

Jair Stefanini Pereira de Ataíde,^{1, *} Amauri Fragoso de Medeiros,² Ricardo Arlen Buriti da Costa,² e Lourivaldo Mota Lima³

¹Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Educação e Saúde, Departamento de Física,

Sítio Olho d'água da bica s/n Zona Rural 58175-000 - Cuité, PB - Brasil

²Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Física,

Rua Aprígio Veloso 882 Bodocongó 58109-970 - Campina Grande, PB â Brasil

³Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia,

Rua Juvêncio Arruda, s/n Bodocong
ó $58109\mathchar`290$ - Campina Grande, PB - Brasil

Este trabalho foi desenvolvido visando caracterizar a propagação vertical das ondas de gravidade entre 80 km e 100 km de altitude. Para este fim, utilizaram-se dados de imagens de aeroluminescência por meio de um imageador CCD all-sky e dados de ventos através de um radar meteórico, ambos encontram-se instalados sobre São João do Cariri - PB (7,4° S, 36,5° O), Brasil. Os dados utilizados foram obtidos simultaneamente durante os meses de agosto de 2004 a julho de 2006. Durante este tempo foram obtidas 214 noites de observações, em que foram detectados 1036 eventos de ondas de gravidade. Os dados foram trabalhados em três etapas distintas partindo de uma metodologia utilizada por Isler et al.[1] no qual todos os resultados apresentaram os três tipos de condições de propagação (vertical, evanescente e canalizada) estão de acordo com estudos já realizados.

In this work the characteristics of the gravity waves vertical propagation in the altitude interval between 80 and 100 km has been investigated. For this purpose, we have used the nightglow imager recorded by an all-sky CCD camera and meteor wind measurements obtained over São João do Cariri (7.4° S, 36.5° W), Brazil. The data were simultaneously obtained during the time interval from 2004/August to 2006/July. During this time were obtained 214 nights of observations, in which were detected 1036 gravity waves events. In order to investigate the gravity wave vertical propagation conditions, the method proposed by Isler et al.[1] was used and the results showed that all three types of propagation conditions (vertical, evanescent and duct) are in accordance with studies already reported.

1. INTRODUÇÃO

A existência de vida em nosso planeta é proporcionada devido à ação da gravidade que mantém a atmosfera em torno da Terra desempenhando uma função protetora. Contudo, o desenvolvimento da humanidade principalmente após a revolução industrial é responsável pelas alterações no equilíbrio natural no qual os fenômenos atmosféricos importantes para a qualidade de vida do planeta, tais como: o efeito estufa e a destruição da camada de ozônio, têm despertado grande interesse da comunidade científica e da sociedade em geral. Na atmosfera terrestre ocorrem fenômenos oscilatórios governados por forças de compressibilidade do ar (ondas acústicas), pela força de gravidade (ondas de gravidade), e por forças rotacionais de escala planetária (ondas de Rossby). Esses fenômenos são causados por perturbações que desequilibram o ar e pelas forças restauradoras que agem em oposição à perturbação. Apesar dos esforços empreendidos pela comunidade científica, a dinâmica da região da alta mesosfera e baixa termosfera do hemisfério sul é pouco conhecida em relação à do hemisfério norte devido aos poucos locais de observação. Apesar de vários fenômenos se manifestarem em ambos os hemisférios, alguns se mostram mais relevantes em apenas um deles, enquanto outros ocorrem exclusivamente em um dos hemisférios numa determinada estação do ano. Por outro lado, a dinâmica da média atmosfera, que compreende a estratosfera e mesosfera, tropical possui características que a distinguem das outras regiões, e por isso tem sido tratada separadamente. A caracterização das variações dos parâmetros da média atmosfera tem como objetivo aperfeiçoar as previsões dos fenômenos e seus efeitos globais. A capacidade de se prever a climatologia global passa necessariamente pela compreensão de como acontece o acoplamento entre as camadas atmosféricas, e a distribuição longitudinal e latitudinal das variações. Neste sentido, tem sido observado que as perturbações de escala planetária desempenham um papel importante na dinâmica da média atmosfera, cujos efeitos contribuem significativamente para a climatologia do planeta [2]. Com o aperfeiçoamento dos equipamentos nas últimas décadas, as observações da aeroluminescência têm aumentado bastante. Em particular, o desenvolvimento de sistemas de imageamento tem sido de importância fundamental para o estudo da ocorrência, propagação e dissipação de ondas de gravidade na região da mesosfera e

Physicæ

^{*}jairstefanini@yahoo.com.br

baixa termosfera $(MLT)^1$. Esses estudos sugerem que as ondas de gravidade atuam como importante fonte de perturbação de mesoescala na atmosfera. Diante do exposto, salientamos que este trabalho é pioneiro e possui como objetivo principal estudar as características verticais das ondas de gravidade através da análise dos dados do imageador e do radar meteórico na região equatorial sobre São João do Cariri - PB (7,38° S, 36,54° O). Para alcançarmos esse objetivo, analisamos as ondas de gravidade e os dados de vento no período de agosto de 2004 a julho de 2006 e, em seguida, a caracterizamos como propagantes, evanescentes e canalizadas.

2. A AEROLUMINESCÊNCIA

Os estudos sobre a aeroluminescência tiveram início no começo do século XX, a partir do reconhecimento por vários astrônomos como sendo uma componente da luz do céu noturno ou espalhada pela atmosfera. Lord Rayleigh durante a década de 30 realizou uma série de medidas em uma restrita faixa espectral, dando início à pesquisa em aeroluminescência. Além disso, o trabalho de Chapman (1931), na tentativa de explicar a emissão da linha verde do oxigênio atômico em 557,7 nm, é um fundamento básico até os dias de hoje [3]. Na atmosfera terrestre, átomos e moléculas que estão acima dos seus níveis normais de energia, liberam esse excesso emitindo radiação (luz) numa ampla faixa espectral e em qualquer latitude. Essa emissão é devida a vários processos de natureza físico-química que, em última análise, são desencadeados pela radiação solar que é armazenada durante o dia e reemitida durante a noite (quimioluminescência), contribuindo significativamente para o brilho do céu, especificamente no infravermelho próximo. Os estudos da luminescência atmosférica têm contribuído bastante para a pesquisa sobre a dinâmica da MLT [4]. As principais partículas responsáveis pelas emissões da luminescência noturna são o oxigênio atômico e molecular, a molécula do OH (radical hidroxila) e do átomo de sódio. A luz natural que a atmosfera terrestre emite continuadamente denomina-se luminescência atmosférica ou airglow. A luminescência diurna é denominada "dayglow", a noturna é denominada "nightglow" (ocorre em regiões da atmosfera entre aproximadamente 80 e 220 km) e quando ela ocorre ao crepúsculo é denominada de "twilighglow". Para o estudo das ondas de gravidade parte-se do princípio que a passagem dessas ondas pela região emissora pode elevar ou baixar a altura dessas camadas adiabaticamente. Assim, é possível relacionar a perturbação na altura da camada também com mudanças de temperaturas através de taxa de queda adiabática. Enquanto a mudança na densidade é responsável pela mudança na intensidade, as mudanças de temperatura irão afetar os coeficientes de taxa de reação nos processos que produzem as camadas e, então, a intensidade de luz radiada irá mudar. Essa mudança é utilizada para captar as imagens [3]. Os principais instrumentos utilizados atualmente no estudo da luminescência atmosférica são o fotômetro, o espectrômetro de rede de difração, interferômetro de Fabry-Perot, o interferômetro de Michelson, o radar de laser, o radar MF e o imageador. Esses equipamentos podem ser utilizados de diversas formas de acordo com a finalidade do estudo.

3. ONDAS NA ATMOSFERA

As ondas atmosféricas são causadas por perturbações que provocam o desequilíbrio do meio a partir de um estado básico, tendo sua existência possibilitada devido à atuação de forças restauradoras em sentido contrário a perturbação. Na atmosfera terrestre, as ondas governadas pela força da gravidade e o gradiente de pressão são denominadas ondas de gravidade; ondas originárias devido às forças de compressibilidade do ar são as ondas acústicas; e aquelas devido às forças rotacionais são as ondas de escala planetária. O período de uma onda atmosférica ajuda a caracterizá-la e, de acordo com o interesse geofísico, as principais são as ondas planetárias, as marés atmosféricas e as ondas de gravidade (as que são de interesse deste estudo são as ondas de gravidade de curto período, entre 5 e 100 minutos).

3.1. Ondas de Gravidade

As ondas de gravidade se originam principalmente na baixa atmosfera a partir da restauração do desequilíbrio entre a força de gravidade e o gradiente de pressão e se propagam até a alta atmosfera. Sua escala espacial varia de alguns quilômetros até milhares de quilômetros e sua velocidade de propagação é normalmente menor do que a velocidade das ondas sonoras. Devido à conservação da energia, essas ondas propagam-se ascendentemente na atmosfera e crescem exponencialmente em amplitude, devido ao decréscimo exponencial da densidade com a altura, caso não haja dissipação da onda. Quando a amplitude se torna muito grande, ou seja, a onda de gravidade alcança um nível crítico, ocorre quebra da onda e sua energia é transferida para a atmosfera, interferindo no campo de vento, causando-lhes aceleração e turbulência, e provocando mudanças também nos campos de pressão e temperatura. Isso ocorre na alta mesosfera e baixa termosfera, entre 80 e 110 km de altura no qual, os processos físico-químicos são particularmente interessantes, pois ocorrem extremos de temperatura e pressão, absorção da radiação solar e ocorre à transição entre uma atmosfera praticamente uniforme em termos de composição química (Homosfera) e uma atmosfera estratificada conforme o peso molecular de seus constituintes (Heterosfera). Nesse contexto, as ondas de gravidade também são responsáveis pelo acoplamento

^[1] Acrônimo de Mesosphere LowerThermosphere

dinâmico entre as camadas da atmosfera e por diversos fenômenos como: turbulência, mistura de constituintes, interações com marés e ondas planetárias, redução da amplitude da maré diurna, geração do fluxo meridional, a anomalia de temperatura na mesopausa e pela interação e modificação do fluxo médio da atmosfera [3]. As fontes de geração para essas oscilações na atmosfera são fenômenos geralmente relacionados com ventos e instabilidades atmosféricas tais como: as frentes frias, os sistemas convectivos, ventos soprando sobre montanhas, explosões vulcânicas, entre outros.

3.2. Observações de ondas de gravidade

As observações de ondas de gravidade têm sido reconhecidas como um elemento essencial na compreensão da dinâmica e estrutura da média atmosfera. Estudos da alta mesosfera e baixa termosfera são restringidos pela dificuldade de acesso para medidas "in situ", sendo importante o uso de técnicas que permitam o monitoramento remoto. Durante as últimas décadas, radares operando em Very High Frequency (VHF), radar de Laser, instrumentos óticos como os fotômetros, interferômetros e imageadores com CCD, têm sido utilizados para caracterizar as ondas de gravidade [5]. Apesar desses instrumentos apresentarem boa resolução temporal e espacial, a rede desses equipamentos de solo encontra-se muito dispersa para se ter uma cobertura global. As observações realizadas por satélites são capazes de produzir uma grande cobertura global, porém não apresentam uma boa resolução espacial [6]. Contudo, essas medidas podem fornecer quantas ondas de gravidade ocorrem em um determinado espaço de tempo em uma dada região. Recentemente, o Global Position System (GPS) começou a ser explorado através da técnica de rádio ocultação de sinal de GPS, a fim de se obter perfis de temperatura, índice de refração, pressão e vapor d'água na atmosfera neutra [7]. Desde então, a técnica de rádio ocultação vem sendo empregada, entre outros estudos, no monitoramento climático [8]; previsão numérica do tempo [9]; no estudo de ondas de gravidade [10] e ondas planetárias [11]. Contudo, a utilização de GPS não permite estudar a propagação vertical das ondas de gravidade por limitar-se a uma região muito restrita, abaixo de 35 km de altura.

3.3. Solução Matemática das Ondas de Gravidade

O estudo dos movimentos atmosféricos é realizado a partir das equações hidrodinâmicas e da termodinâmica. A mistura de gases na baixa e média atmosfera pode ser tratada como um gás ideal único de peso molecular constante. Assim, as leis básicas da hidrodinâmica e da termodinâmica deste gás atmosférico podem ser representadas: 1. Equação do movimento - é uma expressão da segunda lei de Newton e leva em conta o gradiente de pressão e a força gravitacional:

$$\frac{d\nu}{dt} = -2\overrightarrow{\Omega} \times \overrightarrow{\nu} - \frac{1}{\rho}\nabla p + \overrightarrow{g} + \overrightarrow{F} , \qquad (1)$$

em que, o vetor $\nu = (u, v, w)$ representa o campo de velocidade, p a pressão hidrostática e ρ a densidade de massa, Ω taxa de rotação angular da Terra, g aceleração da gravidade e F são forças não conservativas. A equação (1) estabelece o balanço entre forças de diferentes naturezas, agindo sobre uma parcela de fluido.

$$\frac{d\nu}{dt} \Rightarrow$$
 Força inercial

$$2\Omega \times \overrightarrow{\nu} \Rightarrow$$
 Força de Coriolis

 $-\frac{1}{\rho}\nabla p \Rightarrow$ Força devido ao gradiente de pressão

 $g \ \Rightarrow \ {\rm Força}$ devido à gravidade

2. A equação da continuidade - é uma expressão da conservação de massa:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla(\rho \vec{\nu}) = P - L , \qquad (2)$$

em que, $d\rho/dt$ é a variação local da densidade de uma parcela de fluido, $\nabla(\rho \vec{\nu})$ o divergente do fluxo de massa, P é a produção e L é a perda. Em situações que envolvem vários constituintes, a equação da continuidade deve ser escrita para cada constituinte separadamente.

 A equação adiabática - é uma expressão da conservação da energia:

$$\frac{dp}{dt} - C^2 \frac{d\rho}{dt} = (\kappa - 1)Q\rho , \qquad (3)$$

em que, C é a velocidade do som.

4. A equação dos gases perfeitos, aplicada para o ar seco:

$$p = \rho RT , \qquad (4)$$

em que, R é a constante universal dos gases. Um tratamento teórico adequado das ondas de gravidade atmosféricas foi estabelecido por [12]. Ele é baseado nas seguintes hipóteses:

Physicæ 8, 2009

- Despreza-se os efeitos não lineares e a esfericidade da Terra;
- A atmosfera é considerada isotérmica e sem viscosidade;
- A força de Coriolis pode ser desprezada, sem que erros significativos sejam introduzidos, quando a freqüência da onda for muito maior que a freqüência de rotação da Terra.

Sob essas condições, o conjunto de equações linearizadas pode ser usado. Entretanto, como é mais comum em aeronomia, expressa-se as equações linearizadas em termos de V (volume), p (pressão) e ρ (densidade) da forma que é feita por [12]. Como as únicas forças atuantes estão na vertical e as soluções procuradas são ondas planas, pode-se direcionar o eixo horizontal x na direção de propagação da onda, de modo que $\nu = (u, 0, w)$.

3.4. Ondas Propagantes

As ondas propagantes são caracterizadas por propagarem-se tanto na vertical quanto na horizontal. Ao se propagarem na vertical de modo ascendente, aumentam sua amplitude de oscilação à medida que a densidade diminui. Não havendo dissipação de energia, a amplitude da onda torna-se tão grande, devido à diminuição da densidade com a altura, que esta pode sofrer um processo de quebra e transferir momentum e energia para o meio, acelerando ou desacelerando o fluxo básico e provocando turbulência.

3.5. Ondas Evanescentes

As regiões de altas freqüências são dominadas por ondas acústicas enquanto as regiões de baixa freqüência são dominadas pelas ondas internas de gravidade. Dessa forma, o intervalo entre essas freqüências é ocupado pelas ondas evanescentes que se caracterizam por não se propagarem verticalmente, apenas horizontalmente.

3.6. Ondas Canalizadas

O imageamento da aeroluminescência produz somente informações sobre os parâmetros de onda horizontais. Por essa razão, quando as observações envolvem somente uma camada de emissão, as informações dos parâmetros verticais só podem ser inferidas utilizando os parâmetros horizontais juntamente com a relação de dispersão da onda [12]. No entanto sem o conhecimento do vento de fundo (que permite a determinação dos parâmetros intrínsecos), esse método gera muitas incertezas no comprimento de onda vertical inferido. Como conseqüência os trabalhos anteriores em sua maioria consideram que as ondas são propagantes [3]. Na atmosfera as variações na temperatura e os campos de ventos podem afetar a propagação das ondas de gravidade. Quando surgem gradientes nesses campos (temperatura e ventos) pode ocorrer à reflexão das ondas ou o aparecimento de canais de ondas (do tipo guias de onda). Esses canais são importantes na atmosfera, pois as ondas que se encontram nelas são capazes de percorrer grandes distâncias horizontais com pequena perda de energia. As ondas canalizadas são confinadas entre duas regiões de comportamento evanescente $(m^2 < 0)$ ou entre uma região evanescente e o solo, exibindo algum tipo de ressonância [13]. Ondas com comprimentos de onda vertical longos são fortes candidatas ao aprisionamento. Essas ondas podem ser canalizadas por gradientes da freqüência de Brunt-Väisälä (temperatura), por gradientes de ventos ou por ambos. Os canais que são gerados a partir do gradiente de temperatura são denominados de canais térmicos, enquanto os que têm origem através dos gradientes de ventos são chamados de canais Doppler. A equação diferencial que governa a propagação de ondas de gravidade na horizontal em uma atmosfera estratificada em densidade e pressão e com a presença de um vento de fundo, na forma de Boussinesq, e assumindo soluções periódicas no tempo e na direção horizontal (ondas planas monocromáticas) pode ser dado por [14]:

$$\frac{\partial^2 w'}{\partial z^2} + \left[\frac{N^2}{\left(\overline{u} - c\right)^2} - \frac{\partial^2 u_0 / \partial z^2}{\left(\overline{u} - c\right)} - k^2\right] w' = 0,$$
(5)

também conhecida como equação de Taylor-Goldstein, em que w' é a perturbação na velocidade vertical, N é a freqüência de Brunt-Väisälä, u é velocidade do vento de fundo (no nosso caso média noturna) ao longo da direção da onda, c é a velocidade de fase horizontal da onda e k é número de onda . Uma aproximação WKB [15], fornece a solução da equação (5) como função do número de onda vertical:

$$k_z^2 \approx \frac{N^2}{(\overline{u} - c)^2} - \frac{\partial^2 u_0 / \partial z^2}{(\overline{u} - c)} - k_x^2,$$
 (6)

na qual possibilita duas condições para análise dos gráficos (figura 1), que fornecerão (à esquerda) o perfil de k_z^2 para o evento e (à direita) o perfil do vento médio ao longo de direção de propagação da onda:

- $k_z^2 > 0$ a onda é livre e propagante e aparecem canais em um determinado intervalo de altura com contornos limites em $k_z^2 < 0$.
- $k_z^2 < 0$ a onda é evanescente.

A aproximação WKB só é válida se as propriedades do meio variam lentamente numa escala comparável com o comprimento de onda, limitando a propagação vertical das ondas de gravidade e restringem o transporte de energia e momentum delas para a área confinada pelo canal, podendo a onda deslocar-se por grandes distâncias horizontais. Segundo [16], os canais Doppler podem ocorrer sempre que o perfil de vento médio apresente um máximo (ou mínimo) e que seja ligeiramente menor (maior) do que a velocidade de fase da onda observada.

4. METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO

Os dados de imagens e de ventos analisados neste estudo foram coletados em São João do Cariri - PB (7,38° S, 36,54° O) no OLAP - Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba durante o período de agosto de 2004 a julho de 2006 perfazendo assim, um total de 24 meses. Estes dados foram usados para determinar os parâmetros das ondas de gravidade de curto período e o vento médio entre 80 e 100 km de altitude. Denomina-se vento médio a média da velocidade dos ventos noturnos na região atmosférica em estudo. O mesmo será utilizado para determinar os parâmetros intrínsecos das ondas e os perfis de altitude do número de onda vertical ao quadrado, com o objetivo de determinar a caracterização vertical de cada onda observada. O OLAP está instalado numa área pertencente ao Centro de Ciências Agrárias do campus II da Universidade Federal da Paraíba, conhecida como Estação Experimental localizada na cidade de São João do Cariri, Paraíba, e tem operado rotineiramente desde outubro de 1997. Um dos fatores que contribuíram para a escolha da cidade de São João do Cariri como a região para instalação desse observatório foi a cidade localizar-se numa das regiões mais secas do Brasil. Dessa forma, a pouca formação de nuvens e a conseqüente baixa ocorrência de chuvas favorece um maior número de aquisição de dados ao longo do ano. Outros fatos importantes que auxiliaram na escolha foram a sua localização geográfica (em torno de 7° Sul) que permite estudar a atmosfera na região equatorial, que desperta grande interesse científico por parte dos pesquisadores da área de Geofísica Espacial e o fato de ser uma cidade pequena (aproximadamente 4.715 habitantes - IBGE 2006) distante de grandes centros, não contribui com ruído de fundo, ou contaminação espectral, proveniente de luzes artificiais. Neste trabalho, procura-se determinar os parâmetros intrínsecos das ondas de gravidade pela combinação das medidas do comprimento de onda horizontal, visualizadas em imagens de diferentes emissões da aeroluminescência, feitas por imageador all-sky, e do campo de vento horizontal obtido pelo radar meteórico, ambos numa região entre 80 e 100 km de altitude. No imageador instalado no OLAP, os parâmetros intrínsecos das ondas de gravidade podem ser inferidos via análise harmônica, utilizando processamento digital das imagens, que agiliza o processo de análise. A utilização de filtros ópticos de interferência, acoplados mecanicamente ao sistema óptico do imageador, torna possível a detecção de ondas em diferentes camadas de emissão, que estão situadas em diferentes alturas da região MLT.

4.1. O Imageador

O imageador é composto basicamente de um sistema ótico e uma câmara CCD (Charge Coupled Device), que é capaz de detectar variações da aeroluminescência noturna e registrá-las através de imagens como arquivos digitais. Especificamente o imageador pode: i) registrar imagens completas do céu nas emissões da aeroluminescência 557,7 nm, 630,0 nm, do O2 (0,1), do OH e do fundo luminoso do céu noturno; ii) monitorar as variações da aeroluminescência em tempo real.

4.2. Radar SKiYMET

O radar científico SKiYMET (VHF All-Sky Interferometric Meteor Radar) está localizado no OLAP em São João do Cariri, operando em 35,24 MHz. Esse sistema é capaz de detectar até 6000 meteoros por dia e possibilita a determinação de ventos da média atmosfera, de temperaturas e da velocidade de entrada dos meteoros, além do mapeamento dos radiantes dos meteoros em condições de chuvas. Esse instrumento utiliza cinco antenas yagis receptoras de dois elementos, formando uma base interferométrica com o intuito de minimizar a ambigüidade na direção dos meteoros. A transmissão de pulsos eletromagnéticos é feita por uma única antena yagi de três elementos (cada dipolo possui aproximadamente meio comprimento de onda ($\sim 4,25m$), para a transmissão de pulsos de alta freqüência - VHF) situada próxima a este arranjo, caracterizando o SKiYMET como um radar de retro-espalhamento. Estes pulsos são emitidos a uma potência de 12 kW com $13,5 \times 10^{-6}s$ de duração em intervalos de $4,7 \times 10^{-4}s$ cobrindo o céu e cinco antenas receptoras funcionando como interferômetro. O ângulo de chegada é determinado pelas diferencas de fases entre as cinco antenas. O comprimento da onda eletromagnética (OEM) emitida é de 8,5m. A Freqüência de Repetição de Pulsos (FRP) é superior a 2000 Hz. Essa taxa mais alta de pulsação é útil, pois permite a determinação de parâmetros não acessíveis aos sistemas mais antigos, como por exemplo, a velocidade de entrada do meteoro [17]. As principais medidas fornecidas pelo programa incorporado ao sistema do SKiYMET são: data e hora; o alcance do eco; a altura do meteoro; a distância zenital e o ângulo azimutal do meteoro; o nível de ambigüidade; o erro de fase entre os pares de antenas; o tempo de duração da trilha meteórica; e a velocidade de entrada do meteoróide na atmosfera. Ademais, a trilha do meteoro é carregada pelo vento, e assim, observando o deslocamento desta trilha através do deslocamento Doppler do sinal recebido, pode-se calcular a velocidade e a direção do vento atmosférico na altitude de observação. O instrumento detecta os ecos durante todo o dia independente das condições climáticas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados referentes a este trabalho foram obtidos através de observações da aeroluminescência e do vento atmosférico entre 80 e 100 km de altitude. As observações foram realizadas em São João do Cariri - PB (7.38° S, 36.54° O) usando um imageador de varredura completa do céu e o um radar meteórico. Esses instrumentos estão em funcionamento no OLAP e fazem parte de um programa de colaboração entre o INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e o AEROLUME - Grupo de Estudos da Luminescência Espacial da Unidade Acadêmica de Física da UFCG - Universidade Federal de Campina Grande. As medidas de aeroluminescência foram realizadas entre agosto de 2004 e julho de 2006, sempre em períodos de lua nova devido a luminosidade do céu ser menor. Assim, observou-se um total de 214 noites (53 em 2004, 101 em 2005 e 60 em 2006) correspondentes a 1036 eventos de ondas detectados. Os dados de vento são obtidos 24 horas por dia. A partir das medidas do vento entre 80 e 100 km, seguindo uma sugestão de [3], obteve-se perfis de vento para cada dia em que detectouse ondas de gravidade (isso permite a determinação dos parâmetros intrínsecos das ondas de gravidade). Essa metodologia foi usada por [1] com o objetivo de investigar as características de propagação vertical de ondas de gravidade. A partir da equação (6) de Taylor-Goldstein calculou-se o perfil do número de onda vertical, utilizouse os dados em três etapas, que serão descritas a seguir:

- **1ª etapa** os dados de imagens foram calculados desprezando o segundo termo da equação 6 pois $k_z^2 >> (\overline{u} c)^{-1} \partial^2 u_0 / \partial z^2;$
- **2^a** etapa os dados de imagens foram calculados substituindo o segundo termo da equação por $1/4H^2$, em que H é a altura de escala a qual considerou-se constante e igual a 6 km (devido a falta de dados de temperatura);
- 3ª etapa os dados de imagens foram calculados utilizando a equação 6 integralmente.

Com esses critérios, obteve-se o mesmo resultado entre as duas primeiras etapas, o que indica que a aproximação $k_z^2 >> 1/4H^2$ é correta. Dessa forma, os resultados mostrados serão iguais quando se refere a primeira e segunda etapas.

5.1. Análises da Primeira e Segunda Etapa

Como já mencionado, na atmosfera as variações importantes que podem afetar a propagação de ondas de gravidade são gradientes de temperatura e os campos de vento. Na medida que esses gradientes aparecem, é provável a ocorrência de reflexões ou canais de ondas. As ondas que possuem grandes comprimentos de onda são as mais prováveis de serem aprisionadas [3]. Devido à ausência de perfis de temperatura (não possuímos radiossonda), utilizou-se um valor constante para a freqüência de Brunt-Väisälä, isto é, $N^2 = 0,0002s^{-2}$, que é um valor razoável para mesosfera na latitude do estudo. Também focalizou-se a presente discussão apenas nos canais Doppler. Para isto são avaliados os números de onda vertical na equação 6 usando os parâmetros das ondas determinados através de imagens e o vento médio na direção da onda. Para cada evento de onda detectado calculou-se o perfil do número de onda vertical (entre 80 e 100 km), para isto inseriu-se os valores de \overline{u} juntamente com as medidas do comprimento de onda horizontal e da velocidade de fase horizontal na equação 6 para determinação dos perfis (em relação à altura entre 80 km e 100 km) para o número de onda vertical. Para cada noite utilizou-se medidas de vento entre 18:00 h e 06:00 h. Os gráficos produzidos pelas análises são mostrados na figura 1. Os dados dividem-se em duas partes: em que o lado esquerdo exibe o perfil de k_z^2 e o lado direito mostra o perfil de \overline{u} . A linha vertical do lado direito indica o valor da velocidade de fase horizontal da onda em questão. Esse tipo de gráfico foi calculado para cada uma das ondas de gravidade observadas. Encontrou-se as seguintes características: a) perfis onde k_z^2 é positivo em uma determinada região limitada por 2 regiões onde k_z^2 era negativo - abaixo e acima da região positiva, indicando a existência de um canal Doppler.; b)outros casos exibiram perfis com k_z^2 positivo em todo o perfil, o que indica que estas ondas eram verticalmente propagantes; c) em outros casos apresentaram k_z^2 negativos em todo o perfil, indicando que as ondas eram evanescentes. A figura 1 apresenta um caso de onda canalizada verticalmente (canal Doppler) ilustrando como o vento pode provocar o deslocamento Doppler $|c - \overline{u}|$ e pode dar origem a regiões com $k_z^2 > 0$ entre duas regiões com $k_z^2 < 0.\,$ Nota-se claramente que quando $|c-\overline{u}|$ for mínimo k_z^2 será máximo. O evento da figura 1 foi detectado apenas na camada do OH. Isso sugere que a onda não foi detectada nas outras camadas superiores devido ao aprisionamento, ou seja, se a onda se propagava de baixo para cima ao encontrar o canal ficou canalizada e não conseguiu atingir as camadas do O2 e 5577.

Na figura 2 há um exemplo de onda caracterizada como verticalmente propagante, nesse caso, $k_z^2 > 0$ em todo intervalo de altura do perfil de vento. A figura 3 mostra um exemplo de uma onda evanescente. Verifica-se que $k_z^2 < 0$ em todo intervalo de altura do perfil de vento.

Dessa forma, as ondas foram caracterizadas como propagantes nos casos em que $k_z^2 > 0$ em todas as regiões do perfil vertical, como canalizada (canal Doppler) nos casos em que apareceram uma região onde $k_z^2 > 0$ entre duas regiões onde k_z^2 é negativo e como evanescente ou canalizada (canal abaixo ou acima) nos casos em que exibiram variação de sinal dentro de um determinado intervalo de altura que, devido ser pequeno, nem sempre foi possível determinar a extensão vertical de alguns canais. A figura 4 mostra caracterização do movimento vertical dos eventos de ondas observados para cada mês em ter-

Caracterização do movimento vertical de ondas de gravidade através de dados de radar meteórico e imageador de aeroluminescência



Figura 1: Perfil de k_z^2 para o evento de onda canalizada (esquerda) e perfil do vento médio ao longo da direção da propagação da onda (direita) no dia 31/08/2005.



Figura 2: Perfil de k_z^2 para o evento de onda propagante (esquerda) e perfil do vento médio ao longo da direção da propagação da onda (direita) no dia 04/07/2005.

mos absolutos. Nota-se claramente uma predominância na atividade de ondas canalizadas durante o período estudado, com exceção dos meses de fevereiro, setembro e outubro quando a maior ocorrência se deu por parte das ondas evanescentes. De um total de 1036 eventos de ondas, obtiveram-se 479 ondas canalizadas, 330 ondas evanescentes e 227 ondas propagantes. Em todos os casos que encontraram-se ondas propagantes, evanescentes e canalizadas, a maior incidência ocorreu nos meses de maio, junho e julho.

A freqüência na ocorrência de ondas é fortemente ligada à época do ano (sazonalidade), haja vista que a freqüência na ocorrência de eventos de ondas depende da altura em que se encontra a mesopausa com relação às camadas do airglow. Assim pode-se observar que ocorrem atividades de ondas com maior predominância no



Figura 3: Perfil de k_z^2 para o evento de onda evanescente (esquerda) e perfil do vento médio ao longo da direção da propagação da onda (direita) no dia 30/09/2005.

outono seguido do inverno e da primavera. Essa variação sazonal pode estar relacionada com a variação dos ventos na média atmosfera podendo refletir a filtragem de ondas de gravidade nesta região ou diferentes fontes de geração das ondas [3, 18–20].

5.2. Análises da Terceira Etapa

Ao analisarem-se os dados considerando todos os termos da equação 6 verifica-se uma pequena diferença nos resultados encontrados com relação às duas primeiras etapas. Comparando os dados obtidos entre as duas primeiras etapas e a terceira verifica-se uma diminuição de 5,1% na presença das ondas canalizadas, um aumento de 6% de ondas propagantes e praticamente uma uniformidade com relação às ondas evanescentes em que a variação foi de apenas 0.9% a menos. Esses resultados, por se tratarem de variações pequenas, mostram que ao negligenciarem-se os termos da equação 6 está se usando uma metodologia correta, pois não afeta os resultados para este tipo de estudo. E bom salientar que todos os trabalhos anteriores, como exemplo [1, 3, 19, 21, 22], desconsideram os dois últimos termos da relação de dispersão utilizando apenas argumentos teóricos (matemáticos). Observando a caracterização do movimento vertical dos eventos de ondas para cada mês, nota-se uma predominância na atividade de ondas canalizadas durante o período estudado, o que também ocorreu para as duas primeiras etapas. Com relação às ondas evanescentes que se apresentaram em maioria nos meses de fevereiro, setembro e outubro para as duas primeiras etapas, mantiveram-se em maioria durante a terceira etapa nos meses de fevereiro, outubro e junho única diferença. Levando em consideração os 1036 eventos de ondas, obtiveram-se, em termos absolutos, 426 ondas canalizadas, 321 ondas evanescentes e 289 ondas



Figura 4: Histogramas mostrando a distribuição do movimento vertical das ondas de gravidade para: (a) evanescentes, propagantes e canalizadas, (b) canalizadas, (c) evanescentes e (d) propagantes em função dos meses de ocorrência.

propagantes. As maiores incidências foram registradas nos meses de maio, junho e julho para as ondas evanes-

6. CONCLUSÕES

Este artigo foi desenvolvido visando caracterizar a propagação vertical das ondas de gravidade entre 80 km e 100 km de altitude. Para este fim, utilizaram-se dados de imagens de aeroluminescência por meio de um imageador CCD all-sky e dados de ventos através de um radar meteórico, ambos encontram-se instalados no OLAP - Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba - na cidade de São João do Cariri - PB (7,38° S, 36,54° O). Os dados utilizados foram obtidos simultaneamente durante os meses de agosto de 2004 a julho de 2006, num total de 214 noites. Nesse período, detectaram-se 1036 eventos de ondas com simultâneos dados de vento. Obtivemos uma igualdade dos resultados entre as duas primeiras etapas pois, $k_z^2 >> 1/4H^2$. As análises dos resultados revelaram que, para as duas primeiras etap

centes e propagantes (figura 5 b, c) e nos meses de abril, maio e julho para as ondas canalizadas (figura 5 d).

pas, houve uma maior quantidade de ondas canalizadas 46,2%, seguida de ondas evanescentes e propagantes com 31,9% e 21,9%, respectivamente. Ao analisar os dados para a terceira etapa, detectou-se que uma maior atividade de ondas também ocorre durante os meses de maio, junho e julho persistindo uma maior presença de ondas canalizadas com 41,1%, seguida pelas ondas evanescentes com 31% e por fim as ondas propagantes com 27.9%. Ao comparar os dados, verificou-se 5,1% a mais de ondas canalizadas nas duas primeiras etapas em relação à terceira. O mesmo ocorre com as ondas evanescentes que apresentaram 0,9% a mais nas primeiras etapas. Contudo, as ondas propagantes apresentaram 6% a menos nas duas primeiras etapas quando comparadas com a terceira. Dessa forma, concluímos que a utilização de qualquer etapa adotada torna o estudo satisfatório e concorda com estudos anteriores realizados por [1, 3, 21, 22].

 J. R. Isler, M. J. Taylor and D. C. Fritts, Journal of Geophysical **102**, n d22, 26301 (1997). [2] L. M. Lima, Observações de ondas planetárias na região

Caracterização do movimento vertical de ondas de gravidade através de dados de radar meteórico e imageador de aeroluminescência



Figura 5: Histogramas mostrando a distribuição do movimento vertical das ondas de gravidade para: (a) evanescentes, propagantes e canalizadas, (b) canalizadas, (c) evanescentes e (d) propagantes em função dos meses de ocorrência.

da Mesopausa equatorial e de baixas latitudes do Hemisfério sul. (INPE-12346-TDI/995). (Tese de Doutorado em Geofísica Espacial), São José dos Campos - SP, 2005.

- [3] A. F. Medeiros, M. J. Taylor, H. Takahashi, P. P. Batista,
 D. GOBBI, A& Space Res. 27, N. 10, 1749 (2001).
- [4] C. S. Gardner and M. J. Taylor, J. Geophys. Res., 103, n. 6, 6427 (1998).
- [5] C. M. Wrasse, Observação da temperatura rotacional da hidroxila através da aeroluminescência na região da mesosfera terrestre. (INPE-8003-TDI/751). (Tese de Doutorado em Ciência Espacial), São José dos Campos -SP, 2000.
- [6] D. L. Wu, E. F. Fishbein, W. G. Read and J. W. Waters, Journal of the Atmospheric Sciences 53, n. 5, 728 (1996).
- [7] G. A. Hajj, E. R. Kursinski, L. J. Romans, W. I. Bertiger, S. S. Leroy, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 64, n. 4, 451 (2002).
- [8] U. Foelsche, A. Gobiet, A. K. Steiner, G. Kirchengast, M. Borsche, T. Schmidt, J. Wickert, American Geophysical Union. Proceedings, A728 (2004).
- [9] S. B. Healy and J. N. Thepaut, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 132, 605 (2006).
- [10] M. V. Ratnam, G. Tetzlaff and C. Jacobi, Journal of the Atmospheric Sciences 61, n. 13, 1610 (2004).
- [11] W. J. Randel and F. WU, Journal of Geophysical Research 110, n. D9, 3102 (2005).
- [12] C. O. Hines, Can. J. Phys 38, 1441 (1960).
- [13] S. H. Francis, J. Atmos. Terr. Phys., **37**, 1011 (1974).

- [14] E. E. Gossard and W. H. Hooke, Waves in the Atmosphere, Nova Iorque: Elsevier (1975).
- [15] D. G. Andrews, J. R. Holton and C. B. Leovy, Middle Atmosphere Dynamics, Academic Press (1987).
- [16] A. F. Medeiros, Observações de Ondas de Gravidade Através do Imageamento da Aeroluminescência. (INPE-10478-TDI/932). (Tese de Doutorado em Ciência Espacial), São José dos Campos - SP, 2004.
- [17] M. A. Cervera, W. G. Elford e D.I. Steel, Radio Science, 32, 805 (1997).
- [18] E. A. Machado, Caracterização dos parâmetros de ondas de gravidade detectadas por imagem de aeroluminescência sobre São João do Cariri (7° S, 36°W). (Dissertação de Mestrado Meteorologia), Campina grande -PB, 2002.
- [19] R. L. Walterscheid, J. H. Hecht, R. A. Vicent, I. M. Reid, J. Woithe, Journal of Atmospheric and solar-terrestrial physics
- [20] T. Tsuda, Y. Murayama, T. Nakamura, R.A. Vincent, A.H. Manson, C.E. Meek and R.L. Wilson, J. Atmos. Terr. Phys., 56, 555 (1994).
- [21] G. R. Swenson and S. B. Mende, Geophys. Res. Lett. 21, 2239 (2000). 61, 461 (1999).
- [22] K. Shiokawa, M. K. Ejiri, Y. Otsuka, T. Ogawa, M. Kubota, K. Igarashi, A. Saito and T. Nakamura, Geophysical Research Letters 27, 4057 (2000).