



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbge



Circulações locais induzidas pela topografia no Vale do Paraíba e na Serra da Mantiqueira: um estudo de caso para o período de 16 e 22 de agosto de 2010

Bruno de Campos¹, Michelle S. Reboita², Vanessa S. B. Carvalho³, Cássia G. Dias⁴

¹Graduando em Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI, Itajubá, MG. E-mail para correspondência: bcampos.f90@gmail.com (Campos, B.); ^{2,3}Docente do Instituto de Recursos Naturais, UNIFEI; ²mireboita@gmail.com, ³vanessa.silveira@gmail.com; ⁴Mestranda em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UNIFEI. ⁴cassia_dias7@yahoo.com.br.

Artigo recebido em 27/04/2016 e aceito em 16/05/2016

RESUMO

Este estudo identificou e analisou o comportamento de circulações locais induzidas pela topografia no Vale do Paraíba e na Serra da Mantiqueira, entre os dias 16 e 22 de agosto de 2010, por meio de uma simulação numérica com o modelo WRF. O modelo foi dirigido com as saídas do GFS-FNL e a simulação validada com dados de estações meteorológicas. Os maiores valores de correlação entre simulação e observação foram obtidos para a temperatura do ar e os menores para a intensidade e direção dos ventos. Mesmo assim, o WRF foi capaz de representar as mudanças no sentido do vento associadas à circulação de brisa vale e montanha. O modelo simulou durante o dia a brisa de vale e durante à noite, a brisa de montanha. A brisa de vale iniciou-se aproximadamente entre 10 UTC e 14 UTC e a de montanha às 22 UTC, sendo que a fase de transição entre a brisa de montanha para a de vale ocorreu entre as 16 e 20 UTC. Os resultados obtidos também são apresentados por meio de seções verticais das células de circulação de brisa.

Palavras-chave: WRF, modelagem atmosférica, brisas de vale e de montanha.

Local circulations produced by topography in the Paraíba Valley and Mantiqueira Mountains: a study case for the period between the 16th and 22nd of August 2010

ABSTRACT

This study has identified and analysed the behaviour of local circulations driven by topography heterogeneities at the Paraíba Valley and Mantiqueira Mountains, between 16th and 22nd of August 2010, using a numerical simulation with the WRF model. The model was driven with the GFS-FNL analysis and the simulations were validated with weather stations datasets. The highest correlation values between simulation and observations were computed for air temperature and the lowest for wind speed and direction. Even though, the WRF was able to represent the changes in the wind sense related to the breeze circulation. The model simulated the valley breeze during the day and the mountain breeze at night. The valley breeze started approximately between 10 UTC and 14 UTC and the mountain breeze at 22 UTC, where the transitional stage from valley to mountain breeze lays between 16 and 20 UTC. Further results are also presented via vertical cross sections of the breeze circulation cells.

Keywords: WRF, atmospheric modelling, mountain and valley breezes.

Introdução

A região sudeste do Brasil possui uma topografia peculiar. No seu setor sudeste, localizam-se o Vale do Paraíba, a Serra da Mantiqueira, cujo o pico mais alto atinge 2400 m, e a Serra do Mar, com altitude de até 2000 m.

Em regiões de topografia com vales e elevações, geralmente, ocorre o desenvolvimento de brisas de vale e de montanha. A brisa de vale se desenvolve durante o dia devido ao aquecimento do ar adjacente às encostas ser mais rápido do que o do ar adjacente aos vales em um mesmo nível. Por outro lado, durante à noite, o resfriamento

radiativo do ar nas encostas das montanhas ocorre de forma mais rápida do que o na região de vale, gerando um gradiente de pressão e, subsequentemente, o escoamento que se dirige em direção ao vale (brisa de montanha).

Em geral, são conhecidos por circulações locais, os ventos gerados pelo aquecimento diferencial em áreas vizinhas, como a brisa de vale e de montanha e a brisa marítima e terrestre, que sob condições sinóticas ou de mesoescala intensas podem ser modificadas ou até mesmo suprimidas (Gleeson, 1951; Defant, 1951; Walsh, 1974). As circulações locais são definidas por

uma escala espacial e temporal que varia de horas até um dia e dimensão espacial da ordem de poucas dezenas de quilômetros, respectivamente (Orlanski, 1975). Em algumas regiões como, por exemplo, em áreas costeiras e montanhosas, o clima pode ser resultado da persistência de certos tipos de circulações locais (Stull, 2000).

São escassos, na literatura, os estudos sobre circulação de brisa de vale e de montanha. Schmidli e Rotunno (2012) utilizaram um conjunto de equações e modelos dinâmicos para estudar os mecanismos associados a brisas de vale e montanha em uma região formada por duas montanhas isoladas e uma planície central teórica idealizada. O foco do estudo se baseou na relação entre os saldos de calor e a diferença de pressão entre planície-montanha e a causalidade dos fenômenos associados a esses. Os resultados apontaram que a influência do ambiente circundante na evolução dos ventos sobre o vale é refletida principalmente através da redistribuição dos gradientes de pressão e pelas trocas de advecção de *momentum*. De maneira similar, Rucker et al. (2008) investigaram os ventos nos vales na Áustria a partir de observações de alta resolução de *lidars* Doppler. Já no Japão, os estudos revelaram que os efeitos das brisas de vale e de montanha, bem como a brisa marítima e terrestre são vitais para o transporte atmosférico de 20 espécies de componentes advectados com 90 tipos de reações químicas (Kitada et al., 1986).

Com relação à região sudeste do Brasil, Reboita et al. (2014) analisaram a ocorrência de brisas de vale e de montanha na cidade de Itajubá, MG, que está inserida na Serra da Mantiqueira. Foi constatado que a brisa de montanha se estabelece entre 15-16 horas local e tem sua máxima intensidade entre 21-22 horas local. Já a brisa de vale se estabelece entre 07-08 horas local e tem a sua máxima intensidade entre 11-14 horas local. É importante destacar, novamente, que a influência dos ventos de grande escala, quando somados às circulações de brisa marítima e às circulações forçadas pela topografia, podem causar uma intensificação ou enfraquecimento na circulação diurna ou noturna.

As circulações locais são difíceis de serem identificadas em dados de reanálise devido à baixa resolução horizontal destes. Porém, através de modelagem numérica regional é possível avaliar o comportamento dessas circulações com mais clareza. No setor leste do Estado de São Paulo, devido à presença da Serra do Mar e do Vale do

Paraíba, são comuns as brisas de vale e de montanha e, no litoral, as brisas marítimas e terrestres. Com o acoplamento da brisa de vale e da brisa marítima, essas conseguem chegar até a Região Metropolitana de São Paulo (Oliveira et al., 2003) e atuar no transporte e na dispersão de poluentes (Freitas, 2003; Carvalho et al., 2012). Além disso, no verão, a brisa marítima ao interagir com a ilha de calor urbana na cidade de São Paulo contribui para as tempestades severas (Freitas, 2003; Vemado e Pereira Filho, 2016).

Diante do exposto, o objetivo principal deste estudo é comprovar a existência e indicar o comportamento típico das circulações termicamente induzidas que atuam no Vale do Paraíba e na Serra da Mantiqueira através de uma simulação numérica com o modelo meteorológico de mesoescala *Weather Research and Forecasting* (WRF).

Material e Métodos

Simulações com o WRF

Foi realizada uma simulação numérica com o modelo WRF (Skamarock et al., 2008) versão 3.6.1, a fim de representar a circulação local sobre o Vale do Paraíba e a Serra da Mantiqueira (Figura 1) entre os dias 16 e 22 de agosto de 2010. Esse período foi escolhido, como estudo de caso, pela ausência de sistemas frontais sobre a região sudeste do Brasil, o que poderia suprimir as circulações de mesoescala termicamente induzidas. Como mostrado na Figura 2, o período de estudo teve características típicas de inverno, devido à atuação do setor oeste do anticiclone subtropical do Atlântico Sul sobre o sudeste do Brasil (Reboita et al., 2010).

Para gerar as condições iniciais e de fronteira foram utilizadas as análises (saídas) do modelo global GFS-FNL (*Global Forecasting System*) com resolução horizontal de 0,5° a cada 6 horas. Este modelo é desenvolvido pela NOAA/NCEP (*National Oceanic and Atmospheric Administration/National Centre for Environmental Prediction*). Tais análises (a cada 6 horas) foram escolhidas para dirigir o WRF, por serem geradas por um conjunto integrado de técnicas de assimilação de dados observacionais do *Global Telecommunications System* (GTS) e outras fontes. As simulações numéricas usaram três grades aninhadas, com 27, 9 e 3 km de resolução espacial horizontal, centradas em 23,1°S e 45,0°W, como ilustrado na Figura 3. As simulações são

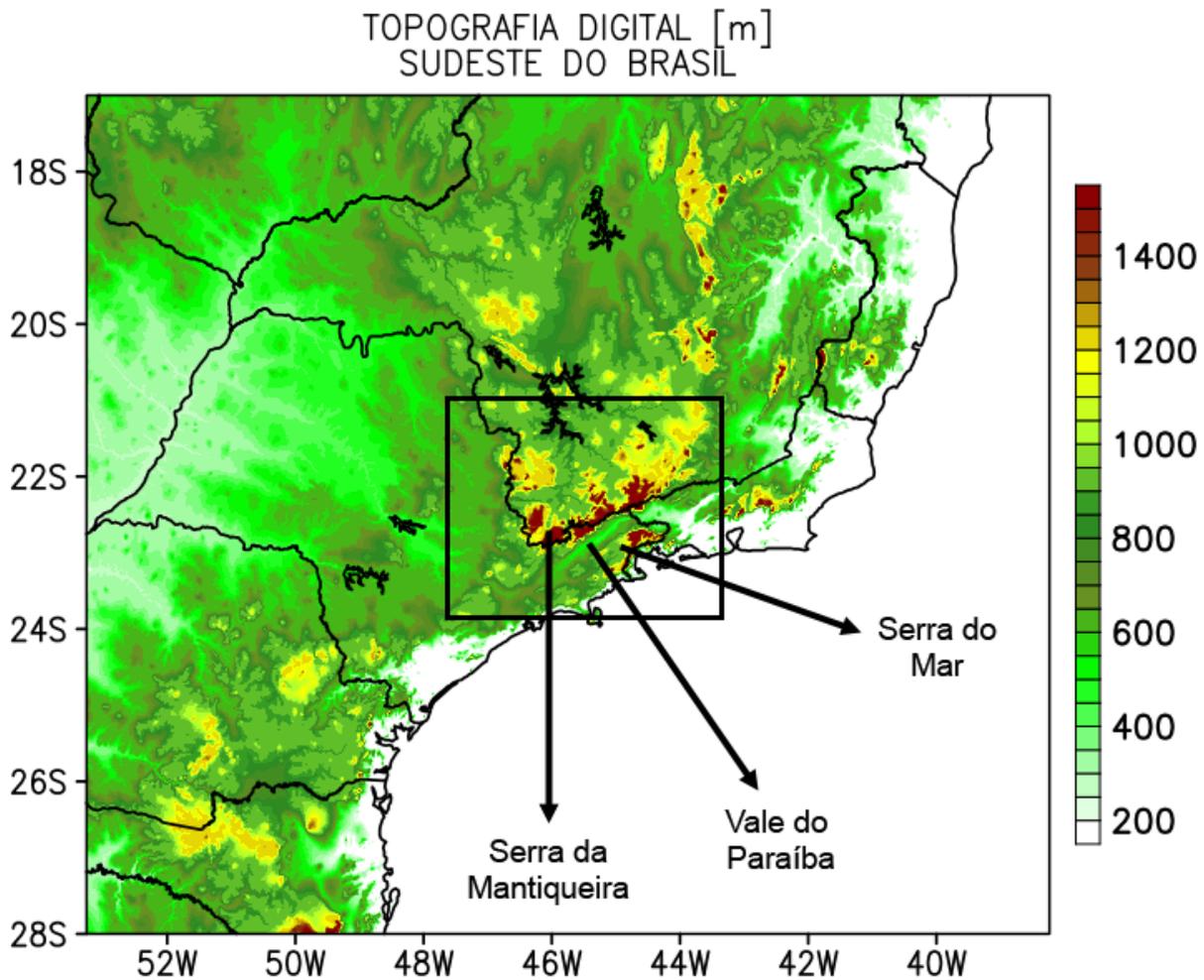


Figura 1. Mapa de topografia digital da Região Sudeste do Brasil. A caixa central (em preto) representa a área de estudo, compreendendo a Serra da Mantiqueira, Vale do Paraíba e Serra do Mar Paulista. Dados com 1 km de resolução derivados do Global 30 Arc-Second Elevation Project GTOPO30 (Gesch, 1994; Gesch e Larson, 1996).

não-hidrostáticas com período de integração do modelo de 192 horas, iniciando-se no dia 15 de agosto de 2010, onde as primeiras 24 horas foram descartadas para contornar os efeitos de *spin-up* numérico (Skamarock, 2004). As configurações físicas e parametrizações da simulação foram WSM3 (microfísica), RRTM (radiação de onda-longa), Dudhia (radiação de onda-curta), Noah (superfície), Grell-Freitas (cúmulos, para a grade-mãe) e YSU (camada limite planetária). O passo de tempo de integração da grade-mãe é de 75 segundos e o das grades aninhadas, de 25 e 8,3 segundos. A grade menor (3 km de resolução horizontal) possui 181 x 160 pontos de grade e as saídas possuem frequência horária. Tal configuração física também é utilizada em rodadas operacionais para a região Sul de Minas Gerais e Vale do Paraíba no Centro de Estudos de Previsão de Tempo e Clima de Minas Gerais (CEPreMG).

A partir dos resultados obtidos com o modelo WRF foram elaborados mapas de topografia e intensidade e direção do vento a 10

metros (m) de altura, e temperatura do ar a 2 m com vento a 10 m. Os campos de vento foram obtidos através do cálculo da anomalia horária da variável, ou seja, a média horária é extraída da média de todo o período de estudo. Por exemplo, a média das 0h00 é subtraída do valor médio das 168 horas de simulação entre os dias 16 e 22 de agosto de 2010. De forma análoga, também foram calculadas anomalias de temperatura do ar com o objetivo de se verificar o aquecimento/resfriamento diferencial entre vales e montanhas. Além disso, com o intuito de se observar o desenvolvimento vertical das células de circulação, foram elaborados perfis verticais de velocidade vertical (w) para três seções localizadas em 22,6°S e 22,0°S (com variação longitudinal), e 46°W (com variação latitudinal), referentes aos pontos sobre a Serra da Mantiqueira, ao norte da Serra da Mantiqueira e sobre o Vale do Paraíba (Figura 4).

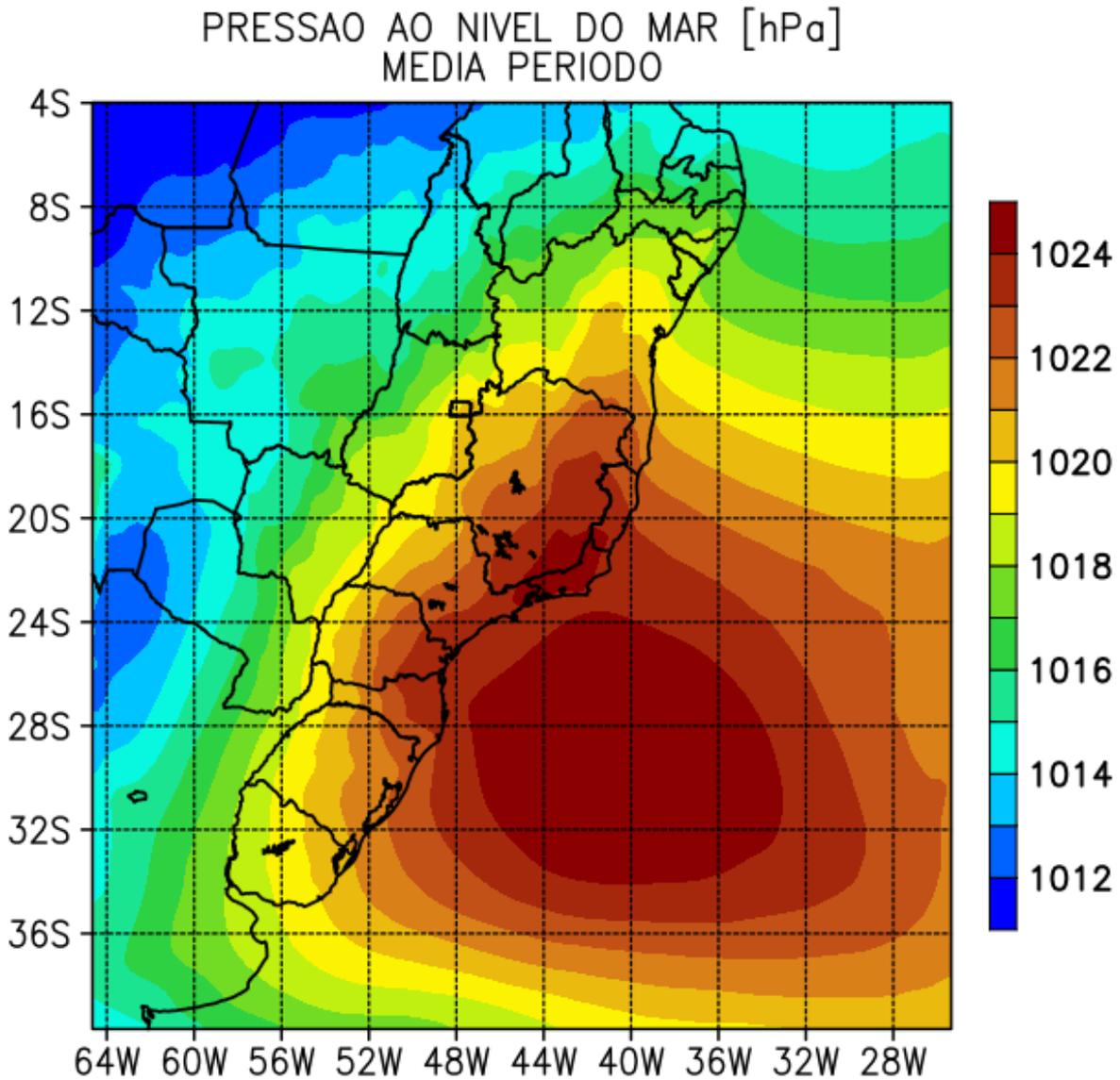


Figura 2. Média da pressão atmosférica reduzida ao nível médio do mar (hPa) no período de 16 a 22 de agosto de 2010. O centro do sistema de alta pressão corresponde aos tons de marrom mais escuro. Os dados utilizados para elaboração da Figura 2 foram obtidos a partir dos resultados da grade-mãe da simulação, com resolução horizontal de 27 km.

Validação dos resultados

Os resultados obtidos a partir da simulação da grade de 3 km do WRF foram validados através da comparação com dados observados. Para tal validação calcularam-se os seguintes parâmetros estatísticos (Tabela 1): desvio-padrão (σ), viés (*bias* em inglês), raiz do erro médio quadrático (*RMSE* em inglês), correlação de Pearson (*R*), índice de concordância (*d*) e o *RMSE_{UB}*, parâmetro proposto por Pielke (2002). Os dados observados são provenientes do METAR da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET) dos aeroportos de São José dos Campos (23°13'45'' S, 45° 51'41''W), Galeão (22°48'32'' S, 43°13'37''W) e Guarulhos

(23°25'56''S, 46°28'9''W). Apesar das estações de Guarulhos e Galeão não estarem localizadas no Vale do Paraíba, estas foram consideradas para a validação da simulação por ainda estarem contidas no domínio da grade menor (3 km). Também utilizou-se a série temporal da estação meteorológica da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI; 22°24'49'' S, 45°27'07'' W). A escassez de dados usados na validação da simulação é devido à ausência de mais estações meteorológicas com razoável frequência temporal nos arredores, que estejam contidas na grade menor. A localização das estações meteorológicas na grade menor, bem como o posicionamento das seções verticais são indicados na Figura 4.

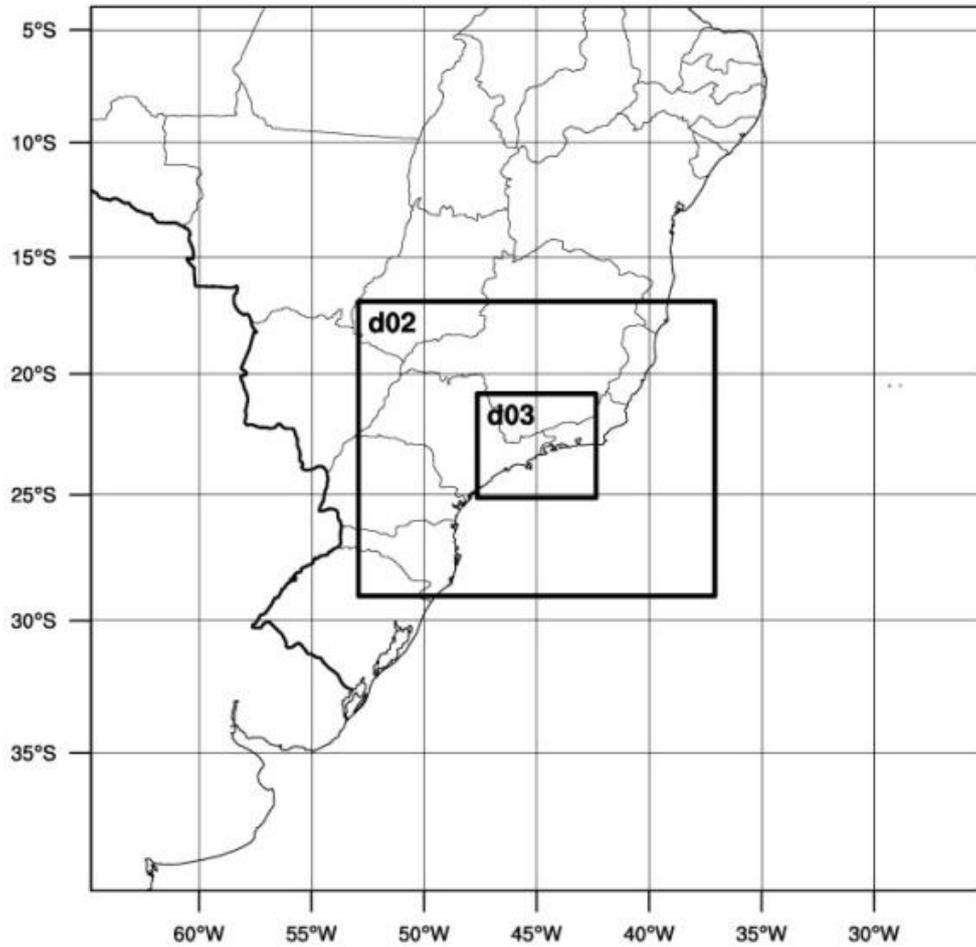


Figura 3. Localização da área de estudo contendo as três grades aninhadas.

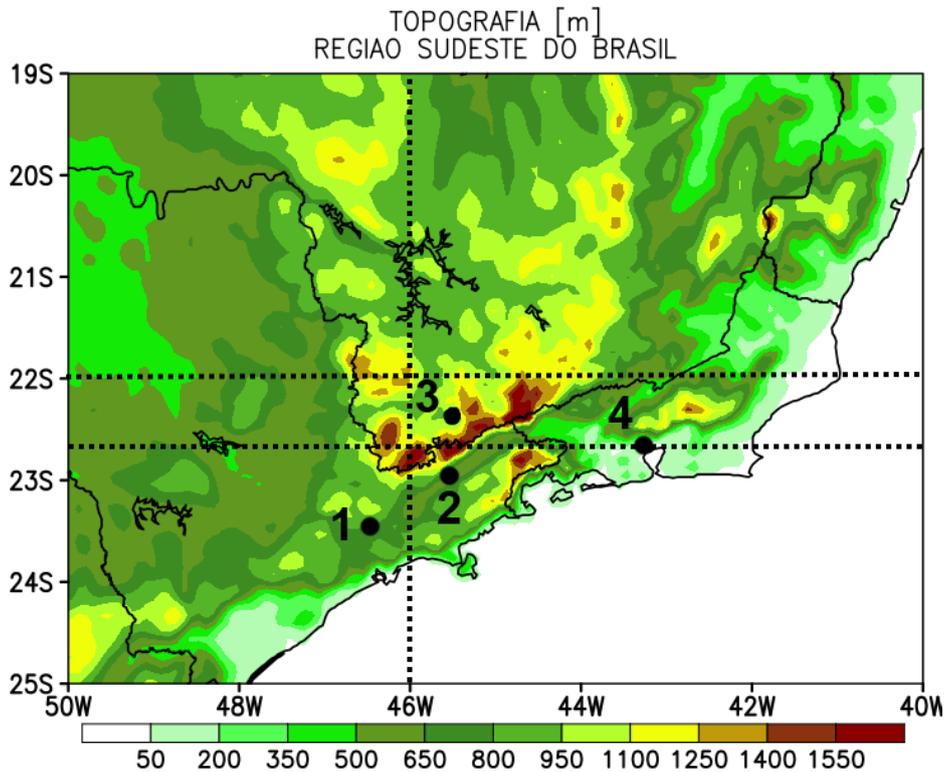


Figura 4. Área de estudo e localização das estações meteorológicas utilizadas para a validação da simulação (pontos pretos): Guarulho (1), São José dos Campos (2), Itajubá (3) e Galeão (4). As linhas tracejadas representam a localização das seções verticais que serão analisadas.

Tabela 1. Estatísticas utilizadas na validação da simulação.

Estatística	Equação	Definição
Desvio-Padrão	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}}$	Medida da variação (dispersão) dos valores individuais em torno da média
Viés	$viés = \bar{y} - \bar{o}$	Indica se, em média, o modelo está superestimando (<i>viés</i> positivo) ou subestimando (<i>viés</i> negativo) os valores observados
Raiz do Erro Quadrático Médio	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - o_i)^2}$	A RMSE representa a magnitude média dos erros entre simulação e observação. É útil, pois possui a mesma unidade que as variáveis em análise.
$RMSE_{UB}$	$RMSE_{UB} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum [(y_i - \bar{y}) - (o_i - \bar{o})]^2}$	O $RMSE_{UB}$ foi apresentado por Pielke (2002) para avaliar a habilidade (<i>skill</i>) de uma simulação, que representa a raiz do erro médio quadrático após a remoção de um desvio médio
Coefficiente de Correlação de Pearson	$R = \frac{\sum[(y_i - \bar{y})(o_i - \bar{o})]}{\sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum(o_i - \bar{o})^2}}$	Permite quantificar o grau de associação entre duas ou mais variáveis.
Índice de Concordância	$d = 1 - \frac{\sum(y_i - o_i)^2}{\sum(y_i - \bar{o} + o_i - \bar{o})^2}$	Constitui uma medida utilizada para analisar o acordo entre dois intervalos de observação. Seus valores variam entre 0, indicando nenhuma concordância, e 1, para uma concordância perfeita (Willmott, 1981)

Em todas as equações apresentadas na Tabela 1, n é o número de dados da série, y_k o valor simulado da variável, o_k o valor observado da variável, \bar{y} o valor médio simulado da variável e \bar{o} o valor médio observado da variável.

Para a avaliação da habilidade do modelo em simular determinada variável, os critérios sugeridos por Pielke (2002) foram verificados:

$$\sigma_{sim} \cong \sigma_{obs} \quad (1)$$

$$RMSE < \sigma_{obs} \quad (2)$$

$$RMSE_{UB} < \sigma_{obs} \quad (3)$$

sendo σ_{obs} o desvio padrão das observações e σ_{sim} o desvio padrão das simulações.

Resultados e Discussão

Validação das Simulações com Observações

As Tabelas 2 e 3 apresentam uma síntese estatística dos resultados encontrados a partir da comparação dos dados simulados e observados de temperatura do ar e velocidade dos ventos em quatro localidades: Galeão, Guarulhos, São José dos Campos e Itajubá. A correlação da temperatura do ar apresentou valores acima de 0,80 para todas as estações. Para São José dos Campos, cidade localizada no Vale do Paraíba, a correlação foi de 0,92 indicando uma ótima associação entre os dados simulados e observados. No caso da velocidade dos ventos, os valores de correlação foram inferiores a 0,50 exceto para Itajubá, com 0,52. O viés revelou também a tendência do

modelo superestimar os valores de temperatura, exceto para o Galeão, e subestimar a velocidade dos ventos, exceto para São José dos Campos e Itajubá, estação onde os menores valores de viés foram registrados. O índice de concordância apresentou bons resultados (acima de 0,75) para a temperatura do ar em Galeão, São José dos Campos e Itajubá. O desempenho do modelo para a velocidade dos ventos não foi satisfatório, com valores de correlação menores que 0,55, apesar do baixo viés para Guarulhos, São José dos Campos e Itajubá. Os critérios para avaliação do *skill* do modelo foram atendidos para todas as localidades consideradas no que se refere a temperatura do ar e não foram atendidos em nenhum dos pontos avaliados para a velocidade dos ventos. Logo, o modelo possui uma melhor (pior) representação para a temperatura do ar em Galeão e Itajubá (Guarulhos) e para o vento, em São José dos Campos e Itajubá (Galeão).

Tais resultados se encontram ainda dentro de um perfil esperado visto que a temperatura do ar, uma variável de modelagem mais direta, está associada a maiores valores de correlação do que a velocidade do vento, a qual possui cálculos mais complexos e está associada assim à erros maiores, refletidos nas correlações e concordâncias. A dependência do prognóstico da velocidade do vento com parametrizações de camada limite planetária e de superfície pode estar também associada com erros sistemáticos nas séries temporais, suavizados nas médias e anomalias, não comprometendo os resultados.

Tabela 2. Análise estatística calculada para comparação entre os valores de temperatura do ar simulados e observados entre os dias 16 e 22 de agosto de 2010.

Estações	R	RMSE	viés	índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Galeão	0,81	2,23	-0,25	0,87	2,22	3,72	2,76
Guarulhos	0,88	3,36	4,37	0,62	2,67	5,67	4,72
São José dos Campos	0,92	3,99	3,30	0,78	2,23	5,66	4,61
Itajubá	0,81	4,50	-2,30	0,80	3,87	4,30	6,33

Tabela 3. Análise estatística calculada para comparação entre os valores de velocidade dos ventos simulados e observados entre os dias 16 e 22 de agosto de 2010.

Estações	R	RMSE	viés	índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Galeão	0,31	3,83	-1,89	0,30	3,33	3,38	1,93
Guarulhos	0,31	3,36	-0,75	0,41	3,28	3,31	1,91
São José dos Campos	0,45	3,59	0,17	0,57	3,59	4,04	1,76
Itajubá	0,52	2,18	0,49	0,66	2,12	2,08	2,34

Evolução diurna das circulações locais

A Figura 5 apresenta a composição da média do campo de vento (direção e intensidade representada por setas) de acordo com a hora do dia e a topografia para a região referente ao domínio da simulação. Para ilustrar os resultados, são apresentadas as figuras com intervalos de 4 horas.

De acordo com a Figura 5, entre 22 e 06 UTC predominou a brisa de montanha, uma vez que os vetores da intensidade e direção do vento apontam das encostas para o Vale do Paraíba (Fig. 5a, 5b e 5f). Das 6 às 10 UTC, houve uma redução da intensidade do vento (diminui o tamanho das setas) e a direção variou significativamente (Fig. 5b e 5c). Nestas situações, características de transição da brisa, a intensidade do vento é fraca e não há sentido preferencial. Resultado similar foi obtido por Reboita et al. (2014) no estudo das circulações de brisa em Itajubá. Nota-se também que entre 06 UTC e 10 UTC, com o aquecimento radiativo solar (nascer do Sol), a brisa inicia sua inversão de sentido. A partir das 14 UTC (Fig. 5d) começa a ser verificada a presença da brisa de vale, sendo que às 18 UTC (Fig. 5e), esta circulação encontra-se bem estabelecida (setas com sentido do vale para as encostas). Tal padrão é bem observado nas regiões de topografia mais elevada (picos de cores mais escuras), onde se observa claramente os intensos vetores apontando em direção às montanhas.

A reversão do sentido do vento está intrinsicamente associada com os aquecimentos diferenciais das encostas das montanhas em comparação com os vales. Desta forma, nota-se que em regiões de topografia mais acentuada (picos mais escuros) a magnitude dos vetores tende a ser maior nas fases maduras de desenvolvimento das

duas brisas. Também é notável o efeito de canalização do vento na região do Vale do Paraíba devido à célula de brisa de montanha, claramente perceptível na Figura 5f, onde o escoamento conflua para o Vale e nos arredores da Região Metropolitana de São Paulo.

Na Figura 6 é mostrada a média horária de temperatura do ar, que indica a evolução do resfriamento e aquecimento ao longo do dia na Serra e no Vale. Em todos os painéis da Figura 6, o Vale do Paraíba sempre esteve mais quente do que as encostas, tanto durante o dia quanto à noite. Entretanto, inicialmente mencionou-se que durante o dia a encosta das montanhas aquece mais rápido do que o vale adjacente (e o contrário para o período noturno). Essa característica do aquecimento diferencial entre a encosta e o vale só é visualizada quando a média de todo o período em estudo (168 horas de simulação) é extraída dos dados médios horários (Fig. 7).

Deste modo, a Figura 7 mostra as anomalias horárias de temperatura e vento às 12 UTC (Fig. 7a), 13 UTC (Fig. 7b), 22 UTC (Fig. 7c) e 23 UTC (Fig. 7d). Estando a montanha mais aquecida que o vale, a circulação da brisa de vale se inicia (Fig. 7a). Em contrapartida, as temperaturas mais frias das encostas das montanhas em relação às do vale durante à noite (Fig. 7c), indicam que o vale é favorável para a convergência dos ventos da circulação de montanha, com o escoamento dos ventos se dirigindo das regiões de maior altitude para o Vale do Paraíba. Em geral, as circulações se iniciam devido à resposta da superfície aos gradientes de pressão gerados pelos gradientes de temperatura. As Figuras 7b e 7d representam a fase de transição das anomalias que, a partir de tais

horários, tornaram-se majoritariamente positivas ou negativas, até que o padrão de circulação comece a se inverter (7c).

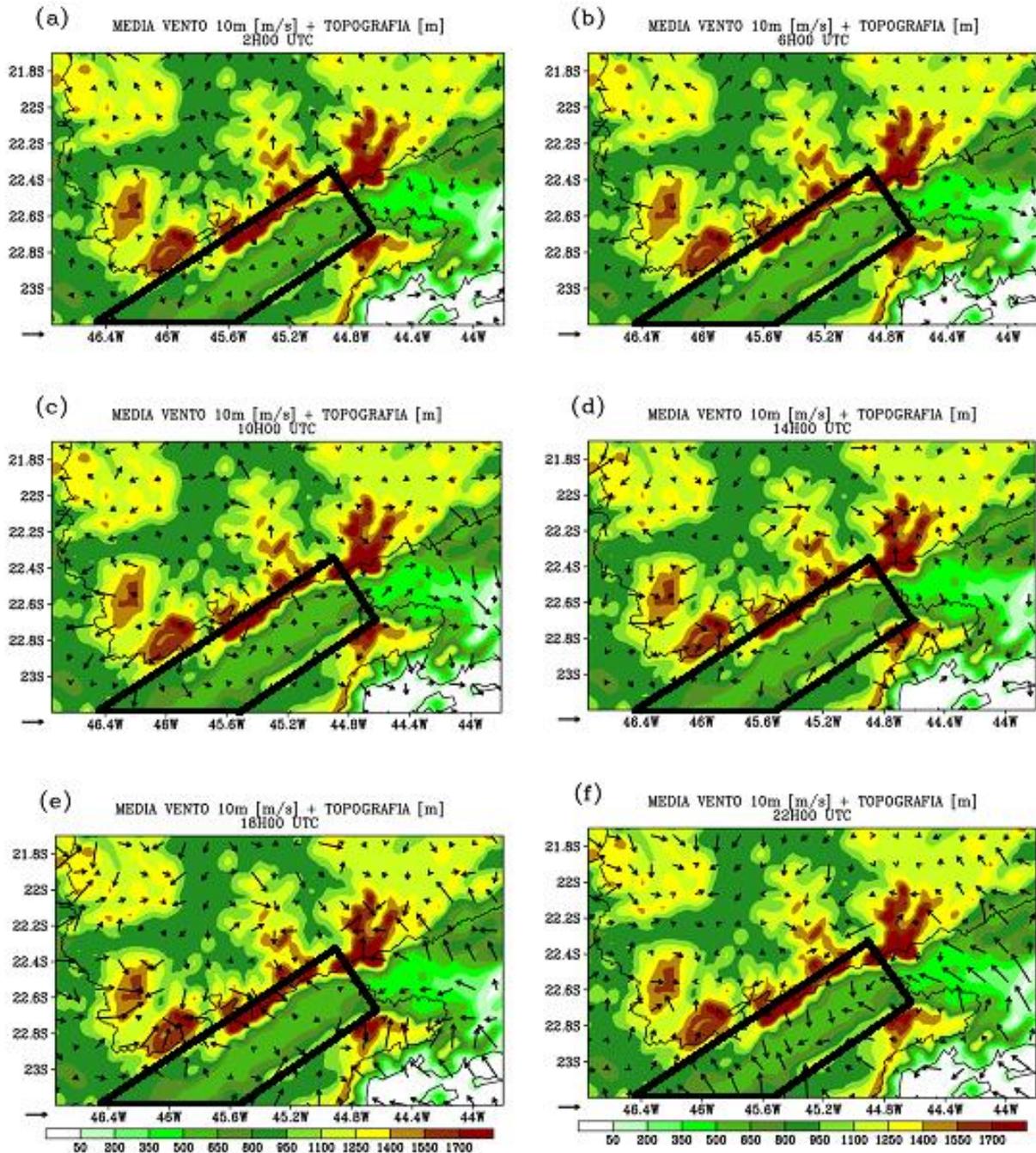


Figura 5. Campo médio dos dias 16 a 22 de agosto de 2010 da topografia (m) e do vento (m/s) para os horários: a) 02 UTC, b) 06 UTC, c) 10 UTC, d) 14 UTC, e) 18 UTC, f) 22 UTC. O vetor de referência (canto inferior esquerdo) equivale a uma magnitude de 3 m s^{-1} . O Vale do Paraíba é indicado pela região compreendida pelo polígono preto.

Também é importante salientar que as anomalias positivas de temperatura foram sempre mais intensas em magnitude do que as negativas,

uma possível evidência dos impactos da urbanização da região na modulação de circulações locais (Freitas et al., 2007).

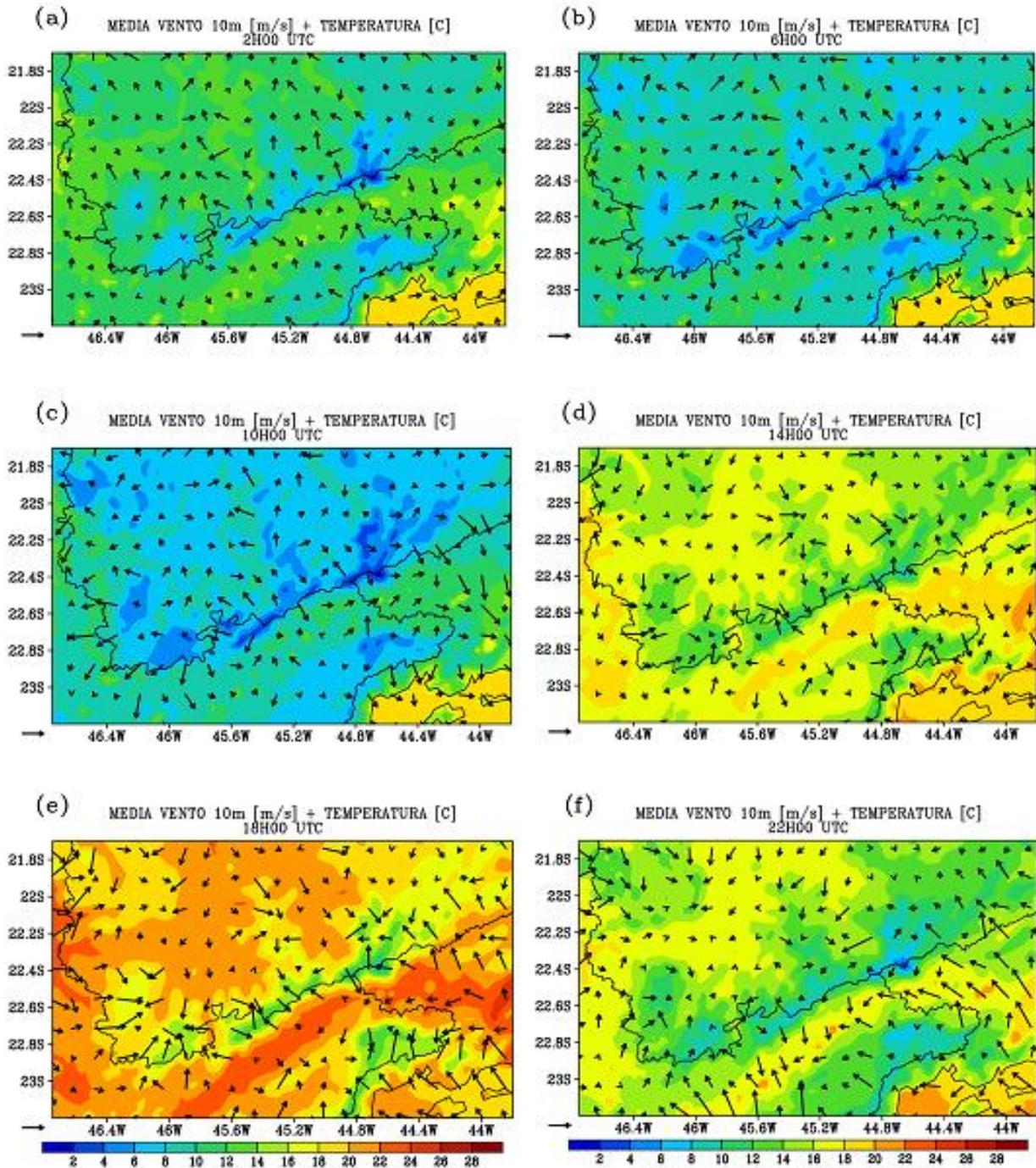


Figura 6. Campo médio dos dias 16 a 22 de agosto de 2010 da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e do vento (m/s ; vetor de referência 3 m s^{-1}) para os horários: a) 02 UTC, b) 06 UTC, c) 10 UTC, d) 14 UTC, e) 18 UTC, f) 22 UTC.

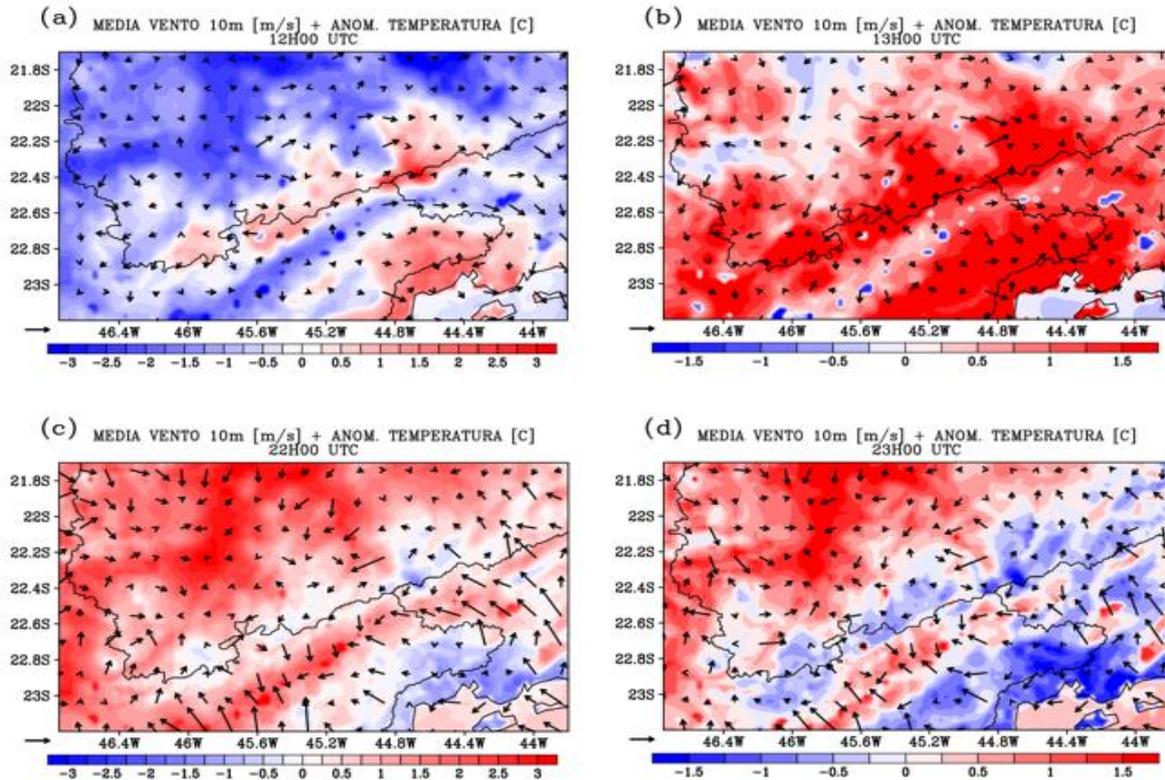


Figura 7. Anomalias horárias de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e anomalias horárias do vento (m/s ; vetor de referência 3 m s^{-1}) com base no período de simulação para os horários: a) 12 UTC, b) 13 UTC, c) 22 UTC e d) 23 UTC.

A Figura 8 apresenta as seções verticais às 02 UTC e 18 UTC dos campos de velocidade vertical (w , onde movimentos ascendentes são representados por valores positivos) e circulação vertical para um corte na Serra da Mantiqueira (Fig. 8a-b), ao norte da Serra da Mantiqueira (Fig. 8c-d) e no Vale do Paraíba (Fig. 8ef), como também descrito na Figura 4. Os horários das 02 UTC e 18 UTC foram os que apresentaram com mais evidência o desenvolvimento vertical das células de brisa de montanha e de vale, respectivamente. Às 02 UTC, nota-se que as regiões onde o movimento vertical é descendente (cor vermelha) houve escoamento característico da brisa de montanha. Já às 18 UTC, nas regiões onde os movimentos são ascendentes (cor azul), a circulação é caracterizada pela brisa de vale. Tais movimentos são mais bem definidos para a Serra e o Vale do Paraíba. No Vale do Paraíba, a inversão da circulação de brisa apresentou-se melhor definida, sendo que o vento só encontra a Serra da Mantiqueira (elevação central) como obstáculo. O aspecto do desenvolvimento vertical das circulações locais é importante na caracterização das células, visto que se pode ter uma visão tridimensional ao associá-las com os campos horizontais. Sedo assim, em média, de acordo com as regiões de transição entre movimentos ascendentes e descendentes, verifica-se que a

célula de brisa de montanha (Fig. 8e) atinge aproximadamente 15 km (aproximadamente $0,15^{\circ}$ de longitude) após a serra da Mantiqueira e a de vale (Fig. 8f), mais intensa, 20 km (aproximadamente $0,2^{\circ}$ de latitude) na região do vale.

Conclusões

Esse estudo analisou as circulações de vale e montanha no Vale do Paraíba e na Serra da Mantiqueira para um período entre os dias 16 e 22 de agosto de 2010 através de uma simulação com o modelo WRF. A simulação foi capaz de representar as condições de temperatura do ar e vento na região, com maiores diferenças entre simulação e observação para os ventos.

O padrão de escoamento entre vale e montanha foi nítido ao se comparar a circulação e topografia da região, bem como nas anomalias de temperatura que indicam a indução da brisa através das diferenças horizontais de temperatura do ar. As células da brisa foram também evidenciadas em perfis verticais do movimento vertical, onde um escoamento ora ascendente, ora descendente nas regiões montanhosas indica a mudança do sentido da circulação nas horas mais propícias aos gradientes térmicos. Porém, em regiões de topografia mais acidentada, as células da

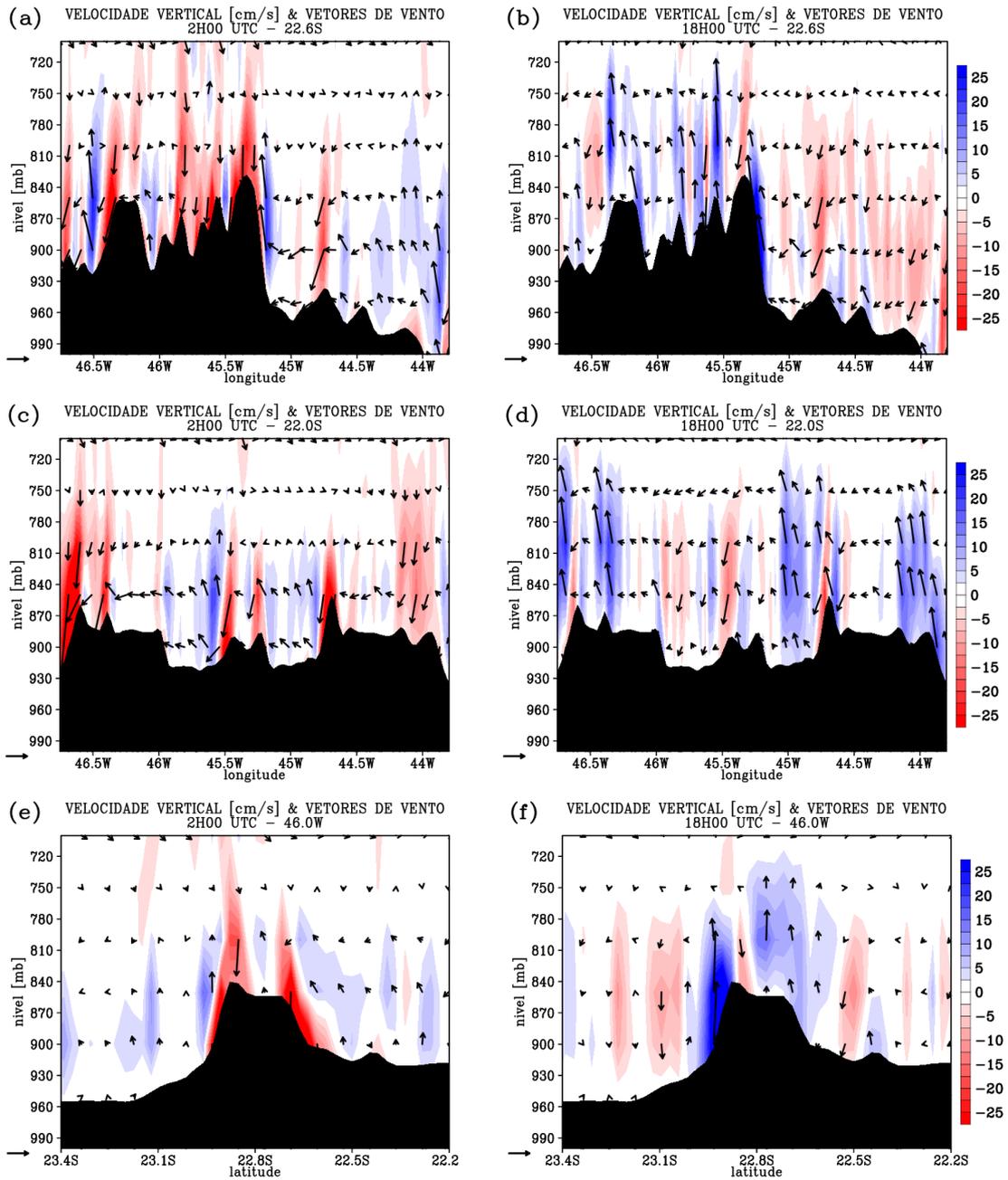


Figura 8. Campo médio dos dias 16 a 22 de agosto de 2010 de velocidade vertical w (cm/s, em cores) e vetores do movimento vertical (vento zonal e w) para as 02 UTC (a, c, e) e para as 18 UTC (b, d, f). Seções vertical em 22,6S (a, b), 22,0S (c, d) e 46,0W (e, f). Os vetores de referência (canto esquerdo das figuras) correspondem a 10 cm/s.

brisa foram menos caracterizadas, provavelmente por influência da rugosidade do terreno.

As simulações apontaram que a brisa de vale iniciou-se aproximadamente às 14 UTC e a de montanha às 22 UTC, sendo que a fase de transição entre a brisa de montanha para a de vale ocorreu, em média, entre as 06 e 10 UTC.

Por fim, ressalta-se que o WRF teve habilidade para representar a circulação de vale e montanha na região do Vale do Paraíba e Serra da Mantiqueira podendo ser empregado em estudos diagnósticos e prognósticos na região. Além disso, é importante mencionar que devido à resolução horizontal dessas circulações, estas não podem ser capturadas por dados de reanálise.

Referências

- Carvalho, V. S. B., Freitas, E. D., Mazzoli, C. R. R., Andrade, M. F., 2012. Avaliação da influência de condições meteorológicas na ocorrência e manutenção de um episódio prolongado com altas concentrações de ozônio sobre a Região Metropolitana de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 27, 458-469.
- Defant, F., 1951. Local Winds. *Compendium of Meteorology*, American Meteorological Society, 655-672.
- Freitas, E. D., 2003. Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes. São Paulo, Tese (Doutorado). São Paulo, IAG/USP.
- Freitas, E. D., Rozoff, C. M., Cotton, W. R., Silva Dias, P. L., 2007. Interactions of an urban heat island and sea breeze circulations during winter over the Metropolitan Area of São Paulo-Brazil. *Boundary-Layer Meteorology* 122, 43-65.
- Gesch, D. B., 1994. Topographic data requirements for EOS global change research. U.S. Geological Survey Open-File Rep. 94-626.
- Gesch, D. B., Larson, K. S., 1996. Techniques for development of global 1-kilometer digital elevation models. *Proceedings Pecora Thirteen Computer File: Human Interactions with the Environment: Perspectives from Space*, Asprs Publications.
- Gleeson, T. A., 1951. On the theory of cross-valley winds arising from differential heating of the slopes. *Journal of Meteorology* 8, 398-405.
- Kitada, T., Igarashi, K., Owada, M., 1986. Numerical Analysis of Air Pollution in a Combined Field of Land/Sea Breeze and Mountain/Valley Wind. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 25, 767-784.
- Oliveira, A. P., Bornstein, R., Soares, J., 2003. Annual and diurnal wind patterns in the city of São Paulo. *Water, Air and Soil Pollution* 3, 3-15, 2003.
- Orlanski, I., 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society* 56, 527-530.
- Pielke, R. A. S. R., 2002. *Mesoscale meteorological modelling*. Second Edition. International Geophysics Series. Academic Press 78, 676.
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Da Rocha, R. P., Ambrizzi, T., 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia* 25, 185-204.
- Reboita, M. S., Assireu, A. T., Da Silva, L. C., Rios, N., 2014. Evidências de Circulação de Brisa Vale-Montanha na Serra da Mantiqueira: Cidade de Itajubá-MG. *Revista Ciência e Natura* 36, 61-71.
- Rucker, M., Banta, R. M., Steyn, D. G., 2008. Along-Valley Structure of Daytime Thermally Driven Flows in the Wipp Valley. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47, 733-751.
- Schmidli, J., Rotunno, R., 2012. Influence of the Valley Surroundings on Valley Wind Dynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences* 69, 561-577.
- Skamarock, W. C., 2004. Evaluating Mesoscale NWP Models Using Kinetic Energy Spectra. *Monthly Weather Review* 132, 3019-3032.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W., Powers, J. G., 2008. A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical Note 475. Disponível: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf. Acesso: 1º jan 2015.
- Stull, R. B., 2000. *Meteorology for Scientists and Engineers*. Massachusetts: Brooks/Cole Pacific Grove.
- Vemado, F., Pereira Filho, A. J., 2016. Severe Weather Caused by Heat Island and Sea Breeze Effects in the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil. *Advances in Meteorology* 2016, 13 p.
- Walsh, J. E., 1974. Sea Breeze Theory and Applications. *Journal of the Atmospheric Sciences* 31, 2012-2026.
- Willmott, C. J., 1981. On the validation models. *Physical Geography* 2, 184-194.