

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA

**CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ONDAS DE  
GRAVIDADE DETECTADAS POR IMAGEM DE  
AEROLUMINESCÊNCIA SOBRE SÃO JOÃO DO CARIRI( 7° S, 36° W)**

ELIALDO ANDRIOLA MACHADO

Campina Grande - PB

Dezembro de 2002

ELIALDO ANDRIOLA MACHADO

**CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ONDAS DE  
GRAVIDADE DETECTADAS POR IMAGEM DE  
AEROLUMINESCÊNCIA SOBRE SÃO JOÃO DO CARIRI(7° S, 36°W)**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em  
Meteorologia da Universidade Federal da Paraíba,  
em cumprimento às exigências para obtenção do  
grau de mestre.

Área de Concentração : Meteorologia de Meso e Grande Escala.

Orientadores: Prof. Dr. Ricardo Arlen Buriti

Prof. Dr. Amauri Fragoso de Medeiros

Campina Grande – PB

Dezembro de 2002



## FICHA CATALOGRÁFICA


M149c Machado, Elialdo Andriola  
Caracterização dos parâmetros de onda de gravidade detectada por imagem de aeroluminescência sobre São João do Cariri (7°S, 36°W) / Elialdo Andriola Machado. Campina Grande : UFCG, 2002.  
96p. : il.  
Dissertação (Mestrado). UFCG/CCT/DCA  
Inclui bibliografia  
1. Aeroluminescência 2. Ondas de gravidade.  
I. Título  
CDU: 551.511.31

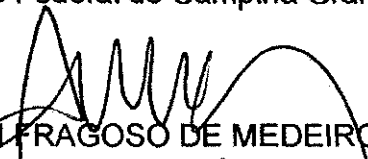
ELIALDO ANDRIOLA MACHADO


CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ONDAS DE GRAVIDADE  
DETECTADAS POR IMAGENS DE AEROLUMINESCÊNCIA SOBRE  
SÃO JOÃO DO CARIRI (7° S, 36° W).

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 20/12/02

BANCA EXAMINADORA

  
Dr. RICARDO ARLEN BURITI DA COSTA  
Departamento de Física  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Dr. AMAURI FRAGOSO DE MEDEIROS  
Departamento de Física  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA  
Departamento de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Dr. AÉRCIO FERREIRA DE LIMA  
Departamento de Física  
Universidade Federal de Campina Grande

## **DEDICATÓRIA**

**Com muito amor aos meus pais e aos meus irmãos, e de maneira bem especial a minha querida namorada Eva Nóbrega.**

**Dedico**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, meu criador, por ter segurado minhas mãos nos momentos mais difíceis.

Ao Curso de mestrado em meteorologia do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, pela estrutura oferecida.

Aos professores Ricardo Arlen Buriti e Amauri fragoso de Medeiros pelas orientações e ensinamentos e sobretudo pelo encorajamento às minhas atividades.

À Coordenação de Aperfeiçoamento do pessoal de Ensino Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo.

A Lígia, Fred, Abel, Moisés, Ribamar e Fábio pelos incentivos nos momentos de dúvidas.

Ao grupo de Pesquisa de Luminescência Atmosférica do Departamento de Física da UFPB – CG.

Aos professores do Departamento de Ciências Atmosféricas e a todos os funcionários (especialmente a Divanete), pela atenção e assistência. A todos os amigos que estiveram presentes, e até mesmo aos ausentes, mas que sempre me motivaram a conquistar os objetivos traçados.

## ABSTRACT

The goal of this work consist in determining physical parameters of short period gravity waves detected by an all-sky imager at S. J do Cariri, an equatorial site. The OH airglow data were collected from September 2000 to August 2001, except on March 2001 when the imager presented electronic problem. In order to obtain a picture about these waves detected at S. J do Cariri ( $7^{\circ}\text{S}$ ,  $36^{\circ}\text{W}$ ), a comparison between this site and Cachoeira Paulista, SP ( $23.5^{\circ}\text{S}$ ,  $45^{\circ}\text{W}$ ) (hereafter CP) was made. Physical parameters, such as: horizontal phase velocity and direction of propagation, observed period and horizontal wavelength, were determined through a sequence of imager. The waves detected at S. J do Cariri presented some differences in comparison with those ones detected at CP. The number of ripples detected at S. J do Cariri, e.g., was larger than that one observed at CP. On the other hand, the number of detected band at S. J do Cariri was smaller than that one observed at CP. At Cariri, on average, the direction of propagation presented a seasonal behavior and the phase velocity detected was bigger than at CP. The horizontal wavelength and observe period detected at S. J do Cariri ranged from 5 to 60 km and 5 to 60 minute, respectively.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho consiste em determinar parâmetros físicos de ondas de gravidade de curto período detectadas por um imageador de céu completo em S. J do Cariri na região equatorial. As observações da luminescência do OH foram coletadas de setembro de 2000 a agosto de 2001, exceto no mês de março quando o imageador apresentou problema eletrônico. Para se obter uma imagem por meio destas ondas detectadas em S.J do Cariri ( $7^{\circ}\text{S}$ ,  $36^{\circ}\text{W}$ ), uma comparação entre esta localidade e Cachoeira Paulista ( $23,5^{\circ}\text{S}$ ,  $45^{\circ}\text{W}$ ) foi realizada. Parâmetros físicos, tais como: velocidade horizontal de fase, direção de propagação, período observado e comprimento de onda horizontal foram determinados através de uma seqüência de imagens. As ondas detectadas em S.J do Cariri apresentaram algumas diferenças em comparação com as detectadas em CP. O número de “ripples” detectado em S.J do Cariri foi maior que aquele observado em CP. Por outro lado, o número de bandas detectado em S.J do Cariri foi menor que aquele observado em CP. Em S. J do Cariri, em média a direção de propagação apresentou uma variação sazonal e a velocidade de fase detectada foi maior que em CP. O comprimento de onda horizontal e o período detectado em S. J do Cariri apresentaram intervalos de 5 a 60 km e 5 a 60 minutos respectivamente.



## SUMÁRIO

Pág.

### RESUMO

### ABSTRACT

I.	<b>LISTA DE FIGURAS</b>	i
II.	<b>LISTA DE TABELAS</b>	v
III.	<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	vi
	<b>1 INTRODUÇÃO</b>	1
1.1	A atmosfera terrestre	2
1.2	Perfil térmico da atmosfera	2
1.3	Luminescência atmosférica	5
1.4	Instrumentação na luminescência atmosférica	8
1.5	Ondas de gravidade	9
1.6	Divisão do trabalho	11
	<b>2 ONDAS DE GRAVIDADE</b>	12
2.1	Ondas de gravidade atmosféricas	12
2.2	Observações de ondas de gravidade	13
2.3	Oscilações atmosféricas na presença da gravidade	18
2.4	Solução matemática das ondas de gravidade	19
	<b>3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA</b>	25
3.1	O imageador com CCD	25
3.2	Captura de imagens	29
	<b>4 A HIDROXILA OH E AS BANDAS DE MEINEL</b>	35
4.1	O espectro do OH no estado fundamental eletrônico $^2\Pi$	35
4.2	O termo de energia vibracional (v)	35

4.3 O termo de energia rotacional (J)	36
4.4 Intensidade das linhas de emissão das transições vibra-rotacionais	40
4.5 Fotoquímica do OH	44
4.6 Mecanismos de reação	45
4.7 Cálculo da taxa volumétrica do OH (6,2)	46
<b>5 RESULTADOS</b>	<b>49</b>
5.1 Bandas e “ripples”	50
5.2 Direção de propagação dos “ripples” e bandas observadas em S.J. do Cariri via imageador all-sky	54
5.2.1 “ripples”	54
5.2.2 Bandas	55
5.3 Comportamento sazonal dos “ripples” e bandas	56
<b>6 DISCUSSÃO</b>	<b>66</b>
6.1 Atividades de ondas	67
6.2 Comprimento de onda	67
6.3 Períodos	68
6.4 Velocidade horizontal de fase	69
6.5 Direcionalidade	70
6.6 Sazonalidade das ondas	71
6.7 Direcionalidade das ondas	72
<b>7 CONCLUSÃO</b>	<b>75</b>
7.1 Sugestões	76
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE A</b>	<b>87</b>
Parâmetros das ondas observadas	88
<b>APÊNDICE B</b>	<b>96</b>
Expressão da concentração do [OH(v = 9,8)]	96

**I - LISTA DE FIGURAS**

Pág.

- Fig. 1.1 - Perfis verticais de temperatura e concentração de alguns componentes da atmosfera para a cidade de São João do Cariri. 4
- Fig. 2.1 - Parâmetros de uma onda de gravidade. 21
- Fig. 2.2 - Uma onda de gravidade simples, mostrando a amplitude da onda, a propagação da fase e o fluxo de energia. 23
- Fig. 3.1 - Dois exemplos de imagens de ondas de gravidade registradas no OH, detectando “ripples” (esquerda) e bandas (direita). 26
- Fig. 3.2 - Figura esquemática do imageador. 28
- Fig. 3.3 - Imagem original e imagem linearizada observadas na cidade de São João do Cariri no dia 30/09/2000. 31
- Fig. 3.4 - Espectro em duas dimensões da área selecionada do evento de onda com 14,6 km de comprimento de onda horizontal. 32
- Fig. 3.5 - Espectro em três dimensões da área selecionada do evento de Onda. 33
- Fig. 3.6 - Espectro temporal mostrando um pico máximo em  $0,15 \text{ min}^{-1}$  que corresponde a um período observado de 6,67 min. 34

Fig. 4.1 - Representação entre várias transições vibra-rotacionais	39
Fig. 4.2 - Principais linhas de emissão do OH (6,2) devido à transições vibra-rotacional	43
Fig.4.3 - Espectro de luminescência mostrando as principais linhas de emissão	43
Fig. 5.1 - Dois exemplos de imagens de ondas de gravidade registradas no OH, mostrando “ripples” (a esquerda no centro da imagem) e bandas (direita)	50
Fig. 5.2 - Valores percentuais das bandas e dos “ripples” observados em S.J do Cariri no período de setembro (2000) a agosto (2001)	51
Fig. 5.3 - Histogramas mostrando a distribuição do comprimento de onda horizontal para os “ripples” (a) e para as bandas (b) em função do número de eventos	52
Fig. 5.4 - Histogramas da distribuição dos períodos observados para os “ripples” (a) e bandas (b), em função do número de eventos	53
Fig.5.5 - Histograma mostrando a distribuição das velocidades de fase para as bandas e para os “ripples”.	54

- Fig. 5.6 - Histograma polar mostrando a distribuição da direção para os “ripples” detectados em S. J. do Cariri. 55
- Fig. 5.7 - Histograma polar mostrando distribuição da direção das bandas entre os meses de setembro de 2000 a agosto de 2001. 56
- Fig. 5.8 - Histogramas mostrando a distribuição do comprimento de onda horizontal em função do número de eventos para as bandas. Verão (a), inverno (b), outono (c) e primavera (d). 57
- Fig. 5.9 - Histogramas mostrando a distribuição do comprimento de onda Horizontal em função do número de eventos para os “ripples”. Verão (a), inverno(b) ,outono(c) e primavera (d). 58
- Fig. 5.10 - Histograma mostrando a distribuição dos períodos observados para as bandas nas quatro estações. 59
- Fig. 5.11 - Histograma mostrando a distribuição dos períodos observados para os “ripples” nas quatro estações. 60
- Fig. 5.12 - Histogramas mostrando a distribuição das velocidades de fase em função do número de eventos para as bandas no verão (a) inverno (b), outono (c) e na primavera (d). 61

- Fig. 5.13 - Histogramas mostrando a distribuição das velocidades de fase em função do número de eventos para “ripples”, no. verão (a), inverno (b), outono (c) e primavera (d). 62
- Fig. 5.14 - Histogramas polares mostrando as distribuições das direções de propagação para as bandas. 64
- Fig. 5.15 - Histogramas polares mostrando distribuições das direções de propagação para os “ripples”. 65
- Fig. 6.1 - Distribuição de relâmpagos em C. Paulista (esquerda) e S. J do S. J. do Cariri (direita). 68
- Fig. 6.2 - Distribuição de relâmpagos para os continentes e os oceanos observados pelo sensor LIZ, no período de dezembro de 1997 até dezembro de 2000. 71
- Fig. 6.3 - Distribuição de relâmpagos para o inverno e verão a Oeste de São João do Cariri. 74

## II. LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 -	Características dos filtros de interferência.	28
Tabela 4.1 -	Termos vibracionais do OH em $\text{cm}^{-1}$ .	37
Tabela 4.2 -	Termos de energia rotacional de $v = 0$ até 9 e momento angular eletrônico igual a $3/2$ ( $I=1$ ) E $1/2$ ( $I=2$ ).	38
Tabela 4.3 -	Linhas de emissão do OH (6,2) via Equações (4.5) - (4.8).	41
Tabela 4.4 -	Intensidade normalizada das principais linhas do OH (6,2), ( $T=200$ K), calculadas por meio dos parâmetros de Turnbull e Lowe (1989) utilizando as Equações (4.11) e (4.12).	43

**III - LISTA DE SÍMBOLOS**

$P$	Pressão atmosférica.
$\rho$	Densidade atmosférica.
$g$	Aceleração da gravidade.
$Z$	Altitude.
$T$	Temperatura (K).
$R$	Constante universal dos gases.
$H$	Altura de escala.
$M$	Peso molecular.
$c_p$	Calor específico a pressão constante.
$c_v$	Calor específico a volume constante.
$\Pi, \Delta, \Sigma$	Indicação dos estados eletrônicos das moléculas.
$C$	Velocidade do som
$\gamma$	Relação entre $c_p$ e $c_v$
$\lambda_x$	Comprimento de onda horizontal
$\lambda_z$	Comprimento de onda vertical
$k_x$	Número de onda horizontal
$k_z$	Número de onda vertical



$\theta$	Fase de propagação de uma onda.
$\omega$	Freqüência observada da onda.
$\Omega$	Freqüência intrínseca da onda.
$(x(i,j), y(i,j))$	Coordenadas da imagem na imagem plana
$\alpha_z$	Ângulo azimutal
$\chi$	Ângulo de elevação.
$\delta$	Correção de azimute na imagem.
$(x_0, y_0)$	Coordenadas reais de zênite.
$A(v', v'')$	Coefficiente de transição em dois níveis vibracionais.
$A(J', v', i' \rightarrow J'' v'' i'')$	Probabilidade de transição entre dois estados.
$B_v, D_v, Y_v$	Constantes vibracionais.
$f(v)$	Produção fracional de um nível vibracional.
$G(v)$	Termo de energia vibracional ( $\text{cm}^{-1}$ ).
$GF_i(v, J)$	Energia em um nível vibra-rotacional.
$h$	Constante de Planck.
$I(J', v', i' \rightarrow J'' v'' i'')$	Intensidade de uma linha de emissão.
$I'$	Intensidade normalizada.
$I$	Indica o momento angular total.
$J$	Número quântico rotacional.
$v$	Número quântico vibracional.
$\Delta J$	Variação entre dois níveis rotacionais.

$\lambda$	Comprimento de uma onda eletromagnética.
$\lambda_{ar}$	Comprimento de onda no ar devido a uma transição entre dois níveis vibra-rotacionais (nm).
$A$	Momento angular em torno do eixo internuclear.
${}^2\Pi$	Designação do estado eletrônico da molécula.
$\sigma_{1,2}(v', v'', J')$	Energia de transição de dois níveis vibra-rotacionais.
$k_I$	Taxa de reação.
$k_B$	Constante de Boltzmann.
$k_3^Q(v', v'')$	Representa o decaimento por colisão de $v'$ para $v''$ .
$k_I^Q(v)$	Decaimento via outros processos colisionais.
$N(J', v', i')$	Número de estados no nível vibra-rotacional ( $v', J'$ ).
$N$	Frequência de Brunt-Väisälä.
$P, Q, R$	Ramos rotacionais originados de uma transição vibra rotacional do OH excitado.
$P$	Produção de uma molécula num estado genérico.
$L$	Perda de uma molécula em um estado genérico.
$Q$	Calor que entra ou sai de uma massa de ar.
$Q_v$	Função de partição rotacional.

## 1 - INTRODUÇÃO

Após a revolução industrial, a humanidade experimentou um rápido e extraordinário desenvolvimento em suas atividades industriais o que gerou como consequência muitas riquezas e impulsionou o desenvolvimento em todos os setores de interesse do homem. Por outro lado, essas atividades industriais provocaram e continuam provocando alterações no equilíbrio natural da Terra, ocasionando mudanças no meio ambiente global. Por exemplo, os gases poluentes produzidos pelas atividades do homem são transportados pelos movimentos que ocorrem na atmosfera e provocam fenômenos já conhecidos e prejudiciais à humanidade como o buraco na camada de ozônio, e o efeito estufa. Estes poluentes podem ser levados a altitudes de até 100 km pela circulação de ventos e espalhados globalmente.

Quando a dinâmica da atmosfera terrestre é examinada quantitativamente, os resultados obtidos são de grande importância em estudos teóricos e no desenvolvimento de métodos de modelagem. Portanto, é de fundamental importância o estudo dos processos químicos e dinâmicos que ocorrem na atmosfera, apesar da complexidade que existe nestes processos, pois só assim é possível prever prováveis mudanças que ocorram no nosso ambiente e que possam ser nocivas à espécie humana.

## 1.1. A atmosfera terrestre

A atmosfera terrestre foi formada a aproximadamente 5 bilhões de anos a partir da liberação de gases no interior da terra recém criada. Os gases predominantes desta época eram o  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{H}_2$  liberados por erupções vulcânicas. Ela pode ser definida como sendo uma série de camadas estruturadas a partir de suas características térmicas. A temperatura em cada camada muda com a altitude, apresentando aumento ou decréscimo (Figura 1.1). De maneira mais simples, ela pode ser entendida como uma mistura de gases dos quais o nitrogênio é o mais abundante. Até uma altura de aproximadamente 100 km (homosfera), a mistura de certo gás em relação ao todo se mantém, e difusão turbulenta predomina. A 100 km tem-se uma região de transição, a turbopausa, acima da qual predomina a difusão molecular. Os gases a partir desta altura, se distribuem de acordo com suas próprias escalas de altura, e não há mais a mistura proporcional. Esta região é denominada de heterosfera.

## 1.2. Perfil térmico da atmosfera

A Figura 1.1 mostra perfis verticais de temperatura e densidade de alguns alguns constituintes atmosféricos em São João do Cariri no estado da Paraíba.

A troposfera é a camada mais baixa e que se encontra em contato com a superfície da terra e atinge uma altitude de aproximadamente 15 -18km. Os movimentos atmosféricos são muito intensos nesta camada. Ela apresenta um decréscimo de temperatura com o aumento da altitude, numa taxa de aproximadamente  $6^\circ\text{C}/\text{km}$  até um mínimo de  $40^\circ\text{C}$  negativos. A obtenção de

dados para o estudo da dinâmica e composição desta região é a mais fácil entre todas, pois os mesmos podem ser coletados in situ por meio de sensores instalados a bordo de aviões, balões e na própria superfície. A região de transição entre a troposfera e a estratosfera é a tropopausa. Sua localização varia com a latitude e a estação do ano.

Acima da tropopausa, inicia-se a estratosfera, cuja altitude máxima está compreendida entre 40 e 50 km e que ao contrário da troposfera, a temperatura cresce até aproximadamente  $-10^{\circ}\text{C}$ .

A região de transição entre a estratosfera e a mesosfera é a estratopausa que é caracterizada, com relação à temperatura, pela isoterminia e, em relação à composição química, por uma queda acentuada na concentração de oxigênio molecular.

Acima da estratopausa encontra a mesosfera. Como a troposfera, esta camada é aquecida por baixo (pela camada de ozônio). Portanto, a temperatura também decrescerá, neste caso, a uma taxa de aproximadamente  $3,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , atingindo no topo da camada, 80 km de altitude, o valor mais baixo de toda a atmosfera, em média  $-90^{\circ}\text{C}$ . Sua principal fonte de calor é a absorção do ultravioleta pelo ozônio próximo da estratopausa.

Como praticamente não existe absorção de radiação em altitudes bem acima da estratopausa, a mesosfera tende a diminuir sua temperatura devido à expansão adiabática do ar, como no caso da troposfera. Nesta região ocorre quebra de ondas de gravidade, o que provoca a ocorrência de forte turbulência no vento de fundo. Estudos nesta região são complexos pelo fato dela se situar acima de altitudes onde balões podem alcançar e muito abaixo das órbitas dos satélites.

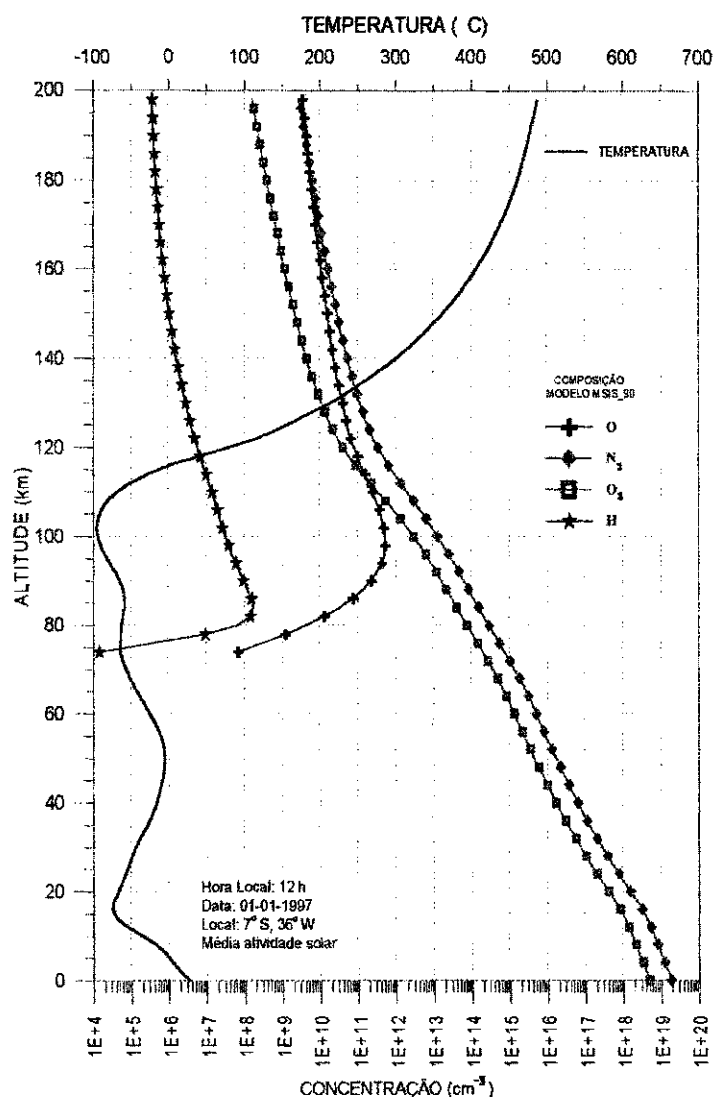


Figura 1.1 - Perfis verticais de temperatura e concentração de alguns componentes da atmosfera segundo o modelo MSIS-90 para a cidade de São João do Cariri-Pb (7.5°S, 36°W) às 12:00 h do dia 01/10/1997.

As medições in situ na mesosfera só podem ser feitas por foguetes. Nesta região, onde são observadas as auroras, predomina a ocorrência de íons e partículas livres. Desse modo, a utilização de equipamentos sensíveis à luz emitida nesta região é de grande importância para se obter informações sobre sua dinâmica e composição.

A região localizada acima da mesosfera é chamada de termosfera, onde a temperatura aumenta rapidamente com a altitude e pode atingir de 230 a 1730 °C, dependendo da atividade solar. O aquecimento desta região é devido à absorção de radiação solar no extremo ultravioleta. A partir de 90 km, ela estende-se por centenas de quilômetros em direção ao espaço, sendo seu limite superior considerado como o “topo da atmosfera”, a 1000 km de altitude. Nesta camada o significado de gás não tem mais sentido.

Nos primeiros 50 km da termosfera encontra-se uma camada com propriedades peculiares, a ionosfera, que apresenta considerável quantidade de átomos e moléculas ionizadas bem como os correspondentes elétrons livres, o que lhe confere a propriedade de refletir eficientemente as ondas de rádio. A região onde as moléculas se movem em trajetórias balísticas e raramente colidem com outras moléculas é denominada de exosfera.

### 1.3. Luminescência atmosférica

A luminescência atmosférica pode ser definida como uma radiação continuamente emitida pela atmosfera planetária. Caracteriza-se por ser uma radiação de intensidade relativamente fraca, de extensa faixa espectral - do ultravioleta distante ( $\lambda \cong 250nm$ ) ao infravermelho próximo ( $\lambda \cong 4\mu m$ ). A intensidade da luminescência comumente usada em aeronomia é o Rayleigh(R), que corresponde a  $10^6$  fótons. $cm^{-2}.s^{-1}$  por coluna.

A luminescência pode ser diurna (dayglow), crepuscular (twilightglow) ou noturna (nightglow). A noturna ocorre em regiões atmosféricas entre aproximadamente 80 e 220 km e é originada por meio de átomos ou moléculas excitados pela radiação ultravioleta solar durante o dia, e por colisões

com outras moléculas ou com partículas carregadas. A técnica de detecção e medida da luminescência noturna ( $\lambda \sim 250 - 4000 \text{ nm}$ ) é, entre as demais, relativamente simples, pois a presença da radiação solar direta torna o espectro complexo e com elevada intensidade de ruído de fundo, dificultando medidas precisas de luminescência. Por este motivo, a maioria das observações de luminescência são feitas no período noturno, e se referem, portanto, ao espectro da luminescência noturna.

Os estudos da luminescência têm como objetivo estabelecer observações regulares da luminescência para monitorar temperatura, ventos e propagação de ondas de gravidade, uma vez que o monitoramento destes parâmetros permite o estudo do comportamento físico - químico da alta atmosfera e permite estabelecer uma climatologia com referência aos aspectos de mudanças globais da alta atmosfera.

Em geral, três métodos são usados nas observações óticas da luminescência: (1) medidas fotométricas de solo; (2) medidas a bordo de foguete e balão; (3) medidas de satélite, sendo que cada método escolhido tem seu propósito. Caso deseje-se investigar as flutuações nas intensidades das emissões da luminescência método mais indicado é a fotometria de solo. O perfil vertical da camada de emissão (taxa volumétrica de emissão) é geralmente determinado através das medidas de fotometria a bordo de foguete, enquanto que, o estudo da distribuição global do campo de radiação da luminescência pode ser acessível através de técnicas de imageamento a bordo de satélite.

A história da luminescência terrestre teve início no começo deste século, quando foi reconhecido por vários estudiosos como sendo uma componente da luz, emitida ou espalhada pela atmosfera. Uma série de medidas efetuadas por Rayleigh (1930,1931), em uma restrita faixa espectral, marca o



início da pesquisa moderna da luminescência. O trabalho pioneiro de Chapman (1931), na tentativa teórica de explicar a emissão da luminescência da linha verde do oxigênio atômico OI557,7 nm permanece ainda nos dias atuais como um fundamento básico do assunto. Posteriormente, com o advento de técnicas experimentais mais sofisticadas, identificou-se, entre outras, as emissões do oxigênio molecular (O<sub>2</sub>) e as emissões do radical hidroxila (OH).

No início do século XX já se sabia que o oxigênio era o responsável pela emissão das linhas nos comprimentos de onda de 557,7 nm e 630 nm. Rayleigh (1930), para distinguir a linha 557,7 nm das auroras, chamou esta luz de aurora não-polar, que mais tarde passou a se chamar de luminescência.

As principais partículas responsáveis pelas emissões da luminescência noturna são o oxigênio atômico e molecular, a molécula de OH (radical hidroxila) e também o átomo de sódio.

Algumas características da luminescência do oxigênio atômico e do radical hidroxila (OH) são resumidas a seguir:

#### 1) Emissões do oxigênio atômico

A primeira emissão a ser estudada foi, a linha verde do oxigênio atômico ou OI557,7 nm, cuja intensidade de emissão varia entre 100 e 200 R e a camada de emissão tem um pico em torno de 96 km de altitude. Seu mecanismo de excitação é realizado em duas etapas para altitudes abaixo de 100 km, sendo o estado excitado O (<sup>1</sup>S) o responsável pela emissão:



onde M é a molécula média da atmosfera composta principalmente por O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>.

O OI630,0 nm é outra linha de emissão do oxigênio atômico, que ocorre pelo decaimento do oxigênio do nível  $^1D$  (abaixo do  $^1S$ ) para o nível  $^3P$ . Para Peterson e Van Zandt (1969), o mecanismo de excitação da linha vermelha do oxigênio atômico (OI630,0 nm), envolve o  $O_2^+$  e o elétron através do processo de recombinação dissociativa em altitudes próximas de  $250 \pm 30$  km.

## 2) Emissões do OH

A luminescência é praticamente dominada pelas emissões vibrato-rotacionais do OH dentro de um mesmo estado eletrônico. A emissão está situada entre 520 nm e  $4\mu\text{m}$  e sua intensidade total está em torno de 4 MR. No caso da banda OH (6,2), por exemplo, sua intensidade situa-se entre 1000 e 3000R. O mecanismo de excitação do OH(v) na mesopausa foi proposto por Bates e Nicolet (1950):



O mecanismo de excitação de níveis vibracionais menores que 6, não está completamente consolidado. Para estes níveis, o mecanismo de excitação envolve o radical  $HO_2$  (Krassovsky, 1972), ou seja :



A distribuição da concentração do OH tem um pico em torno de 87 km de altitude (Lopez-Moreno et al., 1987).

### 1.4. Instrumentação na luminescência atmosférica

A instrumentação utilizada no estudo da luminescência consiste de fotômetro, espectrômetros, interferômetros, radares e imageadores. Ele mede a intensidade absoluta e, em certos casos, a temperatura da atmosfera na região de onde provém a emissão. Um exemplo importante é o estudo de perturbações

devido à passagem de ondas de gravidade pelas camadas emissoras. Os interferômetros também são capazes de detectar tais variações nas camadas e possuem uma resolução espectral bem maior que o fotômetro.

O Imageador utiliza uma câmera eletrônica chamada CCD (Charge Coupled Device) que tem a função de converter fótons em elétrons, gerando uma corrente elétrica que pode ser quantificada com um conversor analógico-digital (ADC). Ele é uma evolução da câmera de tv de alta sensibilidade e da câmera fotográfica, utilizadas no início das décadas de 70 e 80 para obter imagens de estruturas ondulatórias nas regiões de emissões (Hapgood e Taylor, 1982).

Segundo Medeiros (2001), a principal vantagem do imageamento da luminescência é a combinação da alta resolução espacial com a alta resolução temporal na visualização de uma grande área.

A evolução destes equipamentos se deu principalmente no campo dos detectores utilizados por eles. Meinel (1950), obteve o espectro na região do infravermelho num período de aproximadamente 12 horas. Posteriormente, em 1993, Johnston e Broadfoot obtiveram o espectro de luminescência de 300 a 900 nm num intervalo de tempo de 1 hora. Um dos principais responsáveis por isto foi um detector chamado Intensified Charge Couple Device (ICCD).

### 1.5. Ondas de gravidade

As ondas de gravidade são ondas que surgem principalmente na baixa atmosfera a partir do desequilíbrio entre a força de gravidade e o gradiente de pressão e propagam-se até a alta atmosfera. Já faz algum tempo que as estas ondas são reconhecidas como um elemento essencial na compreensão da

dinâmica e estrutura da média atmosfera e isto se tornou mais evidente nos anos 80 com os estudos de Lindzen (Lindzen,1981).

Por ser um meio compressível, sob a ação da força da gravidade e da radiação solar, a atmosfera terrestre apresenta uma série de perturbações ondulatórias de escalas submétricas associadas com turbulências até perturbações de escala global associadas com marés e ondas planetárias. As ondas geradas na baixa atmosfera propagam-se ascendentemente enquanto suas amplitudes crescem exponencialmente em resposta a uma densidade atmosférica decrescente.

Na alta mesosfera e baixa termosfera, entre 80 e 110 km de altura, estas ondas saturam, transferindo energia e momentum para a atmosfera. Nesta região os processos físico-químicos são particularmente interessantes, pois ocorrem extremos de temperatura, pressão e absorção da radiação solar. No entanto, 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. É também nesta faixa de altura onde ocorre a transição entre uma atmosfera praticamente uniforme em termos de composição química e uma atmosfera estratificada conforme o peso molecular de seus constituintes.

Quando uma onda passa por uma camada de emissão, ela deixa um registro na intensidade emitida, a qual pode ser, por exemplo, fotografada (Medeiros,2001). Foi Krassovsky (1972) quem estudou pela primeira vez a interação entre ondas de gravidade e a luminescência do OH, utilizando dados obtidos por um fotômetro. Peterson e Kieffaber (1973 a) fotografaram pela primeira vez estas estruturas na camada de emissão do OH, obtendo assim um registro bidimensional de ondas. Muitos outros estudos foram feitos sobre as ondas de gravidade e sua interação com a luminescência atmosférica

(Armstrong, 1975,1982; Krassovsky et al.,1977; Walterscheid et al.,1987; Shubert e Walterscheid, 1988; Medeiros,2001).

## 1.7 Divisão do trabalho

Capítulo 2 - é reservado à teoria das ondas de gravidade.

Capítulo 3 - trata da instrumentação e metodologia, e apresenta o equipamento utilizado neste trabalho.

Capítulo 4 – apresenta a molécula do OH e do seu espectro vibra-rotacional, tratando também da fotoquímica do OH, onde são apresentados os mecanismos de produção e perdas no estado excitado.

Capítulo 5 – contém análises feitas nos dados obtidos pelo imageador.

Capítulo 6 –é reservado a discussão dos resultados obtidos.

Capítulo 7- apresenta a conclusão do trabalho.

Capítulo 8 – referências bibliográficas.

## 2 - ONDAS DE GRAVIDADE

### 2.1 – Ondas de gravidade atmosféricas

As ondas de gravidade são ondas que se originam principalmente na baixa atmosfera a partir da restauração do balanço entre a força de gravidade e o gradiente de pressão e se propagam até a alta atmosfera. Elas podem apresentar períodos que variam de ~ 5 minutos (período de Brunt-Väisälä) até  $12/\cos\theta$  (em hora), sendo  $\theta$  a colatitude. Quando as ondas se propagam, normalmente na vertical e de baixo para cima, sua amplitude de oscilação cresce enquanto que a densidade atmosférica diminui, caso não haja dissipação da onda. Porém, quando a amplitude se torna muito grande, ocorre quebra da onda e sua energia é transferida para a atmosfera, interferindo nos campos de vento, causando-lhes aceleração e turbulência, e provocando mudanças também nos campos de pressão e temperatura.

Vários fenômenos, que geralmente estão relacionados com ventos e instabilidades na atmosfera, podem ser responsáveis pela geração de ondas de gravidade, como por exemplo: explosões vulcânicas, fluxos de ar sobre montanhas, tempestades convectivas e frentes frias. Se a onda não se dissipa, a sua energia é conservada. Existem várias técnicas para observação de ondas, tais

como o uso de radares e de instrumentos óticos como os fotômetros, interferômetros e imageadores com CCD.

## 2.2 – Observações de ondas de gravidade

Já faz algum tempo que as ondas de gravidade têm sido reconhecidas como um elemento essencial na compreensão da dinâmica e estrutura da média atmosfera. Hines (1960), observou a semelhança existente entre a estrutura do campo de vento nas regiões da mesosfera e termosfera inferior bem como os efeitos correspondentes aos prognosticados pela passagem destas ondas.

Krassovsky (1972), utilizando dados de fotômetro, estudou pela primeira vez a interação entre ondas de gravidade e a luminescência do OH. Posteriormente, vários trabalhos foram surgindo, mostrando mais detalhes desta interação. Armstrong (1975), detectou ondas de gravidade utilizando um espectrômetro de varredura Ebert-Fastie.

Noxon (1978), estudou a propagação ascendente de ondas de gravidade a partir da variação da temperatura rotacional do O<sub>2</sub>.

Hapgood e Taylor (1982), usando uma câmera de TV para pouca luz, obtiveram imagens de estruturas ondulatórias das emissões do OH. Neste mesmo trabalho eles desenvolveram um método para mapear e caracterizar estas estruturas através do uso das estrelas nas imagens. A câmera de TV apresenta a vantagem de apresentar as imagens em tempo real, o que permite um posicionamento adequado do equipamento para se ter a melhor imagem da emissão.

Hines (1972) sugeriu que o transporte de momento linear, através das ondas de gravidade, pode afetar a circulação média da atmosfera. e, desde então, tem ocorrido considerável progresso nas técnicas observacionais dessas ondas na mesosfera baixa termosfera (MLT).

Lindzen, (1981), detalhou aspectos das interações das ondas de gravidade com o fluxo médio, sugerindo que as que apresentavam comprimento de onda horizontal de aproximadamente 1000 km, eram responsáveis pela transferência do momento linear para a atmosfera. Foi verificado posteriormente que ondas de menor escala (~ 100 km) são as mais importantes na transferência do momento linear (Vincent e Reid, 1983; Meeck et al.,1985).

Novas hipóteses para explicar a quebra das ondas de gravidade e conseqüentemente o depósito de energia e momento na atmosfera, foram feitas por outros pesquisadores. Weinstock (1984,1985,1986) sugeriu que processos não lineares poderiam explicar o mecanismo da quebra de ondas de gravidade. Fritts e Rastogi (1985) mostraram que as instabilidades convectivas eram mais importantes do que processos não lineares. Outros trabalhos indicaram que as instabilidades dinâmicas são também mecanismos importantes na quebra de ondas de gravidade (Fritts, 1985, Fritts et al., 1994).

Estudos posteriores tentaram explicar os mecanismos de saturação das ondas de gravidade, tais como a teoria da instabilidade linear (Dewan e Good, 1986), teoria do espalhamento Doppler (Hines, 1991), a parametrização de Fritts e Lu (Fritts e Lu, 1993) e a teoria de filtragem difusiva (Gardner, 1994) .

Vários desses modelos são usados na parametrização dos efeitos das ondas de gravidade na circulação geral (Maclandress, 1998).

Muitos instrumentos podem ser usados na observação das ondas de gravidade, todavia, cada um deles tem sua própria limitação na observação dos



parâmetros dessas ondas e, a combinação dos métodos de análise é muito importante para o estudo mais detalhado das ondas de gravidade (Gardener e Taylor, 1998). Uma dessas técnicas é o imageamento da aeroluminescência em torno da região do mesopausa que tem sido aplicado para observar ondas com características de períodos curtos ( $< 1$  hora) e pequenos comprimentos de onda horizontal (6 – 100 km) em vários locais (Nakamura et al, 1999). Medeiros (2001), observou estruturas de ondas de gravidade em Cachoeira Paulista, usando imageador com CCD.

A publicação das primeiras imagens realizadas com uma lente fish-eye (olho de peixe) all-sky ( $180^\circ$  de campo de visão) mostrando estruturas de onda sobre todo o céu (cobrindo  $10^6$  km<sup>2</sup>) foram registradas por Peterson e Adams (1983).

A campanha ALOHA -90, com imageadores de Taylor (Taylor e Ewareds, 1991), como também com outros instrumentos, permitiu investigar movimentos de curto período em baixa latitude sobre o oceano em Haleakalaj, Havaí (USA). Estruturas de ondas de curto período foram observadas freqüentemente. Também, estes trabalhos marcaram a introdução de imageadores com CCD nas medidas de luminescência. Taylor e Hill (1991) sugeriram que as montanhas não poderiam ser uma fonte importante das ondas observadas, e que a filtragem pelos ventos poderiam desempenhar um papel importante nos padrões de ondas detectados. Taylor et al. (1991) compararam medidas de imageador com o interferômetro da Universidade de Ontário no Canadá e encontraram uma boa concordância.

Taylor et al. (1993) encontraram uma forte anisotropia na direção de ondas de gravidade em Nederland, Colorado (USA). A partir de 22 eventos

detectados, sugeriram que a filtragem pelos ventos em níveis críticos foi a responsável pela anisotropia encontrada.

Swenson e Mende (1994) registraram várias noites de observações de ondas de gravidade em imagens do OH, incluindo uma observação de quebra de onda. Neste trabalho, eles também apresentaram um método aproximado de diferenciação temporal, no qual sucessivas imagens são subtraídas umas das outras. Isto significa uma aproximação de uma derivada temporal de uma série de imagens. O evento de quebra de onda foi caracterizado por uma distorção na frente de onda e o aparecimento de caóticas de caóticas estruturas de “ripples” alinhados ortogonalmente à onda inicial. Este fenômeno é atribuído a semelhantes estruturas observadas por Fritts et al. (1993) em nuvens noctilucentes. Hecht et al. (1994) foi o primeiro a calcular espectro em duas dimensões utilizando a análise de Fourier em imagens do OH.

A campanha ALOHA-93 também foi um momento de várias observações das características da luminescência atmosférica. Hecht et al (1995) calcularam a inclinação do espectro do número de onda em duas dimensões, e também sugeriram a presença de ondas acústicas em altitudes mesosféricas, devido a observação de períodos de onda de 3 minutos, embora isto possa ser explicado pelo deslocamento Doppler da frequência devido ao vento de fundo Swenson e Espy (1995) registraram ondas em imagens do OH com direção para sudeste, comprimento de onda de aproximadamente 25 km e velocidade de fase entre 25-40 m/s. Estas medidas foram comparadas com a teoria de filtragem difusiva (Gardner, 1994) e os resultados foram consistentes com as predições.

Taylor e Garcia (1995) realizaram análise espectral em duas dimensões de imagens observadas sobre Arecibo, Porto Rico (USA). Eles

encontraram comprimentos de onda horizontal entre 26 e 70 km, velocidades de fase entre 31 e 41 m/s e períodos de 11 minutos a 28,5 minutos.

Garcia e Taylor (1997) descreveram uma técnica de processamento de imagens que usava uma calibração espacial, remoção de estrelas, projeção geográfica e análise de Fourier.

Durante a campanha CORN (Collaborative Observations Regarding the Nightglow) Hecht et al. (1997a) em Urbana, Illinois (USA) detectaram em imagens de OH onda alinhadas em 135° e 315°. Estas ondas apresentaram comprimento de onda entre 30-50 km, período entre 10-20 minutos, com velocidade de fase em torno de 50 m/s.

Taylor et al. (1997) obtiveram imagens do OH em Alcântara (2° S, 44° W) no Maranhão, entre agosto e outubro de 1994. Eles encontraram que as bandas exibiram uma forte anisotropia na direção de propagação, com uma direção preferencial para nordeste.

Coble et al. (1998) obtiveram imagens do OH no Novo México (USA) e determinaram o espectro de número de onda horizontal.

Recentemente, estudos óticos e de radar têm revelado uma diversidade muito grande de ondas na região da mesosfera e baixa termosfera (MLT). Os lidars, por exemplo, tem oferecido uma melhor resposta para movimentos de onda com comprimento de onda vertical menores do que a espessura da camada de sódio (~ 10 km). Em comparação, o imageamento da luminescência (principalmente do OH) tem demonstrado alta sensibilidade para movimentos que apresentam comprimentos de onda horizontal de pequena escala (< 100 km) e períodos curtos (< 1 hora), [(Medeiros, 2001; Batista et al., 2000; Nakamura et al., 1999; Isler et al., 1997; Taylor et al., 1997; Garcia et al., 1997; Hecht et al., 1997b; Coble et al., 1998; Taylor e Garcia, 1995)].

Atualmente, a pesquisa sobre ondas de gravidade está centrada na identificação de prováveis fontes, direção preferencial de propagação, tipos de ondas e difusão de momento e energia (Walterscheid et al., 1999; Alexander et al., 2000; Dewan e Picard, 2001; Hecht et al., 2001 e Medeiros, 2001)

### 2.3 – Oscilações atmosféricas na presença de gravidade

Os movimentos ondulatórios, se estendem desde as ondas acústicas até ondas com períodos de vários dias (ondas de maré e planetárias), determinantes do tempo, do clima e de sua variabilidade.

No tratamento dos vários tipos de ondas, os mecanismos restauradores (causas) podem ser separadamente considerados nas equações que governam esses mecanismos, o que permite a análise dos protótipos de ondas puras. Isso representa um primeiro passo para se entender os movimentos extremamente complexos na atmosfera. Por outro lado, a identificação dos mecanismos físicos responsáveis pelos vários tipos de ondas leva ao problema de filtragem, de grande importância em modelagem numérica.

O estudo matemático das ondas de gravidade envolve equações complexas e em muitos casos se faz necessário recorrer a métodos numéricos para solucioná-las. Para o caso mais simples, pode-se considerar pequenas variações de pressão e densidade, não ocorrendo perda de energia (viscosidade nula) e solução plana em duas dimensões. Desse modo, é possível obter ondas como soluções idealizadas de modelos simplificados onde a atmosfera é considerada estacionária, com temperatura e composição uniforme.

Neste tipo de atmosfera básica, as ondas são consideradas perturbações lineares e que ocorrem adiabaticamente, sem atrito, e a aceleração

da gravidade é constante coma altura. A força de Coriolis é desprezada com relação ás forças de gradiente de pressão, de gravidade e também com relação a inércia.

#### 2.4 – Solução matemática das ondas de gravidade

Um tratamento teórico adequado das ondas de gravidade atmosféricas foi estabelecido por Hines (1960). Ele é baseado nas seguintes hipóteses: os efeitos não lineares e a esfericidade da Terra são desprezados; a atmosfera é considerada isotérmica e sem viscosidade e a força de Coriolis pode ser desprezada quando a frequência da onda é muito maior que a frequência de rotação da terra. Sob estas 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  $\rho$ (densidade) da forma que é feita por Hines (1960). As únicas forças atuantes estão na vertical e as soluções são ondas planas. Assim, podemos direcionar o eixo horizontal  $x$  na direção de propagação da onda e  $\vec{V} = (u, 0, w)$  e fazendo  $p = p_1 + p_0$ ;  $\rho = \rho_1 + \rho_0$ . Onde  $p_0$  ( $p$  do estado estático),  $p_1$  ( $p$  no estado 1),  $\rho_0$  ( $\rho$  no estado estático),  $\rho_1$  ( $\rho$  no estado 1) e  $u$  e  $w$  (velocidades em  $x$  e  $z$  respectivamente). As equações do movimento linearizadas são:

$$\begin{aligned} \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{\partial p_1}{\partial x} \\ \rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} &= -\frac{\partial p_1}{\partial z} - \rho_1 g \\ \frac{\partial p_1}{\partial t} + w \frac{\partial p_0}{\partial z} &= C^2 \left( \frac{\partial p_1}{\partial t} + w \frac{\partial p_0}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + w \frac{\partial \rho_0}{\partial z} = -\rho_0 \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

Onde  $C$  é a velocidade do som que está relacionada com  $p_0$  e  $\rho_0$  pela equação  $C^2 = \gamma \frac{p_0}{\rho_0}$  sendo  $\gamma$  a relação entre o calor específico a pressão constante

e o calor específico a volume constante ( $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ ).

São supostas as seguintes equações:

$$\frac{p_1}{p_0 P} = \frac{p_1}{p_0 R} = \frac{U_x}{X} = \frac{U_z}{Z} = A \exp i(\omega t - k_x x - k_z z) \quad (2.2)$$

Onde  $P, R, X, Z, A$  são constantes,  $\omega$  é a frequência da onda,  $k_x$  e  $k_z$  são número de onda horizontal e vertical respectivamente.

Substituindo (2.2) em (2.1) se obtém a seguinte relação de dispersão:

$$w^4 - w^2 C^2 (k_x^2 + k_z^2) + (\gamma - 1) g^2 k_x^2 + i w^2 \gamma g k_z^2 = 0, \quad (2.3)$$

Se a gravidade for desprezada, (2.3) se reduz a:

$$w^2 = C^2 (k_x^2 + k_z^2) \quad (2.4)$$

que governa a propagação do som.

## 2.5 – Ondas de gravidade interna

No caso das ondas de gravidade internas, a relação de dispersão é:

$$w^4 - w^2 C^2 (k_x^2 + k_z^2) + (\gamma - 1) g^2 k_x^2 - \gamma^2 g^2 \omega^2 / 4 C^2 = 0 \quad (2.5)$$

As soluções são da forma:

$$\frac{p_1}{p_0 P} = \frac{p_1}{p_0 R} = \frac{v}{X} = \frac{w}{Z} = A \exp \left( \frac{z}{2H} \right) \exp i(\omega t - k_x x - k_z z) \quad (2.6)$$

A equação (2.5) é de ordem 4 em  $\omega$ , e isto implica que para cada par  $(k_x, k_z)$  existem dois conjuntos distintos de  $\omega^2$ . Se restringirmos aos valores positivos de  $\omega$ , já que a parte negativa altera apenas a direção da propagação, observa-se que um dos valores de  $\omega$  é maior do que o valor de um certo  $\omega_a$ , enquanto que o outro valor é menor que o valor de um certo  $\omega_g$  e que  $\omega_a > \omega_g$  conjuntos, onde  $\omega_a = \gamma g/2C$ , é a frequência acústica de corte e as ondas com frequências maiores do que esta são chamadas de acústicas.  $\omega_g = (\gamma-1)^{1/2}2/C$  é a frequência de Brunt-Väisälä. Isto indica que duas seqüências distintas de ondas internas podem ocorrer, sendo uma de alta frequência ( $\omega > \omega_a$ ) e uma outra de baixa frequência ( $\omega < \omega_g$ ) e que existe um intervalo no espectro ( $\omega_g < \omega < \omega_a$ ) onde ondas internas não se propagam. Estes três tipos de ondas são: ondas acústicas, ondas internas de gravidade e ondas evanescentes, respectivamente.

## 2.6 – Relações entre os parâmetros de uma onda de gravidade

A Figura 2.1 apresenta uma onda de gravidade e seus respectivos parâmetros.

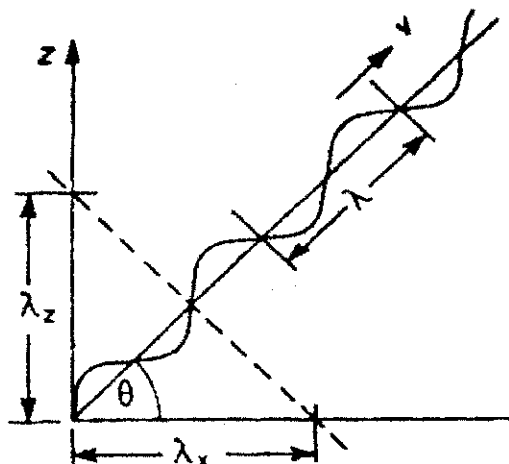


Figura 2.1 – Parâmetros de uma onda de gravidade.

FONTE: Hargreaves (1992, p. 125)

A fase de propagação ( $\theta$ ) é dada por:

$$\theta = \tan^{-1}(\lambda_x / \lambda_z) = \tan^{-1}\left(\frac{k_z}{k_x}\right) \quad (2.7)$$

O comprimento de onda é obtido da seguinte relação:

$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda_x^2} = \frac{1}{\lambda_z^2} = \frac{(k_x^2 + k_z^2)}{(2\pi)^2} \Rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{(k_x^2 + k_z^2)^{1/2}} \quad (2.8)$$

As velocidades de fase nas direções de  $\theta$ , horizontal e vertical, são respectivamente:

$$U = \frac{\omega\lambda}{2\pi} = \frac{\omega}{k}, \quad v = \frac{\omega}{k} \quad e \quad w = \frac{\omega}{k_z} \quad (2.9)$$

Substituindo os as equações de  $\omega_a$  e  $\omega_g$  na equação da relação de dispersão para ondas de gravidade interna:

$$k_z^2 = \left(1 - \frac{\omega_a}{\omega^2}\right) \frac{\omega}{C^2} - k_x^2 \left(1 - \frac{\omega_g^2}{\omega^2}\right) \quad (2.10)$$

e para o caso de uma onda de gravidade pura têm-se que :

$$k_z^2 = k_x^2 \left(\frac{\omega_g^2}{\omega^2} - 1\right) \quad (2.11)$$

A onda só pode se propagar se  $k_x$  e  $k_z$  são reais e positivos, requerendo que  $\omega > \omega_g$ . A equação (de teta) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega_g^2}{\omega^2} - 1\right)^{1/2} \quad (2.12)$$

As ondas de gravidade são diferentes das ondas acústicas. Nas acústicas, a velocidade da onda é determinada pelas propriedades do meio as quais selecionam uma frequência e um comprimento de onda. No caso das ondas de gravidade, a frequência fixa a fase de propagação mas não a velocidade e o



comprimento de onda. O tratamento matemático é bastante simplificado quando se considera a atmosfera isotérmica, sem viscosidade e sem movimento.

Se a atmosfera é considerada com temperatura variável com a altura e com um vento constante  $\vec{V}_o$ , a relação de dispersão pode se obter sem dificuldade. A solução continua com a mesma forma, porém com as substituições:

$$\omega \rightarrow \Omega = \omega - \vec{V}_o \cdot \vec{k},$$

$$\omega_a \rightarrow \omega_A = \sqrt{\left(\omega_a^2 + \frac{\gamma g \partial T}{2T \partial z}\right)} \quad \text{e} \quad (2.13)$$

$$\omega_g \rightarrow \omega_G = \sqrt{\left(\omega_g^2 + \frac{g}{T} \frac{\partial T}{\partial z}\right)}$$

A Figura 2.2 ilustra uma onda de gravidade simples. Para baixas frequências as partículas se movem perpendicularmente a direção de propagação de fase, enquanto que a energia se propaga em ângulo reto em relação velocidade de fase. A amplitude da onda aumenta com a altitude, para manter constante o fluxo de energia (desprezando a viscosidade).

O primeiro resultado das novas condições da atmosfera, é que a propagação sobre um fluxo médio com velocidade constante provoca um deslocamento Doppler na frequência. O segundo é que, o gradiente de temperatura faz com que as frequências de corte e de Brunt-Väisälä se tornem dependentes da altura. A presença do vento também pode produzir reflexões da onda, mesmo que a temperatura seja constante.

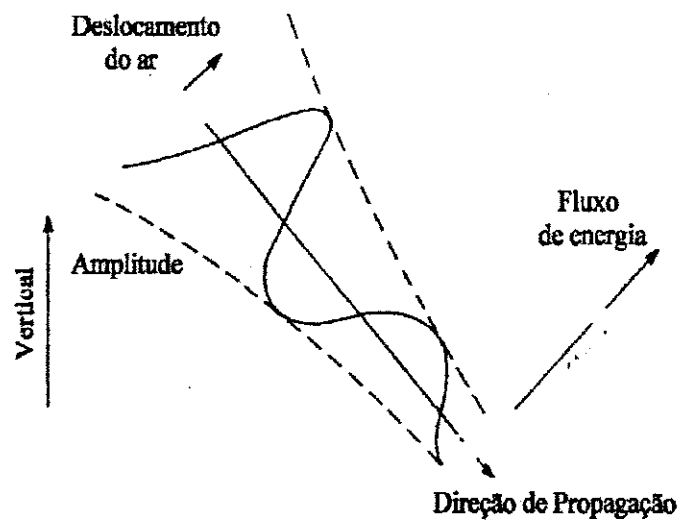


Figura 2.2 - Uma onda de gravidade simples. Pode ser observado aumento da amplitude da onda com a altura, a propagação da fase e o fluxo de energia perpendicular à direção de propagação da onda.

FONTE: Hargreaves (1996,p. 126)

### **3 - INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA**

#### **3.1 - O imageador com CCD**

As investigações da mesosfera e baixa termosfera, (~ 80 -100 km) podem ser feitas utilizando-se várias técnicas de observação e o estudo da luminescência terrestre vem sendo feito a muitos anos, mas, a utilização de instrumentos sofisticados como foguetes, satélites e sensoriamento remoto, é relativamente recente. Estas investigações têm revelado a existência de muitas emissões noturnas resultantes de reações químicas alta atmosfera. Muitas destas emissões ocorrem na mesosfera e baixa termosfera (MLT), cuja camada apresenta uma largura entre 6 e 10 km. Em particular, o desenvolvimento de sistemas de imageamento tem sido de grande importância para o estudo da ocorrência, propagação e dissipação de ondas de gravidade nessa região. Estas ondas são observadas no solo através da variação na intensidade da luminescência e na temperatura rotacional do OH e de outras emissões. A alta resolução do imageador com CCD é utilizada regularmente para obter informações detalhadas da ocorrência de eventos de ondas de gravidade.

O imageador "all-sky" é composto basicamente de um sistema ótico e uma câmera CCD (Charge Coupled Device), sendo capaz de detectar variações da luminescência noturna e registrá-las através de imagens como arquivos

digitais. Imagens all-sky das emissões da luminescência da linhas verde e vermelha do oxigênio atômico OI557,7 nm e OI630 nm respectivamente, emissões do O<sub>2</sub> (0,1), do radical hidroxila OH e do fundo luminoso do céu noturno podem ser observadas. A Figura 3.1 mostra imagens de ripples e bandas obtidas pelo imageador com CCD instalado em S.J. do Cariri. Este tipo de dispositivo vem sendo usado há vários anos em câmaras de vídeo acopladas a sistemas óticos, intensificadores de luz e lente olho de peixe para cobertura do céu noturno (Taylor et al., 1997).

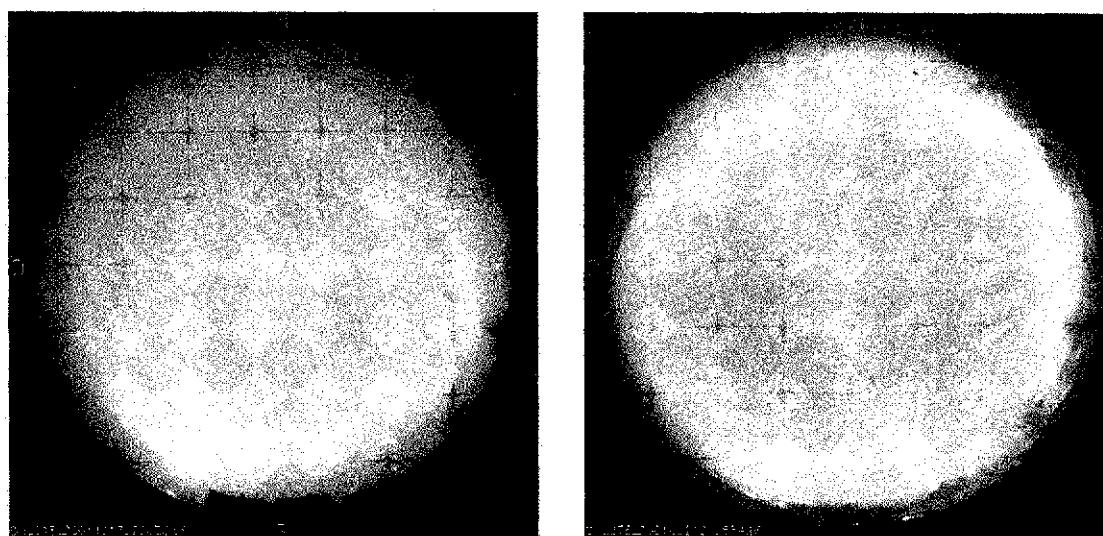


Fig. 3.1 - Dois exemplos de imagens de ondas de gravidade registradas no OH, detectando ripples (esquerda) e bandas (direita), em S. J. do Cariri, nos dias 17/10/2001 e 11/10/2001, respectivamente.

O sistema consiste de uma lente olho de peixe ( $f/4$ ) com um campo de visão de 180°, obtendo uma imagem completa do céu local. Esta imagem passa através de um sistema ótico telecêntrico para que a luz, proveniente de todas as direções, atinja os filtros, dispostos numa roda quase perpendicular. A

roda de filtros do imageador com CCD neste trabalho, tem capacidade de suportar 6 filtros de interferência.

As características destes filtros e as alturas das respectivas camadas de emissões podem ser vistas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características dos filtros de interferência

Filtro	Comprimento de Onda (nm)	Largura de Banda (nm)	Altura Média (km)
OI	557,7	2,65	~96
OI	630,0	3,3	~275
Fundo Luminoso	578,0	2,67	-
O <sub>2</sub> (0,1)	865,5	12	~94
OH	715-930 <sup>1</sup>	215	~87

O sistema, mostrado esquematicamente na figura 3.2, tem a capacidade de trocar de filtro automaticamente via microcomputador. A imagem, depois de filtrada, passa através de um sistema de lentes telecêntricas, que reproduzem a imagem sobre o CCD. O sistema de refrigeração acoplado ao CCD mantém o ruído térmico deste em níveis baixos.

O CCD é uma matriz de células sensíveis à luz. A imagem é captada através das células individuais, denominadas de pixels. A quantidade de pixels em um CCD determina a sua complexidade, tamanho e preço. Quanto maior o CCD mais pixels e, conseqüentemente melhor a qualidade da imagem que será produzida. Entretanto, a melhor qualidade da imagem implica no aumento do arquivo em que ela será guardada. O tempo de transferência da imagem no CCD pra a memória do computador também aumenta.

<sup>1</sup> Com interceptação em 865,5nm

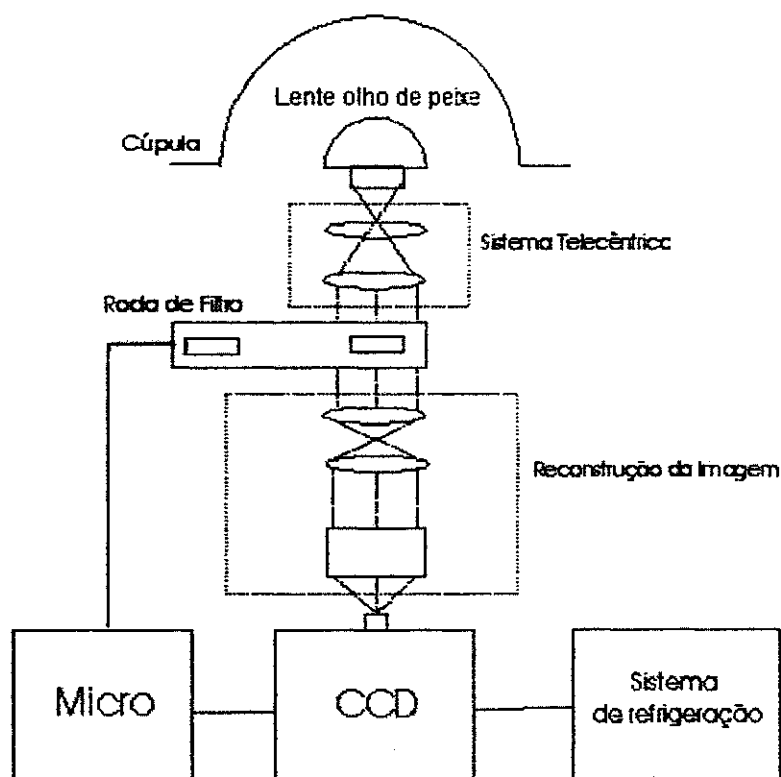


Fig. 3 2 – Imageador mostrado esquematicamente

A CCD utilizada consiste de uma área coletora de  $6,45 \text{ cm}^2$  com uma matriz de  $1024 \times 1024$  com pixels de 14 bits. Apresenta uma alta eficiência quântica, (80% no visível), baixa corrente escura, (0,5 elétrons/pixels/s); baixo ruído de leitura (15 elétrons rms) e alta linearidade (0,05%). A câmera usa uma lente telecêntrica ( $f/4$ ) de varredura completa do céu e que é capaz de obter uma alta resolução sinal-ruído (20:1) das imagens de estruturas de ondas. Os tempos de integração utilizados são 15s para o OH, 90s para o  $\text{O}_2(0,2)$  e para as linhas verde e vermelha do oxigênio atômico, respectivamente OI557,7 nm e OI630,0 nm. A imagem é agrupada para  $512 \times 512$  pixels para melhorar a relação sinal - ruído.

### 3.2 – A captura de imagens

As imagens foram registradas no observatório de luminescência atmosférica, situado em São João do Cariri, para emissões do OH, supondo uma altura média de 85 km.

Uma imagem pode ser considerada como sendo uma matriz de pixels igualmente espaçados, na qual cada pixel é identificado por dois índices (i,j) e por um valor que especifica a intensidade luminosa associada a um tom de cinza na posição (i,j) da imagem (Weeks, 1996).

O valor da intensidade associado a cada pixel, pode ser relacionado a variações da intensidade luminosa do céu, devido à passagem de ondas de gravidade na camada de emissão. Entretanto, a intensidade luminosa registrada na imagem pode ser afetada por ruídos e estes devem ser subtraídos da imagem original antes da análise final, para que uma estimativa mais correta do espectro seja alcançada.

Um outro problema no tratamento espectral das imagens é que para se utilizar transformada de Fourier (FFT), os dados têm que estar igualmente espaçados no arquivo. Isto torna necessário um segundo processamento nas imagens, uma vez que a projeção da imagem sobre a CCD não gera dados igualmente espaçados. Para tratar este problema, as coordenadas da imagem podem ser transformadas em coordenadas geográficas utilizando o método descrito por Hapgood e Taylor, (1982). Isto é feito utilizando um outro sistema de coordenadas, baseado no ângulo de azimute. Assim, o sistema original da imagem é projetado no sistema de coordenadas geográficas. Neste novo sistema o zênite é localizado na origem e  $x$  e  $y$  são os eixos correspondentes às direções leste-oeste e norte-sul geográficos, respectivamente. A condição de

espaçamentos iguais da FFT é satisfeita para as imagens em coordenadas geográficas.

O sistema de coordenadas da CCD (imagem plana)  $(x(i,j), y(i,j))$  e o sistema de coordenadas angulares  $(az, \chi)$  na atmosfera (objeto plano) estão relacionados através da expressão:

$$\begin{bmatrix} X(i, j) - x_c \\ Y(i, j) - y_c \end{bmatrix} = G(\chi) \begin{bmatrix} \sin(az(i, j) - \Delta) \\ \cos(az(i, j) - \Delta) \end{bmatrix}$$

onde  $(x_c, y_c)$  são coordenadas reais do zênite (imagem corrigida),  $\Delta$  é a correção de azimute da imagem e  $G(\chi)$  é determinada pelo formato da lente olho de peixe e relaciona o ângulo de elevação e a distância da lente medida do centro da imagem.

Para se obter informações precisas de pontos no céu, com uma lente olho de peixe, é necessário se fazer a calibração espacial, que é feita usando as estrelas em cada imagem como um ponto de referência conhecido (planetas e estrelas), e, tem como finalidade, quantificar em termos de comprimento real, as estruturas observadas. Este procedimento dá origem aos coeficientes do polinômio da função da lente. Ela se faz necessária sempre que o imageador for instalado em um determinado local, e se ele sofrer qualquer alteração no seu posicionamento, outra calibração é necessária.

Após esta etapa, o programa Sky-map é utilizado para fornecer a localização de cada astro quando se conhece a hora e as coordenadas geográficas do local desejado. A finalidade deste procedimento é a obtenção dos coeficientes que relacionam o sistema de coordenadas padrão com o sistema de coordenadas da imagem.



A remoção das estrelas se faz necessário para evitar listras quando a imagem for projetada no sistema de coordenadas geográficas. A Figura 3.3, mostra uma imagem original detectada e a respectiva imagem linearizada com as estrelas removidas.

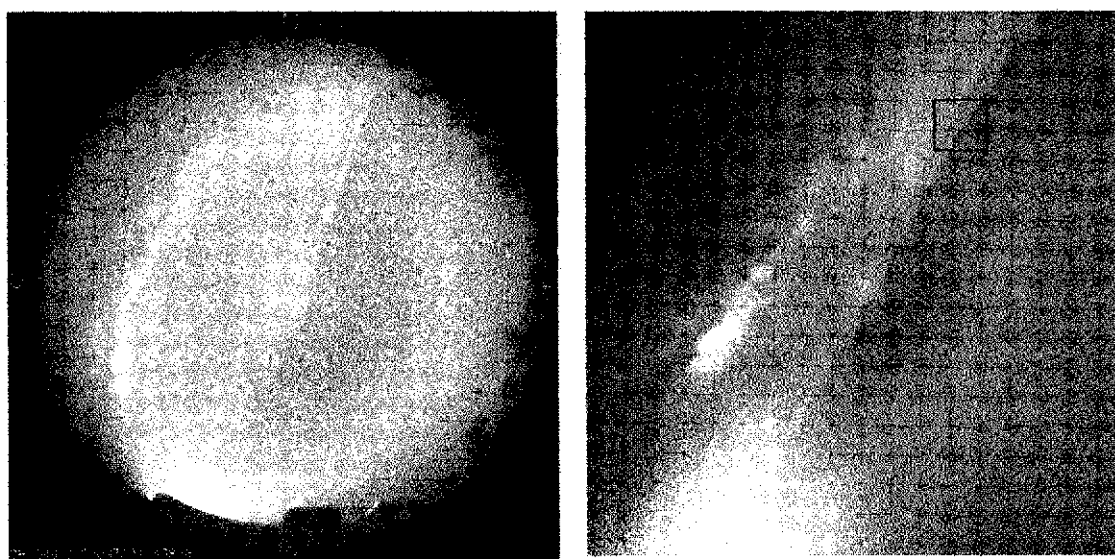


Fig. - 3.3 Imagem original (esquerda) e a imagem linearizada sem estrelas (direita) detectada no dia 30/09/2000 na cidade de S. J. do Cariri.

Após as imagens terem sido processadas, é possível determinar os parâmetros de onda utilizando a transformada de Fourier em duas dimensões. As ondas de gravidade presentes em qualquer parte da imagem são analisadas a partir da seleção da região de interesse e aplicando a FFT na parte selecionada.

A Figura 3.4 mostra o espectro com dois picos do evento selecionado. Os dois picos são devido a simetria da transformada de Fourier para dados reais, gerando assim uma ambigüidade em relação à direção de propagação. Para resolver este problema utiliza-se uma seqüência de imagens

com animação e o espectro temporal. Os picos mostrados na Figura 3.4 se encontram no segundo quadrante  $k_x = -0,35$  rad/km e  $k_y = 0,25$  rad/km e no quarto quadrante  $k_x = 0,35$  rad/km e  $k_y = -0,25$  rad/km. Para determinar o comprimento de onda, deve-se calcular o inverso da distância do pico a origem, através da seguinte equação:

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Para este evento, o comprimento de onda detectado foi de 14,6 km e a direção de propagação (azimute) de  $116,57^\circ$ .

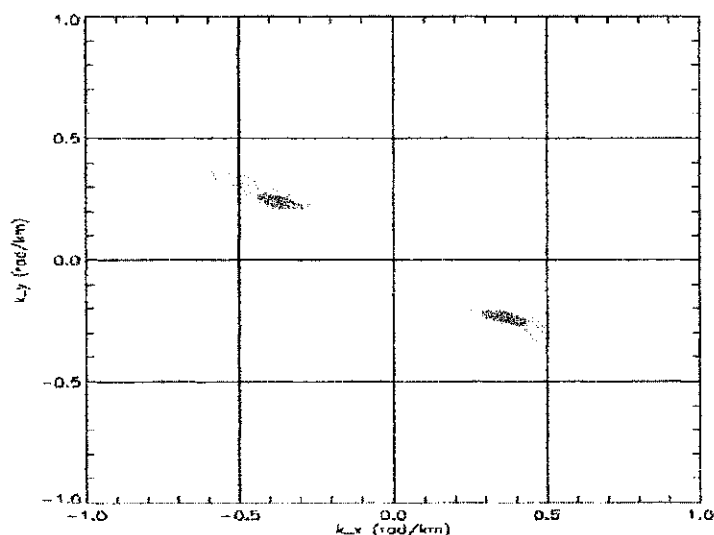


Figura 3.4 - Espectro em duas dimensões da área selecionada do evento de onda com 14,6km de comprimento de onda horizontal.

Na Figura 3.5 é apresentado o espectro em três dimensões. Para se determinar o período observado da onda é necessário calcular a FFT em uma

dimensão em relação ao tempo da FFT em duas dimensões no espaço. Neste caso, a FFT não apresenta simetria, porque os dados são complexos, logo o sinal de pico dá a direção do movimento. Os vales e picos estão bem definidos, porém, não tão lineares como em 3 dimensões.

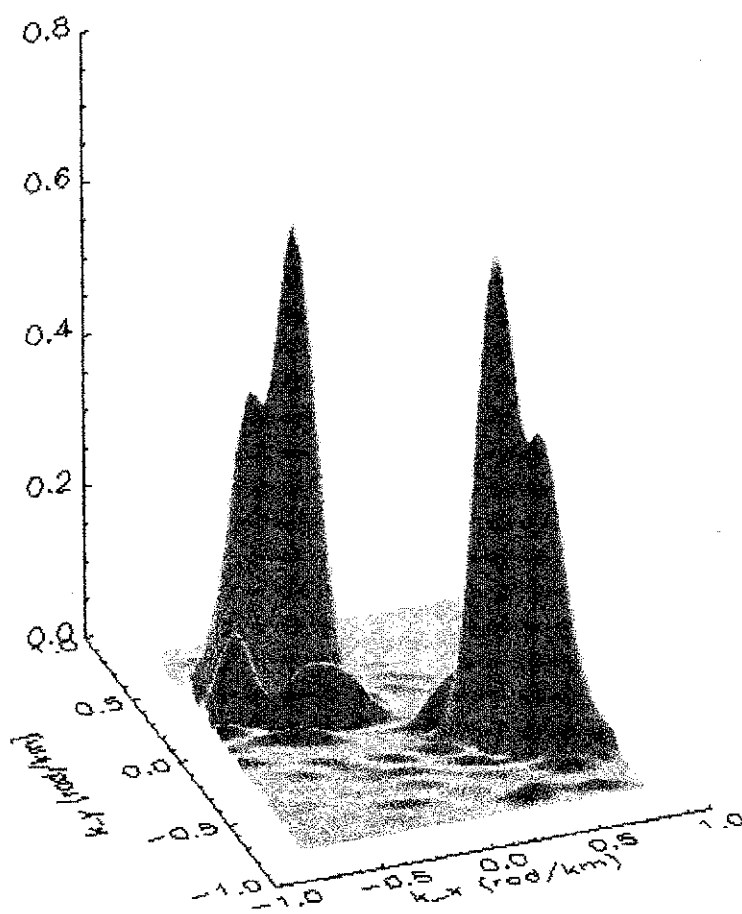


Figura 3.5- Espectro em três dimensões da área selecionada do evento de onda.

Na Figura 3.6 observa-se o espectro temporal com pico em aproximadamente  $0,15 \text{ min}^{-1}$  que corresponde a um período observado de  $6,67$

minutos para uma série de 7 imagens. O valor positivo do período resolve a ambigüidade da direção no caso da determinação do comprimento de onda.

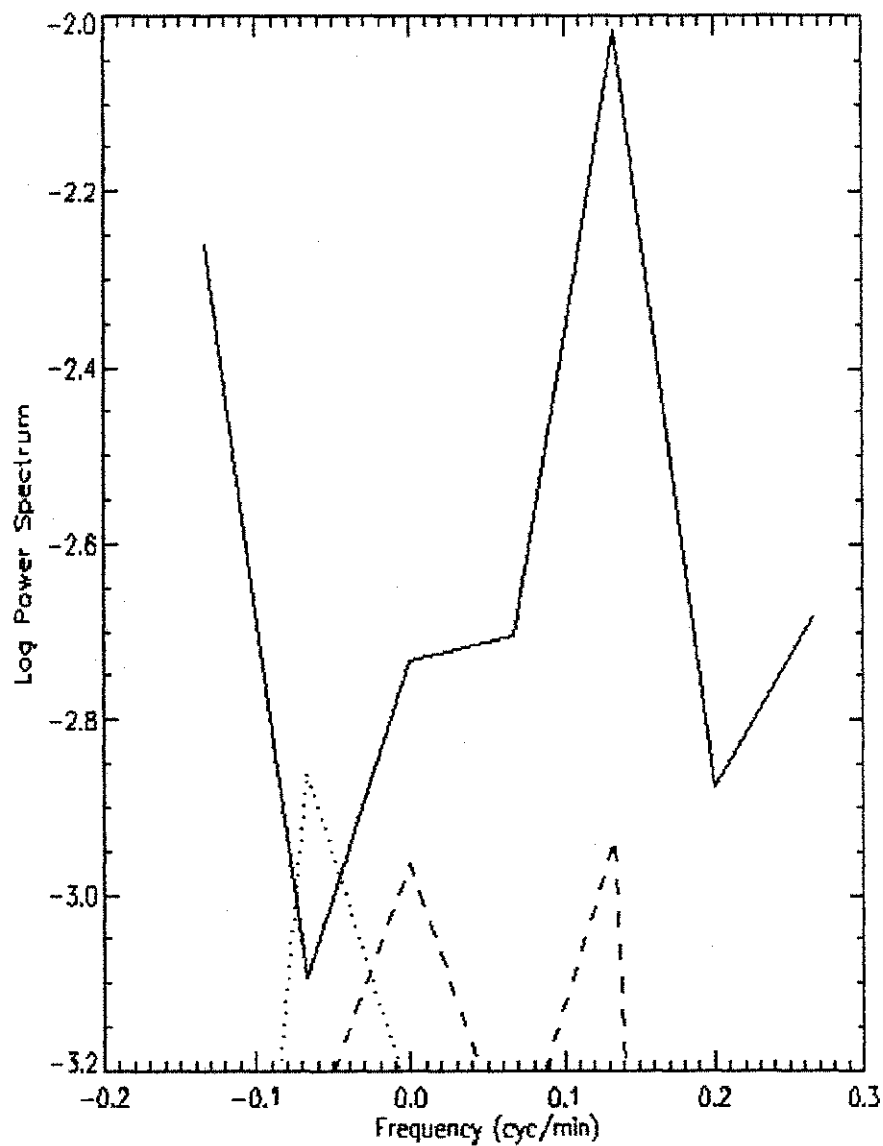


Figura 3.6 - Espectro temporal (linha sólida) mostrando um pico máximo em aproximadamente  $0,15 \text{ min}^{-1}$ , que corresponde a um período observado de 6,67 min. As outras linhas tracejadas e pontilhadas são picos secundários.

## 4 - A HIDROXILA (OH) E AS BANDAS DE MEINEL

### 4.1 - O espectro de OH do estado fundamental eletrônico $^2\Pi$

Dentro do estado eletrônico fundamental  $^2\Pi$  ocorrem transições vibracionais e rotacionais que resultam em emissões do OH as quais são observadas através de instrumentos óticos, como por exemplo, fotômetros e, imageadores com CCD. Estas emissões são denominadas de bandas de Meinel e têm sido observadas na luminescência noturna desde sua identificação espectroscópica por Meinel (1950). Elas podem ser utilizadas em diversas finalidades como, por exemplos, a compreensão das cadeias catalíticas na química do ozônio mesosférico, no cálculo da temperatura rotacional e na investigação da dinâmica da mesosfera.

### 4.2 – Termo de energia vibracional ( $v$ )

Quando se considera a aproximação do oscilador anarmônico, o termo de energia vibracional do OH é dado por:

$$G(v) = 3737,9 (v + 1/2) - 84,965 (v + 1/2)^2 + 0,5398 (v + 1/2)^3 - 0,0011637 (v + 1/2)^4 + \dots \quad (4. 1)$$

onde  $v$  é o nível vibracional da molécula e a energia vibracional  $G(v)$ , é dada em  $\text{cm}^{-1}$ . A Tabela 4.1 mostra as constantes vibracionais (fatores numéricos multiplicativos calculados por Coxon e Foster (1982)).

**TABELA 4.1 - TERMOS VIBRACIONAIS DO OH EM  $\text{cm}^{-1}$ .**

$v$	$G(v)$	$B(v)$	$Y(v)$	$D(v)$
0	1847,73	18,5504	-7,496	0,00191
1	5417,40	17,8386	-7,810	0,00187
2	8821,41	17,1363	-8,146	0,00183
3	12061,77	16,4409	-8,506	0,00180
4	15139,55	15,7491	-8,895	0,00178
5	18054,85	15,0567	-9,318	0,00176
6	20806,55	14,3588	-9,781	0,00177
7	23392,03	13,6492	-10,293	0,00178
8	25806,72	12,9169	-10,869	0,00180
9	28043,78	12,1517	-11,536	0,00186

FONTE: Coxon e Foster (1982), p. 45.

### 4.3 – Termo de energia Rotacional ( $J$ )

O cálculo de cada nível rotacional  $J$  dentro de um nível vibracional  $v$  é feito pelo uso das fórmulas de Hill e Van Vleck (Herzberg, 1950):

$$F_1(J) = B_v[(J + 1/2)^2 - A^2 - (1/2)(4(J + 1/2)^2 + Y_v(Y_v - 4) \cdot A^2)^{1/2}] - D_v J^4, \quad (4.2)$$

$$F_2(J) = B_v[(J + 1/2)^2 + A^2 - (1/2)(4(J + 1/2)^2 + Y_v(Y_v - 4) \cdot A^2)^{1/2}] - D_v (J+1)^4, \quad (4.3)$$

A equação (4.2) refere-se ao estado eletrônico  $^2\Pi_{3/2}$  e a equação (4.3) ao estado  $^2\Pi_{1/2}$ . Na Tabela 4.2 são apresentados alguns valores calculados

de  $F_1(J)$  e  $F_2(J)$  usando valores da tabela 4.1.  $B_v$ ,  $Y_v$  e  $D_v$ , cujos valores são mostrados na Tabela 4.1, são termos relacionados com as constantes vibracionais. O parâmetro  $A$  nas equações 4.2 - 4.3 representa a componente do momento angular orbital eletrônico ao longo do eixo internuclear, no nosso caso  $A=1$ .

**TABELA 4.2 - TERMOS DE ENERGIA ROTACIONAL DE  $v=0$  ATÉ 9 E MOMENTO ANGULAR ELETRÔNICO IGUAL A  $3/2$  ( $i=1$ ) e  $1/2$  ( $i=2$ )**

$v$	$F_1(1/2)$	$F_1(3/2)$	$F_1(5/2)$	$F_1(7/2)$	$F_1(9/2)$	$F_1(11/2)$	$F_1(13/2)$
0	-88,08	-38,11	45,81	164,31	317,87	506,80	731,20
1	-87,50	-39,29	41,63	155,81	303,69	485,55	701,49
2	-86,93	-40,46	37,49	147,40	289,67	464,55	672,13
3	-86,36	-41,62	33,37	139,04	275,75	443,71	643,00
4	-85,79	-42,79	29,26	130,70	261,87	422,93	613,98
5	-85,21	-43,95	25,13	122,34	247,94	402,11	584,89
6	-84,58	-45,09	20,98	113,89	233,88	381,06	555,49
7	-83,89	-46,22	16,77	105,31	219,57	359,65	525,57
8	-83,11	-47,33	12,48	96,48	204,81	337,54	494,66
9	-82,24	-48,45	8,01	87,24	189,35	314,37	462,27

$v$	$F_2(1/2)$	$F_2(3/2)$	$F_2(5/2)$	$F_2(7/2)$	$F_2(9/2)$	$F_2(11/2)$	$F_2(13/2)$
0	88,07	149,33	250,64	391,14	570,02	786,57	1040,18
1	87,49	146,24	243,43	378,30	550,08	758,10	1001,76
2	86,92	143,20	236,35	365,67	530,45	730,05	963,90
3	86,35	140,19	229,34	353,18	511,03	702,29	926,41
4	85,78	137,20	222,39	340,77	491,73	674,70	889,13
5	85,20	134,21	215,45	328,38	472,45	647,11	851,84
6	84,57	131,17	208,43	315,88	453,00	619,27	814,20
7	83,89	128,04	201,28	303,17	433,23	590,99	775,94
8	83,10	124,75	193,85	290,02	412,82	561,78	736,45
9	82,23	121,28	186,07	276,27	391,47	531,22	695,09

A energia em  $\text{cm}^{-1}$  de um nível vibra-rotacional pode ser calculada pela equação:

$$GF_i(v', J) = G(v') + F_i(J) \quad (4.4)$$

onde o primeiro termo se refere a energia vibracional, e o segundo a energia rotacional.

A equação (4.4) é utilizada para calcular a energia de transição entre dois níveis vibra-rotacional, para isso, ela é aplicada em dois estados distintos. É válida a regra de seleção com relação a conservação do momento angular total  $J$  ( $J'' - J' = \Delta J = 0, \pm 1, \dots$ ) e, conseqüentemente, os ramos  $P, Q$  e  $R$  são originados e classificados como se segue:

a) Ramo  $P, \Delta J = 1$

$$\sigma_{1,2}(v', v'', J) = GF_{1,2}(v', J) - GF_{1,2}(v'', J'+1) \equiv P_1(J'+1/2) \text{ ou } P_2(J'+3/2), \quad (4.5)$$

b) Ramo  $Q, \Delta J = 0$

$$\sigma_{1,2}(v', v'', J) = GF_{1,2}(v', J) - GF_{1,2}(v'', J) \equiv Q_1(J'-1/2), Q_2(J'+1/2), \quad (4.6)$$

c) Ramo  $R, \Delta J = -1$

$$\sigma_{1,2}(v', v'', J) = GF_{1,2}(v', J) - GF_{1,2}(v'', J'-1) \equiv R_1(J'-3/2), R_2(J'-1/2), \quad (4.7)$$

onde os subscritos 1 e 2 referem-se aos estados  ${}^2\Pi_{3/2}$  e  ${}^2\Pi_{1/2}$ , respectivamente; e os sobrescritos 'e' referem-se aos estados inicial e final da transição.



Utilizando-se as equações (4.5), (4.6) e (4.7), é possível calcular o valor, em  $\text{cm}^{-1}$ , de cada transição rotacional do nível vibracional  $v'=6$  para  $v''=2$  dentro do OH (6,2). O resultado apresentado em Angstrom ( $\text{\AA}$ ), e corrigido para o ar, é calculado quando se utiliza a equação dada pelo Almanaque de Ciência do Observatório Astronômico da Universidade de Tóquio (1970), qual seja:

$$\lambda_{\sigma} = \frac{1}{\left\{ 10^{-8} + \left[ \left( 6.432,8 + \frac{2.949.810}{(146 - \sigma_{1,2}^2 \cdot 10^{-14})} + \frac{25.540}{(41 - \sigma_{1,2}^2 \cdot 10^{-14})} \right) \right] \right\} \sigma_{1,2}}$$

Algumas transições entre níveis vibra-rotacionais e o significado de cada termo P, Q e R são mostrados na Figura 4.1.

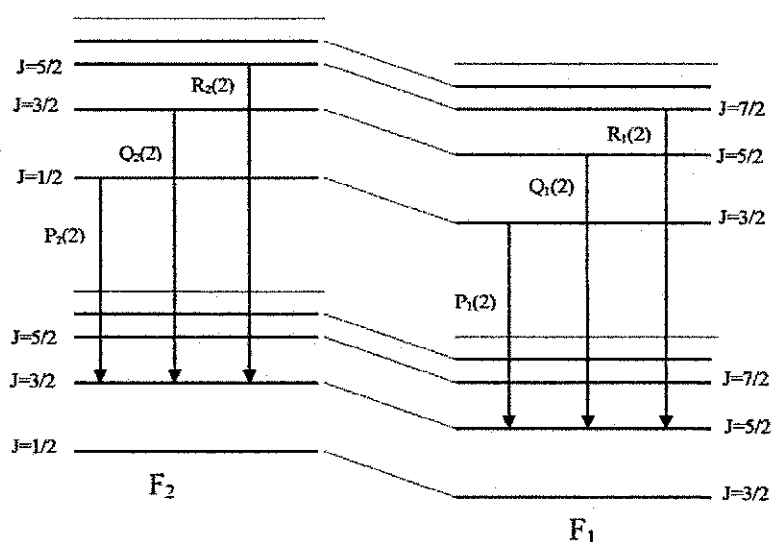


Fig. 4.1 – Representação entre várias transições vibra-rotacionais

A Tabela 4.3 mostra as principais linhas de emissão calculadas do OH.

**TABELA 4.3- LINHAS DE EMISSÃO DO OH (6,2), EM ANGSTRON,  
CALCULADO VIA EQUAÇÕES (4.5) - (4.8)**

$J'$	P1	Q1	R1	P2	Q2	R2
1 $\downarrow$ 2	-	-	-	8379,29	8339,94	-
3 $\downarrow$ 2	8398,25	8398,25	-	8412,12	8346,75	8307,63
5 $\downarrow$ 2	8427,19	8297,82	8295,77	8449,15	8357,77	8293,17
7 $\downarrow$ 2	8462,95	8361,68	8285,49	8490,30	8372,96	8283,34
9 $\downarrow$ 2	8501,42	8377,32	8277,85	8535,61	8392,54	8277,98
11 $\downarrow$ 2	8592,13	8396,79	8275,71	8585,16	8403,80	8336,86
13 $\downarrow$ 2	8594,21	8420,25	8275,51	8639,07	8443,77	8209,34
15 $\downarrow$ 2	8650,35	8447,76	8279,62	-	-	8287,55

#### 4.4 – Intensidades das Linhas de Emissão das Transições Vibra-rotacionais

A intensidade da linha de emissão é calculada por:

$$I(J', v', i' \rightarrow J'', v'', i'') = N(J', v', i') A(J', v', i' \rightarrow J'', v'', i'') \quad (4.9)$$

A intensidade de uma linha de emissão é proporcional ao número de estados no nível  $(v', J')$ ,  $N(J', v', i')$  e à probabilidade de transição destes estados para os de níveis inferiores,  $A(J', v', i' \rightarrow J'', v'', i'')$ .

A expressão que calcula a intensidade de cada linha de emissão em  $\text{fótons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ , leva em consideração que as moléculas se comportam de acordo com a distribuição de Boltzmann e as transições entre diferentes “ $i$ ” são proibidas para o OH devido à conservação de “spin” da molécula é dada por:

$$I(J', v', i' \rightarrow J'', v'', i'') = C_v A(J', v', i' \rightarrow J'', v'', i'') \frac{[2(2J' + 1)]}{Q_v} \exp\left\{\frac{-hcF_i(J', v')}{k_B T}\right\} \quad (4.10)$$

onde,

$$Q_v = \sum_{J', i'=1,2} 2(2J'+1) \exp\left(\frac{-hcF_{i'}}{k_B T}\right) \quad (4.11)$$

é conhecida como função de partição.

Modelos teóricos para cálculo de  $A(J', v', i' \rightarrow J'', v'', i'')$  são fornecidos por Mies (1974) e por Turnbull e Lowe (1989). As constantes  $c$ ,  $h$ ,  $T$ , e  $k_B$  são respectivamente, velocidade da luz no vácuo, constante de Planck, temperatura e a constante de Boltzmann. As constantes  $C_{v'}$  e  $F$  representam a concentração de OH no estado vibracional  $v'$  e a energia rotacional, respectivamente.

Normalmente se usa o valor de intensidade normalizada, que corresponde ao valor de cada linha de emissão dividida pela soma total das linhas dentro da banda, no nosso caso, OH (6,2), e é dada por:

$$I'_\alpha = \frac{I_\alpha}{\sum_\alpha I_\alpha} \quad (4.12)$$

onde  $I$  é a intensidade de cada emissão calculada via equação (4.10). Os valores das intensidades normalizadas para algumas linhas apresentadas na Tabela 4.3 são mostrados na Tabela 4.4.

A Figura 4.5 mostra o espectro de luminescência noturna para comprimentos de onda entre 3000 e 9000 Å com as principais bandas de emissão do OH, inclusive o OH (6,2) e do oxigênio molecular. Pode ser visto também várias linhas de emissão, tais como: OI5577 Å, NaD e OI6300 Å. Nesta figura é

possível localizar a região do espectro onde estão situadas as linhas de emissão do OH (6,2), para calcular a intensidade da banda e a temperatura rotacional. O processo para calcular o espectro de outras bandas de emissão do OH é semelhante ao que foi descrito para o OH (6,2).

**TABELA 4.4 - INTENSIDADE NORMALIZADA DAS PRINCIPAIS LINHAS DO OH (6,2) COM  $T=200$  K CALCULADAS POR MEIO DOS PARÂMETROS DE TURNBULL E LOWE (1989) E USANDO AS EQUAÇÕES (4.11) E (4.12)**

$J'$	Ramo $P_1$	ramo $Q_1$	ramo $R_1$	ramo $P_2$	ramo $Q_2$	ramo $R_2$
1/2	...	...	...	0,032408	0,016414	...
3/2	0,113545	0,161599	...	0,040496	0,004944	0,02174
5/2	0,119873	0,058507	0,064713	0,031368	0,001927	0,02086
7/2	0,079973	0,019529	0,054214	0,01728	0,000683	0,001244
9/2	0,038988	0,005642	0,028549	0,007095	0,000205	0,005297
11/2	0,014498	0,001366	0,010963	0,00222	0,00005	0,001684
13/2	0,00419	0,000277	0,003205	0,000538	9,6E-06	0,00041
15/2	0,00095	0,000046	0,000728	0,000102	1,5E-06	0,000077

Na Figura 4.4 é mostrado o espectro teórico das principais linhas de emissão do OH (6,2) para uma temperatura de 200 K utilizando os coeficientes de Einstein calculados por Turnbull e Lowe (1989). (Ver Equação 4.12)

Na figura 4.5 é possível localizar a região do espectro onde estão situadas as linhas de emissão do OH (6,2) medidas por fotômetro (FOTOH) para calcular a intensidade da banda e a temperatura rotacional.

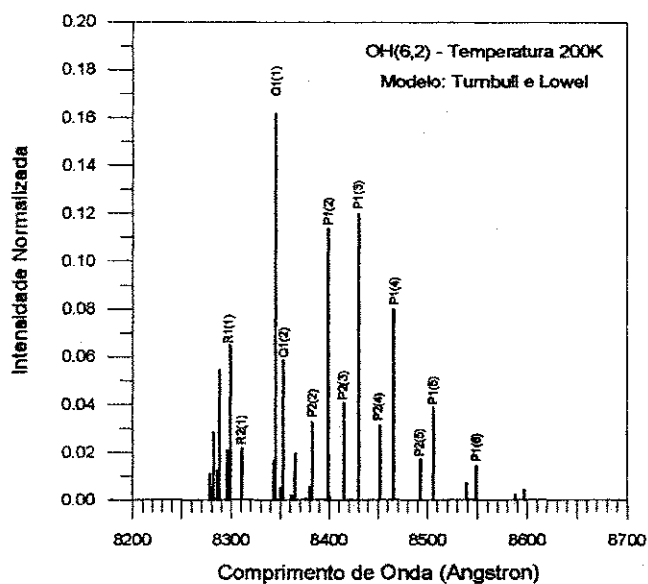


Fig. 4.2 - Principais linhas de emissão do OH (6,2) devido às transições vibrato-rotacional.

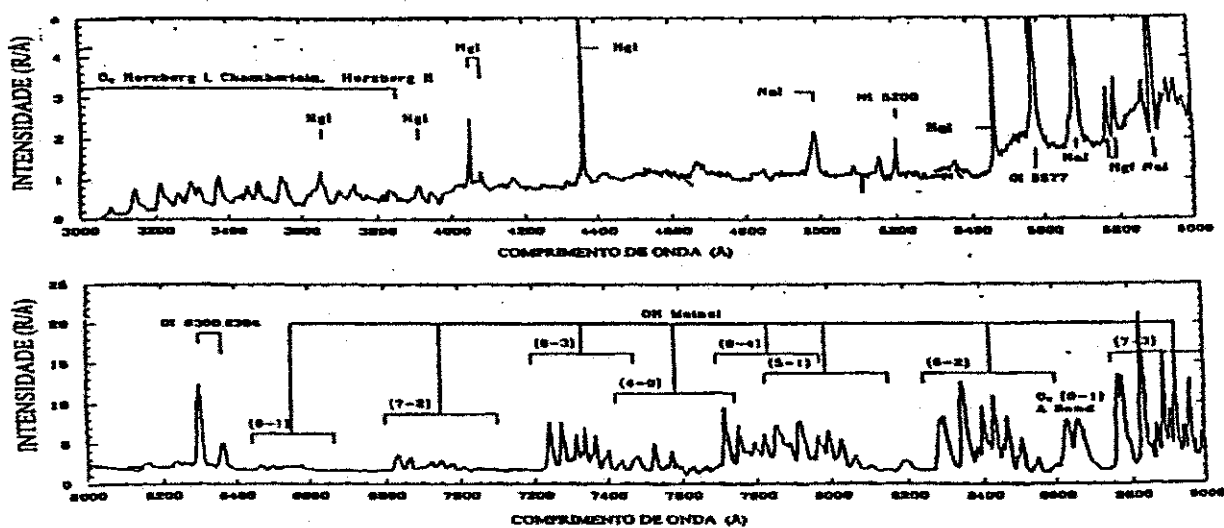


Fig. 4.3 - Espectro de luminescência mostrando as principais linhas de emissão.

FONTE: Johnston e Broadfoot (1993), p.21595

#### 4.4 – Fotoquímica do OH

Meinel (1950) foi o primeiro a investigar a luminescência noturna devido a molécula do  $\text{OH}^*$ . A identificação da reação exotérmica  $\text{H} + \text{O}_3$  como a principal fonte de excitação desta emissão, e também como maior sumidouro de ozônio na região da mesopausa foi feita por Bates e Nicolet (1950).

Posteriormente, muitos outros trabalhos relacionados sobre o assunto foram feitos (Mies, 1974; Llewellyn et al., Coxon, 1980, McDade e Llewellyn, 1988).

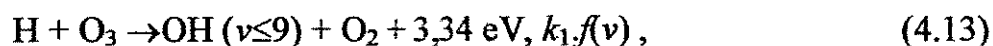
Esta reação, envolvendo H e  $\text{O}_3$ , consegue povoar apenas os níveis vibracionais 7, 8 e 9 (Murphy, 1971). Para níveis mais baixos, a excitação vibracional ainda é tema de discussão. Para Nicolet (1970) e Krassovsky (1972), a reação  $\text{O} + \text{HO}_2$  pode ser uma fonte secundária para excitar níveis até  $v = 6$ . Streit e Johnston (1976) propuseram o mecanismo denominado *cascata colisional* onde o  $\text{OH}^*$  colide com O,  $\text{O}_2$  ou  $\text{N}_2$ , desativando os níveis superiores para o seguinte mais baixo. Segundo McDade e Llewellyn (1987 e 1988) o nível  $v \leq 9$  não é fonte para qualquer outro nível vibracional do  $\text{OH}^*$ . Este processo é denominado *morte súbita* (“sudden death”). Uma das maneiras de descobrir se o mecanismo de excitação do OH é devido a um único processo ou não, é realizar medidas simultâneas das intensidades de várias bandas (Takahashi e Batista, 1981).

As bandas de Meinel, se originam das transições vibra-rotacionais dentro do estado eletrônico fundamental do OH, o estado  $^2\Pi$ . As transições entre dois níveis vibracionais encontram-se na faixa do infravermelho e entre dois níveis rotacionais, na faixa de microondas. Segundo Meinel (1950), as transições vibra-rotacionais emitem radiação entre 520 nm e 2,7  $\mu\text{m}$ . As bandas mais

intensas são aquelas onde  $\Delta v = 2$  e estão localizadas entre os comprimentos de onda de 1,43  $\mu\text{m}$ , que corresponde a região do OH (2,0) e 2,15  $\mu\text{m}$ , correspondente a banda OH (9,7). Medidas obtidas por foguetes (Watanabe et al., 1981; Lopez-Moreno et al., 1985; Greer et al., 1986) têm revelado que estas emissões se originam na mesopausa, entre 80 e 95 km de altitude e o pico de emissão se localiza entre 85 e 90 km e que depende do estado vibracional ( $v$ ) do OH. A espessura dessa camada está em torno de 10 km. É fato que as bandas de Meinel contêm informações sobre a densidade de oxigênio nesta altitude, porém, a falta de conhecimento sobre o verdadeiro mecanismo de reação e a falta de coeficientes de reações mais precisos dificulta a obtenção da real densidade do oxigênio atômico.

#### 4.5 - Mecanismos de Reação

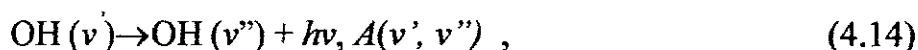
De acordo com Bates e Nicolet (1950) a maior fonte de energia radiante do OH, é a reação:



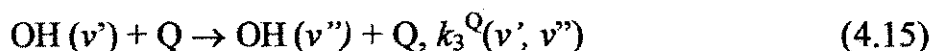
onde  $k_1$  é a taxa de reação (parâmetro necessário para cálculo de produção e perdas),  $f(v)$  é a produção fracional do nível  $v$  e 3,34 eV é a energia liberada nesta reação. Como  $v = 9$  é o nível mais alto que pode ser excitado pela reação (4.13), não existe, assim, nenhuma fonte indireta de  $v \geq 9$ .

Níveis de energia abaixo de  $v = 9$  podem ser excitados por outros processos, ou através de *cascata radiativa*, reação (4.14), ou processos de

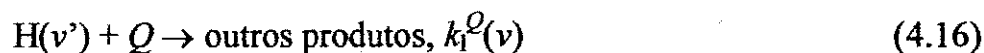
transferência de energia vibracional, ou *cascata colisional*, reação (4.15), ou seja:



onde  $hv$  é a energia do fóton emitido no decaimento vibracional de  $v'$  para  $v''$  e  $A(v', v'')$  é o coeficiente de transição de  $v'$  para  $v''$ . Para o caso de cascata colisional:



onde  $k_3^Q(v', v'')$  é o parâmetro que representa o decaimento via colisão de  $v'$  para  $v''$ ,  $Q$  são as moléculas envolvidas neste processo, ou seja,  $\text{O}_2$  e  $\text{N}_2$ . A compreensão das regras que regem as reações (4.14) e (4.15) para excitar níveis mais baixos, é um dos principais problemas da aeronomia nas Bandas de Meinel. Outra dificuldade é com relação aos processos colisionais que removem parcial ou totalmente os níveis excitados do OH, ou seja:



onde  $Q$  pode ser, além do  $\text{O}_2$  e  $\text{N}_2$ , o  $\text{O}$ . Caso a reação (4.16) venha apresentar como produto de reação o  $\text{OH}(v=0)$  então denominamos esta reação de *morte súbita*.

#### 4.6 - Cálculo da Taxa Volumétrica do OH (6,2)



Para calcular a taxa de emissão volumétrica,  $V(6,2)$ , do OH (6,2) é necessário supor que existe um equilíbrio fotoquímico entre a produção (P) e perda (L) de OH(6) para uma altitude fixa. Considerando que  $[OH(6)]$  é a concentração do OH (6), tem-se:

$$\frac{d[OH(6)]}{dt} = P - L = 0 \quad (4.17)$$

A concentração da molécula OH no estado vibracional  $v = 6$  pode ser produzida via reação (4.13), por decaimento radiativo de  $v = 9$ ,  $v = 8$  ou  $v = 7$ , reação (4.14), e por colisão com  $O_2$  e  $N_2$ , reação (4.15). Já as perdas, segundo McDade e Llewellyn (1988), são devidas ao próprio decaimento espontâneo e às colisões com outras partículas, tais como, oxigênio atômico e molecular e  $N_2$ .

A taxa de emissão do OH (6,2) é dada por:

$$V(6,2) = A(6,2) [OH(6)], \quad (4.18)$$

onde  $A$  é a probabilidade de transição entre os níveis  $v=6$  e  $v=2$ . Utilizando-se das Equações (4.13) a (4.17) pode-se escrever que a variação da concentração de OH (6) é dada por:

$$\frac{d[OH(6)]}{dt} = f(6)k_1[O_3][H] + \sum_{v=7}^9 A(v,6)[OH(v)] + \sum_{v=7}^9 [OH(v)] \left\{ \sum_{Q=O_2, N_2} k_3^Q(v,6)[Q] \right\} - A(6)[OH(6)] - [OH(6)] \sum_{Q=O, O_2, N_2} k_L^Q(6)[Q] = 0, \quad (4.19)$$

Onde  $A(6)$  é o inverso do tempo de vida do  $v = 6$ ,  $k_L^Q(v)$  representa o coeficiente de taxa total para decaimento colisional do OH( $v$ ) por espécies "Q"

em (4.16). A Equação (4.19) deve ser igual a 0 (zero) para que a produção de [OH] seja igual à perda. O primeiro termo do lado direito de (4.19) está relacionado com a Equação (4.13), o segundo e o quarto termos vêm de (4.14) e o terceiro e o quinto termos vêm de (4.15). Assim, utilizando-se a Equação (4.19) pode-se obter a expressão para a concentração do OH (6,2), qual seja:

$$[\text{OH}] = \frac{f(6)k_1[\text{O}_3][\text{H}] + \sum_7^9 A(v,6)[\text{OH}(v)] + \sum_7^9 [\text{OH}(v)] \left\{ \sum_{\text{Q}=\text{O}_2, \text{N}_2} k_3^{\text{Q}}(v)[\text{Q}] \right\}}{A(6) + \sum_{\text{Q}=\text{O}_2, \text{N}_2} [\text{Q}]} \quad (4.20)$$

A taxa de emissão é obtida levando-se a Equação (4.20) na Equação (4.18).

As expressões de concentração do OH para o [OH (9)] e o [OH (8)] são apresentas no Apêndice B.

## 5 - RESULTADOS

Os dados referentes a este trabalho foram obtidos pelo imageador “all-sky” que foi instalado no Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba (OLAP) localizado na cidade de São João do Cariri - PB ( $7^{\circ}23'S$ ;  $36^{\circ}32'O$ ). Este equipamento tem operado neste Observatório desde outubro de 2000, adquirindo imagens da luminescência atmosférica em várias regiões espectrais, devido aos vários constituintes atmosféricos tais como: OH, O<sub>2</sub> atmosférico, OI5577, OI6300 e NaD. Devido à intensidade de cada emissão, o tempo de exposição para aquisição de cada imagem varia. Por exemplo, para o OH o tempo que o “shutter” (diafragma) fica aberto para coletar a luz vinda desta emissão, é de 15 segundos porém, para as outras emissões, o tempo de aquisição de imagens é de 90 segundos. Como o imageador adquire imagens de outras emissões, a resolução temporal das imagens do OH é de ~ 3 minutos.

Neste trabalho, foram utilizados imagens adquiridas entre setembro de 2000 e agosto de 2001. Entretanto, no mês de março de 2001 não houve aquisição devido a um problema eletrônico que ocorreu com o equipamento. Portanto, o número de meses de dados coletados para este trabalho é de 11 meses. A qualidade das imagens era de fundamental importância para o aproveitamento neste trabalho. Imagens com presença de nuvens que pudessem comprometer a análise eram descartadas. Além disso, todas as observações foram realizadas no período de lua nova, ou seja, as imagens eram adquiridas durante 13 noites, 7 antes da lua nova e 6

vezes depois da lua nova. De 132 noites observadas, 78 apresentaram um total de 327 eventos (“ripples” e bandas), dando uma média de 4,2 eventos por noite.

### 5.1 - Bandas e “ripples”

As ondas de gravidade foram classificadas em dois tipos, as bandas e os “ripples”. As bandas têm como característica principal, ocupar uma região do céu bem maior que os “ripples”, além de sua permanência no céu durar até algumas horas e seu comprimento de onda ficar em torno de dezenas e centenas de quilômetros. Por outro lado, os “ripples” têm uma duração de permanência no céu bem menor e seu período pode variar de alguns minutos até dezenas de minutos. Pode-se dizer que o imageador é um equipamento capaz de detectar eventos de ondas com períodos de até uma hora e comprimentos de onda de até 100 km. Ondas de gravidade com dimensões maiores do que estas apresentadas acima podem ser detectadas por outros instrumentos óticos ou até mesmo por radar.

Exemplos de bandas e “ripples” são mostrados na Figura 5.1.

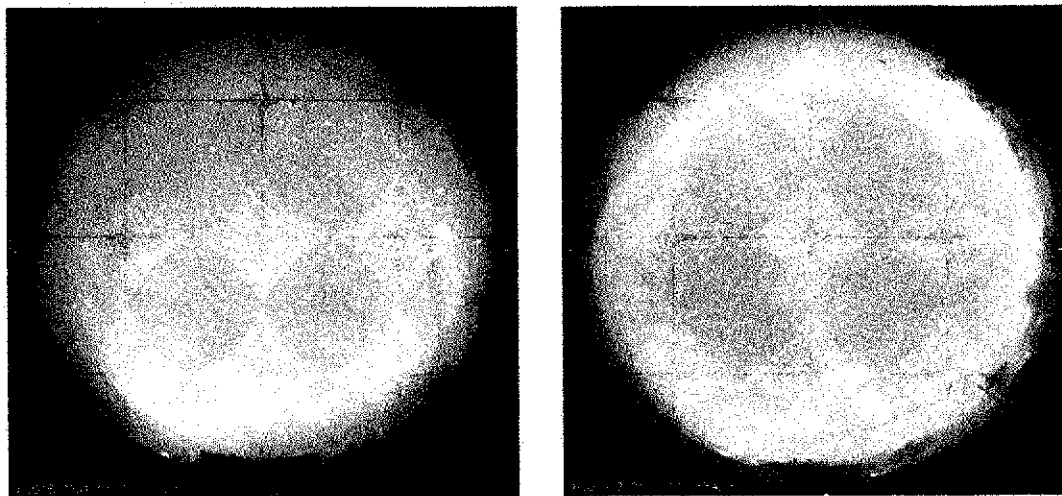


Fig. 5.1 – Dois exemplos de imagens de ondas de gravidade registradas no OH, mostrando “ripples” (a esquerda no centro da imagem) e bandas (direita).

Estas imagens foram obtidas com o imageador all-sky instalado em São João do Cariri. É possível notar uma clara diferença entre estes eventos, porém, deve-se ressaltar que o que mais distingue uma banda de um ripple é o seu tempo de permanência no céu.

Figura 5.2 mostra a distribuição em termos de porcentagens de bandas e “ripples” detectadas em S. J. do Cariri, no período relativo a este trabalho.

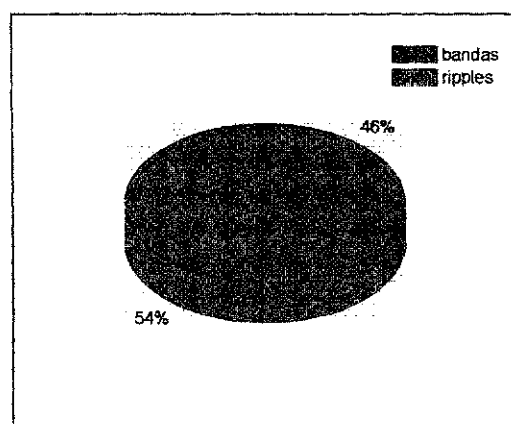


Fig. 5.2 – Valores percentuais das bandas e dos “ripples” observados em S.J do Cariri no período de setembro (2000) a agosto (2001).

Foram detectados 326 eventos, dos quais 45,9% foram bandas e 54,1% “ripples”. A Tabela 1 do apêndice mostra uma distribuição mais detalhada dos eventos observados, onde pode ser notado que, em algumas noites, aparecem bandas e “ripples” até mesmo simultaneamente.

A Figura 5.3 mostra a distribuição dos comprimentos de onda para as bandas e para os “ripples” em função dos números de eventos. Os dados foram agrupados em intervalos de comprimento de onda de 5 km para determinar as escalas horizontais mais frequentes. Nela, observa-se que os “ripples” (Figura 5.3.a) apresentam uma forte tendência de terem comprimentos de onda entre 10 km e 15 km, o que representa aproximadamente 56,5% de todos “ripples” detectados, embora eles tenham apresentado valores entre 0-25km.

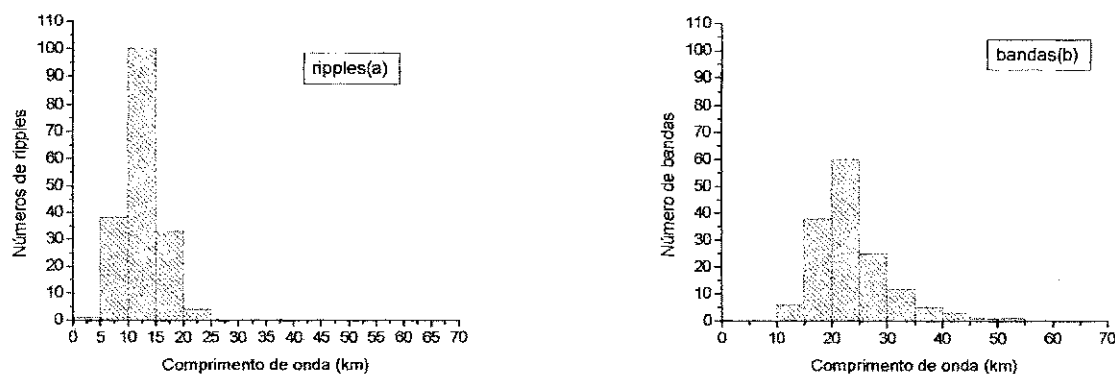


Fig. 5.3 – Histogramas mostrando a distribuição do comprimento de onda horizontal para os “ripples” (a) e para as bandas (b) em função do número de eventos.

A distribuição das bandas (Figura 5.3.b) apresentou variação maior que a dos “ripples”, pois os comprimentos observados ficaram entre 10 km e 55 km, com a maioria dos eventos entre 15 km e 30 km e pico entre 20-25 km o que representa aproximadamente 40,6% de todas as bandas detectadas. O comprimento de onda médio para as bandas apresentou o valor de 25 km e para os “ripples”, o valor médio de comprimento de onda foi 12,6 km.

Na Figura 5.4 são apresentados os resultados da distribuição dos períodos observados para os “ripples” e para as bandas.

Os valores nos histogramas da Figura 5.4 foram agrupados em intervalos de 5 minutos. Os “ripples” (Figura 5.4.a) formam uma distribuição menos acentuada que as bandas. Os valores da distribuição dos períodos observados para os “ripples” estão entre 0-35 min e pico entre 5 min e 10 min cujo valor corresponde a aproximadamente 56,6% de todos os “ripples” observados. As bandas (5.4.b), apresentaram um intervalo de período mais largo que os “ripples”, variando entre 0-55 minutos e apresentado pico entre 5 min e 10 min, que corresponde a 56,7% de todas as bandas observadas.

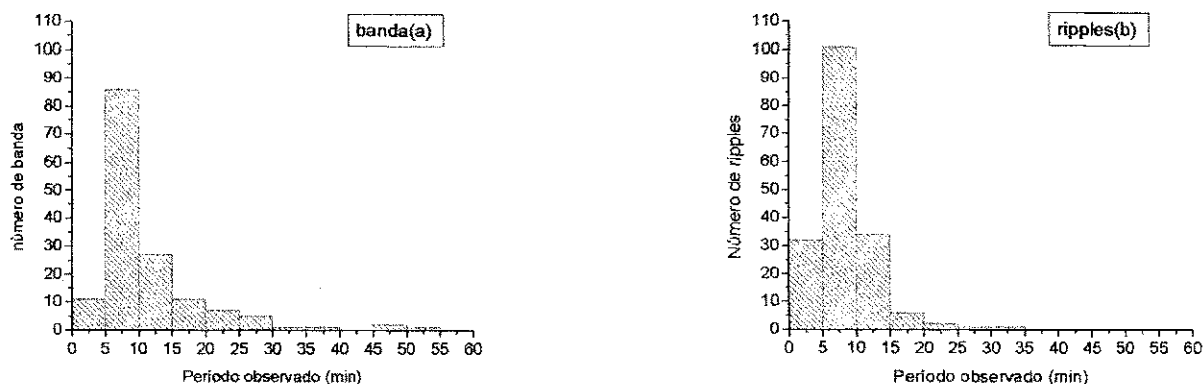


Fig. 5.4 – Histogramas da distribuição dos períodos observados dos “ripples” (b) e das bandas (a) em função do número de eventos.

Os “ripples” (Figura 5.4.b) apresentaram período observado médio de 8,3 minutos e as bandas (Figura 5.4.a) um valor médio de aproximadamente 10,9 minutos.

Neste trabalho, as medições produziram diretamente os valores de comprimento de onda horizontal ( $\lambda_h$ ), período observado ( $\tau_{obs}$ ) e direção de propagação ( $a_z$ ). Os valores de  $\lambda_h$  e  $a_z$  são parâmetros intrínsecos (próprios) da onda, enquanto  $\tau_{obs}$  é um valor aparente, que usualmente apresenta valores diferentes dos valores intrínsecos devido à influência do vento de fundo. A velocidade de fase observada ( $v_f$ ) é obtida da relação  $\lambda_h / \tau_{obs}$ .

A Figura 5.5 mostra a distribuição das velocidades de fase das bandas e dos “ripples”, cujos valores estão agrupados em intervalos de 10 m/s.

As velocidades de fase tanto das bandas (Figura 5.5.a) quanto dos “ripples” (Figura 5.5.b) apresentaram uma boa distribuição. Para as bandas elas variaram de 5 m/s a 105 m/s, apresentando um valor médio de 48 m/s. No caso dos “ripples”, a variação da velocidade de fase foi de 0-85 m/s, apresentado um valor médio de 30 m/s.

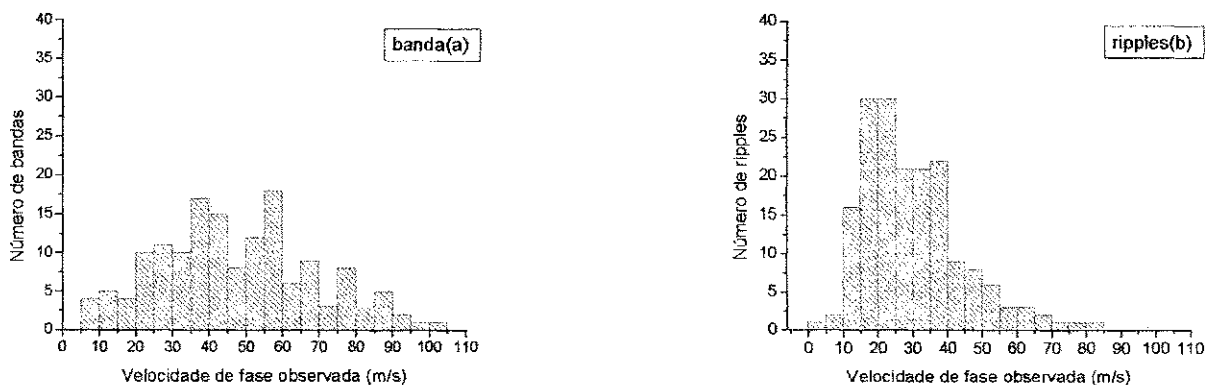


Fig 5.5 – Histograma mostrando a distribuição das velocidades de fase observadas para as bandas (5.5.a) e para os “ripples” (5.5.b) em função do número de eventos.

## 5.2 – Direção de propagação dos “ripples” e bandas observadas em São João do Cariri via imageador all-sky.

### 5.2.1 – “Ripples”:

De um total de 327 noites observadas, 78 apresentaram eventos de “ripples” no total de 177, o que deu uma média de 2,27 eventos por noite.

As direções preferenciais foram do azimute de  $0^\circ$  até  $60^\circ$ , ou seja, Nordeste, representando aproximadamente 23% do total de eventos. Porém, foram detectadas “ripples” em quase todas as direções. Tal comportamento pode ser visto na Figura 5.6 onde o histograma polar mostra a distribuição dos “ripples” com relação a sua direção de propagação. A ordenada do histograma representa o número de eventos ocorrido. A direção que prevaleceu foi entre os azimutes de  $45^\circ$  e  $60^\circ$ , perfazendo assim, um total de 14 eventos.

Para construir o histograma, classificou-se a direção de propagação (azimutes) agrupadas em intervalos de  $15^\circ$ .



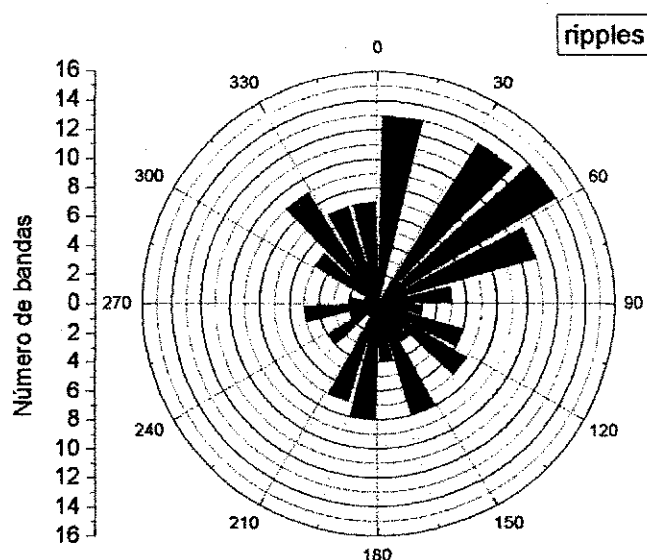


Fig. 5.6 – Histograma polar mostrando a distribuição da direção dos “ripples” detectados em S. J. do Cariri entre os meses de setembro de 2000 a agosto de 2001.

### 5.2.2 – Bandas

O número de bandas detectadas pelo imageador all-sky nestas 78 noites que apresentaram eventos de ondas foi menor que o de “ripples”, ou seja, 150 bandas foram detectadas dando um total de 1,92 banda por noite. Isto equivale a quase 85% do valor da média de “ripples” detectados. O comportamento destas bandas com relação a sua direção de propagação é bem diferente daquele apresentado pelos “ripples”. Nitidamente, as bandas apresentaram direção preferencial para leste. De 150 bandas, 131, ou seja, 87,3% apresentaram componentes de propagação na direção de oeste para leste. Este comportamento é mostrado na Figura 5.7 através do histograma polar da distribuição de propagação das bandas no período estudado. A direção de propagação das bandas entre os azimutes de  $15^\circ$  a  $165^\circ$  está bem uniforme no que diz respeito ao número de ocorrências dando uma média de 9 eventos para cada  $15^\circ$ . No geral, a propagação destas bandas é bem anisotrópica.

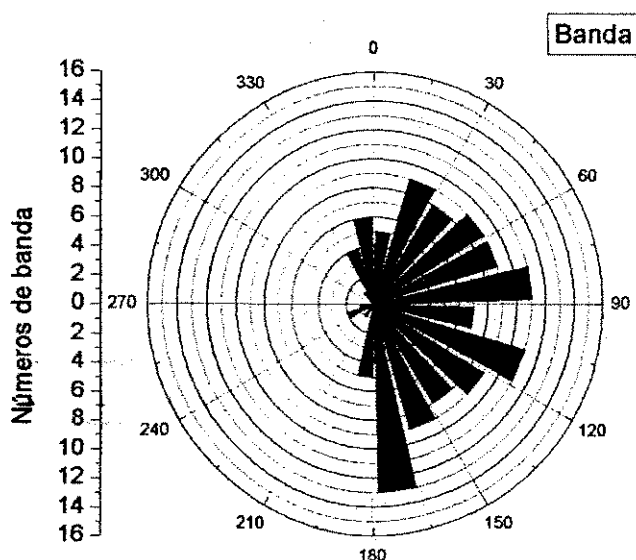


Figura 5.7 – Histograma polar mostrando a distribuição da direção das bandas detectadas em S. J. do Cariri entre os meses de setembro de 2000 a agosto de 2001.

### 5.3 – Comportamento sazonal dos “ripples” e bandas

No estudo da dinâmica da alta atmosfera, ou da atmosfera em geral, é importante a análise sazonal dos parâmetros físicos a fim de tentar construir um quadro representativo dos fenômenos em função dos meses do ano. Análises deste tipo foram realizadas com as bandas e os “ripples” a fim de obter informações da variabilidade sazonal para os meses observados.

A taxa média de evento de ondas de gravidade foi de 0,4 eventos/hora. As observações foram separadas em quatro estações: verão (novembro, dezembro, janeiro e fevereiro), inverno (maio, junho, julho e agosto), outono (março e abril) e primavera (setembro e outubro). Como já dito anteriormente, no mês de março não houve aquisição de dados e, portanto, no outono só foram utilizados dados do mês de abril.

A Figura 5.8 mostra a distribuição dos comprimentos de onda horizontal para as bandas em intervalos de 5 km de largura para cada estação.

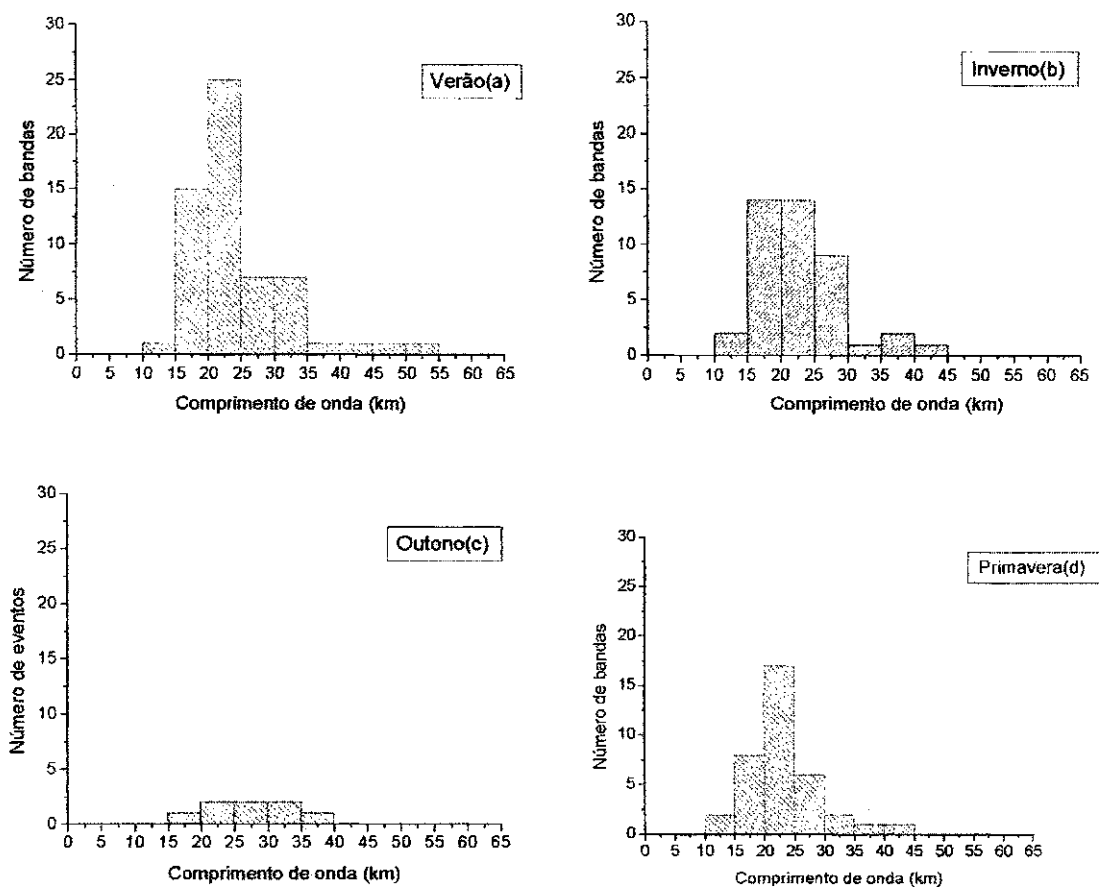


Figura 5. 8 – Histogramas mostrando a distribuição do comprimento de onda horizontal em função do número de eventos para as bandas. Verão (a), inverno (b), outono (c) e primavera (d).

Observa-se nos histogramas que o intervalo de comprimentos de onda horizontal para as quatro estações não apresentou diferenças significativas: no verão (5-8.a) o comprimento de onda horizontal apresentou valores de 10 km até 55 km com a maioria dos eventos tendo comprimento de onda entre 15 e 35 km com pico em 20-25 km; no inverno (Figura 5.8.b) de 5 km a 45 km com a maior parte dos eventos encontrando-se entre 15 km e 30 km, no outono (Figura 5.8.c) de 15 km a 40 km, mas com uma distribuição quase uniforme e na primavera (Figura 5.8.d) de 10 km a 45 km. Nota-se uma maior distribuição dos comprimentos de onda horizontal no verão, inverno e primavera. No outono, poucos eventos foram observados e na primavera a maior parte dos eventos se distribuiu entre 15 km e 30

km, com uma concentração bem acentuada entre 20 km e 25 km. Pode-se observar que no verão, inverno e na primavera o pico de comprimento de onda horizontal está entre 20-25 km.

Na Figura 5.9 observa-se a distribuição dos comprimentos de onda horizontal para os “ripples” em intervalos de 5 km para cada estação.

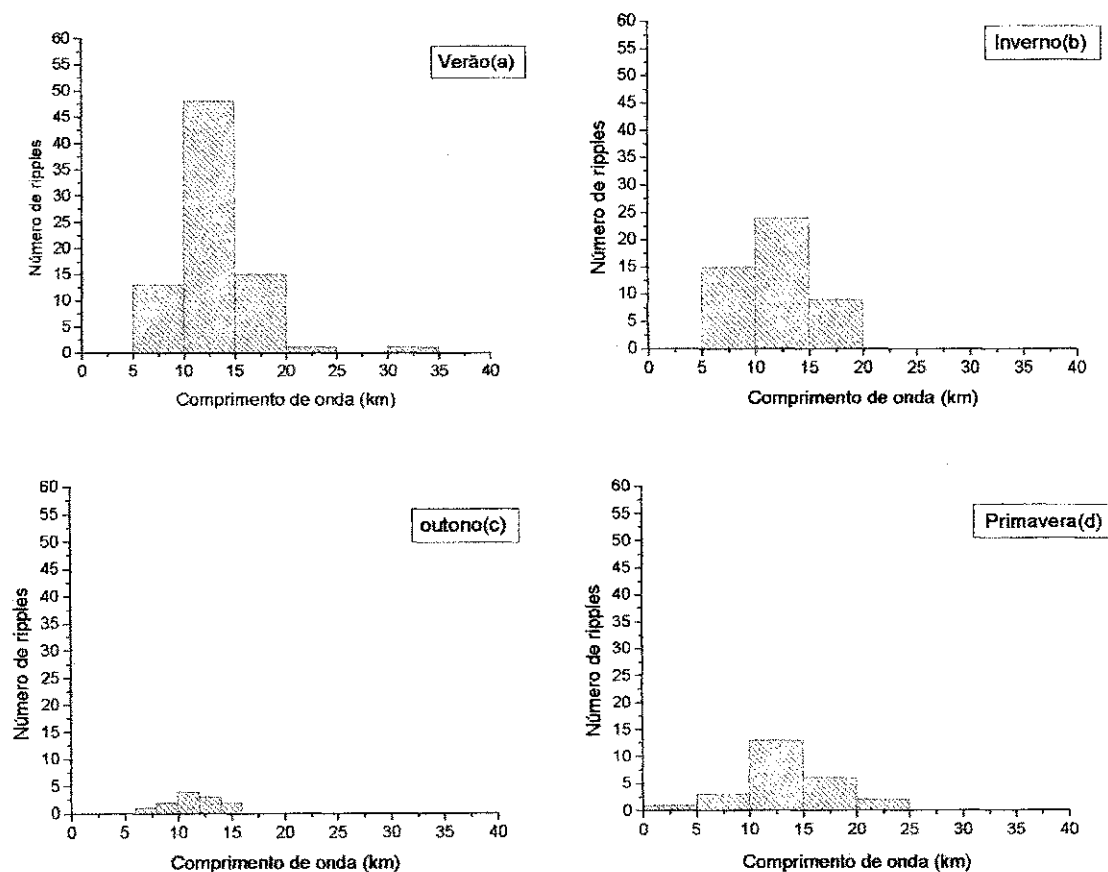


Fig. 5.9 – Histogramas mostrando a distribuição do comprimento de onda horizontal em função do número de eventos para os “ripples”. Verão (a), inverno(b) ,outono(c) e primavera (d).

No verão (Figura 5.9.a) o comprimento de onda horizontal dos “ripples” teve uma variação de 5 a 35 km com concentração maior de eventos entre 5-20 km e pico entre 10 e 15 km. No inverno (Figura 5.9.b) a variação do comprimento de onda horizontal situa-se entre 5-20 km semelhante ao verão

(Figura 5.9.a), mas a maior frequência se encontra entre 10 km e 15 km. No outono (Figura 5.9.c) os comprimentos de onda horizontal estão entre 5 km e 25 km com uma distribuição quase que uniforme, mas o número de eventos observados é muito pequeno para que algumas conclusões sejam extraídas. Na primavera (Figura 5.9.d) a variação situa-se entre 0-25 km com o maior número de ondas entre 10 km e 15 km.

A Figura 5,10 mostra a distribuição dos períodos observados para as bandas em intervalos de 5 min para cada estação.

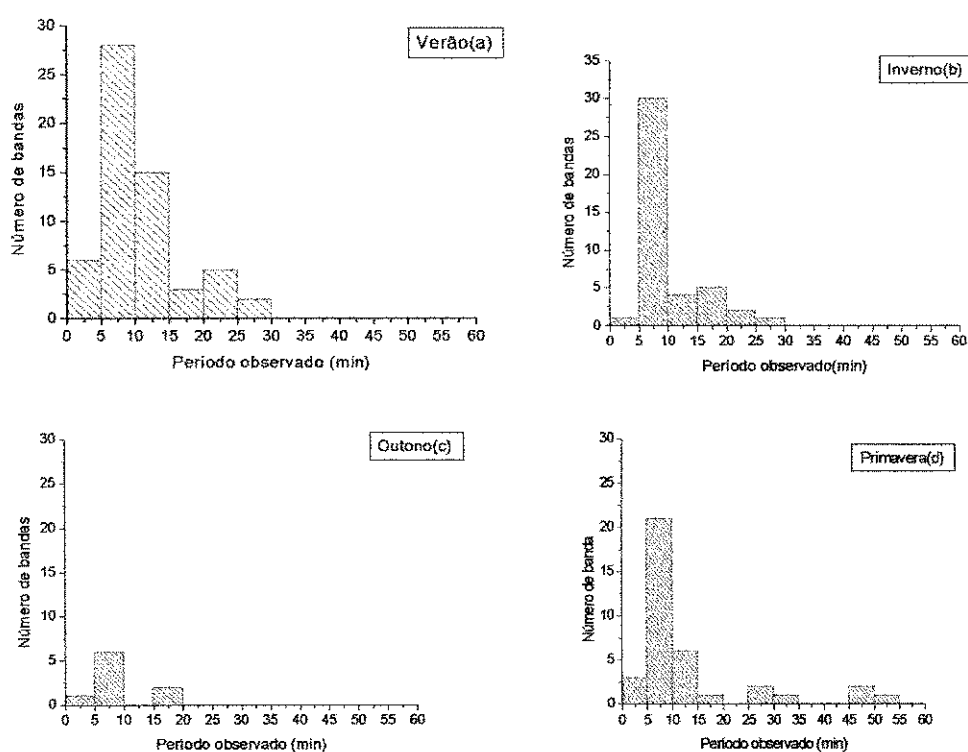


Fig. 5.10 – Histograma mostrando a distribuição dos períodos observados para as bandas nas quatro estações. Verão (a), inverno (b), outono (c) e primavera (d) em função do número de eventos .

No verão (Figura 5.10.a) os períodos observados apresentaram valores entre 0-30 min com pico entre 5 –10 min. No inverno (Figura 5.10.b) a variação dos períodos observados foi semelhante à variação ocorrida no verão, apresentado

também variação do período observado entre 0-30 min e pico entre 5-10 min. No outono (Figura 5.10 c) o período observado se situou entre 0-20 min e na primavera (Figura 5.10.d) a variação foi de 0-55 min com o maior número de bandas apresentando valores situados entre 5 min e 10 min.

A Figura 5.11 mostra a distribuição dos períodos observados agrupados em intervalos de 5 minutos para os “ripples” para as quatro estações em função dos números de eventos .

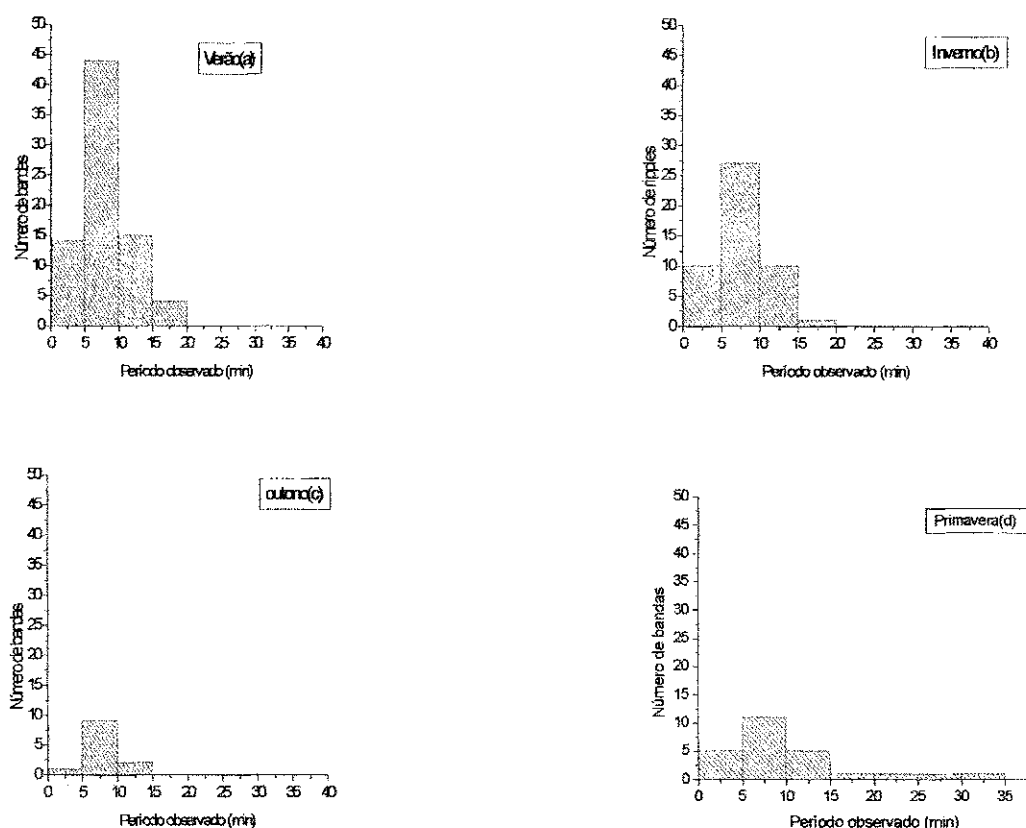


Fig. 5.11 – Histograma mostrando a distribuição dos períodos observados para os “ripples” nas quatro estações. Verão (a), inverno (b), outono (c) e primavera (d) em função do número de eventos .

Das quatro estações a que mostrou uma distribuição de período observado mais longa foi a primavera. Como pode ser observado; no verão (Figura 5.11.a) os períodos observados variaram entre 0-20 min com uma maior concentração entre 0-15 min e pico entre 5-10 min. No inverno (Figura 5.11.b) a

variação dos períodos observados ficou também entre 0-20 min com concentração maior de eventos entre 0-15 min e pico entre 5-10 km. Pode ser observado que o comportamento dos períodos observados são muito parecidos no verão e inverno. No outono (Figura 5.11.c) o período variou entre 0-12 min com uma concentração maior de eventos entre 5 min e a 10 min. Na primavera (Figura 5.11.d) a distribuição dos períodos está entre 0-35 min, ficando o maior número de “ripples” com período variando entre 5-10 min. Vale observar, que o pico de ocorrência para os períodos observados foram de 5-10 min para todas as estações.

É mostrada na Figura 5.12, a distribuição das velocidades de fase observadas agrupadas em intervalos de 10 m/s para as bandas em cada estação

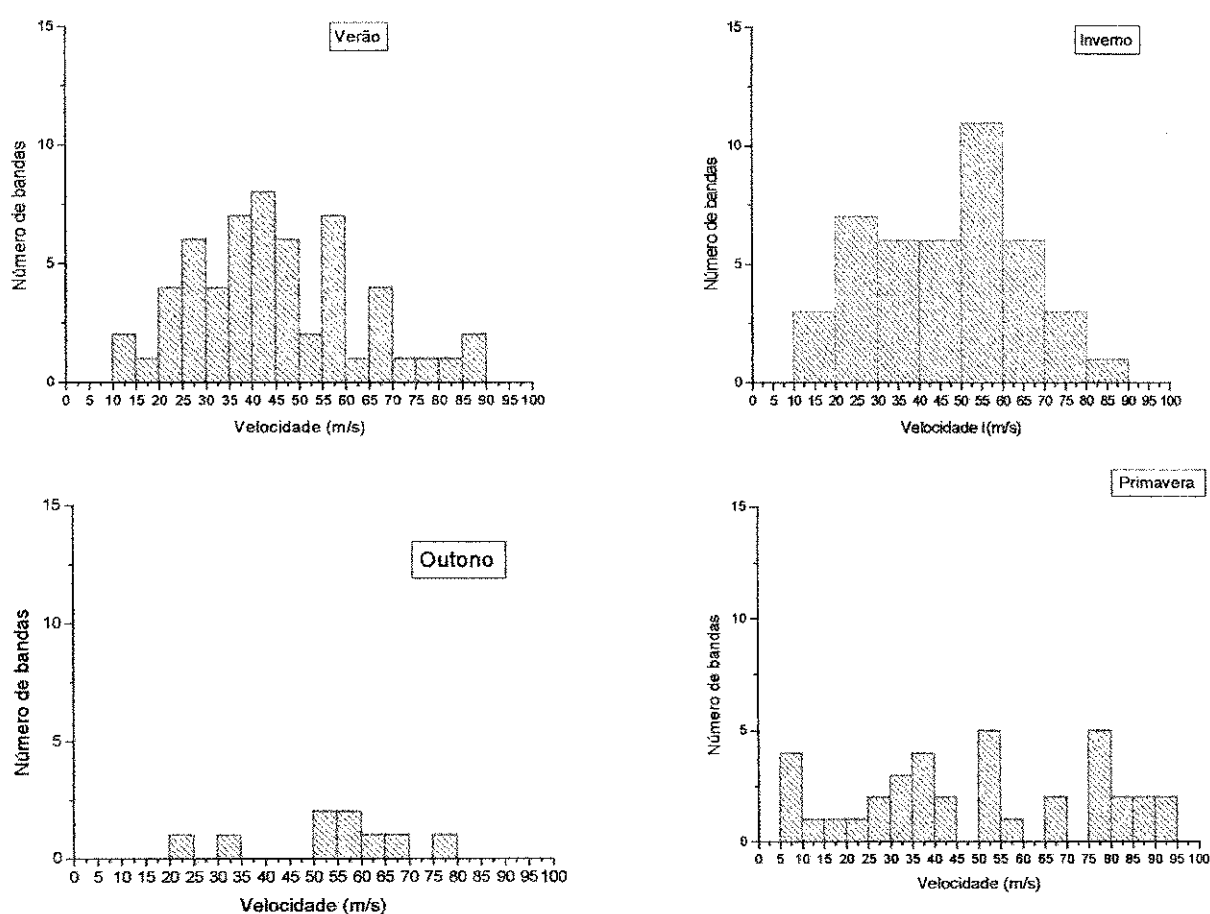


Figura 5.12 – Histogramas mostrando a distribuição das velocidades de fase em função do número de eventos para as bandas no verão (a), inverno (b), outono (c) e na primavera (d).

As velocidades de fase observadas na Figura 5.12 mostram que para todas as estações a variação na distribuição de velocidade foi quase a mesma, ou seja, entre 10 m/s e 80 m/s no verão (Figura 5.12.a) e no inverno (Figura 5.12.b), 20 m/s a 80 m/s no outono (Figura 5.12.c) e 5-85 m/s na primavera (Figura 5.12.d). Nota-se, também, que as velocidades estão bem distribuídas no inverno e no verão apresentando um pico entre 50 m/s a 60 m/s no verão. No outono e no inverno não se observou uma boa distribuição de velocidade.

A Figura 5.13 se refere a distribuição das velocidades de fase observadas agrupadas em intervalos de 10 m/s para as “ripples” em cada estação

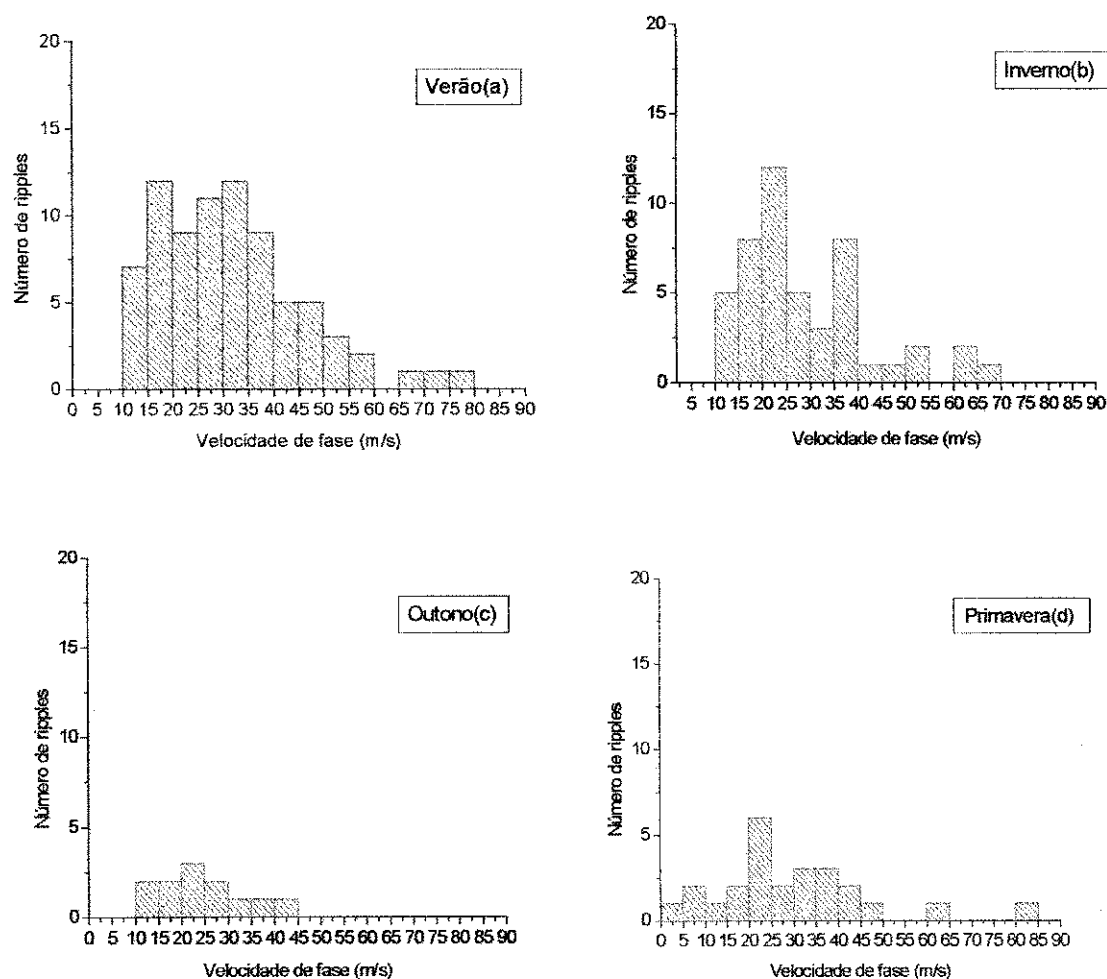


Fig. 5.13 – Histogramas mostrando a distribuição das velocidades de fase em função do número de eventos para os “ripples” no verão (a), inverno (b), outono (c) e na primavera (d).



Observa-se que as velocidades de fase foram bem distribuídas no verão (Figura 5.13.a) e no inverno (Figura 5.13.b). No outono (Figura 5.13.c) as velocidades se ficaram entre 10 –45 m/s e na primavera (Figura 5.13.d) entre 0-85 m/s. No verão o maior número de “ripples” apresentou valor de velocidade observada dentro do intervalo de 10-60 m/s, embora a velocidade nesta estação tenha variado de 10-80 m/s. No inverno a variação das velocidades observadas ficou entre 10-70 m/s, com o maior número de “ripples” situado entre 10-70 m/s.

A Figura 5.14 mostra a distribuição azimutal das direções de propagação agrupadas em intervalos de 15° para as bandas para cada estação do ano.

Pode ser observado que no verão (Figura 5.14.a) ocorreram atividades de ondas bem maiores do que nas outras estações, mas no inverno (Figura 5.14. b) e na primavera as ocorrências também foram consideráveis. No verão, a direção de propagação preferencial observada é sudeste (entre 90° e 180°), no inverno a tendência de direção de propagação é para nordeste (entre 0° e 90°), na primavera (Figura 5.14.d) não se tem uma direção preferencial clara, mas pode se observar a maior parte dos eventos se propagando para leste (entre 65° e 105°) e no outono (Figura 5.14.c) qualquer afirmação é duvidosa em virtude, talvez, do pequeno número de eventos observados neste período.

Destas análises é possível afirmar que a variação sazonal da direção de propagação (direção da velocidade de fase horizontal observada) para as bandas foi mais evidente no verão, inverno e primavera.

Esta variação sazonal observada para a direção de propagação, pode estar relacionada com a variação dos ventos na média atmosfera e pode refletir a filtragem de ondas de gravidade nesta região ou fontes diferentes de geração das ondas. Estes assuntos serão tratados posteriormente em outro capítulo.

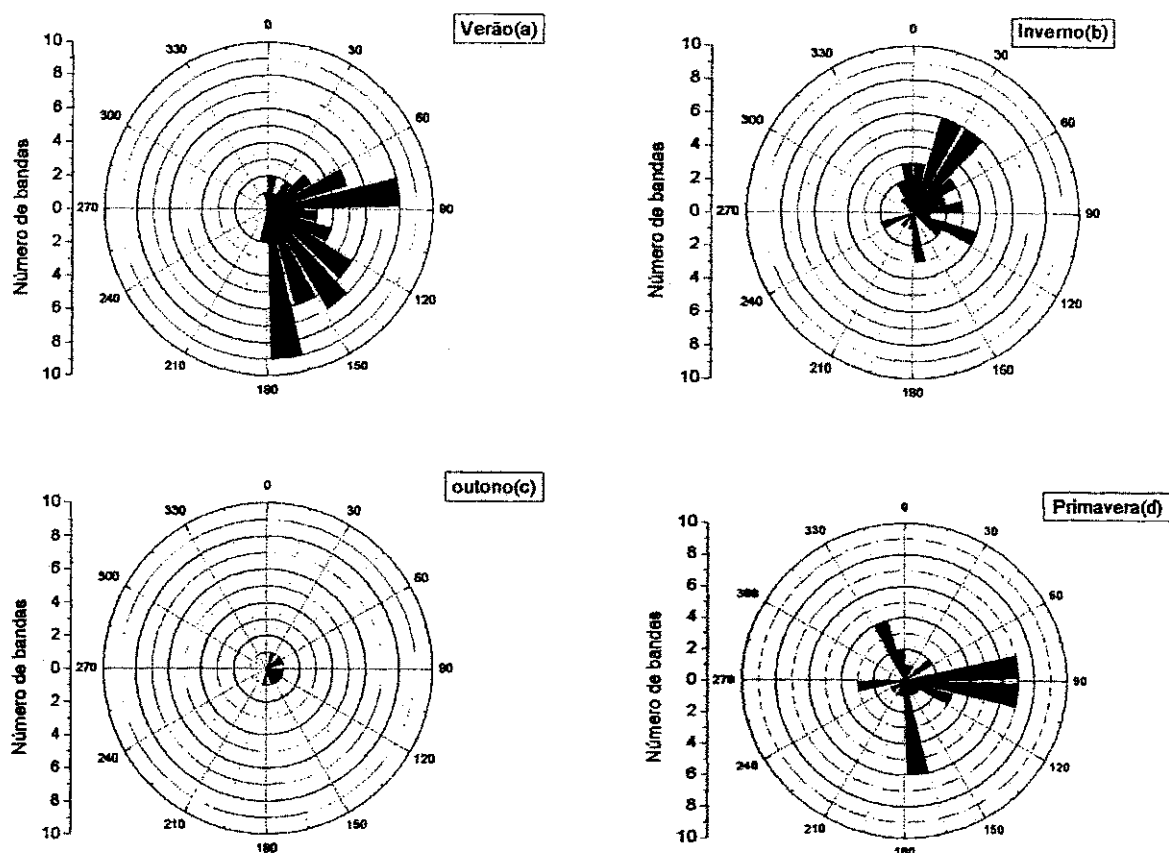


Figura 5.14 – Histogramas polares mostrando as distribuições das direções de propagação para as bandas no verão (a), inverno (b), outono (c) e primavera (d) em função do número de eventos observado.

Na Figura 5.15 é mostrada distribuição azimutal das direções de propagação agrupadas em intervalos de  $15^\circ$  para os “ripples” para cada estação do ano.

Os “ripples” no verão (Figura 5.15.a) apresentaram uma considerável tendência na direção de propagação para nordeste ( $0^\circ - 90^\circ$ ) embora tenham ocorridos eventos em todas as direções, com o maior número de eventos ficando entre  $15-30^\circ$ . No inverno (Figura 5.15.b), outono (Figura 5.15.c) e na primavera (Figura 5.15.d) não ocorre uma clara variação sazonal, pelo que se pode dizer que para os “ripples”, apenas o verão apresentou uma tendência na direção de propagação.

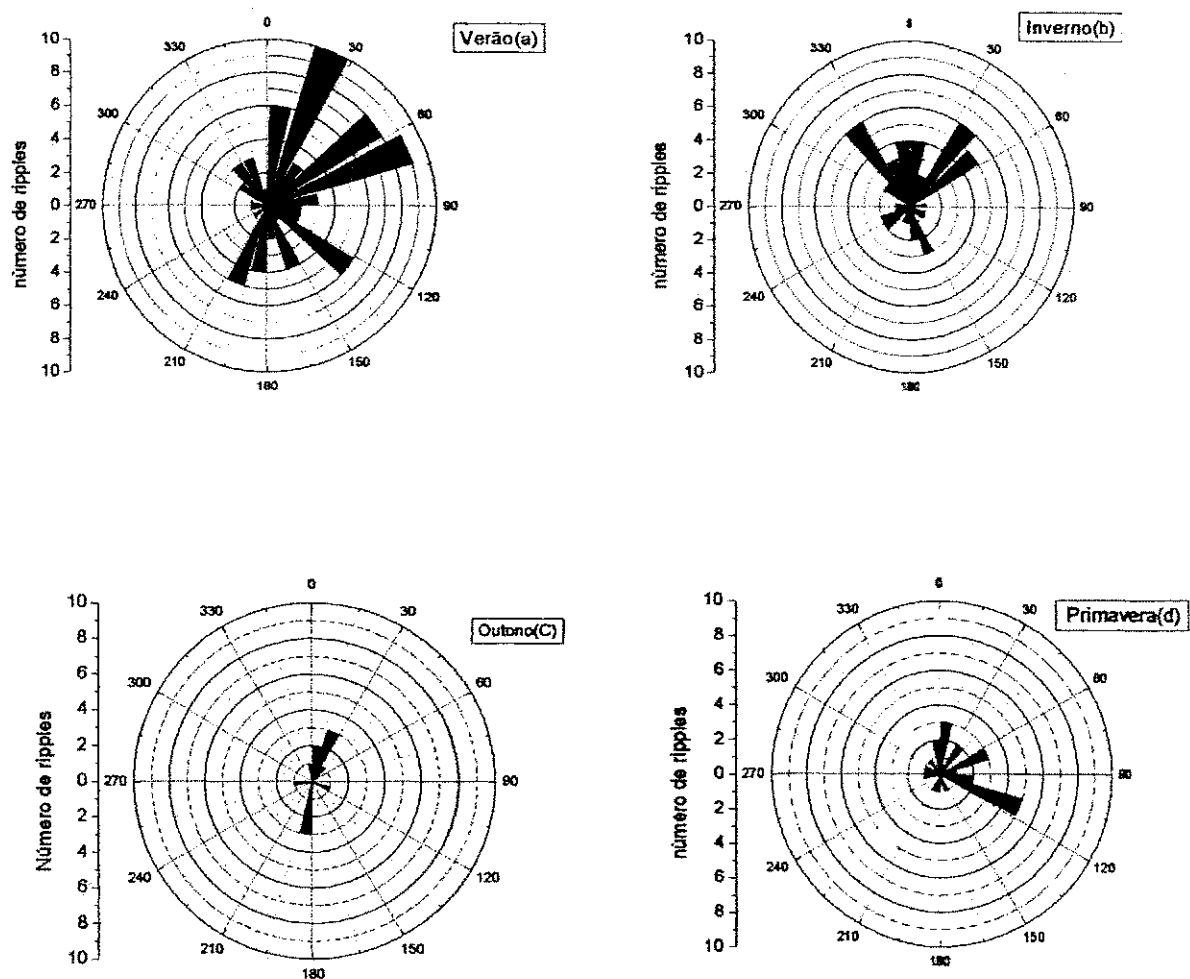


Fig. 5.15 – Histogramas polares mostrando as distribuições das direções de propagação para os “ripples” no verão (a), inverno (b), outono (c) e primavera (d) em função do número de eventos observado.

## 6 - DISCUSSÃO

O estudo de ondas de gravidade de curto período imageamento all-sky do airglow no Brasil teve seu início praticamente no final da década de 90. O trabalho pioneiro nesta área de estudo foi de Medeiros (2001). Os dados utilizados naquele trabalho foram obtidos em C. Paulista, SP. O nosso estudo, na região equatorial, é o segundo realizado feito no Brasil. Outros trabalhos com imageamento de airglow também foram realizados no exterior. No decorrer deste capítulo, serão feitas comparações com o trabalho de Medeiros (2001) e com outros trabalhos.

A análise dos resultados mostrados no capítulo anterior sugere que as ondas de gravidade sobre o Cariri paraibano apresentam características e dependência sazonal e latitudinal em relação aos seus parâmetros físicos, tais como: comprimento de onda, velocidade de fase, período e direção de propagação. Um estudo detalhado destes parâmetros poderá indicar as prováveis fontes geradoras destas ondas. Isto é relevante, pois, a identificação de tais fontes ainda é uma questão em aberto na comunidade científica, principalmente na região equatorial do planeta. Esta discussão será realizada a partir dos resultados relacionados a cada parâmetro individualmente e comparados com os resultados obtidos por Medeiros (2001). Deve-se ressaltar que este Medeiros (2001) trabalhou com dados de imageador no período de outubro de 1998 a setembro de 1999. No entanto, mesmo em períodos

diferentes é importante fazer uma comparação devido à ausência deste tipo de estudo. Esta discussão será pautada nos seguintes tópicos:

### 6.1 - Atividade de ondas

O número de eventos médio por noite observado no Cariri foi de 4,2. Este valor está próximo daquele obtido em C. Paulista que foi de 5,6. A importância de compararmos estes valores é identificar se existe uma maior atividade no Cariri ou em C. Paulista. Isto poderia nos indicar a maior presença de fontes nestas regiões inclusive suas localizações visto que a direcionalidade (como será discutido em detalhes mais adiante) é um ótimo indicativo para isto. No caso do Cariri, como citado anteriormente, a frequência foi de 4,2 eventos por noite; este valor é 25% menor que aquele registrado em C. Paulista. De acordo Taylor et al., (1995), as tempestades são prováveis geradoras de ondas de gravidade. Esta diferença de resultado pode estar associada ao número de tempestades (atividade de convecção) que é maior na região de Cachoeira Paulista. A Figura 6.1 mostra a atividade de relâmpagos observada pelo sensor LIZ (Lightning Imaging Sensor) nas regiões próximas do Cariri e de C. Paulista para os mesmos períodos das observações. De acordo com esta Figura, em Cachoeira Paulista, a maior atividade de relâmpagos se encontra à sudoeste e noroeste, e na região próxima a São João do Cariri, a maior concentração de relâmpagos está situada a Sudoeste, embora eles também se apresentem a noroeste.

### 6.2 - Comprimento de onda

O histograma da distribuição dos comprimentos de onda para os “ripples” (Figura 5.3.a), apresentou uma distribuição entre 0 e 35 km com

maior ocorrência em comprimentos entre 5 e 10 km. Em C. Paulista, os comprimentos de onda detectados ficaram entre 5 e 20 km com destaque para a faixa de 10 a 15 km. Apesar da distribuição em Cariri ser mais larga, os comprimentos de onda mais prováveis de ocorrência são semelhantes em ambas regiões.

No caso das bandas, (Figura 5.3.b) a distribuição das ondas se estendeu entre 10 e 55 km, porém, o maior número se encontrou entre 15 e 30 km. No caso de C. Paulista, a distribuição apresentou bandas com comprimentos entre 10 e 60 km, porém, concentradas entre 10 e 35 km.

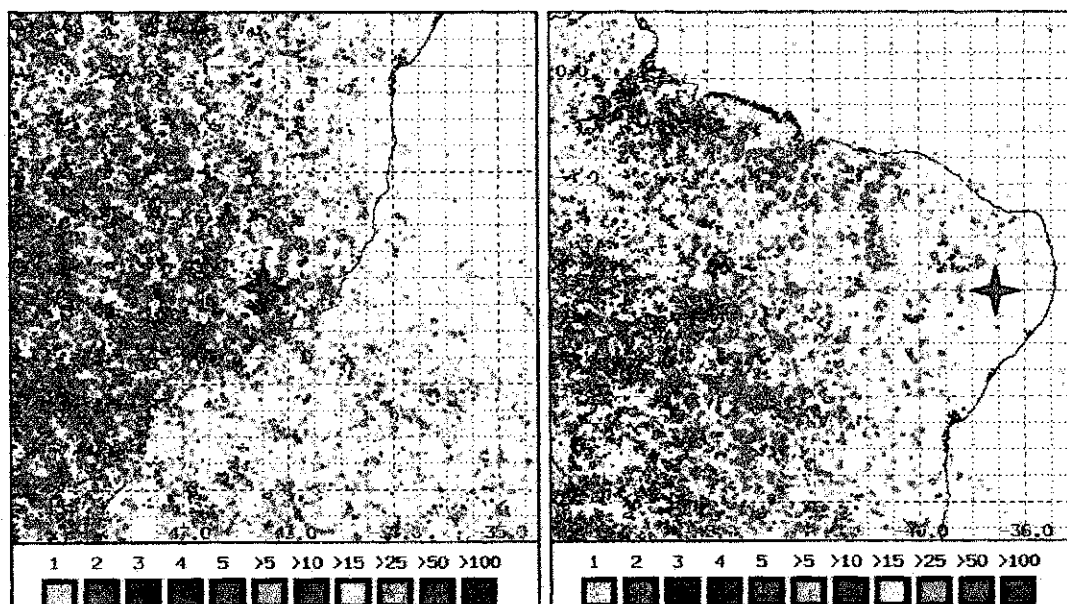


Fig. 6.1 – Distribuição de relâmpagos para a região de C. Paulista (esquerda) para setembro de 1998 a agosto de 1999 e S. J. do Cariri (direita) para setembro de 2000 a agosto de 2001. A localização aproximada de cada cidade está representada por uma estrela. A escala colorida está associada ao número de relâmpagos.

### 6.3 – Períodos

A Figura 5.4 mostra a distribuição dos períodos detectados no Cariri para bandas e “ripples”. Com relação os “ripples” (Figura 5.4.a) os resultados mostram que os períodos se distribuíam entre 0 e 35 minutos.

É visível, porém, uma grande tendência entre 5 e 10 minutos, que corresponde aos valores limites (5 minutos) da Frequência de Brunt Vaisala para que as ondas de gravidade existam. No caso de C. Paulista a distribuição ocorreu entre 4 e 16 minutos, todavia com uma disposição maior para período entre 8 e 10 minutos. Claramente, nota-se que a distribuição do Cariri é mais larga do que a de C. Paulista. No entanto, a tendência é quase a mesma. Esta diferença na largura da distribuição pode estar associada aos diferentes campos de vento nos dois locais de observação, o que provocaria diferentes deslocamentos Doppler nos dois sítios investigados.

A Figura 5.4.b mostra a distribuição dos períodos observados para as bandas no Cariri. Neste caso, as bandas apresentaram uma largura de distribuição entre 0 e 55 minutos, com uma forte tendência para períodos entre 5 e 10 minutos. Para o caso de C. Paulista, as bandas exibem uma distribuição entre 6 e 34 minutos, com um uma maior evidência para períodos entre 14 e 18 minutos. A diferença entre os dois locais também pode estar associada aos diferentes campos de vento e também a diferentes fontes de geração.

#### 6.4 - Velocidade horizontal de fase

Os histogramas do conjunto de velocidades para os “ripples” e bandas observadas no Cariri são mostrados na Figura 5.5. Para os “ripples” (Figura 5.5.a), as velocidades variaram entre 0 e 85 m/s. O intervalo de velocidade que mais se destaca para os “ripples” foi entre 15 e 25 m/s. Para C. Paulista a faixa de velocidade se concentrou entre 10 e 60 m/s, com um maior número de eventos entre 20 e 30 m/s. Notadamente, a largura de bandas das velocidades no Cariri é maior. Isto já era esperado, pois este resultado também foi encontrado no item anterior para os períodos (velocidade é um

parâmetro dependente da medida do período). Quanto a tendência, os intervalos são similares.

As velocidades das bandas (Figura 5.5.b) do Cariri, se distribuíram entre 5 e 105 m/s, com um intervalo de concentração maior entre 35 e 60 m/s. No caso de C. Paulista as velocidades das bandas se estenderam entre 10 e 80 m/s e exibiram um maior número de bandas com velocidades entre 10 e 30 m/s. Comparando as duas larguras de bandas das velocidades notamos que são aproximadamente iguais. No entanto, o Cariri apresentou uma tendência para velocidades maiores do que em C. Paulista. Novamente vamos recorrer aos campos de vento para explicar essa diferença. Devido aos ventos equatoriais serem mais fracos (Hedin et al., 1996), a filtragem (absorção pelo ambiente atmosférico das ondas de gravidade quando as mesmas penetram em regiões com velocidade de fase igual a velocidade do vento) das ondas pelos vento é menor do que na região de C. Paulista. Este resultado foi recentemente obtido por Nakamura et al. (2002) em observações em Jacarta (6,9° S, 107,9° L) na Indonésia.

## 6.5 – Direcionalidade

O conjunto de direção de propagação, detectado para os “ripples” e para as bandas no Cariri é exposto na Figura 5.6 e na Figura 5.7 respectivamente. Fica evidente que no Cariri os “ripples” não apresentaram uma direção de propagação preferencial. Em C. Paulista os “ripples” também não apresentaram uma direção preferencial de propagação. Isto já era esperado, pois, acredita-se que os ripples são oscilações transientes e de geração local. No entanto, é patente para as bandas observadas no Cariri que a maioria dos eventos de bandas se desloca para leste, ou seja, do continente para o oceano. No caso das bandas do C. Paulista, foram detectadas duas



direções preferenciais, uma para noroeste e outra para sudeste. A explicação para estas duas direções está na localização das fontes e na filtragem das ondas. A mesma explicação pode ser usada para o caso do Cariri, sugerindo que as ondas sejam geradas na região amazônica, ou próximo dessa região, onde ocorrem grandes movimento convectivos na baixa atmosfera, com mostra dados do sensor LIS (Lightning Imaging Sensor). Além disso, os movimentos de convecção ocorrem com maior intensidade nos continentes do que nos oceanos.

A Figura 6.2 mostra a distribuição de relâmpagos nos continentes e nos oceanos.

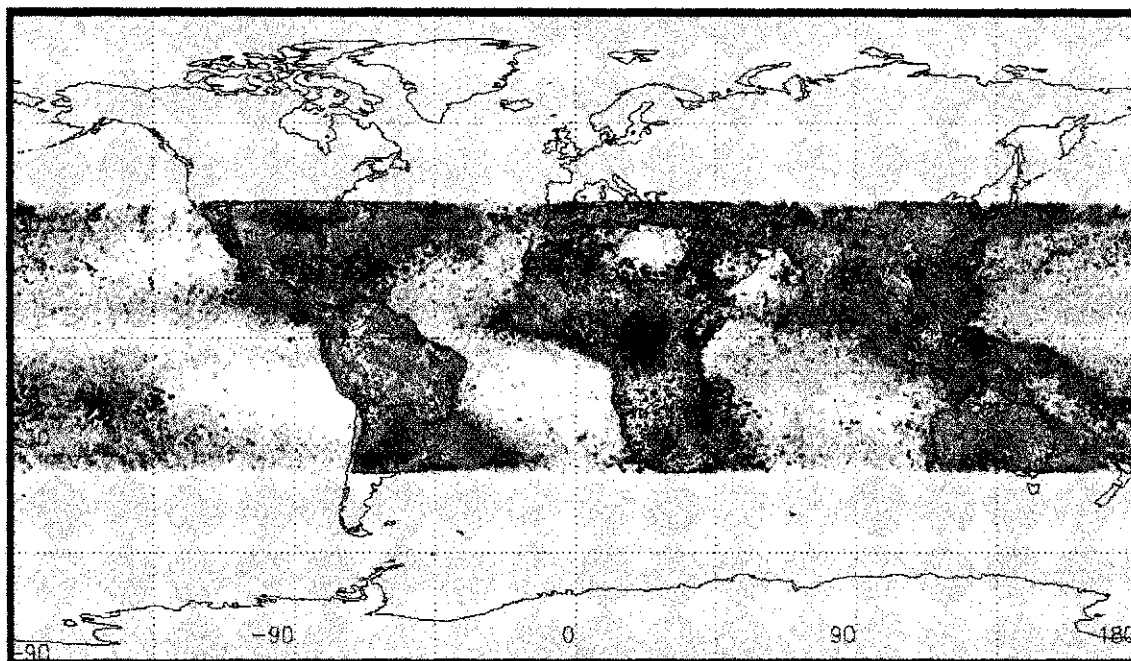


Fig.6.2 – Distribuição de relâmpagos para os continentes e os oceanos, observados pelo sensor LIS, no período de dezembro de 1997 até dezembro de 2000.

#### 6.6 - Sazonalidade das ondas

Após análise das Figuras do Capítulo 5 (Figuras 5.8 a 5.15) observou-se que bandas e “ripples” não apresentaram sazonalidade clara nos parâmetros comprimento de onda e período. No entanto, a velocidade

horizontal de fase e a direção de propagação, exibem uma provável dependência com a estação do ano.

Os histogramas de velocidades para as 4 estações mostraram comportamentos bem distintos para inverno e verão com relação a outono e primavera. Apesar do número de eventos para estas duas últimas estações ser menor, a velocidade das bandas e dos “ripples” estão distribuídas quase uniformemente. No caso das bandas, tanto no inverno quanto no verão, as ondas tiveram uma tendência de propagar-se com velocidade em torno de 47 m/s enquanto que no inverno esta velocidade foi de 46 m/s, o que na prática são iguais. Nos histogramas da Figura 5.12 (distribuição de velocidades de bandas) percebe-se que existe uma distribuição estatística bem definida. Por outro lado, nas estações de equinócios, as distribuições de velocidades não apresentam um valor provável bem definido. Isto pode ser devido ao pequeno número de eventos nestas estações, porém, já existem registros na literatura afirmando que as maiores atividades de ondas ocorrem nos solstícios de inverno e verão (Tsuda et al., 1994). Os “ripples” (Figura 5.13), por sua vez, apresentaram comportamentos sazonais para as velocidades semelhantes às das bandas com velocidade de 31 m/s e 29 m/s para o verão e inverno, respectivamente. Este comportamento não foi detectado em C. Paulista.

## 6.7 - Direcionalidade das ondas

Com relação à direção de propagação das ondas de gravidade, os “ripples” não exibiram uma clara variação sazonal deste parâmetro. No entanto, as bandas apresentam uma forte dependência sazonal, principalmente, no verão e inverno. No solstício de verão, existe uma notável tendência das ondas se propagarem para o quadrante  $90^\circ - 180^\circ$ , podendo ser caracterizado como um movimento para Sudeste. Praticamente não, foram

detectadas ondas se propagando na direção entre  $180^\circ$  -  $360^\circ$ , sugerindo que a provável fonte destas ondas encontra-se a Noroeste de S. João do Cariri. Como já foi dito anteriormente, as regiões onde ocorrem movimentos convectivos, são fortes candidatas à geração de ondas de gravidade. Os relâmpagos podem ser bons indicadores de movimentos convectivos; assim, utilizando dados de um sensor de relâmpagos (LIS – Lightning Imaging Sensor) a bordo de um satélite (Tropic Rainfall Measuring Mission – TRMM) foi possível identificar regiões de alta convecção. A Figura 6.3 mostra a distribuição de relâmpagos numa área de aproximadamente  $20^\circ$  x  $20^\circ$ . Nota-se claramente que a maioria dos relâmpagos está a Oeste de Cariri, com duas regiões com maior presença de relâmpagos, uma Noroeste e outra Sudoeste de Cariri. Porém, não foram detectadas ondas a Nordeste no verão, este comportamento pode ser atribuído à filtragem das ondas pelos ventos estratosféricos (Taylor et al., 1993) ou o aprisionamento das ondas em canais abaixo ou acima da camada de observação (Isler et al., 1997). Portanto, a provável região geradora será aquela a Noroeste.

Para o inverno pode-se sugerir que a direção de propagação das ondas de gravidade é preferencialmente para Nordeste. A Figura 6.3 exhibe dados do sensor LIS para o referido período; nota-se que a atividade de relâmpagos é bem menor para esta época do ano. No entanto, é complexo correlacionar a atividade de relâmpago com as ondas detectadas no Cariri para esta estação.

Finalizando, mesmo diante da dificuldade de correlacionar a atividade de relâmpagos com a geração de ondas no inverno, podemos sugerir que as ondas de gravidade sobre o Cariri estão relacionadas com regiões de convecção e que a direção de propagação depende em parte da localização das fontes (variação sazonal) e da filtragem de ondas por ventos estratosféricos. A

identificação das fontes de ondas de gravidade atualmente, ainda se coloca como um desafio à comunidade científica.

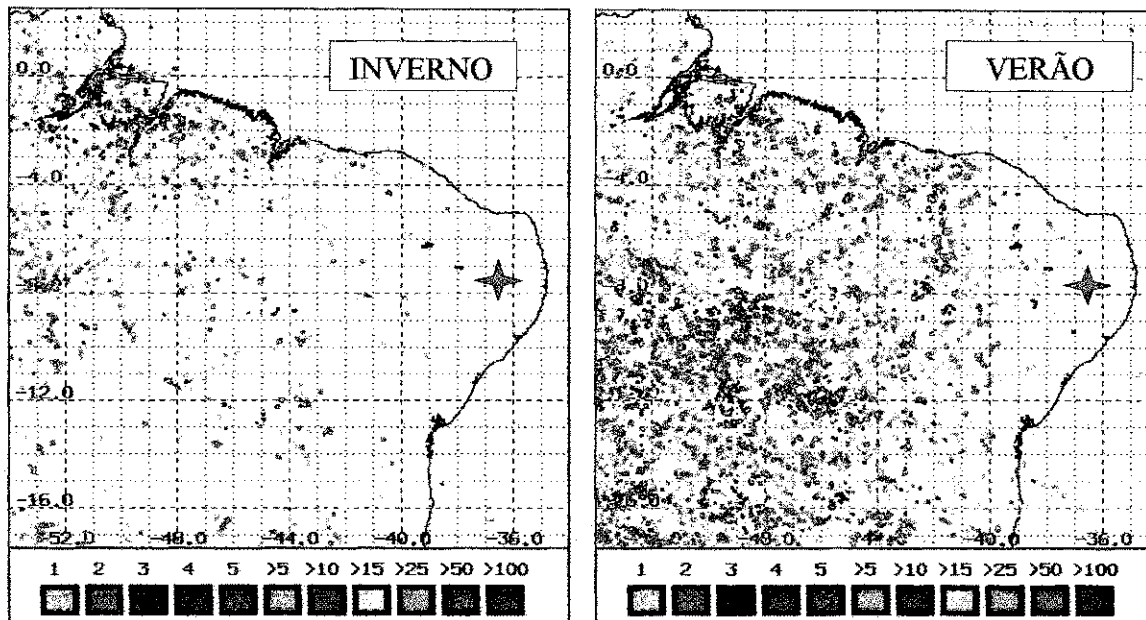


Fig. 6.3 - Distribuição de relâmpagos para inverno (à esquerda) e verão (à direita) a Oeste de S. J. do Cariri. A escala de cores representa o número de relâmpagos acumulados no período correspondente.

## 7 - CONCLUSÃO

O referido trabalho consistiu em apresentar pela primeira vez características das ondas de gravidade detectadas por imageamento na região equatorial brasileira. Os dados utilizados, que são inéditos, foram obtidos por um imageador all-sky instalado no OLAP, localizado na cidade de S. J. do Cariri, em setembro de 2000. Este equipamento foi adquirido pelo PRONEX (em cooperação com o Grupo Lume do INPE) e tem por finalidade obter imagens da luminescência do OI5577, OI6300, O2 atmosférico e OH.

Estas imagens permitem revelar variações das intensidades das emissões que estão relacionadas com as ondas de gravidade possibilitando realizar estudos de dinâmica da alta atmosfera. O conjunto de dados coletados e usados neste trabalho refere-se ao período de setembro de 2000 a agosto de 2001. Porém, em março desse ano não foi possível coletar dados devido a problemas eletrônicos no equipamento.

As observações com o imageador foram realizadas durante 13 dias em torno da Lua Nova. O período de observação registrou no total 327 eventos, entre os quais 177 de ripples e 150 eventos de bandas. Os principais resultados obtidos neste trabalho são apresentados a seguir:

- A maior atividade de ondas ocorreu no inverno e no verão.;
- Os ripples não apresentaram uma variação sazonal em qualquer um dos parâmetros de onda. Por outro lado, as bandas apresentaram variação

sazonal com relação à velocidade horizontal de fase e direção de propagação;

- As velocidades de fase horizontais são maiores em média, do que aquelas observadas em C. Paulista, SP;
- As bandas apresentaram direção de propagação preferencialmente para o Sudeste no verão e Nordeste no Inverno. No outono e primavera foi detectada direção preferencial;
- Ao contrário de C. Paulista, detectou-se maior número de ripples do que de bandas;
- Existe uma correlação entre a direção de propagação no verão com a distribuição de relâmpagos no mesmo período, ao contrário do que ocorreu inverno.

## 7.1 – Sugestões

Para o futuro, fica a sugestão de se investir mais estudos na procura de possíveis fenômenos troposféricos que dão origem às ondas de gravidade. Também, a realização de uma estatística mais precisa envolvendo um número maior de noites observadas com eventos poderá dar maior consistência aos resultados obtidos, principalmente no outono e na primavera onde o número de eventos detectados é menor.

A determinação dos parâmetros intrínsecos das ondas depende do conhecimento do campo de ventos na região da luminescência. Por isto, sugeri-se observações conjuntas com um radar meteórico (existe a previsão de instalação no OLAP em 2003).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexander M. J.; Beres J. H. and Pfister L. Tropical stratospheric gravity wave activity and relationships to clouds. **J. Geophys. Res.**, 105, 22299-22309, 2000.
- Almanaque de Ciência.** Tóquio, Observatório Astronômico da Universidade de Tokyo, Maruzen, 1970.d
- Armstrong, E. B. The influence of a gravity wave on the airglow hydroxyl rotational temperature at night. **J. Atmos. Ter. Phys.**, 37(12): 1585-1591, 1975.
- Bates, D. R.; Nicolet, M. The photochemistry of atmospheric water vapor. **J. Geophys. Res.**, 55 (3): 301 – 325, 1950.
- Batista P. P.; Takahashi H.; Gobbi D. and Medeiros, A. F. First airglow all sky images at 23° S. **Adv. Space Res.**, 26(6), 925-928, 2000.
- Buriti R. A., **Estudo de parâmetros de ondas de gravidade por medidas simultâneas de radar MU e fotômetro em Shigaraki (35°N, 136°L), Japão.** São José dos Campos. 176p. (INPE-6647-TDI.624). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997.

- Chapman S. Some phenomena of the upper atmosphere. **Proc. R. Soc. London. A**, 132-353, 1931.
- Chapman, S. Some phenomena of upper atmosphere. **Proc. Roy. Soc. A.**, A 132: 353 – 374, 1931.
- Coble M. R.; Papen G. C. and Gardner C. S. Computing two-dimensional unambiguous horizontal wave number spectra from airglow images. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing**, 36, 368-382, 1998.
- Coxon, J.A. Optimum molecular constants and term values for  $X^2 \Pi$  ( $v \leq 5$ ) and  $A^2 \Sigma$  ( $v \leq 3$ ) state of OH. **Can. J. Phys.**, 58: 933, 1980.
- Coxon, J.A.; Foster, S.C. Rotational analysis of hydroxyl vibration-rotation emission bands: molecular constant for OH ( $X^2 \Pi$ ),  $6 \leq v \leq 10$ . **Can. J. Phys.**, 60: 41, 1982.
- Dewan E. M. and Good R. E. Saturation and "universal" spectrum for vertical profiles of horizontal scalar winds in the atmosphere. **J. Geophys. Res.**, 91(D2), 2742-2748, 1986.
- Dewan E. M. and Picard R. H., On the origin of mesospheric bores. **J. Geophys. Res.**, 106, 2921-2927, 2001.
- Fritts D. C. and Lu W. Spectral estimates of gravity wave energy and momentum fluxes. Part II: Parameterization of wave forcing and variability. **J. Atmos. Sci.**, 50(22), 3695-3727, 1993.
- Fritts D. C. and Rastogi P. K. Convective and dynamical instabilities due to gravity wave motions in the lower and middle atmosphere. Theory and observations. **Radio Science**, 20(6), 1247-1277, 1985.



- Fritts D. C. A numerical study of gravity wave saturation and multiple wave effects. **J. Atmos. Sci.**, 42, 2043-2058, 1985.
- Fritts D. C.; Isler J. R. and Andreassen O. Gravity wave breaking in two and three dimensions, 2. three dimensional evolution and instability structure, **J. Geophys. Res.**, 99, 8109-8123, 1994.
- Fritts D. C.; Isler J. R.; Thomas G. and Andreassen O. Wave breaking signatures in noctilucent clouds. **Geophys. Res. Lett.**, 20, 2039-2042, 1993.
- Garcia F. J. and Taylor M. J. Two-dimensional spectra-analysis of mesospheric airglow data. **Applied Optics**, 36(29), 7374-7385, 1997.
- Gardner C. S. and Taylor M. J. Observational limits for lidar, radar, and airglow imager measurements of gravity parameters. **J. Geophys. Res.**, 103, 6427-6437, 1998.
- Gardner C. S. Diffusive filtering theory of gravity wave spectra in the atmosphere. **J. Geophys. Res.**, 99(D10), 20601-20622, 1994.
- Greer, R.G.H.; Murtagh, D.P.; McDade. I.C.; Dickinson, P.H.G.; Thomas, L.,; Jenkins, D.B.; Stegman, J.; Llewellyn, E.J.; Witt, G.; Mackinnon, D.J.; Williams, E.R. ETON1: data base pertinent to the study of energy transfer in the oxygen nightglow. **Planet. Space Sci.**, 34(9): 771 – 788, 1986.
- Hapgood M. A. and Taylor M. J. Analysis of airglow image data, **Ann. Geophys.**, 38(6), 805-813, 1982.
- Hapgood, M.A.; Taylor, M.J. Analysis of airglow image data. **Ann Géophys.**, t38 : 803-813, 1982.

- Hecht J. H.; Howat S. K. R.; Walterscheid R. L. and Isler J. R. Observations of spectra of intensity fluctuations of the OH Meinel nightglow during ALOHA-93. **Geophys. Res. Lett.**, 22(20), 2873-2876, 1995.
- Hecht J. H.; Walterscheid R. L. and Ross M. N. First measurements of the two-dimensional horizontal wave number spectrum from CCD images of the nightglow. **J. Geophys. Res. Lett.**, 99, 11449-11460, 1994.
- Hecht J. H.; Walterscheid R. L.; Fritts D. C.; J. R. Isler; Senft D. C.; Gardner C. S. and Franke S. J. Wave breaking signatures in OH airglow and sodium densities and temperatures. 1. Airglow imaging, Na Lidar, and MF radar observations. **J. Geophys. Res.**, 102, 6655-6668, 1997a.
- Hecht J. H.; Walterscheid R. L.; Kickey M. P. and Franke S. J. Climatology and modeling of quasi-monochromatic atmospheric gravity waves observed over Urbana Illinois. **J. Geophys. Res.**, 106, 5181-5191, 2001.
- Hecht J. H.; Walterscheid R. L.; Woithe J.; Campbell L.; Vincent R. A. and R. I. M. Trends of airglow imager observations near Adelaide, Australia. **Geophys. Res. Lett.**, 24(5), 587-590, 1997b.
- Herzberg, G. Molecular spectra and molecular structure. London, D. van Nostrand, 1950. 232p.
- Hines C. O. Internal Atmospheric gravity waves at ionospheric heights. **Can. J. Phys.**, 38, 1441-1481, 1960
- Hines C. O. Momentum deposition by atmospheric waves, and its effects on thermospheric circulation. **Space Research**, 12, 1157-1161, 1972.

- Hines C. O. The saturation of gravity waves in the middle atmosphere II: Development of Doppler-spread theory. *J. atmos. Sci.*, 48, 1360-1379, 1991.
- Isler J. R.; Taylor M. J. and Fritts D. J. Observational evidence of wave ducting and evanescence in the mesosphere. *J. Geophys. Res.*, 102, 26301-26313, 1997.
- Johnston J. E. and Broadfoot A. L. Midlatitude observations of the night airglow: implications to quenching near the mesopause. *J. Geophys. Res.*, 98(D12), Dec 20, 21593-21603, 1993.
- Johnston, J. E.; Broadfoot, A.L. Midlatitude observations of the night airglow: implications to quenching near the mesopause. *J. Geophys. Res.*, 98 (D12): 21593 – 21603, Dec. 20, 1993.
- Krassovsky, V.I.; Potapov, B.P.; Semenov, A.I.; Shagaev, M.V.; Shefov, N.N. Sobolev, V.G.; Toroshelidze, T.I. Internal gravity waves near mesopause and the hydroxyl emission. *Ann. Geophys.*, 33 (3): 347 – 356, 1977.
- Krassovsky, V.I.; Infrasonic variations of OH emissions in the upper atmosphere. *Ann. Geophys.*, 28 (4):739 – 746, 1972.
- Lindzen R. S. Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown. *J. Geophys. Res.*, 86, 9707-9714, 1981.
- Lindzen, R.S. Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown. *J. Geophys. Res.*, 86 (C10): 9707 – 9714, Oct. 20, 1981.

Llewellyn, E. J.; Long, B.H.; Solheim, B.H. The quenching of OH\* in the atmosphere. **Planet. Space Sci.**, 26 (6): 525 – 531, 1978.

Lopez – Moreno, J.J.; Rodrigo, R.; Moreno, F.; Lopez – Puertas, M.; Molina, A.; Altitude distribution of vibrationally excited states of atmospheric hydroxyl at levels  $v=2$  to  $v = 7$ . **Planet. Space Sci.**, 35(9): 1029 – 1035, 1987.

Lopez – Moreno, J.J.; Rodrigo, R.; Vidal, S. Radiative contamination in rocket – borne infrared photometric measurements. **J. Geophys.**, 90 (A7): 6617 – 6621, July, 1985.

McDade, I.C.; Llewellyn, E.J. Kinetic parameters related to sources and sinks of vibrationally excited OH in the nightglow. **J. Geophys. Res.**, 92 (A7): 7643 – 7650, July, 1, 1987.

\_\_\_\_\_ Mesospheric oxygen atom densities inferred from nighttime OH Meinel band emission rates. **Planet. Space. Space Sci.**, 36 (9): 897 – 905, 1988.

McLandress C. On the importance of gravity waves in the middle atmosphere and their parametrization in general circulation models. **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, 60, 1357-1383, 1998.

Medeiros A.F. **Observações de ondas de gravidade através do imageamento da aeroluminescência.** São José dos Campos. 150p. INPE. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

- Meek C. E.; Reid I.M. and Manson A. H. Observations of mesospheric wind velocities. I. gravity waves horizontal scale and phase velocities. **Radio Science**, 20, 1363-1403, 1985.
- Meinel A. B. OH emissions bands in the spectrum of the night sky. **Astrophys. J.**, 112(1), 120-130, 1950.
- Meinel, A.B. OH emission bands in the spectrum of the night (1). **Astrophys. J.**, 111: 555 – 564, 1950.
- Mies, F.H. Calculated vibrational transition probabilities of OH(X<sup>2</sup>Π). **J. Molecular spectrosc.**, 53 : 150 – 188, 1974.
- Murphy, R.E. Infrared emission of OH in the fundamental and first overtone bands. **J. Chem. Phys.**, 54 : 4852 – 1971.
- Nakamura T.; Higashikawa A.; Tsuda T. and Matsushita Y. Seasonal variations of gravity wave structures in OH airglow with a CCD imager at Shigaraki. **Earth Planets Space**, 51, 897-906, 1999.
- Nicolet, M. Ozone and hydrogen reactions. **Ann. Geophys.**, 26: 531, 1970.
- Noxon, J.F. Effect on internal gravity waves on night airglow temperature. **Geophys. Res. Letters**, 5, 25, 1978.
- Peterson, A.W.; Kieffaber, L.M. Infrared photography of OH airglow structures. **Nature**, 242 (5396): 321 – 322, 1973a.
- Peterson, V.L.; van Zandt, T.E. O (<sup>1</sup>D) quenching in the ionospheric F- region. **Planet. Space Sci.**, 17 (12): 1725 – 1736, 1969.

- Rayleigh, Lord IV. Absolute intensity of the aurora line in the night sky and the number of transition. **Proc. Royal Soc.**, London. A129 : 376 – 381, 1930.
- Schubert, G.; Walterscheid, R.L. Wave – driven fluctuations in the OH nightglow from an extended source region. **J. Geophys. Res.**, 93 (A9): 9903 – 9915, 1988.
- Streit, G.E.; Johnston, H.S. Reactions and quenching of vibrationally excited hydroxyl radicals. **J. Chem. Phys.**, 64 (1): 95 – 103, 1976.
- Swenson G. R. and Mende S. B. OH emission and gravity waves (including a breaking wave) in all-sky imagery from Bear Lake, UT. **Geophys. Res. Lett.**, 21, 2239-2242, 1994.
- Swenson G. S. and Espy P. J. Observations of 2-dimensional airglow structure and density from ALOHA, October 9 1993 'storm flight'. **Geophys. Res. Lett.**, 22(20), 2845-2848, 1995.
- Takahashi, H.; Batista, P.P. Simultaneous measurements OH (9,4), (8,3), (7,2), (6,2), (5,1) bands in airglow. **J. Geophys. Res.**, 86 (A7): 5632 – 5642, July 1, 1981.
- Taylor M. J. and Garcia F. J. A two-dimensional spectral analysis of short period gravity waves imaged in the OI(557.7 nm) and near infra red OH nightglow emissions over Arecibo, Puerto Rico. **Geophys. Res. Lett.**, 22, 2473-2276, 1995.
- Taylor M. J. and Hill M. J. Near-infrared imaging of hydroxyl wave structure over an ocean site at low latitude. **Geophys. Res. Lett.**, 18, 1333, 1991.

- Taylor M. J.; Espy P. J.; Baker D. J.; Sica R. J.; Neal P. C. and Pendleton W. R. Simultaneous intensity, temperature and imaging measurements of short-period wave structure in the OH nightglow emission. **Planet. Space Sci.**, 39(8), 1171-1188, 1991.
- Taylor M. J.; Hapgood M. A. and Rothwell P. Observations of gravity wave propagation in the OI (557.7 nm), Na (589.2 nm) and the near infrared OH nightglow emissions. **Planet. Space Sci.**, 35, 413-427, 1987.
- Taylor M. J.; Ryan E. H.; Tuan T. F. and Edwards R. Evidence of preferential directions for gravity wave propagation due to wind filtering in the middle atmosphere. **J. Geophys. Res.**, 98(A4), 6047-6057, 1993.
- Turnbull, D.N.; Lowel, R.P. New hydroxyl transition probabilities and their importance in airglow studies. **Planet. Space Sci.**, 37 (6): 725 – 738, 1989.
- Vincent R. A. and Reid I. M. HF Doppler measurements of mesospheric gravity wave momentum fluxes. **J. Atmos. Sci.**, 40, 1321-1333, 1983.
- Walterscheid R. L.; Hecht J. H.; Vincent R. A.; Reid I. M.; Woihe J. and Hickey M. P. Analysis and interpretation of airglow and radar observations of quasi-monochromatic gravity waves in the upper mesosphere and lower thermosphere over Adelaide, Australia (35 S, 138 E). **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 61, 461-468, 1999.
- Walterscheid, R.L.; Schubert, G.; Straus, J.M. A dynamical – chemical model of wave – driven fluctuations in the OH nightglow. **J. Geophys. Res.**, 92 (A2): 1241 – 1254, 1987.

- Wang D. Y. and Tuan T. F. Brunt-Doppler ducting of small-period gravity wave. **J. Geophys. Res.**, 93, 9916-9926, 1988.
- Watanabe, T.; Nakamura, M. Ogawa, T. Rocket measurements of the O<sub>2</sub> atmospheric and OH Meinel bands in airglow. **J. Geophys. Res.**, 86 (A7): 5768 – 5774, July, 1981.
- Watkins B. and Wand R. H. Observations of clear air turbulence and winds the Millstones Hill radar. **J. Geophys. Res.**, 86, 9605-9614, 1981.
- Weinstock J. Finite amplitude gravity wave; harmonics, advective steepening and saturation. **J. Atmos. Sci.**, 43, 688-704, 1986.
- Weinstock J. Gravity wave saturation and eddy diffusion in the middle atmosphere. **J. Atmos. Terr. Phys.**, 46, 1069-1082, 1984.
- Weinstock J. Theoretical gravity wave spectrum in the atmosphere - strong and weak wave interaction. **Radio Science**, 20, 1295-1300, 1985.



## APÊNDICE A

### Parâmetros das ondas observadas

Neste apêndice é apresentado o resultado geral para as bandas e para os “ripples”. As colunas fornecem informações sobre cada evento de onda.

1. Ordem dos eventos;
2. Data de observação;
3. Azimute (direção de propagação do evento);
4. Comprimento de onda horizontal do evento;
5. Período observado;
6. Velocidade de fase horizontal observada;
7. Tipo de evento

Tabela A1 - Parâmetros de onda

Camada Emissora: OH

Evento	Data	azimute	$\lambda_h$ (km)	T(min)	C(m/s)	tipo de onda
1	23.09.2000	44,60	24,71	23,1	17,83	ripple
2	25.09.2000	117,80	0,71	10,8	1,10	ripple
3	25.09.2000	283,40	9,90	4,7	35,11	ripple
4	26.09.2000	9,45	13,33	8	27,77	ripple
5	26.09.2000	180,88	10,69	5,6	31,82	ripple
6	26.09.2000	357,00	11,50	10,3	18,61	ripple
7	26.09.2000	329,00	11,60	4,1	47,15	rippe
8	26.09.2000	9,40	8,10	6	22,50	ripple
9	26.09.2000	3,80	14,10	16,3	14,42	ripple
10	27.09.2000	67,00	15,13	11,4	22,12	ripple
11	28.09.2000	94,32	12,84	10,67	20,06	ripple
12	30.09.2000	115,80	13,46	5,43	41,31	ripple
13	30.09.2000	115,80	13,46	5,43	41,31	ripple
14	01.10.2000	350,61	12,71	8,48	24,98	ripple
15	01.10.2000	150,44	15,08	26,52	9,48	ripple
16	21.10.2000	36,55	9,90	7,56	21,83	ripple
17	22.10.2000	63,60	14,86	11,77	21,04	ripple
18	23.10.2000	260,00	10,67	4,57	38,91	ripple
19	24.10.2000	81,45	11,34	7,43	25,44	ripple
20	25.10.2000	92,00	17,84	8,61	34,53	ripple
21	26.10.2000	108,50	12,87	6,61	32,45	ripple
22	26.10.2000	117,00	15,58	7,15	36,32	ripple
23	27.10.2000	197,70	23,62	4,74	83,05	ripple
24	29.10.2000	60,00	17,85	4,75	62,63	ripple
25	31.10.2000	286,50	16,57	32,33	8,54	ripple
26	01.11.2000	126,00	13,14	12,3	17,80	ripple
27	01.11.2000	51,00	16,24	3,95	68,52	ripple
28	17.11.2000	202,00	18,47	7,25	42,46	ripple
29	18.11.2000	235,17	14,10	21,61	10,87	ripple
30	20.11.2000	166,50	14,02	17,26	13,54	ripple
31	21.11.2000	86,00	11,92	15,08	13,17	ripple
32	21.11.2000	127,90	10,24	12,93	13,20	ripple
33	22.11.2000	196,00	15,25	5,39	47,16	ripple
34	22.11.2000	174,10	15,50	6,88	37,55	ripple
35	23.11.2000	320,70	15,02	3,57	70,12	ripple
36	23.11.2000	76,80	9,51	9,68	16,37	ripple
37	24.11.2000	31,60	12,61	8,37	25,11	ripple
38	01.12.2000	3,60	14,98	5,39	46,32	ripple
39	01.12.2000	124,70	6,44	6,45	16,64	ripple
40	03.12.2000	54,00	12,04	5,6	35,83	ripple
41	19.12.2000	157,40	11,46	8,42	22,68	ripple
42	20.12.2000	99,80	9,77	10,57	15,41	ripple
43	20.12.2000	53,00	11,94	6,5	30,62	ripple
44	20.12.2000	22,24	10,31	3,22	53,36	ripple

45	20.12.2000	133,60	9,06	9,81	15,39	ripple
46	22.12.2000	63,40	6,68	9,41	11,83	ripple
47	24.12.2000	69,00	13,98	14,21	16,40	ripple
48	24.12.2000	27,00	13,99	8,63	27,02	ripple
49	25.12.2000	357,60	18,15	9,71	31,15	ripple
50	25.12.2000	119,70	15,69	8,63	30,30	ripple
51	27.12.2000	8,00	16,48	6,47	42,45	ripple
52	27.12.2000	11,00	12,71	8,62	24,57	ripple
53	27.12.2000	22,00	14,00	4,31	54,14	ripple
54	27.12.2000	37,00	10,85	6,44	28,08	ripple
55	27.12.2000	84,00	10,14	3,58	47,21	ripple
56	27.12.2000	66,00	11,03	8,61	21,35	ripple
57	27.12.2000	1,00	13,23	6,47	34,08	ripple
58	27.12.2000	20,00	19,91	12,94	25,64	ripple
59	28.12.2000	28,80	16,43	5,04	54,33	ripple
60	28.12.2000	51,00	14,44	9,5	25,33	ripple
61	28.12.2000	163,00	30,96	14,55	35,46	ripple
62	28.12.2000	51,00	14,78	10,6	23,24	ripple
63	29.12.2000	70,60	9,25	8,63	17,86	ripple
64	29.12.2000	53,50	10,39	10,8	16,03	ripple
65	16.01.2001	116,00	9,48	6,48	24,38	ripple
66	17.01.2001	198,80	11,83	11,34	17,39	ripple
67	17.01.2001	22,00	12,27	4,19	48,81	ripple
68	17.01.2001	21,00	10,87	15,11	11,99	ripple
69	17.01.2001	362,00	13,26	8,4	26,31	ripple
70	18.01.2001	125,50	16,09	5,38	49,85	ripple
71	18.01.2001	18,00	9,62	4,85	33,06	ripple
72	18.01.2001	24,50	7,06	3,77	31,21	ripple
73	19.01.2001	126,00	9,77	4,29	37,96	ripple
74	21.01.2001	53,00	12,26	4,87	41,96	ripple
75	22.01.2001	260,00	14,46	4,31	55,92	ripple
76	22.01.2001	61,00	10,54	15,06	11,66	ripple
77	22.01.2001	54,00	14,87	14,58	17,00	ripple
78	23.01.2001	68,00	16,95	6,34	44,56	ripple
79	24.12.2001	184,00	10,49	6,45	27,11	ripple
80	24.01.2001	198,00	13,43	6,41	34,92	ripple
81	24.01.2001	187,00	13,53	6,79	33,21	ripple
82	24.01.2001	194,00	14,82	6,64	37,20	ripple
83	24.01.2001	68,00	20,49	8,47	40,32	ripple
84	27.01.2001	193,00	14,29	12,92	18,43	ripple
85	27.01.2001	195,00	14,92	6,39	38,91	ripple
86	27.01.2001	36,00	11,18	8,62	21,62	ripple
87	15.02.2001	162,00	9,96	4,92	33,74	ripple
88	18.02.2001	139,70	17,40	5,18	55,98	ripple
89	19.02.2001	161,60	12,50	7,2	28,94	ripple
90	20.02.2001	10,50	7,51	4,17	30,02	ripple
91	20.02.2001	73,60	12,09	8,56	23,54	ripple

92	21.02.2001	331,70	10,01	5,39	30,95	ripple
93	21.02.2001	315,00	10,93	5,18	35,17	ripple
94	21.02.2001	308,70	11,13	5,71	32,49	ripple
95	21.02.2001	325,00	16,67	10,7	25,97	ripple
96	22.02.2001	335,90	14,49	10,67	22,63	ripple
97	22.02.2001	334,40	12,03	10,79	18,58	ripple
98	22.02.2001	311,00	14,41	6,84	35,11	ripple
99	22.02.2001	281,70	14,79	11,74	21,00	ripple
100	25.02.2001	20,00	9,88	6,41	25,69	ripple
101	26.02.2001	13,00	13,01	8,52	25,45	ripple
102	26.02.2001	104,00	13,63	6,15	36,94	ripple
103	27.02.2001	66,00	16,99	3,57	79,32	ripple
104	21.04.2001	14,00	6,76	5,7	19,77	ripple
105	22.04.2001	112,60	13,01	6,45	33,62	ripple
106	22.04.2001	359,00	8,44	9,74	14,44	ripple
107	23.04.2001	2,00	11,19	4,89	38,14	ripple
108	23.04.2001	267,00	10,98	14,21	12,88	ripple
109	26.04.2001	188,00	12,56	8,63	24,26	ripple
110	26.04.2001	187,00	14,68	11,24	21,77	ripple
111	26.04.2001	24,00	10,92	6,43	28,30	ripple
112	26.04.2001	25,00	11,04	9,39	19,60	ripple
113	26.04.2001	35,00	12,37	8,63	23,89	ripple
114	27.04.2001	18,00	8,20	5,36	25,50	ripple
115	28.04.2001	184,00	15,98	6,42	41,48	ripple
116	15.05.2001	336,00	10,17	10,25	16,54	ripple
117	15.05.2001	352,00	10,38	3,57	48,46	ripple
118	16.05.2001	277,00	7,39	10,68	11,53	ripple
119	17.05.2001	315,00	11,19	5,28	35,32	ripple
120	17.05.2001	317,00	9,71	5,3	30,53	ripple
121	17.05.2001	258,00	12,21	5,71	35,64	ripple
122	18.05.2001	240,00	11,66	6,32	30,75	ripple
123	18.05.2001	318,00	11,68	10,01	19,45	ripple
124	18.05.2001	228,00	13,18	3,24	67,80	ripple
125	18.05.2001	233,00	10,54	8,64	20,33	ripple
126	18.05.2001	327,00	8,45	12,88	10,93	ripple
127	18.05.2001	134,00	16,71	7,19	38,73	ripple
128	20.05.2001	31,00	8,88	6,41	23,09	ripple
129	20.05.2001	353,00	15,98	12,96	20,55	ripple
130	21.05.2001	112,00	14,82	6,42	38,47	ripple
131	21.05.1991	7,00	10,04	4,31	38,82	ripple
132	21.05.1981	22,00	9,12	6,48	23,46	ripple
133	24.05.2001	25,00	10,47	8,58	20,34	ripple
134	24.05.2001	328,00	9,74	12,15	13,36	ripple
135	24.05.2001	161,00	17,49	7,33	39,77	ripple
136	24.05.2001	301,00	7,91	3,6	36,62	ripple
137	25.05.2001	152,00	15,29	8,62	29,56	ripple

138	25.05.2001	335,00	10,30	14,81	11,59	ripple
139	25.05.2001	351,00	11,98	8,65	23,08	ripple
140	25.05.2001	36,00	13,84	8,65	26,67	ripple
141	25.05.2001	345,00	14,23	8,63	27,48	ripple
142	25.05.2001	6,00	13,79	10,73	21,42	ripple
143	26.05.2001	41,00	11,11	5,37	34,48	ripple
144	26.05.2001	176,00	15,71	6,45	40,59	ripple
145	26.05.2001	316,00	12,62	8,63	24,37	ripple
146	26.05.2001	51,00	15,97	4,31	61,76	ripple
147	26.05.2001	53,00	16,31	16,17	16,81	ripple
148	26.05.2001	59,00	9,68	10,75	15,01	ripple
149	15.06.2001	246,00	12,93	11,66	18,48	ripple
150	16.06.2001	7,00	6,70	7,88	14,17	ripple
151	16.06.2001	344,00	10,94	7,52	24,25	ripple
152	24.06.2001	55,00	8,98	8,93	16,76	ripple
153	26.06.2001	14,00	10,46	4,92	35,43	ripple
154	26.06.2001	43,00	8,19	8,65	15,78	ripple
155	14.07.2001	37,00	6,27	4,78	21,86	ripple
156	24.07.2001	178,00	13,57	4,31	52,47	ripple
157	13.08.2001	34,00	16,01	4,32	61,77	ripple
158	14.08.2001	307,00	8,71	7,47	19,43	ripple
159	14.08.2001	153,00	8,37	5,67	24,60	ripple
160	16.08.2001	190,00	14,94	4,92	50,61	ripple
161	16.08.2001	200,00	14,65	8,63	28,29	ripple
162	17.08.2001	51,00	17,46	9,81	29,66	ripple
163	23.08.2001	80,00	7,89	6,45	20,39	ripple
164	11.09.2001	333,00	13,84	3,85	59,91	ripple
165	11.09.2001	139,00	15,06	4,84	51,86	ripple
166	12.09.2001	265,00	8,83	9,44	15,59	ripple
167	12.09.2001	21,00	10,12	9,93	16,99	ripple
168	12.09.2001	37,00	10,28	10,76	15,92	ripple
169	13.09.2001	309,00	8,58	9,1	15,71	ripple
170	14.09.2001	210,00	12,62	5,76	36,52	ripple
171	14.09.2001	40,00	9,06	12,85	11,75	ripple
172	16.09.2001	8,00	11,30	5,58	33,75	ripple
173	20.09.2001	16,00	15,94	8,54	31,11	ripple
174	20.09.2001	26,00	12,89	8,53	25,19	ripple
175	21.09.2001	229,00	21,02	7,52	46,59	ripple
176	21.09.2001	50,00	10,30	8,6	19,96	ripple
177	22.09.2001	138,00	8,03	8,29	16,14	ripple
178	25.09.2000	114,80	24,56	9,9	41,35	banda
179	26.09.2000	84,68	80,36	36,26	36,94	banda
180	26.09.2000	134,40	23,80	4,1	96,75	banda
181	26.09.2000	103,00	28,10	6,1	76,78	banda
182	26.09.2000	1,70	18,30	15,1	20,20	banda
183	26.09.2000	330,00	14,20	5,98	39,58	banda
184	26.09.2000	99,80	21,70	7	51,67	banda

185	26.09.2000	103,05	28,10	6,08	77,03	banda
186	27.09.2000	101,80	24,09	10,27	39,09	banda
187	27.09.2000	113,80	23,75	7,19	55,05	banda
188	27.09.2000	86,80	25,56	6,16	69,16	banda
189	27.09.2000	343,80	32,40	6,16	87,66	banda
190	27.09.2000	83,40	23,68	6,01	65,67	banda
191	28.09.2000	168,55	22,20	48,65	7,61	banda
192	28.09.2000	167,82	19,39	52,86	6,11	banda
193	28.09.2000	174,00	21,31	9,09	39,07	banda
194	28.09.2000	166,90	19,92	10,66	31,14	banda
195	28.09.2000	262,00	11,89	7,25	27,33	banda
196	28.09.2000	168,00	16,56	10,67	25,87	banda
197	29.09.2000	237,00	24,78	5,41	76,34	banda
198	30.09.2000	81,79	24,35	4,32	93,94	banda
199	30.09.2000	81,50	18,28	6,07	50,19	banda
200	30.09.2000	261,50	23,50	4,31	90,87	banda
201	30.09.2000	205,80	20,51	6,45	53,00	banda
202	30.09.2000	81,50	18,28	6,07	50,19	banda
203	01.10.2000	119,10	21,16	4	88,17	banda
204	01.10.2000	55,70	26,65	5,36	82,87	banda
205	01.10.2000	55,70	26,65	5,36	82,87	banda
206	01.10.2000	150,40	15,08	26,52	9,48	banda
207	02.10.2000	101,00	37,93	46,71	13,53	banda
208	02.10.2000	182,00	41,91	9,31	75,03	banda
209	02.10.2000	94,70	43,96	4,22	173,62	banda
210	02.10.2000	340,00	20,04	10,26	32,55	banda
211	02.10.2000	256,10	24,66	7,85	52,36	banda
212	03.10.2000	169,90	20,67	8,43	40,87	banda
213	25.10.2000	344,00	30,53	12,95	39,29	banda
214	25.10.2000	359,00	25,37	25,6	16,52	banda
215	25.10.2000	353,50	20,58	10,19	33,66	banda
216	26.10.2000	97,73	18,47	31,98	9,63	banda
217	29.10.2000	17,00	24,02	5,14	77,89	banda
218	18.11.2000	143,00	32,07	9,69	55,16	banda
219	18.11.2000	65,00	53,08	20,29	43,60	banda
220	19.11.2000	149,00	63,37	6,94	152,19	banda
221	20.11.2000	170,11	19,69	8,63	38,03	banda
222	21.11.2000	169,60	20,54	25,91	13,21	banda
223	21.11.2000	37,90	23,34	13,82	28,15	banda
224	21.11.2000	189,10	19,93	7,56	43,94	banda
225	22.11.2000	80,00	24,52	9,93	41,15	banda
226	22.11.2000	82,00	30,20	10,81	46,56	banda
227	23.11.2000	58,00	41,38	9,83	70,16	banda
228	23.11.2000	130,50	19,34	7,18	44,89	banda
229	23.11.2000	54,00	46,83	21,58	36,17	banda
230	23.11.2000	171,10	23,64	8,64	45,60	banda
231	19.12.2000	153,60	19,99	14,27	23,35	banda

232	19.12.2000	26,80	20,48	5,6	60,95	banda
233	20.12.2000	127,40	17,40	6,32	45,89	banda
234	20.12.2000	87,40	33,60	23,2	24,14	banda
235	20.12.2000	77,70	19,90	29,3	11,32	banda
236	21.12.2000	109,70	21,33	6,43	55,29	banda
237	21.12.2000	43,00	21,56	5,4	66,54	banda
238	22.12.2000	68,00	19,44	5,76	56,25	banda
239	23.12.2000	119,00	26,60	21,56	20,56	banda
240	24.12.2000	124,00	29,70	13,82	35,82	banda
241	24.12.2000	144,00	20,21	4,25	79,25	banda
242	25.12.2000	130,00	25,74	7,18	59,75	banda
243	25.12.2000	155,00	26,97	10,69	42,05	banda
244	26.12.2000	11,00	21,60	5,5	65,45	banda
245	26.12.2000	87,00	24,10	18,07	22,23	banda
246	26.12.2000	131,00	22,01	7,74	47,39	banda
247	27.12.2000	102,00	39,84	7,39	89,85	banda
248	27.12.2000	347,00	21,57	7,39	48,65	banda
249	28.12.2000	186,70	19,39	4,62	69,95	banda
250	28.12.2000	144,00	16,44	4,85	56,49	banda
251	28.12.2000	2,10	14,14	5,59	42,16	banda
252	28.12.2000	46,00	17,06	4,3	66,12	banda
253	18.01.2001	123,00	19,70	5,74	57,20	banda
254	22.01.2001	77,00	19,25	3,59	89,37	banda
255	23.01.2001	67,00	20,96	6,38	54,75	banda
256	27.01.2001	146,00	19,97	6,45	51,60	banda
257	15.02.2001	165,00	21,57	10,15	35,42	banda
258	15.02.2001	82,00	18,04	9,27	32,43	banda
259	17.02.2001	79,40	16,32	10,75	25,30	banda
260	17.02.2001	136,00	32,60	17,05	31,87	banda
261	18.02.2001	160,30	20,34	8,63	39,28	banda
262	18.02.2001	150,00	20,79	10,15	34,14	banda
263	19.02.2001	169,60	27,46	10,05	45,54	banda
264	20.02.2001	175,70	22,86	8,6	44,30	banda
265	21.02.2001	171,00	23,52	21,47	18,26	banda
266	22.02.2001	175,00	22,97	12,81	29,89	banda
267	22.02.2001	157,00	32,14	6,43	83,31	banda
268	23.02.2001	150,00	28,39	12,63	37,46	banda
269	23.02.2001	107,00	24,16	8,98	44,84	banda
270	24.02.2001	108,00	22,66	14,93	25,30	banda
271	24.02.2001	61,00	22,83	6,73	56,54	banda
272	24.02.2001	102,00	21,57	11,97	30,03	banda
273	25.02.2001	98,70	20,59	11,93	28,77	banda
274	25.02.2001	139,00	28,50	12,4	38,31	banda
275	26.02.2001	65,00	33,69	18,98	29,58	banda
276	18.04.2001	132,50	25,88	8,12	53,12	banda
277	18.04.2001	101,50	19,91	5,91	56,15	banda
278	19.02.2001	54,00	36,29	9,39	64,41	banda

279	20.04.2001	164,00	30,98	15,11	34,17	banda
280	21.04.2001	140,30	24,27	7,3	55,41	banda
281	21.04.2001	60,00	33,28	8,53	65,03	banda
282	22.04.2001	23,00	25,26	17,44	24,14	banda
283	24.04.2001	183,00	20,27	4,25	79,49	banda
284	27.04.2001	107,80	27,71	8,58	53,83	banda
285	16.05.2001	129,00	12,53	7,99	26,14	banda
286	17.05.2001	7,00	21,47	17,74	20,17	banda
287	21.05.2011	357,00	18,78	15,96	19,61	banda
288	21.05.1971	17,00	17,21	21,6	13,28	banda
289	22.05.2001	15,00	20,33	5,83	58,12	banda
290	24.05.2001	52,00	24,72	9,59	42,96	banda
291	24.05.2001	21,00	27,55	8,53	53,83	banda
292	24.05.2001	106,00	18,89	6,49	48,51	banda
293	25.05.2001	248,00	22,87	6,91	55,16	banda
294	25.05.2001	250,00	37,87	25,91	24,36	banda
295	26.05.2001	41,00	14,91	4,01	61,97	banda
296	28.05.2001	47,00	25,58	5,01	85,10	banda
297	15.06.2001	13,00	19,79	7,98	41,33	banda
298	16.06.2001	22,00	29,91	8,57	58,17	banda
299	18.06.2001	337,00	20,77	6,36	54,43	banda
300	18.06.2001	327,00	24,33	16,7	24,28	banda
301	25.06.2001	41,00	23,21	9,51	40,68	banda
302	13.07.2001	121,00	17,71	8,2	36,00	banda
303	14.07.2001	352,00	19,74	9,42	34,93	banda
304	14.07.2001	63,00	27,04	7,55	59,69	banda
305	14.07.2001	359,00	34,96	9,68	60,19	banda
306	14.07.2001	104,00	21,45	9,6	37,24	banda
307	18.07.2001	20,00	24,19	7,99	50,46	banda
308	18.07.2001	13,00	25,74	7,53	56,97	banda
309	18.07.2001	112,00	25,12	12,98	32,25	banda
310	22.07.2001	57,00	24,94	15,59	26,66	banda
311	24.07.2001	44,00	24,78	5,27	78,37	banda
312	24.07.2001	77,00	15,41	5,28	48,64	banda
313	24.07.2001	188,00	18,73	15,27	20,44	banda
314	24.07.2001	115,00	17,30	7,53	38,29	banda
315	24.07.2001	33,00	19,54	23,66	13,76	banda
316	13.08.2001	43,00	26,14	6,35	68,61	banda
317	13.08.2001	83,00	26,26	7,24	60,45	banda
318	13.08.2001	32,00	27,86	6,75	68,79	banda
319	14.08.2001	75,00	41,58	9,47	73,18	banda
320	14.08.2001	61,00	23,90	5,34	74,59	banda
321	16.08.2001	213,00	17,63	5,33	55,13	banda
322	16.08.2001	109,00	18,38	5,37	57,05	banda
323	17.08.2001	16,00	17,28	10,39	27,72	banda
324	19.08.2001	344,00	37,31	10,75	57,84	banda
325	20.08.2001	174,00	17,30	6,44	44,77	banda



326	21.08.2001	170,00	20,10	5,45	61,47	banda
327	21.08.2001	167,00	23,21	10,56	36,63	banda

## APÊNDECE B

Expressão da concentração do [OH (v = 9, 8,)]

$$[\text{OH (9)}] = \frac{\kappa_1 f(9)[H][O_3]}{A(8) + \kappa_L^{O_2}(9)[O_2] + \kappa_L^{N_2}(9)[N_2] + \kappa_L^O(9)[O]} \quad (\text{B.1})$$

$$[\text{OH (8)}] = \frac{\kappa_1 f(8)[H][O_3] + [\text{OH(9)}\{A(9,8) + \kappa_3^{O_2}[O_2] + \kappa_3^{N_2}[N_2]\}}{A(8) + \kappa_L^{O_2}(8)[O_2] + \kappa_L^{N_2}(8)[N_2] + \kappa_L^O(8)[O]} \quad (\text{B.2})$$