



ISSN:1984-2295

# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



## Modelo Semi-Empírico Médio Longitudinal de Ventos Termosféricos a 250 km para Períodos de Baixa Atividade Solar e Geomagnética

Wivaldo Dantas de Asevedo Júnior<sup>1</sup>, Christiano Garnett Marques Brum<sup>2</sup>, José Henrique Fernandez<sup>3</sup>, Anderson Guimarães Guedes<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Professor (Centro Multidisciplinar de Angicos – CMA/UFERSA), Angicos-RN, Brasil. Autor correspondente email: wivaldojr@ufersa.edu.br. <sup>2</sup>Pesquisador Senior e chefe de operações científicas (Arecibo Observatory, University of Central Florida), Arecibo, Porto Rico. <sup>3</sup>Professor (Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas – PPGCC/UFRN), Natal-RN, Brasil. <sup>4</sup>Doutor em Ciências Climáticas, Escola de Ciências e Tecnologias (UFRN) Natal-RN, Brasil.

Artigo recebido em 11/12/2019 e aceito em 04/05/2020

### RESUMO

Neste trabalho é apresentado um modelo semi-empírico de ventos neutros termosféricos médios longitudinais para períodos de baixas atividades solar e geomagnética com dependência em hora local, dia do ano e latitude geográfica para 250 km de altitude. O modelo é denominado de *SEATWIM* (sigla em inglês para *Semi Empirical Averaged Thermospheric Wind Model*) válido para períodos de baixa atividade solar e geomagnética. O *SEATWIM* foi construído a partir de uma análise estatística dos dados observados *in situ* obtidos pelo satélite *UARS* (*Upper Atmosphere Research Satellite*) por meio da carga útil *WINDII* (*Wind Imaging Interferometer*), onde os valores representativos para 250 km são obtidos pela média integrada em altitude entre 205 km e 275 km, e, a partir de uma análise estatístico-espectral, foi extraído comportamento diário e sazonal distribuídos em latitude geográfica. O modelo proposto exibe uma boa concordância em relação à climatologia dos dados observados pelo satélite para as componentes zonal e meridional dos ventos neutros termosférico em distintos períodos. Quando comparado ao comportamento dos dados observados, os índices estatísticos exibiram bons resultados, sendo os melhores resultados obtidos nos períodos de equinócio em ambas as componentes do vento termosférico. A validação estatística também exibiu melhores resultados para a componente zonal em comparação a componente meridional, para todos os períodos do ano. Os testes estatísticos utilizados indicam que o modelo *SEATWIM* assemelha-se ao modelo *HWM14* (*Horizontal Wind Model*, versão 2014) principalmente em relação a componente zonal. Palavras-chave: Simulação computacional, vento neutro termosférico, *SEATWIM*

## Semi Empirical Longitudinal Averaged Thermospheric Wind Model at 250 km for Solar and Geomagnetic Activities Quiet Time

### ABSTRACT

This paper presents a semi empirical model of averaged longitudinal thermospheric neutral wind for quiet time periods of solar and geomagnetic activities with dependence on local time, day of the year and geographical latitude for 250 km of altitude, which was called *SEATWIM* (*Semi Empirical Averaged Thermospheric Winds Model*, the letter Q means quiet time of solar and magnetic activities). The *SEATWIM* was constructed from a statistical analysis of the observed *in situ* data obtained by the *UARS* satellite (*Upper Atmosphere Research Satellite*) through the *WINDII* payload equipment, where the representative values for 250 km are obtained by the average value integrated in altitude between 205 km and 275 km, and, from a statistical and spectral analysis, we extracted daily and seasonal behavior distributed over geographic latitude. The proposed model shows a good agreement with the climatology of the data observed by the satellite for the

thermospheric neutral wind zonal and meridional directions. The statistical indices showed good results when compared to the behavior of the observed data being the best results obtained in the equinox periods in both thermospheric wind directions. Statistical validation also showed better results for the zonal component in comparison with the meridional component for all periods of the year. Statistical tests also indicate that the SEATWIM is similar to the HWM14 (Horizontal Wind Model, version 2014), mainly in the zonal direction.

key-words: Computational simulation, thermospheric neutral wind, *SEATWIM*

## Introdução

Os fenômenos de transporte na região da termosfera terrestre desempenham um papel fundamental na eletrodinâmica da ionosfera terrestre, principalmente na camada *F* em médias e altas latitudes. Dentre os fenômenos de transporte, os ventos neutros termosféricos (*VNT*) se destacam, uma vez que arrastam o plasma ionosférico, devido à ação do movimento acoplado (arrasto iônico), e o distribuem para outras regiões, promovendo variações em densidade de plasma, taxas de recombinação, processos químicos, taxas de difusão e processos de ionização, e absorção de radiação por toda a termosfera. O mecanismo de criação dos ventos neutros termosféricos é conhecido e ocorre devido ao aquecimento da termosfera provocado pela ionização dos constituintes neutros durante a criação da ionosfera. Este aquecimento, por sua vez, faz surgir gradientes de pressão caracterizando o que é chamado de abaulamento da termosfera (Jacchia, 1965; Rishbeth, 1971; Hedin, 1987). O estudo do comportamento dos VNT vem sendo realizado a partir de equipamentos embarcados como cargas útil de satélites, como por exemplo, o *NATE* (*Neutral Atmosphere Temperature Experiment*) a bordo do satélite *AE-C* (*Atmospheric Explorer - C*) (Hedin et al., 1988), ou por instrumentos em solo, como o interferômetro *Fabry-Perot* (*FPI*, sigla para *Fabry-Perot Interferometer*) (Hernandez e Roble, 1976; Sipler et al., 1982; Burnside e Tepley, 1989; Tepley et al., 2011; Brum et al., 2012) ou mesmo por radar de espalhamento incoerente (*ISR*, sigla em inglês para *Incoherent Scatter Radar*) (Salah e Holt, 1974; Buonsanto et al., 1989; Santos et al., 2011). Os primeiros modelos numéricos e/ou matemáticos a descreverem o comportamento dos VNT datam do final da década de 1960 (Geisler, 1967; Kohl e King, 1967). A partir de várias observações, realizadas de por satélites ou mesmo por medidas obtidas em solo foi possível construir modelos empíricos, como o *HWM* (Horizontal Wind Model) (Hedin et al., 1991 e 1988; Drob et al., 2008; Emmert et al., 2008) cuja primeira versão data da década de 1980 e vem sendo constantemente atualizado; atualmente está na versão 2014 (Drob et al., 2015).

Os ventos neutros termosféricos apresentam variação com a hora local (LT), período do ano (sazonalidade), localização geográfica, e atividades solar e geomagnética (Titheridge, 1995). Além disso, em altitudes de aproximadamente 250 km a velocidade horizontal dos ventos neutros termosféricos não apresenta muitas variações em altitude, uma vez que a essas altitudes o arrasto iônico provoca um aumento na viscosidade do plasma ionosférico (Richmond, 1983; Titheridge, 1995), inibindo grandes variações em velocidade.

O modelo apresentado neste trabalho, batizado de *SEATWIM* (sigla para *Semi Empirical Averaged Thermospheric Wind Model*) é construído com base em um estudo estatístico dos registros de ventos neutros termosféricos obtidos por medidas *in situ* realizadas pelo interferômetro imageador *WINDII* (*Wind Imaging Interferometer*) embarcado no satélite *UARS* (*Upper Atmosphere Research Satellite*) o qual foi posto em órbita em 12 de setembro de 1991 e coletou dados de *VNT* até meados de 1997.

O modelo descreve em hora local (0 à 24h) e dia do ano (do dia 1 ao dia 365) valores médios longitudinais das componentes meridional e zonal de VNT em torno de ~250 km de altitude, para períodos de baixa atividade solar e geomagnética ( $F10,7\text{cm} \leq 125\text{ SFU}$  e  $kp \leq 2^+$ ,  $1\text{ SFU} = 10^{-22}\text{ Wm}^{-2}\text{ Hz}^{-1}$ ) localizado geograficamente entre as latitude 50° S e 50° N. Trata-se de um modelo empírico baseado em dados provenientes de observações *in situ*, e parametrizado, onde os valores das componentes de vento neutro são obtidos por meio da soma de médias dos valores com dependência em latitude geográfica e hora local (integrados em longitude e dia do ano) e as médias dos resíduos tratados com dependência em latitude e dia do ano (integrados em longitude e hora local) onde estes resíduos são obtidos pela diferença entre os dados observados e a média com dependência em latitude geográfica e hora local.

## Material e métodos

Para a construção de um modelo semi-empírico é necessária uma base de dados com uma boa cobertura espacial (latitude e longitude geográfica e altitude) e temporal (hora local e sazonal). Diante deste aspecto foram escolhidos os registros de vento neutros termosféricos obtidos utilizando o *WINDII*, que foi um equipamento dentre outros embarcados no satélite *UARS*, que operou entre os anos de 1991 a 1997 (período de transição entre os ciclos solares 22 e 23). Os registros de ventos neutros termosféricos medidos pelo satélite, utilizados neste trabalho, estão disponíveis no portal *EARTH DATA* (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) mantido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) (Shepherd et al., 2001). Destes registros disponíveis foram extraídos 55 dias em 1991, 313 dias em 1992, 254 dias em 1993, 221 dias em 1994, 198 dias em 1995, 151 em 1996 e 97 em 1997. Os mesmos estão organizados na forma de perfis em altitude entre 80km e 360km, com resolução de 3 km, para registros abaixo de 120km, e 5km acima deste limite. A resolução temporal da aquisição dos dados foi de aproximadamente 30 segundos, correspondendo a uma variação latitudinal em torno de 2° em regiões equatoriais. O satélite *UARS* operou na altitude aproximada de 585 km em órbita quase circular inclinada em 57° em relação ao equador (Reber et al., 1993). A cobertura espacial (latitude e longitude geográfica) dos registros se limitava aproximadamente entre ±72° de latitude, no entanto, devido a um movimento de rotação que o satélite *UARS* possuía em torno de seu eixo zenital, de período 36 dias, esse alcance máximo em latitude alternava-se em 36 dias (Emmert et al., 2002). Dessa forma os registros possuem valores constantes entre ±45° em latitude geográfica. Os valores das componentes meridional e zonal do *VNT* possuíam uma intensidade máxima em ~±200m/s com uma incerteza nominal de ±10m/s, sendo que quando positivos os valores da componente meridional apontam para a direção Norte, e a componente zonal para Leste. Cada registro de ventos neutros que compõe o perfil possui uma incerteza associada à medida (Shepherd et al., 1993). Esta incerteza corresponde à qualidade da medida do registro. Outra grandeza possível de ser aferida pelo *WINDII* é a temperatura atmosférica. Foram também extraídas medidas de temperatura até um valor máximo de 2000K.

Para o modelo *SEATWIM*, apresentado neste trabalho, foram selecionados os registros de vento neutro, em suas componentes meridional e zonal, em função da atividade solar e geomagnética, mais especificamente para valores de fluxo solar dessimétrico  $F10.7\text{ cm } (\Phi_{10.7}) \leq 125\text{ SFU}$ , e índice geomagnético  $kp \leq 2^+$ . Levando em conta tais condições, os dias de registros disponíveis foram reduzidos para 43 dias em 1992, correspondendo a 13,7% dos dias disponíveis, 107 dias em 1993 (42,1%), 90 dias em 1994 (40,7%), 119 dias em 1995 (60,1%), 113 em 1996 (74,8%) e 48 em 1997 (49,5%). O modelo que é apresentado fornece valores representativos para a altitude média de ~250 km, calculados a partir da média entre as altitudes 225 km e 275 km. Para tanto, foram utilizados registros de vento com medidas realizadas utilizando as linhas de emissões de reações fotoquímicas (aeroluminescência) em 557,7 nm (*O'S*, linha verde do oxigênio) e 630,0 nm (*O'D*, linha vermelha do oxigênio), uma vez que a faixa em altitude de cobertura dessas medidas é de 80 km a 300 km (Shepherd et al., 1993).

A distribuição espacial em latitude geográfica dos perfis de registros de *VNT* em função do comprimento de onda é mostrada na

e pode-se notar haver maior cobertura de registros utilizando a emissão em 557,7 nm (206.421 perfis) em relação à emissão em 630,0 nm (48.321 perfis). A faixa máxima de latitude de cobertura geográfica atingida está entre ±72°, sendo que a maior concentração de perfis registrados da emissão 557,7nm foi entre -42° e 42°, correspondendo a 70% do total de perfis registrados. Já os perfis registrados da emissão em 630,0nm apresentaram maior concentração entre -45° e 45°, correspondendo a 78% do total de perfis registrados. Os registros analisados também apresentaram

diferenças em relação ao perfil de altitude e hora local associado a cada tipo de emissão utilizada para realizar a medida. Em relação à distribuição dos perfis em função da altitude, as diferenças entre as componentes meridional e zonal são sutis, tendo ambas componentes apresentando máximo de registros para emissões na linha verde em 99 km, e para a linha vermelha entre 240 km e 250 km. Na Figura 2 é mostrado o histograma das altitudes dos registros de vento neutro meridional para as duas emissões (linha verde e linha vermelha)

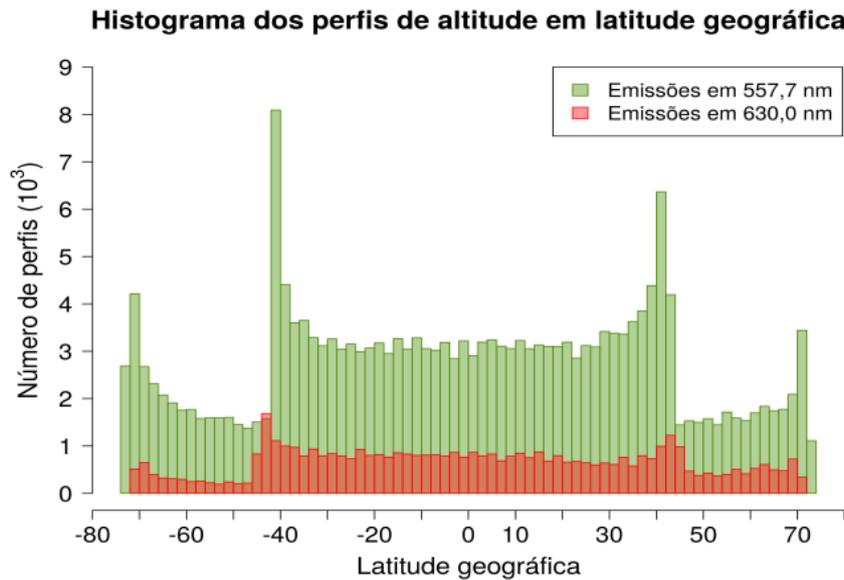


Figura 1. Distribuição do numero de perfis de VNT registrados para os dois comprimentos de onda em estudo (557,7 nm e 630,0 nm, verde e vermelho, respectivamente) em função da latitude geográfica.

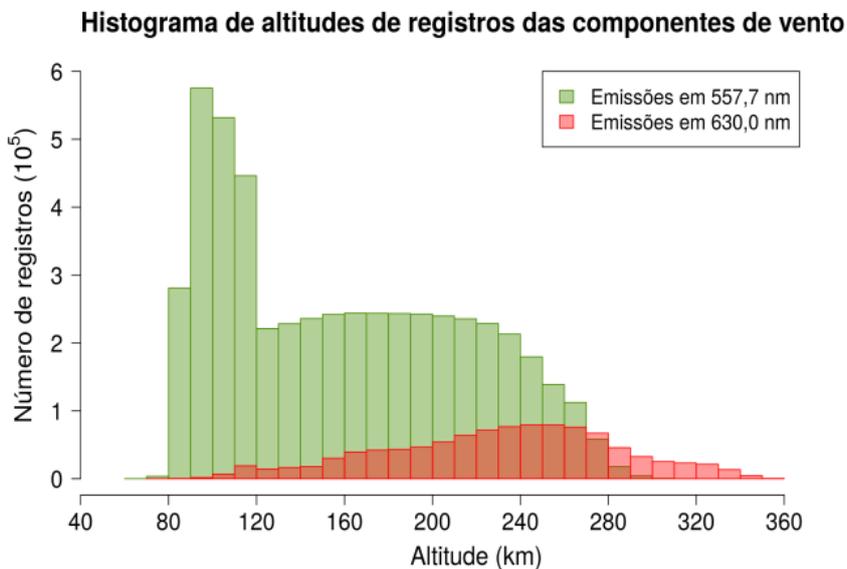


Figura 2. Histograma do numero registros da componente meridional dos VTN por altitude para as duas emissões de aeroluminescência.

A cobertura temporal em hora local apresenta uma predominância durante o período

diurno nas emissões da linha verde para as duas componentes (meridional e zonal) dos VNT. Os

registros obtidos utilizando as emissões na linha vermelha foram mais homogêneos ao longo de todo o dia em ambas as direções de medidas. Esse comportamento pode ser verificado na Figura 3 onde é apresentado um histograma que exhibe a

distribuição em hora local dos perfis de registros da componente meridional dos ventos neutros termosféricos categorizados pela respectiva emissão de aeroluminescência.

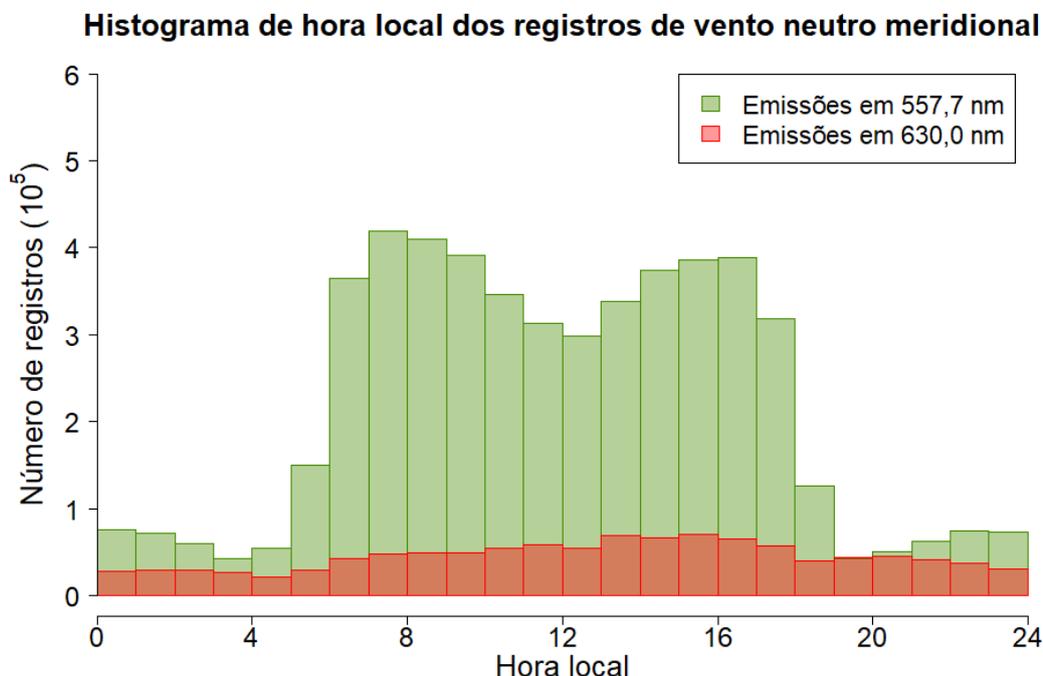


Figura 3. Histograma do número registros da componente meridional dos VTN em função da hora local para as duas emissões de aeroluminescência.

Os dados analisados também apresentaram discrepâncias associadas a direção de deslocamento do satélite (deslocando-se para Sul ou Norte), e em relação a direção de visada do equipamento *WINDII* (direção de observação Sul ou Norte), para condições aeronômicas semelhantes e mesma localização geográfica. Estas variações sistemáticas foram identificadas por Emmert (2001), onde foram observadas variações nos valores absolutos dos ventos neutros associados à direção de visada e direção de deslocamento da ordem de ~50-75m/s. É importante destacar que a presença destas diferenças foi considerada para a construção do modelo *SEATWIM*. A Figura 4 apresenta quatro

painéis mostrando as diferenças discutidas acima encontradas nos registros de ventos neutros (meridional à esquerda, e zonal à direita) associadas às direções de deslocamento e de visada do satélite. Os gráficos do painel superior mostram as médias de registros de vento neutro meridional e zonal nas duas direções de deslocamento (deslocamento para Sul ou Norte) das 11:00 às 12:00 LT em períodos de Solstício de Junho (Maio, Junho, Julho e Agosto). Já os gráficos do painel inferior mostram as médias dos registros de vento neutro meridional e zonal das 08:00 às 09:00 LT em períodos de Equinócios (Março, Abril, Setembro e Outubro) para diferentes direções de visada.

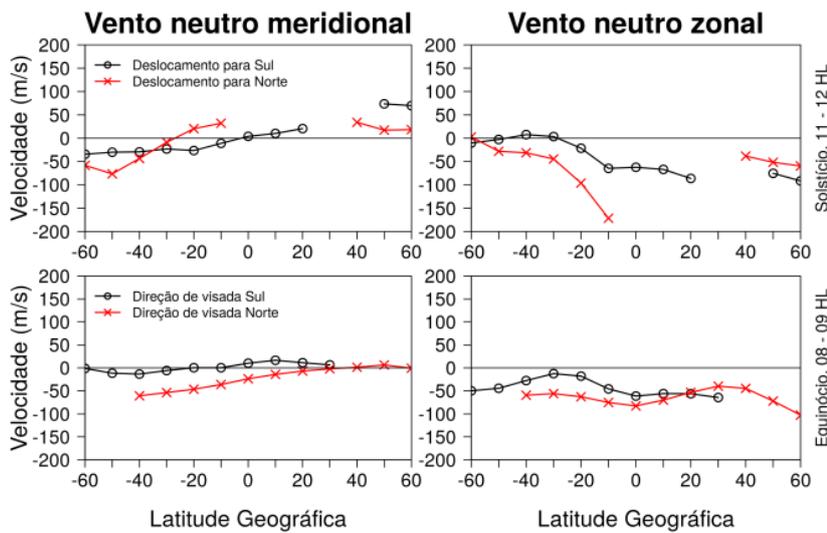


Figura 4. Exemplo de discrepâncias de registros de ventos neutros. Os painéis superiores apresentam variações causadas pela diferença de deslocamento do satélite UARS, enquanto que os painéis inferiores estão às diferenças ocasionadas pela direção de visada do satélite, para as componentes meridional e zonal (colunas à esquerda e direita, respectivamente).

Como pode ser observado na Figura 4, as discrepâncias relacionadas à direção do deslocamento (gráficos do painel superior) são mais expressivas quando comparadas às discrepâncias apresentadas em relação à direção de visada do satélite.

As incertezas associadas aos registros de vento apresentaram diferenças, considerando as componentes de  $VNT$  e o tipo de emissão utilizada nas medidas realizadas. Na Tabela 1 é apresentada a estatística descritiva das incertezas por tipo de emissão de aeroluminescência para as componentes meridional e zonal dos  $VNT$ .

Tabela 1. Estatística descritiva dos valores de incerteza para os dois tipos de emissão de aeroluminescência e componentes dos ventos neutros.

Emissão	Meridional (m/s)		Zonal (m/s)	
	557,7	630,0	557,7	630,0
1º Quartil	7,55	3,88	7,45	4,08
Média	36,01	14,68	34,59	15,41
Mediana	15,71	7,33	15,36	7,82
3º Quartil	40,47	13,67	38,52	14,61

Limite Máximo

89,85

28,35

85,12

30,4

Os limites mínimos referentes à estatística descritiva apresentada na Tabela 1 foram todos iguais a zero. Os valores da estatística descritiva apresentados na Tabela 1 estão coerentes. Também ocorreram *outliers*, que são valores acima do limite máximo obtido pela estatística descritiva. Alguns dos *outliers* se traduzem em valores incorretos obtidos que muitas vezes representam erros de medidas e não corresponde a realidade. Por exemplo, o máximo valor de incerteza registrado referente à linha verde de emissão foi 4764,69 m/s, para a linha vermelha foi 2798,48 m/s. Para a componente zonal o máximo valor medido para a linha de emissão vermelha foi 7668,30 m/s e para a linha verde foi 3392,96 m/s.

#### Descrição do modelo

Após a etapa inicial de triagem e seleção dos dados de forma adequada para a construção do modelo, obteve-se um banco de dados contendo perfis em altitude dos *VNT*, em suas componentes meridional e zonal, localizados espacialmente (latitude e longitude geográfica), distribuídos em hora local e dia do ano com os critérios já mencionados em relação às atividades solar e geomagnética. Para a seleção de registros com a melhor qualidade na medida, foi adotado o padrão de utilização de registros com valores bem definidos de incerteza, descrito a seguir: Para os registros realizados utilizando a emissão em 630,0 nm, foram selecionados valores com incerteza máxima em 25 m/s, e para os registros referentes à emissão em 557,7 nm uma incerteza de 90 m/s. A escolha dos registros de vento com os valores próximo aos máximos de incerteza na medida foi feita com o objetivo de maximizar a cobertura de perfis disponíveis para a construção do modelo. Os valores representativos para a altitude de 250 km foram calculados a partir do comportamento médio em altitude dos registros. Desta forma, para cada perfil selecionado realizou-se uma média integrada em altitude de 225 km a 275 km, e considerando a resolução dos registros em altitude no intervalo mencionado, que foi de 5 km, obteve-se um máximo

de 11 valores em cotas verticais para o cálculo da média em altitude. Os valores que compõem o perfil foram avaliados estatisticamente de forma que fossem escolhidos valores contidos no intervalo  $\bar{V} \pm 2\sigma V$  onde  $\bar{V}$  é a média, e  $\sigma V$  é o desvio padrão dos valores do perfil em altitude. Esta avaliação se fez importante para excluir valores muito discrepantes, possíveis indicativos de erros de medida do equipamento. Aos valores selecionados para os perfis de registros em altitude, aplicou-se uma interpolação polinomial de ordem 3 utilizando *splines* (Akima, 1970 e 1991) de forma a obter um novo perfil de 225 km a 275 km em intervalos de 5 km suprindo as lacunas inseridas pela eliminação de valores. Após realizar a interpolação foi verificado se os valores do novo perfil estão de acordo com os limites nominais de  $\pm 210$  m/s. Depois da aplicação dos critérios acima mencionados calculou-se a média em altitude, que representa o valor de ventos neutros termosférico a 250 km de altitude em função da latitude e longitude geográfica, hora local e dia do ano ( $V_{250}(lat, lon, LT, dia)$ ).

O modelo *SEATWIM* é resultante da soma entre valores médios com dependência em latitude geográfica e hora local (integrados em longitude e dia do ano), que representa o comportamento diário, e a variabilidade média sazonal com dependência em latitude geográfica e dia do ano (integrados em longitude e hora local), representando o comportamento sazonal. Os valores das componentes do *VNT* foram calculados separadamente pela equação a seguir inserida nos algoritmos do modelo:

$$V_M(lat, LT, dia) = V_M(lat, LT) + \Delta V_M(lat, dia) \quad (1)$$

Devido à existência de diferenças associadas à direção de visada do satélite e a direção de deslocamento do satélite, e sendo as discrepâncias associadas à direção de deslocamento terem sido mais expressivas, os termos do lado direito da Equação 1 representam médias das duas direções de deslocamento do satélite. Cada termo

associado à direção do deslocamento (deslocamento na direção Sul e deslocamento na direção Norte) utilizado para calcular  $V_M(lat, LT)$  representam o comportamento médio com dependência em latitude geográfica e hora local, integrados em longitude geográfica e dia do ano para cada direção de deslocamento do satélite. A resolução espacial destes termos é de  $5^\circ$  em latitude geográfica, variando entre  $-50^\circ$  ( $50^\circ$  Sul) e  $50^\circ$  ( $50^\circ$  Norte) e a resolução temporal é de 1 hora, variando de 0 a 24 horas. Para que esses valores médios separados por direção de deslocamento sejam calculados com uma melhor distribuição estatística, cada valor é resultado de uma média realizada em outra matriz contendo os dados mensais (12 meses) espaçados longitudinalmente em  $30^\circ$  (13 valores de  $\pm 180^\circ$ ). As lacunas existentes foram preenchidas com interpolação utilizando *splines* pelo método *MBA* (*Multilevel B-spline approximation*) (Lee et al., 1997).

Para cada resultado (média) obtido com dependência em hora local e latitude geográfica do procedimento anterior foi aplicado um filtro espectral utilizando a transformada de *wavelet* com o objetivo de eliminar periodicidades indesejáveis. Esta metodologia consiste em decompor o sinal em diferentes faixas de frequências e a posterior reconstrução considerando apenas as frequências desejadas. Esta técnica discretiza as diferentes periodicidades de um sinal associadas a sua própria distribuição de ocorrência (igualmente espaçadas) calculada por um conjunto de funções base (Kumar e Foufoula-Georgiou, 1997; Percival e Walden, 2000; Vieira et al., 2003). Para a análise espectral, foi utilizada a função de escala (conhecida como *wavelet* função mãe) *Daubechies Least-Asymmetric* de grau 8 (*LA8*). O procedimento foi aplicado primeiramente na dependência em hora local onde o sinal é decomposto e reconstruído até o nível S2.

Neste caso periodicidades menores de 4 horas foram excluídas. O mesmo procedimento foi realizado considerando a dependência em latitude geográfica, filtrando os dados de periodicidades espaciais entre  $0^\circ$  e  $10^\circ$ . Na prática esse procedimento efetua um “alisamento” nos valores das médias com o intuito de eliminar ruídos que não representem fenômenos físicos ou mesmo que tenham sido introduzidos pelas interpolações realizadas para preencher as lacunas.

Na Figura 5 pode-se observar o comportamento dos valores de  $V_M(lat, LT)$ , onde os dois painéis à esquerda mostram as velocidades absolutas das componentes meridional e zonal dos ventos neutros termosféricos para 7 latitudes geográficas em função da hora local, enquanto que os dois perfis de isolinhas a direita mostram a distribuição espacial ( $\pm 50^\circ$  de latitude geográfica) ao longo do dia do comportamento médio das componentes de *VNT*, sendo o painel superior referente a componente meridional e o inferior referente a componente zonal.

Pode ser observado na Figura 5 o comportamento médio diário das componentes do *VNT* como a direção predominante da componente meridional na direção dos polos em períodos diurnos apresentando um máximo absoluto entre 14:00 e 18:00 horas local. Esse movimento é resultado do gradiente de pressão provocado pelo aquecimento dos gases na região devido à ação da radiação solar. Esta ação é mais efetiva em regiões próximas ao Equador, uma vez que essa região recebe maior incidência de raios solares no período diurno. No período noturno a predominância da componente meridional é na direção do Equador. Este movimento no sentido do Equador é um dos principais mecanismos de manutenção da ionosfera em períodos noturnos.

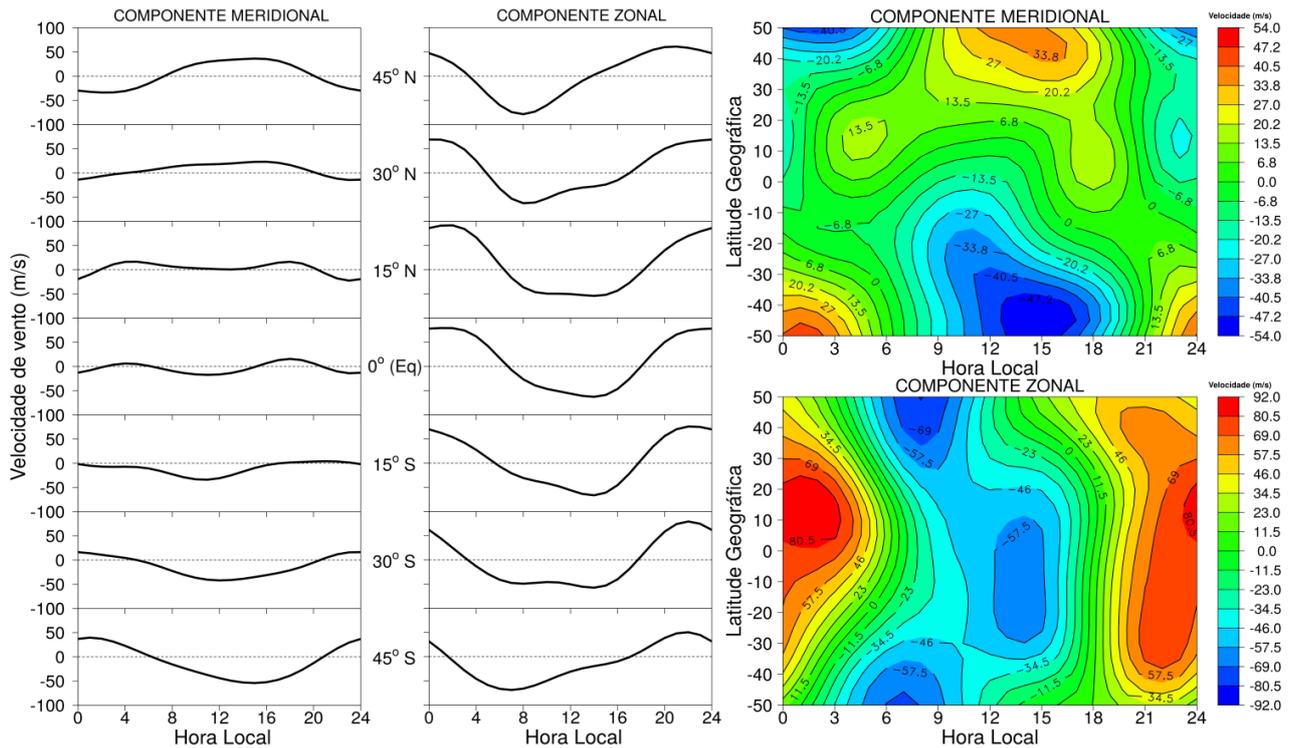


Figura 5. Variação da média da velocidade dos ventos neutros em função da hora local e latitude geográfica (integradas em dia do ano e longitude) para 250 km de altitude em condições quiescentes ( $k_p \leq 2^+$ ;  $k_{p_m} \sim 2^-$ ) ( $\Phi_{10.7} \leq 125$  SFU;  $\Phi_{10.7m} = 87$  SFU).

Já na componente zonal, pode-se observar que a inversão do sentido de Leste para Oeste da componente zonal ocorre em horários diferentes em relação à faixa de latitude geográfica. Em latitudes maiores a inversão ocorre entre 00:00 e 03:00 LT enquanto que em regiões próximas ao Equador ocorre entre 03:00 e 06:00 LT. Essa inversão da componente zonal caracteriza um movimento de convergência dos *VNT* na direção zonal. Já nos períodos de 15:00 e 19:00 LT, ocorre a inversão de sentido de Oeste para Leste indicando um movimento de divergência da componente zonal dos *VNT*. Na região equatorial a divergência ocorre próximo às 18:00 LT e em latitudes maiores ocorre próximo às 15:00 LT. Os máximos absolutos da componente zonal apontando no sentido Leste ocorrem entre às 23:00 e 03:00 LT. Próximo ao Equador o máximo ocorre próximo às 03:00 LT e em latitudes maiores o corre próximo às 24:00 LT. O máximo absoluto da componente zonal no sentido Oeste ocorre entre 06:00 e 15:00 LT. Na região equatorial ocorre próximo às 15:00 LT e em latitudes maiores entre 06:00 e 09:00 LT.

O segundo termo da Equação 1 corresponde a variabilidade sazonal média do modelo. As variabilidades referentes a cada componente (meridional e zonal) foram obtidas pela média dos resíduos, e tratados, entre  $V_{250}(lat, lon, LT, dia)$  e  $V_M(lat, LT)$  quando satélite se desloca para Sul e para Norte. Os resíduos médios tratados para cada componente e direção de deslocamento do satélite possuem dependência em latitude geográfica e dia do ano (integrados em longitude e hora local) com resolução espacial de 5° em latitude, variando entre -50° (50° Sul) e 50° (50° Norte) e a resolução ao longo do ano é de 1 dia, variando de 1 até 365.

Para obter o valor da variabilidade média e tratada associada a direção de deslocamento efetuou-se um procedimento semelhante ao já utilizado para obter os valores médios com dependência em hora local e latitude geográfica. Para que esses valores médios separados por direção de deslocamento sejam calculados com uma melhor distribuição estatística, cada valor é resultante de uma média realizada em outra matriz contendo os

dados em hora local (0 às 24h) espaçados longitudinalmente em  $30^\circ$  (13 valores de  $\pm 180^\circ$ ). As lacunas existentes foram preenchidas novamente utilizando o método *MBA*. Esse procedimento foi feito considerando o dia 15 de cada mês representado pela média mensal, portanto o número de dias para calcular a média varia de acordo com o mês. Novamente foi aplicada uma interpolação utilizado *MBA*, mas para a dependência em latitude geográfica com resolução de  $5^\circ$  variando entre  $-50^\circ$  ( $50^\circ$  Sul) e  $50^\circ$  ( $50^\circ$  Norte) e a resolução ao longo do ano é de 1 dia, variando de 1 até 365. Também foi

aplicado um filtro *wavelet*. Esse procedimento foi realizado para a construção das dependências dia do ano, e latitude geográfica também objetivando promover um “alisamento”. Por se tratar de valores calculados a partir dos resíduos médios obtidos pela diferença entre  $V_{250}(lat, lon, LT, dia)$  e os valores médios com dependência em latitude e hora local  $V_M(lat, LT)$ , também foi aplicado, quando necessário, um fator de correção em relação a variável dia do ano.

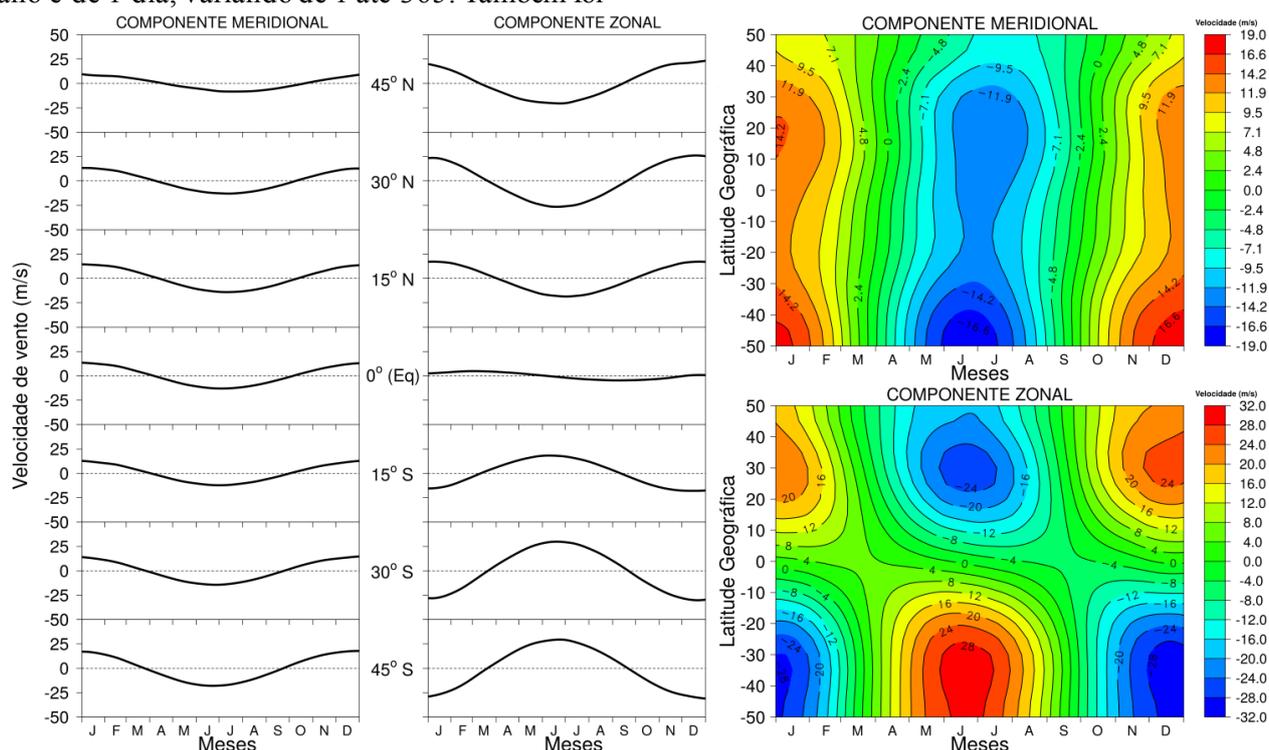


Figura 6. Variabilidade média da velocidade dos ventos neutros em função do dia do ano e latitude geográfica (integradas em hora local e longitude) para 250 km de altitude em condições geofísicas consideradas calmas  $kp \leq 3^+$ ;  $kp_m = 2^+$  ( $\Phi_{10.7} \leq 125 SFU$ ;  $\Phi_{10.7m} = 87 SFU$ ).

Em relação ao comportamento médio sazonal das variabilidades das componentes de *VNT* apresentados nos perfis de isolinhas da Figura 6 pode-se destacar, na componente zonal, as variabilidades presentes que provocam uma intensificação do *VNT* para a direção Leste durante o inverno e para a direção Oeste durante o verão. Períodos de outono e primavera (equivalentes aos equinócios) exibem um padrão assimétrico, mas sua contribuição não é efetiva (Brum et al., 2012). Já na componente meridional, pode-se observar que para

o hemisfério Norte a variabilidade contribui no sentido de intensificar *VNT* na direção Sul durante o verão e para a direção Norte durante o inverno. Já no hemisfério Sul esse comportamento se inverte onde ocorre uma intensificação na direção Norte durante o verão e uma intensificação para a direção Sul no inverno. Esse padrão de comportamento médio para as componentes meridional e zonal já era esperado e está associado com a circulação trans-equatorial durante a transição do verão para o inverno (Roble et al., 1977).

*Análise estatística comparativa*

Para avaliarmos o desempenho do modelo de uma forma quantitativa, foram escolhidos quatro parâmetros estatísticos comparativos: o erro médio (*EM*), a raiz do erro quadrático médio (*RMSE*), o índice de concordância de Willmott (Willmott, 1981), e a correlação de Spearman (Spearman, 1904). Além destes também foi aplicado o teste estatístico de Wilcoxon pareado (Wilcoxon, 1945). A escolha da correlação de Spearman e do teste de

Wilcoxon pareado se fez necessárias já que as comparações foram feitas em séries temporais curtas (0 a 24 horas). Dessa forma, faz-se necessário a utilização de parâmetros e testes estatísticos para dados não parametrizados. Na Tabela 2 são mostradas as relações matemáticas e condições de validade dos parâmetros estatísticos escolhidos para avaliar a desempenho do modelo:

Tabela 2. Parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o desempenho do modelo *SEATWIM*

Parâmetro Estatístico	Relação Matemática	Condições de validade
Erro médio	$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)$	$EM \leq 0$ ou $EM \geq 0$
Raiz do erro quadrático médio	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}$	$RMSE \geq 0$
Índice de concordância de Willmott	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N ( S_i - \bar{O}  +  O_i - \bar{O} )^2}$	$0,0 \leq d \leq 1,0$
Correlação de Spearman	$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N (IO_i - IS_i)^2}{N(N^2 - 1)}$	$-1,0 \leq r_s \leq 1,0$

Nas relações acima expostas,  $S_i$  corresponde aos valores simulados e  $O_i$  corresponde a valores observados,  $\bar{O}$  é a média dos dados observados,  $\bar{S}$  é a média dos valores simulados e  $N$  é o número de valores a serem comparados. Na correlação de Spearman  $IO_i$  é o índice ranqueado dos valores observados (ordem decrescente) e  $IS_i$  é o índice ranqueado dos valores simulados (ordem decrescente). O teste de hipótese de Wilcoxon pareado é um teste de hipótese não paramétrico e consiste basicamente em analisar as diferenças entre duas populações, neste caso valores observados e simulados (Wilcoxon, 1945). Para isso, é construída uma nova série a partir de suas diferenças  $D_i = S_i - O_i$ . Deste modo, adotou-se a hipótese nula ( $H_0$ ) e hipótese Alternativa ( $H_1$ ) conforme o definido a seguir:

$$\begin{aligned} H_0: \mu_D &= 0 \\ H_1: \mu_D &\neq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

A hipótese nula ( $H_0$ ) é que a mediana da diferença ( $D_i$ ) seja igual à zero indicando que as duas populações não apresentam diferenças

significativas. Se o  $p$ -valor calculado for maior do que o nível de significância definido para o teste, a hipótese nula é aceita, ou seja, não existe diferença significativa entre as populações. Caso  $p$ -valor seja menor ou igual ao nível de significância adotado devemos rejeitar a hipótese nula, ou seja, existe diferença significativa entre as populações. O nível de significância adotado no teste foi de 5% (equivalente ao nível de confiança de 95%) e as populações são os dados simulados e observado.

**Resultados e Discussão**

Como o modelo *SEATWIM* é um modelo médio longitudinal em condições geofísicas consideradas calmas (baixa atividade solar e geomagnética), os resultados apresentados neste item são focados na climatologia dos valores de *VNT*. Dessa forma, os resultados que serão exibidos aqui correspondem aos períodos de Solstício de Dezembro, Equinócios e Solstício de Junho. Para os valores simulados a partir dos modelos computacionais, foi escolhido o dia 360 do ano (próximo ao dia médio no período de 01 de Novembro a 28 de Fevereiro). A escolha de

representar o dia 360 do ano (dia médio no período de 01 de Novembro a 28 de Fevereiro) e não o dia 354 (22 de Dezembro) para representar o período de solstício de dezembro foi feita por que a

representação deste período para os dados observados a serem utilizados nas comparações para cada hora local foi calculada pela média dos dias no período de 01 de Novembro a 28 de Fevereiro.

Vento neutro termosférico médio em 250 km, período calmo ( $\Phi_{10.7m} = 87,0$  SFU e  $k_p_m = 1,58$ )

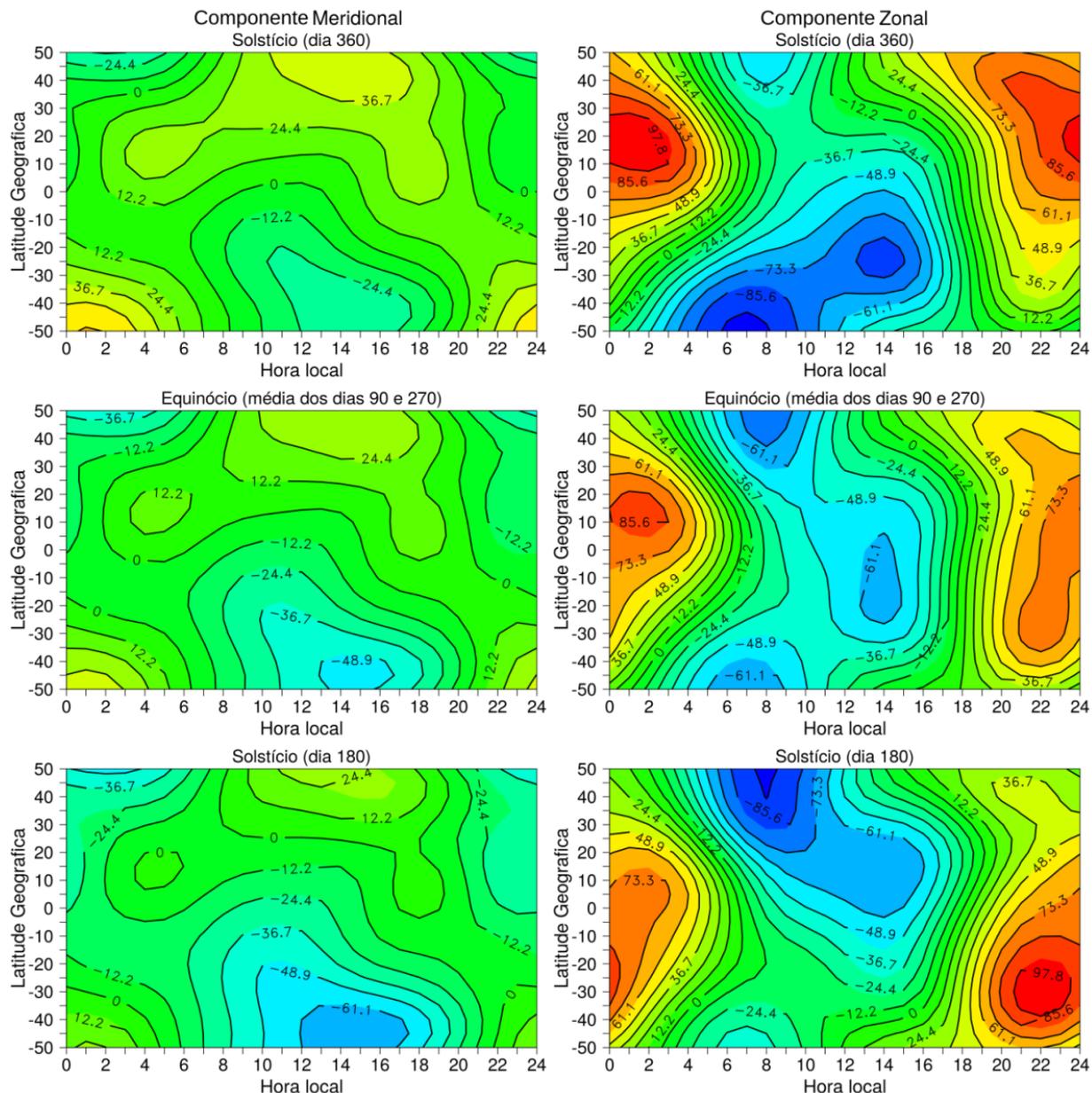


Figura 7. Perfis de isolinhas obtidos a partir do modelo *SEATWIM* mostrando as velocidades das componentes dos ventos neutros em hora local, latitude geográfica em períodos do ano distintos (comportamento sazonal).

Para representar o período de Solstício de dezembro, o dia 180 do ano (dia médio no período de 01 maio a 31 de agosto) para representar o

Solstício de junho, e a média dos dias 90 (dia médio entre 01 março e 30 de abril) e 270 (próximo ao dia

médio entre 01 setembro e 31 de outubro) para representar o período de Equinócios.

Na Figura 7 são apresentados gráficos em isolinhas dos valores resultantes para as componentes de *VNT* obtidos pelo modelo *SEATWIM*. Os gráficos apresentam o comportamento em função da latitude geográfica e da hora local para condições de solstício de dezembro, solstício de junho e equinócio. Os painéis à esquerda correspondem a componente meridional enquanto os painéis da direita correspondem à componente zonal. De forma qualitativa pode se ver que o comportamento climatológico apresentado está em concordância com a climatologia apresentada por Emmert et al. (2002).

Nos resultados a seguir foi feita uma comparação qualitativa entre os valores observados (*UARS-WINDII*), representado por quadrados pretos, e dois modelos computacionais: a versão de 2014 do modelo semi-empírico HWM (*Horizontal Wind Model, HWM14*), representado por círculos vermelhos, e o *SEATWIM*, representado por triângulos azuis. Os dados observacionais utilizados nesta comparação foram selecionados considerando registros medidos em 250 km de altitude e condições de atividade solar e geomagnéticas quiescentes, ou seja,  $\Phi \leq 125 \text{ SFU}$  e  $kp \leq 2^+$ . A partir desses dados foram calculados os valores representativos para cada hora local sendo o período de solstício de Dezembro (Solstício NDJF) resultante da média dos meses de Novembro à Fevereiro, o período de solstício de Junho (Solstício MJJA) a média dos meses de maio à agosto, e o período do Equinócio (Equinócios MASO) a média dos meses de Março, Abril, Setembro e Outubro. Os dados simulados foram obtidos para 250 km e considerando os períodos de solstício de Dezembro o dia 360 do ano, o solstício de Junho o dia 180 do ano, e para o Equinócio a média entre os dias 90 e 270 do ano. Os valores calculados com o modelo *SEATWIM* correspondem as componentes de *VNT* para condição de baixa atividade solar e geomagnética ( $\Phi_m = 87 \text{ SFU}$  e  $kp_m = 2^-$ ) em 250 km de altitude. Os valores calculados com modelo *HWM14* de cada dia climatologicamente

representativo foram obtidos realizando uma média integrada longitudinalmente (-180° até 180° em intervalos de 10°) para a altitude de 250 km. Com relação às condições de atividade solar e geomagnética adotado para o modelo *HWM14*, é importante destacar que esta versão do modelo não apresenta dependência com fluxo solar (Drob et al., 2015), nesse caso apenas foi aplicado a condição geomagnética de  $ap_m = 6,81 \text{ nT}$  (correspondente ao valor médio de  $ap$  obtido dos registros utilizados para construir *SEATWIM*). Nas Figuras 8 e 9 são mostradas as sobreposições de dados observados (*UARS-WINDII*), e os modelos *HWM14* e *SEATWIM* para os períodos de solstício de dezembro, solstício de junho e equinócio para 5 latitudes diferentes das componente meridional e zonal do *VNT*, respectivamente. A barra de erro presente nos valores observados corresponde ao desvio padrão ( $\sigma V$ ) dos dados utilizados para calcular a média representativa de cada hora local nos períodos do ano específicos. É importante destacar a ocorrência de lacunas nos dados observados em alguns horários ao longo do dia. Essas lacunas estão presentes em todos os períodos do ano e aconteceram pelo fato de não haverem dados observados em 250 km de altitude nas condições de baixa atividade solar e geomagnética preestabelecidas nos horário específicos. Os valores simulados com *HWM14* também apresentaram lacunas de dados, no entanto estas lacunas ocorreram apenas na componente zonal e nos períodos de solstício. Essas lacunas ocorreram por que o modelo *HWM14* não foi capaz de obter valores em 250 km para os horários específicos nos dias de solstício utilizados para o caso das simulações (dia 360 e 180 do ano).

Como pode ser observado na Figura 8 ambos os modelos subestimam visivelmente os dados observados no período de solstício de dezembro nas latitudes mostradas, com exceção a latitude 50° S, onde os modelos superestimam os valores observados. A maior diferença visualmente perceptivelmente ocorre na latitude 25° S.

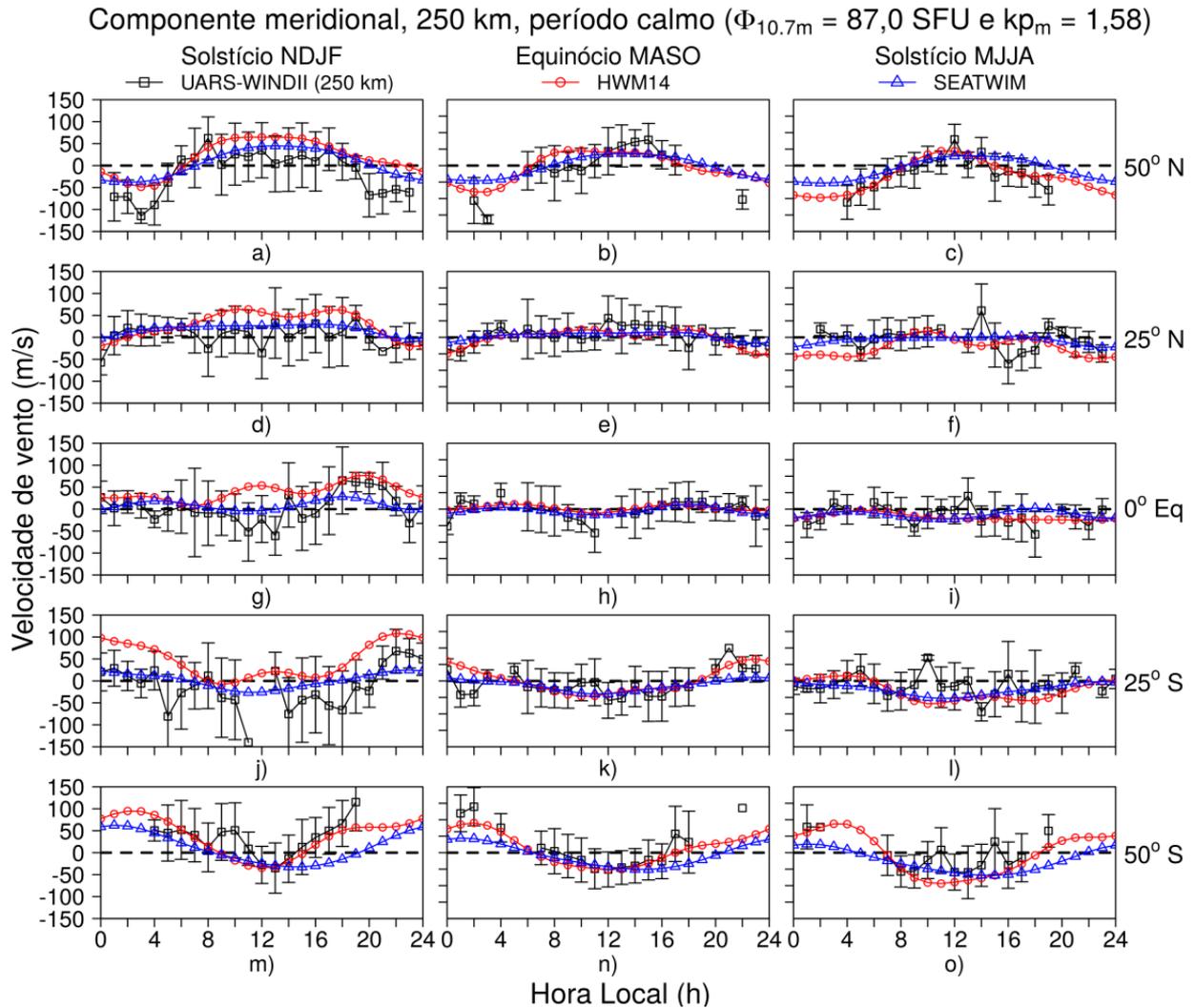


Figura 8. Comparação entre a componente meridional dos VNT obtidos de dados observados (UARS-WINDII na cor preta) e de dados gerados pelos modelos *HWM14* (cor vermelha) e *SEATWIM* (cor azul) para 5 valores de latitude geográfica e em períodos do ano diferentes.

Os valores de *RMSE* indicam diferenças absolutas consideráveis entre os valores observados e os valores simulados para os dois modelos observam-se que os para *HWM14* são maiores em comparação ao modelo *SEATWIM*, a exceção, mais uma vez, ocorre na latitude 50° S. Os dois modelos apresentam valores de concordância de *Willmott* abaixo de 0,8, onde os melhores valores de concordância ocorrendo em 50° N e 50° S para os dados do *HWM14*. Nas demais latitudes observa-se uma fraca concordância. O modelo *SEATWIM* apresentou uma boa concordância em 50° N, no entanto, os demais valores de latitude apresentam uma fraca concordância com valores observados,

assim como os valores calculados pelo modelo *HWM14*. Os dois modelos apresentam boa correlação nas latitudes 25° S e 50° N, sendo que *HWM14* apresenta uma boa correlação em 50° S. As demais latitudes, os dois modelos apresentam uma fraca correlação. Quando observamos os *p*-valores obtidos pelo teste de *Wilcoxon* pareado. No caso do modelo *SEATWIM* apenas em 25° N o *p*-valor indica que os dados observados e simulados, apresentam uma diferença significativa. Já o modelo *HWM14* apenas na latitude 50° S o *p*-valor obtido indica não existir diferença significativa entre os valores observados e os valores simulados. Levando em consideração o teste de *Wilcoxon* pareado o modelo

*HWM14* não obteve um bom desempenho em comparação ao modelo *SEATWIM*.

Tabela 3. Parâmetros e teste estatístico realizado para a componente meridional de VNT para 5 latitudes geográficas em três períodos do ano: solstício de Dezembro (NDJF), Equinócios (MASO) e Solstício de Junho (MJJA) entre dados observados (*UARS-WINDII*) e os modelos *SEATWIM* e *HWM14*.

Períodos	GLAT	COMPONENTE MERIDIONAL									
		MODELO <i>SEATWIM</i>					MODELO <i>HWM14</i>				
		<i>EM</i>	<i>RMSE</i>	<i>d</i>	<i>r<sub>s</sub></i>	<i>p</i> -valor	<i>EM</i>	<i>RMSE</i>	<i>d</i>	<i>r<sub>s</sub></i>	<i>p</i> -valor
Solstício de Dezembro	50° N	<b>22,63</b>	<b>36,63</b>	0,78	0,74	0,14	<b>36,09</b>	<b>44,76</b>	0,77	0,76	<b>0,03</b>
	25° N	14,43	24,59	<b>0,58</b>	<b>0,41</b>	<b>0,01</b>	24,81	<b>38,40</b>	<b>0,54</b>	<b>0,35</b>	<b>0,01</b>
	0°	5,07	28,49	<b>0,53</b>	<b>0,54</b>	0,23	<b>34,41</b>	<b>45,20</b>	<b>0,59</b>	<b>0,29</b>	<b>0,00</b>
	25° S	15,95	<b>43,31</b>	<b>0,60</b>	0,71	0,29	<b>62,30</b>	<b>72,32</b>	<b>0,60</b>	0,70	<b>0,00</b>
	50° S	<b>-46,21</b>	<b>63,82</b>	<b>0,53</b>	<b>0,59</b>	0,10	-21,25	<b>43,71</b>	0,74	0,77	0,48
Equinócios	50° N	<b>15,93</b>	<b>45,08</b>	0,78	0,90	0,56	<b>20,28</b>	<b>43,26</b>	0,84	<b>0,47</b>	0,66
	25° N	-0,96	20,26	0,69	0,66	0,97	-7,15	23,63	0,76	<b>0,40</b>	0,44
	0°	-1,83	21,46	0,65	0,76	0,43	4,33	22,76	<b>0,55</b>	0,65	0,81
	25° S	-6,49	<b>32,08</b>	0,63	<b>0,57</b>	0,76	6,29	<b>33,37</b>	0,79	<b>0,54</b>	0,38
	50° S	<b>-38,03</b>	<b>54,52</b>	0,73	0,76	0,47	<b>-23,92</b>	<b>34,84</b>	0,91	0,95	1,00
Solstício de Junho	50° N	<b>26,26</b>	<b>40,37</b>	0,72	0,77	0,43	9,02	23,75	0,92	0,91	0,35
	25° N	-2,38	<b>35,26</b>	<b>0,26</b>	<b>-0,10</b>	0,34	<b>-23,04</b>	<b>46,79</b>	<b>0,41</b>	<b>0,27</b>	<b>0,01</b>
	0°	0,49	31,18	<b>0,24</b>	<b>-0,15</b>	0,90	-6,64	26,46	<b>0,49</b>	<b>0,45</b>	0,23
	25° S	-12,93	<b>37,63</b>	<b>0,40</b>	<b>0,10</b>	0,16	-15,92	<b>44,90</b>	<b>0,44</b>	<b>0,11</b>	0,11
	50° S	<b>-35,17</b>	<b>51,21</b>	0,68	<b>0,45</b>	0,35	<b>-34,24</b>	<b>48,22</b>	0,81	<b>0,59</b>	0,87

Visualmente observando na Figura 8 o comportamento da sobreposição do período dos Equinócios podemos notar que ambos os modelos apresentam uma tendência menor e subestimar ou superestimar os dados observado. Este fato fica bem claro quando observamos na Tabela 3 os valores menores de *EM* e comparação aos mesmos para o período de Solstício de Dezembro. Esse comportamento também é exibido para os valores de *RMSE*. Entre os modelos os dois tiveram um comportamento semelhante em termos de diferença observada pelo índice *RMSE*. Os valores de concordância de Willmott para *HWM14* são melhores em relação ao modelo *SEATWIM*, apresentando valores acima de 0,8 o que indica uma ótima concordância em relação aos dados observados. A exceção ocorre na região do Equador onde apresenta uma concordância moderada.

Observando os valores de correlação observa-se que o modelo *SEATWIM* apresenta um melhor desempenho em comparação a *HWM14*. Quando comparamos os resultados dos *p*-valores obtidos para o teste de Wilcoxon pareado, ambos os modelos apresentaram valores superiores a 5% o que indica que os modelos não apresentam diferenças significantes a um nível de significância de 5%. Já em relação ao período de solstício de Junho visualmente observa-se na Figura 8 que existem diferenças principalmente observando a latitude de 50° S onde pode se ver que os valores de *HWM14* estão mais de acordo como os dados observados em comparação aos valores de *SEATWIM*. Na Tabela 3 os parâmetros de erro médio indicam que o modelo *SEATWIM* superestima mais que os valores de *HWM14* os dados observados. Outra questão que também pode

explicar esse comportamento é que existe uma lacuna de valores observados em 50° S, isso pode influenciar os valores de erro médio (*EM*).

Os valores de *RMSE* para ambos os modelos indicam diferenças absolutas significativas em relação aos dados observados o que pode indicar uma amplitude de oscilação na diferença entre o modelo a ser comprado e os dados observados. O comportamento do índice de concordância de *Willmott* é semelhante para ambos os modelos com os valores de *HWM14* apresentando valores um

pouco melhor de concordância em comparação aos valores de *SEATWIM*. Ambos os modelos apresentam uma fraca correlação, no entanto, o modelo *SEATWIM* apresenta fraca correlação negativa, ou anticorrelação em 25° N e 0°. Os valores obtidos para o *p*-valor no caso do modelo *SEATWIM* indicam semelhança significativa entre o modelo e os valores observados. Já para o modelo *HWM14* apenas a latitude 25° N exibe um *p*-valor indicativo de diferença significativa entre os valores simulados e observados.

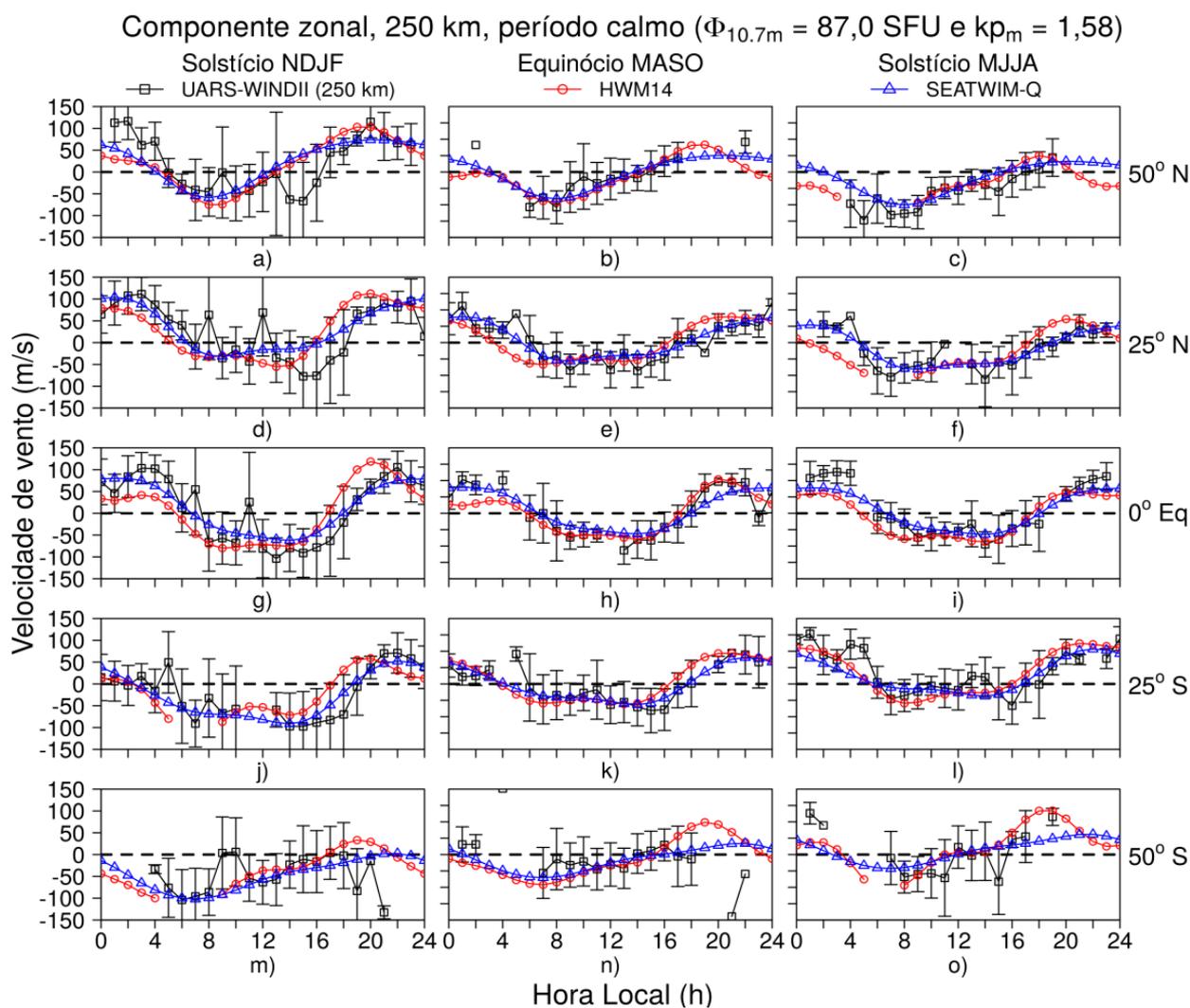


Figura 9. Comparação entre a componente zonal dos VNT obtidos de dados observados (*UARS-WINDII* na cor preta) e de dados gerados pelos modelos *HWM14* (cor vermelha) e *SEATWIM* (cor azul) para 5 valores de latitude geográfica e em períodos do ano diferentes.

A Figura 9 apresenta a sobreposição dos valores da componente zonal de *VNT* simulados por

*HWM14*, *SEATWIM* e dados observados em 250 km de altitude. Para o período de Solstício de Dezembro

pode-se perceber visualmente que os valores de *VNT* simulados tendem a subestimar ou superestimar menos os dados observados se comparamos com os resultados exibido para a componente meridional, isso pode ser verificado quando observamos os valores do erro médio para ambos os modelos. Já os valores de *RMSE* ambos os modelos exibem valores acima dos observado na *Tabela 3* sendo que o modelo *HWM14* apresenta maior diferença absoluta uma vez que seus valores de *RMSE* são maiores em comparação ao modelo *SEATWIM*. Os valores

obtidos para o índice de concordância de *Willmott* exibem um melhor desempenho do modelo *SEATWIM*, os valores de correlação também são melhores para o modelo *SEATWIM*. No entanto, encontrou-se uma fraca correlação na latitude 50° S. O modelo *HWM4* apresenta uma fraca anticorrelação em 50° S. Os testes de Wilcoxon pareado para os dois modelos exibem semelhança significativa entre os modelos e os dados observados.

Tabela 4. Parâmetros e teste estatístico realizado para a componente zonal de *VNT* para 5 latitudes geográficas em três períodos do ano: Solstício de Dezembro (NDJF), Equinócios (MASO) e Solstício de Junho (MJJA) entre dados observados (*UARS-WINDII*) e os modelos *SEATWIM* e *HWM14*.

Períodos	GLAT	COMPONENTE ZONAL									
		MODELO <i>SEATWIM</i>					MODELO <i>HWM14</i>				
		EM	<i>RMSE</i>	d	rs	p-valor	EM	<i>RMSE</i>	d	rs	p-valor
Solstício de Dezembro	50° N	-1,27	<b>45,73</b>	0,80	0,66	0,95	-2,49	<b>48,48</b>	0,80	0,60	0,98
	25° N	5,48	<b>42,31</b>	0,84	0,66	0,59	-1,04	<b>54,36</b>	0,77	<b>0,55</b>	1,00
	0°	2,03	<b>32,01</b>	0,93	0,84	0,80	-8,52	<b>49,96</b>	0,86	0,74	0,64
	25° S	-2,72	<b>28,51</b>	0,92	0,86	0,74	1,68	<b>49,25</b>	0,76	<b>0,52</b>	0,76
	50° S	-7,88	<b>50,29</b>	<b>0,56</b>	<b>0,24</b>	0,84	9,15	<b>64,42</b>	<b>0,27</b>	<b>-0,18</b>	0,43
Equinócios	50° N	-8,18	<b>30,74</b>	0,91	0,91	0,43	-15,49	<b>39,69</b>	0,85	0,86	0,74
	25° N	2,65	29,90	0,92	0,87	0,76	-3,59	<b>47,32</b>	0,82	0,69	0,97
	0°	5,37	33,51	0,93	0,86	0,87	-5,48	33,52	0,93	0,85	0,78
	25° S	-3,14	27,86	0,93	0,89	0,84	3,00	39,33	0,88	0,76	0,65
	50° S	-6,71	<b>88,06</b>	<b>0,17</b>	<b>-0,02</b>	0,94	-5,47	<b>101,96</b>	<b>0,17</b>	<b>-0,02</b>	0,72
Solstício de Junho	50° N	<b>20,35</b>	<b>35,47</b>	0,87	0,82	<b>0,02</b>	15,30	25,53	0,91	0,81	0,06
	25° N	-0,54	28,22	0,92	0,80	0,69	-9,84	<b>57,57</b>	0,70	<b>0,43</b>	0,80
	0°	-7,16	29,35	0,95	0,90	0,91	-26,36	<b>43,04</b>	0,90	0,82	0,29
	25° S	<b>-15,01</b>	<b>42,39</b>	0,85	0,71	0,59	-7,06	<b>41,69</b>	0,89	0,76	0,76
	50° S	-3,34	<b>53,73</b>	<b>0,67</b>	<b>0,64</b>	0,57	9,87	<b>51,13</b>	0,83	0,75	0,43

Ainda na Figura 9 é possível perceber que nos períodos dos Equinócios não existe muita diferença entre os dados simulados e observados assim como para a componente meridional. Os valores de erro médio da Tabela 4 indicam pouca tendência de subestimar ou superestimar os dados observados. Já os valores de *RMSE* apresentam comportamento semelhante para os dois modelos sendo que os valores obtidos para esse parâmetro estatístico referente ao modelo *HWM14* são ligeiramente maiores. Os índices de concordância de *Willmott* para ambos são semelhantes e melhores

quando comparamos ao solstício de dezembro e também em comparação àqueles obtidos para a componente meridional. Ambos os modelos apresentam fraca concordância na latitude 50° S. Os valores de correlação do modelo *SEATWIM* são melhores em comparação aos valores obtidos para *HWM14*. Os dois modelos exibem uma fraca anticorrelação em 50° S. Os *p*-valores obtidos realizando o teste de Wilcoxon pareado indica que os modelos são significativamente semelhantes como os dados observados. Em relação ao período referente ao Solstício de Junho, assim como o

Solstício de Dezembro e os Equinócios, ambos os modelos apresentam uma fraca tendência a superestimar ou subestimar os dados observados em comparação a componente meridional e esse fato pode ser observado visualmente e também pelos valores de erro médio da Tabela 4. Vale salientar que nesse período ocorreram muitas lacunas de valores observados e isso afeta a comparação estatística. Os valores de *RMSE* para as latitudes 0° e 25° N são bem maiores para *HWM14*. Para as demais latitudes o comportamento é bem semelhante. Os índices de concordância também apresentam semelhanças com uma ligeira vantagem de *SEATWIM* em comparação a *HWM14*. Os valores de correlação também apresentam semelhanças, apresentando uma boa correlação com exceção a latitude 25° N para o modelo *HWM14*. Já os valores obtidos para o *p*-valor existem um indicativo de diferença significativa entre os valores simulados com *SEATWIM* e os dados observados para a latitude 50°

N. De modo geral pode-se notar que os modelos *SEATWIM* e *HWM14* apresentam certa semelhança nos valores simulados por ambos para as componentes meridional, zonal em diferentes períodos do ano. Para evidenciar esse fato realizamos uma comparação estatística entre os dois modelos para as duas componentes de *VNT*.

Quando observamos os parâmetros estatísticos exibidos na Tabela 5 podemos observar que existe uma semelhança entre os modelos na componente zonal, já na componente meridional exibe consideráveis diferenças como tendência a subestimar os valores simulados com *SEATWIM* no período de Solstício de Dezembro e superestimar no período de Solstício de Junho. Também é possível perceber que nas componentes a semelhança é maior no período de equinócios em comparação aos períodos de solstícios.

Tabela 5. Parâmetros e teste estatístico realizado para as componentes de *VNT* para 5 latitudes geográficas em três períodos do ano: Solstício de Dezembro (NDJF), Equinócios (MASO) e Solstício de Junho (MJJA) entre o modelo *SEATWIM* e o modelo *HWM14*.

Períodos	GLAT	MERIDIONAL					ZONAL				
		Em	<i>RMSE</i>	d	r <sub>s</sub>	<i>p</i> -valor	Em	<i>RMSE</i>	d	r <sub>s</sub>	<i>p</i> -valor
Solstício de Dezembro	50° N	-13,92	18,50	0,93	0,95	0,17	3,11	16,89	0,97	0,97	0,79
	25° N	-10,39	21,94	0,73	0,87	0,13	6,51	<b>29,38</b>	0,92	0,76	0,41
	0°	<b>-29,34</b>	34,90	<b>0,43</b>	<b>0,12</b>	<b>0,00</b>	10,55	<b>38,30</b>	0,89	0,73	0,34
	25° S	<b>-46,22</b>	<b>52,52</b>	<b>0,62</b>	0,92	<b>0,00</b>	-6,00	27,46	0,92	0,79	0,37
	50° S	<b>-25,77</b>	<b>33,45</b>	0,83	0,90	<b>0,03</b>	-3,50	23,85	0,86	0,77	0,36
Equinócios	50° N	3,17	19,29	0,93	0,90	0,86	8,87	26,05	0,93	0,85	0,42
	25° N	6,19	15,45	0,82	0,79	0,85	6,23	<b>30,76</b>	0,91	0,78	0,46
	0°	-6,29	7,99	0,83	0,89	<b>0,03</b>	12,29	<b>33,38</b>	0,91	0,78	0,31
	25° S	-14,11	<b>25,99</b>	0,78	0,99	0,44	-7,16	21,19	0,96	0,88	0,79
	50° S	-19,61	<b>28,93</b>	0,88	0,90	0,20	-1,30	<b>31,87</b>	0,87	0,93	0,71
Solstício de Junho	50° N	<b>23,94</b>	<b>31,66</b>	0,85	0,96	0,08	<b>22,03</b>	<b>39,37</b>	0,76	<b>0,65</b>	0,50
	25° N	<b>21,24</b>	<b>28,78</b>	0,63	0,78	<b>0,00</b>	9,69	<b>44,19</b>	0,80	0,64	0,86
	0°	7,37	14,80	<b>0,49</b>	<b>-0,12</b>	<b>0,00</b>	18,77	28,65	0,94	0,90	0,09
	25° S	3,14	19,26	0,82	0,75	0,73	-8,21	25,40	0,95	0,87	0,70
	50° S	<b>-23,02</b>	<b>42,94</b>	0,81	0,87	0,21	-8,14	<b>39,03</b>	0,80	0,82	0,54

## Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um modelo médio longitudinal (*SEATWIM*) com cobertura espacial em latitude geográfica compreendido entre  $-50^\circ$  até  $50^\circ$  para 250 km em hora local (0 às 24h) e sazonal para qualquer dia do ano (do dia 1 até 365) representativo para períodos considerados geofisicamente calmos, mais especificamente para valores de fluxo solar médio  $\Phi_m = 87 \text{ SFU}$  e índice de atividade magnética média  $kp_m = \sim 2$ . O modelo foi desenvolvido com base em uma análise estatística dos registros de perfis de *VNT* realizadas utilizando o equipamento embarcado (*WINDII*) no satélite *UARS* que operou entre os anos de 1991 a meados de 1997. Como base nos resultados obtidos pode tecer algumas conclusões:

- O modelo *SEATWIM* se mostrou capaz em descrever de forma qualitativa a climatologia média longitudinal para 250 km de altitude conforme se pode observar da climatologia apresentada em (Emmert et al., 2002);
- Observando os valores obtidos para *SEATWIM* percebemos que o modelo apresenta boa concordância interceptando a barra de erro dos dados observados;
- Os índices estatísticos comparativos entre os valores da componente zonal de dos modelos *SEATWIM* e *HWM14* apresentam valores melhores quando comparados a componente meridional para todos os períodos do ano. Sendo que, os valores comparativos estatisticamente referentes ao período de equinócio são melhores em comparação aos valores apresentados para os períodos de solstícios;
- Na comparação estatística realizada entre os modelos *SEATWIM* e *HWM14* a componente zonal apresenta maior semelhança estatística em comparação a componente meridional. Observa-se que existe maior semelhança estatística entre as componentes zonais dos modelos. Em relação aos períodos do ano, os parâmetros estatísticos exibiram melhor desempenho nos períodos de equinócio para as duas componentes de *VNT*.

### Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), ao Programa de Pós Graduação em Ciências Climáticas (PPGCC), pela estrutura de trabalho fornecida, a NASA pela

disponibilidade dos dados utilizado nessa pesquisa e a Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA) instituição na qual faço parte. Um especial agradecimento aos meus orientadores Dr. Christiano Garnett Marque Brum e Dr. José Henrique Fernandez, e também ao Dr Anderson Guimarães Guedes pelas valorosas contribuições. À Fundação de Amparo a Pesquisa (FAPESP) pela disponibilidade do relatório FAPESP processo no 05/59433-7 elaborado pelo Dr Christiano Garnett Marque Brum. O Observatório de Arecibo é operado pela Universidade da Flórida Central (University of Central Florida- UCF) sob o acordo de cooperação com a National Science Foundation (NSF, projeto numero AST-1744119) e em aliança com a Yang Enterprises e Ana G. Méndez-Universidad Metropolitana.

### Referências

- Akima, H., 1970. A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures. *Journal of the Association for Computing Machinery* 14, 589-602. [doi:10.1145/321607.321609](https://doi.org/10.1145/321607.321609)
- Akima, H., 1991. Method of Univariate Interpolation that Has the Accuracy of a Third-degree Polynomial. *Journal ACM Transactions on Mathematical Software* 17, 341-366. [doi:10.1145/114697.116810](https://doi.org/10.1145/114697.116810)
- Brum, C. G. M., Tepley, C. A., Fentzke, J. T., Robles, E., Santos, P. T. dos, & Gonzalez, and S. A., 2012. Long-term Changes in the Thermospheric Neutral Winds over Arecibo: Climatology based on over three decades of Fabry-Perot observations. *Journal of Geophysical Research* 117, A00H14. [doi:10.1029/2011JA016458](https://doi.org/10.1029/2011JA016458)
- Buonsanto, M. J., Salah, J. E., Miller, K. L., Oliver, W. L., Burnside, R. G., & Richards, P. G., 1989. Observations of neutral circulation at mid-latitudes during the Equinox Transition Study. *Journal of Geophysical Research*, 94 16987-16997. [doi:10.1029/JA094iA12p16987](https://doi.org/10.1029/JA094iA12p16987)
- Burnside, R. G., & Tepley, C. A., 1989. Optical observations of thermospheric neutral winds at Arecibo between 1980 and 1987. *Journal of Geophysical Research* 94, 2711-2716. [doi:10.1029/JA094iA03p02711](https://doi.org/10.1029/JA094iA03p02711)
- Drob, D. P., Emmert, J. T., Crowley, G., Picone, J. M., Shepherd, G. G., Skinner, W. W., Hays, P., Niciejewski, R. J., Larsen, M., She, C. Y., Meriwether, J. W., Hernandez, G., Jarvis, M. J.,

- Sipler, D. P., Tepley, C. A., O'Brien, M. S., Bowman, J. R., Wu, Q., Murayama, Y., Kawamura, S., Reid, I. M., & Vincent, R. A., 2008. An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07: HWM07 EMPIRICAL WIND MODEL. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 113, A12304. [doi:10.1029/2008JA013668](https://doi.org/10.1029/2008JA013668)
- Drob, D. P., Emmert, J. T., Meriwether, J. W., Makela, J. J., Doornbos, E., Conde, M., Hernandez, G., Noto, J., Zawdie, K. A., McDonald, S. E., Huba, J. D., & Klenzing, J. H., 2015. An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere. *Earth and Space Science* 2, 301-319. [doi:10.1002/2014EA000089](https://doi.org/10.1002/2014EA000089)
- Emmert, J. T., 2001. Climatology of upper thermospheric daytime neutral winds from satellite observations (Phdthesis). Utah State University.
- Emmert, J. T., Drob, D. P., Shepherd, G. G., Hernandez, G., Jarvis, M. J., Meriwether, J. W., Niciejewski, R. J., Sipler, D. P., & Tepley, C. A., 2008. DWM07 global empirical model of upper thermospheric storm-induced disturbance winds: DWM07 THERMOSPHERIC WIND MODEL. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113, A11319. [doi:10.1029/2008JA013541](https://doi.org/10.1029/2008JA013541)
- Emmert, J. T., Fejer, B. G., Shepherd, G. G., & Solheim, B. H., 2002. Altitude dependence of middle and low-latitude daytime thermospheric disturbance winds measured by WINDII: WINDII DAYTIME DISTURBANCE WINDS. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107, SIA19-1 - SIA19-15. [doi:10.1029/2002JA009646](https://doi.org/10.1029/2002JA009646)
- Geisler, J. E., 1967. A numerical study of the wind system in the middle thermosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 29, 1469-1482. [doi:10.1016/0021-9169\(67\)90100-6](https://doi.org/10.1016/0021-9169(67)90100-6)
- Hedin, A. E. (1987). MSIS-86 Thermospheric Model. *Journal of Geophysical Research* 92, 4649-4662. [doi:10.1029/JA092iA05p04649](https://doi.org/10.1029/JA092iA05p04649)
- Hedin, A. E., Biondi, M. A., Burnsider, R. G., Hernandez, G., Johnson, R. M., Killeen, T. L., Mazaudier, C., Meriwether, J. W., Salah, J. E., Sica, J. R., Smith, R. W., Spencer, N. W., Wickwar, V. B., & Viridi, T. S., 1991. Revised global model of thermosphere winds using satellite and ground-based observations. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 96, 7657-7688. [doi:10.1029/91JA00251](https://doi.org/10.1029/91JA00251)
- Hedin, A. E., Spencer, N. W., & Killen, T. L., 1988. Empirical global model of upper thermosphere winds based on atmosphere and dynamics explorer satellite data. *Journal of Geophysical Research* 22, 9959-9978. [doi:10.1029/JA093iA09p09959](https://doi.org/10.1029/JA093iA09p09959)
- Hernandez, G., & Roble, R. G., 1976. Direct measurements of nighttime thermospheric winds and temperatures, 2. Geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research* 81, 5173-5181. [doi:10.1029/JA081i028p05173](https://doi.org/10.1029/JA081i028p05173)
- Jacchia, L. G., 1965. Static diffusion models of the upper atmosphere with empirical temperature profiles. *Smithsonian Contributions to Astrophysics* 8, 213-257. [doi:10.5479/si.00810231.8-9.213](https://doi.org/10.5479/si.00810231.8-9.213)
- Kohl, H., & King, J. W., 1967. Atmospheric winds between 100 and 700 km and their effects on the ionosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 29, 1045-1062. [doi:10.1016/0021-9169\(67\)90139-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(67)90139-0)
- Kumar, P., & Fofoula-Georgiou, E., 1997. Wavelet analysis for geophysical applications. *Reviews of Geophysics* 35, 385-412. [doi:10.1029/97RG00427](https://doi.org/10.1029/97RG00427)
- Lee, S., Wolberg, G., & Shin, S. Y., 1997. Scattered data interpolation with multilevel B-splines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 3, 228-244. [doi:10.1109/2945.620490](https://doi.org/10.1109/2945.620490)
- Percival, D. B., & Walden, A. T., 2000. *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. [doi:10.1017/CBO9780511841040](https://doi.org/10.1017/CBO9780511841040)
- Reber, C. A., Trevathan, C. E., McNeal, R. J., & Luther, M. R., 1993. The Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) mission. *Journal of Geophysical Research* 98, 10643-10647. [doi:10.1029/92JD02828](https://doi.org/10.1029/92JD02828)
- Richmond, A. D., 1983. Thermospheric Dynamics and Electrodynamics. In R. L. Carovillano & J. M. Forbes (Orgs.), *Solar-Terrestrial Physics: Principles and Theoretical Foundations* 104, 523-607. [doi:10.1007/978-94-009-7194-3\\_21](https://doi.org/10.1007/978-94-009-7194-3_21)
- Rishbeth, H., 1971. The F-layer dynamo. *Planetary and Space Science* 19, 263-267. [doi:10.1016/0032-0633\(71\)90205-4](https://doi.org/10.1016/0032-0633(71)90205-4)
- Roble, R. G., Dickinson, R. E., & Ridley, E. C., 1977. Seasonal and solar cycle variations of the

- zonal mean circulation in the thermosphere. *Journal of Geophysical Research* 82, 5493-5504. [doi:10.1029/JA082i035p05493](https://doi.org/10.1029/JA082i035p05493)
- Salah, J. E., & Holt, J. M., 1974. Midlatitude thermospheric winds from incoherent scatter radar and theory. *Radio Science* 9, 301-313. [doi:10.1029/RS009i002p00301](https://doi.org/10.1029/RS009i002p00301)
- Santos, P. T., Brum, C. G. M., Tepley, C. A., Aponte, N., González, S. A., & Robles, E., 2011. Using incoherent scatter radar to investigate the neutral wind long-term trend over Arecibo: NEUTRAL WIND LONG-TERM TREND AT ARECIBO. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116, A00H13. [doi:10.1029/2011JA016514](https://doi.org/10.1029/2011JA016514)
- Shepherd, G. G. et al., 2001. UARS Wind Imaging Interferometer (WINDII) Level 3AL V011, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Recuperado 21 de fevereiro de 2017, de [https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/UARW13AL\\_011.html](https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/UARW13AL_011.html)
- Shepherd, G. G., Thuillier, G., Gault, W. A., Solheim, B. H., Hersom, C., Alunni, J. M., Brun, J.-F., Brune, S., Charlot, P., Cogger, L. L., Desaulniers, D.-L., Evans, W. F. J., Gattinger, R. L., Girod, F., Harvie, D., Hum, R. H., Kendall, D. J. W., Llewellyn, E. J., Lowe, R. P., Ohrt, J., Pasternak, F., Peillet, O., Powell, I., Rochon, Y., Ward, W. E., Wiens, R. H., & Wimperis, J., 1993. WINDII, the Wind Imaging Interferometer on the Upper Atmosphere Research Satellite. *Journal of Geophysical Research* 98, 10725-10750. [doi:10.1029/93JD00227](https://doi.org/10.1029/93JD00227)
- Sipler, D. P., Luokkala, B. B., & Biondi, M. A., 1982. Fabry-Perot determinations of midlatitude F-region neutral winds and temperatures from 1975 to 1979. *Planetary and Space Science* 30, 1025-1032. [doi:10.1016/0032-0633\(82\)90152-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(82)90152-0)
- Spearman, C., 1904. The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology* 15, 72-101. [doi:10.2307/1412159](https://doi.org/10.2307/1412159)
- Tepley, C. A., Robles, E., García, R., Santos, P. T., Brum, C. M., & Burnside, R. G., 2011. Directional trends in thermospheric neutral winds observed at Arecibo during the past three solar cycles: ARECIBO THERMOSPHERE NEUTRAL WIND TRENDS. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 116, A00H06. [doi:10.1029/2010JA016172](https://doi.org/10.1029/2010JA016172)
- Titheridge, J. E., 1995. Winds in the ionosphere—A review. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 57, 1681-1714. [doi:10.1016/0021-9169\(95\)00091-F](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00091-F)
- Vieira, L. E. A., Gonzalez, W. D., Echer, E., Guarnieri, F. L., Prestes, A., Gonzalez, A. L. C., Santos, J. C., Dal Lago, A., & Schuch, N. J., 2003. Multi-Scale Analysis of the Geomagnetic Symmetric Index (sym). *Solar Physics* 217, 383-394. [doi:10.1023/B:SOLA.0000006858.86646.9f](https://doi.org/10.1023/B:SOLA.0000006858.86646.9f)
- Wilcoxon, F., 1945. Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin* 1, 80-83. [doi:10.2307/3001968](https://doi.org/10.2307/3001968)
- Willmott, C. J., 1981. On the validation of models. *Physical geography* 2, 184-194. [doi:10.1080/02723646.1981.10642213](https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213)