



**Análise da Variabilidade dos Ventos em Extensos Sistemas Aquáticos Tropicais:  
Comparação dos Resultados Obtidos com os Modelos WRF e BRAMS**  
Assessment of the Wind Variability on the Large Tropical Aquatic Systems:  
Comparison Between WRF and BRAMS Models

André Luiz dos Reis; Bruno de Campos;  
Vanessa Silveira Barreto Carvalho & Arcilan Trevenzoli Assireu

*Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais,  
Campus Prof. José Rodrigues Seabra – Sede, Av. B P S, 1303, 37500 903, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil*  
E-mails: andreluiz.reis4@gmail.com; bruno.campos@tag.usp.br vanessa.silveira@unifei.edu.br; assireu@gmail.com  
Recebido em: 05/04/2018 Aprovado em: 23/07/2018  
DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_2\\_663\\_676](http://dx.doi.org/10.11137/2018_2_663_676)

### Resumo

Os padrões de vento são importantes em vários campos de estudo como a dispersão de poluentes, evapotranspiração, umidade, advecção de calor, aproveitamento eólico etc. Em reservatórios hidrelétricos, os ventos podem ser influenciados pelo balanço de energia em superfície. Neste sentido, dados meteorológicos de uma torre de 10 m, instalada em uma ilha no reservatório de Furnas, Minas Gerais, e simulações com modelos meteorológicos de mesoescala WRF e BRAMS foram utilizados para analisar a variabilidade do vento. A representatividade dos modelos foi verificada a partir de simulações para dois períodos sob diferentes condições sinóticas: a atuação de um anticiclone e a passagem de um sistema frontal. Os resultados indicaram que durante a atuação do anticiclone o BRAMS foi mais eficiente em simular a intensidade e direção dos ventos, enquanto o WRF representou melhor os valores de umidade e temperatura. No caso do sistema frontal, o WRF foi eficiente em representar todos os parâmetros analisados, enquanto o BRAMS não obteve bons resultados para intensidade e direção dos ventos. As simulações mostraram que o relevo na região do reservatório atua como agente canalizador dos ventos e que o aquecimento diferencial entre o reservatório e a superfície no entorno gera um gradiente de temperatura e uma circulação lacustre.

**Palavras-chave:** Reservatório hidrelétrico; brisa lacustre; modelagem numérica da atmosfera

### Abstract

Wind patterns are important in various fields of study such as pollutant dispersion, evapotranspiration, humidity, advection of heat, wind use etc. In hydroelectric reservoirs, the winds can be influenced by the surface energy balance. In this sense, meteorological data of a 10 m tower, installed on an island in the Furnas reservoir, Minas Gerais, and simulations with mesoscale meteorological models WRF and BRAMS were used to analyze wind variability. The representativeness of the models was verified from simulations for two periods under different synoptic conditions: the performance of an anticyclone and the passage of a frontal system. The results indicated that during the anticyclone operation the BRAMS was more efficient in simulating the intensity and direction of the winds, while the WRF represented better values of humidity and temperature. In the case of the frontal system, the WRF was efficient in representing all analyzed parameters, whereas BRAMS did not obtain good results for intensity and direction of the winds. The simulations showed that the relief in the reservoir region acts as a channeling agent of the winds and that the differential heating between the reservoir and the surrounding surface generates a temperature gradient and a lacustrine circulation.

**Keywords:** hydroelectric reservoirs; lacustrine circulation; numerical modeling of the atmosphere



## 1 Introdução

A opção pelo uso da energia hidrelétrica no Brasil levou à construção de grandes reservatórios de água, via represamento dos rios. Extensos corpos d'água somados ao relevo montanhoso ao entorno podem favorecer o potencial eólico uma vez que pode ocorrer a canalização dos ventos e a diminuição do atrito devido a lâmina d'água (Assireu et al., 2013).

Os reservatórios hidrelétricos brasileiros exceto os amazônicos são geralmente construídos em regiões de planalto possuindo uma forma alongada ao longo do antigo canal do rio. Assireu et al. (2013), fazendo uso integrado de registros de uma estação meteorológica fundeada no reservatório de Itumbiara (GO), de dados do modelo digital de elevação (MDE) e de resultados de vento obtidos através de simulação numérica com o modelo *WeatherResearchandForecasting* (WRF) identificaram a canalização dos ventos pela ação do relevo.

As características dos reservatórios brasileiros são favoráveis ao aproveitamento eólico uma vez que a forma geralmente alongada destes pode intensificar os ventos. Outro fator favorável ao aproveitamento eólico sobre reservatórios é a disponibilidade de redes de transmissão próximas (Pimenta & Assireu, 2015). Com a finalidade de verificar o potencial eólico nos reservatórios brasileiros, Assireu et al. (2011) analisaram dados do MDE e dados de vento construindo curvas de persistência de oito reservatórios no Brasil afim de analisar o potencial eólico e verificaram que alguns destes podem ser favoráveis a implantação de parques eólicos sugerindo ainda que a sazonalidade do vento pode complementar o potencial hidroelétrico no período da vazante.

A implantação de reservatórios artificiais pode ocasionar mudanças nas condições atmosféricas locais como a diminuição da temperatura, aumento da umidade relativa do ar e mudanças no comportamento do vento (Sousa, 2010). Freitas e Dias (2004) estudaram a influência das represas Billings e Guarapiranga para as condições atmosféricas da Região Metropolitana de São Paulo. Estes autores utilizaram o modelo *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS) e caracterizaram, por meio da análise dos campos de divergência e convergência, a advecção de temperatura e vento, os horários de ocorrência da brisa lacustre induzida pelo

aquecimento diferenciado entre a lâmina d'água e a região do entorno. A fim de analisar os impactos do reservatório de Itaipu para a camada limite planetária (CLP) local, Stivari (1999) verificou a interferência do reservatório na circulação local e a ocorrência de brisa lacustre apontando os horários de ocorrência da mesma.

Nesse contexto, este artigo tem como objetivo principal avaliar a variabilidade do vento na região do reservatório Hidrelétrico de Furnas, localizado no Estado de Minas Gerais, por meio de simulações com os modelos BRAMS e WRF, para duas condições sinóticas distintas. Uma avaliação do desempenho destes modelos em representar as condições meteorológicas na região de interesse também é um dos objetivos deste estudo.

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Área de Estudo

O estudo compreende a região do Reservatório Hidrelétrico de Furnas localizado no interior do estado de Minas Gerais (Figura 1) no curso médio do rio Grande, entre os municípios de São José da Barra e São João Batista do Glória, em Minas Gerais. A represa cobre uma superfície de 1.440 km<sup>2</sup> com a cota máxima de 762 m em relação ao nível do mar e abrange 34 municípios. O lago é formado por dois braços: um a leste e outro a sul da barragem. Do lado leste, o principal rio que deságua no lago é o Rio Grande. Do lado sul, a represa é formada da junção dos rios Verde, Sapucaí e Machado, além de muitos ribeirões e córregos.

### 2.2 Período do Estudo

Para análise foram selecionados dois períodos de condições sinóticas distintas, as quais foram avaliadas por meio de imagens de satélite e cartas sinóticas disponibilizadas pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC-INPE). Foi selecionado como Caso 1 o período entre 20 a 24 de junho de 2014 quando foi identificada a influência de um sistema de alta pressão na região (Figura 2). Para o Caso 2, foi selecionado o período entre os dias 23 e 25 de julho de 2014 (Figura 3) que corresponde à passagem de uma frente fria na região.

Figura 1 Área de estudo no curso médio do rio Grande, entre os municípios de São José da Barra e São João Batista do Glória, em Minas Gerais.

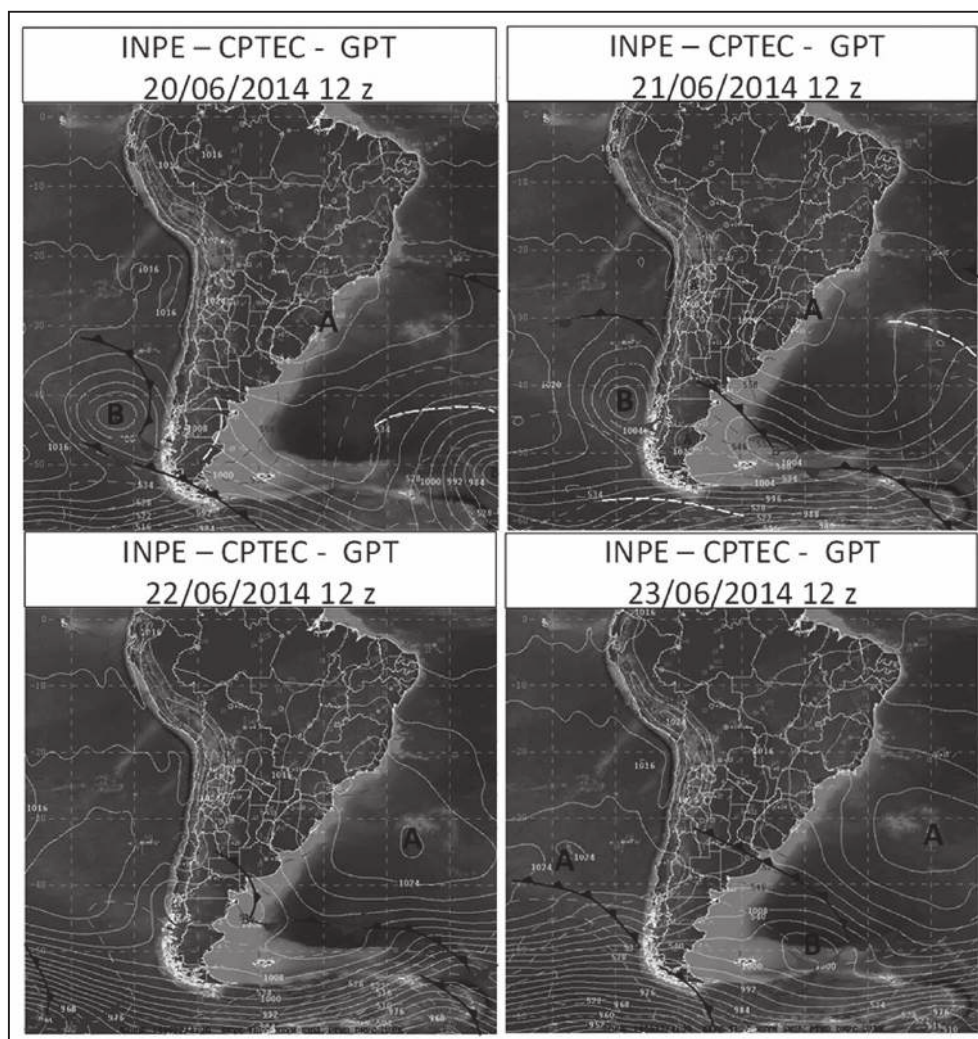
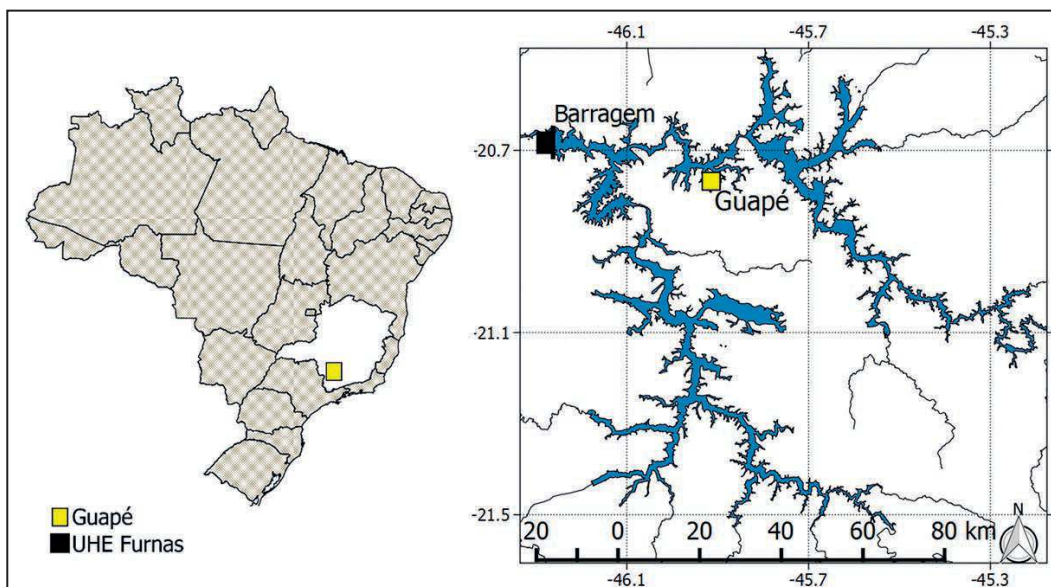


Figura 2 Cartas sinóticas de 20 à 23 de junho de 2014 às 09:00 (Horário Local – HL), na figura a letra A e B indicam o centro de uma região de alta e baixa pressão respectivamente. Fonte: CPTEC, 2014.

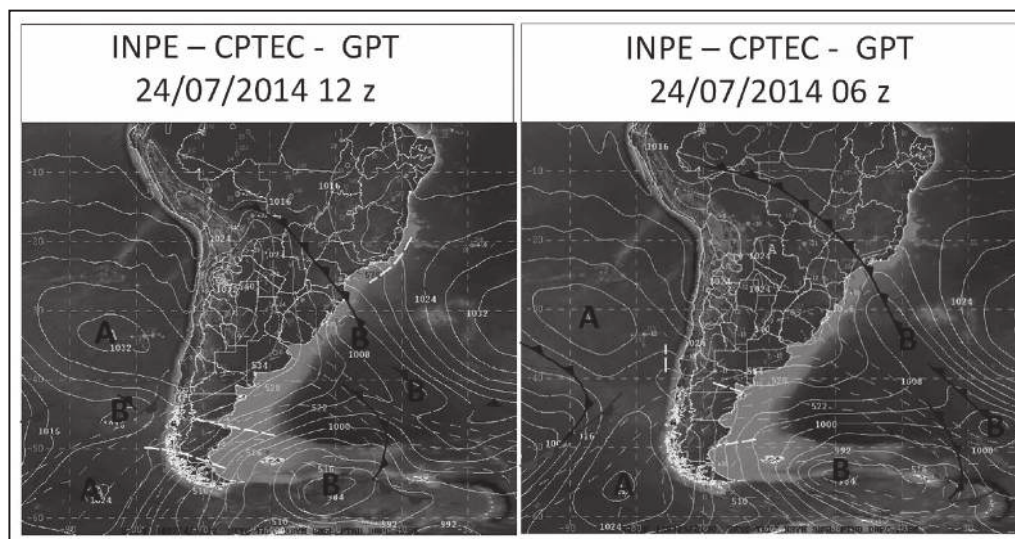


Figura 3 Cartas sinóticas dos dias 24 de julho de 2014 às 09:00 (HL) e 25 de julho de 2014 às 03:00 (HL), na figura a letra A e B indicam o centro de uma região de alta e baixa pressão respectivamente. Fonte: CPTEC, 2014.

A seleção desses períodos também levou em conta a disponibilidade de dados meteorológicos fornecidos a partir do projeto “Aproveitamento Eólico em Reservatórios Hidrelétricos: Cenário Atual e Futuro”, financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG). Os dados de intensidade e direção do vento, temperatura e umidade relativa, são provenientes deste experimento que consistiu da instalação de três torres anemométricas no braço do reservatório próximo a cidade de Guapé. As torres foram instaladas num arranjo amostral de investigação da influência do *fetch* para o regime de ventos, comportamento do escoamento na transição água-terra e estudo da influência da cobertura e topografia. Neste estudo, foi utilizado para comparação os dados provenientes da torre instalada numa pequena ilha dentro do reservatório, já que para os períodos selecionados, os dados das outras duas torres apresentaram descontinuidade.

Para as simulações foram utilizados os modelos numéricos de mesoescala BRAMS 4.2 e WRF 3.6.1 (Skamarock *et al.*, 2008). Todas as simulações foram inicializadas com dados obtidos a partir do modelo *Global Forecast System (GFS-FNL; NCEP, 2000)* do *National Center for Environmental Prediction (NCEP)* com frequência de 6 horas. Foram consideradas três grades aninhadas com resolução espacial horizontal de 16, 4 e 1 km centradas na coordenada 20.99°S e 45.86°W. A Figura 4 apresenta a configuração das grades utilizadas nos modelos e a Tabela 1 a configuração utilizada para as simulações.

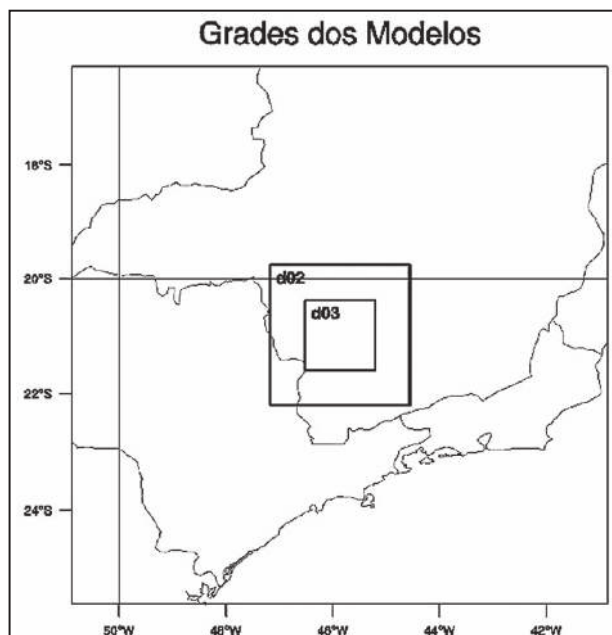


Figura 4 Configuração das grades dos modelos.

Para o Caso 1, a simulação teve início às 21:00 (Hora Local - HL) do dia 19 de junho de 2014 com a duração de 88 horas e, para o caso 2, deu-se início no dia 23 de julho de 2014 às 21:00 (HL), com uma rodada de 43 horas. Em ambos os casos foram desconsideradas as 12 primeiras horas com a finalidade de eliminar o efeito *spin-up* (Skamarock, 2004).

Para a verificação dos resultados, foram aplicadas estatísticas comparando os dados gradados

Parâmetro	BRAMS			WRF		
	d01	d02	d03	d01	d02	d03
Pontos em x	66	66	138	66	66	137
Pontos em y	66	66	138	66	66	137
Níveis Verticais	40	40	40	40	40	40
Passo de Tempo	40s	10s	2,5s	40s	10s	2,5s
Cúmulos	Grell	desativado	desativado	Betts-Miller-Janjic	desativado	desativado
R. de Onda Longa	Chen	Chen	Chen	RRTM	RRTM	RRTM
R. de Onda Curta	Chen	Chen	Chen	Dudhia	Dudhia	Dudhia
Nudging	ativado	ativado	ativado	ativado	ativado	ativado

Tabela 1 Configuração e parametrizações utilizadas nas simulações.

pelos modelos com os dados registrados pela torre meteorológica. Foram então aplicados os seguintes métodos estatísticos: desvio padrão ( $\sigma$ ), erro médio (ME), erro médio quadrático (MSE), raiz do erro médio quadrático (RMSE), correlação de Pearson (R) e o índice de concordância (d) conforme metodologia apresentada por Mazzoliet al. (2008). Mazzoliet al. (2008) apud Pielke (2002) também indicaram um critério para o cálculo do *skill* da simulação que foi utilizado para avaliação dos resultados. Neste caso, o desvio padrão da série observada e da série simulada deve ser aproximadamente igual ( $\sigma_{obs} \approx \sigma_{sim}$ ), a raiz do erro médio quadrático (RMSE) deve ser menor do que o desvio padrão da observação ( $RMSE < \sigma_{obs}$ ) e o  $RMSE_{ub}$ , que representa a raiz do erro médio quadrático após a remoção de um desvio médio, também deve ser menor do que o desvio padrão da observação ( $RMSE_{ub} < \sigma_{obs}$ ).

Com a finalidade de verificar as variações do vento e da temperatura na região do reservatório foram gerados os seguintes campos: (a) topografia utilizada pelo modelo e vento a 2m; (b) temperatura

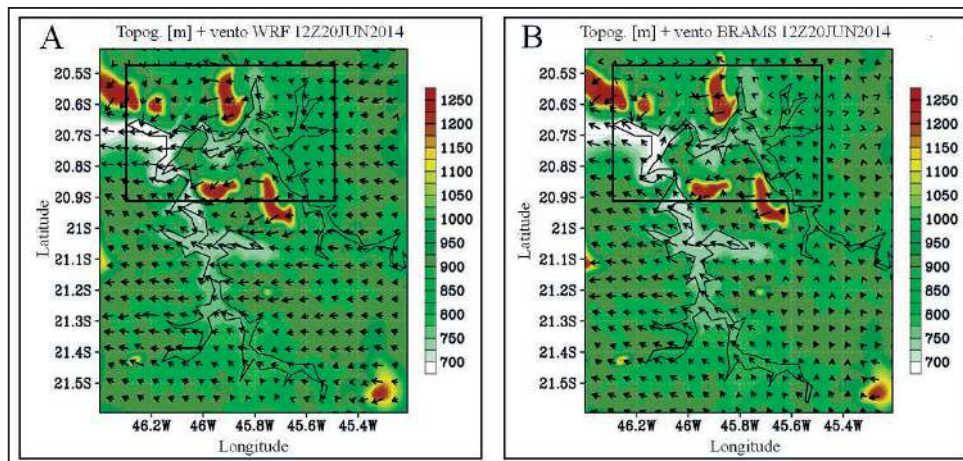
a 2 m; e (c) perfil vertical do vento e da anomalia de temperatura.

### 3 Resultados e Discussões

#### 3.1 Influência da Topografia no Campo de Vento

A representação da topografia nos modelos numéricos é bastante importante uma vez que esta pode influenciar o escoamento através do aquecimento diferencial vale-montanha (Freitas, 2003), ou pela canalização dos ventos pela morfologia do terreno (Sakai 2006). A Figura 5 indica que tanto as simulações do BRAMS quanto o WRF representam a ação da orografia como agente de canalização dos ventos no braço do reservatório onde se localiza a torre utilizada para a coleta de dados. Fica muito claro a intensificação do vento no braço do reservatório disposto na direção leste oeste, este setor é alinhado com extensas cadeias de montanhas (região destacada com o retângulo figura 5A e 5B). Este resultado é similar ao encontrado por Assireu et al., (2011 e 2013) para o reservatório de Itumbiara na divisa entre Minas Gerais e Goiás, onde as características do relevo são similares.

Figura 5 Campos de vento e topografia gerados pelos modelos BRAMS (A) e WRF (B) para as 09:00 (HL) de 20 de junho de 2014.



### 3.2 Comparação dos Resultados

#### 3.2.1 Resultados do Caso 1:

##### Atuação de um Sistema de Alta Pressão

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos com a aplicação dos métodos estatísticos comparando os dados de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento observados e simulados com os modelos BRAMS e WRF entre os dias 20 e 24 de junho de 2014.

Os valores de temperatura simulados pelo BRAMS e WRF apresentaram correlação (R) de 0,75 e 0,83 respectivamente, e concordância (d) de 0,72 e 0,74 com o observado. Estes resultados indicam que o WRF obteve os melhores resultados quando comparado aos dados observados. O erro médio (ME) apresentou valores relativamente baixos para ambos os modelos indicando que a diferença da média da simulação e da observação foi pequena com uma ligeira tendência de subestimação dos valores observados por ambos os modelos BRAMS e WRF. Os critérios do *skill* não foram satisfeitos para a simulação de temperatura, com o modelo BRAMS. Já o modelo WRF apresentou pequena diferença entre o  $\sigma_{sim}$  e o  $\sigma_{obs}$  e resultados do RSME e  $RSME_{UB}$  inferiores ao desvio padrão do observado indicando que o modelo teve habilidade em simular a temperatura do ar.

A análise estatística da umidade relativa do ar indicou valores relativamente elevados de correlação e índice de concordância com superiores a 0,78 tanto para o BRAMS como para o WRF. O erro médio apresentou valores relativamente baixos, indicando que o modelo BRAMS tende a subestimar, enquanto o WRF tende a superestimar a umidade relativa do ar. A diferença entre o  $\sigma_{sim}$  e  $\sigma_{obs}$  foi pequena nos dois modelos utilizados, o segundo e terceiro critério

para se obter o *skill* foram atingidos, demonstrando a habilidade do modelo em simular tal parâmetro.

Os métodos estatísticos aplicados aos valores de intensidade do vento indicaram para a simulação realizada com o BRAMS R e d de 0,72 e 0,84 respectivamente, valores relativamente altos, enquanto para o WRF os valores foram mais baixos, com índices R = 0,39 e d = 0,64, o que indica que o modelo não representou os dados de vento em superfície em concordância com as observações. Os resultados foram corroborados pela análise do ME que apresentou valor relativamente baixo para a simulação realizada com o BRAMS, indicando que a diferença entre a média da simulação e a da observação foi pequena, e valores relativamente mais altos para o WRF. Verificou-se também que o BRAMS apresentou uma ligeira tendência de subestimativa da intensidade dos ventos enquanto WRF obteve uma tendência de superestimar tais valores. O BRAMS cumpriu todos os critérios do *skill* propostos por Pielke (1984), ao contrário do WRF, quando analisada a velocidade dos ventos.

A Figura 6 apresenta a série temporal das variáveis medidas e simuladas. A visualização dos resultados de temperatura indica um ciclo diurno bem definido, com maiores valores observados durante a tarde, em resposta ao aquecimento radiativo e os menores valores durante a manhã. Ambos os modelos acompanharam bem as variações diurnas, no entanto observou-se que o BRAMS apresentou uma maior amplitude térmica durante o dia, subestimando, principalmente, as temperaturas mínimas registradas no reservatório. A relação inversa entre temperatura e umidade relativa foi observada ao longo do dia. Em geral, ambos os modelos representaram razoavelmente bem o comportamento e a magnitude dos valores de umidade relativa.

		$\sigma_{obs}$	$\sigma_{sim}$	ME	MSE	RMSE	R	d	$RMSE_{UB}$
BRAMS	Temperatura	2,97	5,13	-1,63	15,15	3,89	0,75	0,72	3,5
	Umidade	13,79	15,39	-7,95	152,93	12,37	0,81	0,78	9,13
	Int. vento	1,67	1,63	-0,15	2,05	1,24	0,72	0,84	1,22
WRF	Temperatura	2,97	2,21	-0,71	3,35	1,83	0,83	0,84	1,67
	Umidade	13,79	12,29	8,81	149,13	12,21	0,81	0,85	7,98
	Int. vento	1,67	1,88	0,79	4,55	2,13	0,39	0,64	1,96

Tabela 2 Resultados estatísticos obtidos através da comparação entre os valores gerados pelo BRAMS e WRF e os observados durante o CASO1.

Os resultados da velocidade do vento também revelam um comportamento bem definido durante o dia, como se pode observar, as maiores intensidades são observadas no início da tarde, o que pode ser atribuído a um maior gradiente horizontal de temperatura, já que a incidência solar favorece o aumento de turbulência na atmosfera e ao aumento da velocidade do vento. Em oposição no início do dia são observados os menores valores de intensidade dos ventos. A simulação realizada com o BRAMS é a que melhor acompanha as variações do vento medidas in situ.

A direção do vento varia de forma temporal e espacial, de acordo com fatores como a topografia

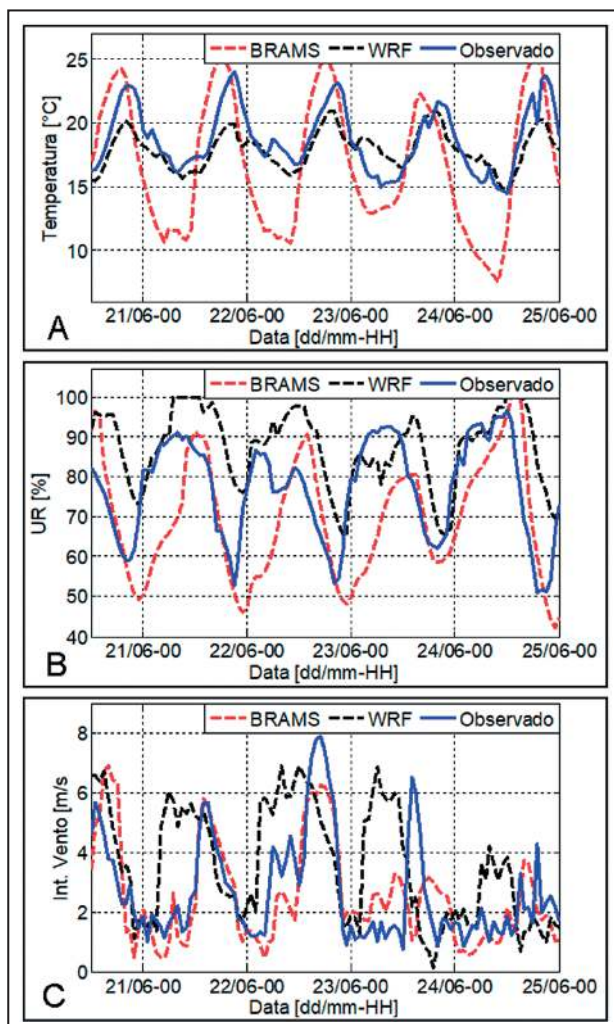


Figura 6 Comparação das séries temporais simuladas pelos modelos BRAMS e WRF e observada temperatura (A), UR (B) e vento (C).

local, a rugosidade da superfície associada ao relevo e a vegetação, o clima e a época do ano (Vendramini, 1986). Os ventos que atingem a região de estudo no período selecionado possuem maior frequências de leste e também um sinal na direção oeste. Os ventos predominantes (de leste) foram bem identificados por ambos os modelos, no entanto apenas o BRAMS simulou ocorrências de ventos de oeste (Figura 7).

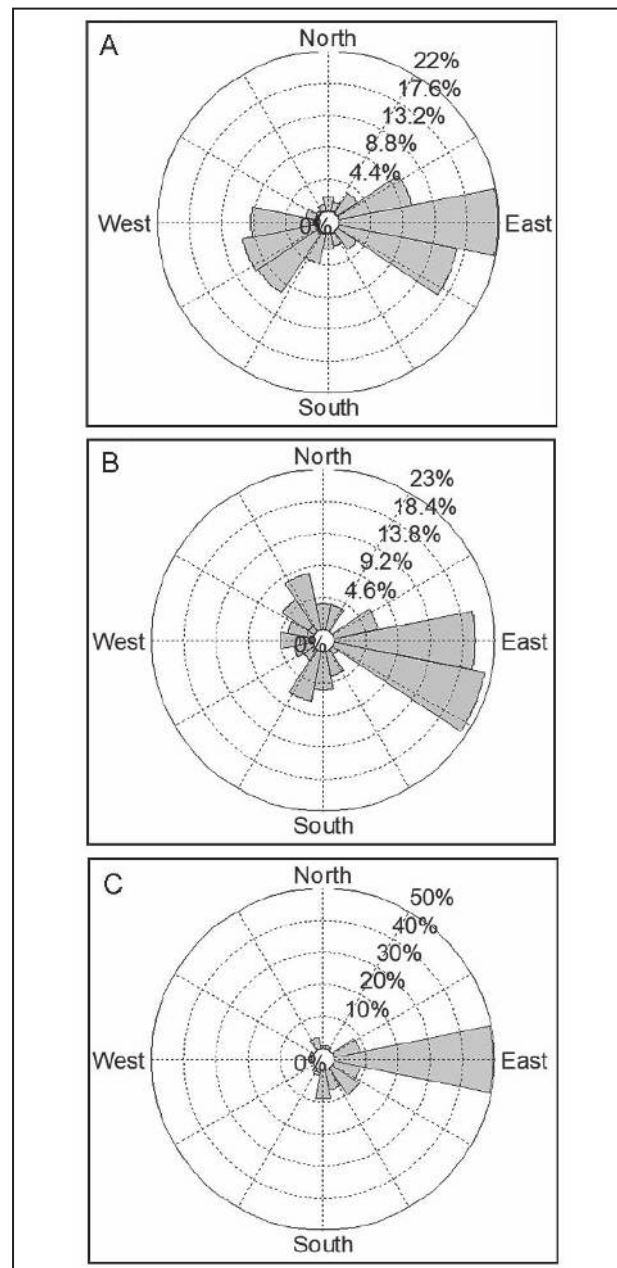


Figura 7 Rosas dos ventos para o período de 20 a 24 de junho de 2014 considerando os dados (a) observado, (b) BRAMS e (c) WRF

A fim de verificar o aquecimento diferencial induzido pelo reservatório foram gerados os campos de temperatura do ar para dois horários representando o horário esperado de maior e menor aquecimento do ar adjacente ao reservatório, sendo o primeiro para às 14:00(HL) do dia 22 de junho de 2014 (Figura 8A e 8C) e o segundo para às 00:00(HL) o dia 23 de junho de 2014 (Figura. 8B e 8D), onde é possível verificar que os campos de temperatura indicam valores de temperatura do ar adjacente ao reservatório maiores (menores) durante a noite (dia), do que os valores verificados nas regiões ao seu entorno. Esta tendência foi verificada por ambos os modelos (BRAMS e WRF). A temperatura da superfície da água em reservatórios tropicais é, na maior parte do tempo, maior (menor) do que a do ar durante a noite (dia), como mostrado por Assireu et al. (2011) (Figura 9).

Foi verificado uma diferença de temperatura entre a região do corpo d'água (atmosfera sobre o reservatório) e a atmosfera ao entorno de aproximadamente 3°C durante a manhã e 5°C durante a tarde indicando que a presença da massa de água exerce influência na variação de temperatura. Dias e Freitas (2004) verificaram para a represa de Billings e Guarapiranga diferenças de temperatura entre 0,2 e 0,9°C da região do lago com relação ao seu entorno. Como antecipado por Lorenzetti et al. (2015), o balanço de energia entre sistemas aquáticos tropicais e atmosfera é dominado pelo calor latente e, portanto, estes resultados apontam para o potencial destes modelos também serem aplicados para estudos de balanço de energia e influências de extensos sistemas aquáticos para o clima local.

A Figura 10 representa a seção vertical da área de estudo na latitude de 20,75°S, na qual se localiza a torre anemométrica considerada como referência para comparação com as simulações (próxima a cidade de Guapé-MG). Pode-se observar comportamentos distintos para as 09:00 e as 14:00(HL). No período da manhã, observam-se ventos ascendentes na região do corpo d'água.

Este resultado também foi observado por Freitas e Dias (2003), os quais observaram que no período da manhã se forma uma região de convergência sobre o lago. Anomalias positivas de temperatura também foram observadas sobre a superfície adjacente ao reservatório (longitude de 46 a 45,6°W).

No período da tarde observa-se a predominância de ventos descendentes sobre o reservatório, o mesmo resultado também foi verificado por Freitas e Dias, (2004) onde foi verificado que no período da tarde uma região de divergência se forma sobre o lago.

A Figura 10 evidencia um conjunto de circulações verticais mais intensas por parte do BRAMS (Fig. 10A e 10B) ilustrando uma circulação característica de brisa lacustre quando, no período da manhã, verifica-se convergência sobre o reservatório e, durante a tarde, divergência de ventos do reservatório. Na literatura é definido que a brisa lacustre é gerada pelo aquecimento diferencial entre a superfície da água e a superfície terrestre próxima, devido à diferença na capacidade calorífica entre a terra e o corpo d'água (Simpson, 1994).

### 3.2.2 Resultados do Caso 2: Atuação de um Sistema Frontal

A Tabela 3 apresenta os resultados estatísticos obtidos por meio da comparação entre as séries de dados observados e simulados com os modelos BRAMS e WRF para os dias 24 e 25 de julho de 2014 (Caso 2).

A temperatura simulada pelo BRAMS e pelo WRF apresenta valores relativamente elevados de correlação linear de Pearson (R) e do índice *d* superiores a 0,95. Os valores do ME foram relativamente baixos indicando que a diferença da média da simulação e da observação foi pequena, com uma ligeira tendência de superestimava dos resultados gerados pelo BRAMS e subestimativa para os obtidos com o WRF. Também foi possível observar que ambos os modelos obedeceram aos critérios do *skill* definidos por Pielke (1984) no que se refere a temperatura do ar.



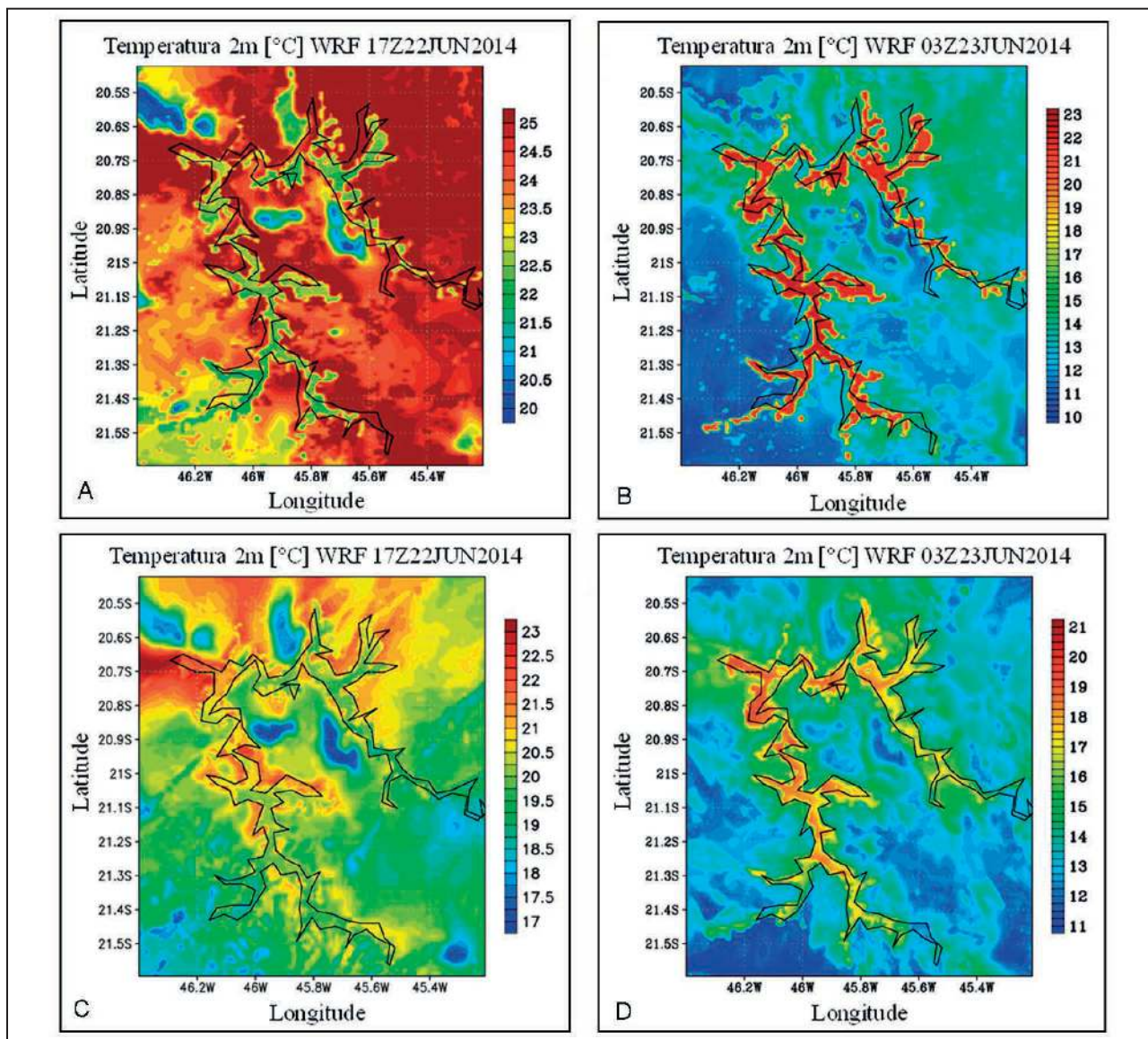
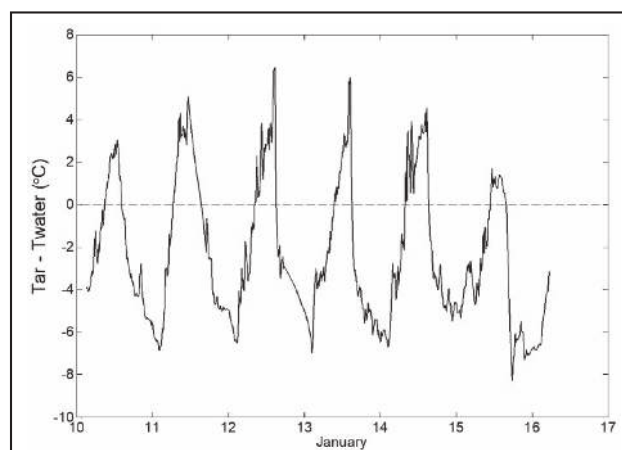


Figura 8 Temperatura a 2 m simuladas pelos modelos BRAMS (A e B) e WRF (C e D) para 14:00 (HL) de 22 de junho de 2014 e para 00:00 (HL) de 23 de junho de 2014.

Figura 9 Diferenças de temperatura do ar e água, durante o mês de janeiro, típicas para reservatórios em regiões tropicais.  
 FONTE: Assireu et al. (2011).



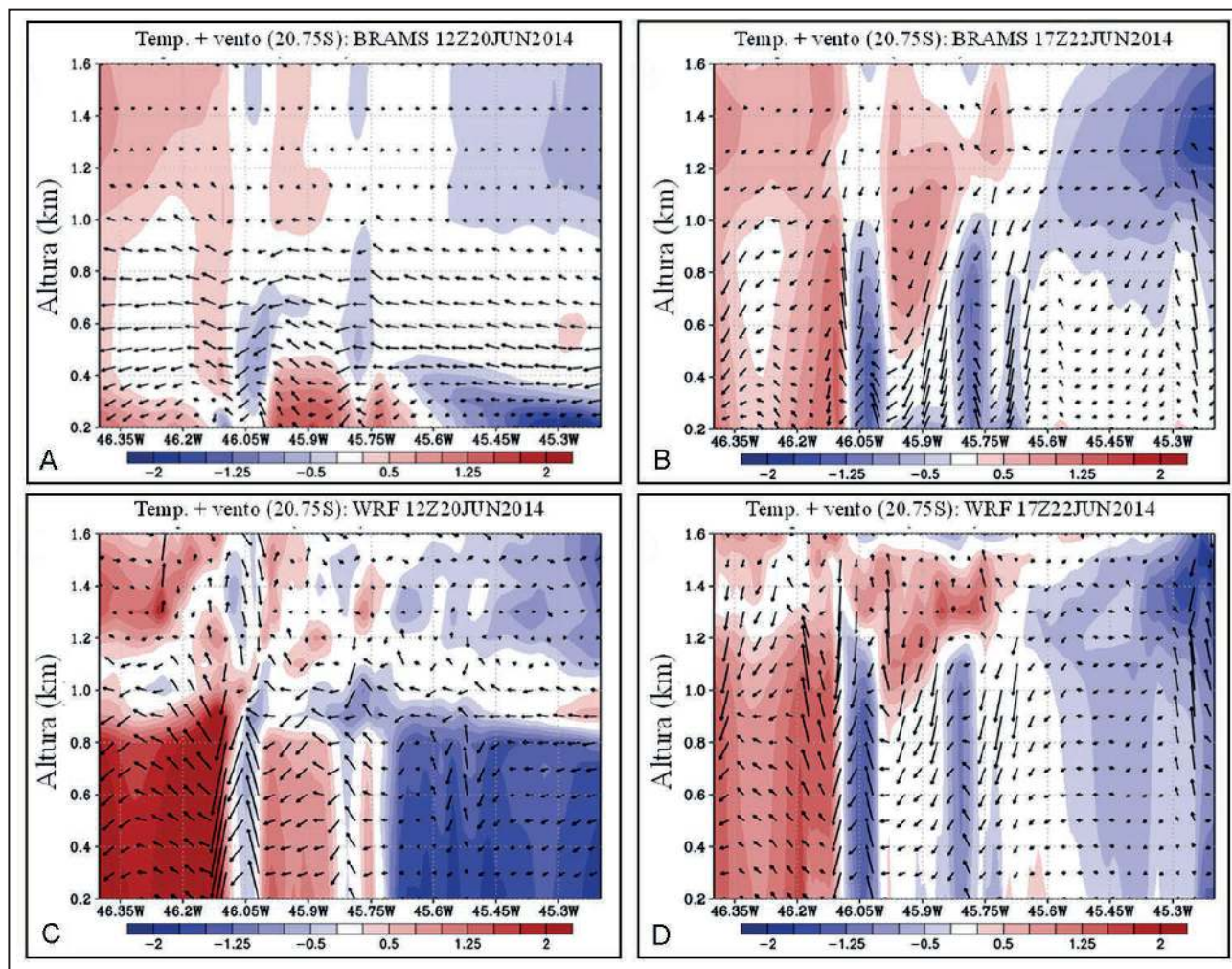


Figura 10 Perfil vertical do vento e da anomalia de temperatura (temperatura média para cada nível menos o valor de temperatura para cada ponto) simuladas pelos modelos BRAMS (A e B) e WRF (C e D) para os dias 20 de junho de 2014 às 09:00 e 22 de junho de 2014 às 14:00 (HL).

A análise estatística da umidade também indicou valores elevados de correlação e concordância para o BRAMS e para o WRF – valores acima de 0,93. O cálculo do ME também revelou valores relativamente baixos indicando bom desempenho dos modelos na simulação do parâmetro. A diferença percentual do  $\sigma_{sim}$  e  $\sigma_{obs}$  foi de 13% para o BRAMS e 2% para o WRF. O segundo e terceiro critério do *skill* também foram obedecidos por ambos os modelos, cumprindo os critérios propostos por Pielke (1984).

A comparação entre os resultados de velocidade simulados e observados indicaram que os modelos não foram eficientes na simulação para

este caso. Os resultados obtidos com o BRAMS, apresentaram correlação de 0,48 e índice de concordância de 0,35. O valor de correlação e concordância encontrado para a simulação realizada com o WRF foram relativamente mais satisfatórios na comparação com o BRAMS (correlação de 0,66 e concordância de 0,81). O ME foi de -1,46 para a simulação realizada com o BRAMS e de 0,29 para o WRF. Verificou-se também que o BRAMS apresentou uma tendência de subestimar a intensidade dos ventos enquanto o WRF obteve uma ligeira tendência de superestimar tais valores. Para o BRAMS, nenhum dos critérios do *skill* foram obedecidos, indicando a dificuldade do modelo em

simular o vento para esta condição. Para a simulação realizada com o WRF observou uma diferença percentual do  $\sigma_{sim}$  em relação ao  $\sigma_{obs}$  próxima de 4% e tanto o  $RSME$  quanto o  $RSME_{UB}$  apresentaram valores inferiores ao desvio padrão do observado indicando que os critérios do *skill* foram atingidos.

		$\sigma_{obs}$	$\sigma_{sim}$	ME	MSE	RMSE	R	d	$RMSE_{UB}$
BRAMS	Temperatura	5,04	5,83	0,77	3,63	1,90	0,96	0,97	1,69
	Umidade	21,31	24,73	-2,46	87,25	9,34	0,93	0,95	8,91
	Int. vento	1,95	1,37	-1,46	5,87	2,42	0,48	0,35	1,76
WRF	Temperatura	5,04	4,81	-0,23	0,72	0,85	0,98	0,99	0,81
	Umidade	21,31	21,65	6,62	100,71	10,03	0,95	0,95	6,67
	Int. vento	1,95	2,03	0,29	2,81	1,67	0,66	0,81	1,64

Tabela 3 Resultados estatísticos obtidos através da comparação entre os valores gerados pelos modelos BRAMS e WRF comparados ao observado durante o CASO2.

Os sistemas frontais, associados aos distúrbios de grande-escala, deslocam-se acompanhados de ciclones e anticiclones móveis, alterando os campos de pressão atmosférica, vento, e de outras variáveis, ao longo da sua trajetória (Wallace & Hobbs, 1977).

A temperatura nesse período apresentou uma pequena variação, provavelmente, associada à presença de nebulosidade. A partir de 25 horas de simulação (01Z do dia 25/07) foi verificado um padrão mais constante de temperatura observado e simulados (Figura 11A) A umidade relativa apresentou as mesmas características da temperatura. A partir de 01 Z do dia 25, o vento não possui uma variação diária definida. A simulação com o WRF aproxima mais do observado

A passagem de uma frente fria também provocou mudanças no comportamento de ventos. No Caso 1, foi verificado uma componente significativa de ventos soprando para leste, enquanto no Caso 2 essa componente não foi verificada, o vento observado apresenta componentes soprando para norte e para oeste. Os resultados gerados pelas e aproximaram do observado. No entanto a simulação realizada com o WRF se mostrou mais representativa uma vez que a direção predominante no período foi bem próxima a verificada nos valores medidos (frequência e direção).

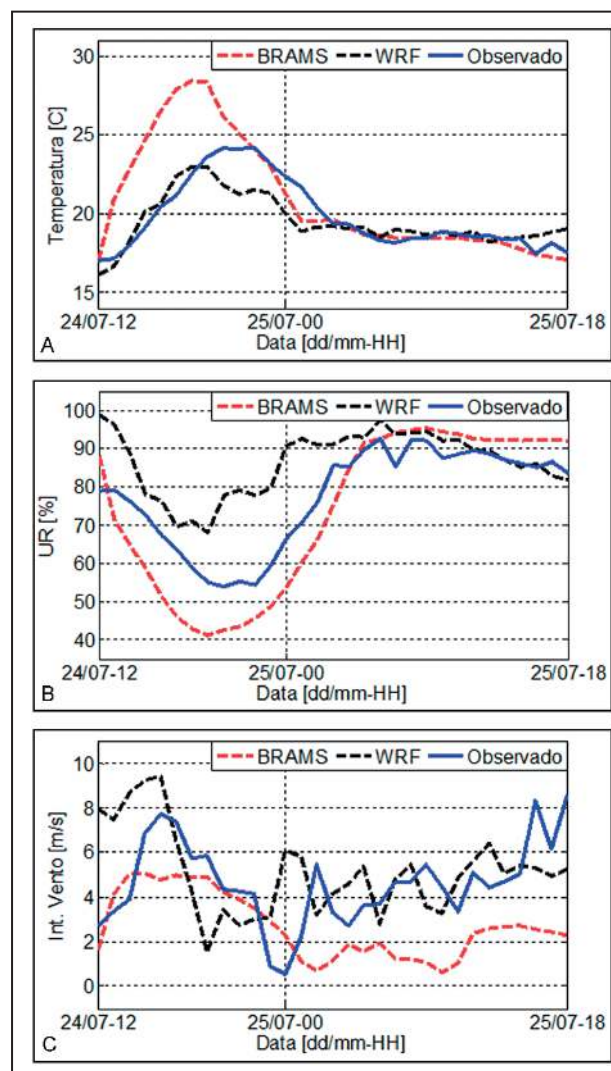


Figura 11 Comparação das séries temporais simuladas pelos modelos BRAMS e WRF e observada: temperatura (A), UR (B) e vento (C).

Como discutido anteriormente, durante a passagem de frente fenômenos de escalas menores como o aquecimento diferenciado não são representativos. Isto repercute em uma maior mistura na coluna vertical na latitude do braço do reservatório próximo a cidade de Guapé – MG, conforme observado na Figura 13.

A fim de verificar o gradiente horizontal de temperatura induzido pelo reservatório, no cenário da atuação do sistema frontal, foram gerados os campos de temperatura do ar para dois horários onde é esperado gradientes mais intensos.

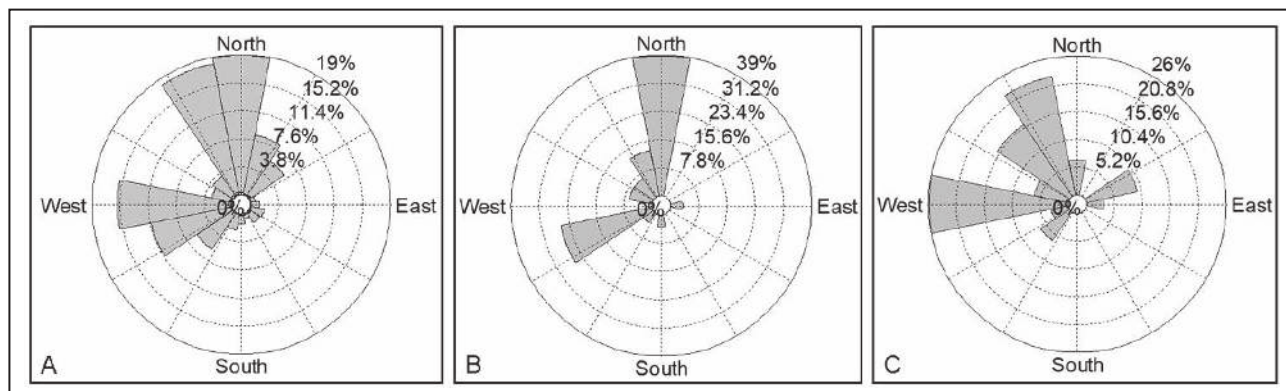


Figura 12 Comparação gráfica da direção do vento medido e simulado Observado (A), BRAMS (B) e WRF (C).

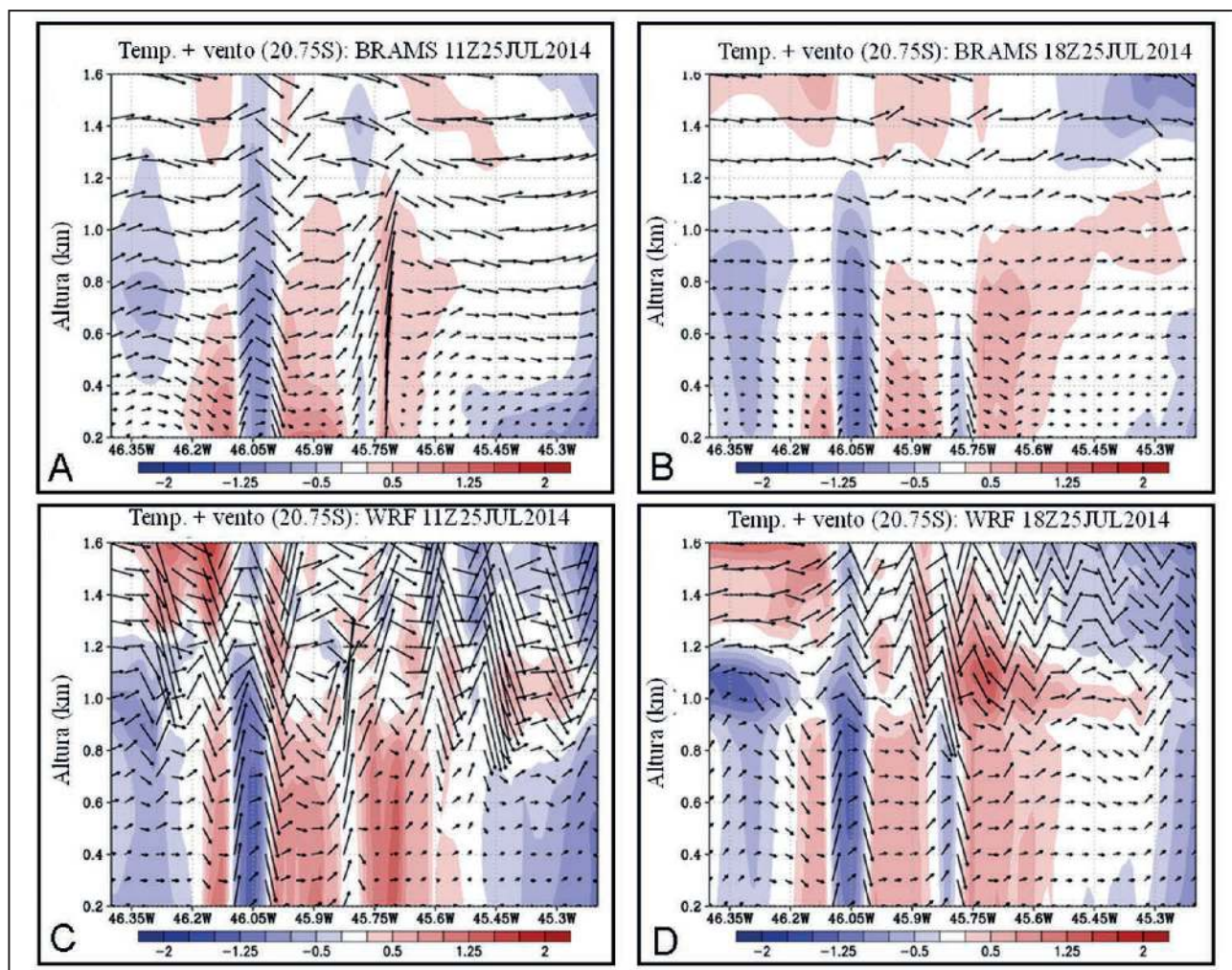


Figura 13 Perfil vertical do vento e da anomalia de temperatura (temperatura média para cada nível menos o valor de temperatura para cada ponto) simuladas pelos modelos BRAMS (A e B) e WRF (C e D) para o dia 24 de julho de 2014 às 08:00 e às 16:00 (HL).

O primeiro para às 08:00(HL) e o segundo para às 15:00(HL) do dia 25 de julho de 2014. Para o horário das 8:00 (11 Z) o resultado é semelhante ao observado no Caso 1, a temperatura do ar adjacente a superfície do reservatório permanece mais quente que a região ao entorno (Figura 14A e 14C). Para o horário das 15:00 HL (18 Z), ambos os modelos BRAMS e WRF mostraram ar adjacente a água com temperatura maior do que sobre a terra. A atuação do sistema frontal é dominante sobre os sistemas de menor escala, agindo de forma a homogeneizar o campo horizontal de temperatura. Assim, os maiores valores de temperatura do ar sobre o reservatório

estão associados ao fato de a água ter uma resposta mais lenta a perda de calor, fornecendo calor para o ar adjacente. Percebe-se, então, que a presença de extensos sistemas aquáticos contribui para o aumento do gradiente horizontal de temperatura, inclusive nos períodos de frente fria.

#### 4 Conclusão

A partir das simulações com os modelos WRF e BRAMS foi possível verificar o papel do relevo como agente canalizador e intensificador dos ventos na região do reservatório de Furnas, Minas Gerais.

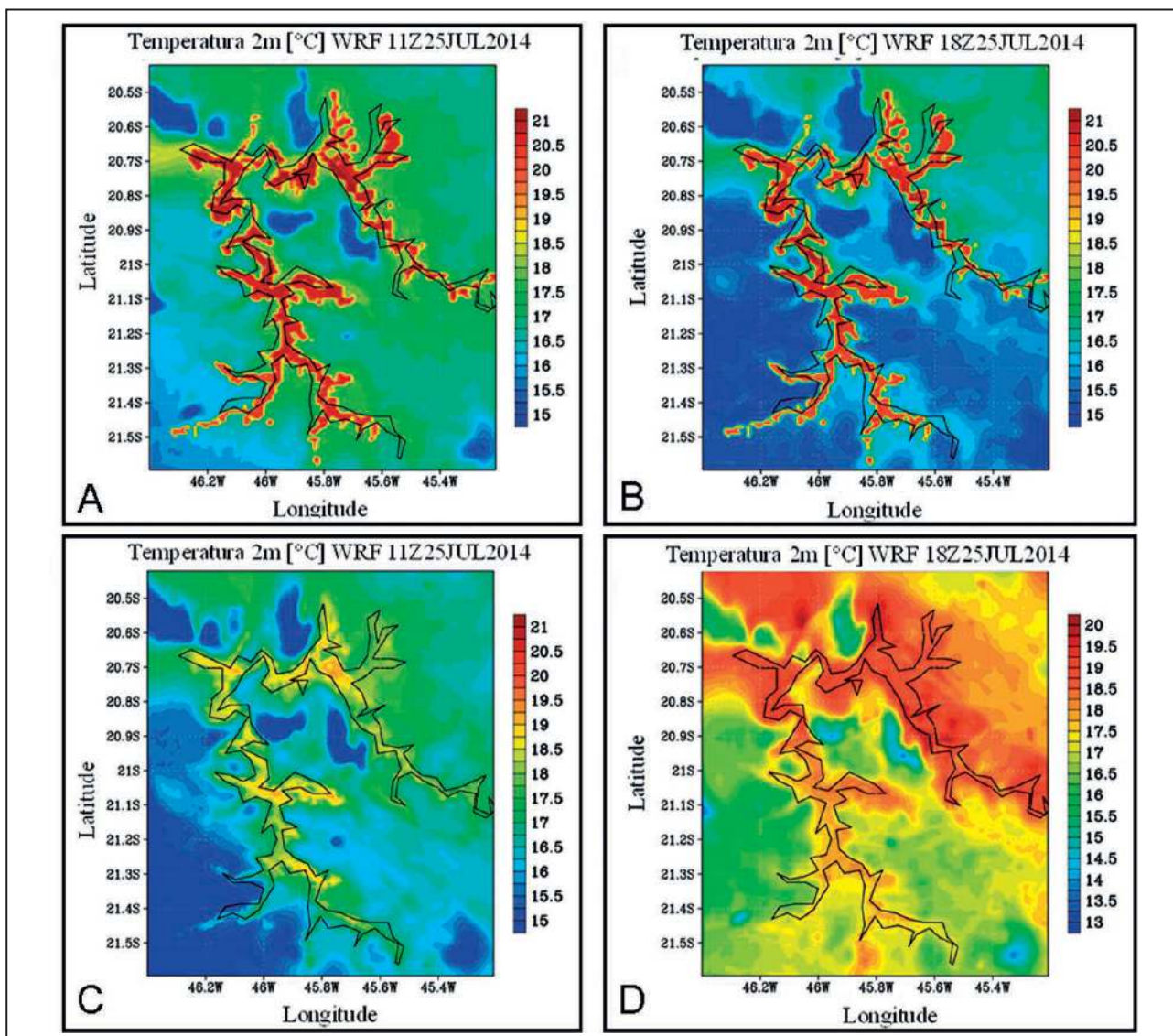


Figura 14 Temperatura a 2 m simuladas pelos modelos BRAMS (A e B) e WRF (C e D) para 08:00 e 15:00 (HL) do dia 25 de julho de 2014.

Também foi possível observar que os modelos apresentaram resultados distintos, quando comparados aos dados observados, em duas condições sinóticas analisadas. Na primeira delas (Caso 1), durante a atuação de um sistema de alta pressão, o modelo BRAMS foi o que melhor simulou os valores velocidade e direção dos ventos, enquanto os valores de temperatura e umidade relativa do ar foram melhores representados pelo WRF. Na segunda simulação (Caso 2), durante a atuação do sistema frontal, os resultados indicaram que o modelo WRF representou bem todos os parâmetros analisados, enquanto o modelo BRAMS não obteve bons resultados no que se refere a comparação com dados de direção e velocidade dos ventos.

Analisando a distribuição espacial da temperatura do ar sobre o reservatório e a região de entorno, além dos perfis verticais de vento e temperatura, foi possível verificar o aquecimento (e resfriamento) diferencial induzido pelo reservatório que induz uma circulação característica de brisa lacustre.

## 5 Referências

- Assireu, A.T.; Pelegrin, C.C. & Pimenta, F.M. 2013. Intensificação do vento devido a influências do relevo: evidências a partir de modelos numéricos e medidas in situ. *Revista Ciência e Natura*, Santa Maria, 1: 76 - 78.
- Assireu, A.T.; Pimenta, F.M. & Souza, V.C.O. 2011. Assessment of the Wind Power Potential of Hydroelectric Reservoirs. In: *de Alcântara EH, ed. Energy Resources: development, distribution, and exploitation*. New York: Nova Science Publishers. 241 p.
- Brazilian Regional Atmospheric Modeling System /CPTEC. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: Acesso em: 04 dez. 2014, 10:30:00.
- Freitas, E.D. 2003. *Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes*. 2003. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 156 p.
- Freitas, E.D. & Dias, P.L.D. 2004. Os efeitos da brisa lacustre sobre as condições atmosféricas da região metropolitana de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 18, Fortaleza, 2004.
- Lorenzetti, J.A.; Araujo, C.A.S. & Cutarelli, M.P. 2011. Mean diel variability of surface energy fluxes over Manso Reservoir. *Journal of the International of limnology*, 1(1): 155-172.
- Mazzoli, C. R.; Carvalho, V. S. B.; Freitas, E. D.; Andrade, M. F.; Martins, L. D.; Martins, J. A. 2008. Utilização de métodos estatísticos para avaliação da acurácia dos resultados de simulações numéricas da concentração de ozônio gerados pelos modelos cit, spm-brams E WRF/CHEM. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15, São Paulo. *Anais do XV Congresso Brasileiro de Meteorologia*.
- Mattiuzzi, H.V. 2012. O Comportamento dos ventos em vitória (Es): A Gestão E Interpretação Dos Dados Climatológicos. *Revista geonorte*, 3(5): 983-993
- National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. 2000, updated daily. *NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999*. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory.
- Sousa, M. B; DE Fatima Mariano, Z; Galvani, E. 2012. Influência de lagos artificiais no clima local e no clima urbano do caso de presidente Epitácio – SP. *Revista Geonorte*, 3(9), 391-400.
- NCEP–National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce (2007) . NCEP Global Forecast System (GFS) Analyses and Forecasts. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, 2015. Disponível em. Acesso em jan 2015.
- Oliveira, L.L.; Vianello, R.L. & Ferreira, N. 2001. *Meteorologia Fundamental*, Erechim, RS: Ed. EDIFAPES, 430 p.
- Pielke, R. A. 2002. *Mesoscale Meteorological Modeling*. Estados Unidos, Academic Press, v. 78. 676 p.
- Pimenta, F.M. & Assireu, A.T. 2015. Simulating reservoir storage for a wind-hydro hybrid system. *Renewable Energy*, 76: 757-767.
- Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds084.6/>. Acesso em: dezembro 2014.
- Sakai, R.K.; Fitzjarrald, D.R.; Walcek, C.; Czirkowsky M.J. & Freedman J. M. 2006. Wind Channeling in the Hudson Valley. In: SYMPOSIUM ON BOUNDARY LAYERS AND TURBULENCE, 17, New York, p. 1 – 5.
- Stivari, S.M.S. 1999. *Um estudo da brisa lacustre do Lago de Itaipu*. Departamento de ciências atmosféricas, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado 181p.
- Stech, J.L; Lima, I.B.T.; Novo, E.M.L.M.; Silva, C.M.; Assireu, A.T.; Lorenzetti, J.A.; Carvalho, J.C.; Barbosa, C.C.F. & Rosa, R.R. 2006. Telemetric Monitoring system for meteorological and limnological data acquisition. *Internationale Vereinigung fur Theoretische und Angewandte Limnologie Verhandlungen*, 29(4): 1747-1750.
- 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.
- Vendramini, E.Z. 1986. *Distribuições probabilísticas de velocidades do vento para avaliação do potencial energético eólico*. Programa de Pós-graduação em Agronomia, UNESP, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Tese de Doutorado em Agronomia, 110 p.
- Skamarock, W.C. 1977. Evaluating Mesoscale NWP Models Using Kinetic Energy Spectra. *Monthly Weather Review*, 132(12): 3019-3032.
- Wallace, J.M. & Hobbs, P.V. 2006. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. London, Academic Press, 467 p.