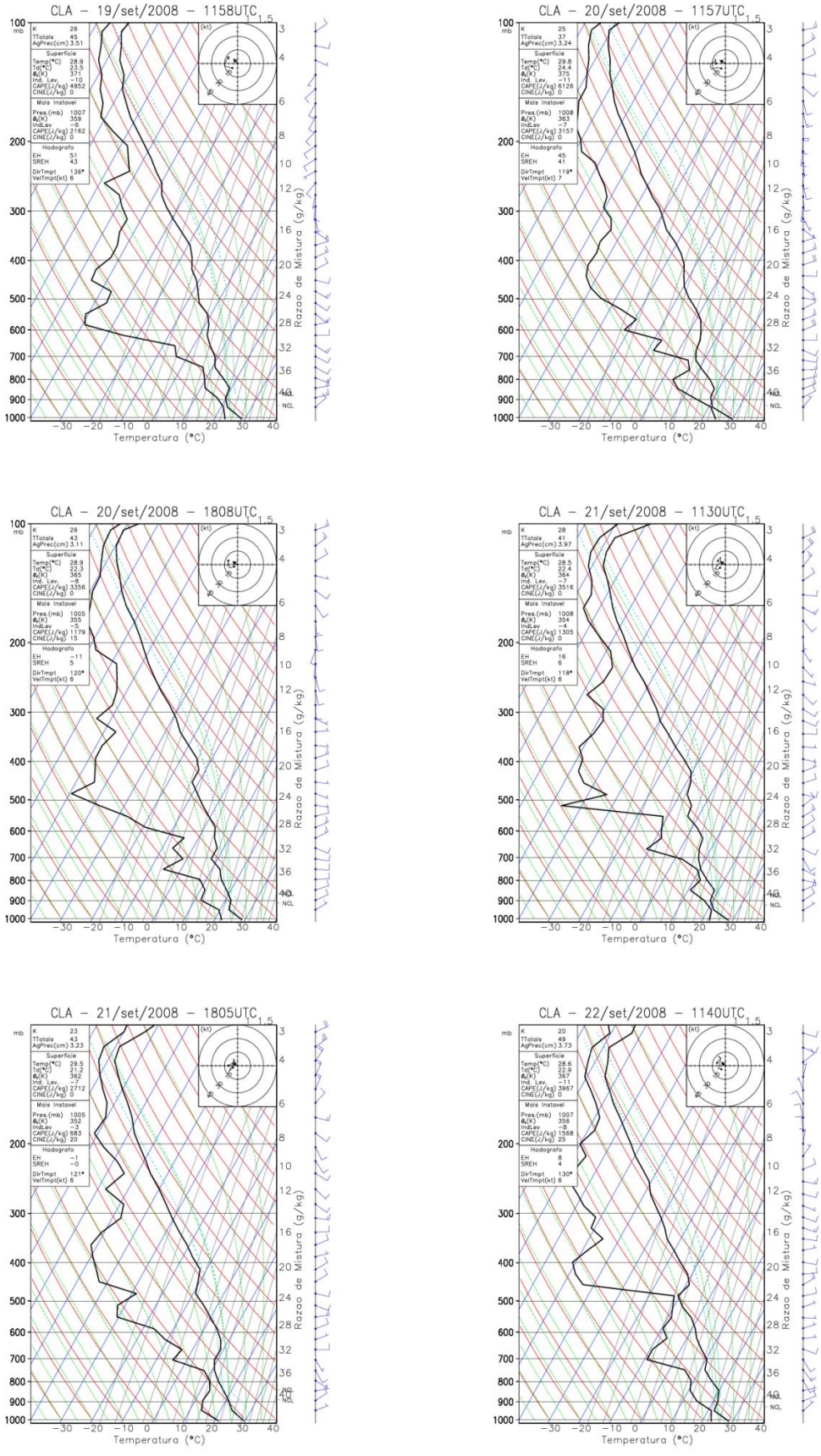


Figura 4.13 – Diagramas termodinâmicos Skew T-Log p das sondagens realizadas no CLA às 12:00 e 18:00 UTC nos dias 19, 20, 21 e 22/set/2008 (continuação).

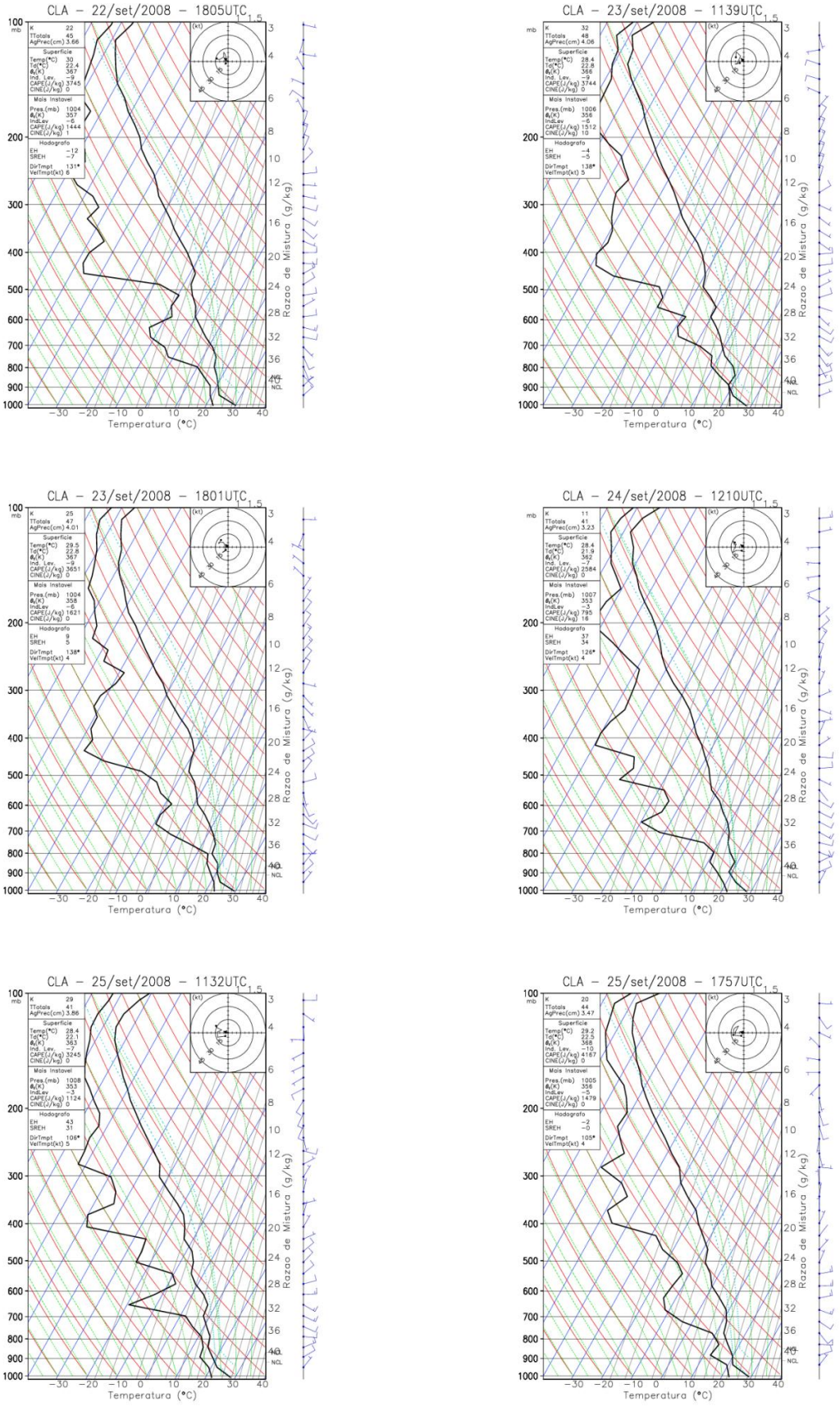


Figura 4.13 – Diagramas termodinâmicos Skew T-Log p das sondagens realizadas no CLA às 12:00 e 18:00 UTC nos dias 22, 23, 24 e 25/set/2008 (conclusão).

A fim de analisar com detalhes a estrutura da CLP, os perfis verticais de vento foram divididos em período diurno (sondagens realizadas às 12:00 e 18:00 UTC) e período noturno (sondagens realizadas às 00:00 e 06:00 UTC) em ambas as Campanhas (Murici2008 e GPM2010).

A Figura 4.14 (a) apresenta o perfil médio da velocidade do vento para o período seco (Murici2008). Neste período a velocidade média do vento na camada de 50 a 3.000m foi 10,1 e10,8m/s nos períodos do dia e da noite, respectivamente. O vento mínimo (máximo) observado durante o dia foi de 5,5m/s (11,6m/s) e durante a noite o vento mínimo (máximo) foi de 3,5m/s (14,4m/s). Comparando o período diurno e noturno observou-se uma diferença entre 0 a 2,0m/s da velocidade do vento nos primeiros 2.350m da atmosfera, enquanto que, acima desta altitude o aumento chegou a quase 3,0m/s de diferença.

As variações de intensidade do vento não estiveram, necessariamente, associadas às mudanças na direção do vento. O comportamento do vento estabelece um padrão nos primeiros 1.000m de ventos de direção NE, de E entre 1.000 e 1.500m, acima de 1.500 até 3.000m há predominância da direção SE e, posteriormente tendendo a retornar para o quadrante NE. A velocidade do vento foi maior nos horários entre 06:00 e 12:00 UTC. Estes resultados estão em concordância com os resultados encontrados por Fisch (1999), apesar da velocidade observada nos primeiros 2.000m ser superior (em torno de 4,0m/s) e a mudança do vento para direção sudeste ser mais expressiva.

Em geral, durante o período seco o perfil da direção do vento foi predominantemente de direção NE nos primeiros 1.500m e, acima deste nível, o vento apresenta uma rotação para a direção SE. A velocidade do vento apresenta um aumento nos primeiros 100m e com pouco mais de 10,0m/s de intensidade acima de 500m. Próximo a 1.000m sua intensidade diminui, mas logo aumenta novamente. Na Figura 4.14.b vê-se os perfis de direção e velocidade do vento durante o período noturno. Neste período o vento é mais intenso desde a superfície até 700m e, assim como no período diurno há uma diminuição do vento próximo a 1.600m. Esta diminuição coincide com a mudança, quase sutil, da direção do vento sugerindo uma circulação entre continente e oceano, mas para confirmar esta sugestão seria necessária também a análise do perfil vertical do vento sobre o oceano.

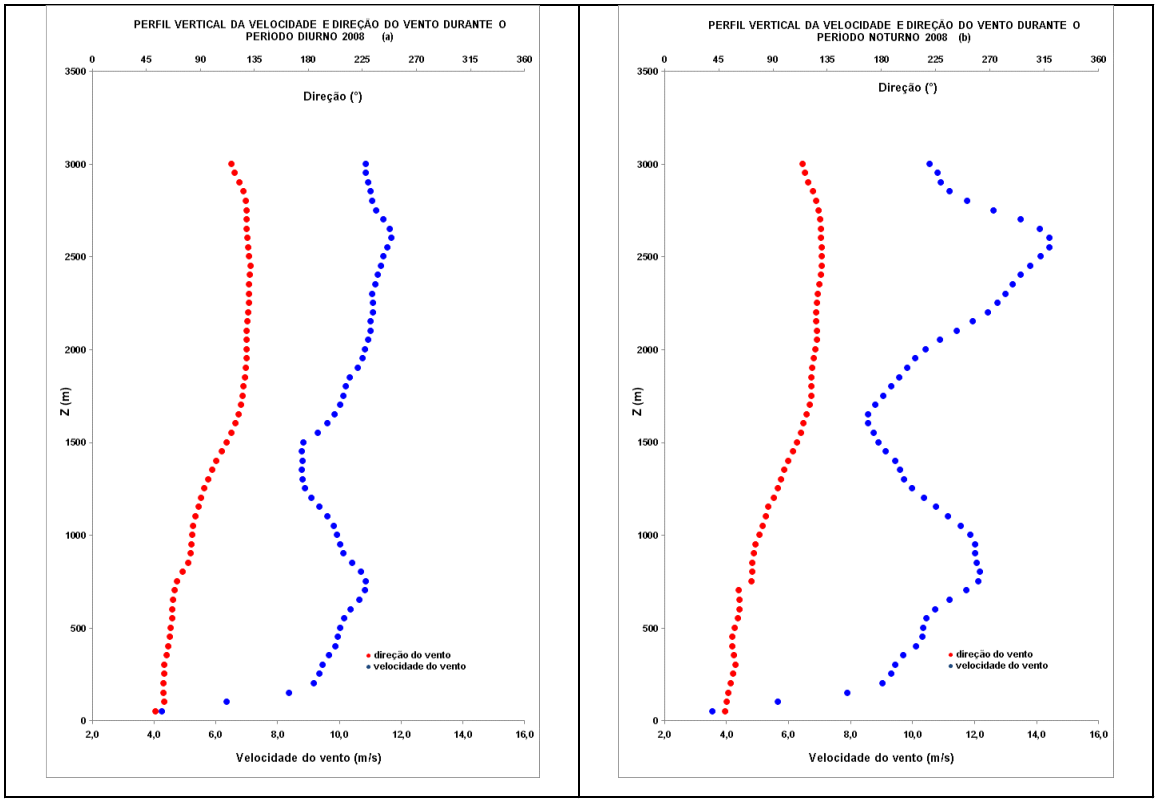


Figura 4.14 – (a) Perfis verticais da velocidade (abscissa inferior) e direção do vento (abscissa superior) para o período diurno (12:00 e 18:00 UTC) e (b) Perfis verticais da velocidade (abscissa inferior) e direção do vento (abscissa superior) para o período noturno (00:00 e 06:00 UTC) a partir de sondagens de16 a 26/09/2008.

A estimativa da altura da Camada Limite Convectiva (CLC) foi feita através de análise gráfica do perfil de temperatura potencial (θ). A propriedade de θ é bem misturada na CLC e, ao atingir a camada de inversão, o gradiente dessa propriedade apresenta uma inclinação aguda, deixando de ser constante com a altura (z). A partir desta acentuada inclinação, determina-se o nível da camada de inversão, e admite-se que a altura da CLC corresponde à base desta camada no primeiro ponto onde o perfil da temperatura aumenta rapidamente por pelo menos três pontos consecutivos, sendo o ponto mais baixo a altura da CLC.

A partir do critério acima, analisou-se as sondagens realizadas nos horários das 12:00 e 18:00 UTC para os dois períodos seco (Murici2008) e chuvoso (GPM2010).

Durante o período seco a altura média da CLC às 12:00 UTC foi de 690m e no horário das 18:00 UTC foi reduzida para 575m. Como não foram realizadas sondagens às 15:00 UTC e pelos valores encontrados (12:00 e 18:00 UTC) estima-se que o maior desenvolvimento da CLC possivelmente ocorreu entre 14:00 e 15:00 UTC quando se teve maior aquecimento (Figura 4.3 (d)). Reuter (2002) encontrou o valor médio de 716m para CLC sobre o CLA, ou seja, a altura de 575m encontrada neste estudo também pode estar associada ao aumento da intensidade do vento haja vista que no estudo anterior a velocidade do vento médio em superfície oscilou entre 2 a 3,0m/s e, para este período (Murici2008) o vento médio ficou entre 4,0 a 5,0m/s aproximadamente. Ou seja, quando existe turbulência mecânica associada ao cisalhamento do vento, a profundidade da CLC tende a ser mais desenvolvida.

4.2.2 Campanha GPM (Mar/2010 – Período Chuvoso)

As Figuras 4.15(a) e (b) mostram os perfis verticais médio do vento no período chuvoso de 19 a 25/03/10. Neste período a velocidade do vento na camada entre 50 a 3.000m variou, em média, de 8,0m/s a 8,9m/s nos períodos do dia e da noite, respectivamente. O vento mínimo (máximo) observado durante o dia foi de 0,7m/s (9,0m/s) e durante a noite o vento mínimo (máximo) foi de 0,3m/s (10,4m/s). Nos primeiros 100m a velocidade do vento ficou abaixo de 4,0m/s (5,0m/s) no período noturno (diurno). De 200 a 1.500m a velocidade do vento ficou entre 6,3m/s a 9,3m/s tanto para o período da manhã quanto da noite. A partir de 1.800m há um aumento da velocidade do vento de 1,0 a 2,0 m/s no período da noite em relação à manhã.

Durante o dia nota-se uma variação na direção do vento nos primeiros 300m, onde há mudança do vento da direção SE para NE e, posteriormente, margeando a direção E até 3.000m (Figura 4.16.a). À noite, a variação na direção do vento é ainda menor, sendo de E nos primeiros 100m da superfície e, predominantemente de NE até 3.000m (Figura 4.16.b).

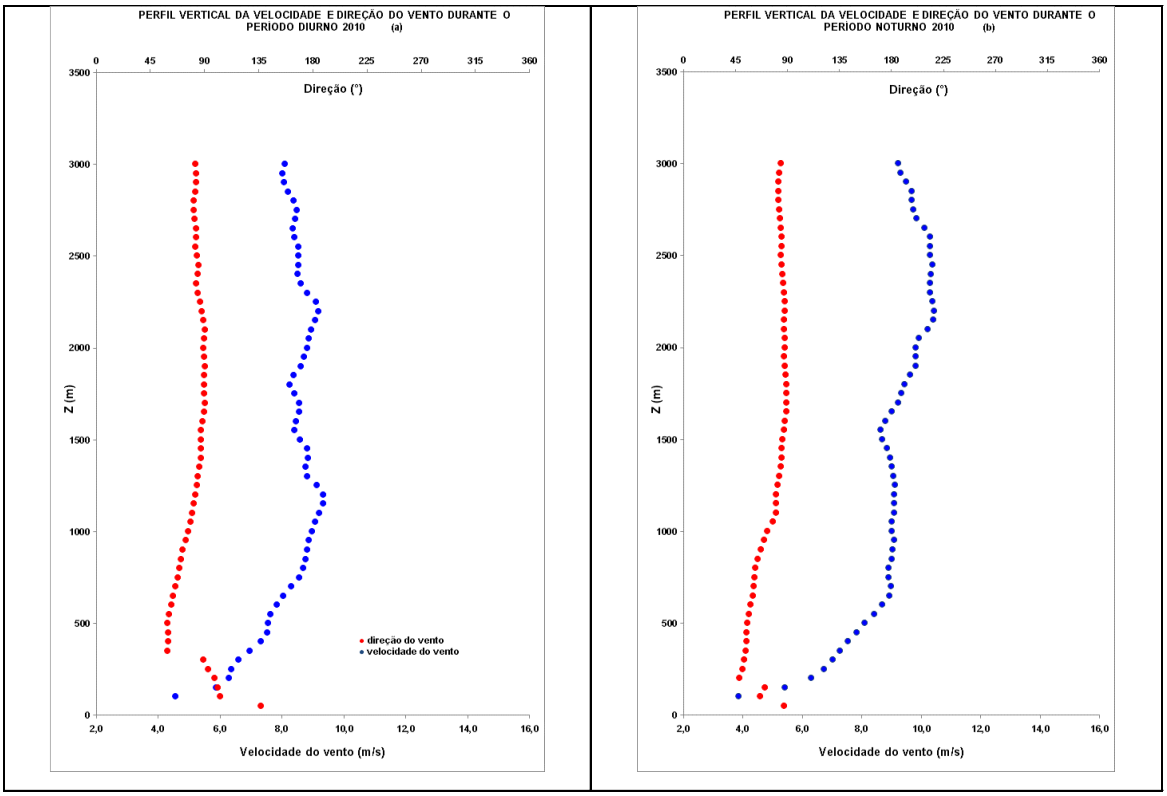


Figura 4.15 – (a) Perfis verticais da velocidade (abscissa inferior) e direção do vento (abscissa superior) para o período diurno (12:00 e 18:00 UTC) e (b) Perfis verticais da velocidade (abscissa inferior) e direção do vento (abscissa superior) para o período noturno (00:00 e 06:00 UTC) a partir de sondagens de19 a 25/03/2010.

Ao avaliar as estruturas da atmosfera por meio dos diagramas *Skew-T Log p* (Figura 4.16) durante o período chuvoso (GPM2010), infere-se à mesma muita instabilidade, favorável à formação de nuvens convectivas.

Na maior parte do período uma camada muito úmida é estabelecida, o que indica uma camada profunda de nuvens baixas até altas; provavelmente, *Cumulunimbos.* Como neste período as temperaturas são mais baixas nesta região, certamente o aumento da nebulosidade sobre a região é ocasionado pela posição da ZCIT, que traz a nebulosidade, reduz a temperatura e, possivelmente interfere nos ventos (superfície e altitude).

O valor médio de CAPE foi de 1002,9 Jkg^{-1} e o CINE com valor de 26,5Jkg^{-1}. Valores de CINE variam entre 0 J/kg (nenhuma inibição convectiva) e 50 Jkg^{-1}, com valores acima de 100 Jkg^{-1}sendo considerados altos. Apesar do valor de CINE ter sido maior que aquele observado no período seco, ainda assim é considerado baixo, ou seja,

este resultado combinado ao valor de CAPE alto, esteve associado à convecção na região.

No período chuvoso as temperaturas (devido ao menor valor de fluxo de calor sensível, que não foi medido) apresentam-se mais baixas em relação ao período seco, daí a altura média da CLC ser menor, sendo que às 12:00 UTC foi de 440m e às 18:00 UTC de 480m, este último valor um pouco maior neste horário em função da superfície demorar um pouco mais tempo para ser aquecida.

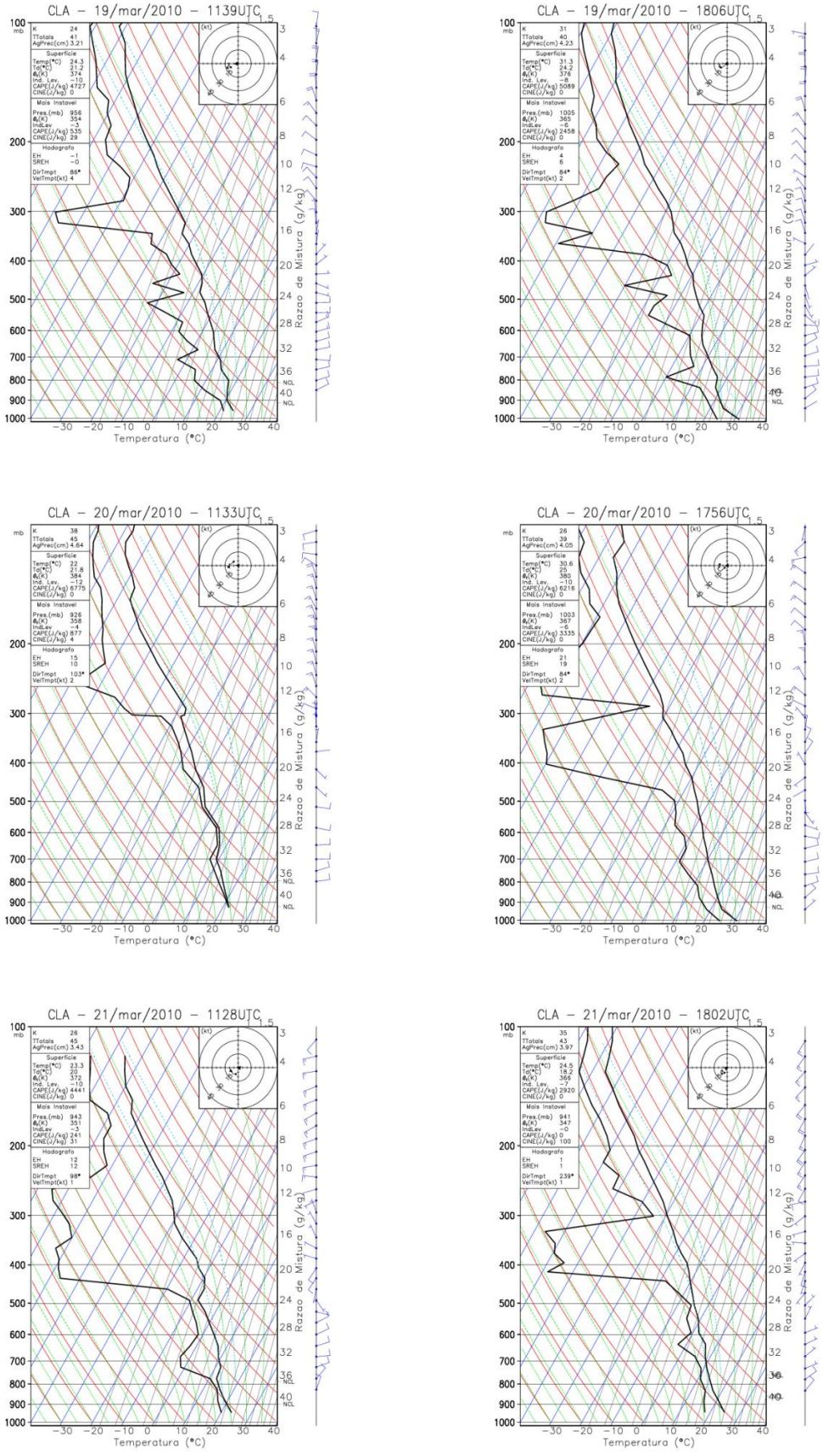


Figura 4.16 – Diagramas termodinâmicos Skew T-Log p das sondagens realizadas no CLA às 12:00 e 18:00 UTC nos dias 19, 20 e 21/mar/2010.

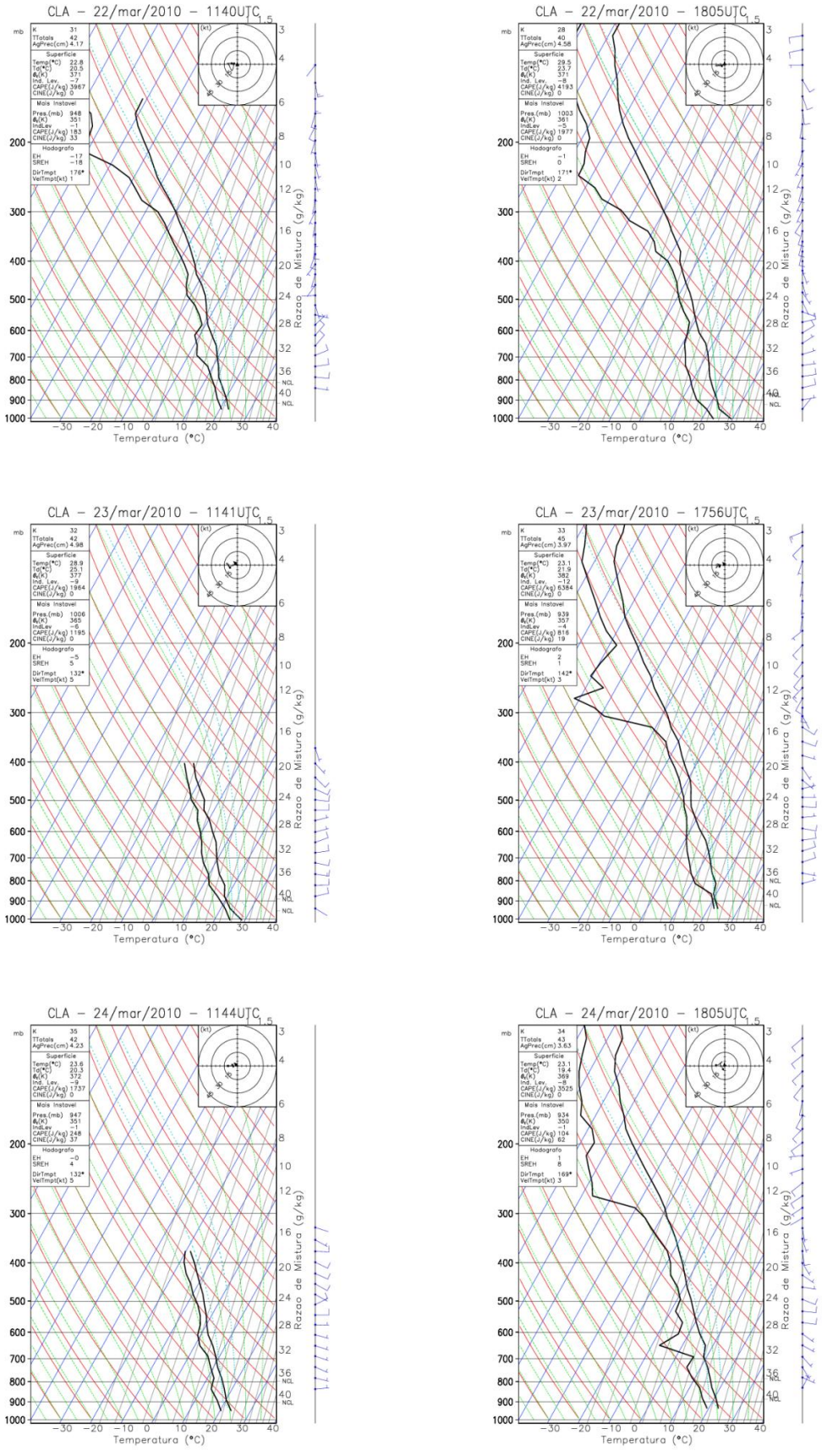


Figura 4.16 – Diagramas termodinâmicos Skew T-Log p das sondagens realizadas no CLA às 12:00 e 18:00 UTC nos dias 22, 23 e 24/mar/2010 (continuação).

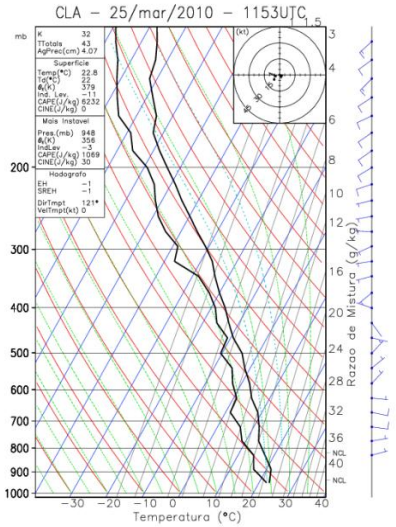


Figura 4.16 – Diagrama termodinâmico Skew T-Log p da sondagem realizada no CLA às 12:00 UTC no dia 25/mar/2010 (conclusão).

5 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os resultados referentes à diferentes parametrizações de Camada Limite Planetária considerando a previsão numérica do modelo MM5 para o caso de duas grades aninhadas, ou seja, dois domínios conforme apresentado no Capítulo 3. Para esta condição (Configuração I) serão apresentadas comparações gráficas entre séries temporais de componentes zonal e meridional do vento (relativamente aos dados observados), bem como métricas estatísticas tais como índice de concordância refinado de Willmott, Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e BIAS.

5.1 Dados para Verificação

A Tabela 5.1 apresenta as fontes de dados e os critérios de avaliação para o CLA.

Tabela 5.1 - Fontes de dados observados e critérios para comparação do vento

Fonte de dados	Critério de avaliação para comparação
Dados de radiossondagens a cada 6 horas (00:00; 06:00; 12:00 e 18:00) realizadas no CLA.	Considera-se somente os horários das 00:00 e 12:00 UTC. Análise estatística (Willmott, RMSE e BIAS).
Dados do NCEP/NCAR Reanalysis	Considera-se somente os horários das 00:00 e 12:00 UTC. Análise gráfica subjetiva dos valores das saídas do modelo para as componentes zonal e meridional nos níveis de pressão (1000, 925, 850 e 700hPa).

5.2 Experimento CONF I

A configuração 1 (CONF I) manteve as parametrizações físicas do modelo MM5 utilizadas operacionalmente no CNMA/ICEA, conforme a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Definição da CONF I.

Configuração I – 2 grades com 26 níveis verticais		
Número de pontos	130 X 130	121 X 121
Resolução da grade (km)	18	6
Passo no tempo (s)	45	45
Aninhamento	Two-way	
Parametrização de cumulus	Grell	Grell
Camada Limite	**MRF, BLK, ETA, BT**	**MRF, BLK, ETA, BT**
Convecção Explícita	Simple Ice	Simple Ice
Radiação	Cloud radiation scheme	Cloud radiation scheme
Temperatura no solo	Multi Layer	Multi Layer

5.3 Desempenho da CONF I

Nesse item, procurou-se identificar as principais diferenças entre as parametrizações da CLP, com relação à habilidade do modelo em prever o vento em termos de componentes zonal (u) e meridional (v) com antecedência de 60 horas, pois as 12 primeiras horas não são avaliadas (descartadas por efeito *spin-up*). Foram analisados os dois períodos: do dia 17 às 00:00UTC ao dia 21 às 00:00 de setembro de 2008 (representativo do período seco) e do dia 19 às 00:00UTC ao dia 25 às 00:00 UTC de março de 2010 (período chuvoso).

Tomando-se o exemplo da Figura 5.1, considera-se um período de simulação que se inicia no dia 17 às 00:00 UTC e termina no dia 20 às 00:00 UTC. A avaliação das simulações está dividida em duas partes. Primeiramente foi feita uma comparação puramente gráfica entre os resultados obtidos a partir das simulações (ou seja, considerando-se cada tipo de parametrização de CLP) e o valor observado (radiossondagem) e também, comparando-se com as reanálises do NCEP.

Na segunda parte, as métricas estatísticas (índice de concordância de Willmott, RMSE, BIAS) foram usadas na análise, considerando cada 12 horas de antecedência de previsão em relação à observação, ou seja, 60, 48, 36, 24 e 12 horas antes do evento (observação).

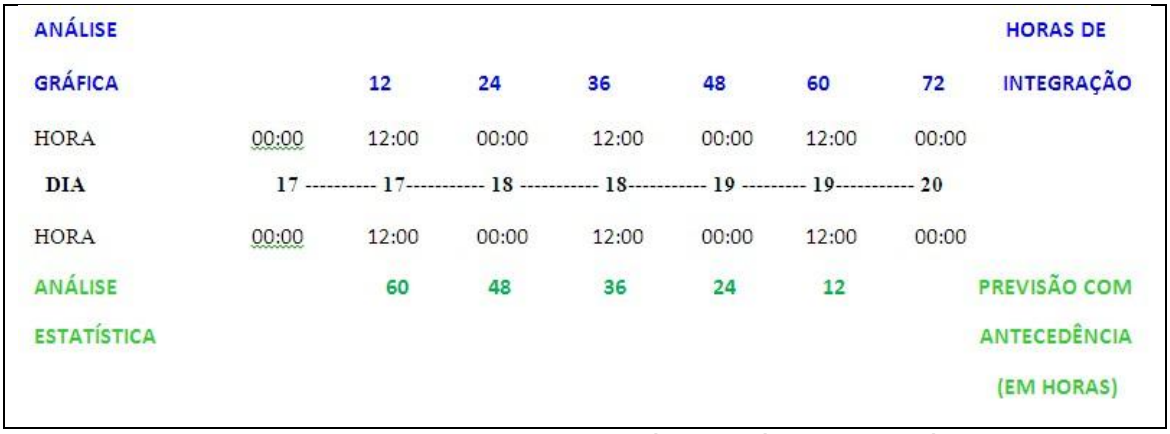


Figura 5.1 - Esquema utilizado nas análises gráficas e estatísticas.

A análise gráfica, ou simplesmente a plotagem dos dados, contempla uma análise prévia, mesmo que subjetiva e, até mesmo de auxílio à análise estatística. Os resultados foram os seguintes:

ANO DE 2008 (Período Seco):

Analisando-se a Figura 5.2 observa-se que todas as parametrizações (Figs. 5.2c, 5.2d, 5.2e e 5.2f) tendem a superestimar os valores da componente zonal acima de 925hPa (4 a 6m/s). Próximo das 24 horas de integração, todas as parametrizações (ETA; BLK; BT e MRF) conseguem acompanhar a mudança desta componente desde 1000 até próximo de 780hPa. Entretanto, as parametrizações BLK (Fig. 5.2d) e MRF (Fig. 5.2f) aproximam-se mais do valor observado (Fig. 5.2b), com diferença em torno de 2,0m/s.

Pela Figura 5.2b há um aumento da componente u nas 36, 60 e 72 horas próximo a 925hPa, mas as parametrizações ficam próximas a este padrão observado somente acima de 925hPa: neste caso, entre 900 e 720hPa para as 60 a 72 horas de simulação. Próximo a superfície (1000hPa) as parametrizações ETA, BLK e BT foram mais compatíveis que o MRF (assumida de referência) em relação à observação. Quando se compara as reanálises do NCEP à observação o

comportamento da componente u parece ser semelhante, porém superestimando o valor desta variável entre 2,0 a 3,0m/s, exceto próximo ao nível de 925hPa.

A Figura 5.3 apresenta a componente meridional do vento. Nela, destaca-se a simulação com a parametrização BLK (Fig. 5.3d) entre os níveis de 1000 e 925hPa, o qual apresenta o comportamento mais próximo da observação em relação aos demais, exceto em relação às reanálises do NCEP (Fig. 5.3a). Ao contrário, as parametrizações ETA (Fig. 5.3c), BT (Fig. 5.3e) e MRF (Fig.5.3f) possuem uma variação maior para a intensidade do vento com tendência a subestimar em torno de 2,0 a 3,0m/s do valor observado (Fig. 5.3b). Para a camada entre 850 e 700hPa, todas as simulações somente se aproximam da observação próximo das 24 horas de integração; no restante do período não conseguem acompanhar as flutuações da componente meridional do vento. Quanto às reanálises do NCEP, esta se aproxima da observação, mas com valores de v ligeiramente inferior (em torno de 2,0m/s).

Apesar do refinamento da grade 2 (Fig. 5.4) em relação à grade 1, não foi observado uma mudança significativa que represente uma melhoria geral em nenhuma das simulações avaliadas para a componente zonal (Figs. 5.4c, 5.4d, 5.4e e 5. 4f).

Na grade 2 a componente meridional não sofreu nenhuma alteração significativa em relação ao que já havia sido apresentado no domínio 1 (Fig. 5.3), ou seja, apresentaram comportamento semelhante. (Fig. 5.5).

Considerando-se para o dia 17set2008 a inicialização a partir das 12:00UTC (Fig. 5.6), as simulações ETA (Fig. 5.6c), BLK (Fig. 5.6d), BT (Fig. 5.6e) e MRF (Fig. 5.6f) tendem novamente a superestimar (principalmente as parametrizações ETA e BT) a componente zonal do vento acima de 925hPa, como já fora visto anteriormente na inicialização das 00:00UTC.

A inicialização a partir das 12:00UTC não resultou em melhora das previsões para componente meridional (Fig.5.7). Notou-se uma mudança no sinal da componente meridional desde 1000 até 700hPa, onde nos níveis mais baixos o valor é negativo, a partir de 850hPa passou a ser positivo (Fig.5.7b). As simulações (Figs. 5.7c, 5.7d, 5.7e e 5.7f) acompanham esta mudança de sinal da componente meridional, porém com menor flutuação.

Na Figura 5.8, nota-se que a intensificação da componente zonal do vento próximo à 925hPa (Fig.5.8b) é estendida até 700hPa em todas as simulações (Figs. 5.8c, 5.8d, 5.8e e 5.8f) durante quase todo o período de integração, o que não ocorre nas observações.

A Figura 5.10 mostra o comportamento da componente zonal do vento a partir das 00:00 UTC do dia 18 set até às 00:00 UTC do dia 21set. Um pico do vento, entre -15 a -18m/s próximo a 925hPa e estendendo-se até 700hPa é verificado em todas as simulações (Figs. 5.10c, 5.10d, 5.10e e 5.10f), sendo um pouco mais fraco para a simulação MRF (Fig.5.10f). Somente após 24 horas do início da integração as simulações (Figs. 5.10c, 5.10d, 5.10e) acompanham o comportamento do vento zonal observado (Fig. 5.10b) a partir de 925hPa, mas elas superestimam o valor observado em até 4m/s, exceto a simulação MRF (Fig.5.10f) que superestima em torno de 1 a 2m/s. O mesmo período foi avaliado para componente meridional (Fig.5.11). Em geral, as simulações de BLK (Fig. 5.11d) e MRF (Fig.5.11f) acompanharam esta variação de intensidade com diferença de 1 a 3m/s em relação à observação e possuem a tendência de subestimar o valor da componente meridional. A simulação de BKL (Fig.5.11d) acompanhou melhor a mudança do sinal de v acima de 850hPa até as 48 horas de integração.

No domínio 2, as simulações das componentes zonal e meridional para o dia 18, inicializadas às 00:00UTC (Fig. 5.12) não foram diferentes daquelas obtidas no domínio 1 (Fig. 5.10).

A inicialização a partir das 12:00UTC do dia 18 resultou no aumento da componente zonal (Fig.5.14). Esta superestimativa foi verificada em ambas as simulações (Figs. 5.14c, 5.14d, 5.14e e 5.14f).

As previsões da componente meridional a partir das 12:00UTC (Fig.5.15) foram melhores do que aquelas inicializadas às 00:00UTC nos domínios 1 (Fig.5.11) e 2 (Fig.5.13), principalmente na camada entre 1000 e 925hPa para as simulações de BLK (Fig.5.15d) e MRF (Fig.5.15f). Este resultado, porém, não foi verificado na camada entre 850 e 700hPa a partir de 36 horas após o início da integração. Os resultados obtidos pela parametrização ETA (Fig.5.15c) e BT (Fig.5.15e) somente se aproximam do valor observado entre os níveis de 850 e 700hPa nas primeiras 24

horas de integração e entre 36 e 48 horas próximo a 850hPa. Também não houve diferenças das simulações realizadas nos domínios 1 e 2 (Figs. 5.14 a 5.17)

Relativo às Figuras 5.2 a 5.17 para a componente zonal do vento os resultados das simulações sugeriram que próximo à 1000hPa as parametrizações ETA, BLK e BT tiveram melhor performance do que a parametrização de referência (MRF). Para a camada de 925 a 700hPa não houve muita diferença entre todas as parametrizações, sendo estas melhores para as previsões de 60 e 72 horas. Não houve diferença entre as inicializações de 00:00 e 12:00UTC. Ou seja, a parametrização parece não ser tão importante, tampouco a inicialização. Possivelmente este resultado esteja relacionado à microfísica de nuvens.

Encontrou-se que nos primeiros níveis da atmosfera (1000 a 925hPa) a componente meridional foi melhor prevista pelo modelo MM5 quando se definiam as parametrizações MRF e BLK como opções de PBL. A camada intermediária (925 a 850hPa) não foi bem prevista em nenhum dos horários, a partir das opções de parametrizações estudadas, nem mesmo pela parametrização de referência, ou seja, pode ser que o tipo de parametrização de PBL escolhida não interfira a previsão desta componente do vento nestes níveis da atmosfera. Entre 850 e 700hPa a componente do vento foi bem prevista nas previsões de 24, 36 e 48 horas por todas as parametrizações, destacando-se entre elas a parametrização BLK. Para a componente meridional do vento houve diferença entre as inicializações das 00:00 e 12:00UTC, sendo que as de 12:00UTC aproximaram-se mais da observação, principalmente na camada de 1000 a 925hPa.

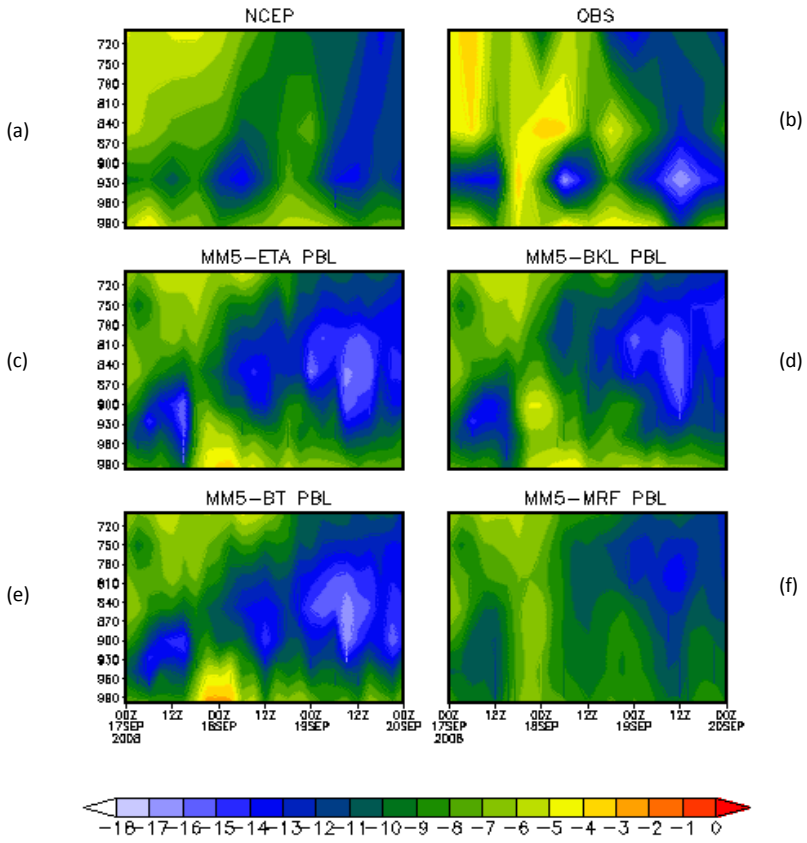


Figura 5.2 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 17set2008 às 00:00UTC a 20set2008 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

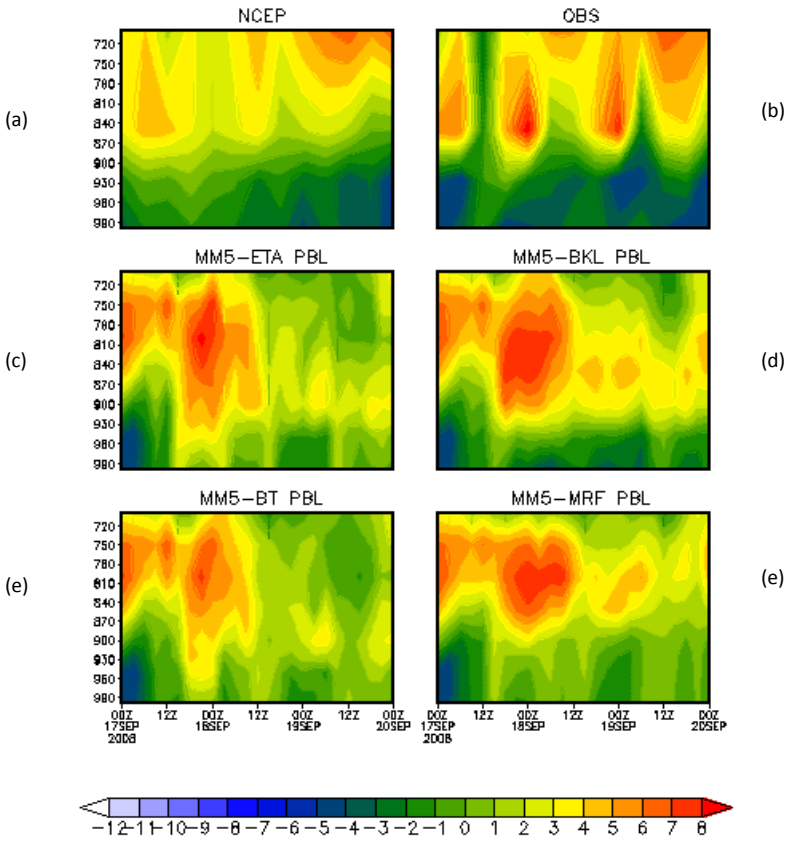


Figura 5.3 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 17set2008 às 00:00UTC a 20set2008 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

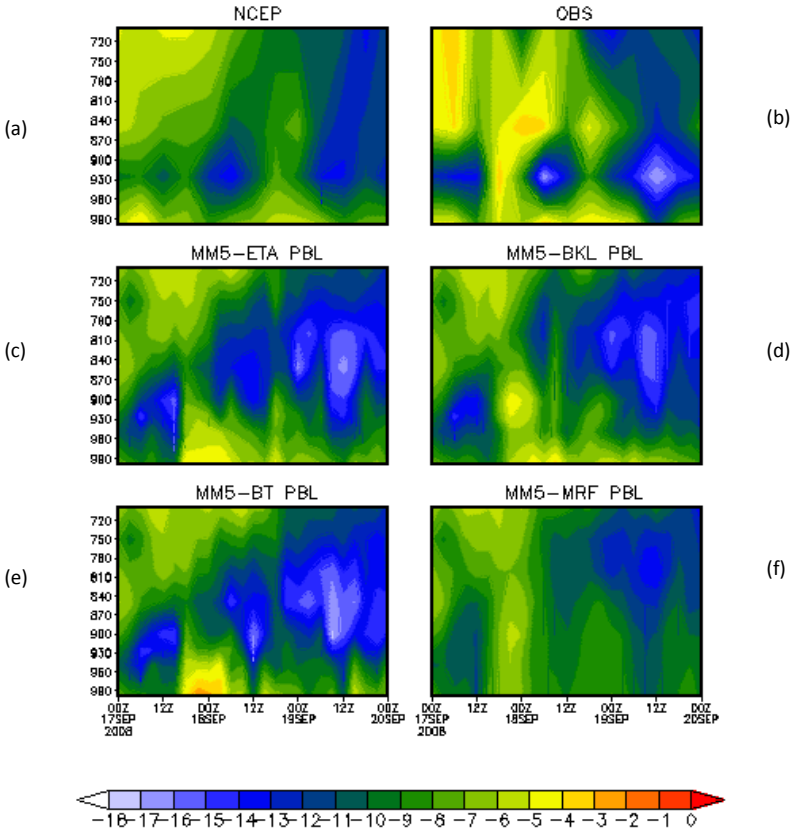


Figura 5.4 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 17set2008 às 00:00UTC a 20set2008 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

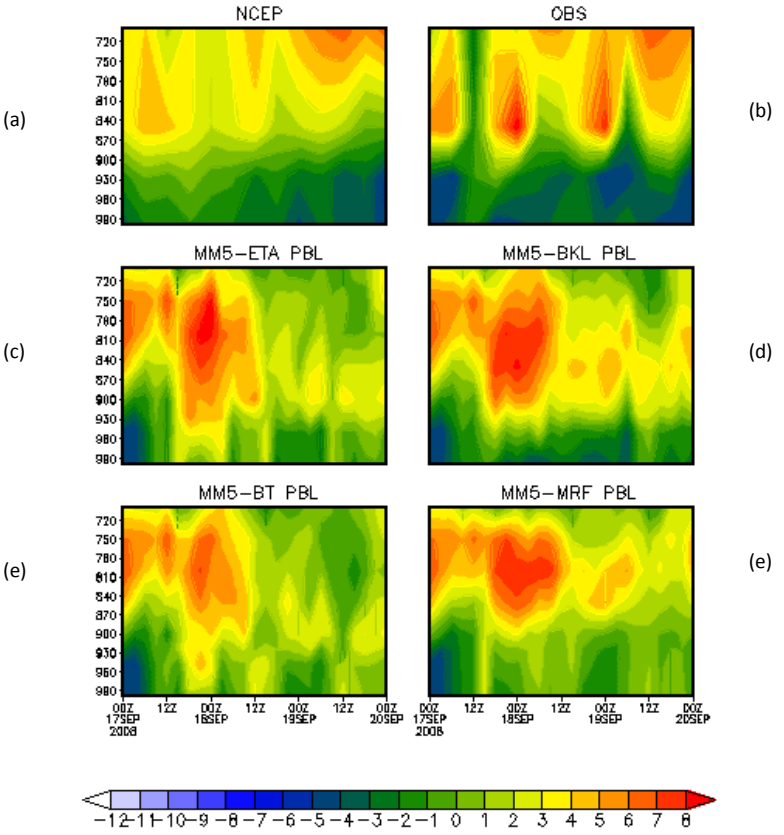


Figura 5.5 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 17set2008 às 00:00UTC a 20set2008 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

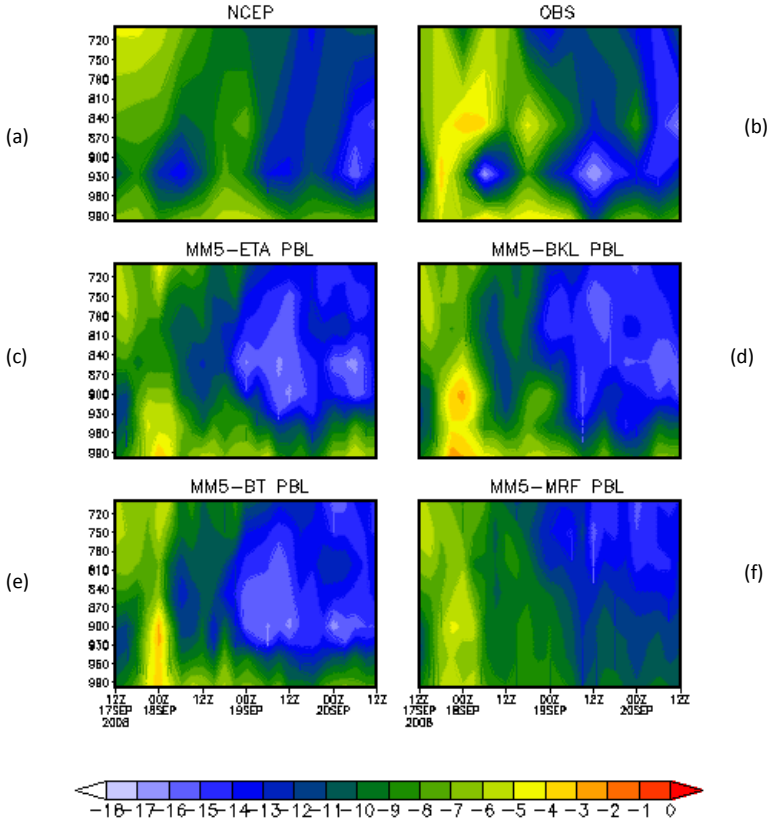


Figura 5.6 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 17set2008 às 12:00UTC a 20set2008 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

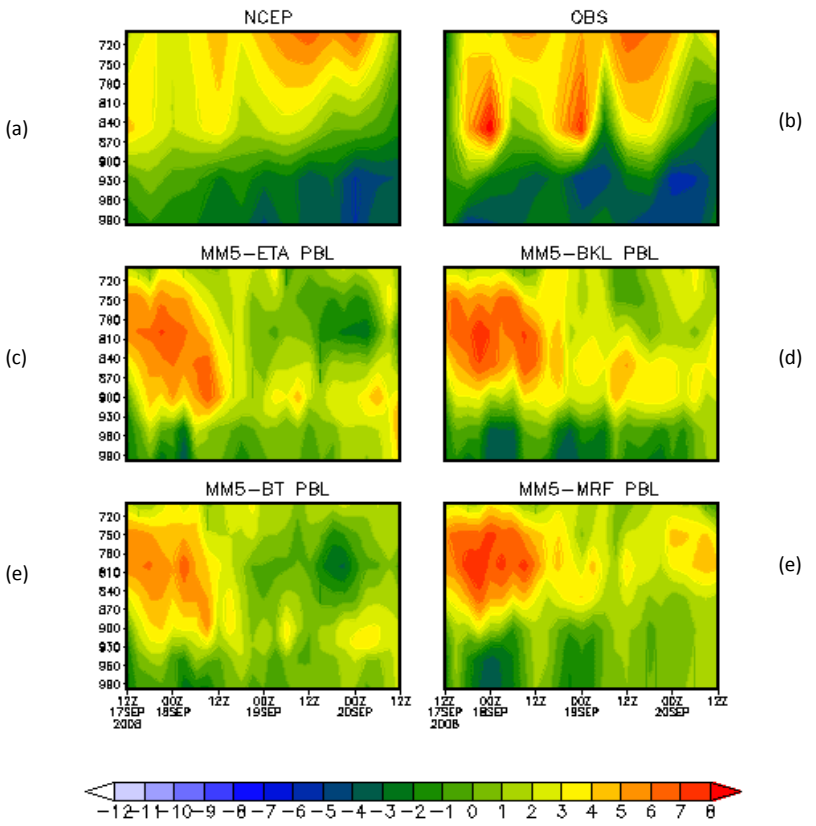


Figura 5.7 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 17set2008 às 12:00UTC a 20set2008 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

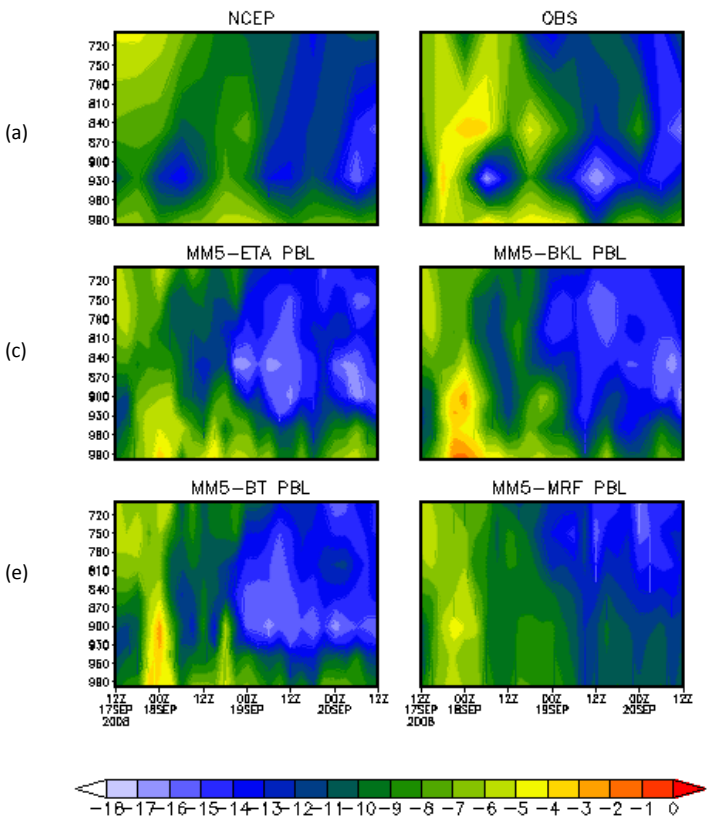


Figura 5.8 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 17set2008 às 12:00UTC a 20set2008 às 12:00UTC - Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK ; (e) BT e (f) MRF.

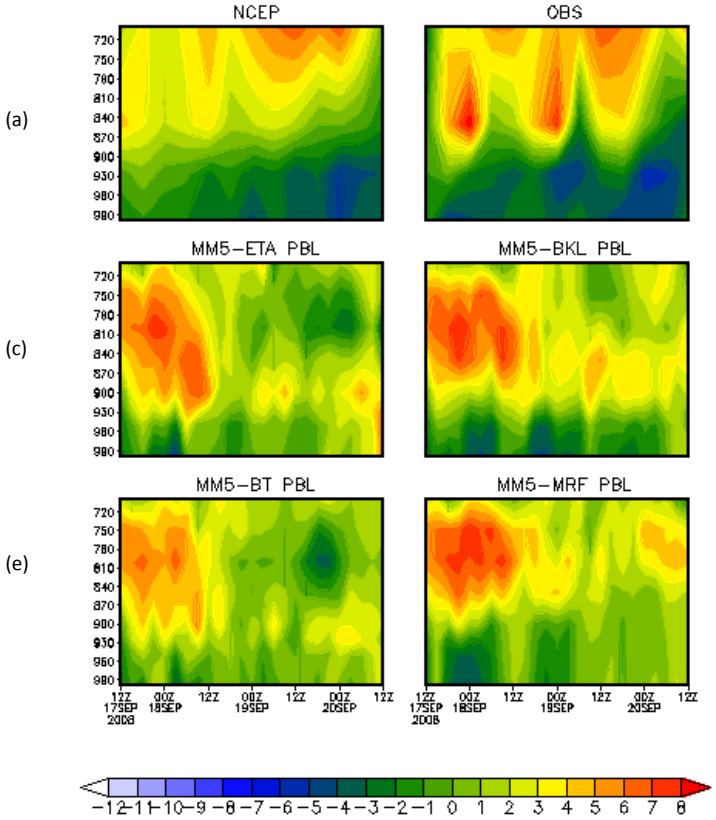


Figura 5.9 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de17set2008 às 12:00UTC a 20set2008 às 12:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

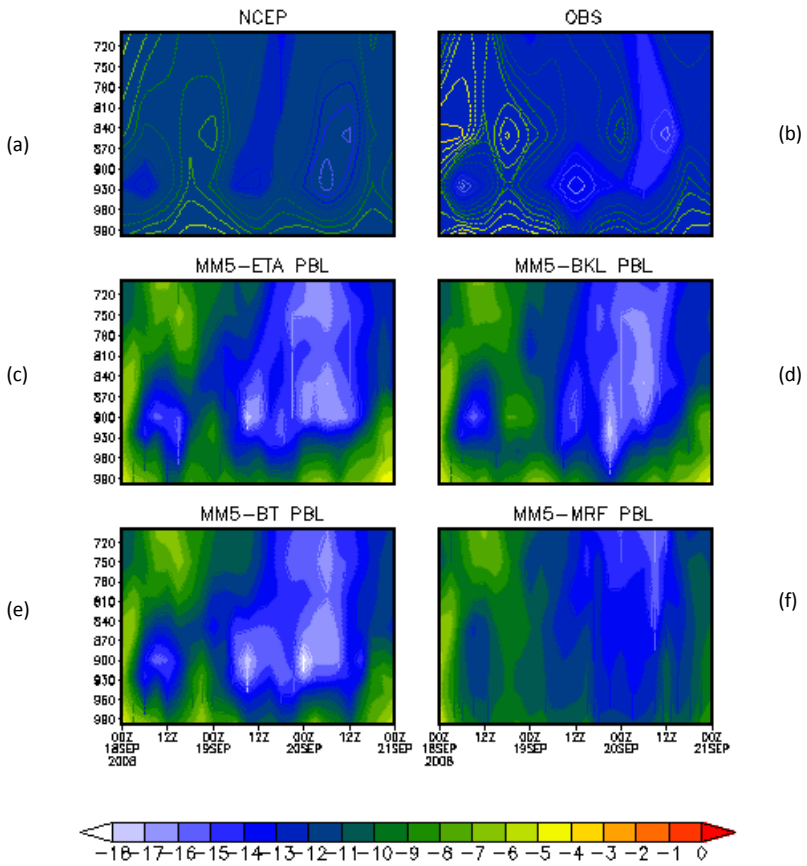


Figura 5.10 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 18set2008 às 00:00UTC a 21set2008 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

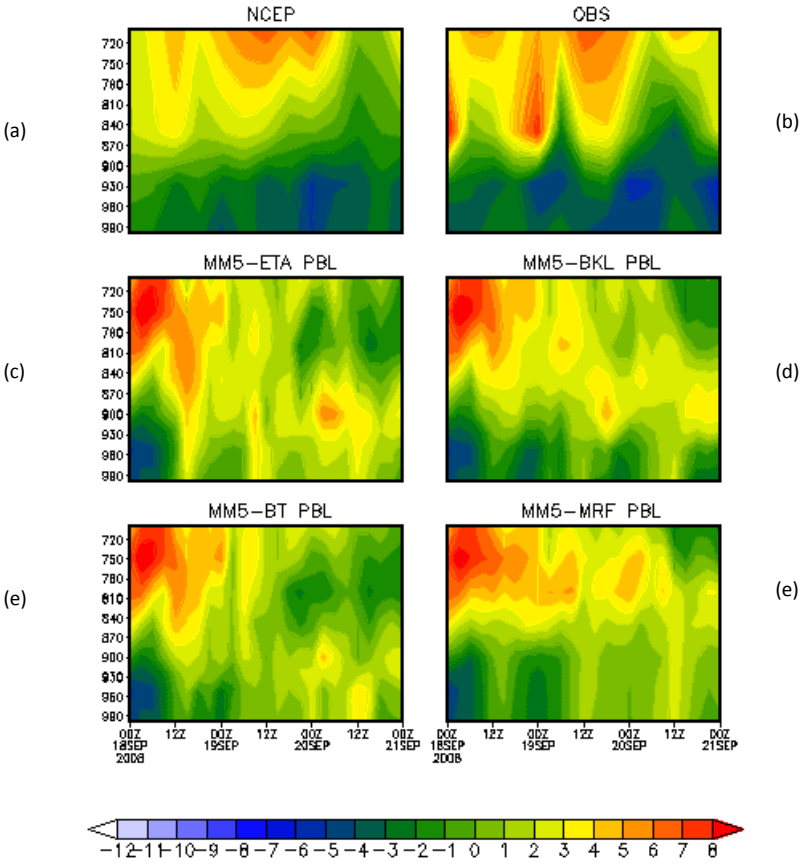


Figura 5.11 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 18set2008 às 00:00UTC a 21set2008 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

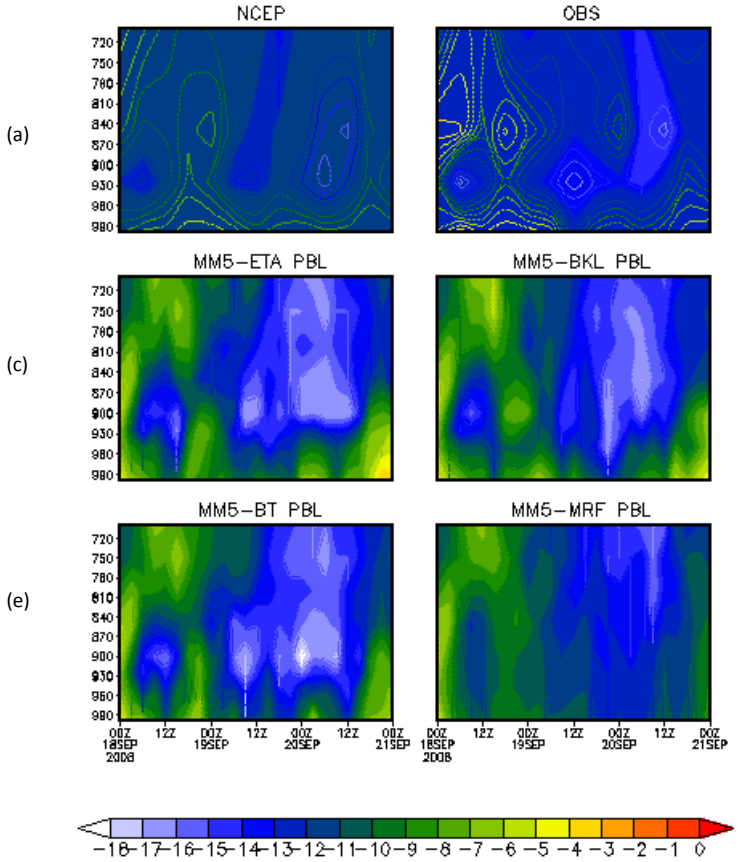


Figura 5.12 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 18set2008 às 00:00UTC a 21set2008 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

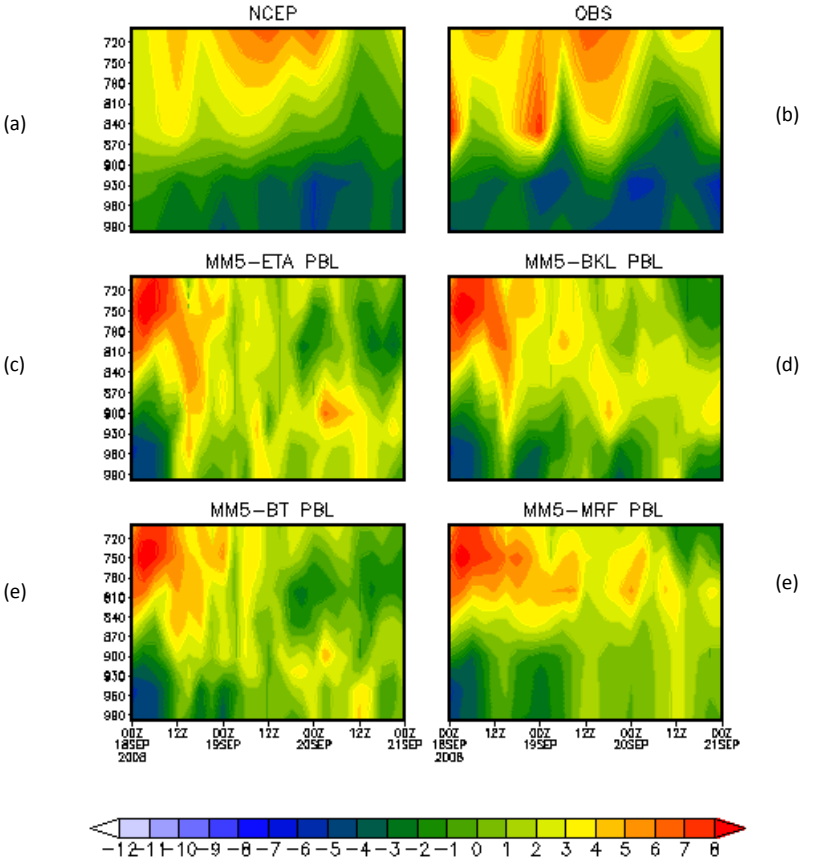


Figura 5.13 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 18set2008 às 00:00UTC a 21set2008 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

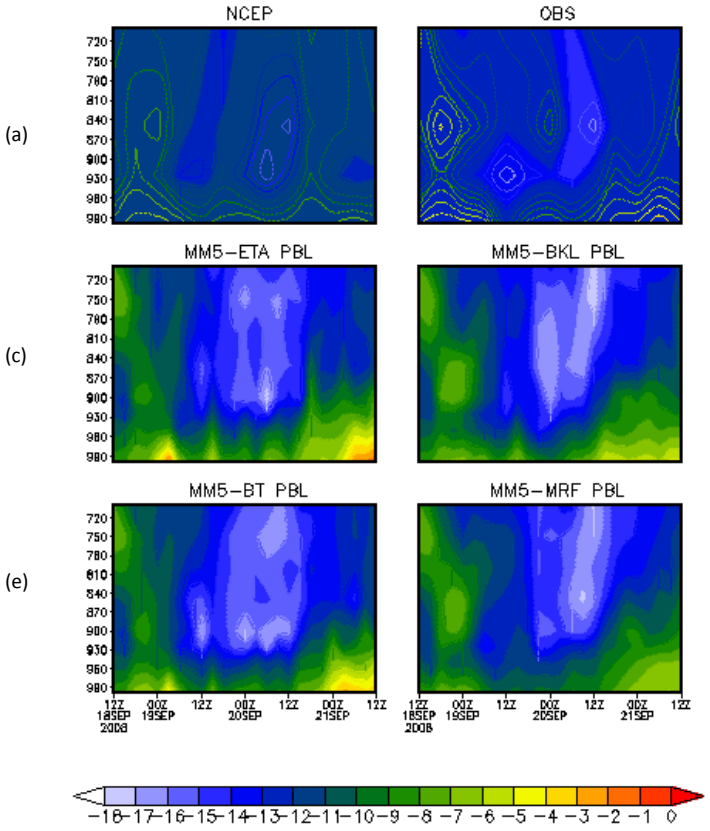


Figura 5.14 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 18set2008 às 12:00UTC a 21set2008 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

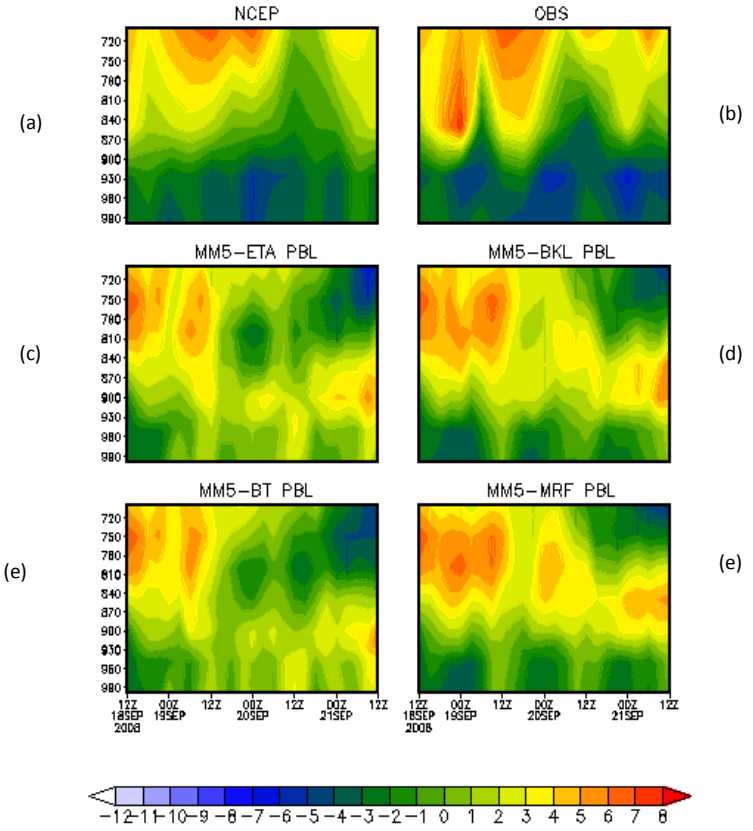


Figura 5.15 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 18set2008 às 12:00UTC a 21set2008 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

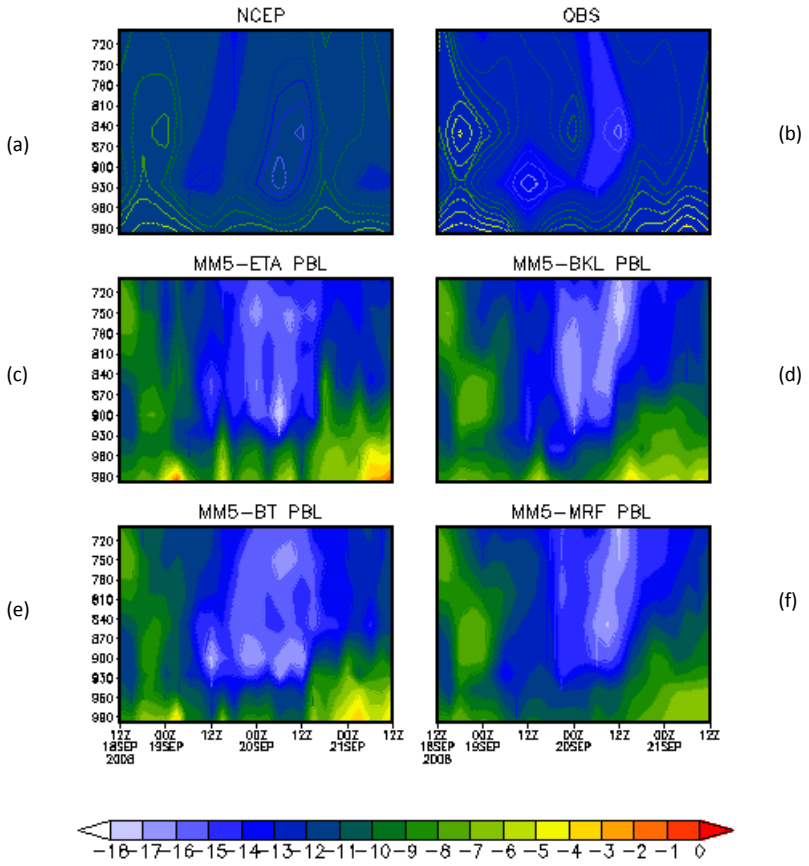


Figura 5.16 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 18set2008 às 12:00UTC a 21set2008 às 12:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK ; (e) BT e (f) MRF.

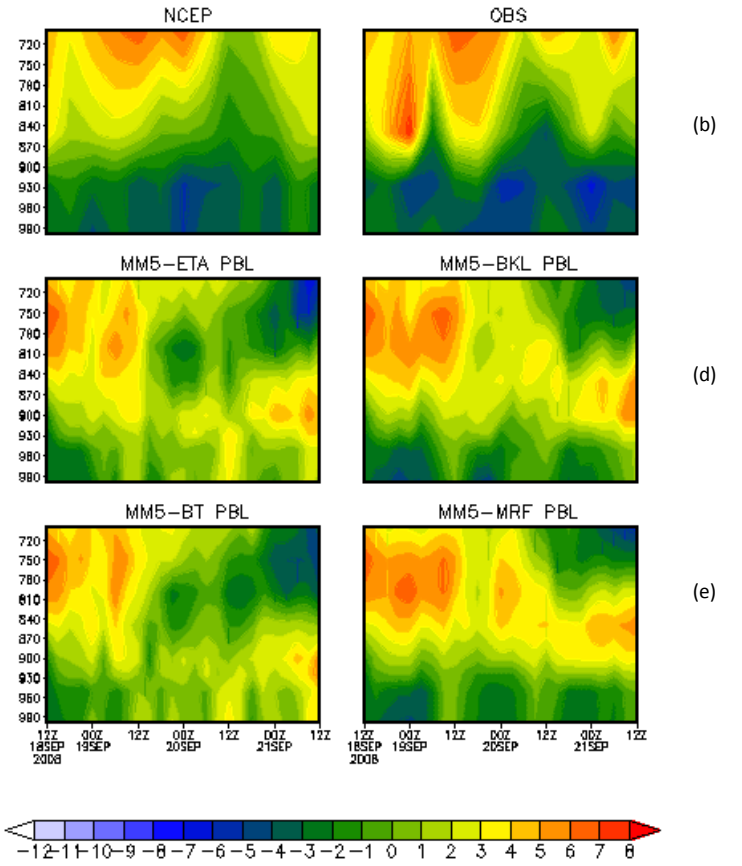


Figura 5.17 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 18set2008 às 12:00UTC a 21set2008 às 12:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

Ano 2010 (Período Chuvoso):

A Figura 5.18 apresenta a componente zonal prevista a partir do dia 19 março às 00:00UTC até o dia 22 às 00:00UTC. Durante todo o período a componente zonal ficou entre 4,0 a 8,0m/s (Fig. 5.18b) na camada de 1000 a 925hPa, sendo que estes valores também foram constatados nas simulações ETA (Fig. 5.18c), BLK (Fig. 5.18d) e BT (Fig. 5.18e), mas não no caso da simulação MRF (Fig. 5.18f). Ainda nesta camada observou-se que a componente zonal tende a diminuir ainda mais sua intensidade a partir de 36 horas (dia 20, Fig. 5.18b) o que também foi previsto pelas simulações ETA (Fig. 5.18c), BLK (Fig. 5.18d) e BT (Fig. 5.18e), porém, de forma mais acentuada. Entre os níveis de 850 e 700hPa o valor da componente u ficou entre 10,0 a 14,0m/s nas primeiras 24 horas, diminuindo ao longo do período para em torno de 6,0 a 9,0m/s e somente a simulação MRF (Fig. 5.18f) acompanha a observação (Fig. 5.18b).

O comportamento da componente meridional do vento para o período de 19 a 22 março às 00:00UTC pode ser visto na Figura 5.19. Esta componente simulada por todas as previsões ETA (Fig. 5.19c), BLK (Fig. 5.19d), BT (Fig. 5.19e) e MRF (Fig. 5.19f) teve o sinal diferente do observado (5.19b) nos níveis acima de 925hPa. Na camada de 1000 a 925hPa ela foi subestimada pelas parametrizações, exceto pela parametrização BLK que superestimou os valores da componente entre 48 e 60 horas de integração. Os dados de reanálises do NCEP (Fig. 5.19a) superestimaram o valor observado (1 – 3m/s).

Apesar dos domínios diferentes (1 e 2), as componentes zonal (Figs. 5.18 e 5.20) e meridional (Figs. 5.19 e 5.21) se assemelham, sem destacar nenhuma diferença significativa no comportamento destas variáveis.

O mesmo período verificado anteriormente é analisado nas Figuras. 5.22 e 5.24, porém, as simulações foram iniciadas às 12:00UTC. As simulações ETA (Fig. 5.22c), BLK (Fig. 5.22d) e BT (Fig. 5.22e) e também, os dados de reanálises do NCEP (Fig. 5.22a) subestimaram a componente zonal observada. Somente a previsão MRF (Fig. 5.22f) ficou equiparada à observação em toda a extensão da camada da atmosfera analisada e ao longo de toda a previsão.

A partir de inicializações às 12:00UTC (Fig. 5.23) notou-se novamente a permanência do sinal (negativo) da componente meridional simulada por todas as previsões (Figs. 5.23c, 5.23d, 5.23e e 5.23f) acima de 925hPa, diferentemente do que fora observado (Fig. 5.23b). Apesar disso, ambas se aproximam do valor observado 24 horas após o início da simulação entre 1000 e 850hPa. A simulação MRF (Fig. 5.23f) ficou um pouco mais próxima da observação, com somente 1- 2m/s de diferença (Fig. 5.23b).

A componente zonal prevista na grade mais refinada (domínio 2) é apresentada na Figura 5.24. Embora haja o refinamento da grade, novamente isto não resultou em melhor previsão em relação ao domínio 1 (Fig. 5.22). Da mesma forma, a componente meridional (Fig. 5.25) também não apresentou diferença (ou melhora na previsão) em relação àquela prevista no domínio 1 (Fig. 5.23).

A Figura 5.26 apresenta o comportamento da componente zonal prevista a partir do dia 20 março às 00:00UTC até o dia 23 às 00:00UTC. A componente zonal ficou em torno de 8m/s em toda a extensão da camada da atmosfera, com exceção dos períodos de início e final da simulação (quando a componente zonal foi mais intensa com valores de aproximadamente 12 a 14m/s). Tanto a previsão ETA (Fig. 5.26c), quanto BLK (Fig. 5.26d) e BT (Fig. 5.26e) subestimaram o valor da componente u entre 1000 e 850hPa, em quase 6m/s e superestimaram em torno de 4m/s o valor da componente u entre 850 e 700hPa. O mesmo padrão foi apresentado nos dados de reanálises do NCEP (Fig. 5.26a). Os resultados obtidos pela parametrização MRF (Fig.5.26f) também apresentou comportamento semelhante às demais, porém com diferenças de 1 a 2m/s.

A componente meridional também foi analisada no dia 20 às 00:00UTC ao dia 23 às 00:00UTC (Fig. 5.27). As previsões de ETA (Fig. 5.27c), BLK (Fig. 5.27d), BT (Fig. 5.27e) e MRF (Fig. 5.27f) para esta variável foram coerentes com a observação (Fig. 5.27b) durante quase todo o período até o dia 22 às 00:00UTC entre os níveis de 1000 e 850hPa. Após o dia 22 às 00:00UTC o sinal da componente meridional diferiu e nenhuma das previsões seguiu esta mudança, sendo este positivo para observação e negativo para as simulações. Nos níveis acima de 850hPa houve uma tendência das previsões em mudar o sinal da componente v em relação à observação. O que se destaca entre os dias 20 às 12:00UTC ao dia 22 às 00:00UTC

foi a presença de um máximo de 9m/s próximo ao nível de 925hPa que todas as previsões detectaram, com destaque para BLK (Fig. 5.27d) que ficou um pouco melhor. Os dados do NCEP (Fig. 5.27a) não apresentaram valores muito bons (próximos) em relação aos observados.

A componente zonal prevista na grade mais refinada (domínio 2) é apresentada na Figura 5.28. Novamente o refinamento da grade não apresenta ganho em termos de previsão desta variável em relação ao domínio 1 (Fig. 5.26). Da mesma forma que a componente meridional (Fig. 5.29) também não apresentou diferença (ou melhora na previsão) em relação àquela prevista no domínio 1 (Fig. 5.27).

A partir de inicialização das 12:00UTC (Fig. 5.30) não houve diferença significativa nos padrões observados anteriormente (Fig. 5.26) para componente zonal, ou seja, não houve melhora na previsão da componente zonal. Os resultados obtidos pela parametrização MRF (Fig. 5.30f) permaneceram mais próximos da observação que os demais. Também não houve diferença entre os domínios 1 e 2 (Figs. 5.30 e 5.32).

Quando a inicialização ocorreu a partir das 12:00UTC (Fig. 5.31) os núcleos de valores máximos (ou mínimos) próximos à 925hPa, também foram encontrados a partir dos dados de reanálise do NCEP (Fig. 5.31a). Para as previsões ETA (Fig. 5.31c), BLK (Fig. 5.31d), BT (Fig. 5.31e) e MRF (Fig. 5.31f) não houve diferença àquelas inicializadas às 00:00UTC.

A Figura 5.33 refere-se a componente meridional considerando-se o domínio 2 do modelo. Mais uma vez, as diferenças muito sutis nos resultados obtidos pelas simulações do modelo MM5 não acrescentaram ganho na previsão quando comparadas ao domínio 1 (Fig. 5.31).

O resultado gráfico das simulações de 2010 (Figs. 5.18 a 5.33) mostrou que quando estas simulações foram inicializadas às 00:00UTC, entre os níveis de 1000 a 925hPa e 850 a 700hPa, a parametrização MRF não foi superada por nenhuma outra, ou seja, a parametrização MRF obteve previsão da componente zonal mais próxima da observação, entretanto, nos níveis entre 925 e 850hPa as parametrizações ETA, BLK e BT ficaram melhores que a MRF, apesar de subestimar

os valores observados. Ao passo que, quando as simulações foram inicializadas às 12:00UTC nenhuma parametrização ficou mais próxima da observação que a parametrização MRF, considerando-se todo o período de 72horas para toda a camada da atmosfera estudada.

De acordo com os resultados obtidos para a componente meridional, esta não foi bem simulada pelas parametrizações de PBL quando inicializadas às 00:00UTC e, quando submetidas a iniciar-se às 12:00UTC, as parametrizações ETA, BLK e BT se aproximaram (mas sem superar) do desempenho de MRF (que foi melhor) na camada de 1000 a 850hPa.

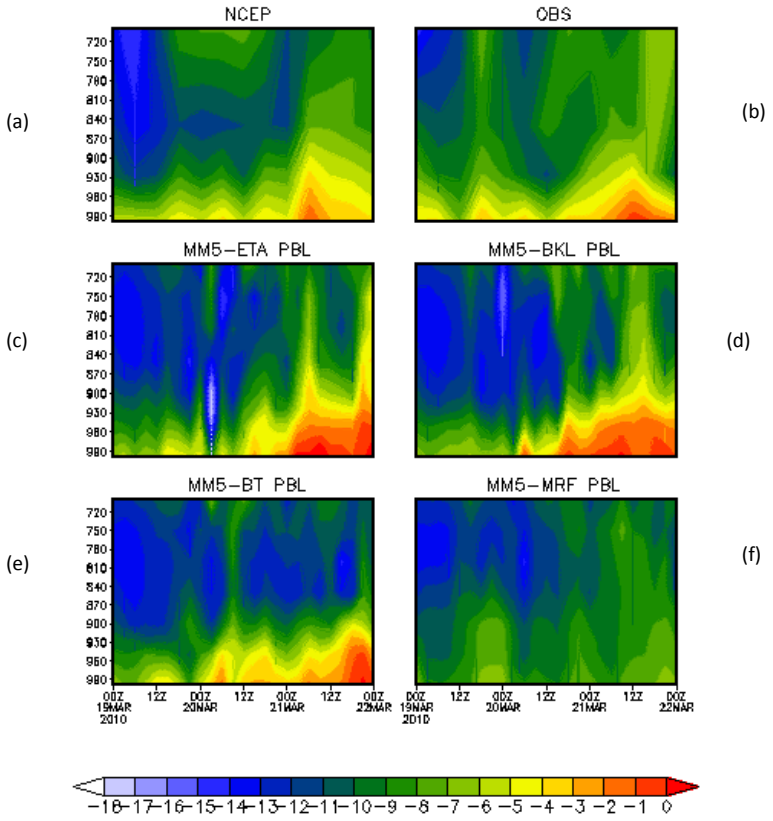


Figura 5.18 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 19mar2010 às 00:00UTC a 22mar2010 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

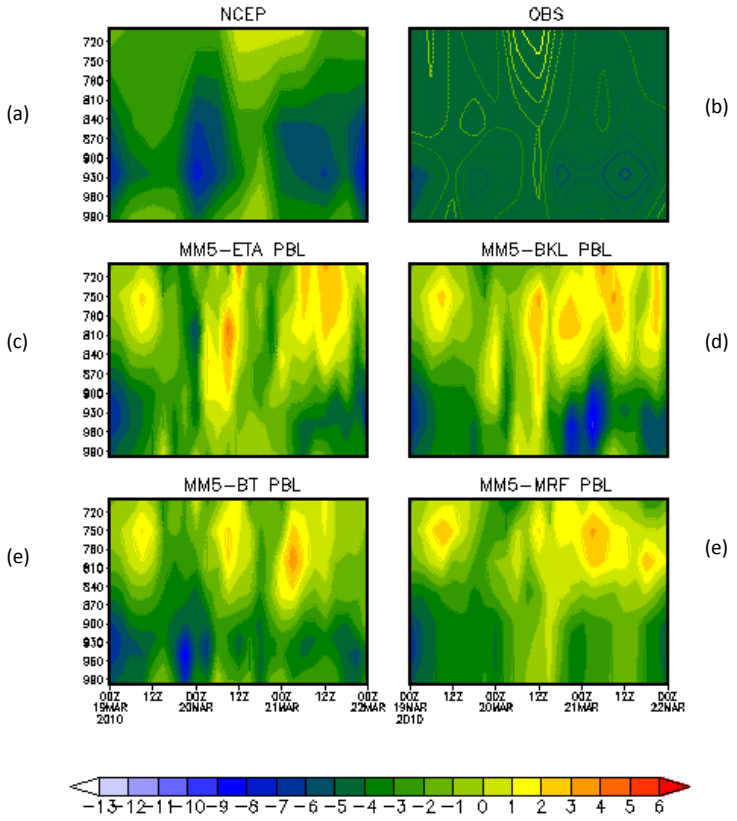


Figura 5.19 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 19mar2010 às 00:00UTC a 22mar2010 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

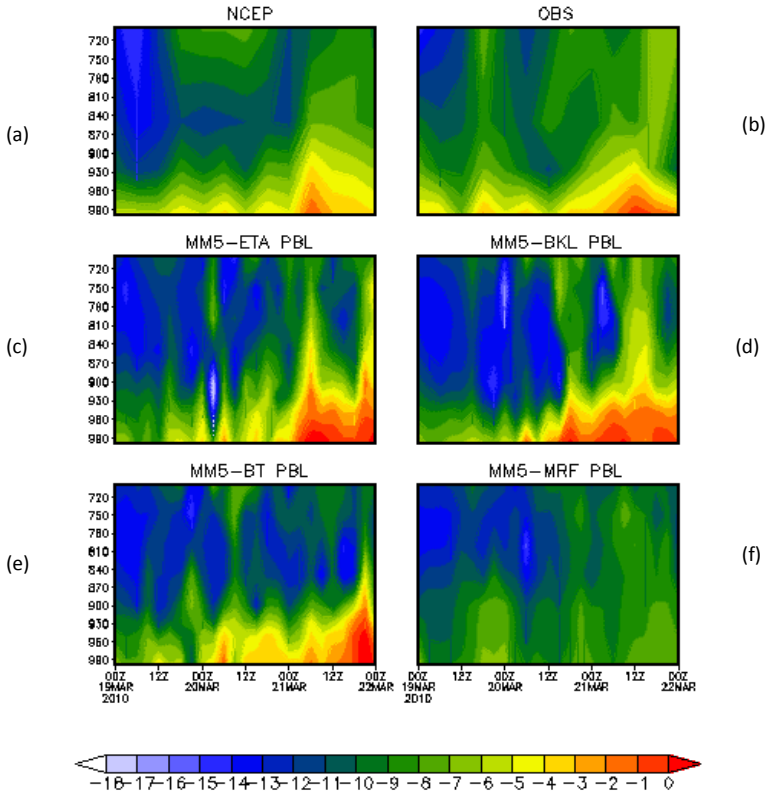


Figura 5.20 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 19mar2010 às 00:00UTC a 22mar2010 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

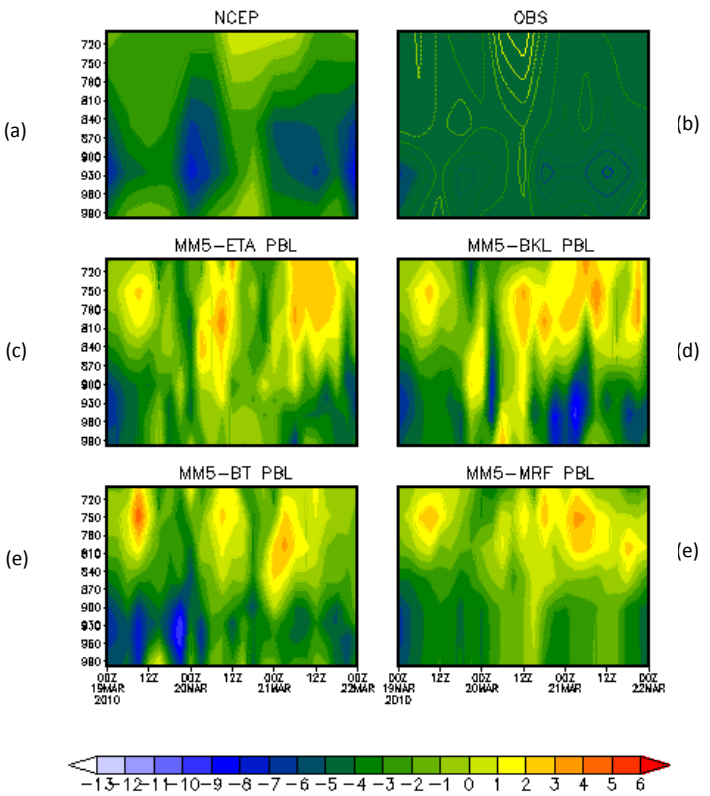


Figura 5.21 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 19mar2010 às 00:00UTC a 22mar2010 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

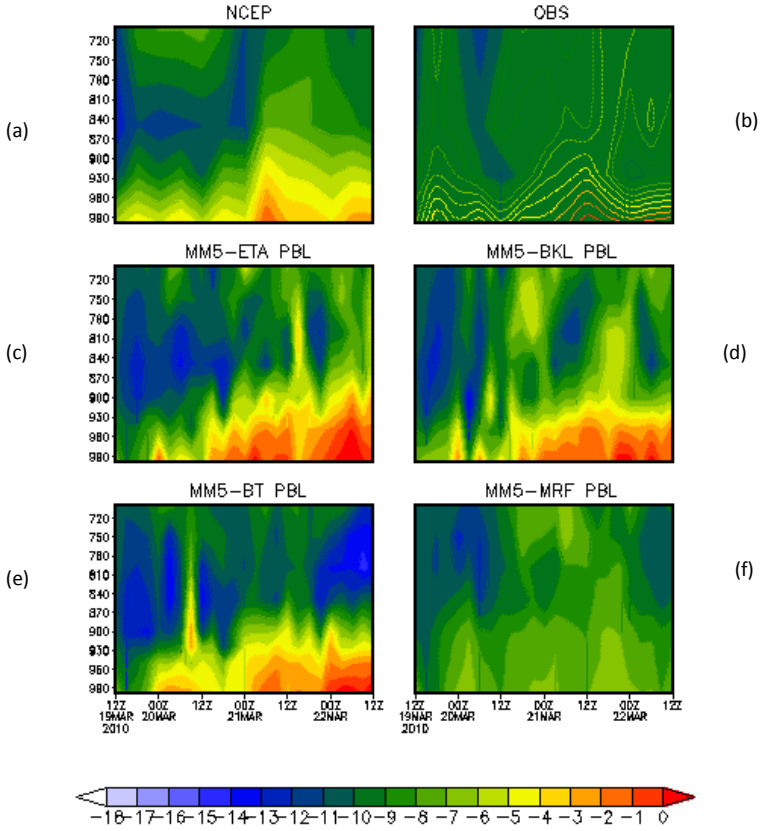


Figura 5.22 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 19mar2010 às 12:00UTC a 22mar2010 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

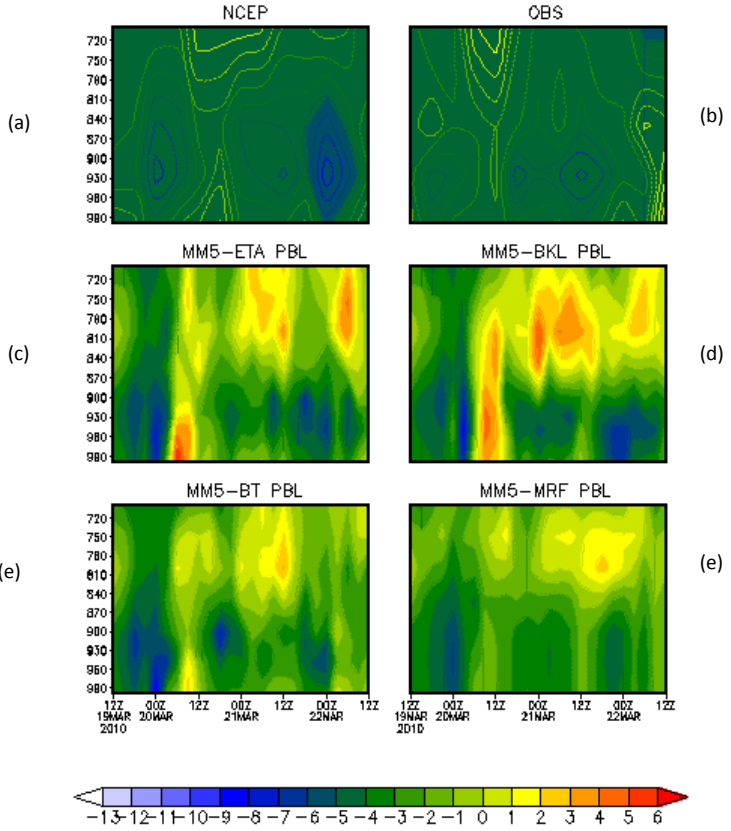


Figura 5.23 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 19mar2010 às 12:00UTC a 22mar2010 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

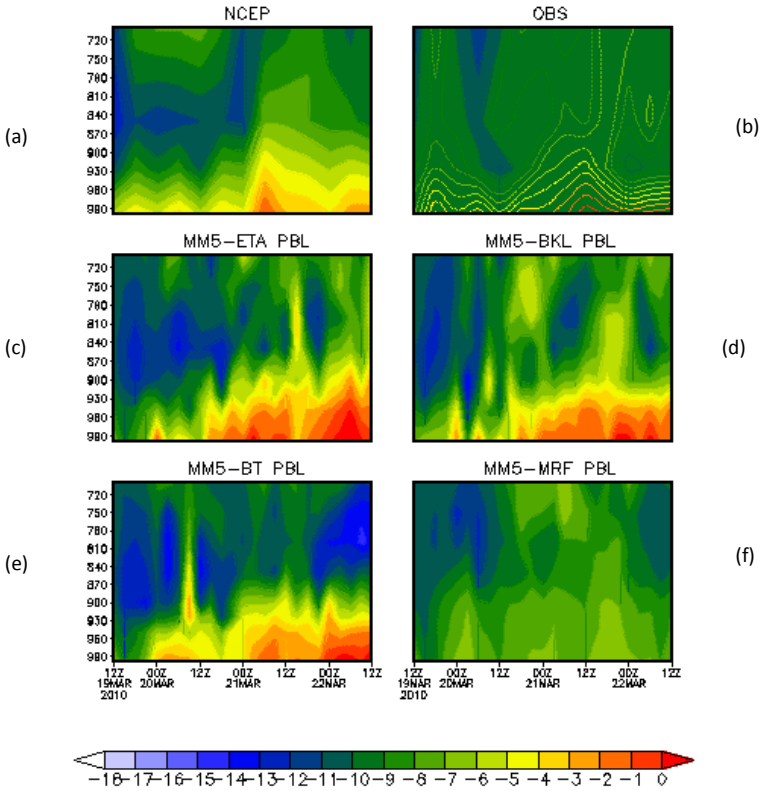


Figura 5.24 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 19mar2010 às 12:00UTC a 22mar2010 às 12:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK ; (e) BT e (f) MRF.

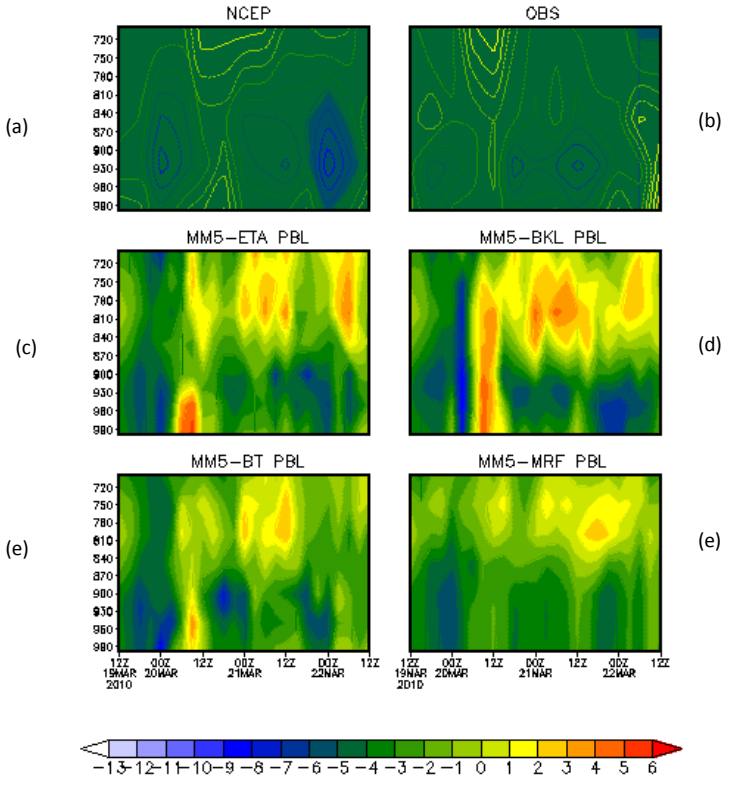


Figura 5.25 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 19mar2010 às 12:00UTC a 22mar2010 às 12:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

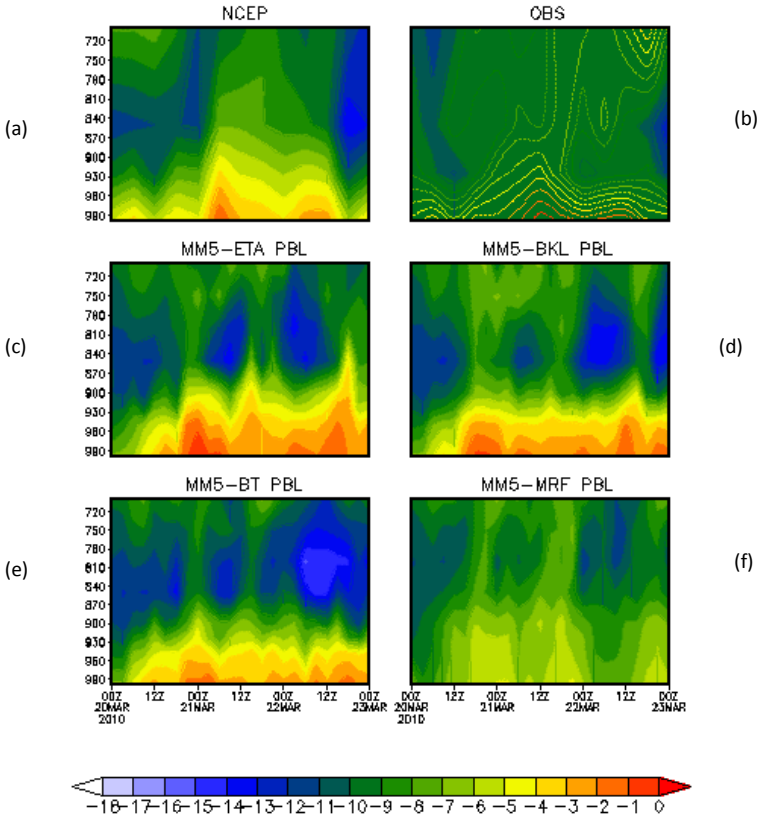


Figura 5.26 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000 e 700hPa para o período de 20mar2010 às 00:00UTC a 23mar2010 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

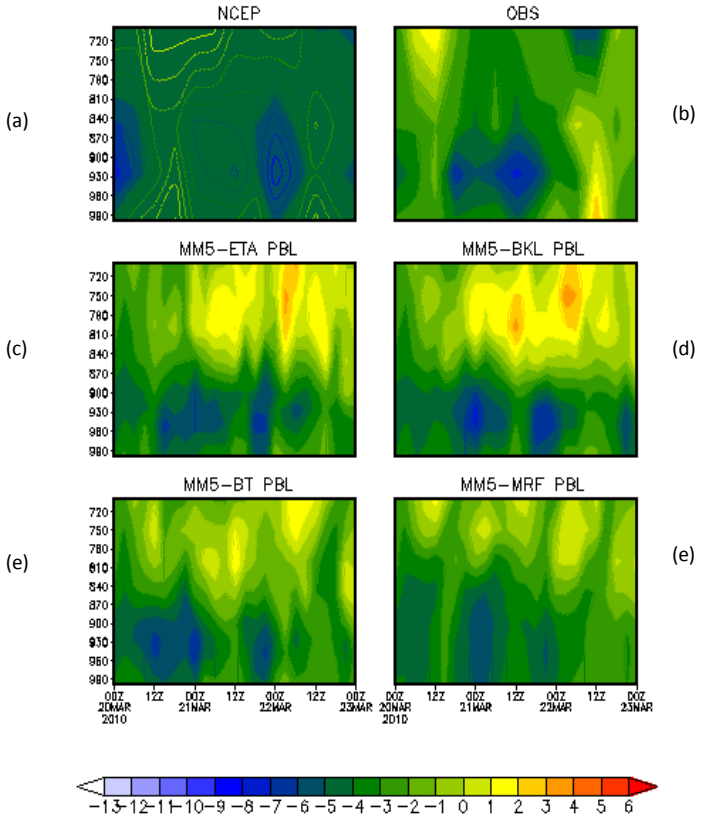


Figura 5.27 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 20mar2010 às 00:00UTC a 23mar2010 às 00:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

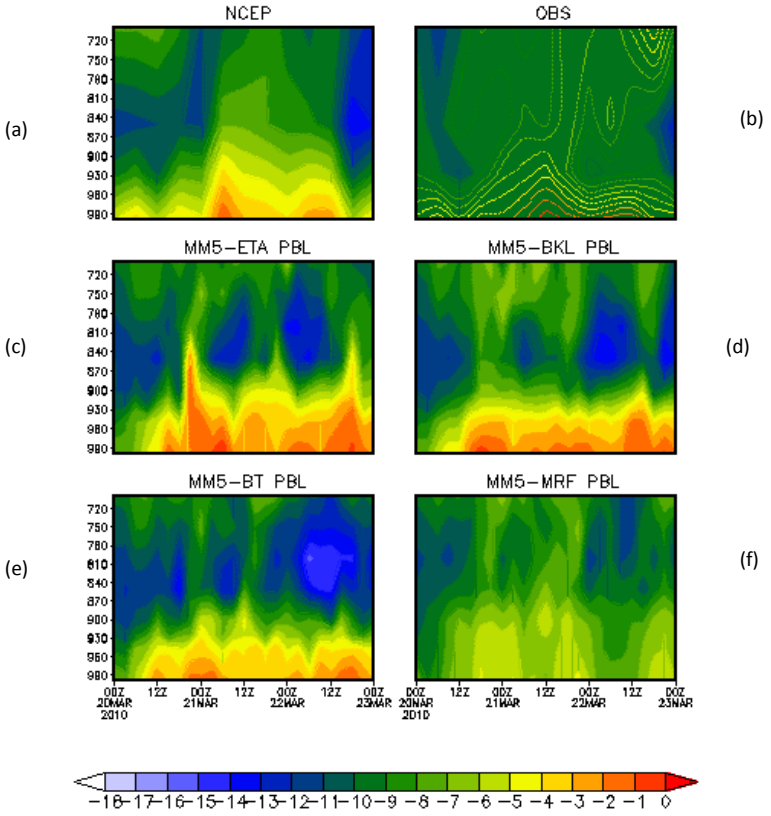


Figura 5.28 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 20mar2010 às 00:00UTC a 23mar2010 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK ; (e) BT e (f) MRF.

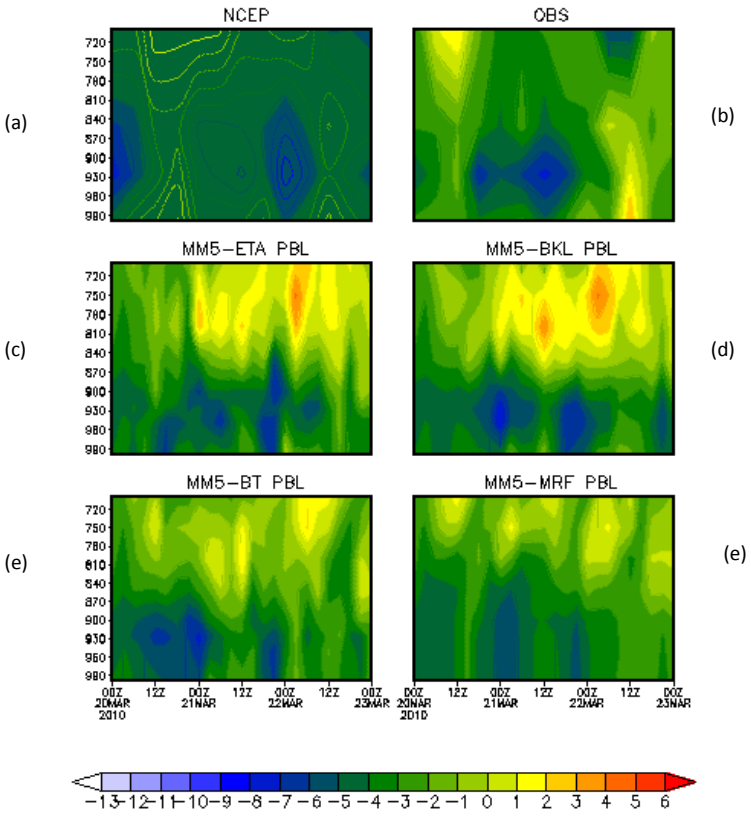


Figura 5.29 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 20mar2010 às 00:00UTC a 23mar2010 às 00:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

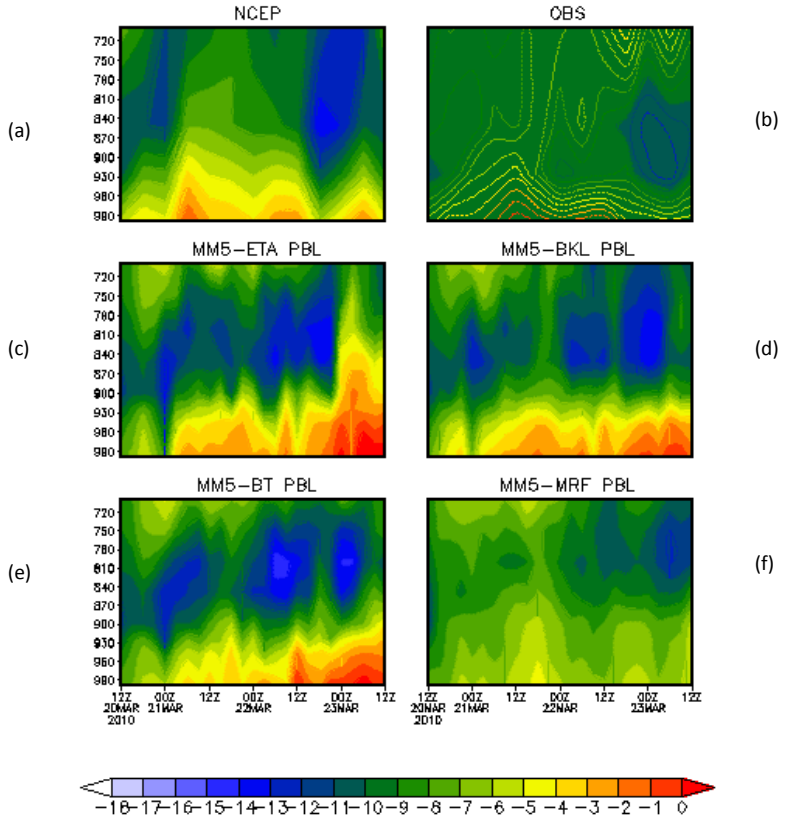


Figura 5.30 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 20mar2010 às 12:00UTC a 23mar2010 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

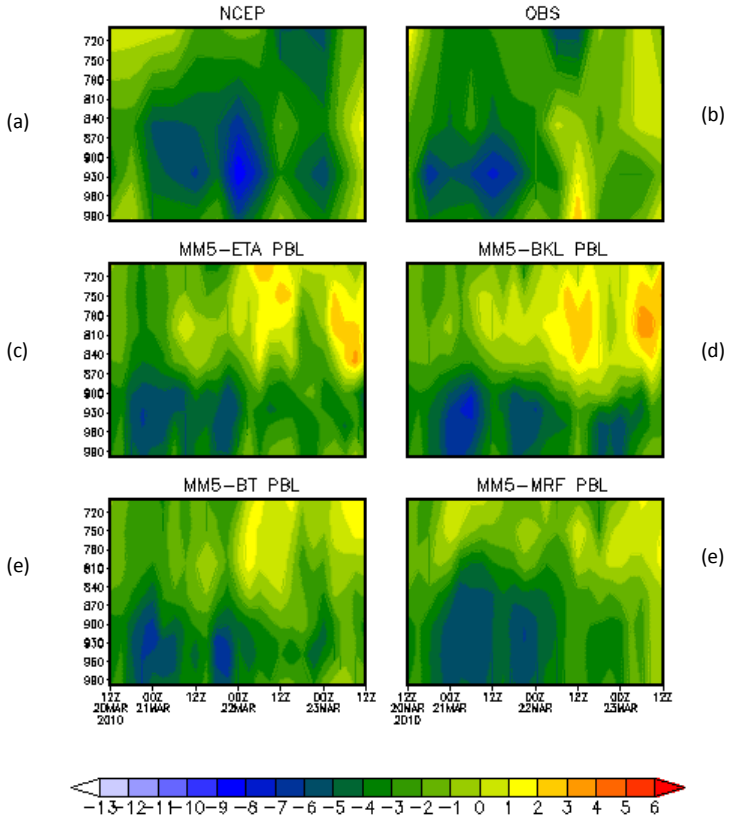


Figura 5.31 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 20mar2010 às 12:00UTC a 23mar2010 às 12:00UTC – Domínio 1: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando as parametrizações (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

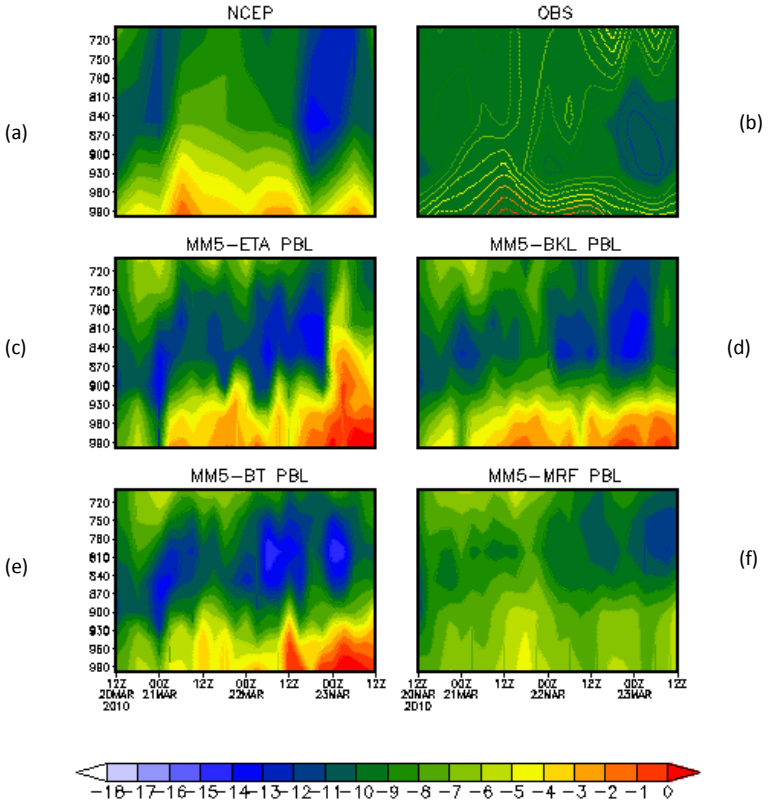


Figura 5.32 – Componente zonal do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 20mar2010 às 12:00UTC a 23mar2010 às 12:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK ; (e) BT e (f) MRF.

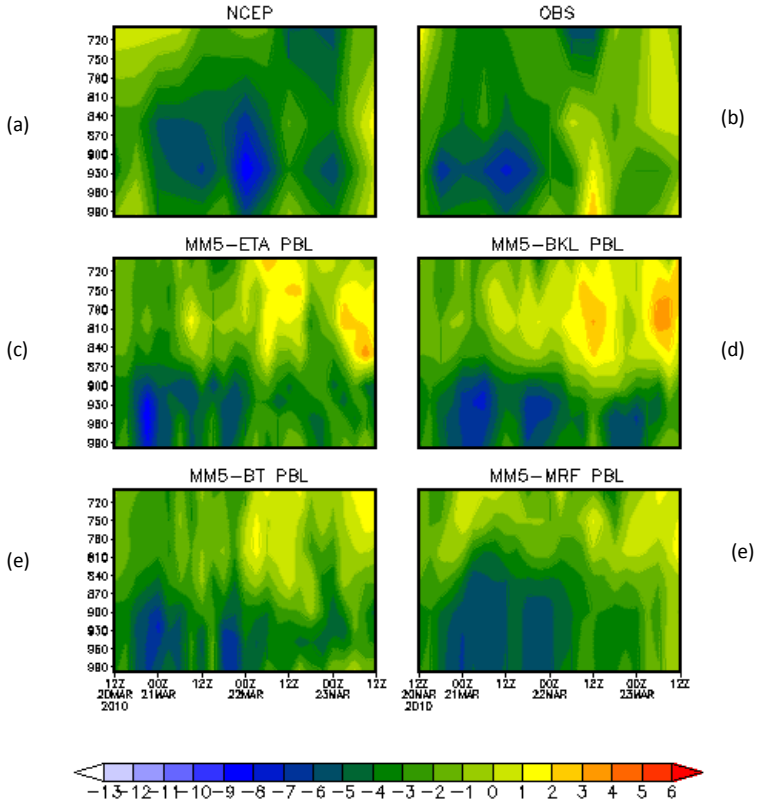


Figura 5.33 – Componente meridional do vento (m/s) entre 1000hPa e 700hPa para o período de 20mar2010 às 12:00UTC a 23mar2010 às 12:00UTC – Domínio 2: (a) Reanálises – NCEP; (b) Radiossondagens do CLA; Simulação MM5 considerando a parametrização (c) ETA; (d) BLK; (e) BT e (f) MRF.

5.3.1 - Perfis da Velocidade e Direção do Vento

Ano de 2008:

As Figuras 5.34 a 5.37 apresenta as previsões de 24, 36, 48, 60 e 72 horas dos perfis verticais de velocidade e direção do vento para os dias 20 e 21set2008 a partir de simulações dos dias 17 e 18, respectivamente, inicializadas tanto às 00:00 quanto às 12:00UTC. Para a velocidade do vento a performance dos horários das previsões variou. Em alguns casos o resultado foi melhor para as previsões de 24 e 72 horas de integração do modelo dependendo também de quando as simulações iniciavam-se: 00:00 ou 12:00UTC.

A direção do vento pareceu ser melhor prevista pelo modelo do que a velocidade quando comparada à observação. As parametrizações utilizadas previram os valores de direção do vento muito próximo às observações, mas em alguns horários as simulações com parametrização MRF do modelo MM5 definiu-se mais próxima ao valor real. Assim como ocorreu com a velocidade do vento, o horário (tempo de integração do modelo) em que a previsão da direção do vento é melhor não ficou definido. As velocidades diferiram de 1,0 a 5,0 m/s aproximadamente e, as piores previsões da direção do vento chegaram, em média, em torno de 40° de diferença.

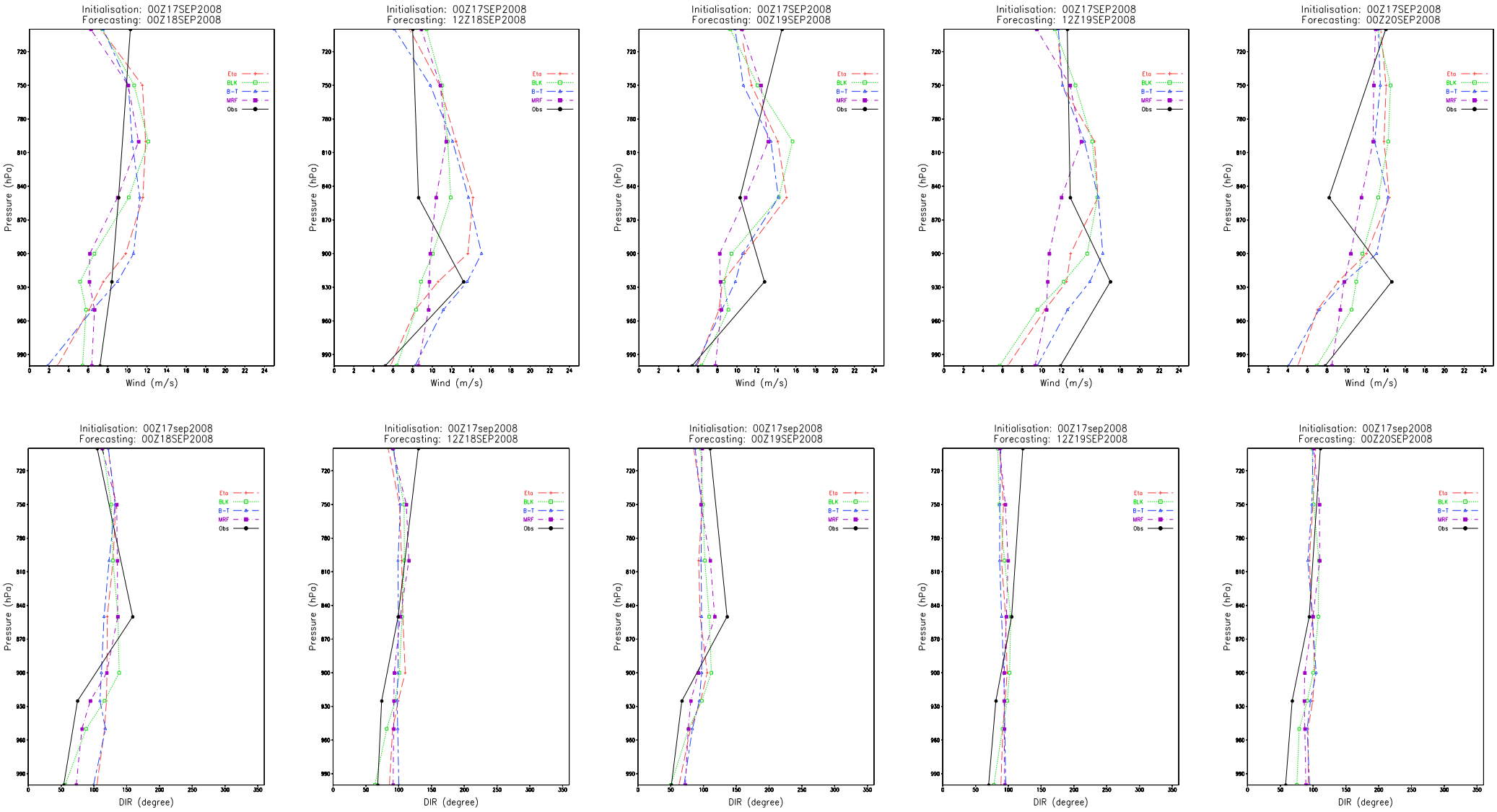


Figura 5.34 – Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 20set2008 às 00:00UTC com as parametrizações ETA (linha tracejada vermelha); BLK (linha pontilhada verde com quadrado); B-T (linha tracejada azul com triângulo) e MRF (linha tracejada roxa com quadrado) e a observação da radiossondagem (linha contínua preta com bola cheia) na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas.

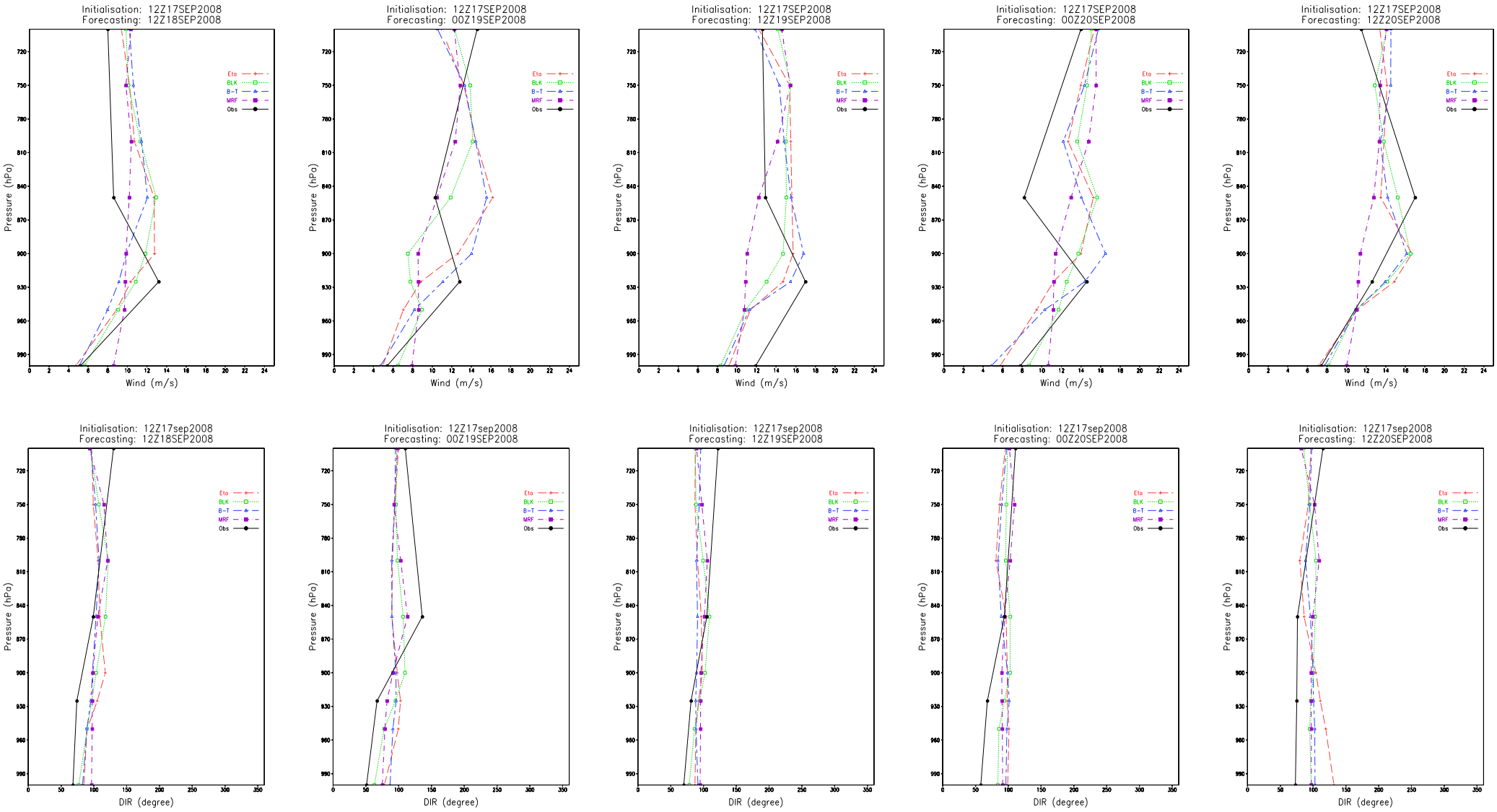


Figura 5.35 – Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 20set2008 às 12:00UTC com as parametrizações ETA (linha tracejada vermelha); BLK (linha pontilhada verde com quadrado); B-T (linha tracejada azul com triângulo) e MRF (linha tracejada roxa com quadrado) e a observação da radiossondagem (linha contínua preta com bola cheia) na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas.

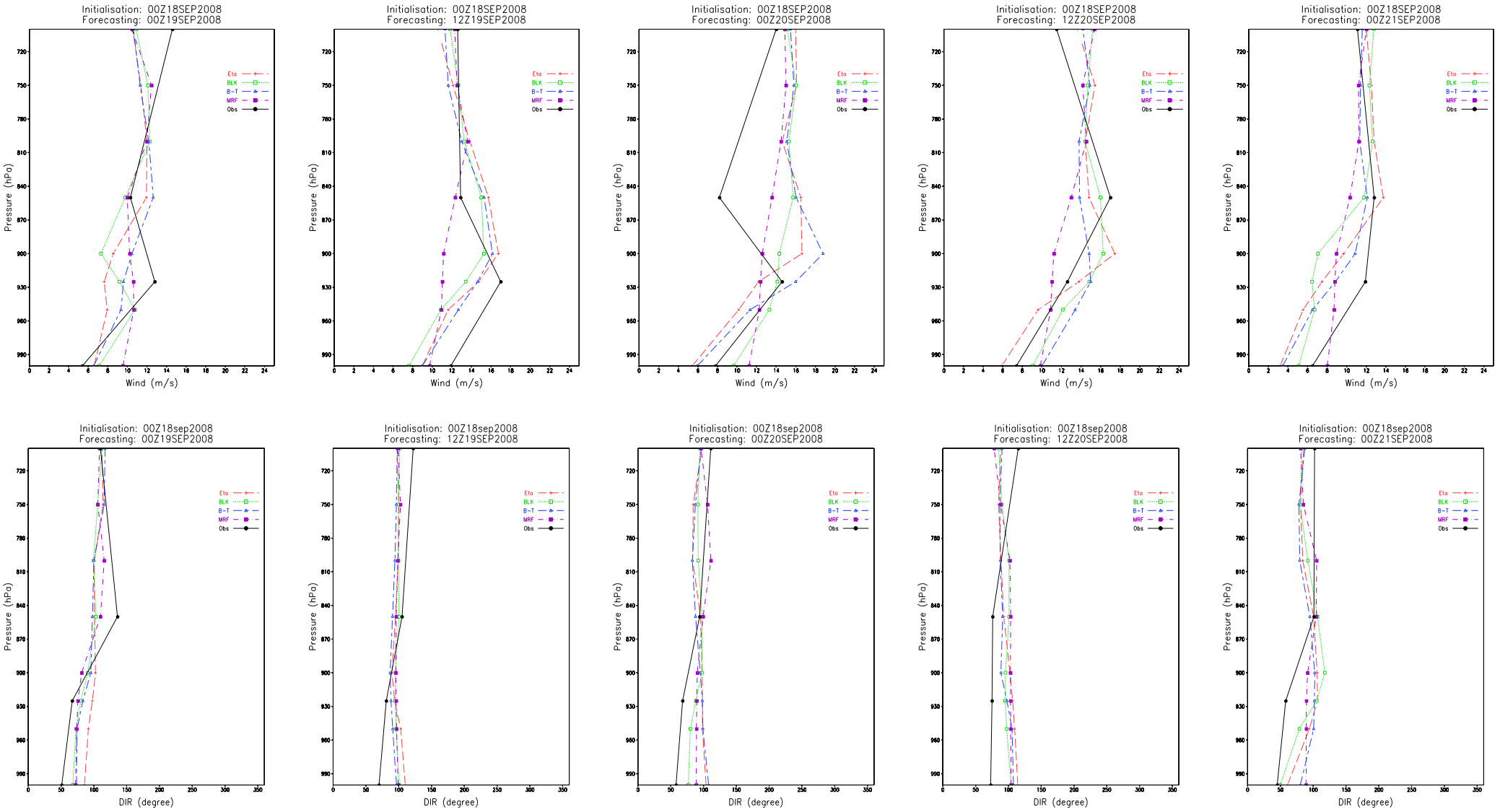


Figura 5.36 – Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 21set2008 às 00:00UTC com as parametrizações ETA (linha tracejada vermelha); BLK (linha pontilhada verde com quadrado); B-T (linha tracejada azul com triângulo) e MRF (linha tracejada roxa com quadrado) e a observação da radiossondagem (linha contínua preta com bola cheia) na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas.

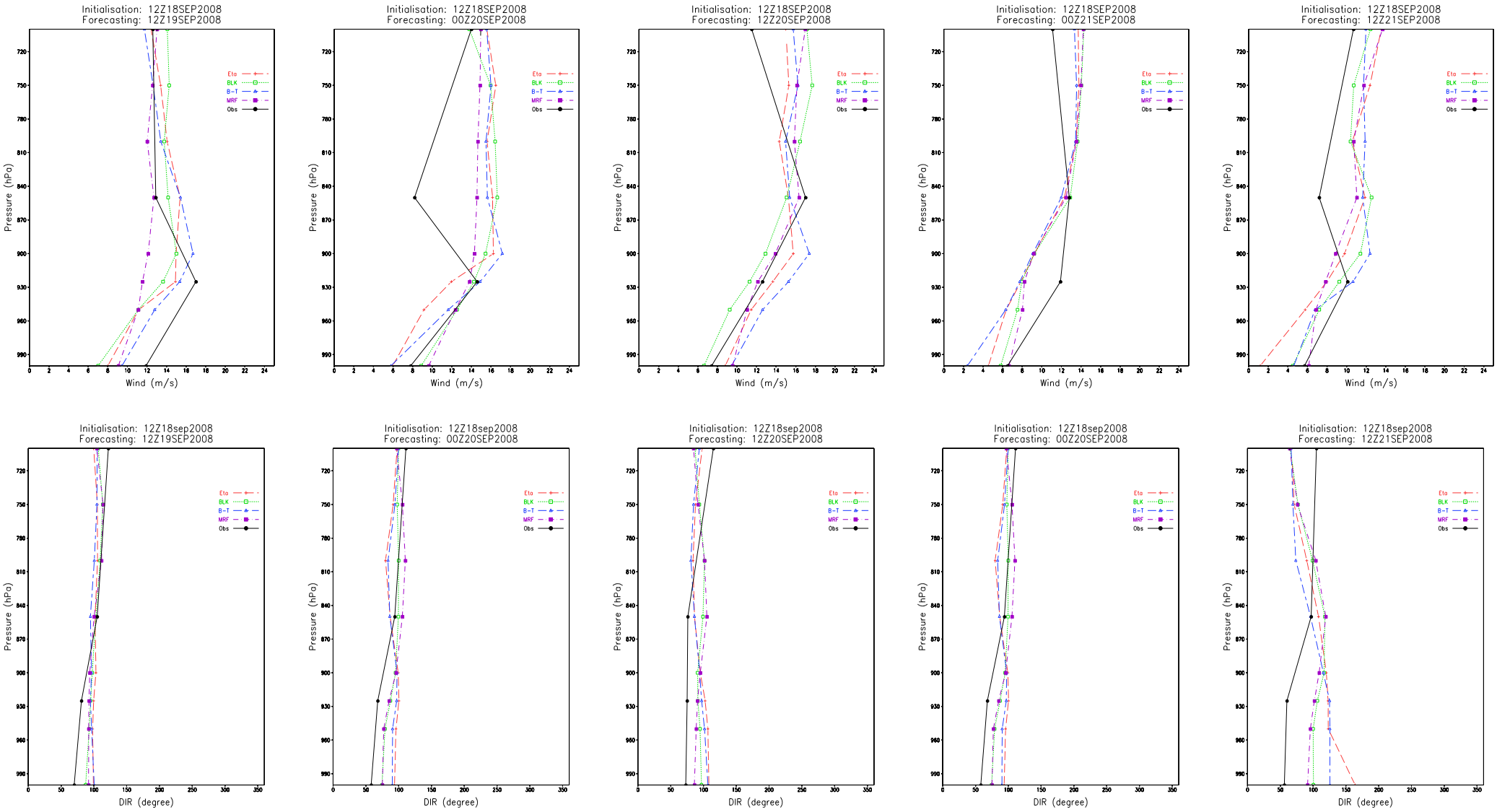


Figura 5.37 – Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 21set2008 às 12:00UTC com as parametrizações ETA (linha tracejada vermelha); BLK (linha pontilhada verde com quadrado); B-T (linha tracejada azul com triângulo) e MRF (linha tracejada roxa com quadrado) e a observação da radiossondagem (linha contínua preta com bola cheia) na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas.

Ano de 2010:

Os perfis verticais de velocidade e direção do vento para os dias 22 e 23 de março estão representados nas Figuras 5.38 a 5.41. Da mesma maneira como foi observado no período seco (2008), no período chuvoso não ficou bem definido os horários em que as previsões são melhores. A análise revelou alguns resultados com diferenças de até 5,0m/s da intensidade do vento entre o valor real e o simulado, como no caso da simulação para o dia 22mar2010 às 00:00UTC (Fig. 5.38), que foi bem simulada pelo modelo, considerando todas as parametrizações, durante quase todo o período de integração. Entretanto, para os tempos finais (acima de 60 horas) isto não ocorreu, principalmente para a parametrização ETA nos níveis de 925 e 850hPa. Notou-se que as simulações a partir da parametrização MRF se destacaram dentre as demais quer seja na previsão da velocidade quanto na previsão da direção do vento. Um resultado observado, entretanto ainda não conclusivo, é que as previsões de 24, 60 e 72 horas foram melhores para a direção do vento no período chuvoso.

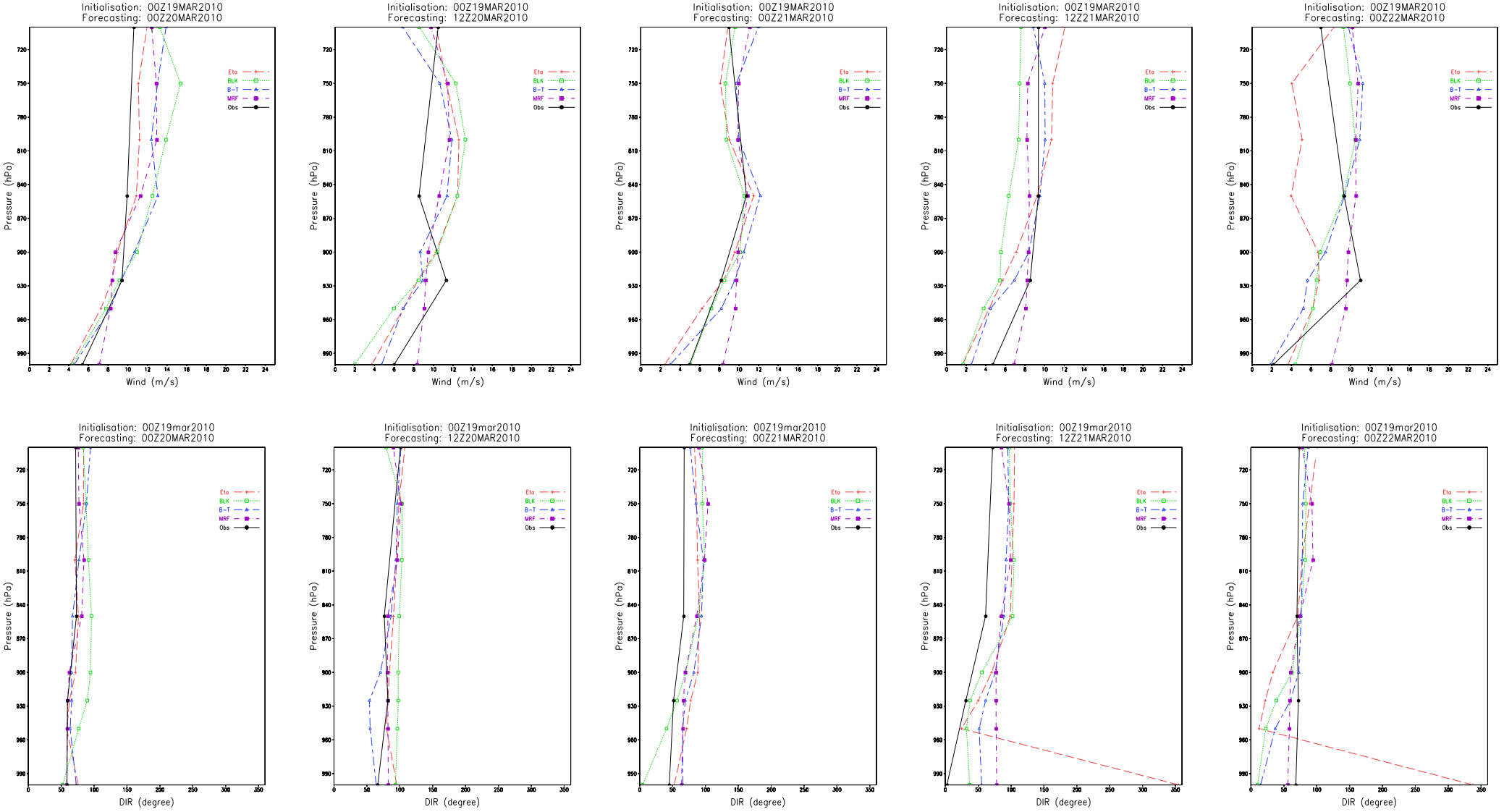


Figura 5.38 – Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 22mar2010 às 00:00UTC com as parametrizações ETA (linha tracejada vermelha); BLK (linha pontilhada verde com quadrado); B-T (linha tracejada azul com triângulo) e MRF (linha tracejada roxa com quadrado) e a observação da radiossondagem (linha contínua preta com bola cheia) na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas.

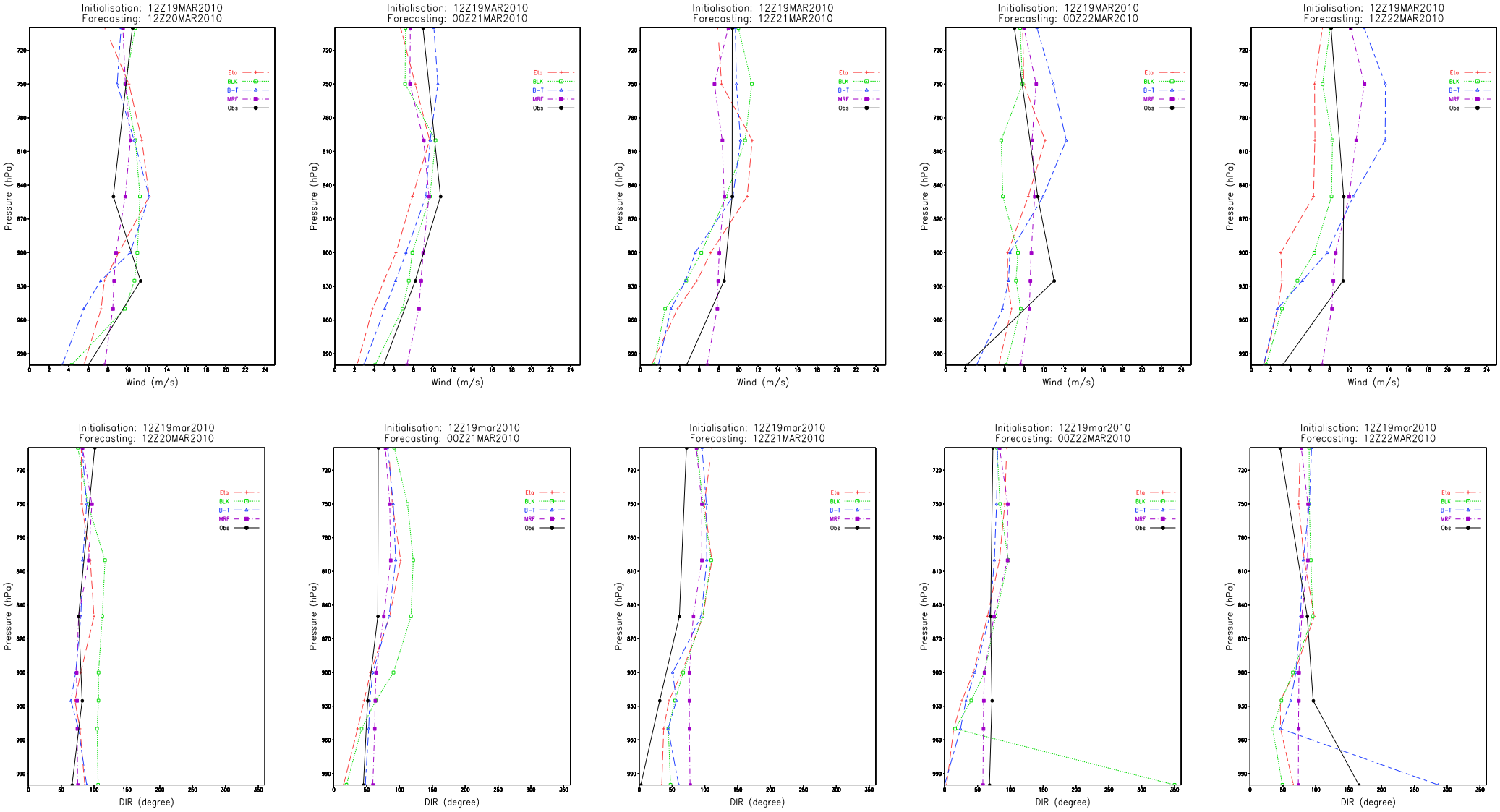


Figura 5.39 – Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 22mar2010 às 12:00UTC com as parametrizações ETA (linha tracejada vermelha); BLK (linha pontilhada verde com quadrado); B-T (linha tracejada azul com triângulo) e MRF (linha tracejada roxa com quadrado) e a observação da radiossondagem (linha contínua preta com bola cheia) na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas.

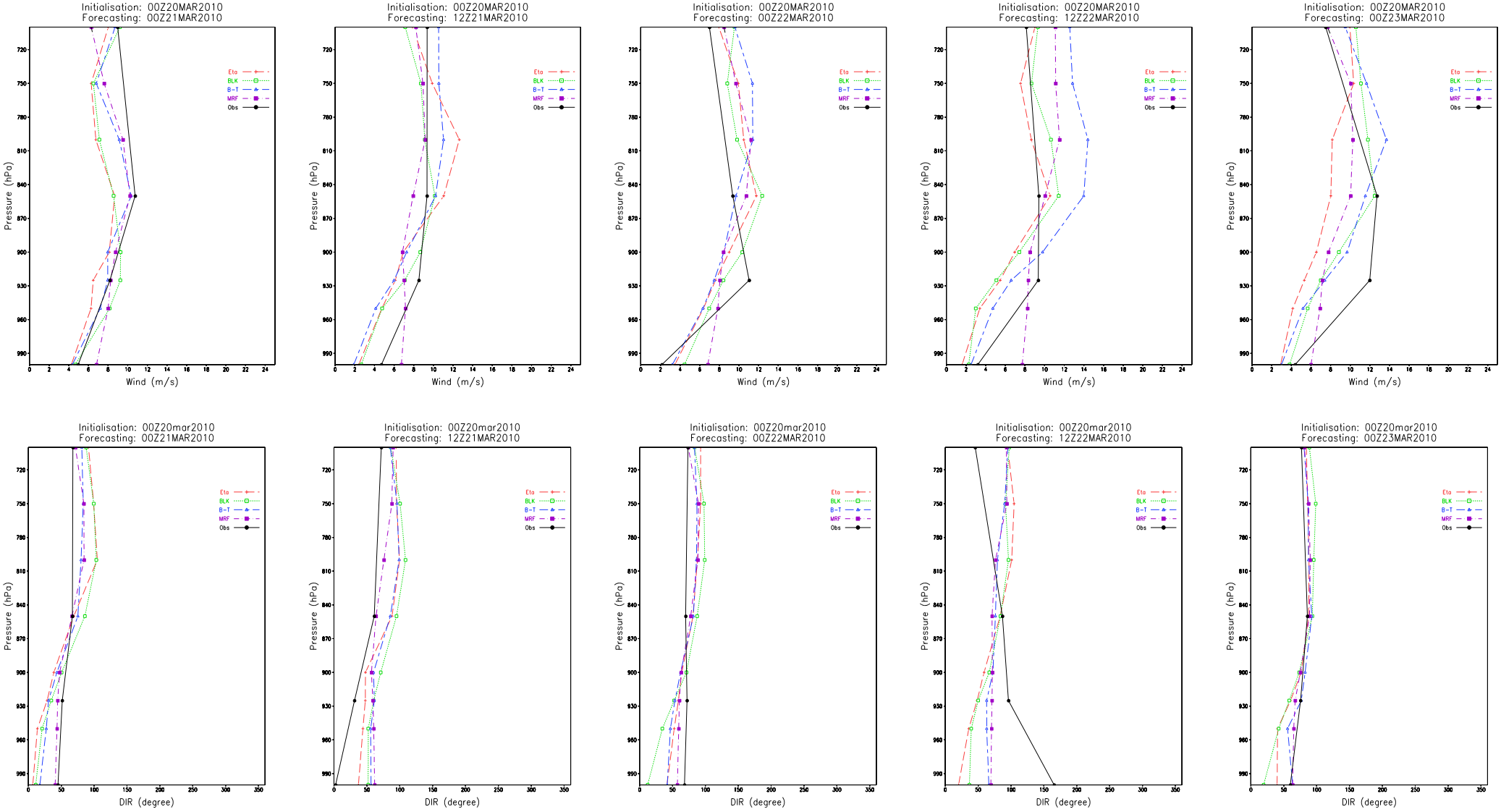


Figura 5.40 – Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 23mar2010 às 00:00UTC com as parametrizações ETA (linha tracejada vermelha); BLK (linha pontilhada verde com quadrado); B-T (linha tracejada azul com triângulo) e MRF (linha tracejada roxa com quadrado) e a observação da radiossondagem (linha contínua preta com bola cheia) na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas.

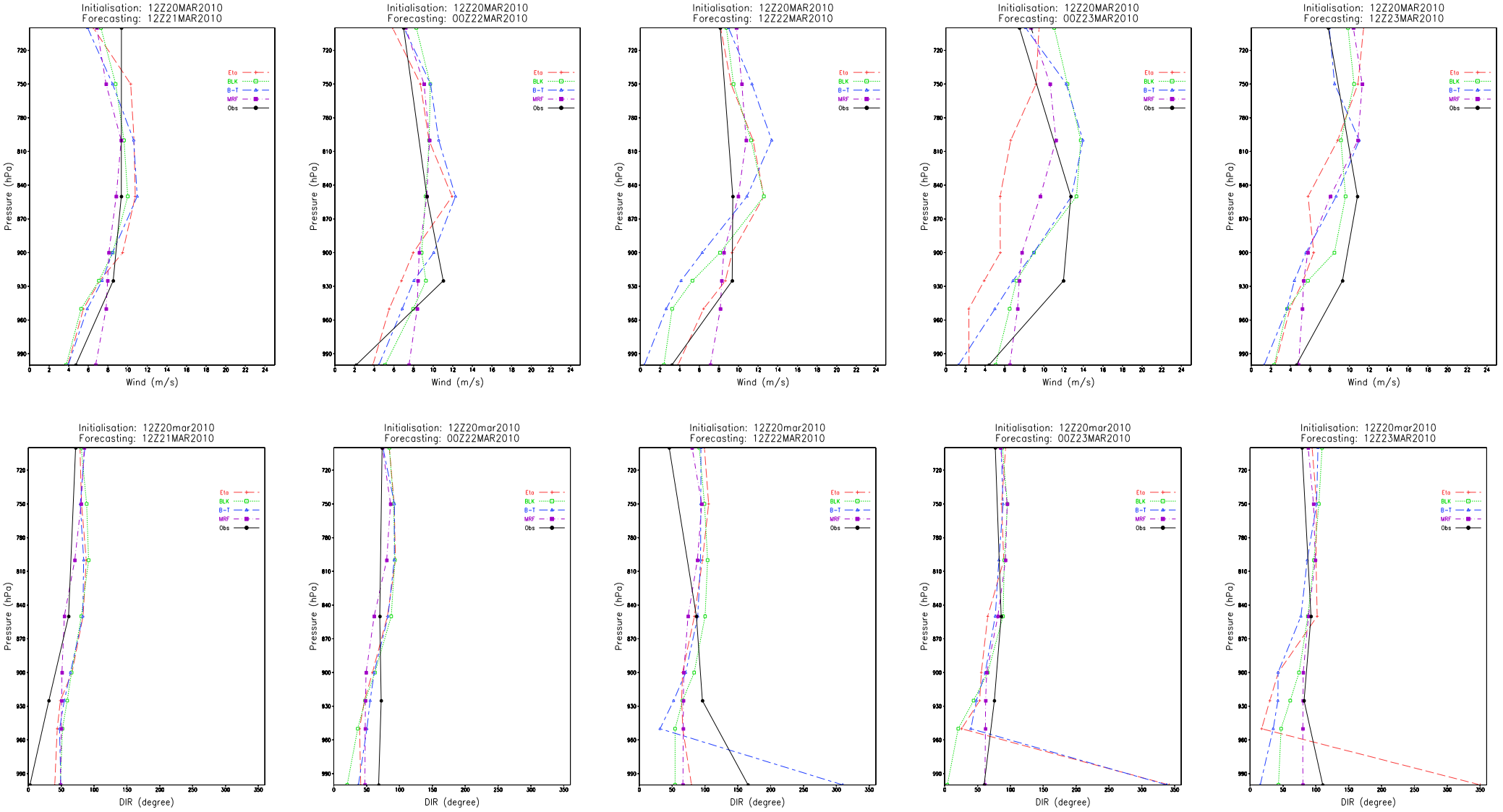


Figura 5.41 – Comparação dos perfis verticais do vento (m/s) previstos para o dia 23mar2010 às 12:00UTC com as parametrizações ETA (linha tracejada vermelha); BLK (linha pontilhada verde com quadrado); B-T (linha tracejada azul com triângulo) e MRF (linha tracejada roxa com quadrado) e a observação da radiossondagem (linha contínua preta com bola cheia) na camada de 1000 a 700hPa para o período de 24, 36, 48, 60 e 72 horas.

Esta primeira parte da análise dos resultados auxilia a análise estatística. Os resultados indicaram o considerável potencial das parametrizações de PBL para melhorar a qualidade das previsões do vento à curto prazo geradas pelo modelo MM5. Por outro lado, estes resultados mostraram que o impacto das parametrizações não é igualmente sentida em toda a extensão da atmosfera aqui estudada (1000 a 700hPa), ou seja, existem limitações na previsão do vento (componentes) em partes desta camada, sendo às vezes uma determinada parametrização apresenta melhores resultados próximo da superfície e, em outras vezes, em níveis mais altos.

De uma maneira geral, considerando-se todas as opções de parametrizações de PBL, notou-se que o modelo apresentou erros na intensidade do vento, mas estes erros ocorreram em 1000hPa, ou seja, o campo de vento próximo à superfície não respondeu bem às principais características de relevo do CLA ou sugerindo que devêssemos ajustar não somente a parametrização de PBL, mas também a parametrização de física de nuvens. Considerando-se toda a camada da atmosfera estudada (1000 a 700hPa), as diferenças foram menores nos setores dominantes do vento (NE e SE), o que de alguma forma reduz esta limitação já que os setores mais importantes são razoavelmente simulados pelo modelo.

5.4 Análise de Willmott

A análise estatística foi feita baseada em três parâmetros como já havia sido mencionada no Capítulo 3.

Como o índice de Willmott pode variar no intervalo de -1,0 a 1,0, aqui se considerou o critério de avaliação apresentado na Tabela 5.2.1. Neste caso, o índice de Willmott foi considerado o avaliador qualitativo das previsões.

Tabela 5.2.1 – Critério de avaliação adotado para Willmott

Intervalo	**Desempenho**
1,0 a 0,75	Excelente
0,75 a 0,5	Bom
0,5 a 0,25	Razoável

0,25 a -0,25	Pouco satisfatório
-0,25 a -0,5	Insatisfatório
-0,5 a -0,75	Pobre
-0,75 a -1,0	Muito pobre

Fonte: Wilmott, 2013.

Da mesma maneira, adotou-se um critério de avaliação dos resultados para o RMSE, conforme é mostrado na Tabela 5.2.2. Esta avaliação foi considerada quantitativa.

Tabela 5.2.2 – Critério de avaliação adotado para o RMSE

Intervalo	**Desempenho**
0,0 a 1,9	Ótimo
2 a 2,9	Bom
3 a 3,9	Satisfatório
≥ 4	Insatisfatório

As Figuras 5.4.1 a 5.4.21 (Apêndice A) apresentam os resultados estatísticos encontrados durante os períodos seco e chuvoso. Sequencialmente mostra-se o desempenho de Willmott para cada nível (1000, 925, 850 e 700hPa) segundo a evolução temporal, ou seja, para cada um dos dias dentro dos períodos analisados (seco e chuvoso) e posteriormente, uma avaliação média para toda a camada da atmosfera (de 1000 a 700hPa).

A análise feita para cada um dos dias dos períodos mostrou, em média, que:

- A previsão a partir da parametrização de MRF ficou mais próxima do valor real (observação) no prognóstico da componente zonal no período seco (2008) no nível de 700hPa quando a inicialização era feita a partir de dados das 00:00UTC, enquanto que, quando inicializada às 12:00UTC o resultado era melhor no nível de 850hPa. A componente meridional prevista pela parametrização MRF foi melhor em 850hPa tanto para inicializações às

00:00UTC quanto para 12:00UTC. Ainda sobre a parametrização MRF, em 2010 (período chuvoso) as componentes zonal e meridionais foram melhores previstas nos níveis de 1000 e 925hPa para inicializações às 00:00 UTC e 12:00UTC.

● A parametrização BLK teve melhor resultado para a componente zonal no período seco em 1000hPa (inicialização às 00:00UTC) e, em 850hPa (inicialização às 12:00UTC) e a componente meridional em 850hPa (inicialização às 00:00UTC) e 1000hPa (inicialização às 12:00UTC). No período chuvoso, a parametrização BLK teve melhor desempenho na previsão da componente zonal em 700hPa (inicialização às 00:00 UTC) e 1000hPa (inicialização às 12:00UTC). A componente meridional prevista foi melhor nos níveis de 1000hPa (inicialização às 00:00UTC) e 925hPa (inicialização às 12:00UTC).

● A parametrização ETA previu melhor a componente zonal no período seco em 1000hPa (inicialização às 00:00UTC) e, em 850hPa (inicialização às 12:00UTC) e a componente meridional em 850hPa tanto para inicialização das 00:00UTC quanto para inicialização das 12:00UTC. No período chuvoso, a parametrização ETA teve seu melhor desempenho na previsão da componente zonal em 700hPa (inicialização às 00:00 UTC) e 1000hPa (inicialização às 12:00UTC). A componente meridional prevista foi melhor no nível de 1000hPa em ambas as inicializações (00:00 UTC e 12:00UTC).

● A parametrização de BT prognosticou melhor a componente zonal no período seco (2008) no nível de 700hPa (inicialização às 00:00UTC) e no nível de 1000hPa (inicialização às 12:00UTC). A componente meridional prevista pela parametrização BT foi melhor em 850hPa tanto para inicializações às 00:00UTC quanto para 12:00UTC. No período chuvoso a componente zonal prevista a partir desta parametrização aproximou-se mais da observação no nível de 700hPa (inicialização às 00:00UTC) e em 1000hPa (inicialização às 12:00 UTC) e a componente meridional nos níveis de 1000hPa (inicialização às 00:00UTC) e 925hPa (inicialização às 12:00UTC).

A Tabela 5.3 mostra os resultados das simulações inicializadas às 00:00UTC para o período do dia 17 às 00:00 ao dia 21 às 00:00UTC do mês de set/2008 para a componente zonal e meridional. Por meio da avaliação do critério de Willmott, em média, as simulações de 48 e 60 horas obtiveram os melhores resultados, sendo que a parametrização de BLK obteve o resultado de -0,06 no domínio 1 (DOM 1) e para o domínio 2 (DOM 2), a parametrização MRF foi melhor que as demais com um índice de -0,10. Apesar do melhor desempenho comparativamente às demais parametrizações, BLK e MRF tiveram, segundo o índice de Willmott um resultado pouco satisfatório.

Já o RMSE apontou, em média, resultados melhores para as simulações com 12 horas de antecedência. Sendo observado valores de 1,72 (equivalente a uma ótima representação) no DOM 1 a partir da parametrização MRF (melhor resultado dentre as parametrizações) e de 1,75 (ótimo) no DOM 2 também para a parametrização MRF (melhor resultado dentre as parametrizações). O BIAS mostrou que as parametrizações avaliadas subestimaram (17,2 %) os valores da componente zonal em quase todos os horários, exceto para o horário das 12 horas.

A componente meridional, em média, não foi muito bem simulada por nenhuma das parametrizações. As simulações testadas mostram uma tendência a superestimar (20,5%) os valores, o que discordou da análise subjetiva feita anteriormente para esta variável. Ao contrário, na camada entre 1000 e 925hPa a análise subjetiva apontou, aparentemente, uma subestimativa dos valores da componente v feitas pelas diferentes parametrizações. O melhor índice de Willmott obtido foi de -0,21 para o DOM 1 e -0,23 para o DOM 2, ambos obtidos a partir da parametrização de BLK. Os resultados de RMSE para a componente meridional não foram tão bons quanto o resultado da componente zonal, mas foram considerados bons (2,05 e 2,16) nos dois domínios.

Tabela 5.3 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 00:00UTC para o período do dia 17 às 00:00UTC ao dia 21set2008 às 00:00UTC, considerando-se os dois domínios.

Componente Zonal - 2008					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
WILLMOTT	12	-0,14	-0,11	-0,17	-0,11
	24	-0,14	-0,12	-0,18	-0,19
	36	-0,12	-0,09	-0,11	-0,12
	48	-0,07	-0,06	-0,09	-0,08
	60	-0,07	**-0,06**	-0,09	-0,08
DOM 2					
WILLMOTT	12	-0,20	-0,17	-0,25	-0,24
	24	-0,19	-0,19	-0,24	-0,26
	36	-0,16	-0,16	-0,21	-0,21
	48	-0,10	-0,12	-0,16	-0,19
	60	**-0,10**	-0,11	-0,17	-0,19
DOM 1					
RMSE	**12**	**1,72**	1,76	1,79	1,74
	24	1,76	1,83	1,88	1,87
	36	1,79	1,89	1,91	1,91
	48	1,86	1,93	1,96	1,96
	60	1,89	1,95	1,99	1,98
DOM 2					
RMSE	**12**	**1,75**	1,80	1,92	1,87
	24	1,79	1,87	1,96	1,96
	36	1,83	1,91	2,00	2,00
	48	1,89	1,97	2,04	2,07
	60	1,93	1,99	2,09	2,12
DOM 1					
BIAS	**12**	0,18	0,45	0,30	0,23
	24	-0,27	0,07	-0,12	-0,28
	36	-0,35	-0,06	-0,20	-0,49
	48	-0,45	-0,08	-0,29	-0,50
	60	-0,46	-0,20	-0,42	-0,59
DOM 2					
BIAS	12	-0,65	-0,71	-0,89	-1,00
	24	-0,98	-0,96	-1,08	-1,33
	36	-1,04	-1,16	-1,33	-1,56
	48	-1,07	-1,12	-1,30	-1,63
	60	-1,09	-1,17	-1,43	-1,79

Componente Meridional - 2008					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
WILLMOTT	12	-0,30	-0,23	-0,35	-0,34
	24	-0,36	-0,30	-0,40	-0,40
	36	-0,29	-0,22	-0,34	-0,35
	48	-0,29	**-0,21**	-0,34	-0,36
	60	-0,24	-0,17	-0,30	-0,32
DOM 2					
WILLMOTT	12	-0,30	-0,27	-0,35	-0,35
	24	-0,35	-0,33	-0,38	-0,40
	36	-0,30	-0,27	-0,34	-0,35
	48	-0,30	-0,26	-0,34	-0,36
	60	-0,26	**-0,23**	-0,31	-0,33
DOM 1					
RMSE	12	2,22	2,11	2,32	2,28
	24	2,20	2,07	2,30	2,28
	36	2,21	2,11	2,32	2,31
	48	2,17	2,07	2,31	2,29
	60	2,13	**2,05**	2,28	2,26
DOM 2					
RMSE	12	2,28	2,20	2,37	2,36
	24	2,25	2,17	2,35	2,34
	36	2,26	2,20	2,38	2,36
	48	2,24	2,18	2,37	2,35
	60	2,21	**2,16**	2,34	2,32
DOM 1					
BIAS	12	1,04	1,12	1,50	1,21
	24	1,06	1,14	1,53	1,20
	36	1,13	1,15	1,53	1,20
	48	1,14	1,24	1,65	1,29
	60	1,25	1,34	1,79	1,45
DOM 2					
BIAS	12	1,60	1,59	1,91	1,56
	24	1,50	1,56	1,93	1,51
	36	1,57	1,66	1,93	1,53
	48	1,59	1,73	2,05	1,68
	60	1,73	1,86	2,18	1,85

A Tabela 5.4 apresenta os resultados das simulações inicializadas às 12:00UTC para o período do dia 16 às 12:00 ao dia 21 às 12:00UTC do mês de set/2008 para a componente zonal. Os valores encontrados para Willmott foram melhores do que aqueles obtidos anteriormente, quando as simulações foram inicializadas às 00:00 UTC, porém diferente destas últimas, a parametrização BLK foi melhor no DOM 1 com valores de -0,01 (pouco satisfatório) no horário de 12 horas e MRF no DOM 2 com valor de -0,04 (às 48 horas).

A partir da análise de RMSE os melhores resultados encontrados foram de 1,68 (ótimo) para o domínio 1 e 1,63 (ótimo) para o domínio 2, ambos obtidos segundo a parametrização MRF. Através do BIAS chegou-se a um resultado de superestimativa dos valores da componente zonal, ao contrário do que havia sido observado quando a inicialização das simulações era a partir das 00:00 UTC.

Os resultados das simulações inicializadas às 12:00UTC para o período do dia 16 às 12:00 ao dia 21 às 12:00UTC do mês de set/2008 para a componente meridional do vento também podem ser na Tabela 5.4 . Os resultados obtidos foram ainda piores em relação àqueles encontrados a partir da inicialização às 00:00UTC.

O valor de Willmott foi de -0,28 (insatisfatório) para o DOM 1, sendo o melhor resultado obtido por BLK em relação as outras parametrizações e para o DOM 2 de -0,32 (insatisfatório) por MRF.

O RMSE novamente foi considerado ótimo, mas ao contrário do resultado observado na inicialização das 00:00UTC, MRF foi considerada ótima (1,98) nos domínios 1 e 2. Também, os resultados das simulações avaliadas foram superestimados cerca de 20% em relação aos observados.

Tabela 5.4 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 12:00UTC para o período do dia 16 às 12:00UTC ao dia 21set2008 às 12:00UTC, considerando-se os dois domínios.

Componente Zonal - 2008					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
	12	-0,04	**-0,01**	-0,15	-0,11
	24	-0,07	-0,03	-0,11	-0,10
WILLMOTT	36	-0,09	-0,10	-0,15	-0,15
	48	-0,05	-0,05	-0,09	-0,07
	60	-0,07	-0,08	-0,11	-0,09
DOM 2					
	12	-0,06	-0,08	-0,12	-0,11
	24	-0,08	-0,10	-0,11	-0,11
WILLMOTT	36	-0,06	-0,13	-0,15	-0,13
	48	**-0,04**	-0,06	-0,09	-0,08
	60	-0,07	-0,07	-0,11	-0,11
DOM 1					
	12	**1,68**	1,72	1,80	1,77
	24	1,76	1,81	1,84	1,81
RMSE	36	1,79	1,88	1,87	1,87
	48	1,82	1,90	1,90	1,87
	60	1,85	1,94	1,93	1,91
DOM 2					
	12	**1,63**	1,67	1,74	1,67
	24	1,69	1,76	1,81	1,77
RMSE	36	1,74	1,81	1,85	1,82
	48	1,76	1,81	1,85	1,82
	60	1,81	1,85	1,89	1,86
DOM 1					
	12	1,19	1,56	1,65	1,46
	24	1,11	1,44	1,39	1,16
BIAS	36	0,93	1,28	1,20	0,98
	48	0,92	1,23	1,13	0,82
	60	0,88	1,28	1,20	0,90
DOM 2					
	12	0,64	0,75	1,06	0,66
	24	0,40	0,43	0,53	0,12
BIAS	36	0,29	0,29	0,33	-0,10
	48	0,24	0,19	0,09	-0,28
	60	0,24	0,29	0,15	-0,18

Componente Meridional - 2008					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
	12	-0,36	-0,32	-0,43	-0,40
	24	-0,31	**-0,28**	-0,35	-0,33
WILLMOTT	36	-0,34	-0,31	-0,37	-0,34
	48	-0,31	-0,28	-0,33	-0,32
	60	-0,33	-0,30	-0,36	-0,34
DOM 2					
	12	-0,36	-0,39	-0,45	-0,42
	24	**-0,32**	-0,36	-0,38	-0,36
WILLMOTT	36	-0,36	-0,37	-0,39	-0,38
	48	**-0,32**	-0,34	-0,37	-0,36
	60	-0,36	-0,35	-0,39	-0,39
DOM 1					
	12	2,03	2,00	2,13	2,07
	24	2,05	2,00	2,13	2,07
RMSE	36	2,03	1,99	2,12	2,06
	48	2,02	2,00	2,11	2,07
	60	1,98	1,98	2,10	2,06
DOM 2					
	12	2,04	2,10	2,16	2,13
	24	2,06	2,12	2,17	2,14
RMSE	36	2,05	2,10	2,17	2,14
	48	2,05	2,11	2,19	2,15
	60	2,03	2,09	2,18	2,15
DOM 1					
	12	1,15	1,48	1,73	1,59
	24	1,20	1,29	1,76	1,46
BIAS	36	1,23	1,31	1,69	1,37
	48	1,30	1,38	1,71	1,47
	60	1,28	1,43	1,81	1,57
DOM 2					
	12	1,42	1,81	1,93	1,87
	24	1,49	1,80	2,05	1,88
BIAS	36	1,49	1,79	2,02	1,80
	48	1,60	1,92	2,13	1,89
	60	1,64	1,94	2,19	2,00

A Tabela 5.5 mostra os resultados das simulações inicializadas às 00:00UTC para o período do dia 20 às 00:00 ao dia 25 às 00:00UTC do mês de mar/2010 para as componentes zonal e meridional. Pela primeira vez, a parametrização de BT apresentou um resultado mais expressivo. Os melhores índices de Willmott -0,13 (pouco satisfatório) e -0,16 (pouco satisfatório) foi apresentado pela parametrização de BT nos domínios 1 e 2, respectivamente.

O RMSE foi considerado ótimo em ambos os domínios, porém, os resultados foram obtidos a partir de parametrizações diferentes: de 1,50 no DOM 1 por BLK e de 1,60 por MRF.

Na avaliação adotada para identificar os melhores resultados das simulações para a componente zonal, os resultados dos parâmetros estatísticos divergiram, ou seja, BT foi melhor que as demais parametrizações segundo o critério de Willmott e BLK e MRF segundo o RMSE.

No caso da componente meridional, novamente a parametrização MRF se destacou com melhor resultado para o índice de Willmott sendo encontrados valores de -0,08 (pouco satisfatório) no DOM 1 e de -0,10 no DOM 2. O RMSE também registrou melhores resultados para MRF onde o valor de 1,49 (ótimo) foi estabelecido no DOM 1 e de 1,50 (ótimo) por MRF e BLK no DOM 2. O valor de BIAS aponta uma superestimativa (em média 15%) das parametrizações para a componente meridional do vento.

Tabela 5.5 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 00:00UTC para o período do dia 20 às 00:00UTC ao dia 25mar2010 às 00:00UTC, considerando-se os dois domínios.

Componente Zonal - 2010					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
	12	-0,24	-0,18	-0,37	-0,29
	24	-0,26	-0,24	-0,34	-0,23
WILLMOTT	36	-0,19	-0,16	-0,24	-0,19
	48	-0,18	-0,16	-0,22	-0,16
	60	-0,17	-0,14	-0,20	**-0,13**
DOM 2					
	12	-0,28	-0,25	-0,27	-0,28
	24	-0,28	-0,29	-0,27	-0,31
WILLMOTT	36	-0,24	-0,21	-0,21	-0,23
	48	-0,21	-0,19	-0,20	-0,19
	60	-0,20	-0,17	-0,19	**-0,16**
DOM 1					
	12	1,54	**1,50**	1,78	1,70
	24	1,65	1,66	1,83	1,63
RMSE	36	1,68	1,67	1,84	1,71
	48	1,69	1,72	1,86	1,74
	60	1,70	1,74	1,85	1,77
DOM 2					
	12	**1,60**	1,64	1,71	1,67
	24	1,72	1,75	1,77	1,74
RMSE	36	1,75	1,80	1,82	1,78
	48	1,77	1,83	1,88	1,80
	60	1,78	1,85	1,90	1,84
DOM 1					
	12	-0,96	0,49	0,47	-0,76
	24	-1,42	-0,24	0,01	-0,44
BIAS	36	-1,44	-0,45	-0,32	-0,83
	48	-1,47	-0,64	-0,47	-0,95
	60	-1,38	-0,68	-0,49	-0,97
DOM 2					
	12	-1,31	0,03	0,10	-0,63
	24	-1,83	-0,66	-0,26	-1,10
BIAS	36	-1,84	-0,76	-0,50	-1,27
	48	-1,87	-0,97	-0,77	-1,33
	60	-1,75	-1,03	-0,88	-1,40

Componente Meridional - 2010					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
	12	-0,12	-0,19	-0,23	-0,17
	24	**-0,08**	-0,15	-0,21	-0,14
WILLMOTT	36	-0,19	-0,25	-0,27	-0,19
	48	-0,21	-0,26	-0,27	-0,22
	60	-0,22	-0,27	-0,29	-0,25
DOM 2					
	12	-0,13	-0,15	-0,26	-0,21
	24	**-0,10**	-0,16	-0,22	-0,17
WILLMOTT	36	-0,21	-0,25	-0,29	-0,21
	48	-0,22	-0,26	-0,30	-0,23
	60	-0,23	-0,28	-0,30	-0,24
DOM 1					
	12	**1,49**	1,61	1,70	1,54
	24	1,50	1,64	1,72	1,53
RMSE	36	1,57	1,74	1,77	1,59
	48	1,61	1,74	1,81	1,66
	60	1,66	1,79	1,86	1,73
DOM 2					
	12	**1,50**	**1,50**	1,68	1,51
	24	1,50	1,61	1,72	1,54
RMSE	36	1,57	1,69	1,75	1,58
	48	1,59	1,70	1,78	1,63
	60	1,62	1,72	1,82	1,67
DOM 1					
	12	1,34	1,26	1,68	1,22
	24	1,28	1,35	1,80	1,03
BIAS	36	1,29	1,44	1,76	1,18
	48	1,15	1,41	1,76	1,24
	60	1,04	1,28	1,64	1,12
DOM 2					
	12	1,62	1,09	1,60	1,04
	24	1,54	1,30	1,75	1,28
BIAS	36	1,60	1,41	1,67	1,27
	48	1,44	1,32	1,64	1,28
	60	1,31	1,20	1,55	1,19

A Tabela 5.6 mostra os resultados das simulações inicializadas às 12:00UTC para o período do dia 20 às 12:00 ao dia 25 às 12:00UTC do mês de mar/2010 para a componente zonal. A parametrização MRF obteve os melhores índices de Willmott tanto no DOM 1, de 0,17 (pouco satisfatório) quanto no DOM 2, de 0,14 (pouco satisfatório), inclusive melhores que aqueles encontrados no mesmo período com inicialização às 00:00UTC. Os valores de RMSE foram ótimos: de 1,61 no domínio 1 e de 1,66 no DOM 2, ambos obtidos por MRF. O BIAS mostra uma tendência das parametrizações em subestimar (16%) os valores observados.

A componente meridional foi melhor simulada pela parametrização MRF nos dois domínios, sendo de 0,28 (razoável) no domínio 1 e de 0,29 (razoável) no domínio 2. Também o melhor resultado de RMSE foi para parametrização MRF. Em quase todos os horários as parametrizações tenderam a subestimar os valores da componente meridional (Tabela 5.6).

Tabela 5.6 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 12:00UTC para o período do dia 20 às 12:00UTC ao dia 25mar2010 às 12:00UTC, considerando-se os dois domínios.

Componente Zonal - 2010					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
	12	-0,16	-0,09	-0,25	0,07
	24	-0,06	-0,11	-0,16	-0,16
WILLMOTT	36	0,12	0,10	0,00	0,10
	48	0,15	0,14	0,04	0,12
	60	**0,17**	0,14	0,07	0,12
DOM 2					
	12	-0,16	-0,14	-0,26	0,02
	24	-0,09	-0,08	-0,17	-0,21
WILLMOTT	36	0,08	0,09	-0,02	0,06
	48	0,10	0,11	0,01	0,06
	60	**0,14**	0,10	0,02	0,06
DOM 1					
	12	**1,61**	1,62	1,88	1,73
	24	1,61	1,68	1,84	1,73
RMSE	36	1,64	1,67	1,81	1,73
	48	1,65	1,67	1,79	1,73
	60	1,66	1,69	1,79	1,73
DOM 2					
	12	**1,66**	1,69	1,92	1,77
	24	1,68	1,70	1,87	1,77
RMSE	36	1,71	1,72	1,85	1,76
	48	1,72	1,72	1,85	1,81
	60	1,72	1,76	1,87	1,81
DOM 1					
	12	-1,73016	-0,38232	0,22389	-0,71065
	24	-1,62864	-0,46159	-0,21301	-0,97958
BIAS	36	-1,71556	-0,65741	-0,41417	-0,99509
	48	-1,63077	-0,66503	-0,44369	-1,13102
	60	-1,59547	-0,84848	-0,62325	-1,13102
DOM 2					
	12	-1,98792	-0,92636	0,104676	-1,128
	24	-1,93143	-0,97678	-0,42495	-1,33559
BIAS	36	-2,0339	-1,14864	-0,69235	-1,40357
	48	-1,96652	-1,02315	-0,72135	-1,6514
	60	-1,91215	-1,27912	-1,00671	-1,6514

Componente Meridional - 2010					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
	12	0,10	0,01	-0,04	0,12
	24	0,15	0,09	0,06	0,00
WILLMOTT	36	0,24	0,18	0,16	0,22
	48	0,27	0,20	0,17	0,23
	60	**0,28**	0,22	0,19	0,24
DOM 2					
	12	0,08	-0,07	-0,08	0,09
	24	0,15	0,05	0,05	-0,04
WILLMOTT	36	0,27	0,16	0,14	0,20
	48	0,28	0,20	0,14	0,21
	60	**0,29**	0,22	0,16	0,22
DOM 1					
	12	**1,45**	1,64	1,60	1,53
	24	1,54	1,69	1,65	1,57
RMSE	36	1,58	1,73	1,69	1,61
	48	1,64	1,77	1,76	1,68
	60	1,70	1,81	1,83	1,75
DOM 2					
	12	1,47	1,68	1,65	1,58
	24	1,54	1,71	1,68	1,61
RMSE	36	1,55	1,74	1,73	1,65
	48	1,61	1,76	1,80	1,70
	60	1,67	1,82	1,88	1,79
DOM 1					
	12	-0,05035	-0,03984	0,382919	0,193932
	24	-0,15112	-0,10113	0,043592	-0,08178
BIAS	36	-0,33656	-0,1508	0,010605	-0,16139
	48	-0,43157	-0,07571	-0,00035	-0,23226
	60	-0,60664	-0,27421	-0,06952	-0,34002
DOM 2					
	12	0,266586	-0,0044	0,261632	0,320124
	24	0,218627	-0,00944	0,040278	-0,00643
BIAS	36	0,046339	-0,04717	0,002185	-0,06665
	48	-0,04449	-0,03057	-0,02377	-0,17497
	60	-0,24062	-0,24526	-0,15574	-0,291

5.4.1 Discussão dos Resultados da CONF I considerando-se Inicializações das 00:00 e 12:00UTC.

O impacto em se definir a parametrização de PBL ideal do modelo MM5 para o CLA na previsão dos ventos (através dos valores de suas componentes) foi avaliado para os períodos seco e chuvoso. A avaliação estatística (índice de concordância de Willmott, RMSE, BIAS) sinalizou alguns resultados importantes em busca pela melhor parametrização de PBL. A partir dos resultados obtidos pelo experimento numérico da CONF I identificou-se que, em média, os melhores resultados do índice de Willmott foram para as previsões de 60 horas, entretanto os melhores resultados de RMSE foram encontrados em previsões com 12 horas de antecedência tanto para o período seco quanto para o chuvoso.

Foi percebido logo neste primeiro experimento (CONF I) que as parametrizações ETA e BT não são adequadas para o CLA. Considerando-se os períodos seco (2008) e chuvoso (2010), em geral, a parametrização MRF, considerada padrão do MM5, foi a que apresentou os melhores resultados.

Além desta parametrização de referência, a parametrização BLK foi outra que também se destacou. Um fator importante, que deve ser ressaltado aqui é que tanto o esquema de parametrização MRF quanto de BLK são esquemas não-locais, isto pode ser uma das causas do modelo MM5 prever sutilmente melhor o vento na PBL considerando estes esquemas, haja vista que os esquemas não-locais simulam melhor as PBLs profundas e com grandes turbilhões (com convecção).

Também se constatou que as inicializações das 12:00UTC são melhores que aquelas das 00:00UTC. Clifford et al., (2002) afirmam que muitas das parametrizações da camada limite do MM5, incluindo a MRF, têm tendência para promover uma mistura vertical excessiva, o que significa que os erros que produzem são maiores durante a noite (altura em que existe menor mistura vertical). Possivelmente durante a noite o principal processo responsável pelos erros gerados é a nebulosidade prevista que controla a radiação de longa radiação perdida para o espaço.

5.5 Testes de Resolução de Grade

Para definir qual a grade mais adequado para simulação do vento no CLA, avaliou-se a resolução horizontal para um caso de uma única grade de resolução de 3 km (TESTE 1) e também, para três grades com 9, 3 e 1 km (denominado de TESTE 2). O dia escolhido para representar o período seco foi 21set2008 às 12:00 UTC e para o período chuvoso o dia 22mar2010 às 00:00 UTC.

As Tabelas 5.7 e 5.8 mostram os resultados das simulações para os dias representativos de set2008 e mar2010 para as componentes zonal e meridional do vento, considerando as parametrizações de MRF, BLK, ETA e BT do modelo MM5 na configuração do TESTE1.

Considerando-se o índice de concordância de Willmott quando se avalia a resolução de primeira grade, observa-se que a componente zonal foi melhor simulada quando a parametrização selecionada era de BLK, sendo que os resultados foram bom (0,57) para a condição seca e razoável (0,22) para a condição chuvosa. Entretanto, para a componente meridional a parametrização MRF foi melhor que as demais para o período seco, mas ainda sim, com um índice insatisfatório (-0,32) segundo o critério de Willmott; contradizendo este resultado, o RMSE (1,39) indica uma ótima previsão. A componente meridional no período chuvoso foi melhor simulada pelas parametrizações de MRF e BT, as quais apontaram o resultado razoável (0,47) para o critério estatístico de Willmott e ótimo (1,19) segundo o RMSE.

Tabela 5.7 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) para o dia 21set2008 às 12:00UTC, considerando-se somente um domínio.

Componente Zonal - 2008					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
WILLMOTT	**12**	0,42	**0,57**	0,56	0,55
	24	0,35	0,47	0,45	0,45
	36	0,33	0,41	0,40	0,40
	48	0,32	0,39	0,38	0,38
	60	0,30	0,38	0,37	0,37
DOM 1					
RMSE	**12**	1,27	**1,09**	1,13	1,13
	24	1,41	1,24	1,28	1,27
	36	1,42	1,24	1,27	1,27
	48	1,46	1,32	1,34	1,34
	60	1,44	1,29	1,31	1,31
DOM 1					
BIAS	12	0,78	0,78	0,65	0,69
	24	0,96	1,00	0,85	0,90
	36	1,02	1,04	0,89	0,95
	48	1,11	1,17	1,02	1,07
	60	1,02	1,08	0,93	0,99

Componente Meridional - 2008					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
WILLMOTT	12	-0,38	-0,40	-0,40	-0,40
	24	-0,38	-0,39	-0,39	-0,39
	36	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58
	48	-0,45	-0,47	-0,46	-0,46
	60	**-0,32**	-0,33	-0,33	-0,33
DOM 1					
RMSE	12	**1,39**	1,41	1,43	1,42
	24	1,42	1,44	1,44	1,44
	36	1,41	1,43	1,43	1,42
	48	1,50	1,52	1,51	1,51
	60	1,46	1,48	1,47	1,47
DOM 1					
BIAS	12	-0,27	-0,31	-0,36	-0,35
	24	0,09	0,08	0,04	0,04
	36	0,43	0,43	0,39	0,40
	48	0,80	0,81	0,77	0,79
	60	0,80	0,82	0,78	0,80

Tabela 5.8 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) para o dia 22mar2010 às 00:00UTC, considerando-se somente um domínio.

Componente Zonal - 2010					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
WILLMOTT	12	-0,34	-0,36	-0,40	-0,41
	24	-0,51	-0,58	-0,62	-0,64
	36	-0,25	-0,29	-0,34	-0,36
	48	0,12	0,12	0,08	0,08
	60	0,20	**0,22**	0,18	0,18
DOM 1					
RMSE	**12**	1,74	**1,70**	1,80	1,81
	24	1,86	1,81	1,90	1,89
	36	1,97	1,92	1,98	1,99
	48	2,08	2,02	2,07	2,07
	60	2,08	2,01	2,06	2,06
DOM 1					
BIAS	12	-2,77	-2,39	-2,66	-2,65
	24	-3,24	-2,92	-3,17	-3,14
	36	-3,64	-3,35	-3,59	-3,59
	48	-4,04	-3,73	-3,94	-3,95
	60	-3,88	-3,53	-3,75	-3,76

Componente Meridional - 2010					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	IMULAÇÃ(	MRF	BLK	ETA	BT
WILLMOTT	**12**	**0,47**	0,45	0,45	**0,47**
	24	0,44	0,40	0,38	0,39
	36	0,06	0,05	0,06	0,07
	48	-0,23	-0,23	-0,23	-0,22
	60	-0,06	-0,07	-0,07	-0,07
DOM 1					
RMSE	12	1,28	1,29	1,29	1,26
	24	**1,19**	1,21	1,21	**1,19**
	36	1,38	1,38	1,38	1,38
	48	1,51	1,50	1,50	1,50
	60	1,61	1,62	1,62	1,62
DOM 1					
BIAS	12	1,22	1,27	1,18	1,13
	24	0,57	0,55	0,49	0,48
	36	0,66	0,63	0,59	0,57
	48	0,74	0,73	0,70	0,68
	60	0,55	0,54	0,53	0,50

Os mesmos dias também são avaliados considerando-se três grades ou domínios (TESTE 2). A Tabela 5.9 aponta que as componentes zonal e meridional na condição seca foram melhores simuladas a partir das parametrizações de BLK (0,61) na primeira grade e BT (0,56 e 0,49) nas segunda e terceira grades, respectivamente.

No caso das simulações para o período chuvoso (Tabela 5.10), a parametrização MRF teve melhor desempenho segundo o RMSE em relação às demais, tanto para a componente zonal quanto meridional. Para o caso de se considerar três grades, a componente zonal obteve os melhores resultados (Willmott e RMSE) em relação à componente meridional, o que é bom para o CLA, tendo em vista que o escoamento é mais zonal (devido aos alísios) do que meridional (contribuição da brisa marítima).

Tabela 5.9 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) para o dia 21set2008 às 12:00UTC, considerando-se três domínios.

Componente Zonal - 2008					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
	12	0,58	**0,61**	0,61	0,59
	24	0,49	0,52	0,52	0,50
WILLMOTT	36	0,32	0,34	0,34	0,32
	48	0,31	0,33	0,33	0,31
	60	0,29	0,30	0,30	0,28
DOM 2					
	12	0,37	0,48	0,41	0,44
	24	0,41	0,43	0,44	**0,56**
WILLMOTT	36	0,33	0,33	0,36	0,37
	48	0,33	0,29	0,33	0,32
	60	0,30	0,26	0,30	0,29
DOM 3					
	12	0,35	0,41	0,31	**0,49**
	24	0,42	0,44	0,43	**0,49**
WILLMOTT	36	0,32	0,32	0,35	0,36
	48	0,30	0,25	0,28	0,29
	60	0,25	0,21	0,27	0,24
DOM 1					
	12	1,14	**1,11**	1,11	1,14
	24	1,27	1,24	1,24	1,27
RMSE	36	1,35	1,32	1,32	1,35
	48	1,35	1,31	1,32	1,34
	60	1,36	1,33	1,34	1,36
DOM2					
	12	1,31	1,23	1,25	**1,19**
	24	1,33	1,30	1,26	1,21
RMSE	36	1,40	1,35	1,36	1,34
	48	1,41	1,41	1,41	1,43
	60	1,42	1,44	1,44	1,46
DOM 3					
	12	1,31	1,36	1,39	**1,25**
	24	1,30	1,34	1,34	1,27
RMSE	36	1,43	1,39	1,34	1,35
	48	1,51	1,54	1,53	1,54
	60	1,56	1,58	1,51	1,58
DOM 1					
	12	0,05	0,02	-0,01	-0,04
	24	0,33	0,30	0,27	0,23
BIAS	36	0,46	0,45	0,41	0,38
	48	0,48	0,46	0,42	0,39
	60	0,24	0,23	0,18	0,15
DOM2					
	12	0,73	0,94	0,91	0,60
	24	0,77	1,03	0,83	0,79
BIAS	36	1,02	1,14	0,98	0,85
	48	1,17	1,34	1,17	1,12
	60	1,22	1,41	1,27	1,24
DOM 3					
	12	0,94	1,20	1,14	0,94
	24	0,86	1,00	0,95	0,81
BIAS	36	1,19	1,14	1,01	0,93
	48	1,44	1,54	1,48	1,37
	60	1,61	1,68	1,42	1,51

Componente Meridional - 2008					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
	12	-0,42	**-0,41**	-0,41	-0,41
	24	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60
WILLMOTT	36	-0,63	-0,63	-0,63	-0,63
	48	-0,49	-0,49	-0,49	-0,49
	60	-0,43	-0,43	-0,43	-0,43
DOM 2					
	12	-0,30	-0,29	-0,36	-0,49
	24	-0,30	-0,28	-0,38	**-0,19**
WILLMOTT	36	-0,55	-0,51	-0,56	-0,55
	48	-0,42	-0,43	-0,44	-0,44
	60	-0,29	-0,30	-0,31	-0,30
DOM 1					
	12	-0,31	-0,37	-0,44	-0,44
	24	**-0,20**	-0,31	-0,38	-0,35
WILLMOTT	36	-0,48	-0,56	-0,56	-0,54
	48	-0,44	-0,49	-0,46	-0,50
	60	-0,30	-0,36	-0,38	-0,37
DOM 1					
	12	1,41	1,41	**1,40**	**1,40**
	24	1,70	1,70	1,69	1,69
RMSE	36	1,67	1,67	1,67	1,67
	48	1,82	1,82	1,82	1,82
	60	1,83	1,83	1,83	1,83
DOM2					
	12	**1,29**	1,30	1,39	1,41
	24	1,33	1,33	1,39	**1,29**
RMSE	36	1,35	1,34	1,37	1,36
	48	1,49	1,48	1,47	1,48
	60	1,46	1,47	1,45	1,45
DOM 3					
	12	1,32	1,41	1,53	1,52
	24	**1,24**	1,38	1,43	1,41
RMSE	36	1,35	1,46	1,46	1,45
	48	1,45	1,55	1,53	1,57
	60	1,41	1,51	1,50	1,53
DOM 1					
	12	0,79	0,77	0,77	0,76
	24	1,69	1,67	1,67	1,67
BIAS	36	1,86	1,84	1,84	1,84
	48	2,41	2,39	2,40	2,40
	60	2,58	2,57	2,57	2,58
DOM2					
	12	-0,38	-0,44	-0,57	-0,42
	24	0,07	0,06	-0,08	-0,29
BIAS	36	0,46	0,41	0,20	0,24
	48	0,93	0,90	0,66	0,73
	60	0,94	0,89	0,65	0,69
DOM 3					
	12	-0,57	-0,64	-0,94	-0,98
	24	-0,19	-0,16	-0,37	-0,35
BIAS	36	0,32	0,33	0,06	0,12
	48	0,67	0,78	0,60	0,66
	60	0,64	0,73	0,45	0,57

Tabela 5.10 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) para o dia 22mar2010 às 00:00UTC, considerando-se três domínios.

Componente Zonal - 2010					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
	12	-0,51	-0,51	-0,49	-0,51
	24	-0,75	-0,76	-0,74	-0,76
WILLMOTT	36	-0,48	-0,49	-0,49	-0,50
	48	0,02	0,01	0,00	-0,01
	60	**0,15**	0,14	0,12	0,12
DOM 2					
	12	-0,41	-0,35	-0,62	-0,66
	24	-0,61	-0,70	-0,83	-0,81
WILLMOTT	36	-0,28	-0,40	-0,54	-0,53
	48	0,12	0,10	-0,12	-0,08
	60	0,29	**0,30**	0,12	0,16
DOM 1					
	12	-0,28	-0,36	-0,53	-0,52
	24	-0,55	-0,73	-0,84	-0,79
WILLMOTT	36	-0,18	-0,38	-0,48	-0,45
	48	0,22	0,10	0,05	0,08
	60	**0,35**	0,29	0,26	0,29
DOM 1					
	12	1,96	1,96	1,97	1,98
	24	1,98	2,01	2,07	2,07
RMSE	36	2,06	2,08	2,12	2,12
	48	2,10	2,11	2,14	2,15
	60	2,12	2,13	2,16	2,17
DOM2					
	12	1,76	1,71	2,16	2,14
	24	1,76	1,71	2,11	2,05
RMSE	36	1,88	1,97	2,19	2,15
	48	1,96	2,00	2,26	2,20
	60	1,90	1,95	2,19	2,14
DOM 3					
	12	1,52	1,73	1,94	1,93
	24	1,56	1,77	2,07	1,90
RMSE	36	1,73	1,92	2,08	2,01
	48	1,82	1,98	2,05	2,04
	60	1,79	1,95	2,01	2,00
DOM 1					
	12	-2,84	-2,74	-2,94	-2,85
	24	-3,12	-3,20	-3,58	-3,50
BIAS	36	-3,63	-3,71	-3,98	-3,92
	48	-3,85	-3,88	-4,11	-4,09
	60	-3,98	-4,03	-4,25	-4,24
DOM2					
	12	-2,35	-1,00	-0,60	-1,14
	24	-2,60	-1,67	-1,78	-1,90
BIAS	36	-3,03	-2,70	-2,68	-2,87
	48	-3,34	-2,97	-3,18	-3,19
	60	-3,11	-2,76	-3,01	-2,99
DOM 3					
	12	-1,32	-1,34	-0,87	-1,56
	24	-1,72	-1,69	-0,92	-0,77
BIAS	36	-2,31	-2,50	-1,77	-1,76
	48	-2,68	-2,77	-1,89	-2,14
	60	-2,48	-2,55	-1,78	-2,03

Componente Meridional - 2010					
DOM 1					
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF	BLK	ETA	BT
	12	**0,08**	0,07	**0,08**	0,07
	24	-0,02	-0,03	-0,03	-0,03
WILLMOTT	36	-0,26	-0,26	-0,26	-0,26
	48	-0,42	-0,42	-0,41	-0,42
	60	-0,17	-0,17	-0,17	-0,18
DOM 2					
	12	**0,20**	0,05	-0,37	-0,26
	24	0,11	0,11	-0,22	-0,13
WILLMOTT	36	-0,10	-0,07	-0,32	-0,25
	48	-0,30	-0,30	-0,44	-0,39
	60	-0,04	-0,08	-0,22	-0,15
DOM 1					
	12	**0,20**	-0,02	-0,34	-0,06
	24	0,11	-0,34	-0,44	-0,08
WILLMOTT	36	-0,05	-0,40	-0,54	-0,29
	48	-0,22	-0,48	-0,59	-0,41
	60	0,01	-0,23	-0,35	-0,18
DOM 1					
	12	1,61	1,62	1,62	1,62
	24	**1,57**	1,58	1,58	1,58
RMSE	36	1,60	1,61	1,61	1,61
	48	1,66	1,67	1,67	1,67
	60	1,69	1,70	1,70	1,70
DOM2					
	12	1,55	1,81	2,40	2,40
	24	**1,47**	1,61	2,10	2,10
RMSE	36	1,49	1,59	1,96	1,96
	48	1,51	1,66	1,90	1,90
	60	1,57	1,68	1,90	1,90
DOM 3					
	12	1,56	1,85	2,24	1,90
	24	1,48	2,14	2,29	1,78
RMSE	**36**	**1,46**	2,00	2,17	1,74
	48	1,47	1,94	2,10	1,72
	60	1,53	1,92	2,06	1,76
DOM 1					
	12	2,25	2,27	2,25	2,27
	24	2,18	2,20	2,19	2,20
BIAS	36	2,00	2,01	2,01	2,02
	48	1,97	1,99	1,98	1,99
	60	1,64	1,65	1,64	1,65
DOM2					
	12	1,80	1,95	3,56	3,25
	24	1,54	1,17	2,04	2,01
BIAS	36	1,38	0,96	1,41	1,41
	48	1,35	1,09	1,22	1,31
	60	0,98	0,81	0,89	0,93
DOM 3					
	12	1,74	2,38	3,02	2,04
	24	1,48	2,46	2,52	1,27
BIAS	36	1,16	1,67	1,84	0,92
	48	1,04	1,54	1,78	0,98
	60	0,71	1,12	1,30	0,61

5.6 Testes de Sensibilidade de Dados FNL

Testes foram realizados para avaliar se os dados de FNL podem gerar previsões melhores do que aqueles dados oriundos do GFS. Utilizaram-se os mesmos dias do ítem 5.5 para as condições seca e chuvosa. As Tabelas 5.11 e 5.12 mostram os resultados das simulações das componentes zonal e meridional a partir de dados de reanálises.

No caso da simulação feita a partir de dados FNL para a condição seca, somente comparou-se a componente meridional em relação aos resultados obtidos para simulação a partir de uma grade e três grades, haja vista que o melhor resultado da componente zonal a partir de uma grade e três grades não foi da parametrização do MRF mas sim das parametrizações BLK e BT. A componente meridional foi melhor simulada quando os dados de entrada eram GFS, para o caso de 1 ou 3 grades. Por outro lado, no caso chuvoso, os melhores resultados foram obtidos quando a simulação iniciou-se com dados FNL para as duas componentes, para as duas condições de grade (única e com 3 grades).

Tabela 5.11 – Índices estatísticos obtidos para as componente zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) para o dia 21set2008 às 12:00UTC, considerando-se dois domínios e dados FNL.

Componente Zonal - 2008		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF
	12	**0,47**
	24	**0,47**
WILLMOTT	36	0,32
	48	0,30
	60	0,26
DOM 2		
	12	0,44
	24	**0,51**
WILLMOTT	36	0,34
	48	0,33
	60	0,29
DOM 1		
	12	**1,26**
	24	1,34
RMSE	36	1,44
	48	1,52
	60	1,50
DOM2		
	12	**1,26**
	24	1,27
RMSE	36	1,36
	48	1,42
	60	1,40
DOM 1		
	12	0,13
	24	0,86
BIAS	36	1,31
	48	1,57
	60	1,56
DOM2		
	12	-0,94
	24	-0,22
BIAS	36	0,37
	48	0,13
	60	-0,04

Componente Meridional - 2008		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF
	12	-0,46
	24	-0,53
WILLMOTT	36	-0,66
	48	-0,52
	60	**-0,45**
DOM 2		
	12	-0,50
	24	-0,60
WILLMOTT	36	-0,70
	48	-0,55
	60	**-0,47**
DOM 1		
	12	**1,54**
	24	1,61
RMSE	36	1,67
	48	1,82
	60	1,82
DOM2		
	12	**1,69**
	24	1,77
RMSE	36	1,81
	48	1,96
	60	1,94
DOM 1		
	12	0,40
	24	1,17
BIAS	36	1,51
	48	1,97
	60	1,78
DOM2		
	12	-3,34
	24	-2,24
BIAS	36	-1,39
	48	-1,49
	60	-1,80

Tabela 5.12 – Índices estatísticos obtidos para as componente zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) para o dia 22mar2010 às 00:00UTC, considerando-se dois domínios e dados FNL.

Componente Zonal - 2010		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF
WILLMOTT	12	0,12
	24	-0,35
	36	0,12
	48	0,51
	60	**0,55**
DOM 2		
WILLMOTT	12	-0,11
	24	-0,40
	36	-0,04
	48	0,39
	60	**0,46**
DOM 1		
RMSE	**12**	**0,57**
	24	0,87
	36	1,16
	48	1,16
	60	1,19
DOM2		
RMSE	**12**	**1,35**
	24	1,37
	36	1,61
	48	1,61
	60	1,65
DOM 1		
BIAS	12	0,85
	24	1,03
	36	0,52
	48	0,11
	60	0,27
DOM2		
BIAS	12	1,02
	24	1,26
	36	0,47
	48	0,14
	60	0,22

Componente Meridional - 2010		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF
WILLMOTT	**12**	**0,47**
	24	0,25
	36	-0,26
	48	-0,35
	60	-0,08
DOM 2		
WILLMOTT	**12**	**0,47**
	24	0,23
	36	-0,27
	48	-0,29
	60	0,00
DOM 1		
RMSE	**12**	**0,83**
	24	0,93
	36	1,31
	48	1,26
	60	1,48
DOM2		
RMSE	**12**	**1,30**
	24	1,40
	36	1,60
	48	1,55
	60	1,64
DOM 1		
BIAS	12	0,30
	24	0,57
	36	0,16
	48	-0,19
	60	-1,17
DOM2		
BIAS	12	-0,03
	24	0,20
	36	-0,17
	48	-0,18
	60	-1,03

5.7 Ajustes dos Parâmetros de Micrometeorologia

Diante do resultado da CONF I obtidos por meio das métricas estatísticas encontrou-se que, além da parametrização de referência (MRF) do modelo MM5, a parametrização BLK foi aquela que apresentou melhores resultados dentre as demais e, portanto, foram as escolhidas para ajustes.

Foram introduzidas no código fonte do modelo MM5 as características de PBL do CLA, que se julga ser relevantes para melhorar a previsão do vento naquela região. Assumindo as parametrizações MRF e BLK como as mais apropriadas na previsão do vento do CLA.

Na parametrização de PBL existem alguns valores de entrada e também algumas contantes pré-determinadas que, dependendo da região de estudo, podem interferir significativamente nos resultados. Isto pode estar ocorrendo nas simulações do modelo MM5 para o CLA, haja vista que algumas variáveis já são pré-definidas com valores não característicos daquela região, como no caso da velocidade de fricção (u_*) e do comprimento de rugosidade (Z_0), que se sabe que possuem uma sazonalidade própria (Roballo, 2008).

5.7.1 Ajuste de u_* na Parametrização MRF de PBL.

Para o caso de u_* é plausível considerar que o valor calculado pelo modelo MM5 seja representativo da região, pois esta informação é calculada a cada novo passo de tempo. Porém, os dados de entrada podem não estar sendo tão precisos para fornecer informações reais da região do CLA, uma vez que estes são calculados e extrapolados em pontos de grades.

ROBALLO (2008) estudou o escoamento atmosférico no CLA analisando dados de vento coletados, nos períodos 1995 - 1999 (anos base) em seis níveis de uma torre anemométrica (TA). Os resultados mostraram que a velocidade de atrito típica u_* foi igual a 0,32 m/s (período chuvoso) e 0,46 m/s (seco). Estes valores de velocidade de atrito observados (medidos) foram inseridos nas configurações do modelo MM5 para esta rodada de ajuste.

5.7.1.2 Desempenho da CONF II

Para esta nova configuração (CONF II) considerou-se u_* medido no CLA para os mesmos períodos estudados na CONF I, inclusive mantendo-se os mesmos processos físicos.

Tabela 5.13 – Definição da CONF II.

Configuração II – 2 grades com 26 níveis verticais		
Número de pontos	130 X 130 (DOM 1)	121 X 121 (DOM2)
Tamanho da grade (km)	18	6
Passo no tempo (s)	45	45
Aninhamento	Two-way	
Parametrização de cumulus	Grell	Grell
Camada Limite	**MRF**	**MRF**
Convecção Explícita	Simple Ice	Simple Ice
Radiação	Cloud radiation scheme	Cloud radiation scheme
Temperatura no solo	Multi Layer	Multi Layer

As Tabelas 5.14 a 5.17 resumem os resultados obtidos através dos índices estatísticos para CONF II. Considerando-se a inicialização das 00:00UTC, para o período seco (2008) os índices de concordância de Willmott não foram melhores que do que aqueles obtidos na CONF I. Para a componente zonal este índice foi de -0,07 e -0,10 nos DOM1 e DOM2, enquanto que na CONF I os valores observados foram de -0,06 e -0,10 para os DOM1 e DOM2, respectivamente. O RMSE foi idêntico em ambas às CONFs I e II e também, os valores de BIAS que indicaram que os valores simulados foram subestimados pelo modelo MM5. A componente meridional inicializada às 00:00 UTC, simulada através da CONF II , também não superou a CONF I, apresentando valores de -0,24 (DOM1) e -0,26 (DOM2), enquanto que os melhores resultados desta componente obtidos pela parametrização BLK na CONF I foram de -0,17 (DOM1) e -0,23 (DOM2). Os valores de RMSEs foram de 2,13 (DOM1) e 2,21 (DOM2), sendo que os valores de BIAS mostram uma superestimativa de aproximadamente 21% da componente meridional.

As componentes zonal e meridional foram melhores simuladas pela CONF II do modelo MM5 quando inicializadas às 12:00 UTC em relação àquelas simuladas na CONF I. Estes resultados são mostrados na Tabela 5.15.

A Tabela 5.16 apresenta o resultado da CONF II do modelo MM5 para o período chuvoso de 2010 inicializadas às 00:00UTC. Nota-se que as componentes zonal (0,04) e principalmente meridional (0,08) obtiveram um resultado melhor do que quando simuladas pela CONF I (-0,13 e -0,08, ver Tabela 5.5). Apesar disso, o RMSE da CONF II não apresentou melhores resultados que aqueles encontrados na CONF I. A partir da inicialização das 12:00 UTC as componentes zonal e meridional foram um pouco mais bem simuladas (76,5%) na CONF II (Tabela 5.17).

Tabela 5.14 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 00:00UTC para o período do dia 17 às 00:00UTC ao dia 21set2008 às 00:00UTC, considerando-se os dois domínios.

Componente Zonal - 2008		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF
	12	-0,14
	24	-0,14
WILLMOTT	36	-0,12
	48	**-0,07**
	60	**-0,07**
DOM 2		
	12	-0,20
	24	-0,19
WILLMOTT	36	-0,16
	48	**-0,10**
	60	**-0,10**
DOM 1		
	12	**1,72**
	24	1,76
RMSE	36	1,79
	48	1,86
	60	1,89
DOM 2		
	12	**1,75**
	24	1,79
RMSE	36	1,83
	48	1,89
	60	1,93
DOM 1		
	12	0,18
	24	-0,27
BIAS	36	-0,35
	48	-0,45
	60	-0,46
DOM 2		
	12	-0,65
	24	-0,98
BIAS	36	-1,04
	48	-1,07
	60	-1,09

Componente Meridional - 2008		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF
	12	-0,30
	24	-0,36
WILLMOTT	36	-0,29
	48	-0,29
	60	**-0,24**
DOM 2		
	12	-0,30
	24	-0,35
WILLMOTT	36	-0,30
	48	-0,30
	60	**-0,26**
DOM 1		
	12	2,22
	24	2,20
RMSE	36	2,21
	48	2,17
	60	**2,13**
DOM 2		
	12	2,28
	24	2,25
RMSE	36	2,26
	48	2,24
	60	**2,21**
DOM 1		
	12	1,04
	24	1,06
BIAS	36	1,13
	48	1,14
	60	1,25
DOM 2		
	12	1,60
	24	1,50
BIAS	36	1,57
	48	1,59
	60	1,73

Tabela 5.15 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 12:00UTC para o período do dia 16 às 12:00UTC ao dia 21set2008 às 12:00UTC, considerando-se os dois domínios.

Componente Zonal - 2008		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF
	12	**0,15**
	24	0,12
WILLMOTT	36	0,10
	48	**0,15**
	60	0,11
DOM 2		
	12	0,12
	24	0,11
WILLMOTT	36	0,12
	48	**0,16**
	60	0,12
DOM 1		
	12	**1,65**
	24	1,74
RMSE	36	1,81
	48	1,84
	60	1,89
DOM 2		
	12	**1,63**
	24	1,71
RMSE	36	1,78
	48	1,82
	60	1,86
DOM 1		
	12	0,79
	24	0,70
BIAS	36	0,62
	48	0,67
	60	0,68
DOM 2		
	12	0,24
	24	-0,01
BIAS	36	-0,04
	48	-0,04
	60	0,02

Componente Meridional - 2008		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF
	12	-0,23
	24	**-0,17**
WILLMOTT	36	-0,21
	48	**-0,17**
	60	-0,20
DOM 2		
	12	-0,23
	24	-0,19
WILLMOTT	36	-0,23
	48	**-0,18**
	60	-0,23
DOM 1		
	12	2,03
	24	2,06
RMSE	36	2,05
	48	2,03
	60	**2,00**
DOM 2		
	12	**2,05**
	24	2,08
RMSE	36	2,06
	48	2,07
	60	2,05
DOM 1		
	12	1,27
	24	1,29
BIAS	36	1,40
	48	1,52
	60	1,52
DOM 2		
	12	1,56
	24	1,58
BIAS	36	1,64
	48	1,81
	60	1,87

Tabela 5.16 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 00:00UTC para o período do dia 20 às 00:00UTC ao dia 25mar2010 às 00:00UTC, considerando-se os dois domínios.

Componente Zonal - 2010		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF
	12	-0,11
	24	-0,13
WILLMOTT	36	-0,06
	48	-0,05
	60	**-0,04**
DOM 2		
	12	-0,16
	24	-0,16
WILLMOTT	36	-0,11
	48	-0,07
	60	**-0,06**
DOM 1		
	12	**1,54**
	24	1,64
RMSE	36	1,68
	48	1,70
	60	1,71
DOM 2		
	12	**1,61**
	24	1,72
RMSE	36	1,75
	48	1,77
	60	1,78
DOM 1		
	12	-1,08
	24	-1,51
BIAS	36	-1,55
	48	-1,61
	60	-1,53
DOM 2		
	12	-1,47
	24	-1,94
BIAS	36	-1,96
	48	-2,02
	60	-1,90

Componente Meridional - 2010		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF
	12	0,02
	24	**0,08**
WILLMOTT	36	-0,05
	48	-0,08
	60	-0,09
DOM 2		
	12	0,01
	24	**0,05**
WILLMOTT	36	-0,08
	48	-0,09
	60	-0,10
DOM 1		
	12	**1,43**
	24	1,43
RMSE	36	1,50
	48	1,53
	60	1,56
DOM 2		
	12	1,51
	24	**1,48**
RMSE	36	1,55
	48	1,56
	60	1,58
DOM 1		
	12	1,25
	24	1,14
BIAS	36	1,11
	48	0,90
	60	0,73
DOM 2		
	12	1,59
	24	1,43
BIAS	36	1,45
	48	1,22
	60	1,05

Tabela 5.17 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 12:00UTC para o período do dia 20 às 12:00UTC ao dia 25mar2010 às 12:00UTC, considerando-se os dois domínios.

Componente Zonal - 2010		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF
	12	-0,22
	24	-0,12
WILLMOTT	36	0,11
	48	0,14
	60	**0,18**
DOM 2		
	12	-0,22
	24	-0,14
WILLMOTT	36	0,08
	48	0,10
	60	**0,14**
DOM 1		
	12	**1,68**
	24	1,70
RMSE	36	1,73
	48	1,74
	60	1,75
DOM 2		
	12	**1,74**
	24	1,76
RMSE	36	1,80
	48	1,81
	60	1,81
DOM 1		
	12	-1,89
	24	-1,85
BIAS	36	-1,96
	48	-1,91
	60	-1,92
DOM 2		
	12	-2,17
	24	-2,19
BIAS	36	-2,31
	48	-2,27
	60	-2,25

Componente Meridional - 2010		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	MRF
	12	0,01
	24	0,10
WILLMOTT	36	0,23
	48	0,28
	60	**0,30**
DOM 2		
	12	-0,03
	24	0,08
WILLMOTT	36	0,24
	48	0,28
	60	**0,30**
DOM 1		
	12	**1,52**
	24	1,61
RMSE	36	1,65
	48	1,69
	60	1,76
DOM 2		
	12	**1,55**
	24	1,62
RMSE	36	1,63
	48	1,67
	60	1,73
DOM 1		
	12	-0,04
	24	-0,23
BIAS	36	-0,48
	48	-0,66
	60	-0,90
DOM 2		
	12	0,25
	24	0,14
BIAS	36	-0,08
	48	-0,25
	60	-0,51

5.7.1.2.1 Discussão dos Resultados da CONF II considerando-se Inicializações das 00:00 e 12:00UTC.

Comparando-se as inicializações das 00:00 e 12:00UTC, constatou-se que às inicializações das 12:00UTC favoreceram as previsões das componentes zonal e meridional durante o período seco quando se analisa o índice de Willmott e também, o RMSE. Sob esta condição, o modelo subestimou as componentes u e v do vento em torno de 16 e 20%, respectivamente. Durante o período chuvoso há divergência entre os resultados obtidos a partir de Willmott, o qual aponta as melhores previsões a partir das simulações inicializadas às 12:00UTC, enquanto que o RMSE indica as simulações inicializadas às 00:00UTC com mais apropriadas para a previsão das componentes u e v do vento.

5.7.2 Ajuste de u_* e Z_0 na Parametrização BLK de PBL.

Como o esquema de parametrização BLK foi expressivo nos resultados observados na CONF I, investigaram-se novas melhorias para a previsão do vento para o CLA. Diferentemente da CONF II, esta nova configuração (CONF III) acrescentou modificações não somente em u_* mas também no comprimento de rugosidade (Z_0) e na estrutura vertical, conforme a Tabela 5.18 abaixo.

Tabela 5.18 – Definição da CONF III.

Configuração III– 2 grades com 31 níveis verticais		
Número de pontos	130 X 130 (DOM1)	121 X 121 (DOM2)
Tamanho da grade (km)	18	6
Passo no tempo (s)	45	45
Aninhamento	Two-way	
Parametrização de cumulus	Grell	Grell
Camada Limite	**BLK**	**BLK**
Convecção Explícita	Simple Ice	Simple Ice
Radiação	Cloud radiation scheme	Cloud radiation scheme
Temperatura no solo	Multi Layer	Multi Layer

O perfil logarítmico do vento no CLA apresenta parâmetros sazonais, que dependem das condições de tempo (seco ou chuvoso) e que estão associadas a uma intensificação da velocidade do vento. Os valores obtidos do comprimento de rugosidade foram de 0,19 m (0,06 m) no período chuvoso (seco), extraídos de Roballo (2008).

Tabela 5.19 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 00:00UTC para o período do dia 17 às 00:00UTC ao dia 21set2008 às 00:00UTC, considerando-se os dois domínios.

Componente Zonal - 2008		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	BLK
	12	-0,11
	24	-0,12
WILLMOTT	36	-0,09
	48	**-0,06**
	60	**-0,06**
DOM 2		
	12	-0,17
	24	-0,19
WILLMOTT	36	-0,16
	48	-0,12
	60	**-0,11**
DOM 1		
	12	**1,76**
	24	1,83
RMSE	36	1,89
	48	1,93
	60	1,95
DOM 2		
	12	**1,80**
	24	1,87
RMSE	36	1,91
	48	1,97
	60	1,99
DOM 1		
	12	0,45
	24	0,07
BIAS	36	-0,06
	48	-0,08
	60	-0,20
DOM 2		
	12	-0,71
	24	-0,96
BIAS	36	-1,16
	48	-1,12
	60	-1,17

Componente Meridional - 2008		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	BLK
	12	-0,23
	24	-0,30
WILLMOTT	36	-0,22
	48	-0,21
	60	**-0,17**
DOM 2		
	12	-0,27
	24	-0,33
WILLMOTT	36	-0,27
	48	-0,26
	60	**-0,23**
DOM 1		
	12	2,11
	24	2,07
RMSE	36	2,11
	48	2,07
	60	**2,05**
DOM 2		
	12	2,20
	24	2,17
RMSE	36	2,20
	48	2,18
	60	**2,16**
DOM 1		
	12	1,12
	24	1,14
BIAS	36	1,15
	48	1,24
	60	1,34
DOM 2		
	12	1,59
	24	1,56
BIAS	36	1,66
	48	1,73
	60	1,86

Tabela 5.20 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 12:00UTC para o período do dia 16 às 12:00UTC ao dia 21set2008 às 12:00UTC, considerando-se os dois domínios.

Componente Zonal - 2008		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	BLK
	12	**0,19**
	24	0,16
WILLMOTT	36	0,08
	48	0,14
	60	0,10
DOM 2		
	12	0,10
	24	0,08
WILLMOTT	36	0,04
	48	**0,13**
	60	0,11
DOM 1		
	12	**1,66**
	24	1,75
RMSE	36	1,86
	48	1,90
	60	1,95
DOM 2		
	12	**1,64**
	24	1,75
RMSE	36	1,82
	48	1,84
	60	1,88
DOM 1		
	12	1,13
	24	0,95
BIAS	36	0,87
	48	0,89
	60	1,01
DOM 2		
	12	0,31
	24	-0,08
BIAS	36	-0,14
	48	-0,19
	60	-0,01

Componente Meridional - 2008		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	BLK
	12	-0,19
	24	**-0,14**
WILLMOTT	36	-0,17
	48	**-0,14**
	60	-0,16
DOM 2		
	12	-0,26
	24	-0,23
WILLMOTT	36	-0,24
	48	**-0,21**
	60	-0,23
DOM 1		
	12	2,05
	24	2,05
RMSE	36	2,04
	48	2,05
	60	**2,04**
DOM 2		
	12	2,15
	24	2,16
RMSE	36	2,15
	48	2,16
	60	**2,14**
DOM 1		
	12	1,64
	24	1,42
BIAS	36	1,50
	48	1,63
	60	1,69
DOM 2		
	12	1,93
	24	1,91
BIAS	36	1,98
	48	2,15
	60	2,20

Tabela 5.21 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 00:00UTC para o período do dia 20 às 00:00UTC ao dia 25mar2010 às 00:00UTC, considerando-se os dois domínios.

Componente Zonal - 2010		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	BLK
	12	-0,04
	24	-0,11
WILLMOTT	36	-0,01
	48	-0,02
	60	**0,01**
DOM 2		
	12	-0,13
	24	-0,17
WILLMOTT	36	-0,08
	48	-0,06
	60	**-0,03**
DOM 1		
	12	**1,49**
	24	1,65
RMSE	36	1,67
	48	1,72
	60	1,72
DOM 2		
	12	**1,61**
	24	1,72
RMSE	36	1,75
	48	1,79
	60	1,80
DOM 1		
	12	0,53
	24	-0,23
BIAS	36	-0,44
	48	-0,67
	60	-0,71
DOM 2		
	12	0,12
	24	-0,56
BIAS	36	-0,62
	48	-0,86
	60	-0,94

Componente Meridional - 2010		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	BLK
	12	-0,05
	24	**0,00**
WILLMOTT	36	-0,12
	48	-0,13
	60	-0,15
DOM 2		
	12	**-0,01**
	24	-0,02
WILLMOTT	36	-0,12
	48	-0,13
	60	-0,16
DOM 1		
	12	**1,52**
	24	1,55
RMSE	36	1,60
	48	1,60
	60	1,63
DOM 2		
	12	**1,51**
	24	1,59
RMSE	36	1,64
	48	1,65
	60	1,67
DOM 1		
	12	1,15
	24	1,20
BIAS	36	1,17
	48	1,09
	60	0,90
DOM 2		
	12	1,11
	24	1,18
BIAS	36	1,19
	48	1,03
	60	0,88

Tabela 5.22 – Índices estatísticos obtidos para as componentes zonal e meridional para a camada da atmosfera (1000 a 700hPa) a partir de simulações iniciadas às 12:00UTC para o período do dia 20 às 12:00UTC ao dia 25mar2010 às 12:00UTC, considerando-se os dois domínios.

Componente Zonal - 2010		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	BLK
WILLMOTT	12	-0,12
	24	-0,12
	36	0,13
	48	0,17
	60	**0,18**
DOM 2		
WILLMOTT	12	-0,19
	24	-0,11
	36	0,08
	48	**0,12**
	60	0,11
DOM 1		
RMSE	**12**	**1,65**
	24	1,72
	36	1,71
	48	1,71
	60	1,73
DOM 2		
RMSE	**12**	**1,74**
	24	1,76
	36	1,78
	48	1,77
	60	1,81
DOM 1		
BIAS	12	-0,50
	24	-0,71
	36	-0,88
	48	-0,91
	60	-1,14
DOM 2		
BIAS	12	-1,15
	24	-1,24
	36	-1,37
	48	-1,25
	60	-1,55

Componente Meridional - 2010		
DOM 1		
ÍNDICES ESTATÍSTICOS	SIMULAÇÃO	BLK
WILLMOTT	12	-0,03
	24	0,08
	36	0,20
	48	0,24
	60	**0,27**
DOM 2		
WILLMOTT	12	-0,11
	24	0,03
	36	0,17
	48	0,24
	60	**0,27**
DOM 1		
RMSE	**12**	**1,74**
	24	1,80
	36	1,84
	48	1,87
	60	1,92
DOM 2		
RMSE	12	**1,72**
	24	1,75
	36	1,78
	48	1,78
	60	1,84
DOM 1		
BIAS	12	-0,09
	24	-0,13
	36	-0,23
	48	-0,27
	60	-0,52
DOM 2		
BIAS	12	-0,05
	24	-0,02
	36	-0,14
	48	-0,25
	60	-0,51

Para inicialização às 00:00UTC, segundo o índice de concordância de Willmott encontrado, considerando-se o DOM 1 no período seco (2008) a CONF I e III tiveram o mesmo resultado, ou seja, CONF I e III apresentam melhores resultados do que CONF II. Então, conclui-se que quando a parametrização BLK ajustada (CONF III) é ativada no modelo MM5, ela gera resultados semelhantes à parametrização MRF (referência do modelo MM5) para a componente zonal do vento. No caso do DOM2 o ajuste na parametrização BLK piorou a simulação quando comparada às CONFs I e II.

No período chuvoso para o horário das 00:00 UTC, em ambos os domínios, a CONF III apresentou melhor concordância que os resultados obtidos nas CONFs I e II. O RMSE também foi menor (representando um melhor ajuste), porém somente no DOM1.

A CONF III apontou melhores resultados no período seco quando comparada a CONF I, em ambos os domínios, para simulação da componente zonal inicializada às 12:00UTC.

No período de chuva, a simulação da componente zonal inicializada às 12:00 UTC, apresentou muitas variações entre o índice de Willmott e o RMSE. A CONF III apresentou o mesmo resultado da CONF II, e ambas, melhores que a CONF I, segundo o índice de Willmott. Quando se avaliou o RMSE, este foi menor na CONF III, porém, maior do que a CONF I.

A componente meridional no período seco (2008) foi mais bem simulada a partir da CONF III em relação às CONFs I e II de acordo com o índice de Willmott tanto nas simulações inicializadas às 00:00 quanto às 12:00 UTC. A CONF III apresentou RMSE somente menor (melhor) ou igual naquelas simulações inicializadas às 00:00 UTC em relação às CONFs II e I, respectivamente. Nas simulações inicializadas às 12:00UTC, em ambos os domínios, o RMSE foi maior (pior) na CONF III quando comparada à CONF I e CONF II.

No período chuvoso (2010) a componente meridional não apresentou melhor resultado que as CONFs I e II, conforme o índice de Willmott, exceto para as simulações inicializadas às 00:00 UTC, embora este resultado não está de acordo com o RMSE.

5.7.2.1 Discussão dos Resultados da CONF III considerando-se Inicializações das 00:00 e 12:00UTC.

Assim como foi encontrado para CONF II, CONF III apresentou melhores resultados nas previsões das componentes zonal e meridional para o período seco a partir das inicializações das 12:00UTC de acordo com Willmott e RMSE. No período chuvoso, também semelhante à CONF II, observou-se que as melhores previsões das componentes zonal e meridional diferem de acordo com o índice de Willmott (o qual identificou àquelas inicializadas às 12:00UTC) e com o RMSE (o qual sugere àquelas inicializadas às 00:00UTC).

6 CONCLUSÃO

Os resultados observacionais obtidos neste estudo estiveram de acordo com os estudos observacionais anteriores da região do CLA. No período seco a atmosfera ficou pouco instável, entretanto com condições favoráveis à formação de nuvens com baixa eficiência de precipitação, características típicas da região. As variações de intensidade do vento não estiveram, necessariamente, associadas às mudanças na direção do vento. Com relação à Camada Limite Convectiva, ela se apresentou mais desenvolvida às 12:00UTC com uma altura média de 690m, a qual foi mais baixa que aquela encontrada por Reuter (2002) de 716m, evidenciando-se assim que quando existe turbulência mecânica associada ao cisalhamento do vento, a profundidade da CLC tende a ser mais desenvolvida. Por outro lado, no período chuvoso, os perfis verticais médio do vento mostraram que a velocidade do vento na camada entre 50 a 3.000m variou, em média, de 8,0 a 9,0m/s. Durante o dia notou-se uma variação na direção do vento nos primeiros 300m, onde há mudança do vento da direção SE para NE e, posteriormente, mantendo constante a direção E até 3.000m. À noite, a variação na direção do vento foi ainda menor, sendo de E nos primeiros 100m e, predominantemente de NE até 3.000m. No período chuvoso as temperaturas (devido ao menor valor de fluxo de calor sensível) apresentaram-se mais baixas em relação ao período seco, daí a altura média da CLC ser menor, entre 440 a 480m. Apesar de não existir muitos estudos de jatos em baixos níveis na região do CLA, foram identificados em ambos os períodos seco e chuvoso.

A análise gráfica apontou algumas informações que ajudaram a posterior avaliação estatística (Willmott, RMSE e BIAS), como por exemplo:

- As simulações BLK e MRF ficaram mais próximas da observação em ambos os períodos seco (2008) e chuvoso (2010).

- A componente meridional do vento, em geral, foi subestimada entre 1000 e 925hPa pelas simulações ETA, BLK, BT e MRF. No período chuvoso (2010) as simulações tenderam a subestimar valores de v nos níveis mais baixos e também, apresentaram mudança no sinal desta componente acima de 925hPa.

- Apesar do refinamento das grades, a inserção de uma nova grade aninhada, não implicou em melhora significativa da previsão das componentes zonal e meridional. A falésia pode estar mal representada no modelo e também, tavez fosse necessário aumentar a resolução até 1x1 km.

- Os dados FNL do NCEP/NCAR estiveram mais próximos da observação. O que pode sugerir que os mesmos representam bem as condições tropicais.

- A presença de um jato em baixos níveis (próximo a 925hPa) entre os dias 20 às 12:00 UTC ao dia 22 às 00:00 UTC no período chuvoso (mar/2010), foi bem captado por todas as simulações, sendo que a simulação BLK foi um pouco mais realista.

- Tomando-se os dias analisados para cada um dos períodos (seco e chuvoso) como exemplo, foi possível constatar graficamente que existem diferenças de previsão do vento quando se compara diferentes processos (parametrizações) ocorridos da PBL dentro do modelo MM5.

Ainda no aspecto da modelagem numérica, o impacto em se definir a parametrização de PBL ideal do modelo MM5 para o CLA na previsão dos ventos (através dos valores de suas componentes) foi avaliado para os períodos seco e chuvoso. A avaliação estatística sinalizou alguns resultados importantes em busca pela melhor parametrização de PBL. A partir dos resultados obtidos pelo experimento numérico da CONF 1 foi possível extrair os seguintes conclusões:

- Estatisticamente, o resultado de CONF I propôs as parametrizações MRF e BLK como melhores parametrizações de PBL para o CLA na métrica RMSE (ótimo) do que na métrica Willmott (pouco satisfatório).

- O aninhamento das grades não resultou em melhoras significativas nos resultados.

- Considerando-se todas as parametrizações testadas de PBL do modelo MM5, as previsões inicializadas às 00:00UTC subestimaram a

componente zonal, em média 19% para o período seco e 17% para o período chuvoso.

- Considerando-se todas as parametrizações testadas de PBL do modelo MM5, as previsões inicializadas às 00:00UTC superestimaram a componente meridional em torno de 22% para o período seco e 17% para o período chuvoso.

- As simulações inicializadas, em geral, às 12:00UTC foram as que produziram melhores resultados para as componentes zonal e meridional do vento nos períodos seco e chuvoso.

- Em média, os melhores resultados do índice de Willmott foram observados para previsões com 60 horas de antecedência, enquanto que os melhores resultados de RMSE foram encontrados em previsões com 12 horas de antecedência.

- Considerando-se os períodos seco (2008) e chuvoso (2010), em geral, a parametrização MRF, considerada padrão do MM5, foi a que apresentou melhores resultados. Além desta parametrização de referência, a parametrização BLK foi outra que se destacou em relação às demais opções (ETA e BT).

Com relação aos testes de refinamento de grades e dados, as simulações mostraram que:

- A aplicação de 3 grades ao invés de 1 ou duas grades na previsão da componente zonal é melhor durante a época chuvosa, contudo, para componente meridional o melhor resultado na previsão é quando se utiliza somente 1grade. Na época seca, a utilização de 3 grades é melhor para ambas as componentes. Entretanto, uma vez que o tempo de simulação aumenta enormemente com o aumento dos pontos do domínio de simulação, esta melhoria de resultados não justifica o elevado custo computacional associado ao aumento de resolução.

- Empregar dados de reanálises (FNL) ao invés de GFS na época chuvosa mostrou ter um impacto positivo significativo (melhora o acerto da previsão das componentes zonal e meridional). Entretanto, considerando o período seco, a utilização destes dados (FNL) somente proporcionou melhora na previsão da componente zonal.

Ainda sobre o ponto de vista numérico, foram extraídos os seguintes resultados para a CONF II:

- Para o período seco (2008) as previsões das componentes zonal e meridional obtiveram uma melhoria de performance com a implementação de u_* medido, mas este resultado foi observado somente quando as simulações são inicializadas às 12:00UTC, segundo o índice de concordância de Willmott. Diferentemente, o RMSE indica uma degradação dos resultados do modelo. As previsões do modelo MM5 para a componente zonal foram, em geral, melhores que as previsões da componente meridional. Isto é, de certa forma, um bom resultado, pois a componente zonal (ventos alísios) é mais intensa do que a componente meridional (relacionado à componente meridional).

- Para o período chuvoso (2010) segundo o índice de Willmott as previsões das componentes zonal e meridional obtiveram um ganho com a implementação de u_* medido, para aquelas inicializadas às 12:00UTC. Ao contrário, o RMSE indicou uma melhora do modelo somente nas previsões das componentes do vento quando as simulações foram inicializadas às 00:00UTC.

Ao introduzir valores sazonais da velocidade de atrito e do coeficiente de rugosidade correspondentes àqueles medidos no CLA (Roballo, 2008), obtiveram-se, em alguns casos, melhores resultados de simulações das componentes zonal e meridional do vento na CONF III. Através dos índices estatísticos foram extraídos os seguintes resultados da CONF III:

- Os ajustes de $u_* e Z_0$ feitos nas configurações CONF II e III nas parametrizações MRF e BLK de Camada Limite possibilitaram, sobre

algumas condições, melhores resultados nas simulações das componentes zonal e meridional.

- Segundo o índice de Willmott os ajustes nestas parametrizações foram eficazes quando observamos os resultados para as componentes zonal e meridional do vento no período seco (2008) quando estas foram inicializadas às 12:00UTC; componente zonal iniciadas às 12:00 UTC no período chuvoso (2010) semelhante à CONF II.

Em geral, avaliando-se todos os resultados encontrados nas simulações numéricas realizadas (CONFs I, II e III) chega-se a seguinte conclusão:

Frequentemente, a grande limitação deste modelo compreende na subestimação da componente zonal do vento, que pode ser atribuída à suavização do terreno associada à discretização do terreno, a qual não foi resolvida utilizando domínios de maior resolução. É preciso aumentar a resolução dos dados estáticos (topografia, cobertura vegetal, etc.). Deve-se ressaltar aqui, que neste estudo a suavização de terreno no que diz respeito à altimetria não foi manipulada.

Segundo Carvalho (2009), a suavização não implica apenas uma diferença de altitudes entre os pontos reais e os pontos da malha. Então, provavelmente o modelo “vê” a falésia mais baixa do que é na realidade, e também faz uma suavização de todo o relevo. Este aspecto resultante da suavização do relevo, por si só, produzirá ventos mais intensos devido ao menor efeito de atrito presente entre a superfície e a massa de ar em movimento (maior área de terreno em contato com a superfície da massa de ar). Uma maneira de tentar minimizar o problema dos efeitos do terreno na simulação do vento é recorrer a modelos de microescala, que possuem uma capacidade de lidar com a interação do escoamento com o terreno que os modelos de mesoescala não possuem ou aumentar a resolução dos dados de terreno/vegetação.

Durante o período chuvoso o ajuste de u_* na parametrização MRF (CONF II) do modelo MM5 alcançou maior desempenho do modelo para a previsão das componentes zonal e meridional (vento) de acordo com o índice de Willmott,

considerando-se as previsões de 60 horas de antecedência, inicializadas a partir das 12:00UTC.

Durante o período seco os ajustes propostos nas CONFs II e III não trouxeram melhoria de performance à previsão das componentes zonal e meridional quando estas foram inicializadas às 00:00UTC. Aquelas inicializadas às 12:00UTC, o ajuste proposto na CONF III proporcionou uma melhora na previsão das componentes u e v, considerando-se o índice de Willmott. Ou seja, a CONF III para a previsão do vento no período seco é melhor para o CLA quando as simulações são realizadas a partir das 12:00UTC, entretanto, segundo o RMSE, os ajustes atribuídos nas CONFs II e III não proporcionaram, em geral, um impacto positivo nas previsões das componentes zonal e meridional.

Efetivamente, já que o RMSE manteve-se ótimo, pondera-se entre os índices estatísticos avaliados (Willmott e RMSE) que houve uma melhora na previsão do vento no CLA à aplicação da CONF II no modelo MM5 para o período chuvoso e CONF III para o período seco àquelas previsões de 12 e 24 horas de antecedência, inicializadas às 12:00UTC.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Simular um período maior que possa representar épocas intrasazonais de Alcântara.
- Combinar as parametrizações de PBL: MRF e BLK ajustadas às parametrizações de nuvens já estudadas para Alcântara.
- Manipular no modelo MM5 a suavização do terreno (*nudding*) a fim de diminuir o impacto sobre a intensidade do vento simulado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ANDRADE, K.; CAVALCANTI, I. F. A. Climatologia dos sistemas frontais e padrões de comportamento para o verão na América do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza. **Anais.**..Fortaleza: SBMET, 2004.

BARROS, S. S. **Precipitação no Centro de Lançamento de Alcântara:** aspectos observacionais e de modelagem. 2008. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

BERMAN, S.; RAO, J. Y. K. S. T., Spatial and temporal variation in the mixing depth over the northeastern United States during the summer of 1995, **J. APPL. Meteorol**., v. 38, p. 1661-1673, 1999.

BLACKADAR, A. K., Modeling the nocturnal boundary layer. Preprints,Third Symp. on Atmospheric Turbulence, Diffusion, and Air Quality, Raleigh, NC, **Amer. Meteor. Soc.**, p. 46–49, 1976.

BOLZAN, M. A. Transformada em ondeleta: uma necessidade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 4, p. 563-567, 2006.

BONNER, W.D.; Case study of thunderstorm activity in relation to the low-level jet. **Monthly Weather Review**, v. 94, n.3, p. 167–178, mar. 1966.

BONNER, W. D.; ESBENSEN S.; GREENBERG R. Kinematics of the low level jet. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v.7, n.3, p.339 – 347, 1968.

BRAUN, S. A.; TAO; W. Sensitivity of high-resolution simulations of Hurricane Bob (1991) to Planetary Boundary Layer Parameterizations. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 12, p. 3941–3961, dec. 2000.

BURK, S. D., THOMPSON, W. T. A vertically nested regional numerical weather prediction model with second-order closure physics. **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 2305–2324, 1989.

CAMILO, G. L. Impacto das parametrizações de camada limite planetária do MM5 na previsão de ventos em baixos níveis. **Revista da Universidade da Força Aérea**, v. 23, n.28, 2011.

CARVALHO, D. J. S. **Optimização do modelo numérico de previsão do tempo WRF no contexto de previsão e produção de energia eólica.** 2009. Dissertação (Mestrado em Meteorologia e Oceanografia Física) – Universidade de Aveiro, Portugal.

CARVALHO, M. A. V. **Variabilidade da largura e intensidade da Zona de Convergência Intertropical Atlântica:** aspectos observacionais e de modelagem. 2011. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

CHEN, C. et al. Using MM5 to hindcast the ocean surface forcing fields over the Gulf of Maine and Georges Bank region. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, [S.l.], v. 22, n.2, p. 131-145, feb. 2005.

CORRÊA, C. S. et al. Estudo observacional dos jatos de nível baixo sobre a região metropolitan de Porto Alegre. **Rev. Bras. de Recursos Hídricos**. v.6, n.4, p.19-27,2001.

CORRÊA, C. S. **Estudo estatístico da ocorrência de jatos no perfil vertical do vento na baixa atmosfera e a sua relação com eventos de intense precipitação pluvial no Rio Grande do Sul**. 2005. Tese (Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.

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, 2006.

CORRÊA. E. B., **Avaliação do sistema combinado de modelagem mm5/calmet na representação da circulação atmosférica da região metropolitana do Rio de Janeiro, 2007**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) - Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

COUTINHO, E. C. **Estudo das características atmosféricas na região do CLA**. 1999. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

DEGRAZIA, G. A.; VELHO, H. F. C.; CARVALHO, J. C. Nonlocal exchange coefficients for the convective boundary layer derived from spectral properties. **Beiträge zur Physic der Atmosphäre (Contributions to Atmospheric Physics)**, v. 70, n. 1, p. 57–64, 1997.

DOSWELL, C. A.; D. M. SCHULTZ, On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. **Electronic J. Severe Storms Meteor**., v. 1, n. 3, p. 1-22 2006.

DUDHIA, J., Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. **J. Atmos. Sci**, v. 46, p. 3077-3107, 1989.

DUDHIA, J. et. al. **Mesoscale modeling system tutorial class notes and user's guide**: MM5 modeling system version 3.Boulder, CO: PSU/NCAR, 2003.

FISCH, G. Características do perfil vertical do vento no Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 14, n.1, p. 11-21, 1999.

FISCH, G. Ventos em altitude na costa litorânea do Maranhão. **Boletim de monitoramento hidroclimático do Estado do Maranhão**, v. 2, n.2, p. 43-47, 1997.

GARRANA, D. Técnicas de baixo custo para previsão de mesoescala. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO E IBÉRICO DE METEOROLOGIA, 11., 2001. **Anais...** Buenos Aires, Argentina: [s.n.], 2001.

GARRAT, J. R.; PIELKE, R. A. On the Sensitivity of Mesoescale Models to Surface-Layer Parameterization Contants. **Boundary Layer Meteorology**, v. 48, p. 377-387, 1989.

GISLER, C. A. F. **Análise do perfil de vento na camada limite superficial e sistemas meteorológicos atuantes no Centro de Lançamento de Alcântara.** 2009. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

GRAPS, A. An introduction to wavelets. **IEEE Computational Science and Engineering**, v.2, n.2, p. 50-61, 1995.

GRELL, G.A.; DUDHIA, J.; STAUFFER, D.R. **A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5).** Boulder, Colorado: NCAR, 1995. 122p. NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR.

HASTENRATH*,* S., LAMB, P. **Climatic atlas of the Tropical Atlantic and Eastern Pacific Oceans**. University of Wisconsin Press, 1977, 113 p.

HOLTSLAG, A. A. M.; B. BOVILLE, Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model. **J. Climate**, v. 6, p. 1825-1842, 1993.

HONG, S.Y., PAN, H.L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. **Monthly Weather Review**, v.124**,** p. 2322–2339, 1996.

JANJIC, Z. I. The step-mountain Eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. **Mon. Wea. Rev**., 122, 927–945, 1994.

KALNAY, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project*,* Bull*.* **Amer. Meteor. Soc., v.** 77, p. 437-470, 1996.

KARAM, H. A. **Estudo do jato de baixos níveis de Iperó e das implicações no transporte de poluentes no Estado de São Paulo**, 2002. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

KAYANO, M.T.; ANDREOLI, R.V. Clima da Região Nordeste do Brasil. In. CAVALCANTI, I.F.A. et al. (Eds). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de textos, 2009. 464p.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. **Monthey Weather Review**, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.

LOREDO-SOUZA, A.M; SCHETTINI, E.B.C; PALUCH, M.J. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. In: MÖLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. (Org.). **Turbulência**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, 2004, v.4, p.137-163.1 CD-ROM.

LYRA, A. A., **Testes de sensibilidade e avaliação das previsões de vento do modelo ETA para Região Nordeste**. 2007. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.

LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R. Parâmetros de rugosidade aerodinâmica sobre vegetação esparsa em região semi-árida. **Rev. Bras. Meteorol.,** v. 22, n. 2, 2007.

MARCIOTTO, E. R.; FISCH, G. Investigation of approaching ocean flow and its interaction with land internal boundary layer. **American Journal of Environmental Engineering**. v. 3, n. 1, p. 18-2, 2013.

MARENGO, J.A.; SOARES, W.R. Episódios de jatos de baixos níveis ao leste dos Andes durante 13 – 19 de abril de 1999. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.17, n.1, p. 35 – 52, 2002.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics and Space Physics**. v. 20, n. 4., p. 851-875, Nov. 1982.

MOURA, A. D. Von Neumann e a previsão numérica de tempo e clima. **Estudos. Avançados,** v.10 n. 26. São Paulo, Jan./Abr. 1996.

NOGUEIRA, J. H. A. **Sensibilidade da precipitação simulada na região do Centro de Lançamento de Alcântara a esquemas de convecção explícita:** Estudos de Caso. 2010. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. O; BARBOSA, E. C; MORAES, N. O; GADELHA, A. A. L; PIMENTEL, L. C, G; LANDAU, L. **Um teste de sensibilidade do modelo de mesoescala MM5 através de dois tipos de aninhamento de grade:** um estudo de caso. Disponível em: http://www. criatividadecoletiva.net/cbm-files/22-3d2637b45064aef21cceef12dba4d164.doc. Acesso em: 03/04/2009.

OYAMA, M. D. Precipitação do modelo de mesoescala MM5: avaliação preliminar da sensibilidade às parametrizações de convecção profunda em grade reduzida. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBMet, 2004.

OYAMA, M. D. ; NOBRE, C. A. Climatic consequences of a large-scale desertification in northeast Brazil: a GCM simulation study. **Journal of Climate**, v. 17, n.16, p. 3203-3213, 2004.

OYAMA, M. D.; GIAROLLA, E. Simulação de Linhas de Instabilidade na Costa Norte do Brasil de 6 a 9 de Julho de 2005 com o Uso do Modelo Regional MM5: Resultados Preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBMet, 2006.

OYAMA, M.D**. Instalação do modelo de mesoescala MM5 na ACA/IAE/CTA**. São José dos Campos: Divisão de Ciências Atmosféricas, Instituto de Aeronáutica e Espaço, Centro Técnico Aeroespacial, 2003. Publicação interna, PI-002.

PEREIRA NETO, A. V. ; OYAMA, M. D. Mudanças do esquema de convecção profunda Kain-Fritsch para a região do centro de lançamento de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 579-590, 2011.

PEREIRA, E. I.; MIRANDA, I.; FISCH, G. F.; MACHADO, L. A. T.; ALVES, M. A. S. **Atlas climatológico do Centro de Lançamento de Alcântara**. São José dos Campos: Centro Técnico Aeroespacial, 2002. Relatório de desenvolvimento, ACA/RT-01/01, GDO- 000000/B0047.

PÉREZ, C.; JIMÉNEZ, P.; JORBA, O.; SICARD, M.; BALDASANO, J. M. Influence of the PBL scheme on high resolution photochemical simulations in urban coastal area over the Western Mediterranean. **Atmospheric Environment**, v. 40, p. 5274-5297. 2006.

PIELKE, R. A. **Mesoscale meteorological modelling**. New York: Academic Press, 2002.

PIRES, L. B. M. **Estudo da camada limite interna desenvolvida em falésias com aplicação para o Centro de Lançamento de Alcântara.** 2009. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, São José dos Campos.

PIRES, L. B. M.; FISCH, G. Ventos da camada limite superficial no Centro de Lançamento de Alcântara. **Ciência e Natura**, Santa Maria, RS, v. único, p. 213-216, 2005.

PIRES, L. B. M.; GIELOW, R.; FISCH, G. Vento na transição entre as superfícies oceânica e litorânea no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). In: ESCOLA DE PRIMAVERA DE TRANSIÇÃO E TURBULÊNCIA, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, 2006 [CD-ROM]

REITER, E. R.. **Jet stream meteorology**. University of Chicago Press. 515,1963.

REUTER, E. D. J. **Estudo das camadas limites planetária marinha e continental na região do Centro de Lançamento de Alcântara**, 2002. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

REUTER, E. D. J. Estudo observacional da camada limite planetária marinha na região do Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara - MA. **Revista Brasileira de Meteorologia.** Vol. 19, n.3. p. 251-264, dez. 2004.

ROBALLO, S.T. **Estudos da camada limite interna no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA).** 2007. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, São José dos Campos.

ROBALLO, S.T.; FISCH, G. Escoamento Atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): Parte I - Aspectos Observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 4, p. 15, 2008.

SEAMAN, M. L., LUDWIG , F. L., DONALL, E. G., WARNER, T. T.; BHUMRALKAR, C. M. Numerical studies of urban planetary boundary-layer structure under realistic synoptic conditions, **J. Appl. Meteorol**., v. 28, p. 760-781, 1989.

STIVARI, S. M. S.; OLIVEIRA, A. P. Estudo observacional dos jatos de baixos níveis na região do lago de Itaipu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2000. p.1809–1814.

STULL, R. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988, 684p.

TAVARES, P. S. **Um estudo observacional da incursão de sistemas frontais no Nordeste Brasileiro e sua influência na atmosfera do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA)**. 2008. 152 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008.

TROEN, I.; L. MAHRT, A simple model of the atmospheric boundary layer; sensitivity to surface evaporation. **Boundary-Layer Meteorol**., v. 37, p. 129-148, 1986.

WHITEMAN, C. D.; BIAN, X.; ZHONG, S. Low level jet climatology from enhanced rawinsonde observations at a site in the souther Great Plains. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v.36, p. 1363 – 1376, 1997.

WILLMOTT, C. J. et al., A refined index of model performance. **International Journal of Climatology.**, vol.32, n. 13, p. 2088-2094, 2011.

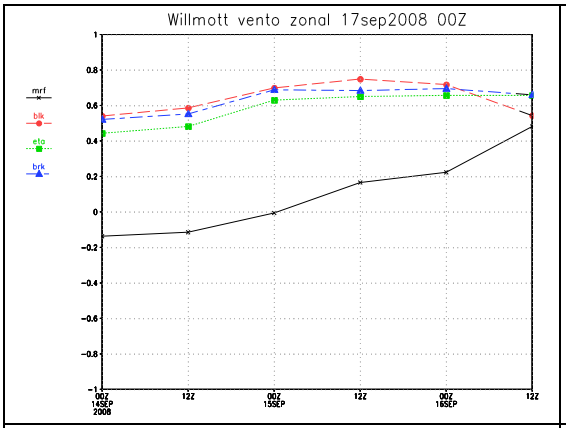
WILMOTT , C. J. **Interpretação do índice Willmott** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <diane.reuter@cptec.inpe> em 30 jan. 2013.

WIPPERMANN, F. Numerical study on the effects controlling the low-level jet. **Beiträge zur Physik der Atmosphäre** (**Contributions to Atmospheric**. **Physics**), v.46, p. 137 – 154, 1973.

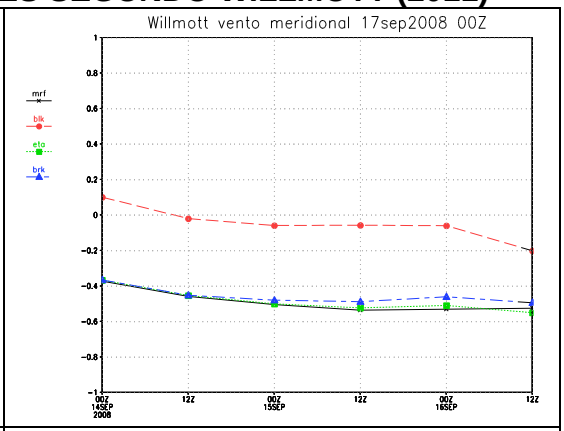
WU, Y.; RAMAN, S. Effect of land-use pattern on the development of low level jet. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v.36, p. 573 – 590, 1997.

WYNGAARD, J. C.; BROST, R. A. Top-down and bottom-up diffusion of a scalar in the convective boundary layer. **J. Atmo. Sci.,** v. 41, p. 102-112, 1984.

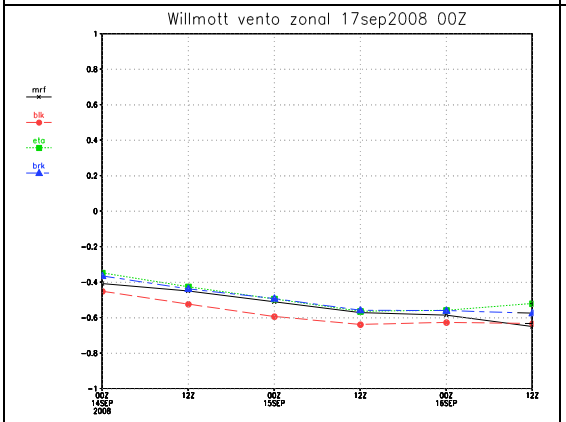
(a)



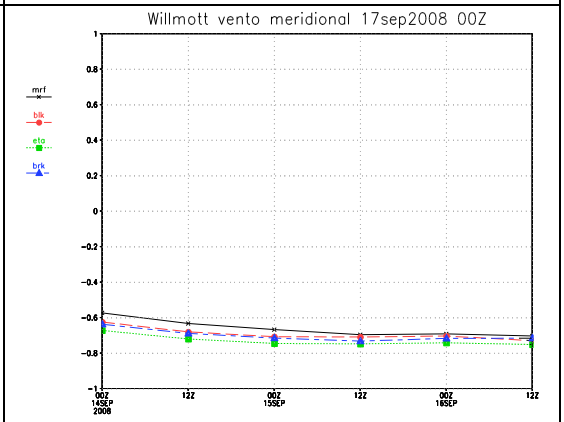
(b)



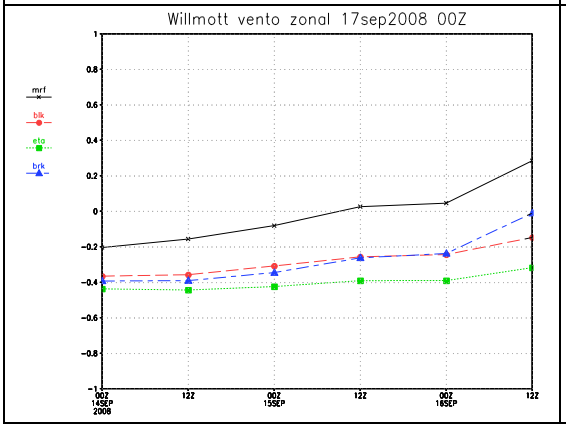
(c)



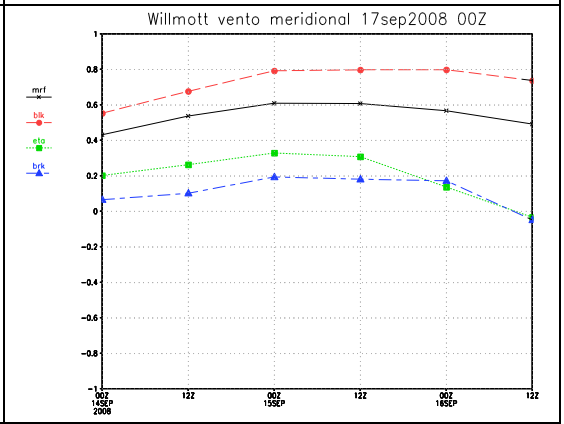
(d)



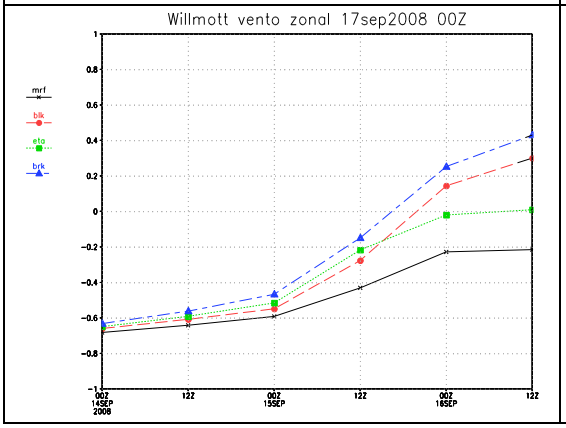
(e)



(f)



(g)



(h)

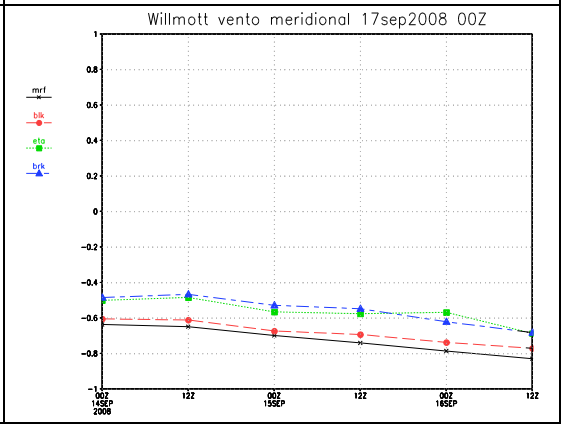
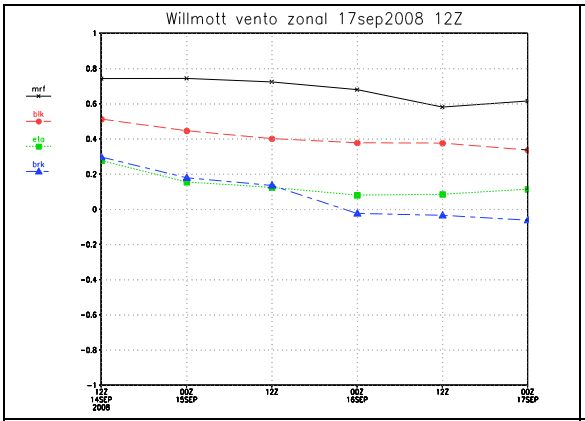
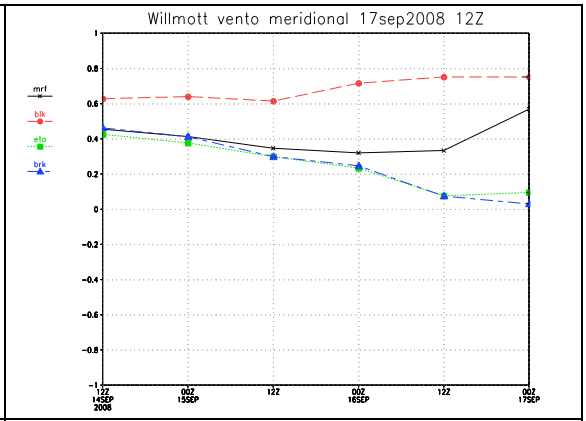


Figura 5.4.1 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 17set2008 às 00:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

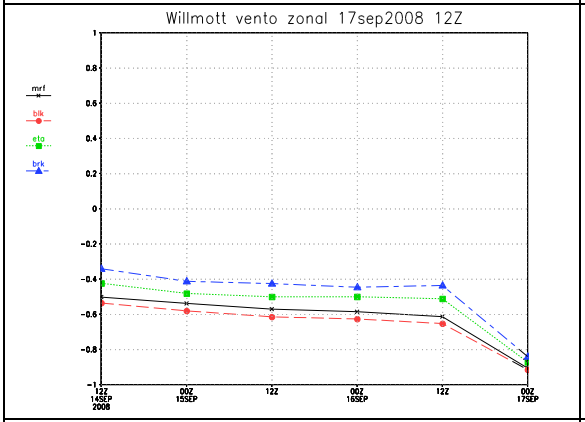
(a)



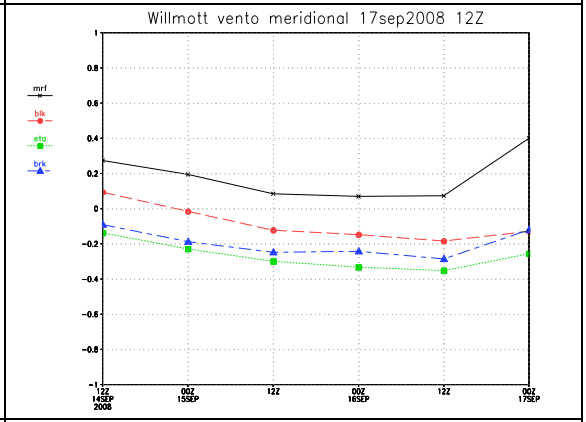
(b)



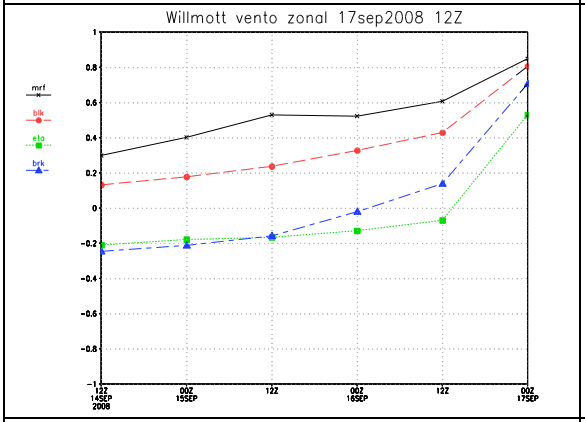
(c)



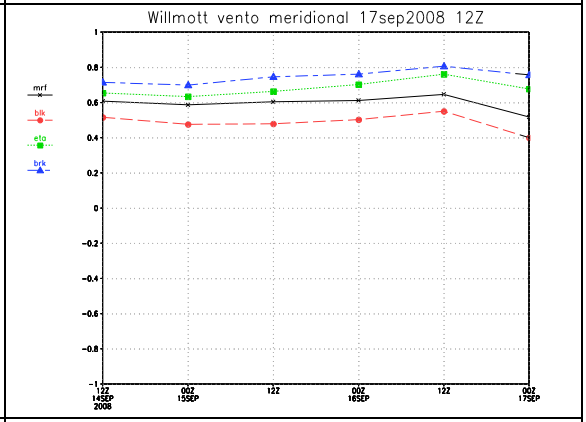
(d)



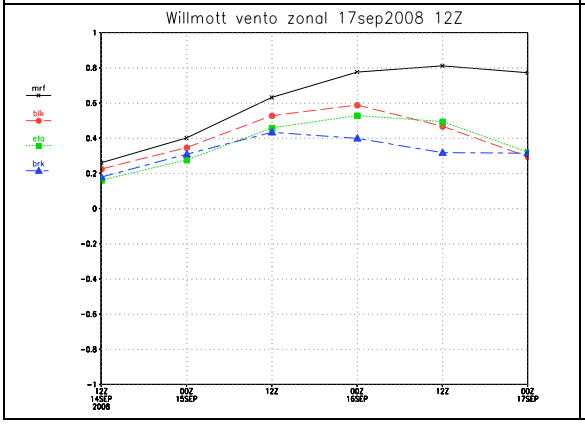
(e)



(f)



(g)



(h)

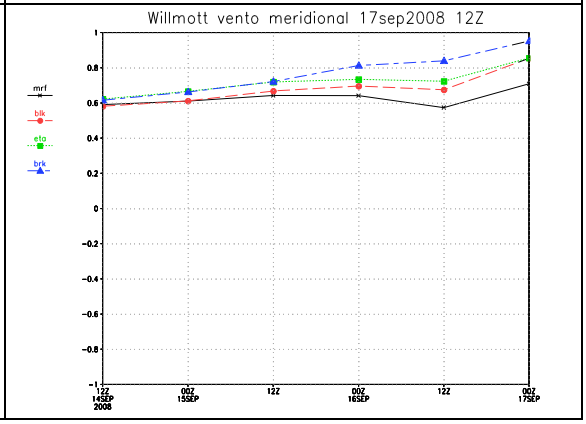
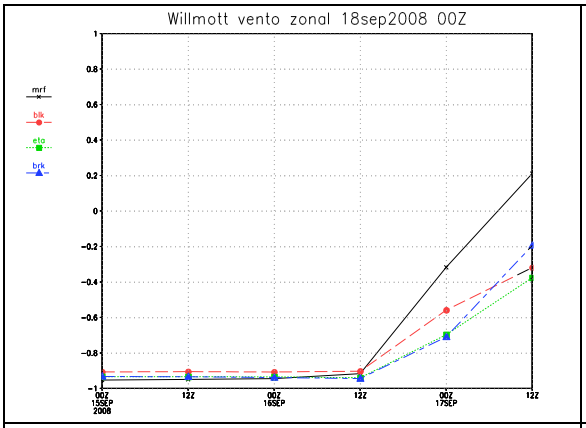
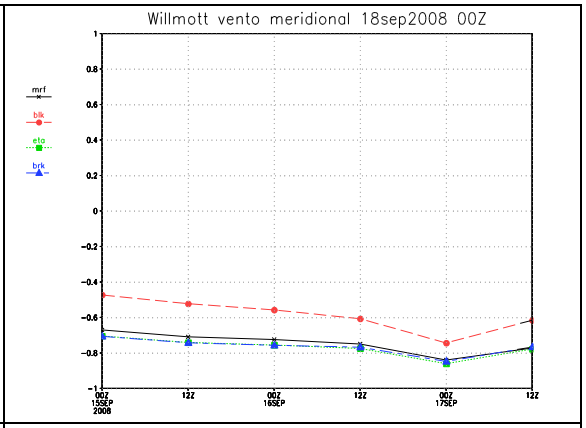


Figura 5.4.2 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 17set2008 às 12:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

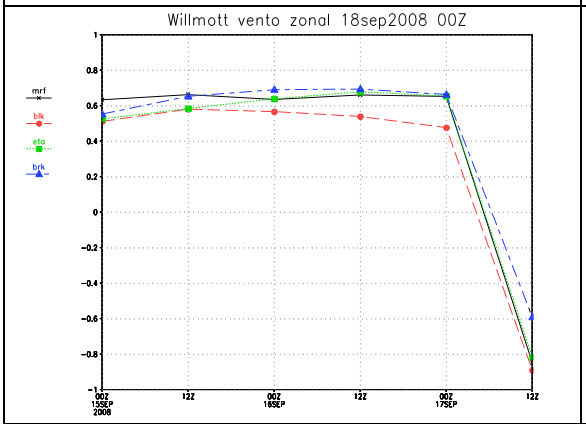
(a)



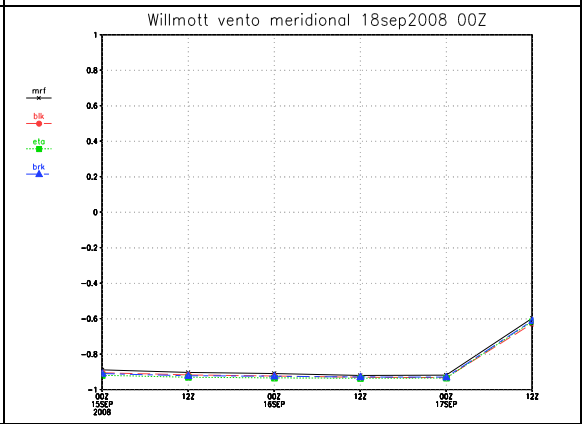
(b)



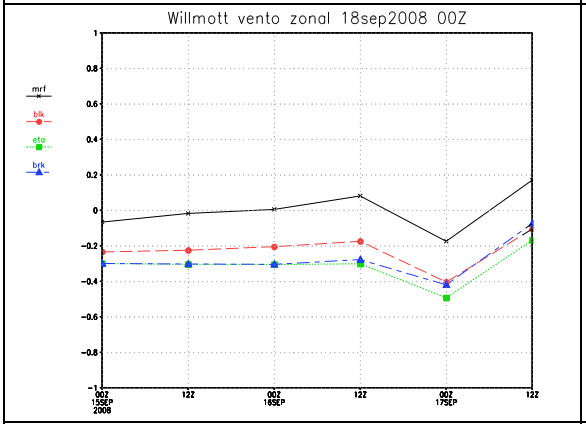
(c)



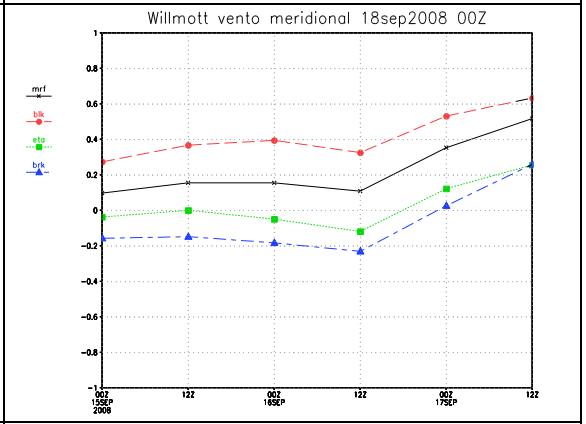
(d)



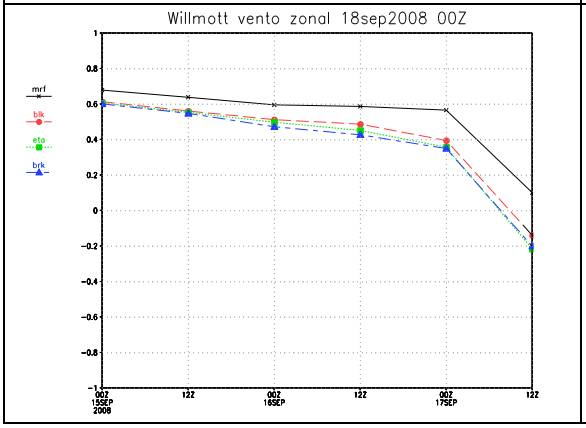
(e)



(f)



(g)



(h)

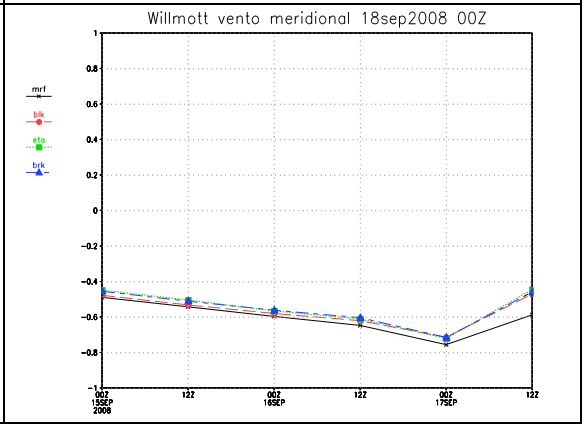
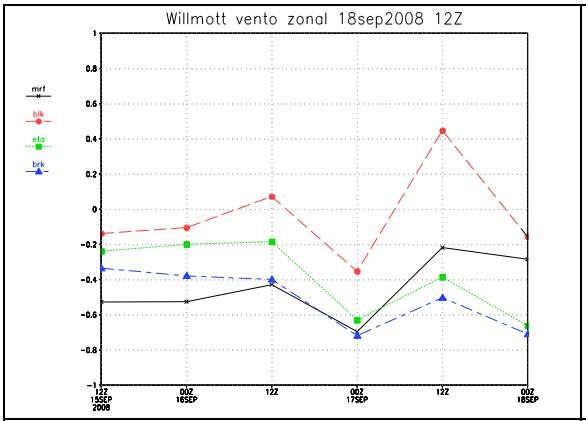
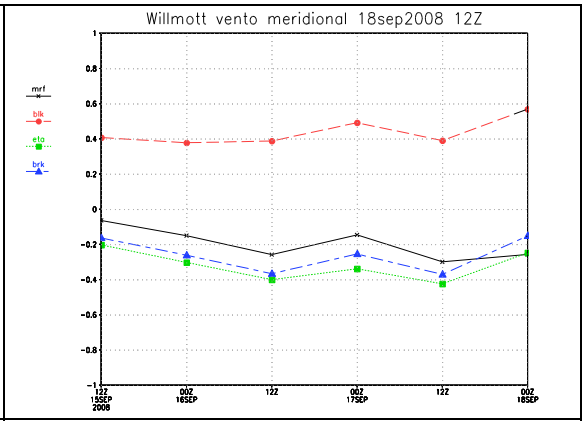


Figura 5.4.3 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 18set2008 às 00:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

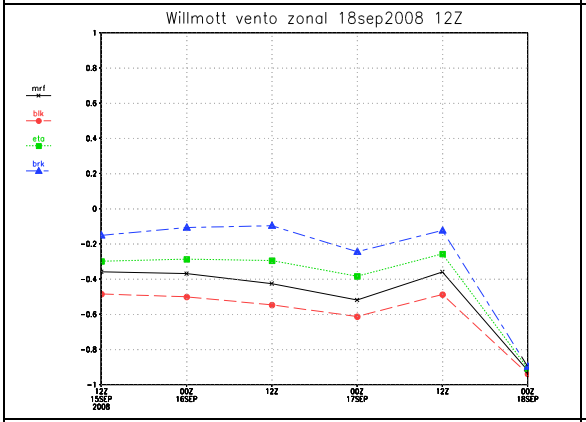
(a)



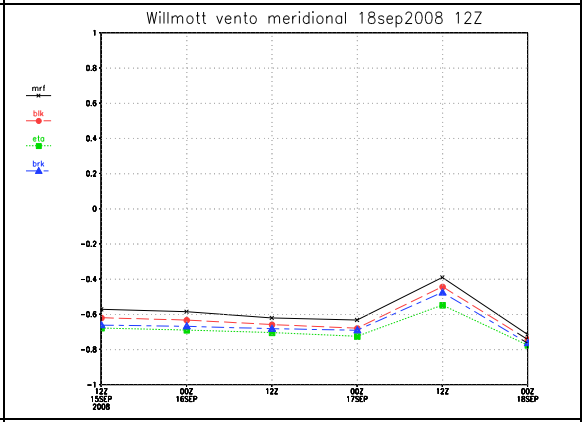
(b)



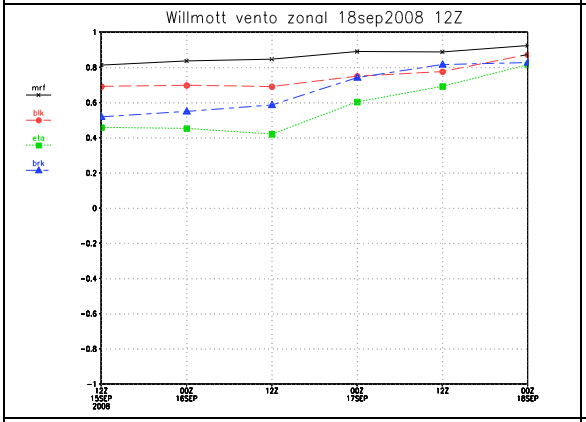
(c)



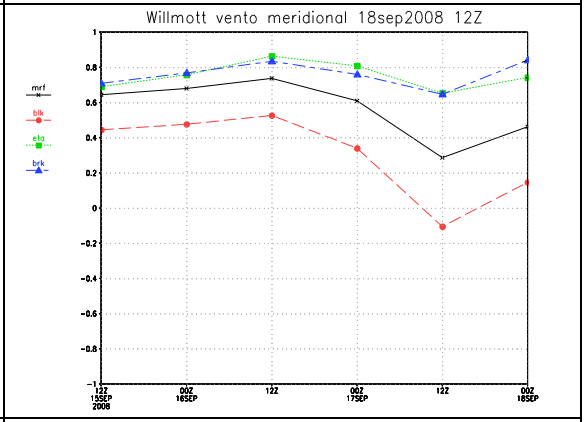
(d)



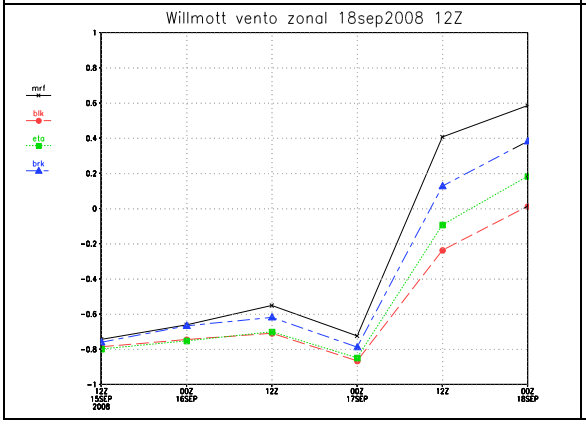
(e)



(f)



(g)



(h)

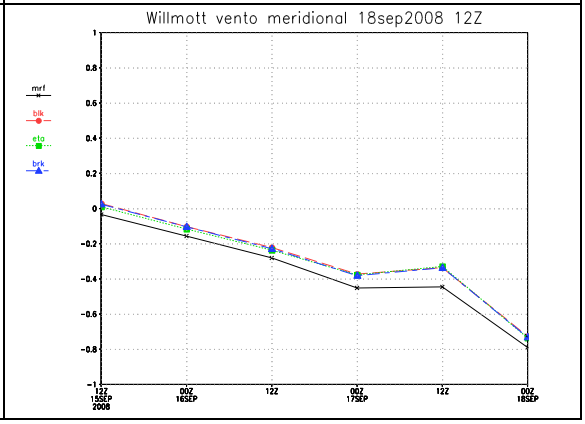
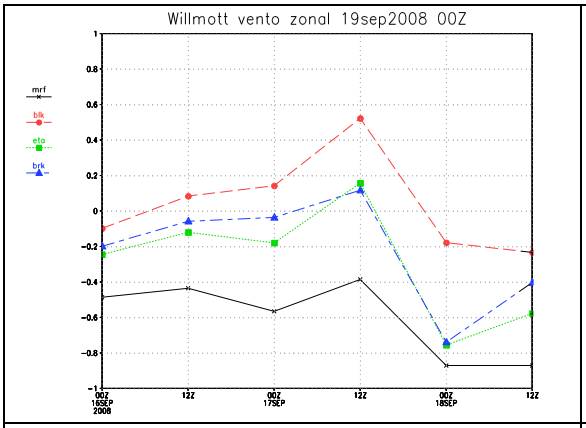
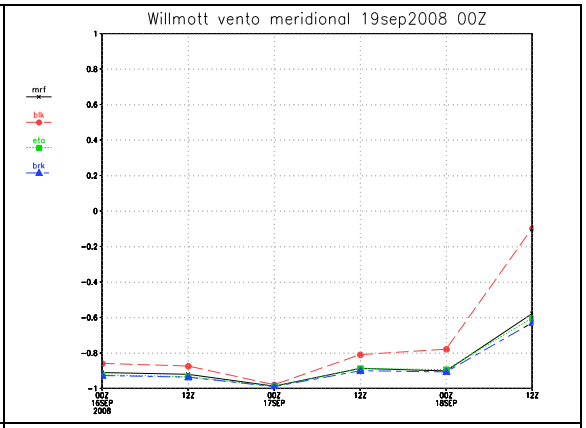


Figura 5.4.4 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 18set2008 às 12:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

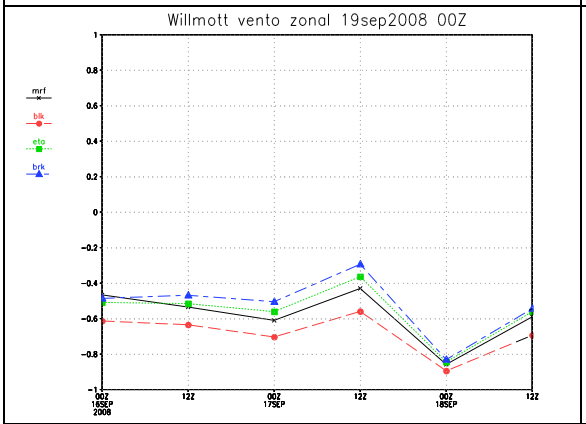
(a)



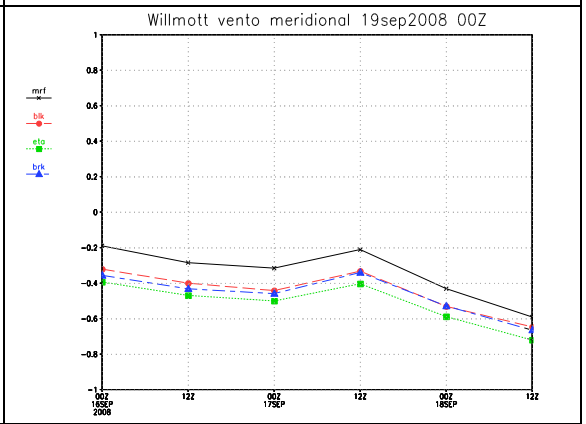
(b)



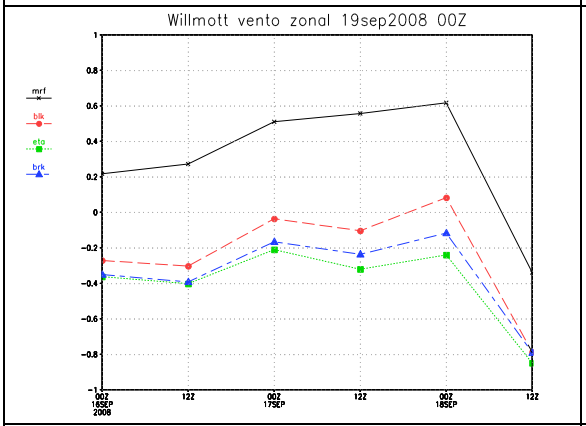
(c)



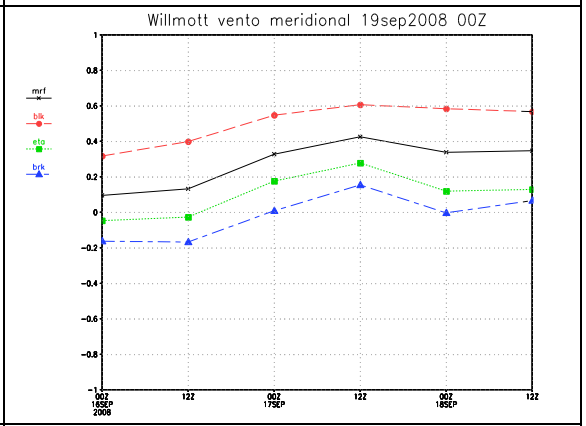
(d)



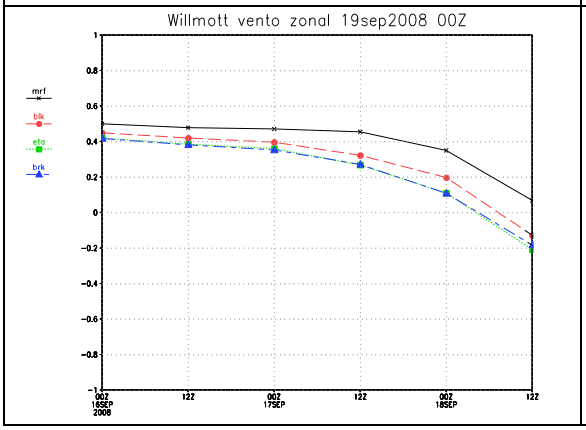
(e)



(f)



(g)



(h)

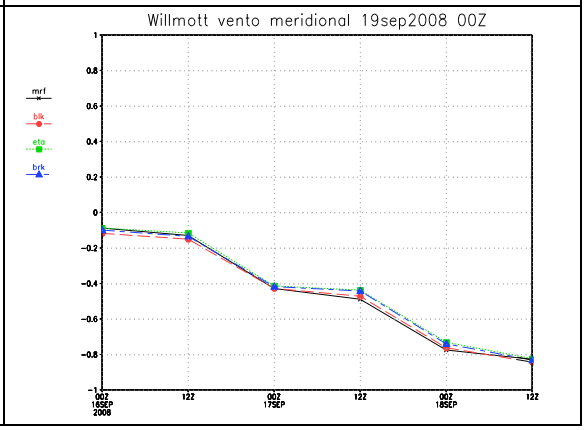
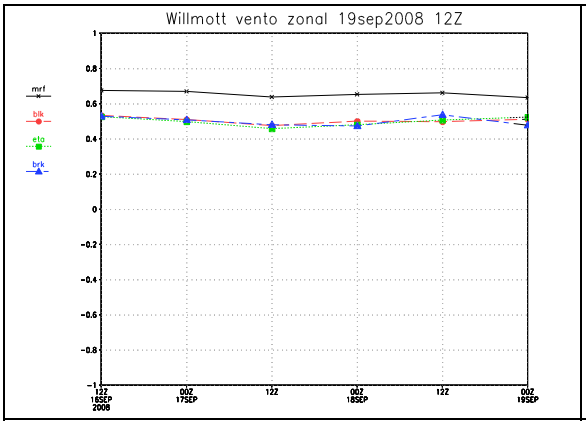
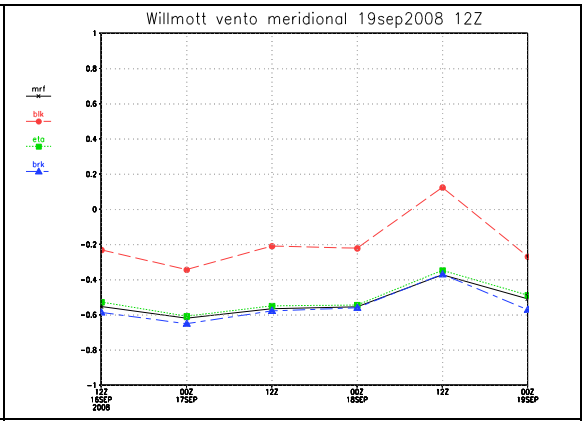


Figura 5.4.5 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 19set2008 às 00:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

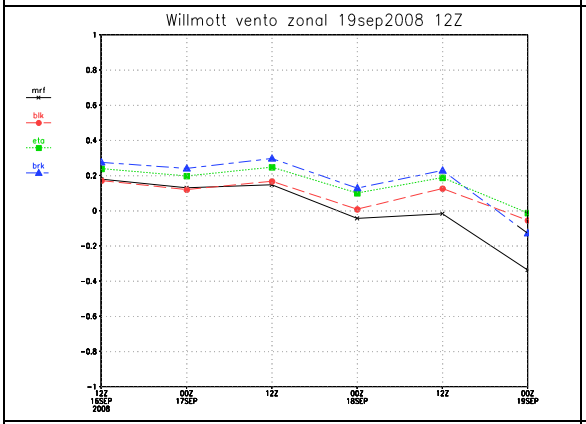
(a)



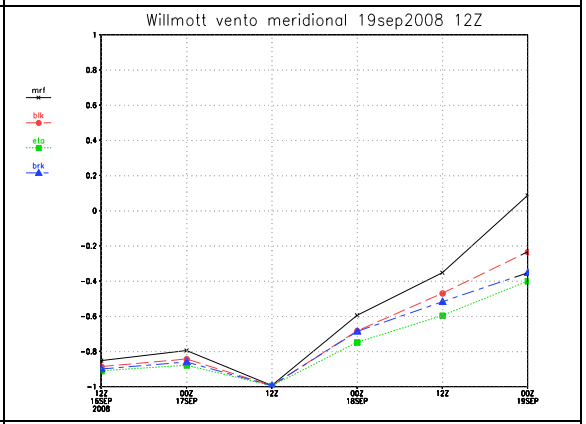
(b)



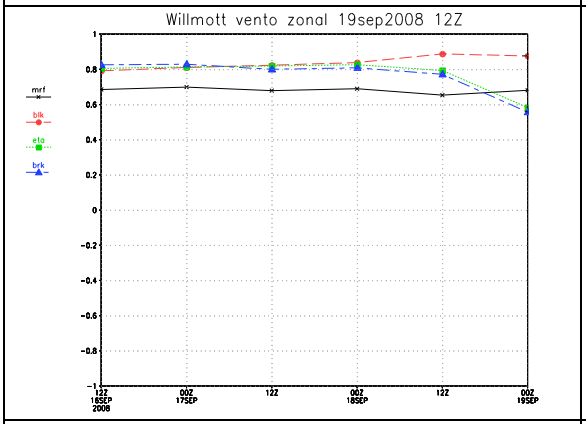
(c)



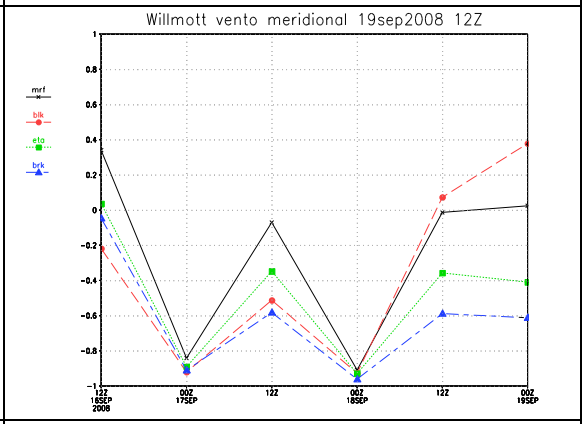
(d)



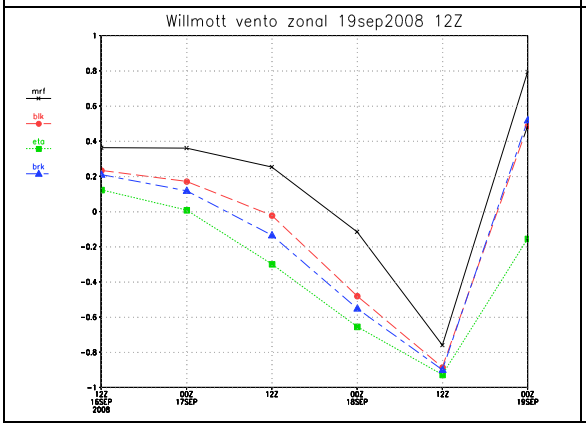
(e)



(f)



(g)



(h)

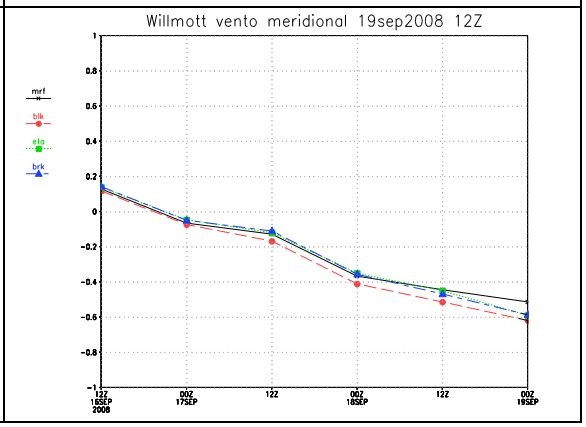
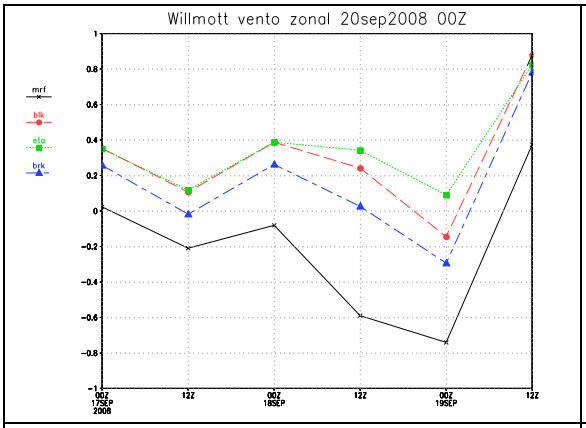
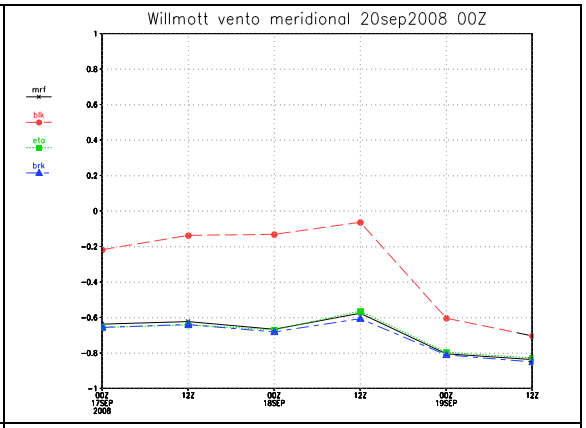


Figura 5.4.6 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 19set2008 às 12:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

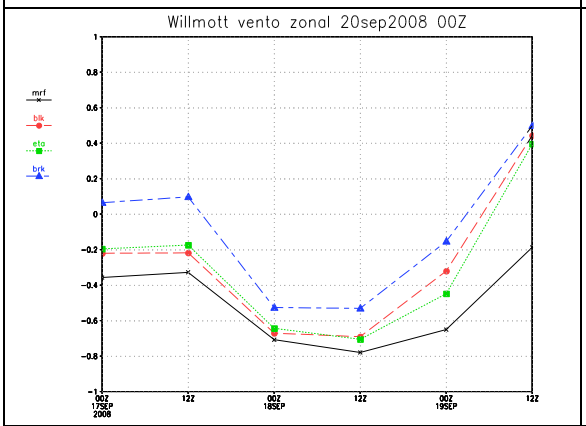
(a)



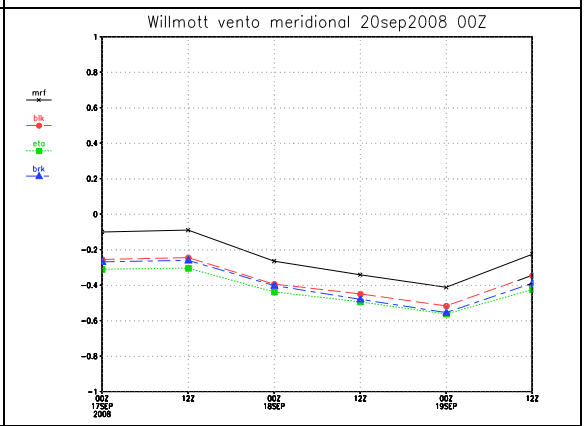
(b)



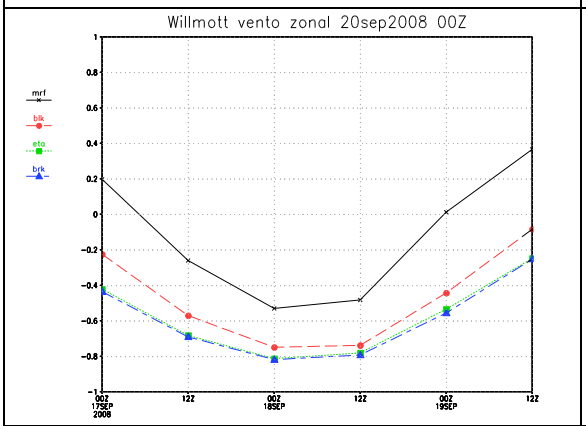
(c)



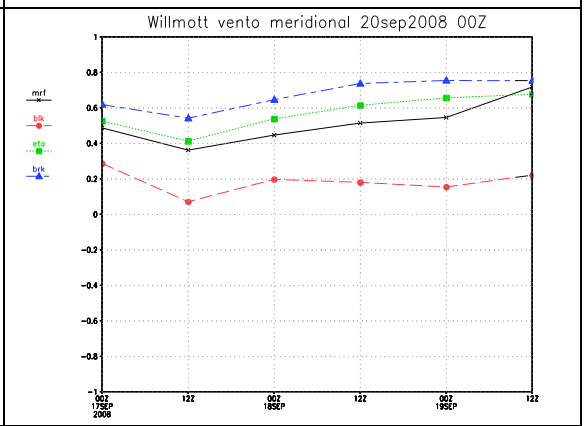
(d)



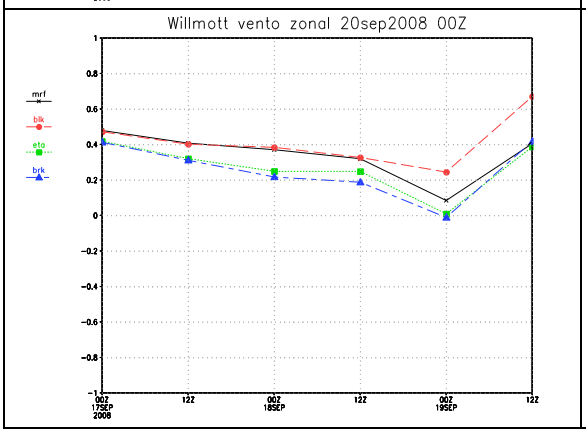
(e)



(f)



(g)



(h)

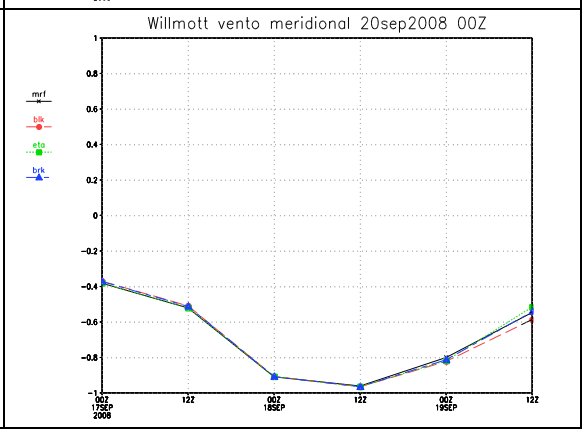
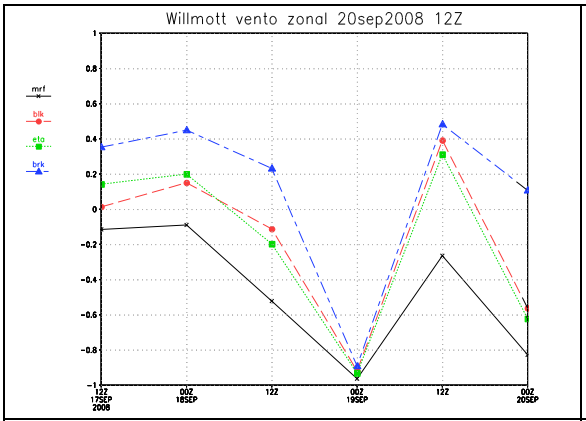
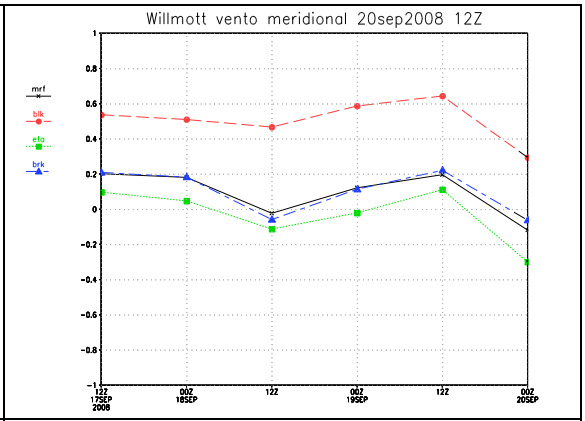


Figura 5.4.7 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 20set2008 às 00:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

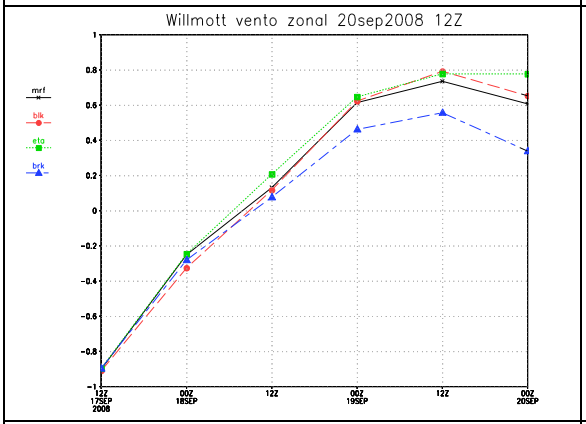
(a)



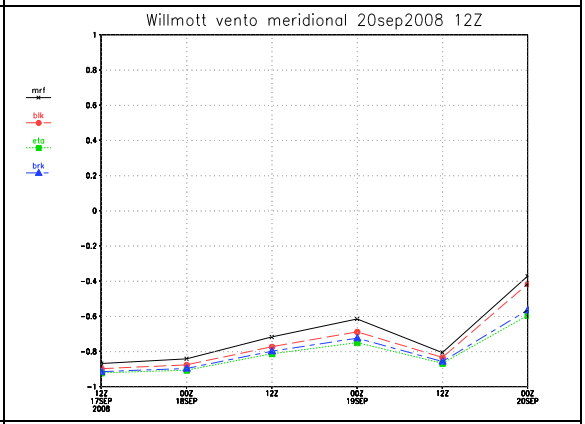
(b)



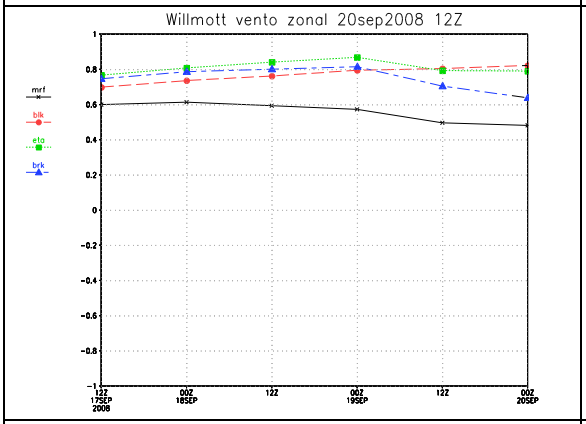
(c)



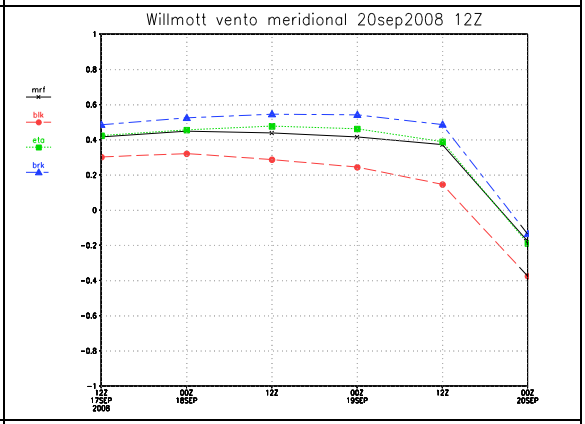
(d)



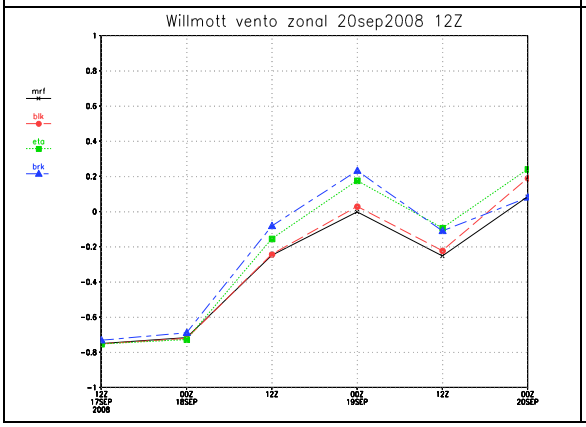
(e)



(f)



(g)



(h)

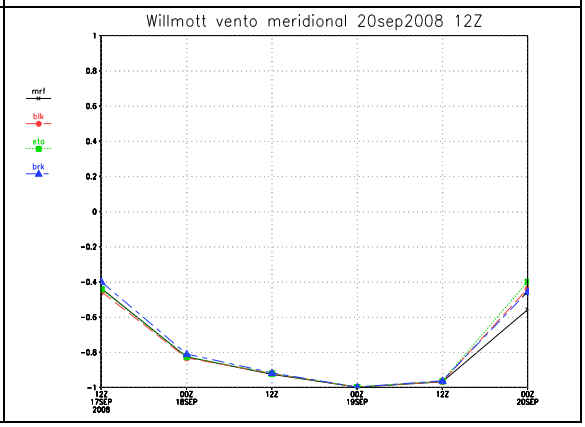
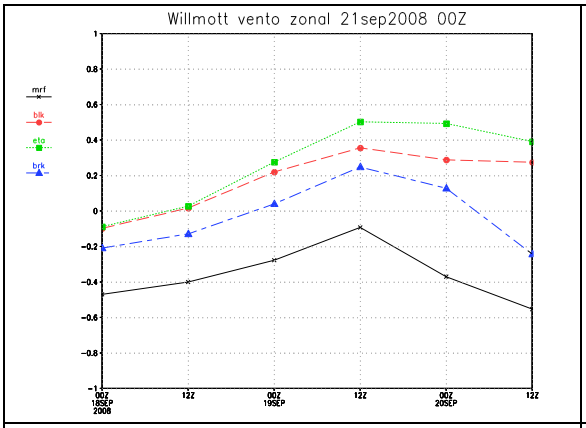
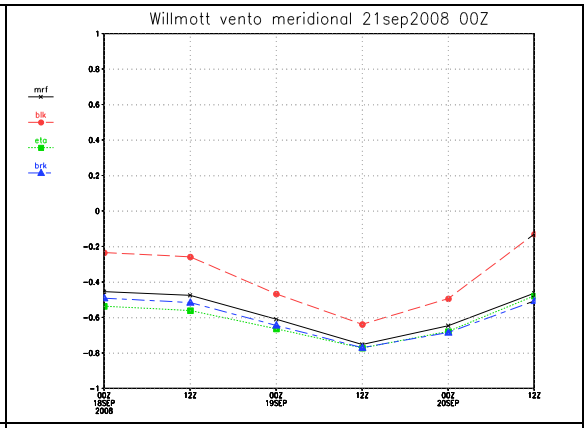


Figura 5.4.8 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 20set2008 às 12:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

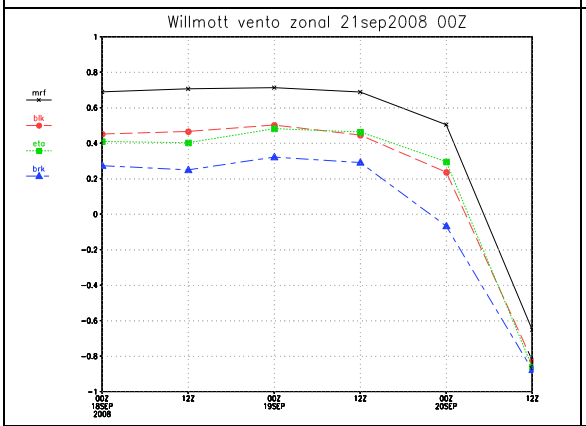
(a)



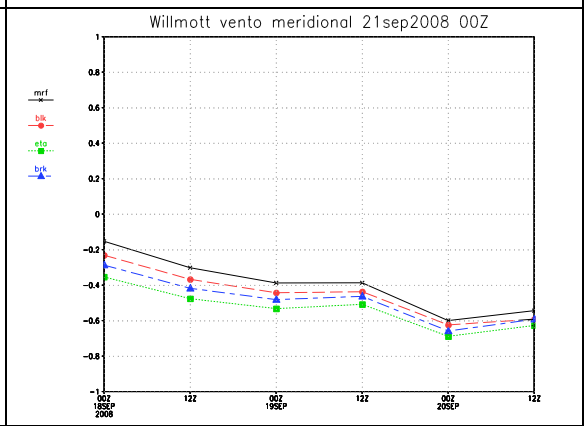
(b)



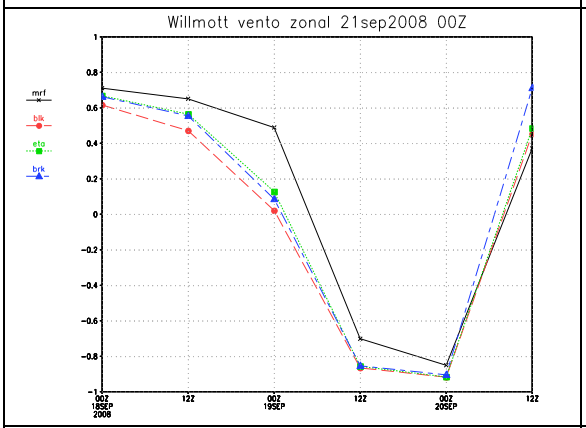
(c)



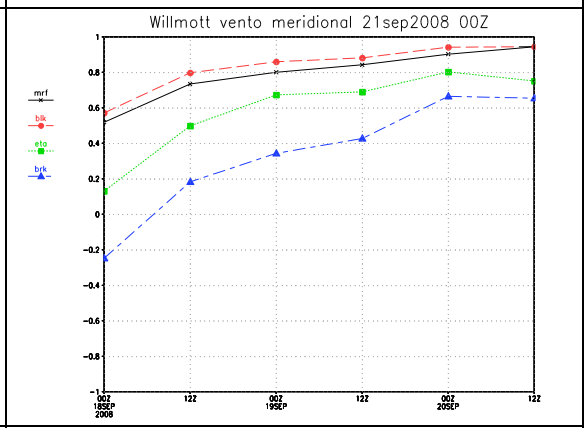
(d)



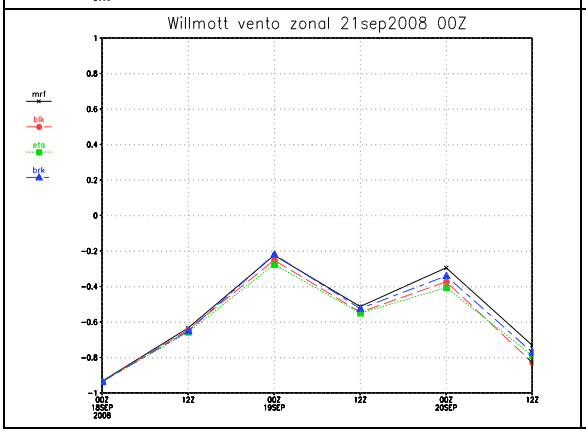
(e)



(f)



(g)



(h)

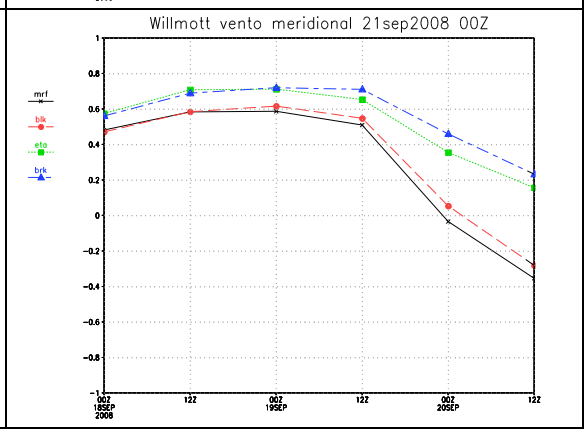


Figura 5.4.9 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 21set2008 às 00:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

(g) (h)

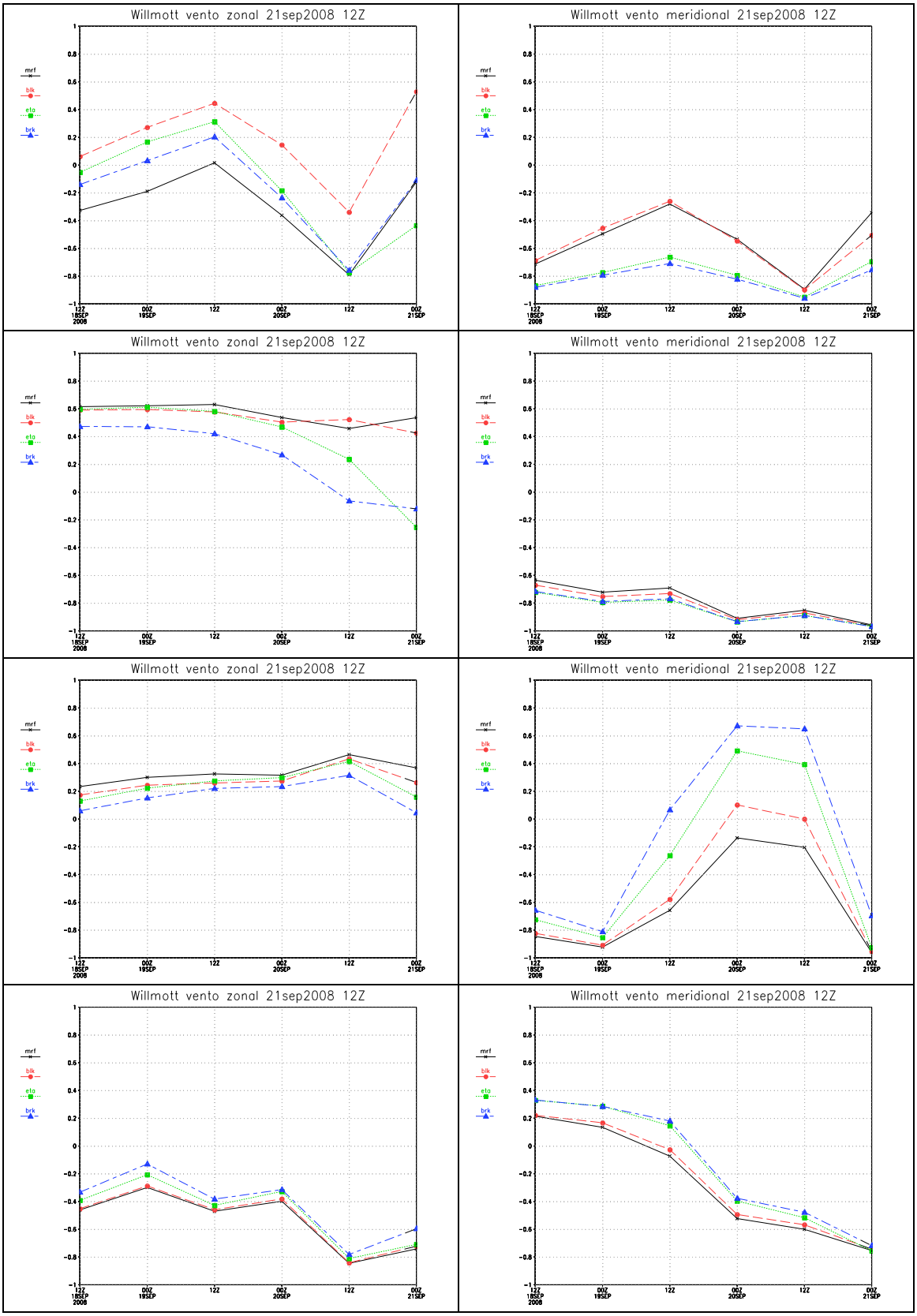
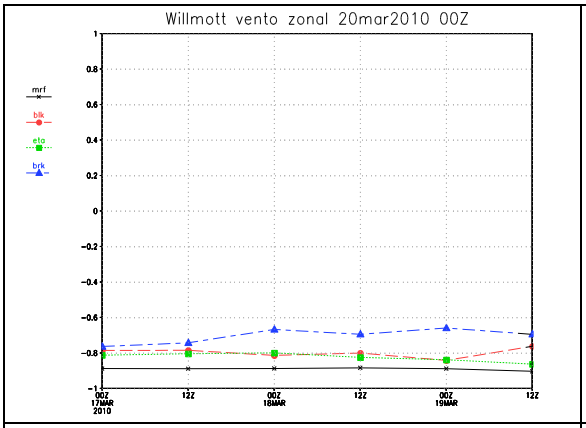
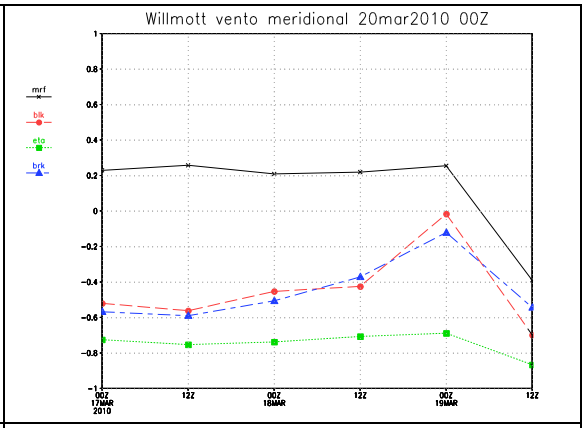


Figura 5.4.10 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 21set2008 às 12:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo). 2010

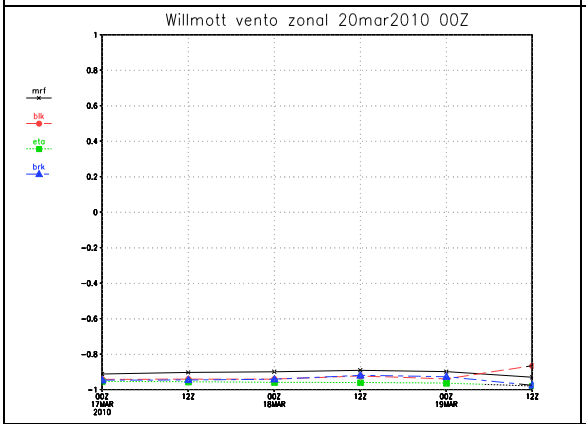
(a)



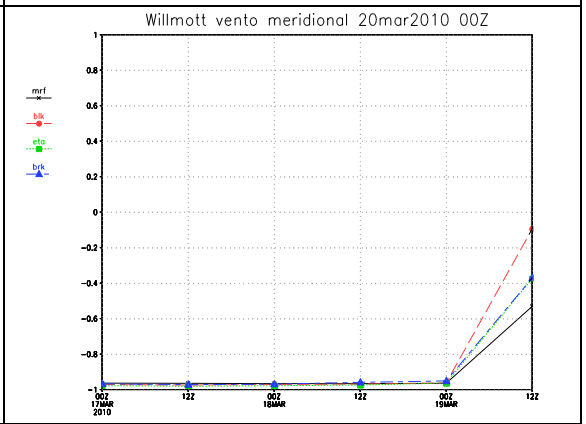
(b)



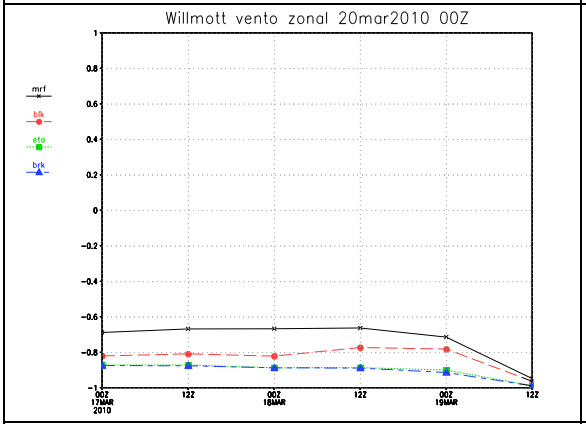
(c)



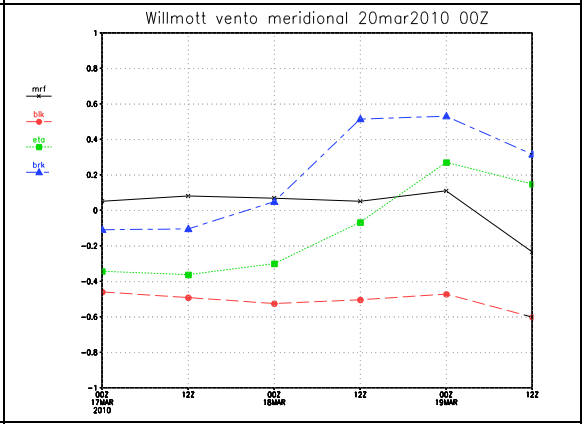
(d)



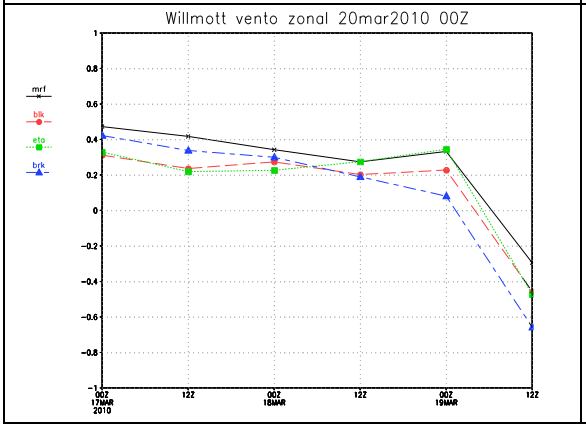
(e)



(f)



(g)



(h)

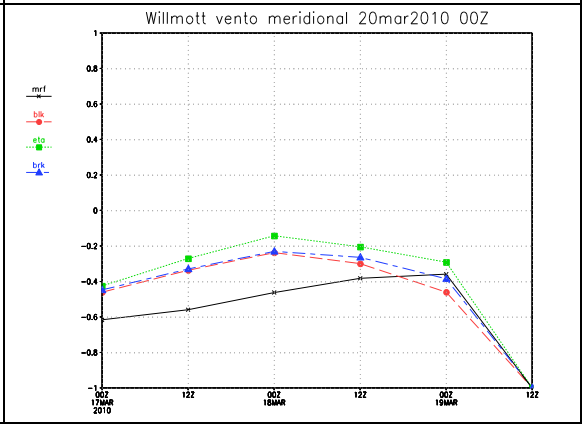
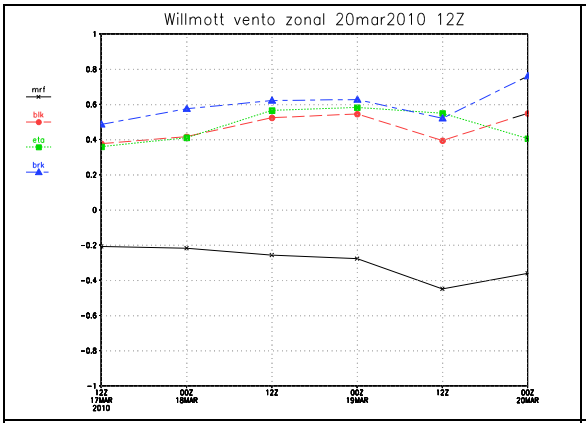
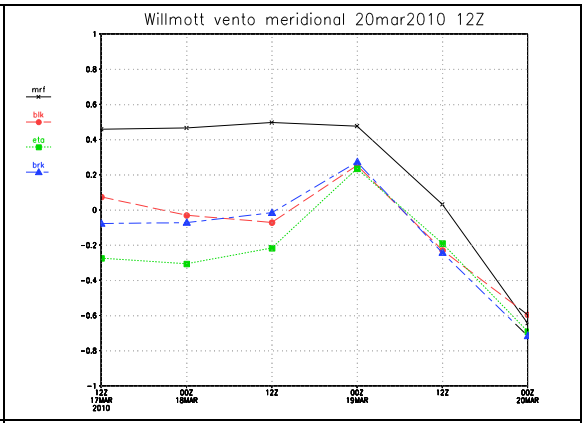


Figura 5.4.11 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 20mar2008 às 00:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

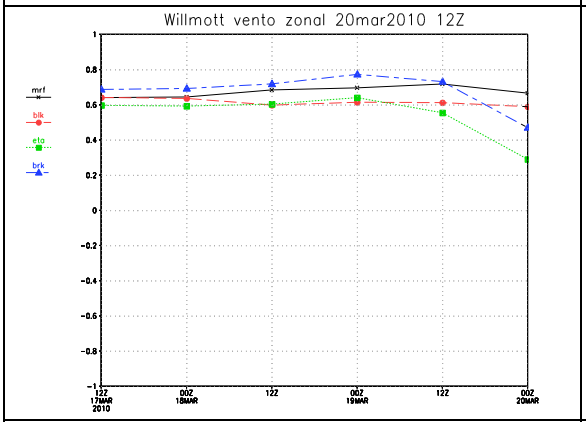
(a)



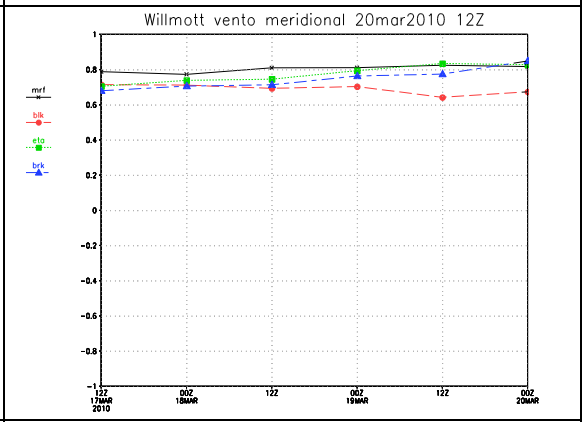
(b)



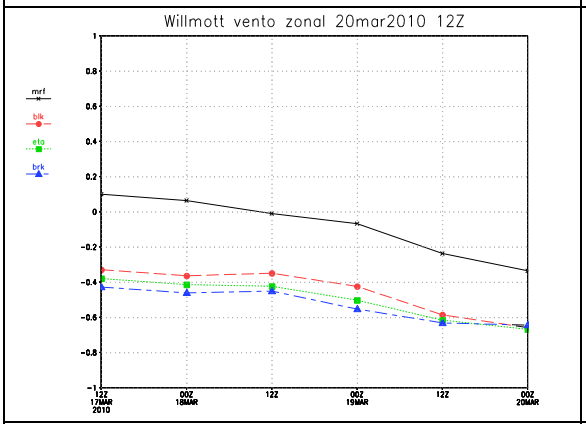
(c)



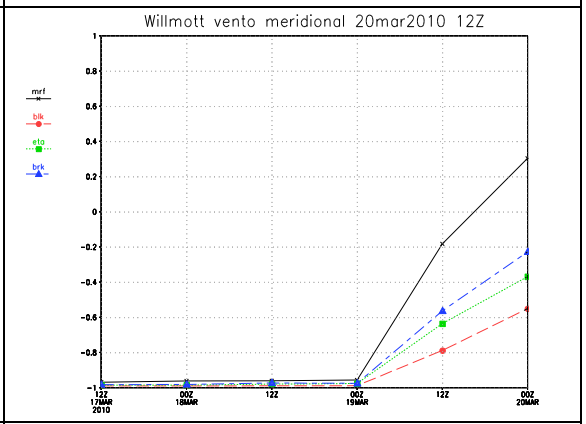
(d)



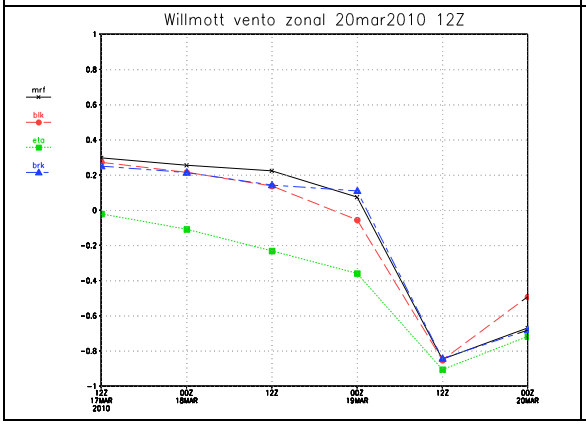
(e)



(f)



(g)



(h)

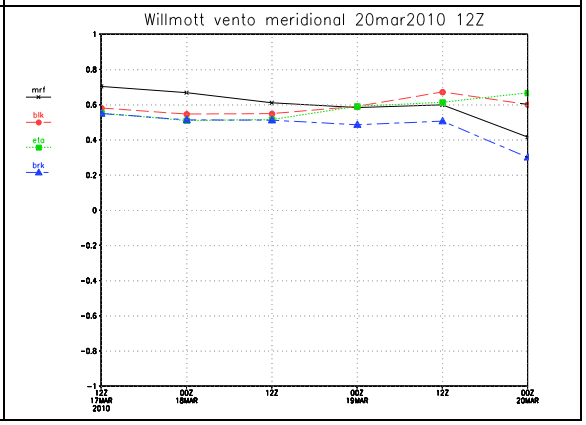
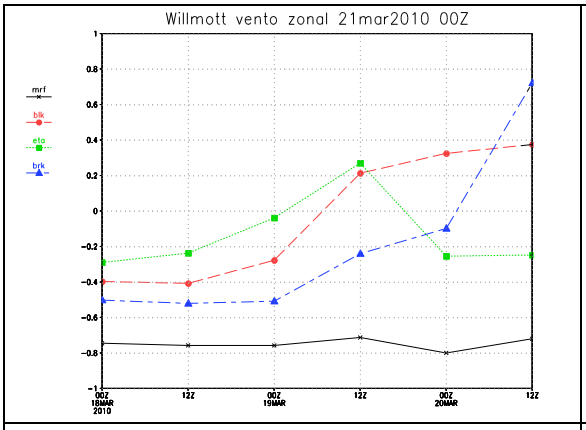
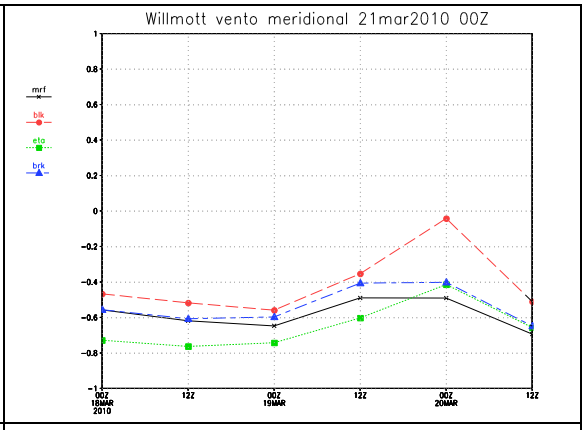


Figura 5.4.12 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 20mar2008 às 12:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

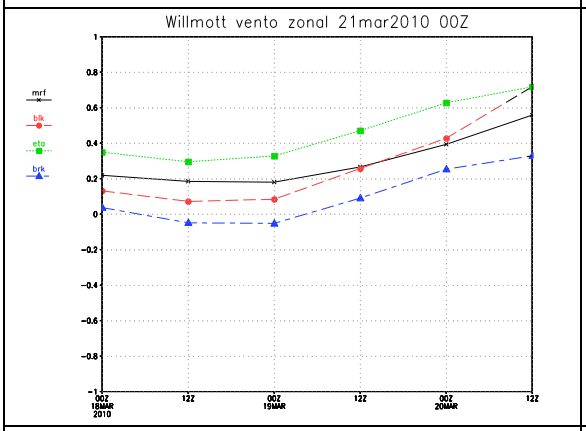
(a)



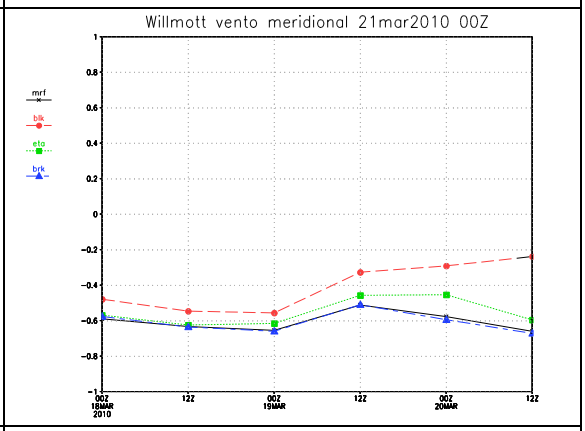
(b)



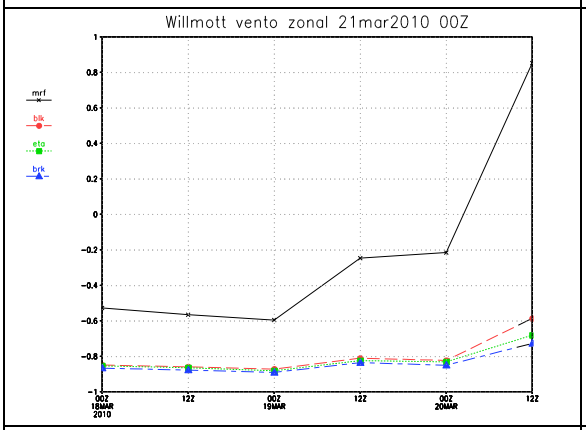
(c)



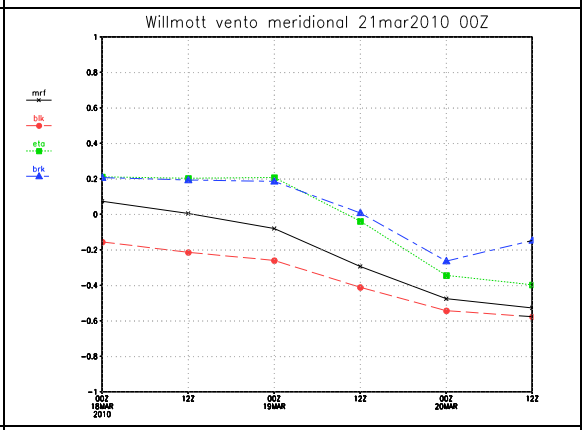
(d)



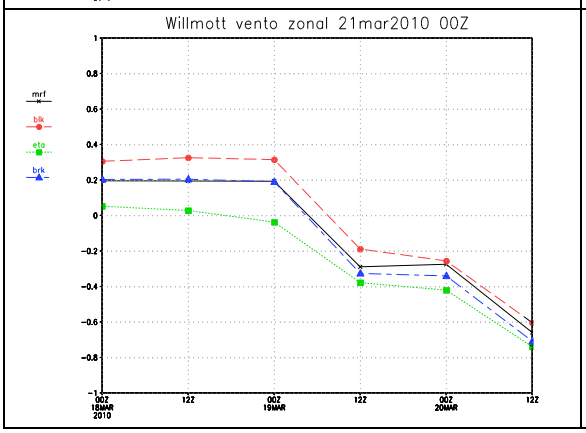
(e)



(f)



(g)



(h)

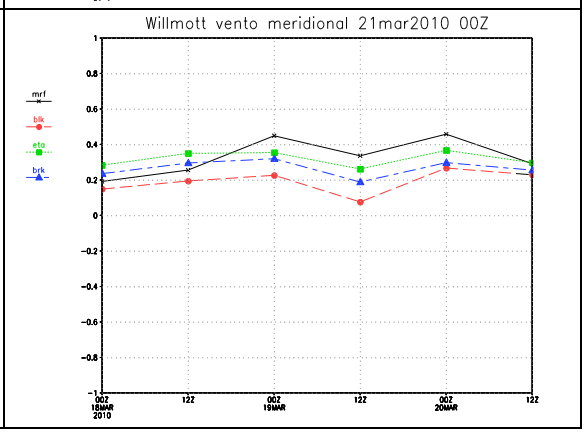
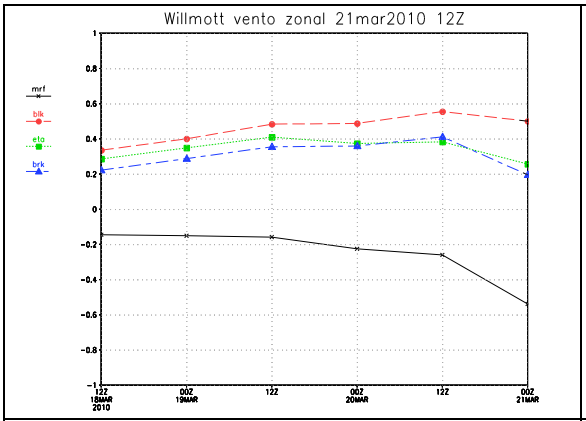
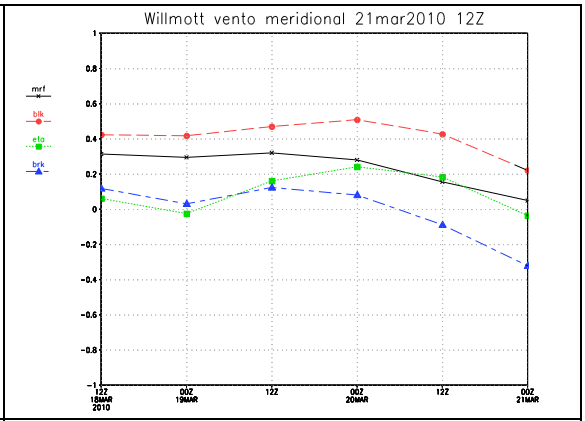


Figura 5.4.13 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 21mar2008 às 00:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

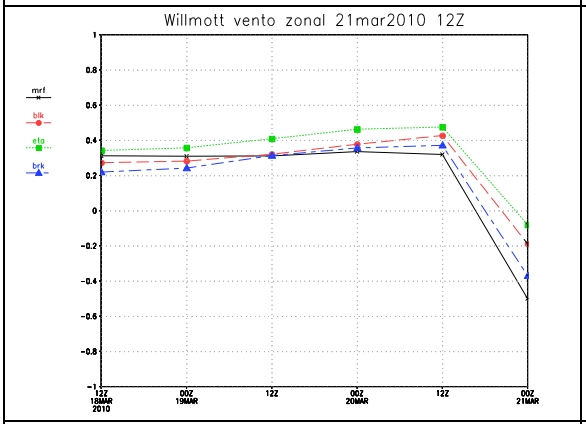
(a)



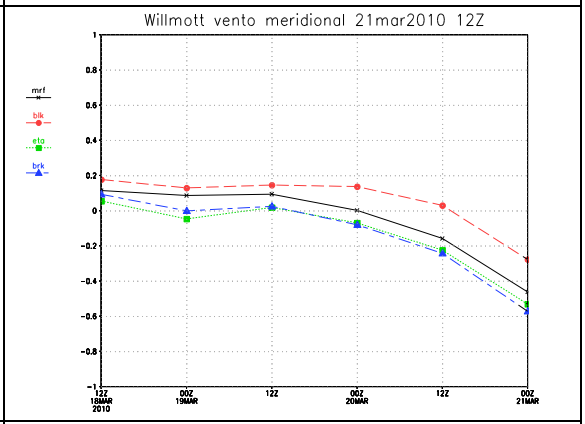
(b)



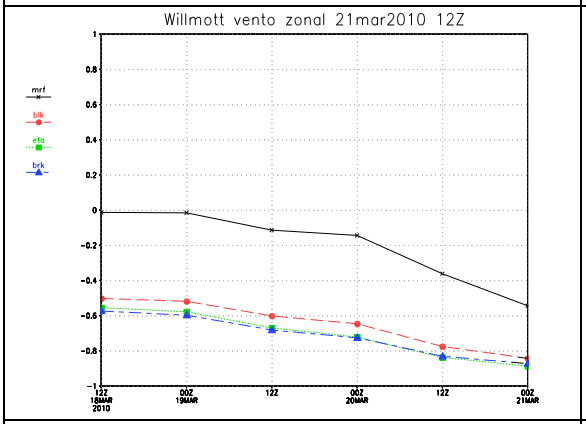
(c)



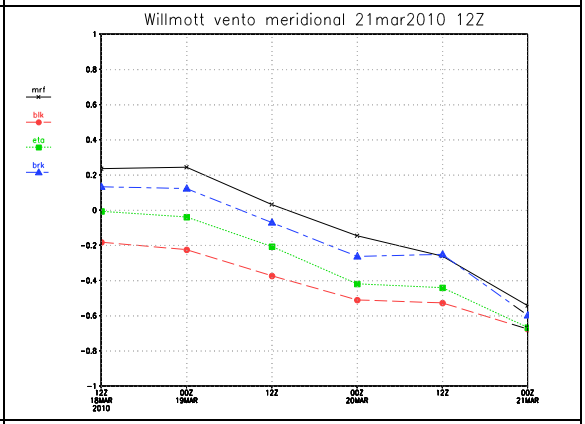
(d)



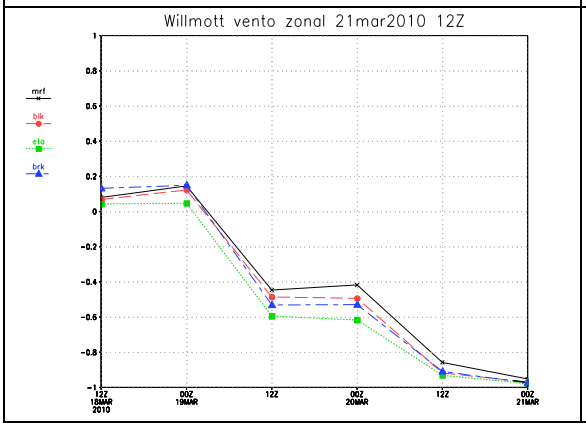
(e)



(f)



(g)



(h)

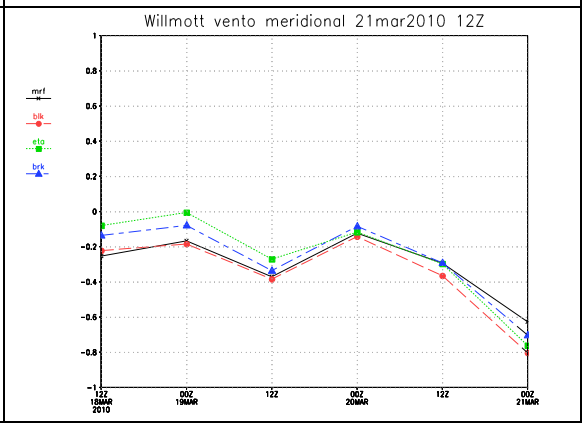
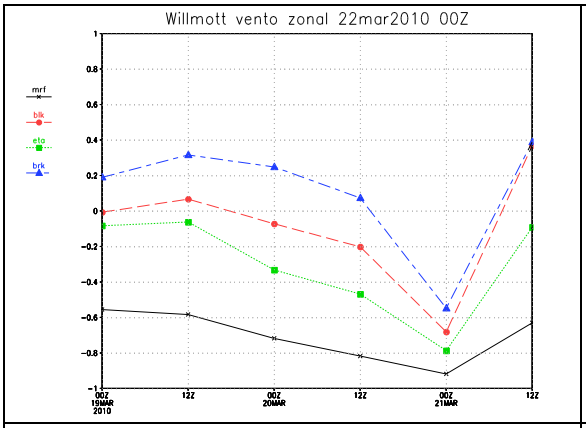
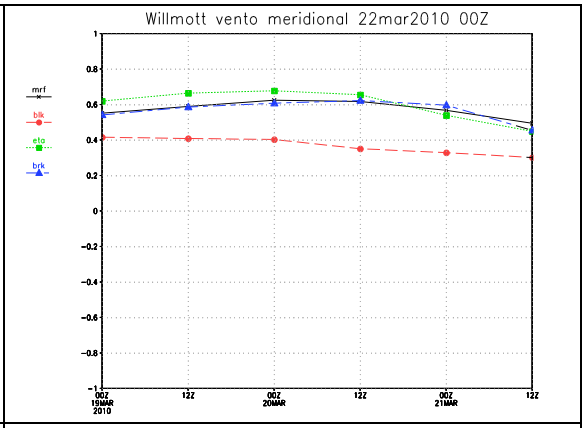


Figura 5.4.14 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 21mar2008 às 12:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

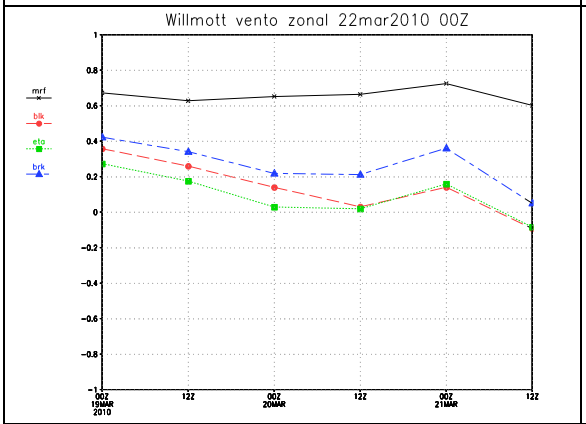
(a)



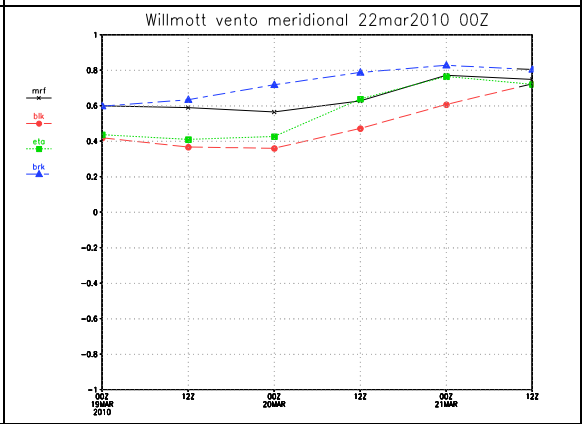
(b)



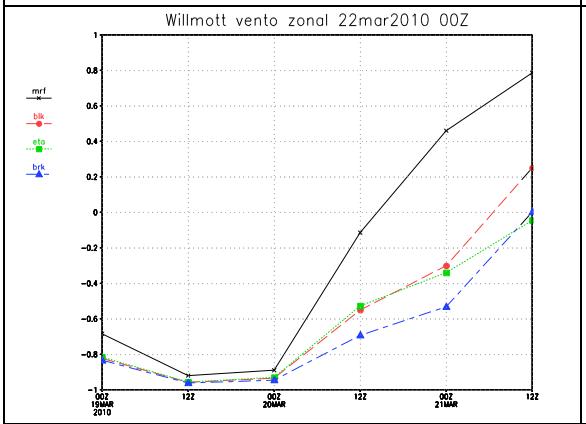
(c)



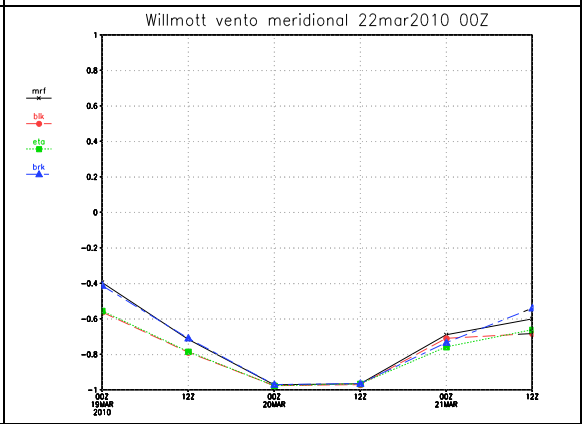
(d)



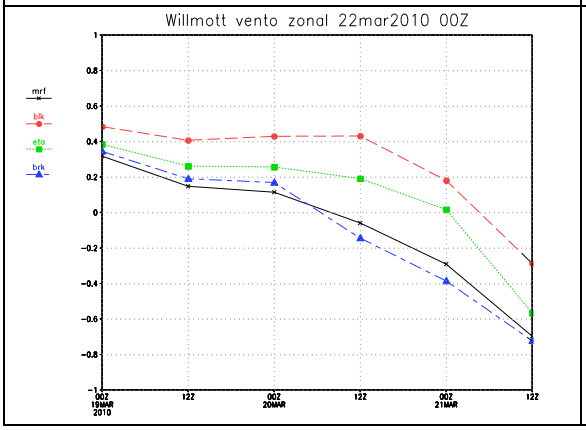
(e)



(f)



(g)



(h)

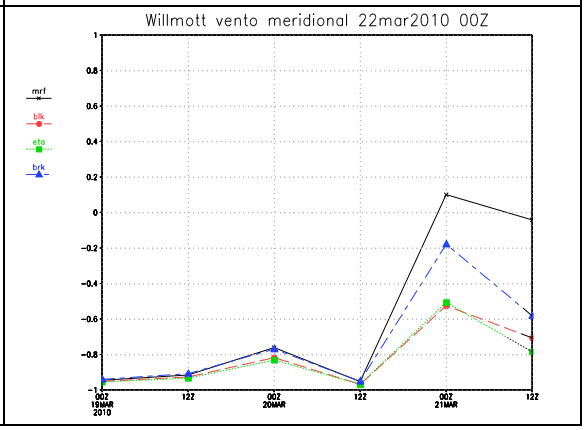
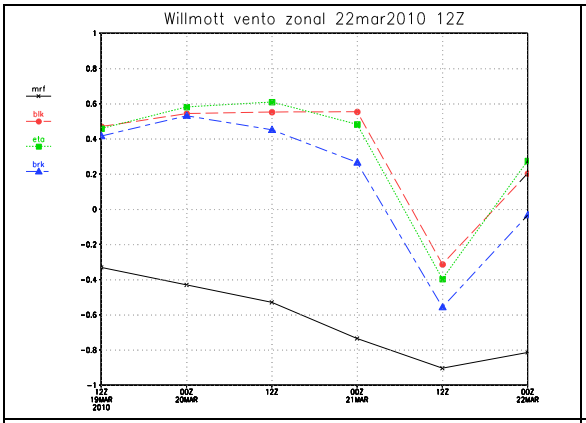
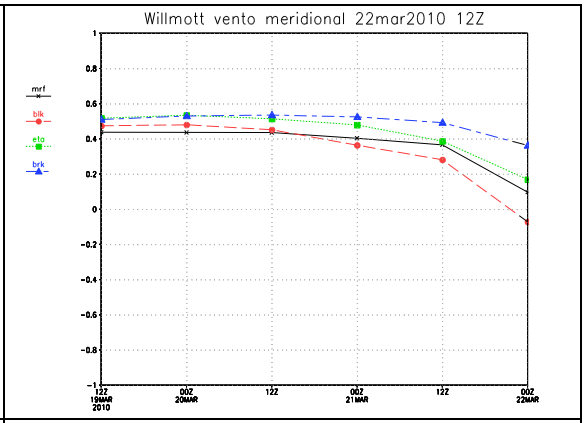


Figura 5.4.15 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 22mar2008 às 00:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

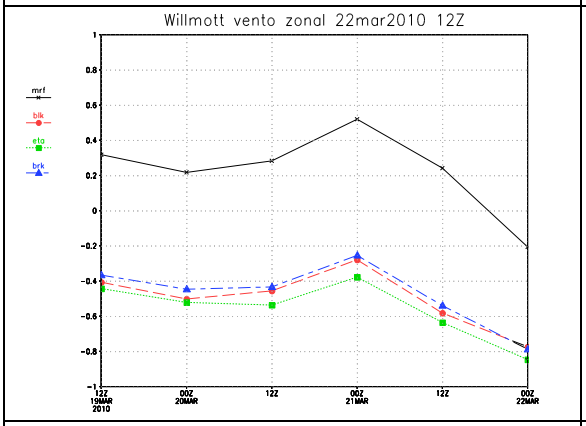
(a)



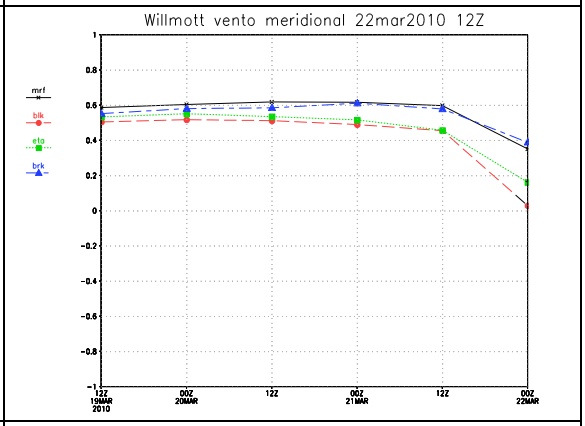
(b)



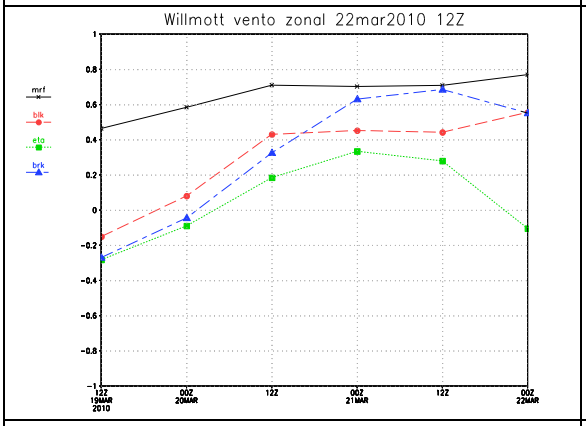
(c)



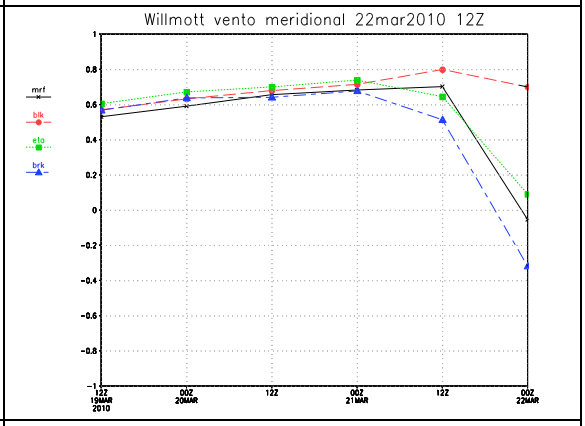
(d)



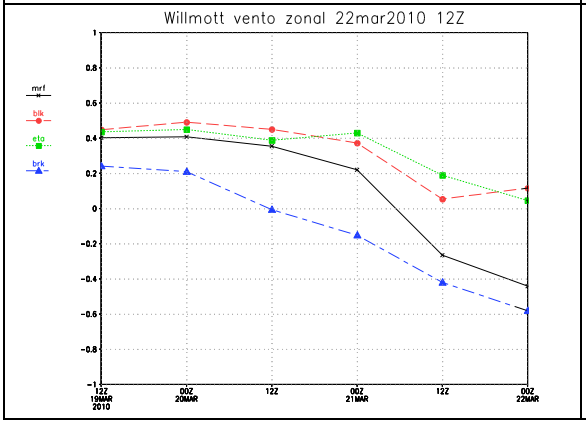
(e)



(f)



(g)



(h)

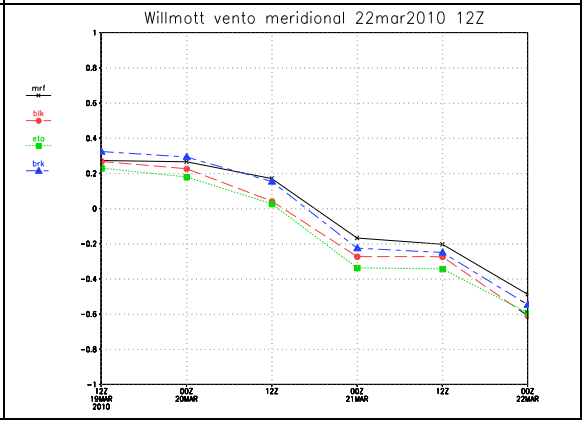


Figura 5.4.16 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 22mar2008 às 12:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

(g) (h)

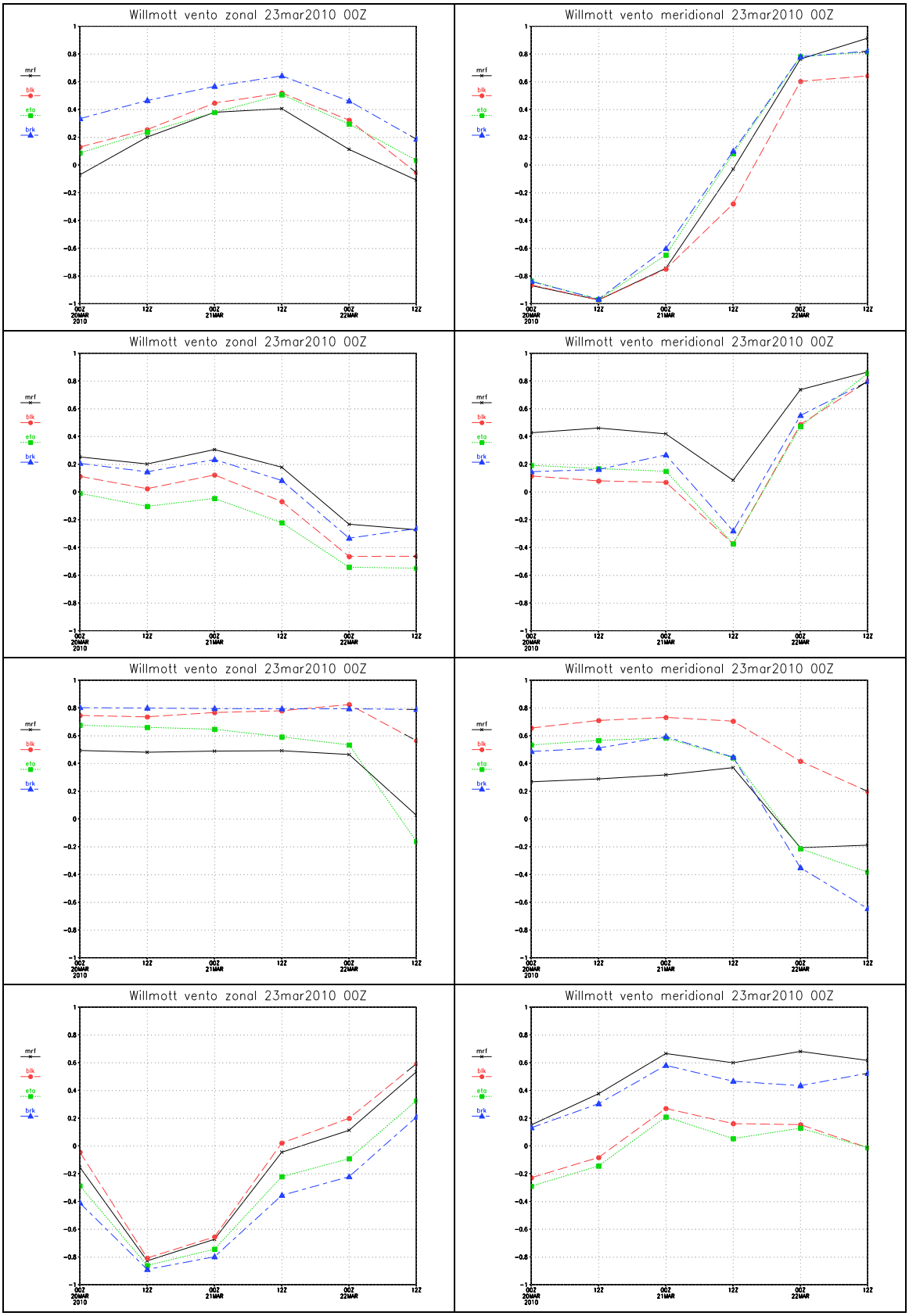
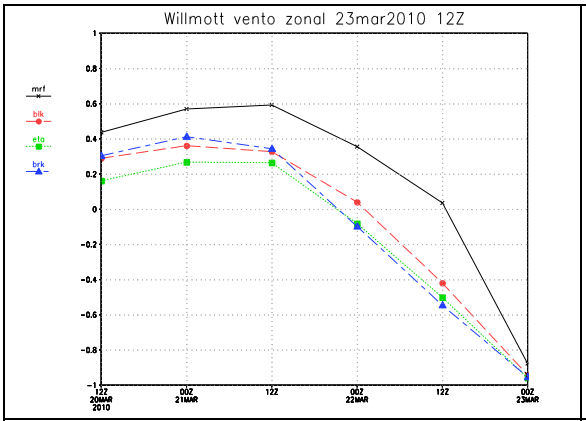
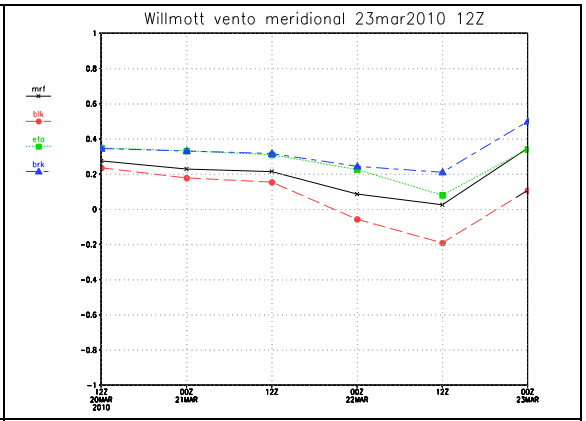


Figura 5.4.17 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 23mar2008 às 00:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

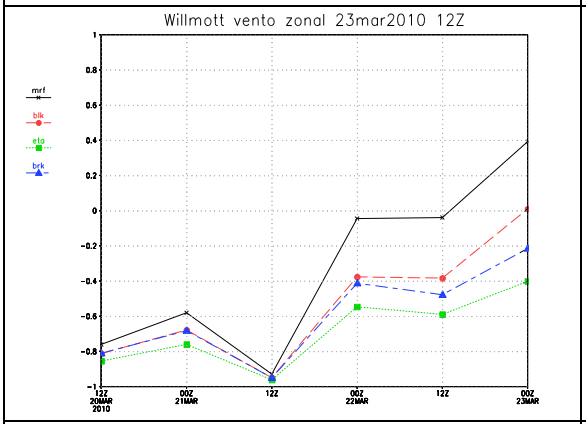
(a)



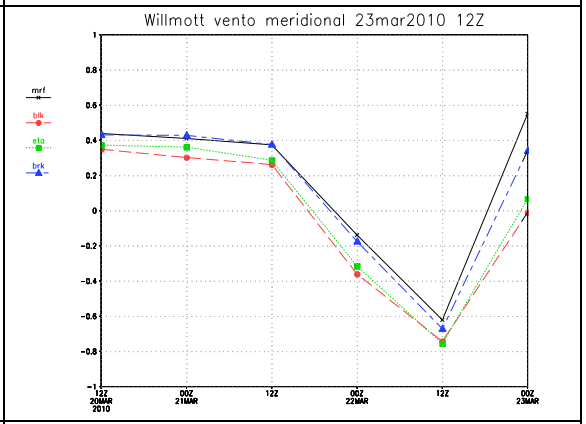
(b)



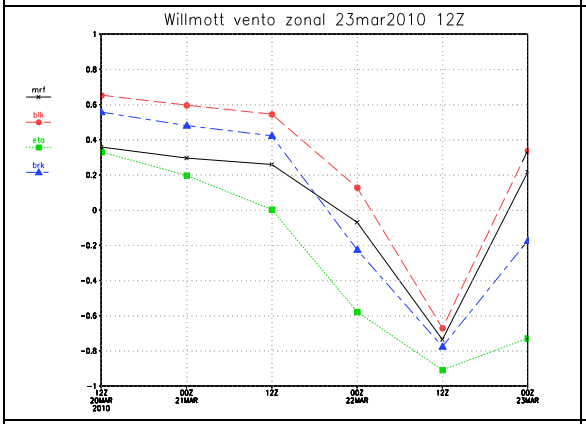
(c)



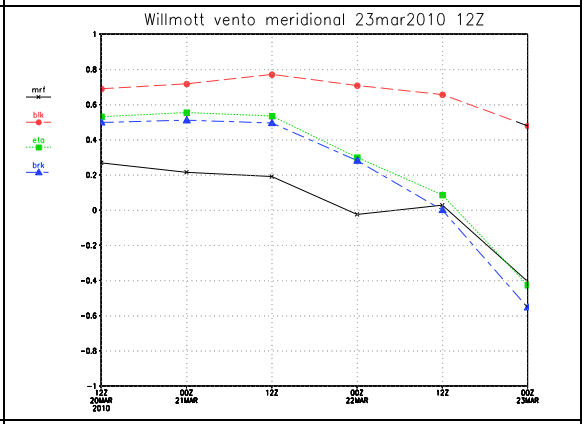
(d)



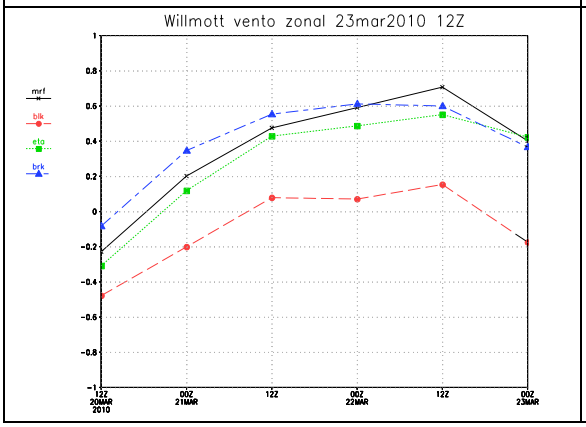
(e)



(f)



(g)



(h)

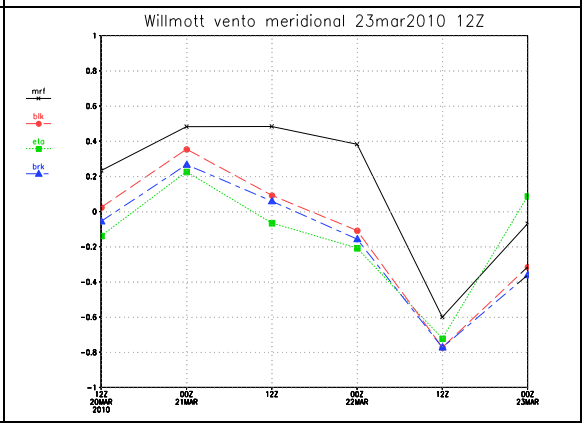
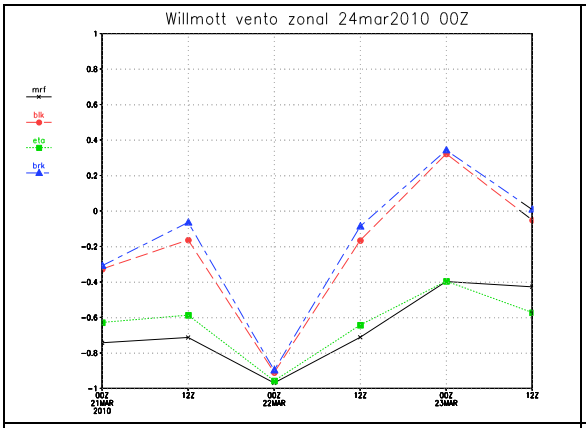
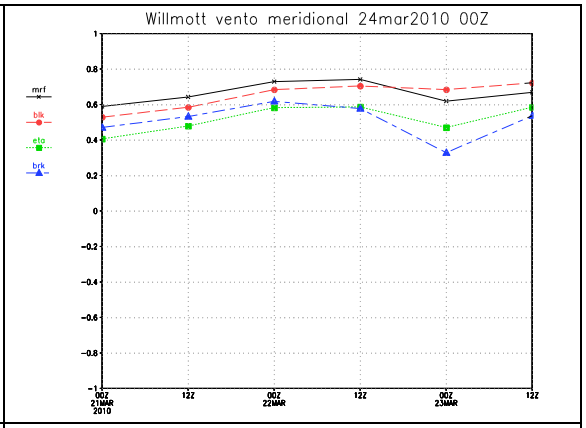


Figura 5.4.18 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 23mar2008 às 12:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

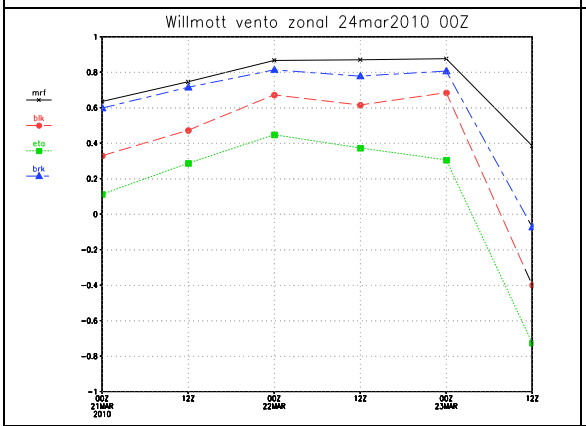
(a)



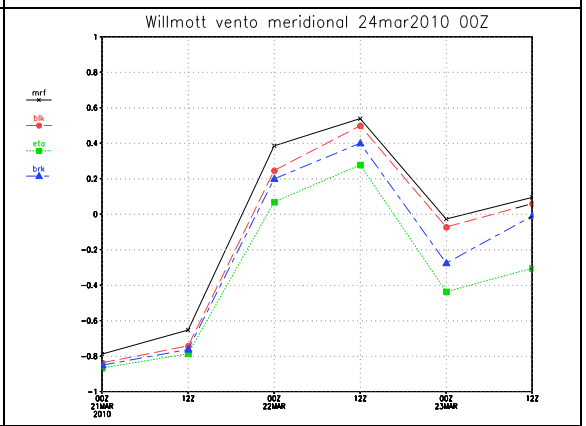
(b)



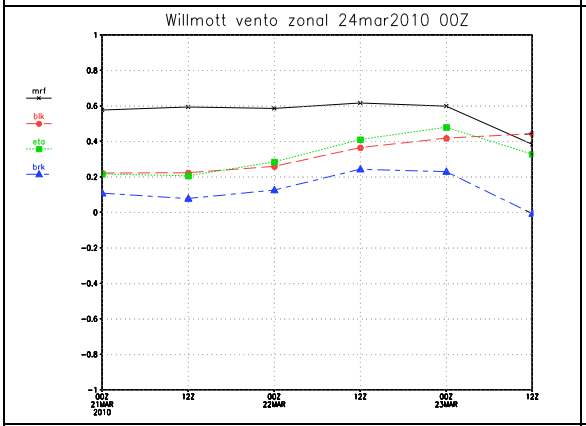
(c)



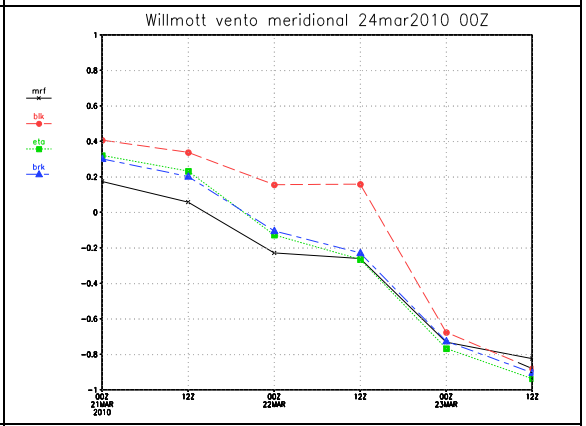
(d)



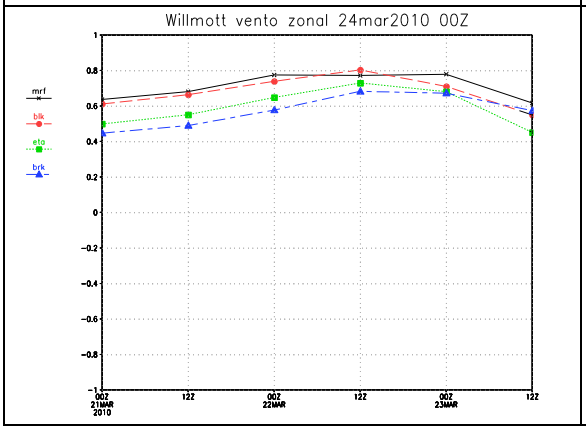
(e)



(f)



(g)



(h)

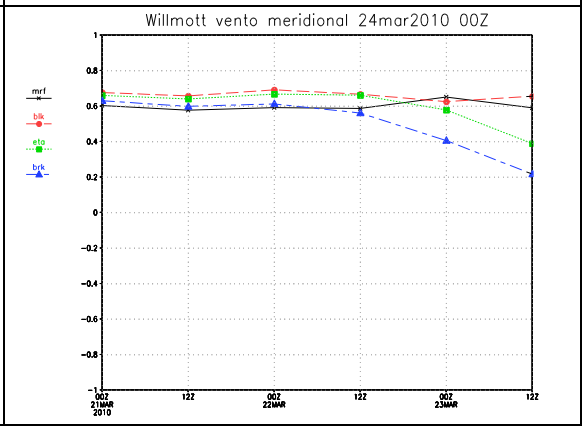
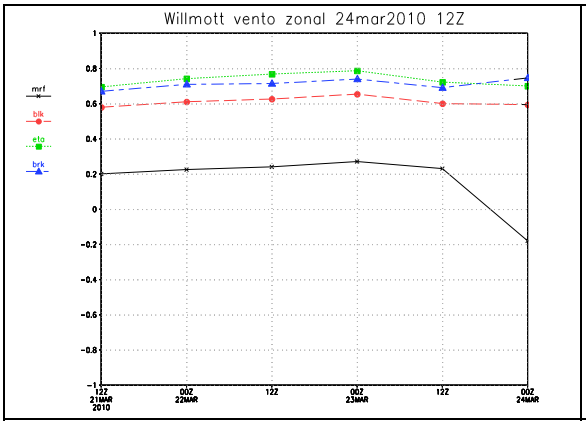
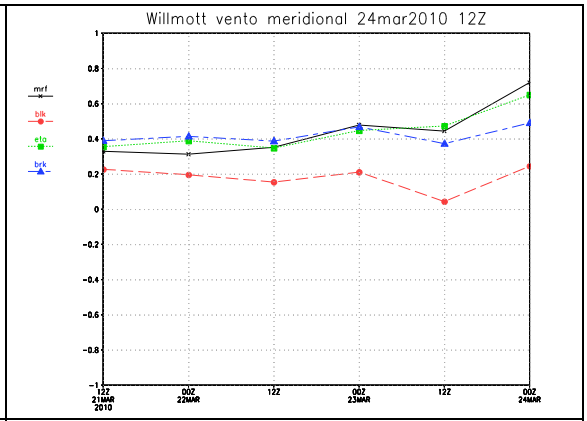


Figura 5.4.19 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 24mar2008 às 00:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

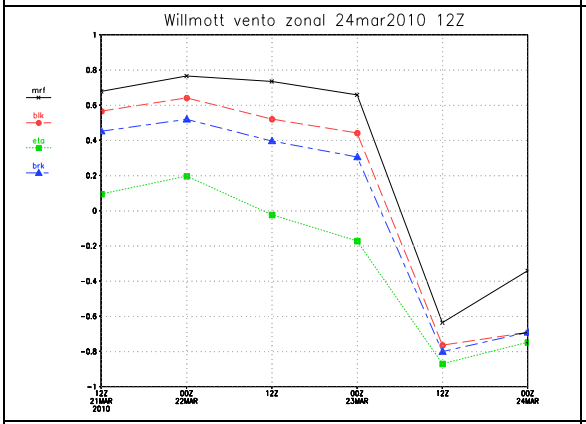
(a)



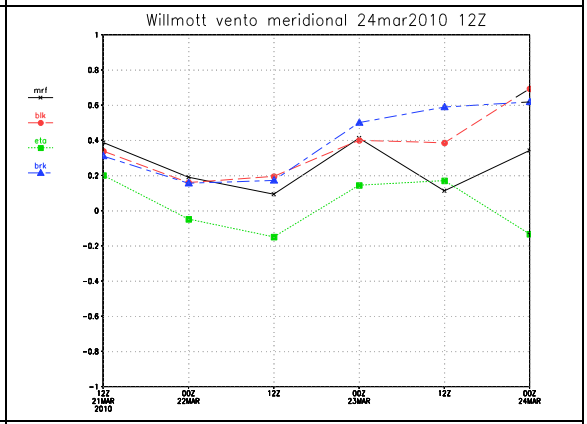
(b)



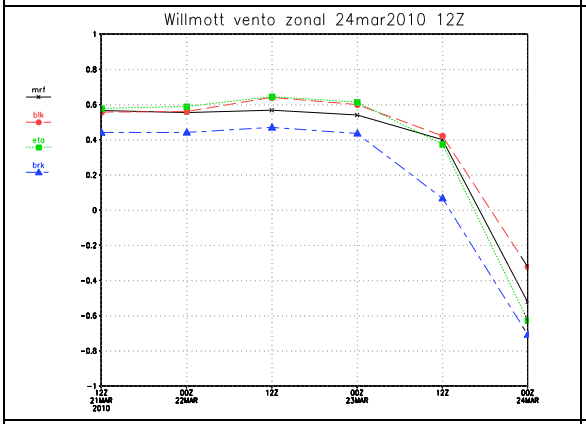
(c)



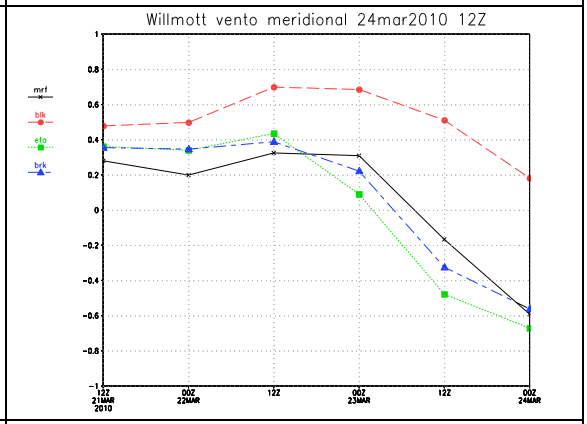
(d)



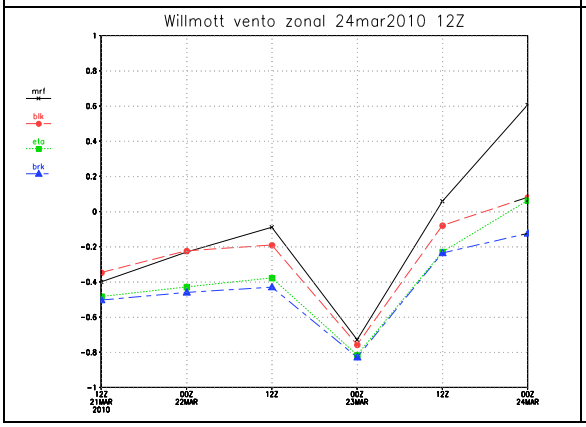
(e)



(f)



(g)



(h)

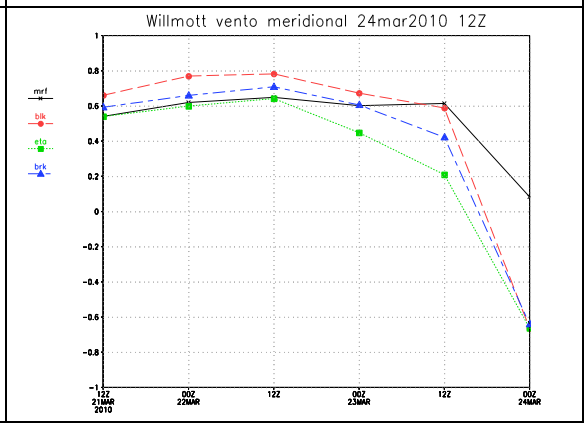
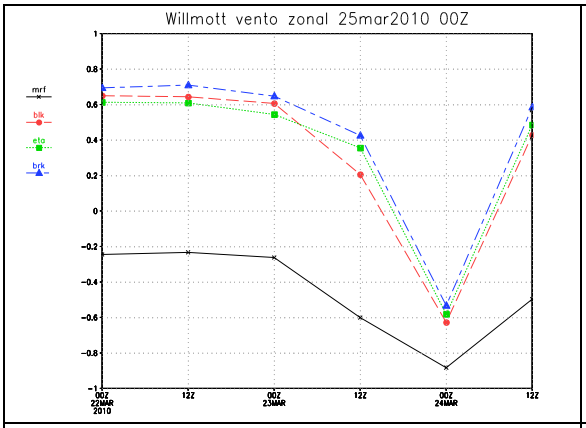
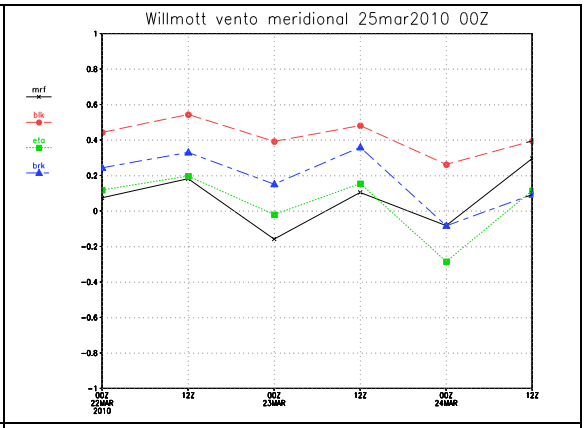


Figura 5.4.20 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 24mar2008 às 12:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

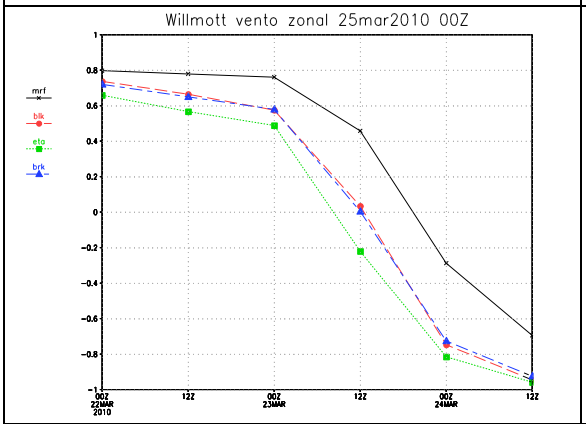
(a)



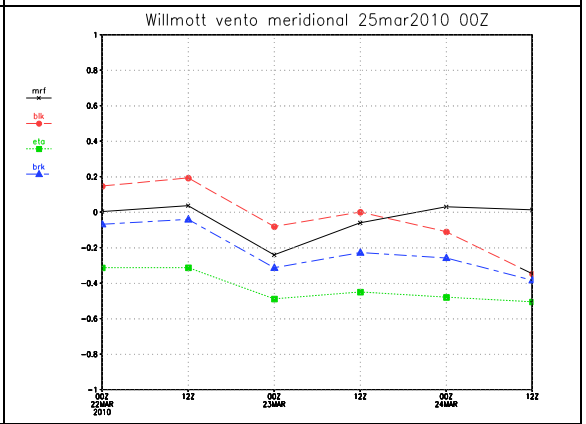
(b)



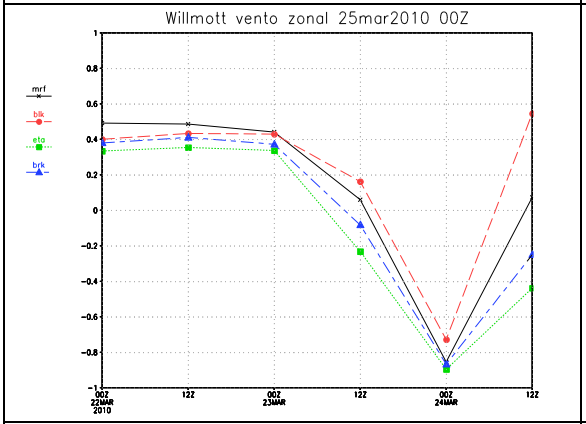
(c)



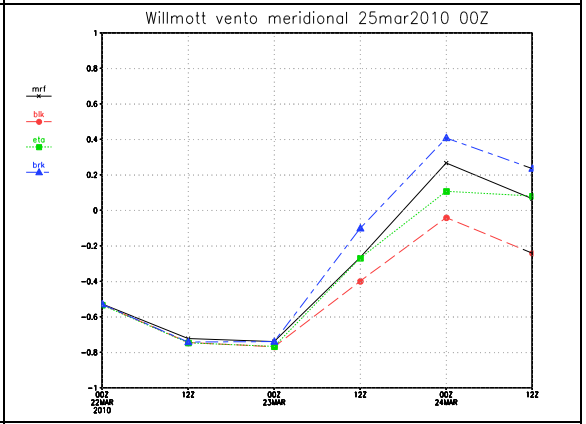
(d)



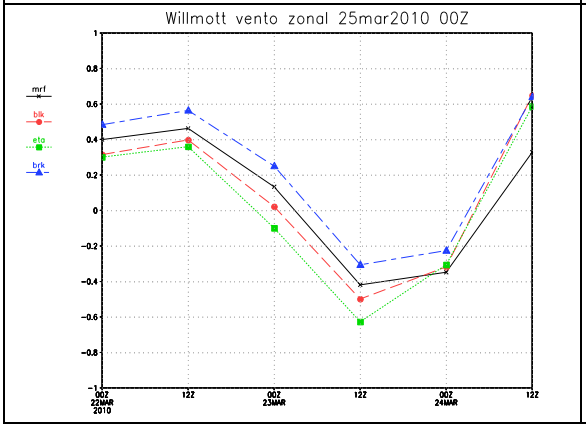
(e)



(f)



(g)



(h)

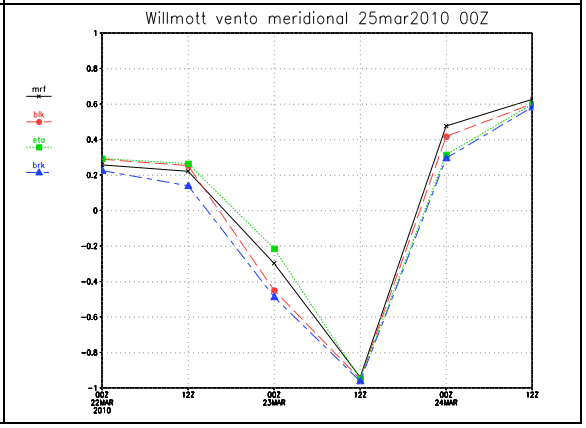


Figura 5.4.21 – Análise de Willmott das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 1000, 925, 850 e 700hPa para o dia 25mar2008 às 00:00UTC considerando-se as parametrizações MRF (linha contínua preta com traço); BLK (linha tracejada vermelha com bola cheia); ETA (linha pontilhada verde com quadrado) e B-T (linha tracejada azul com triângulo).

ANEXO A - ESQUEMAS MRF e BLK DE PBL

ESQUEMA MRF DE PBL

Breve descrição do modelo

Este esquema foi desenvolvido por Hong e Pan (1996) baseado em Troen e Mahrt (1986) e está descrito em Hong (1999).
A difusividade na Camada Limite está formulada de acordo com os resultados de investigação em LES – Large Eddy Simulation obtido por Troen e Mahrt (1986). Este esquema determina a altura da Camada Limite calculando o número global de Richardson e em seguida especifica o perfil do coeficiente de difusividade em função da altura da Camada Limite e determina os valores dos coeficientes em função dos fluxos à superfície. Os fluxos de calor sensível e calor latente são calculados neste esquema de acordo com a teoria de Monin-Obukhov (Long, 1988).

Neste esquema existe uma parametrização dos fluxos contrários ao gradiente que depende da velocidade convectiva e dos fluxos à superfície. De acordo com Dudhia (2000) é um esquema muito eficiente computacionalmente.

Os fluxos de calor e de umidade são calculados utilizando uma teoria K modificado no esquema MRF, de modo que o fluxo de qualquer variável arbitrária (C) é representado por:

$$w'C' = K_c \left(\frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_c \right)$$

Onde γ_g é um termo contragradiente. Hong e Pan (1996) definem γ_g como

$$\gamma_C = b \frac{\overline{w'C'_{sfc}}}{w_s \; z_i}$$

Onde w_s é uma escala de velocidade definida como $w_s = u_* \phi_m^{-1}$, b é uma constante assumida como sendo 7,8 e ϕ_m é o cisalhamento do vento adimensional

em função da estabilidade. A adição γ_g a 6.1 permite os fluxos contragradientes de ser representado pela parametrização. Hong e Pan (1996) definiu o coeficiente de troca de momentum K_{zm} ser:

$$K_{zm} = kw_s z \ \ 1 - \frac{z}{z_i}^{\ p}$$

Onde k é a constante de von Kármán (supostamente 0,4), z é a altura acima do solo, e p é assumido ser de 2,0. O coeficiente de transferência de calor (e similarmente umidade) foi relacionado com K_{zm} com o número de Prandtl (Pr), o qual é definido como:

$$P_r = \ \frac{\phi_l}{\phi_m} + \ bk \ \frac{0.1 \ z_i}{z_i}$$

De tal forma que $K_{zt} = \ K_{zm} \ \ P_r$.

Esquema de difusão vertical MRF

- Não há parametrização explícita da camada limite.
- Coeficientes de difusividade são parametrizados como funções do número de Richardson local.
- A aproximação local-K (Louis 1979) é usada tanto para camada limite e atmosfera livre.
- Restrições quando a atmosfera é bem misturada devido aos fluxos contragradientes. Desta maneira, o método não é bem comportado para condições instáveis.

Equações do esquema MRF de PBL

Difusividade não local: Camada de mistura

$$\theta_s = \theta_{va} + \theta_T \left[= b \frac{\overline{(w'\theta_v')_0}}{w_s h} \right],$$

$$h = \mathrm{Rib}_{cr} \frac{\theta_{va} |U(h)|^2}{g(\theta_v(h) - \theta_s)},$$

Difusividade não local

Monin-Obukov length

$$L = \frac{-u_*^3}{k(g/\theta_{v0})(\overline{w'\theta_v'})_0}.$$

stable regime $[\overline{(w'\theta_v')_0} > 0]$,

$$\phi_m = \phi_t = \left(1 + 5 \frac{0.1h}{L}\right),$$

Turbulent velocity scale

$$w_s = u_* \phi_m^{-1},$$

$$K_{zm} = k w_s z \left(1 - \frac{z}{h}\right)^p$$

Friction velocity

$$u_* = [(\overline{u'w'})_0^2 + (\overline{v'w'})_0^2]^{1/4}.$$

unstable and neutral conditions $[\overline{(w'\theta_v')_0} \leq 0]$,

$$\phi_m = \left(1 - 16 \frac{0.1h}{L}\right)^{-1/4}, \quad \text{for } u \text{ and } v$$

$$\phi_t = \left(1 - 16 \frac{0.1h}{L}\right)^{-1/2}, \quad \text{for } \theta \text{ and } q,$$

Prandtl number

$$\mathrm{Pr} = \left(\frac{\phi_t}{\phi_m} + bk \frac{0.1h}{h}\right),$$

$K_{zh} = K_{zm} / Pr$

ESQUEMA BLK DE PBL

Breve descrição do modelo

Este modelo foi desenvolvido por Blackadar e revisto por Zhang e Anthes (1982). A parametrização da camada limite neste modelo tem como objetivo o cálculo da mistura vertical das seguintes variáveis: vento horizontal, temperatura potencial, razão de mistura e gelo e água liquida das nuvens, (Grell et all., 1995).

De acordo com Grell (1995) a velocidade de atrito neste modelo é calculada em função da turbulência definida para quatro casos: convecção livre, convecção forçada, turbulência mecânica e estável. A convecção livre e forçada que correspondem a um número global de Richardson negativo correspondem a atmosferas estaticamente instáveis em que, na primeira domina a convecção devido a gradientes de temperatura e na segunda a convecção devido à velocidade do vento. A turbulência mecânica e o caso estável correspondem a um número global de Richardson positivo sendo no primeiro caso menor que o número crítico de Richardson e no segundo maior. Nestes dois casos a atmosfera é estaticamente estável embora no primeiro caso a velocidade do vento torne a atmosfera turbulenta.

Bulk Richardson

$$\mathbf{Rb} = \frac{g z_a}{\theta_a} \frac{(\theta_a - \theta_g)}{(V_a)^2},$$

Rb >= 0.2 Muito estável (sem turbulência)

0.2 > Rb > 0 turbulência mecânica amortecida

Rb <= 0 e |z_h/L| <= 1.5 Convecção forçada (marginalmente instável)

Rb <= 0 e |z_h/L| >1.5 convecção livre

De acordo com Zhang e Anthes (1982) este modelo considera dois regimes de Camada Limite, o primeiro é o regime noturno e abrange os casos da atmosfera estável ou pouco instável (convecção forçada, no caso estável e turbulência mecânica) e segundo é o regime de convecção livre. No regime noturno é usada a teoria-k em que k é definido em função do número local de Richardson. No regime de convecção livre são usados os princípios desenvolvidos por Blackadar (1996).

Esquema Blackadar		
Estável	Módulo noturno	Teoria-K (fechamento turbulência de primeira ordem)
Instável	Módulo de convecção livre	Modelo de pluma de convecção

As esquações do modelo para o regime noturno são:

$$\frac{\partial \theta_a}{\partial t} = [K_{h1}(\theta_{3/2} - \theta_a)/(z_{3/2} - z_a) + H_g/(\rho C_p)]/z_1 ,$$

$$\frac{\partial q_a}{\partial t} = [K_{q1}(q_{3/2} - q_a)/(z_{3/2} - z_a) + Q_g/\rho]/z_1 ,$$

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} = [K_{m1}(u_{3/2} - u_a)/(z_{3/2} - z_a) - \tau_g u_a/(\rho V_a)]/z_1 + f(v_a - v_{ga}),$$

$$\frac{\partial v_a}{\partial t} = [K_{m1}(v_{3/2} - v_a)/(z_{3/2} - z_a) - \tau_g v_a/(\rho V_a)]/z_1 - f(u_a - u_{ga}).$$

As esquações do modelo para o regime de convecção livre são:

$$\frac{\partial \theta_a}{\partial t} = -(H_1 - H_g)/(\rho C_p z_1).$$

$$\frac{\partial q_a}{\partial t} = [Q_g - \bar{m} \sum_{i=2}^{l} (q_a - q_{i-1/2})\Delta z]/(\rho z_1),$$

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} = f(v_a - v_{ga}) - \left[\frac{\tau_g u_a}{\rho V_a} - \bar{m} \sum_{i=2}^{l} (u_a - u_{i-1/2})\Delta z\right] \Big/ z_1 ,$$

$$\frac{\partial v_a}{\partial t} = -f(u_a - u_{ga}) - \left[\frac{\tau_g v_a}{\rho V_a} - \bar{m} \sum_{i=2}^{l} (v_a - v_{i-1/2})\Delta z\right] \Big/ z_1 ,$$

Determinação do regime de estabilidade a cada novo passo de tempo:

$$\frac{1}{L} = -\frac{kgH_1}{C_p \rho \theta_a u^{*3}} .$$

$$\psi_m = 0.0954 - 1.86(z_a/L) - 1.07(z_a/L)^2 - 0.249\left(\frac{z_a}{L}\right)^3,$$

$$\psi_h = 0.201 - 3.23(z_a/L) - 1.99\left(\frac{z_a}{L}\right)^2 - 0.474\left(\frac{z_a}{L}\right)^3.$$

Estudos de sensibilidade realizados com este modelo por Zhang e Anthes (1982) concluíram que a disponibilidade de umidade é o fator mais critico. Variações na disponibilidade de umidade no solo alteram muito o valor dos integrais verticais dos fluxos de calor latente e sensível e da altura máxima da camada limite. À medida que a disponibilidade de umidade aumenta, o ambiente fica mais úmido e mais frio e a camada limite mais baixa.

No estudo de sensibilidade em relação à rugosidade, as conclusões foram que aumentar a rugosidade, aumenta o atrito, a evaporação e a mistura. Isto tem como consequências uma diminuição da temperatura e da velocidade do vento que no caso em estudo foram respectivamente de 4ºC e de 7m/s.

Em relação à capacidade térmica o modelo mostra-se menos sensível quando os fluxos de calor latente dominam e mais sensível quando os fluxos de calor mais importantes são os radiativos. Os resultados obtidos pelo modelo não se mostraram muito sensíveis a variações do albedo. O modelo é bastante sensível às condições sinóticas nomeadamente o vento geostrófico.

Análise de Sensibilidade do Esquema BLK:

- Disponibilidade de umidade (Am)
- Comprimento de rugosidade (Z0)
- Capacidade térmica (Cg)
- Albedo (A)

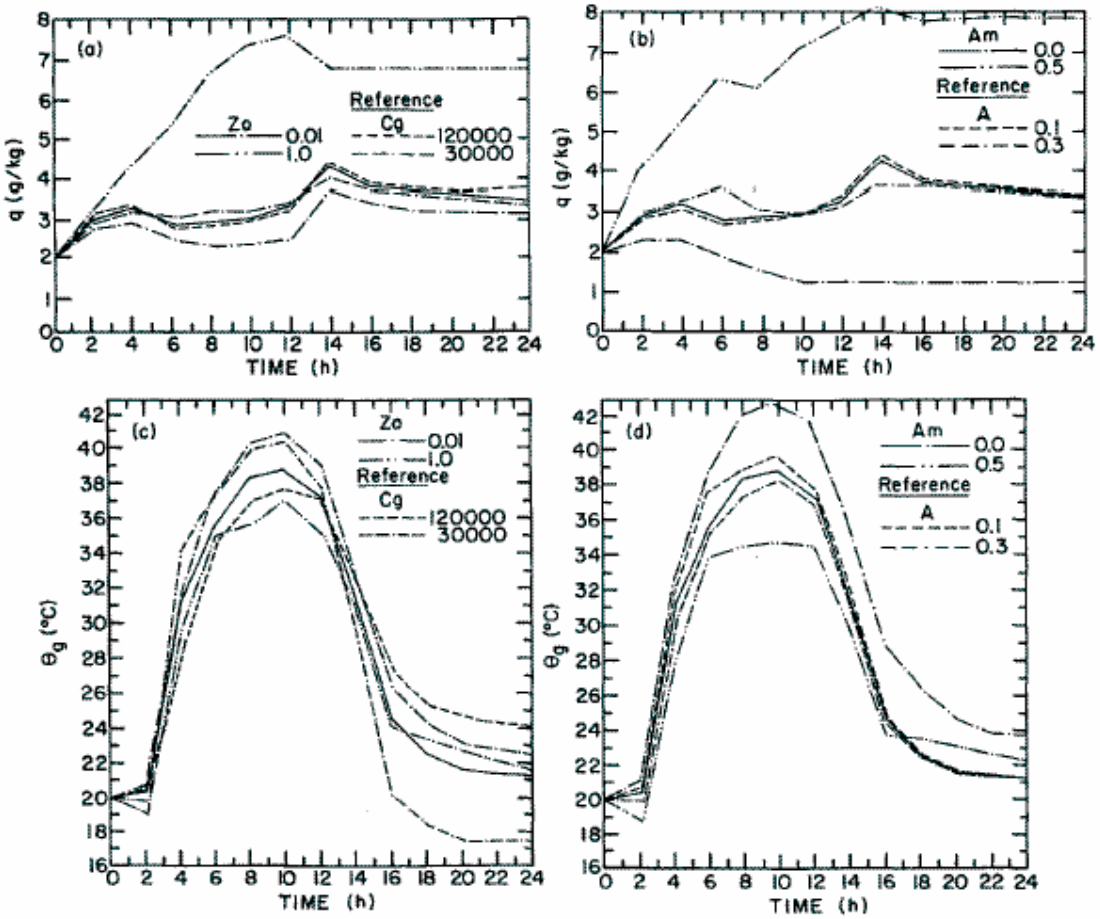


FIG. 3. Temporal variation of surface layer specific humidity q and ground potential temperature θ_g for sensitivity experiments in which roughness parameter z_0, thermal capacity C_g, moisture availability A_m, and albedo A are varied. See text for details.

Fonte: Zhang and Anthes, (1982), J. APPL. METEOR., 1594-1609