

ONDAS DE GRAVIDADE NA ESTRATOSFERA EQUATORIAL BRASILEIRA: ESTUDO DE CASO

A. L. P. OLIVEIRA^{1*}, E. P. CAZUZA¹, J. Q. MEDEIROS NETO¹, J. P. SILVA JUNIOR¹, A. A. X. BARBOSA¹, G. L. BORBA¹, D. MENDES¹, M. P. DA SILVA¹, M. L. ALCÂNTARA¹¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN
andersonluiz_fisica@yahoo.com.br*

Artigo submetido em 26/05/2016 e aceito em 29/10/2016

DOI: 10.15628/holos.2016.4638

RESUMO

Perturbações atmosféricas geradas por ondas de gravidade e com características quase periódicas têm sido intensamente estudadas nas últimas décadas. No entanto, poucos desses estudos se referem a atmosfera equatorial sobre o setor sul americano de latitudes. No presente trabalho se discute resultados relativos a detecção de assinaturas de ondas de gravidade no perfil de temperatura da estratosfera equatorial, em uma faixa de altura compreendida entre 16 – 25 km, a partir de dados de radiossondas instaladas em balões meteorológicos lançados, rotineiramente, do Centro de

Lançamentos da Barreira do Inferno (CLBI), localizado em Natal/RN (5,8°S; 35,5°O), durante o ano de 2000. Neste ano foram realizadas 185 sondagens diurnas, sendo que em 29 casos foram observadas perturbações com períodos aproximados compreendidos entre 6 – 28 min, ou seja, compatíveis com ondas de gravidade. Além disso, foi calculado o perfil da densidade de energia potencial, para o caso do dia 23/05/2000, e se constatou que a densidade de energia potencial, associada à esta perturbação, foi da ordem de 0,5 – 4 J/kg.

PALAVRAS-CHAVE: Ondas de gravidade, Estratosfera, Balões meteorológicos**GRAVITY WAVES IN EQUATORIAL STRATOSPHERE BRAZILIAN BALLOONS IN METEOROLOGICAL DATA: A CASE STUDY**

ABSTRACT

Atmospheric disturbances generated by gravity waves exhibiting quasi-periodic characteristics have been intensively studied in recent decades. However, only a few of these studies refers to equatorial atmosphere above the South American sector latitudes. In this work we discuss results concerning the detection of gravity waves signatures in the temperature profile of the equatorial stratosphere, in a height range of 16 – 25 km from radiosonde data installed in weather balloons routinely launched by the Launching Center of Barreira

do Inferno (CLBI), located in Natal/RN, (5.8°S; 35.5°W), during the year 2000. During this year there were made 185 diurnal surveys, and in 29 of these cases, disturbances were observed with approximate periods between 6 – 28 min, i.e. compatibles with of gravity waves. In addition, the density profile of potential energy was calculated considering the day 05/23/2000, and it was found that the potential energy density, associated with this disorder, was in the range 0.5 – 4 J/kg.

KEYWORDS: Gravity waves, Stratosphere, Weather balloons

1 INTRODUÇÃO

Ondas de Gravidade são perturbações quase periódicas que surgem, principalmente, na baixa atmosfera devido ao balanço entre a força de gravidade e o gradiente de pressão e propagam-se até a alta atmosfera (HINES, 1960; TAKAHASHI *et al.*, 1999; TSUDA *et al.*, 2000). O estudo destas ondas tem recebido crescente atenção graças ao importante papel representado no transporte de *momentum* e energia através da baixa e média atmosfera.

Por outro lado, como verificado por Lastovicka (1997) as ondas de gravidade geradas na baixa atmosfera, são capazes de perturbar a termosfera, principalmente a ionosfera, enquanto que Takahashi *et al.* (1999) estudando os efeitos da propagação de ondas de gravidade na estratosfera, verificou que estas perturbam o perfil de temperatura nessa região, bem como a circulação geral, confirmando mais uma vez os resultados de Hines (1960), que mostrou que as ondas de gravidade são um importante mecanismo de dissipação de energia, tanto na alta como na baixa atmosfera. Mais recentemente, com o trabalho de Forbes (2000), verificou-se que as ondas de gravidade são, provavelmente, o principal mecanismo de acoplamento troposfera-termsfera, mostrando que oscilações de marés associadas a este acoplamento são capazes de provocar variações de temperatura na faixa de 110 km de altura, quebrando, assim, o conceito de que pode-se tratar, principalmente a troposfera, como isolada do resto do sistema atmosférico. Indo mais além, Bishop *et al.* (2006) tratou da existência de respostas termosféricas às perturbações, tipo ondas de gravidade, geradas durante tempestades com raios, evidenciando mais ainda o acoplamento entre a troposfera e a termosfera. Na alta atmosfera, as ondas de gravidade se propagam na forma distúrbios ionosféricos, os TID's (sigla para Travelling Ionospheric Disturbance), e são responsáveis, por exemplo, por perturbações no perfil de densidade eletrônica na ionosfera e possuem relação com irregularidades no plasma ionosférico, conhecidas como bolhas de plasma, como descrito nos trabalhos de Sobral *et al.* (2002), MacDougal *et al.* (2011) e Cazuza (2014).

As ondas de gravidade são as principais causas de flutuações de mesoescala em parâmetros característicos da atmosfera neutra, como em perfis de temperatura e de velocidade do vento e, portanto, pode-se usar tais parâmetros como traçadores de assinaturas dessas ondas visto que o que se observa, naturalmente, é o efeito das ondas no meio e não a própria onda.

Vários trabalhos tais como os de Hines (1960), Forbes *et al.* (1997), Medeiros *et al.* (2004) e Wrasse (2004) sugerem que as principais fontes de geração destas ondas encontram-se na região da troposfera, dentre as quais podem ser destacadas as convecções troposféricas (GARDNER, 1995; FRITTS e ALEXANDER, 2003), fatores meteorológicos (TAYLOR e HAPGOOD, 1988; NAPPO, 2002; FRITTS e ALEXANDER, 2003) e os forçantes orográficos (GARDNER, 1995; HICKEY, 2011).

No presente artigo, apresenta-se evidência da existência de ondas de gravidade na estratosfera sobre a região de Natal/RN (5,8°S; 35,5°O), a partir de detecção de perturbações em perfis de temperatura, obtidos com balões meteorológicos, compatíveis com assinaturas de ondas de gravidade.

Os balões meteorológicos são lançados do CLBI, atingem alturas de até 28 km e são capazes de coletar dados tais como pressão atmosférica, temperatura, umidade relativa e velocidade e orientação do vento. O tempo de voo é da ordem de 70 minutos e os dados são enviados por telemetria. São realizados, quase que diariamente, dois lançamentos, um às 12 horas (UT) e outro às 24 horas (UT).

As perturbações, observadas no perfil de temperatura aqui consideradas, apresentaram características quase periódicas se comparadas com os perfis para o mesmo dia obtidos por simulação numérica através do modelo MSIS-90. A esse tipo de comportamento atribuiu-se como causa a perturbação provocada, no campo de temperatura estratosférico, a passagem de ondas de gravidade. Tal procedimento foi usado para determinar características morfológicas das oscilações e parâmetros tais como comprimento de onda vertical (λ_z), período (τ) e frequência angular (ω).

Com isso, foi possível obter algumas características da morfologia e dinâmica das ondas de gravidade aqui observadas. Tais ondas atravessam a tropopausa, sugerindo assim acoplamento entre essas duas camadas, e depositam significativa quantidade de energia nas alturas onde sofrem dissipação. Das estimativas obtidas, quanto a quantidade de energia potencial associada a estas ondas, verifica-se o quão importante pode ser o processo de acoplamento entre camadas e inferir que nessas condições o transporte de energia entre as camadas da atmosfera pode afetar parâmetros meteorológicos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Ondas de gravidade são desencadeadas, principalmente, por eventos que provocam perturbações em regiões localizadas da atmosfera, tendo como causa a atuação de forças restauradoras que agem em sentido contrário à perturbação. A gravidade se apresenta como a principal força restauradora nesse processo, o que dá nome à perturbação (HINES, 1960; KELLEY, 2009). Tais ondas, formam o componente de menor frequência de uma classe mais geral, sendo geradas principalmente por eventos que produzem uma rápida compressão de uma região da atmosfera (HICKEY, 2011) e influenciam a estrutura térmica da média atmosfera (VARGAS, 2007).

O limite superior de frequência das ondas de gravidade é a frequência de Brunt-Väisälä (N), uma vez que uma onda alcança regiões nas quais sua frequência intrínseca se torna maior do que N , ela não consegue mais se propagar verticalmente (HICKEY, 2011; WRASSE, 2004). A Equação (1) mostra como calcular a frequência de Brunt-Väisälä para determinada região da atmosfera.

$$N^2 = \frac{g}{T} \left(\frac{dT}{dz} + \frac{g}{c_p} \right) \quad (1)$$

Nessa equação, g é a aceleração da gravidade e c_p é o calor específico à pressão constante.

Quando a frequência de oscilação da onda, ω , é igual a frequência de Brunt-Väisälä, ou seja $\omega = N$, a região é chamada de nível de reflexão e quando $\omega < N$ a onda caracteriza-se como uma

onda de gravidade (FRITTS e ALEXANDER, 2003; HICKEY, 2011). Essas ondas possuem períodos superiores a 5 min, podendo chegar a horas (HINES, 1960).

Além da frequência de Brunt-Väisälä, a energia potencial se configura como um importante parâmetro de identificação da presença de ondas de gravidade na atmosfera (TSUDA *et al.*, 2000; WRASSE *et al.*, 2007). A energia potencial é inversamente proporcional à frequência de Brunt-Väisälä e depende também da variância da temperatura, como mostrado na Equação (2).

$$E_p = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{g}{N} \right)^2 \left(\frac{\overline{T'}}{\overline{T}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Onde, g é a aceleração da gravidade, \overline{T} é a média da temperatura atmosférica e $\overline{T'}$ é a média da temperatura perturbada (TSUDA *et al.*, 2000; WRASSE *et al.*, 2007).

A média da temperatura perturbada, $\overline{T'}$, é obtida, em cada caso, a partir da função característica da perturbação. Essa função, senoidal, relaciona parâmetros da perturbação tais como fase (φ), amplitude (A), variação da altura (δz) e frequência (ω) com T' .

Para a perturbação descrita no presente trabalho, ou seja, a que foi detectada em 23/05/2000, a flutuação da temperatura pode ser representada, com boa aproximação, pela Equação (3).

$$T' = T'_0 + A \left[\text{sen} \left(\frac{\pi(z-z_0)}{\omega} \right) \right] \quad (3)$$

Onde, T'_0 é a temperatura inicial da perturbação e $(z - z_0)$ é a faixa de altura onde se detectou a perturbação e se realiza o cálculo da energia potencial.

A Equação (4) permite estimar a variância da flutuação da temperatura, $\overline{T'^2}$ (TSUDA *et al.*, 2000; WRASSE *et al.*, 2007).

$$\overline{T'^2} = \frac{1}{z-z_0} \int_{z_0}^z T'^2 dz \quad (4)$$

Por outro lado, para se determinar o comportamento da temperatura em condições não perturbadas se faz uso do modelo semi empírico MSIS-90 (sigla para Mass Spectrometer Incoerentes Scatter Radar), que reúne dados de densidade e temperatura da atmosfera (HEDIN, 1991). A escolha de tal modelo deve-se ao fato de que ele reproduz, com alto grau de precisão, as características térmicas da atmosfera sobre esta região.

Os dados que representam o efeito líquido sobre o campo de temperatura, e que apresentam características de quase periodicidade, são tratados por técnicas de análise de Fourier, mais precisamente a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e, com isso, é possível determinar o espectro de frequências da perturbação. Deste modo, é possível comparar o espectro de frequências com as frequências de Brunt-Väisälä, diferenciando-as, assim, de outras formas de perturbações encontradas na estratosfera tais como marés, ondas planetárias ou ondas de Rossby.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Existem poucas técnicas de sondagens atmosféricas que permitem a detecção das assinaturas de ondas de gravidade na estratosfera, dentre elas destacam-se as radiossondagens por balões (ALLEN e VINCENT, 1995) e por satélites (TSUDA *et al.*, 2000; WRASSE *et al.*, 2007). Em ambos os casos se está interessado em observar o perfil de velocidade vertical do vento ou o perfil vertical da temperatura. Os resultados aqui discutidos foram obtidos por radiossondagens realizadas através de balões meteorológicos, com precisão suficiente para medir a temperatura vertical desde a troposfera até a estratosfera.

O balão leva consigo uma carga útil formada por uma sonda tipo Vaisala, como mostra a Figura 1, composta por sensores de temperatura (2), umidade relativa (3), pressão atmosférica (4) e velocidade do vento, bem como por um localizador GPS (1) e uma antena de transmissão UHF (5). Assim, os dados coletados são transmitidos para a estação em terra, em tempo real, via telemetria. A Figura 1 mostra a radiossonda e o balão, lançados no dia 06/07/2016.

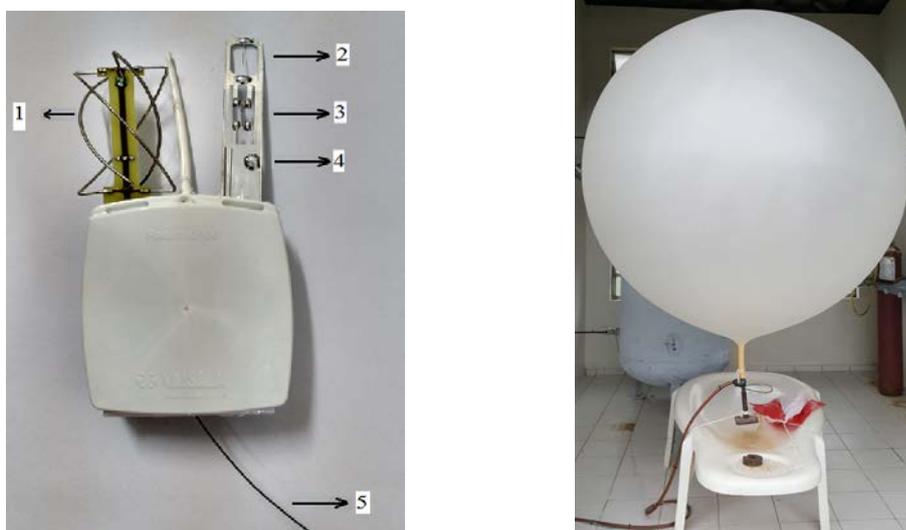


Figura 1: Sonda tipo Vaisala contendo sensores de temperatura, pressão, umidade relativa e velocidade do vento (esquerda) e balão meteorológico com a sonda e paraquedas acoplados (direita) em lançamento realizado pelo CLBI no dia 06/07/2016.

Os dados de temperatura obtidos durante a radiossondagem permitem a construção dos perfis verticais de temperatura. Esses dados, assim dispostos, podem ser comparados com perfis verticais de temperatura gerados a partir do modelo MSIS-90. Comparando os resultados experimentais com os teóricos, gerados pelo modelo, é possível detectar perfis que apresentam características de perturbações quase periódicas, as quais, sugere-se, devem ter sido causadas por fontes periódicas ou quase periódicas. E em muitos desses casos, assume-se que tais perturbações deve-se a passagem de ondas de gravidade.

Nesse contexto, foram analisados 185 perfis de temperatura cujas sondagens foram realizadas por volta das 12 horas (UT), todas no ano de 2000, sobre a região da cidade de Natal/RN. Destes, a determinação de parâmetros tais como frequência (ω), comprimento de onda vertical (λ_z) e período (τ) permitiu classificar 29 assinaturas deixadas nos perfis de temperatura estratosférico, possivelmente, por ondas de gravidade.

A Tabela 1 mostra o número mensal de sondagens e a quantidade de eventos, para cada mês, referentes ao ano de 2000. De acordo com as características típicas das ondas de gravidades, encontradas na literatura, as perturbações listadas na terceira coluna da Tabela 1 se referem aos casos que atribui-se como causados por ondas de gravidade. Tais eventos reforçam a ideia de que esta região (latitude compreendida entre 10°N-10°S), próxima ao Equador, concentra atividades de ondas de gravidade, na baixa atmosfera, como citado por Wrasse *et al.* (2007).

Tabela 1: Número de sondagens realizadas pelo CLBI e casos de perturbações com características de ondas de gravidade em 2000.

Meses/2000	Sondagens	Ondas de gravidade
Jan	29	3
Fev	13	2
Mar	0	0
Abr	0	0
Mai	13	6
Jun	12	4
Jul	15	3
Ago	16	2
Set	17	5
Out	24	3
Nov	17	0
Dez	29	1
Total	185	29

Quando se analisa o comportamento sazonal das ondas de gravidade sobre a região em estudo, percebe-se que o outono e a primavera contemplam o maior percentual de eventos, como mostra a Figura 2. Dentro do período no qual as sondagens foram realizadas, o mês de maio foi o que apresentou o maior número de casos, o que está de acordo com o trabalho de Allen e Vincent (1995) que mostrou que, na baixa atmosfera, nos meses do outono e primavera a atividade de ondas de gravidade é maior em regiões de baixas latitudes, no entanto esses autores não chegaram a caracterizar os meses.

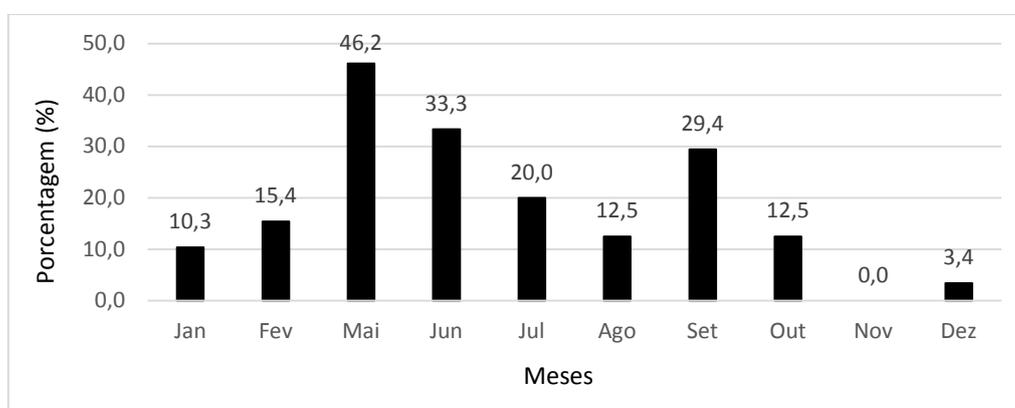


Figura 2: Comparação entre os casos identificados como ondas de gravidade e o número de sondagens mensais realizadas sobre a região de Natal (5,8°S; 35,5°O) no ano de 2000.

Por outro lado, a partir do perfil de temperatura experimental, e do perfil teórico, gerado pelo MSIS-90, foi possível obter as características fundamentais da perturbação, ou seja, seu período (τ), comprimento de onda vertical (λ_z) e a frequência (ω). Assim, a Figura 3 apresenta tal situação para os dados coletados durante a sondagem realizada no dia 23/05/2000. O balão foi lançado às 12:15 horas (UT) e seu voo durou 71,9 min. Ele atingiu a altitude de 25,6 km (quando estourou), tendo, durante o percurso, viajado através da troposfera, tropopausa e atingido a estratosfera na altura compreendida entre 16 – 25 km, aproximadamente, região esta onde foi localizada a perturbação, com característica quase periódica, como se observa na Figura 3.

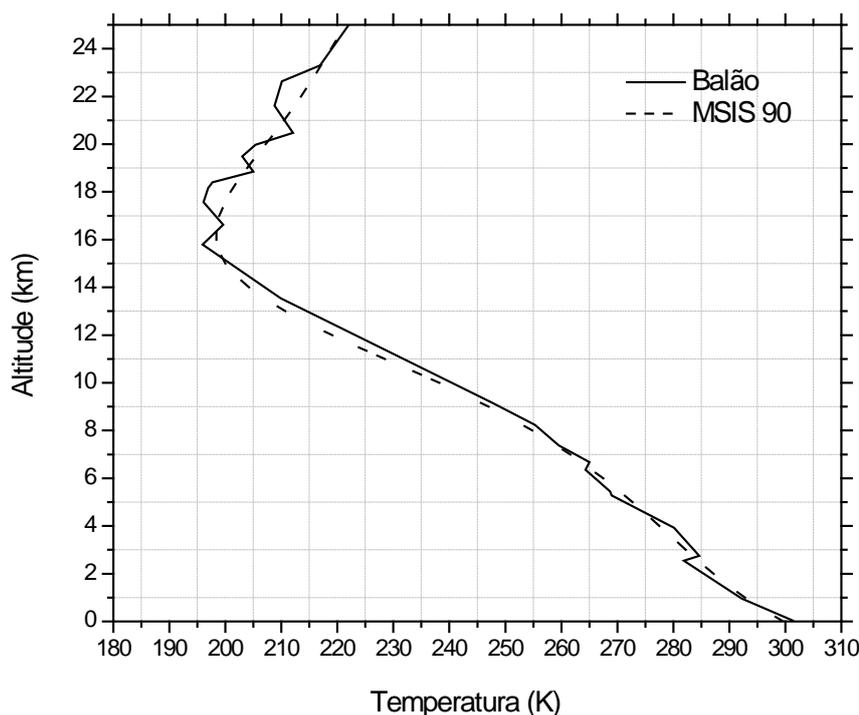


Figura 3: Comparação dos perfis verticais de temperatura a partir de dados do balão (sólida) e dados do modelo MSIS-90 (tracejada) referentes ao dia 23/05/2000 às 12:15 (UT) sobre a região de Natal (5,8°S; 35,5°O).

O perfil de temperatura atmosférico, $T(z)$, pode ser definido como sendo formado por uma temperatura básica, $\overline{T(z)}$, e uma componente perturbada, $T'(z)$. Portanto, a flutuação da temperatura pode ser calculado pela diferença entre as medidas realizadas pelo balão e os dados do modelo. O resultado dessa diferença é mostrado na Figura 4, para o dia 23/05/2000. Procedimento semelhante para a determinação da temperatura básica foi discutido em Bishop *et al.* (2006), utilizando os dados do MSIS-90, e Wrasse *et al.* (2007), utilizando as médias das temperaturas, tendo ambos obtido resultados semelhantes aos apresentados neste trabalho.

Ainda na Figura 4 é possível identificar uma flutuação de grande amplitude na temperatura estratosférica, alcançando valores superiores a 8 K. Além disso, parâmetros da onda tais como comprimento de onda vertical (λ_z) e período (τ) podem ser determinados a partir da flutuação da temperatura, como será discutido a seguir. Neste caso, os valores encontrados são da ordem 2 km e 9 min, respectivamente, condizentes, portanto, com os parâmetros de uma onda de gravidade nesta região. Além disso, por se tratar de um fenômeno ascendente fica evidente que a fonte da perturbação é troposférica.

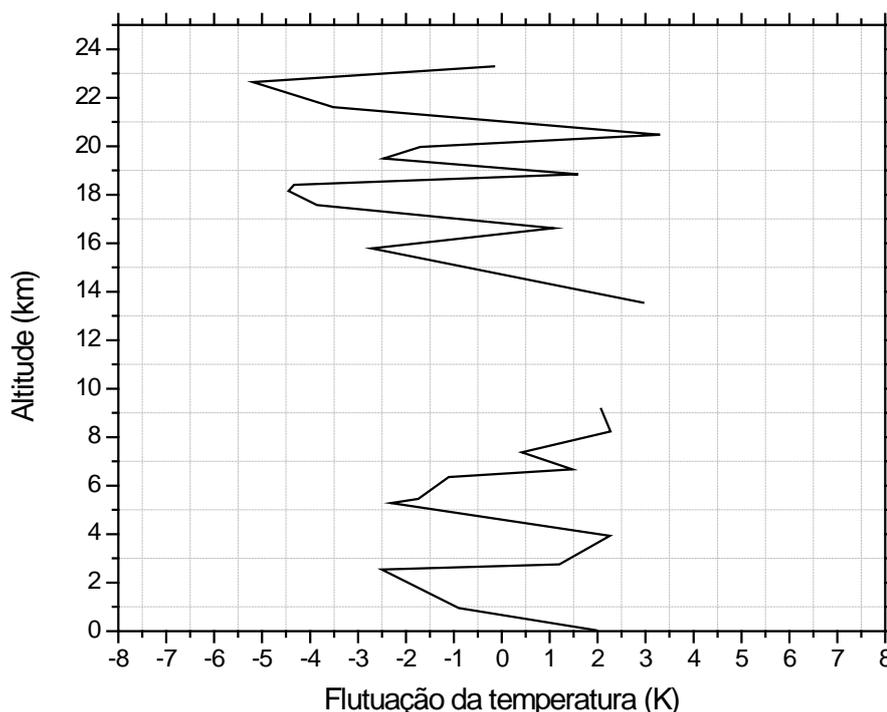


Figura 4: Flutuação da temperatura medida pelo balão em relação aos dados do MSIS-90 referentes ao dia 23/05/2000 às 12:15 (UT) sobre a região de Natal (5,8°S; 35,5°O).

Além dos parâmetros acima citados, o perfil da temperatura perturbada permite, ainda, o cálculo da densidade de energia potencial, associada à onda de gravidade. Para tanto, se faz necessário determinar a variância da temperatura, utilizando a Equação (4), e o perfil da frequência de Brunt-Väisälä, utilizando a Equação (1). Procedimento semelhante foi utilizado por Tsuda *et al.* (2000) e Wrasse *et al.* (2007) para o mesmo fim.

As ondas de gravidade representam o ramo inferior quando comparadas com as frequências de Brunt-Väisälä, N , que é a frequência fundamental de oscilação da atmosfera. Além disso, a densidade de energia potencial, E_p , depende da variância da temperatura, $\overline{T'^2}$, e possui relação inversa com N^2 , como mostra a Equação (2). Portanto, a determinação do perfil vertical de distribuição das frequências de Brunt-Väisälä é importante no estudo da dissipação de energia das ondas de gravidade na estratosfera. Nos casos aqui estudados a taxa de dissipação de energia, por unidade de massa, variou de 0,5 J/kg até 15 J/kg. Valores estes que estão em acordo com resultados similares obtidos por técnicas de rádio ocultação discutidos em Wrasse *et al.* (2007).

Como seria de se esperar, a relação inversa entre a densidade de energia e o quadrado da frequência Brunt-Väisälä torna-se evidente nos máximos de E_p , correspondentes aos mínimos de N^2 , como pode ser observado nas Figuras 5(A) e 5(B).

Ainda na Figura 5(B) é possível observar que a densidade da energia potencial apresenta valores compreendidos entre 0,5 – 4 J/kg, aproximadamente, condizentes com a literatura como mostrado em Tsuda *et al.* (2000) e Wrasse *et al.* (2007) e que foram importantes para confirmar o fato das ondas de gravidade se apresentarem como um mecanismo de transporte de energia

entre as camadas da atmosfera, mostrando como se dá o acoplamento entre as regiões da atmosfera como previsto no trabalho pioneiro de Hines (1960).

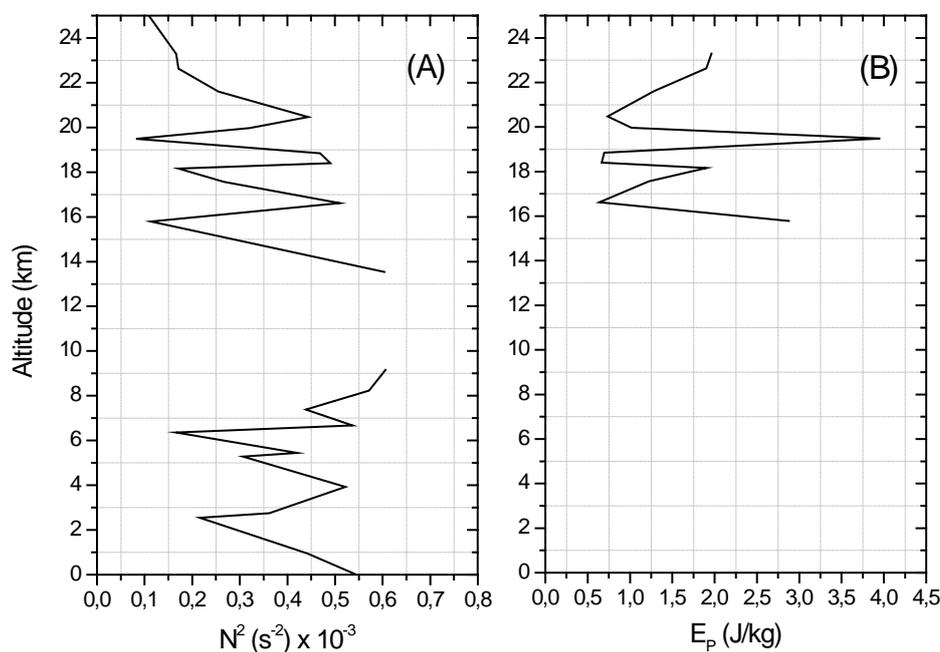


Figura 5: (A) Perfil da frequência de Brunt-Väisälä ao quadrado; (B) Perfil da densidade de energia potencial. Referentes ao dia 23/05/2000 às 12:15 (UT) sobre Natal (5,8°S; 35,5°O).

Portanto, tendo em vista a dependência entre a flutuação da temperatura e a frequência de Brunt-Väisälä, é possível estimar não só a taxa de ocorrência das ondas de gravidade mas também a região da estratosfera onde, com maior frequência, elas sofrem seu processo de dissipação.

4 CONCLUSÕES

O estudo da flutuação da temperatura no sistema troposfera-estratosfera, utilizando os dados coletados pelos balões meteorológicos lançados pelo CLBI e sua comparação com os dados do modelo MSIS-90, torna possível a determinação de parâmetros associados às perturbações atmosféricas típicas das ondas de gravidade. Parâmetros tais como frequência (ω), período (τ) e comprimento de onda vertical (λ_z) foram determinados em 29 casos nos quais observam-se perturbações características de ondas de gravidade, durante o ano de 2000. Esses casos fazem parte de um total de 185 sondagens diurnas, cujos lançamentos foram realizados por volta das 12 horas (UT).

Nos casos aqui apresentados os períodos das ondas de gravidade apresentam valores aproximados da ordem de 6 – 28 min compatíveis, mais uma vez, com os resultados clássicos de Hines (1960) que mostrou que as ondas de gravidade possuem períodos mínimos da ordem de 5 min podendo chegar a horas.

Para esses eventos foi rodado o modelo MSIS-90 para a região da cidade de Natal/RN e verificou-se que ele reproduz, com boa aproximação, o perfil troposférico e estratosférico, em condições não perturbadas. Contudo, em relação à temperatura e à altitude da tropopausa, se observou, em média, diferenças aproximadas da ordem de 5 K e 2 km, respectivamente.

Além disso, a partir do cálculo da variância da temperatura foi possível determinar a densidade de energia potencial associada às ondas de gravidade na estratosfera. Em particular, para o caso do dia 23/05/2000, verificou-se que a quantidade de energia, por unidade de massa, foi da ordem de 0,5 – 4 J/kg.

Verificou-se, que, utilizando técnicas simples, como sondagens com balões meteorológicos, é possível obter resultados consistentes, como os existentes na literatura, em relação à propagação de ondas de gravidade na estratosfera, bem como estimar, não somente, seus parâmetros físicos mas a taxa de energia, por unidade de massa, associada a esse tipo de perturbação.

Contudo, questões como a climatologia das ondas de gravidade estratosféricas, para a região aqui estudada, ainda está em aberto, bom como as influências do clima troposférico e do clima espacial sobre a morfologia dessas perturbações estão sendo temas de estudos e encontram-se aguardando novos resultados.

5 REFERÊNCIAS

1. Allen, S. J.; Vincent, R. A. (1995). Gravity wave activity in the lower atmosphere: Seasonal and latitudinal variations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 100, n. D1.
2. Bishop, R. L.; Aponte, N.; Earle, G. D.; Sulzer, M.; Larsen, M. F.; Peng, G. S. (2006). Arecibo observations of ionospheric perturbations associated with the passage of Tropical Storm Odette. *Journal of Geophysical*, v. 111.
3. Cazuza, E. P. (2014). *Estudos de distúrbios ionosféricos propagantes de larga escala (LSTID's) na região equatorial durante grandes tempestades magnéticas: estudo de casos* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.
4. Forbes, J. M.; Hagan, M. E.; Zhang, X.; Hamilton, K. (1997). Upper atmosphere tidal oscillations due to latent heat release in the tropical troposphere. *Annales Geophysicae - Atmospheres Hydrospheres and Space Sciences*, v.15, n.9.
5. Forbes, J. M. (2000). Wave coupling between the lower and upper atmosphere: case study of an ultra-fast Kelvin Wave. *Journal of Atmospheric and SolarTerrestrial Physics*. v.62, 17-18.
6. Fritts, D. C.; Alexander, M. J. (2003). Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Reviews of Geophysics*, v. 41, n. 1.

7. Gardner, C. S. (1995). Introduction to Aloha/Anlc-93 - the 1993 Airborne Lidar and Observations of the Hawaiian Airglow Airborne Noctilucent Cloud Campaigns. *Geophysical Research Letters*, v.22, n.20.
8. Hedin, A. E. (1991). Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* (1978–2012) 96.
9. Hickey, M. P. (2011). Atmospheric Gravity Waves and Effects in the Upper Atmosphere Associated with Tsunamis. Embry-Riddle Aeronautical University USA.
10. Hines, C. O. (1960). Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Canadian Journal of Physics*, v.38, n.11.
11. Kelley, M. C. (2009). *The earth's ionosphere*. Elsevier Science (USA).
12. Lastovicka, J. (1997). Observations of tides and planetary waves in the atmosphere-ionosphere system. *Adv. Space Rec.*, 20(6).
13. Macdougall, J. W.; Abdu, M. A.; Batista, I.; Burity, R.; Medeiros, A. F.; Jayachandran, P. T.; Borba, G. L. (2011). Spaced transmitter measurements of medium scale traveling ionospheric disturbances near the equator. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38.
14. Medeiros, A. F.; Takahashi, H.; Batista, P. P.; Gobbi, D.; Taylor, M. J. (2004). Observations of atmospheric gravity waves using airglow all-sky CCD imager at Cachoeira Paulista, Brazil (23° S, 45° W). *Geofísica Internacional*, 43(1): 29-39.
15. Nappo, C. J (2002). *An introduction to atmospheric gravity waves*. Elsevier Science (USA).
16. Sobral, J. H. A.; Abdu, M. A.; Takahashi, H.; Taylor, M. J.; De Paula, E. R.; Zamlutti, C. J.; De Aquino, M. G.; Borba, G. L (2002). Ionospheric plasma bubble climatology over Brazil based on 22 years (1977-1998) of 630 nm airglow observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 64.
17. Takahashi, H.; Batista, P. P.; Burity, R. A.; Gobbi, D.; Nakamura, T.; Tsuda, T.; Fukao, S. (1999). Response of the airglow OH emission, temperature and mesopause wind to the atmospheric wave propagation over Shigaraki, Japan. *Earth Planets and Space*, v.51, n.7-8.
18. Taylor, M. J.; Hapgood, M. A. (1988). Identification of a thunderstorm as a source of shortperiod gravity-waves in the upper-atmospheric nightglow emissions. *Planetary and Space Science*, v.36, n.10.

19. Tsuda, T.; Nishida, M.; Rocken, C.; Ware, R. H. (2000). A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 105(D6).
20. Vargas, F. A. (2007). *Investigação do fluxo de momento das ondas de gravidade na alta atmosfera através da aeroluminescência* (Tese de Doutorado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil.
21. Wrasse, C. M. (2004). *Estudo de geração e propagação de ondas de gravidade atmosféricas* (Tese de Doutorado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil.
22. Wrasse, C. M.; Takahashi, H.; Fachine, J.; Denardin, C. M.; Wickert, J. (2007). Ondas de gravidade na estratosfera terrestre inferida através da técnica de rádio ocultação de GPS. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25.