MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.02.15.30-TDI

# ESTUDO DE ONDAS DE GRAVIDADE-ACÚSTICA OBSERVADAS NA MLT NA REGIÃO AMAZÔNICA E NO SUL DO BRASIL

Cassio Espindola Antunes

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Alexandre Alvares Pimenta, e Vânia Fátima Andrioli Novaes Silva, aprovada em 30 de maio de 2018.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BA9HLL>

INPE
São José dos Campos
2018

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):**

**Presidente:**

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

**Membros:**

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.02.15.30-TDI

# ESTUDO DE ONDAS DE GRAVIDADE-ACÚSTICA OBSERVADAS NA MLT NA REGIÃO AMAZÔNICA E NO SUL DO BRASIL

Cassio Espindola Antunes

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Alexandre Alvares Pimenta, e Vânia Fátima Andrioli Novaes Silva, aprovada em 30 de maio de 2018.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BA9HLL>

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Antunes, Cassio Espindola.

An89e Estudo de ondas de gravidade-acústica observadas na MLT na Região Amazônica e no Sul do Brasil / Cassio Espindola Antunes. – São José dos Campos : INPE, 2018.

xxiv + 153 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.02.15.30-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadores : Drs. Alexandre Alvares Pimenta, e Vânia Fátima Andrioli Novaes Silva.

1. Ondas de gravidade-acústica. 2. Fontes de geração de ondas de gravidade acústica. 3. Luminescência atmosférica. 4. Simulações numéricas. 5. Frentes mesosféricas. I.Título.

CDU 555.511.31:534.8(81)

Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aluno (a): *Cassio Espindola Antunes*

Título: "ESTUDO DE ONDAS DE GRAVIDADE-ACÚSTICA OBSERVADAS NA MLT NA REGIÃO AMAZÔNICA E NO SUL DO BRASIL".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de *Doutor(a)* em

*Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas*

Dr. Alisson Dal Lago

*Presidente / INPE / São José dos Campos - SP*

*( ) Participação por Video - Conferência*

Dr. Alexandre Alvares Pimenta

*Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP*

*( ) Participação por Video - Conferência*

Dra. Vânia Fátima Andrioli Novaes Silva

*Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP*

*( ) Participação por Video - Conferência*

Dr. Clezio Marcos De Nardin

*Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP*

*( ) Participação por Video - Conferência*

Dr. Paulo Roberto Fagundes

*Convidado(a) / UNIVAP / São José dos Campos - SP*

*( ) Participação por Video - Conferência*

Dr. José Ricardo Abalde Guede

*Convidado(a) / ITA / São José dos Campos - SP*

*( ) Participação por Video - Conferência*

*Este trabalho foi aprovado por:*

*( ) maioria simples*

*(✓) unanimidade*

*São José dos Campos, 30 de maio de 2018*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, aos meus amados pais, José Luiz Irion Antunes e Elenita Espindola Antunes, que em momento algum deixaram de me apoiar para atingir este objetivo. Mesmo nos momentos mais difíceis e nebulosos, eles estavam lá, suprindo as demandas emocionais e espirituais necessárias para seguir em frente. Igualmente, à minha querida irmã, Scheila Espindola Antunes, que serviu de exemplo e inspiração para o irmão caçula, devo o meu muito obrigado pelo incentivo e apoio transmitido ao longo da jornada.

Sou muito grato a minha esposa, Tatiana Meinertz Vier, e filho, Vicente Vier Antunes, por terem participado, se não diretamente na parte técnica, mas indiretamente e de maneira fundamental na parte emocional para a conclusão deste trabalho. À minha esposa, o muito obrigado pela compreensão, carinho e paciência, sobretudo nos últimos meses de trabalho. Muito obrigado ao meu filho, que por proporcionar a experiência e emoção da paternidade foi fundamental para que eu concluísse este objetivo de vida.

Devo gratidão eterna aos meus orientadores, Dr. Alexandre Alvares Pimenta e Dra. Vânia Fátima Andrioli Novaes Silva, que estiverem presentes e participaram dedicadamente de cada etapa de desenvolvimento da tese. Ao Dr. Alexandre Alvares Pimenta o meu agradecimento especial, por ter aceito a proposta de orientação e não ter medido esforços para que o trabalho fosse concluído. A Dra. Vânia Fátima Andrioli Novaes Silva, agradeço profundamente por ter contribuído de maneira fundamental desde o início, sempre colaborando prontamente para discutir, tirar dúvidas e sugerindo excelentes ideias.

Agradeço aos colaboradores que participaram diretamente deste trabalho, sem os quais não seria possível atingir os resultados obtidos. Ao Dr. Jose Valentin Bageston, por ter compartilhado sua experiência, sabedoria e ferramentas para a compreensão e análise das ondas de gravidade. Ao Dr. Cristiano Max Wrasse, por ter ajudado em diversos momentos no processamento e calibração das imagens, além de discutir pontos importantes do tema e do trabalho. Ao Dr. Esfhan Alam Kherani, por ter participado de maneira exaustiva e fundamental para atingirmos os resultados com as simulações numéricas. Ao Dr. Barclay Robert Clemesha, que participou da concepção e proposta de tese, compartilhando seu vasto conhecimento sobre a atmosfera e técnicas de observação. A todos estes colaboradores, diretos e fundamentais, os meus mais sinceros e profundos agradecimentos.

Aos diversos colaboradores, que talvez não participaram diretamente dos resultados e conclusões deste trabalho, mas de igual importância para que o mesmo fosse concluído, pois sem a suas contribuições, conversas, tempos de descontração e risadas o trabalho seria impraticável. Ao Eng. Fernando Morais Santos (Fernandinho), pelo auxílio técnico, pelas caronas na volta do INPE, pelas conversas descontraídas e engraçadas, pelas conversas sérias e lições de vida. A Maria da Conceição Alves (Con) pela dedicação, comprometimento, carinho e atenção com todos os alunos da pós-graduação, pelas confraternizações no LASER, pelas conversas e risadas que amenizaram as dificuldades do doutorado. Ao Rubens (Rubinho), que auxiliou em diversos momentos tecnicamente para solucionar problemas com softwares e equipamentos, bem como pelas conversas interessantes no intervalo para um café. Ao Dr. Siomel Savio Odriozola, pelo coleguismo, pelo compartilhamento de experiência e conhecimento, por respeitar o inevitável cochilo na mesa de trabalho após o almoço, pelo papo na hora do café e pelo próprio grão de café de boa qualidade. Ao Dr. Alisson Dal Lago, pelas inúmeras caronas de ida e volta do INPE, pelo incentivo e pelo apoio para persistir na jornada do doutorado apesar das adversidades. Ao Dr. Clézio De Nardin, pelo apoio na chegada a então nova cidade de São José dos Campos, pelos ensinamentos, preocupação e compartilhamento de experiências de paternidade. A todos, o meu muito obrigado.

Ao mentor, Dr. Nelson Jorge Schuch, que contribuiu de forma inestimável com valiosos conhecimentos e compartilhando sua sabedoria, desde os tempos de graduação, e que foram responsáveis por uma grande mudança e crescimento como individuo. Muito obrigado.

Agradeço ao Instituto Federal Catarinense, minha atual casa profissional, por conceder a licença para me afastar integralmente da atividade docente, afim de que pudesse dedicar-me exclusivamente ao doutorado na etapa mais crucial. Obrigado aos colegas e Direção do Campus Blumenau, por possibilitarem da melhor maneira possível que o afastamento fosse viável.

Finalmente, a todos os meus amigos, do Rio Grande do Sul, os que fiz em São José dos Campos, aos que passaram pelas repúblicas do condomínio Esplanda Palace, a todos que fizeram parte e são responsáveis pelo caminho percorrido, cujos nomes não poderei citar para não ser injusto com àqueles que certamente a memória me deixará escapar, obrigado, pois todos tem uma parcela de contribuição.

Agradeço às instituições CAPES e CNPq pelo apoio financeiro ao projeto. E espero que as futuras gerações, incluindo a do meu filho, continuem tendo o indispensável

apoio financeiro e melhores condições para estudar e desenvolver cientifica e culturalmente o Brasil. Somente incentivo e investimento em educação podem resolver os diversos problemas de uma sociedade de maneira eficiente.

**RESUMO**

Neste trabalho são investigadas as características das ondas de gravidade na alta atmosfera sobre duas regiões distintas do Brasil. Foram analisados dados da luminescência atmosférica na MLT (*Mesosphere and Lower Thermosphere*), das emissões do OI 557,7 nm e NaD 589,3 nm, obtidos por um imageador all-sky. A estação SMS (29,442°S; 53,822°O) fica localizada no extremo sul do Brasil, entre baixas e médias latitudes, na cidade de São Martinho da Serra, RS. Os dados analisados foram coletados entre março de 2011 a maio de 2012. Nos eventos analisados neste sítio observou-se uma anisotropia na direção de propagação em torno do eixo NO-SE. A propagação preferencial no inverno foi para NO, enquanto que no verão ocorreu no sentido SE. A estação MAN (2,589°S; 60,221°O) fica na região Norte do Brasil em meio a floresta Amazônica, a cerca de 60 km de Manaus, AM. Os dados analisados para este sítio compreendem o período de julho de 2015 a agosto de 2017. Somente no período do outono observou-se uma direção preferencial para N na propagação das ondas de gravidade. Nas demais estações do ano não houve direção preferencial, sendo que no inverno, período com maior número de observações, a propagação foi quase isotrópica. Frentes mesosféricas foram observadas em ambas regiões e estudo de casos abordando este tipo de evento são apresentados. Duas frentes mesosféricas duplas (*twin mesospheric bores*) foram observadas na estação MAN. Mais de 50% dos eventos observados em SMS não tem relação com atividade convectiva na troposfera, sugerindo que as fontes estão acima dessa região. Sobre a estação MAN a atividade convectiva troposférica é praticamente contínua ao longo do ano, sendo tipicamente observadas múltiplas zonas de convecção na região Amazônica. A posição destas zonas de convecção troposféricas apresentou alta correlação com a direção de propagação das ondas de gravidade observadas na MLT. Um novo mecanismo de geração de ondas de gravidade-acústica *in situ* na baixa termosfera, devido a aquecimento Joule associado às camadas E-esporádicas foi proposto. Simulações numéricas da geração e propagação de ondas de gravidade-acústica foram conduzidas para o mecanismo proposto e para múltiplas forçantes troposféricas.

Palavras-chave: Ondas de gravidade-acústica. Fontes de geração de ondas de gravidade-acústica. Luminescência atmosférica. Simulações numéricas. Frentes mesosféricas.

**STUDY OF ACOUSTIC GRAVITY WAVES OBSERVED IN THE MLT OVER THE AMAZONIC REGION AND IN THE SOUTHERN BRAZIL**

## ABSTRACT

In this work is presented an investigation of gravity waves observed in the upper atmosphere over two distinct regions of Brazil. Nightime airglow data emissions of the OI 557.7 nm and NaD 589.3 nm from the MLT – Mesosphere and Lower Thermosphere, obtained by an all-sky imager are analyzed. The SMS station (29.442°S, 53.822°W) is located in the Southern Brazil, between low and middle latitudes, in the city of São Martinho da Serra, RS state. The data were collected from March 2011 to May 2012. An anisotropy was observed in the propagation direction NW-SE for the events analyzed at SMS station. The preferential propagation in the winter was to NW, whereas in the summer it occurred in the SE direction. The MAN station (2.589°S, 60.221°W) is in the Northern Brazil in the Amazon forest region, located about 60 km from Manaus, AM state. The MAN analyzed data comprise the period from July 2015 to August 2017. A northward preferential propagation was observed during fall period while during the other seasons there was no preferential direction. In the winter, the period with the highest number of observations, the propagation was almost isotropic. Mesospheric fronts were observed in both regions and studies addressing this type of event are presented. Two double mesospheric bores (twin mesospheric bores) were observed at the MAN station. Investigation of possible sources indicated that more than 50 % of the events observed in SMS have no evident relation with convective ativity, therefore probably have their sources above the troposphere. On the other hand, the tropospheric convective activity is practically continuous throughout the year on the MAN station, being usual to observe multiple convection zones in the Amazon region. These tropospheric convection zones position showed a high correlation with the propagation direction of gravity waves observed in the MLT. A new mechanism for acoustic gravity wave generation in the low thermosphere due to Joule heating associated with E-sporadic layers is proposed. Numerical simulations of acoustic gravity waves generation and propagation were conducted for the proposed in situ generation mechanism and for multiple tropospheric forcing.

Keywords: Acoustic gravity waves. Acoustic gravity waves sources. Ariglow. Numeric simulations. Mesospheric bores.

## LISTA DE FIGURAS

**Pág.**


2.1 Variação vertical de temperatura da atmosfera. . . . . 4
2.2 Propagação de ondas e regiões de $m^2$. . . . . 14
2.3 Formação de dutos de propagação. . . . . 15

3.1 Frente mesosférica seguida de trem de ondas de gravidade. . . . . 24
3.2 Localização dos sítios de observação SMS e MAN. . . . . 25
3.3 Imagens dos filtros do imageador de SMS. . . . . 26
3.4 Imagens dos filtros do imageador de MAN. . . . . 27
3.5 Fotômetro imageador all-sky. . . . . 28
3.6 Câmera CCD. . . . . 31
3.7 Roda de filtros e lente olho de peixe. . . . . 31
3.8 Modelo de agenda de operação do imageador. . . . . 34
3.9 Espectro do filtro óptico do BG. . . . . 35
3.10 Espectro do filtro óptico do O5. . . . . 35
3.11 Espectro do filtro óptico do Na. . . . . 36
3.12 Onda de gravidade observada simultaneamente na imagem de diferentes filtros em SMS 31/05/2011. . . . . 38
3.13 Redução da dimensão da imagem original. . . . . 41
3.14 Onda de gravidade observada na imagem não linearizada. . . . . 42
3.15 Distorção da imagem original mapeada em escala linear de km. . . . . 43
3.16 Mapeamento de coordenadas da imagem original para geográficas. . . . . 45
3.17 Seleção das estrelas para determinação da função de lente. . . . . 46
3.18 Função da lente. . . . . 47
3.19 Mapeamento da imagem original. . . . . 48
3.20 Janelamento da imagem para análise FFT. . . . . 49
3.21 Espectro cruzado médio resultante da análise espectral. . . . . 49

4.1 Calendário de dados analisados de SMS. . . . . 52
4.2 Contagem de ocorrência de ondas de gravidade e de noites úteis de observação para o período analisado. . . . . 54
4.3 Parâmetros de onda observados em SMS. . . . . 55
4.4 Comprimento de onda horizontal em SMS nas estações do ano. . . . . 56
4.5 Período observado em SMS nas estações do ano. . . . . 57
4.6 Velocidade de fase observada em SMS nas estações do ano. . . . . 58
4.7 Azimute de propagação observado em SMS nas estações do ano. . . . . 59
4.8 Temperatura de topo de nuvem. . . . . 61

4.9 Ocorrência de ondas de gravidade com e sem a presença de possíveis fontes convectivas na troposfera. . . . . 62
4.10 Média do vento zonal e meridional em Santa Maria durante meses de outono e inverno. . . . . 66
4.11 Média do vento zonal e meridional em Santa Maria durante meses de verão. 67
4.12 Frente mesosférica observada em SMS na emissão do OI 557,7 nm – 25/08/2011. . . . . 68
4.13 Frente mesosférica observada em SMS na emissão do NaD 589,3 nm – 25/08/2011. . . . . 69
4.14 Efeito de complementariedade. . . . . 70
4.15 Imagens linearizadas da frente mesosférica de 25/08/2011. . . . . 71
4.16 Temperatura de topo de nuvem $t_0$ - 8 e $t_0$ - 6 horas da observação de frente mesosférica em SMS – 25/08/2011. . . . . 74
4.17 Temperatura de topo de nuvem $t_0$ - 4 e $t_0$ - 0 horas da observação de frente mesosférica em SMS – 25/08/2011. . . . . 75
4.18 Frente mesosférica 24/11/2011 SMS imagem original. . . . . 78
4.19 Frente mesosférica 24/11/2011 SMS imagem linearizada 300x300 $km^2$. . . 79
4.20 Temperatura de topo de nuvem $t_0$ - 6 e $t_0$ - 4 horas da observação de frente mesosférica em SMS – 24/11/2011. . . . . 80
4.21 Temperatura de topo de nuvem $t_0$ - 2,5 e $t_0$ - 0 horas da observação de frente mesosférica em SMS – 24/11/2011. . . . . 81

5.1 Calendário de dados analisados de MAN. . . . . 84
5.2 Ocorrência de ondas de gravidade entre julho de 2015 e agosto de 2017 na estação MAN. . . . . 86
5.3 Parâmetros de onda observados em MAN. . . . . 87
5.4 Comprimento de onda horizontal em MAN nas estações do ano. . . . . 88
5.5 Período aparente em MAN nas estações do ano. . . . . 89
5.6 Velocidade de fase das ondas de gravidade observadas em MAN nas estações do ano. . . . . 90
5.7 Azimute de propagação observado em MAN nas estações do ano. . . . . 91
5.8 Parâmetros de onda observados em MAN para eventos com período superior a 24 minutos. . . . . 92
5.9 Temperatura de topo de nuvem na região da estação MAN. . . . . 94
5.10 Sobreposição de ondas durante evento de frente mesosférica em MAN - 15/08/2015. . . . . 96
5.11 Temperatura de topo de nuvem em MAN na noite de 15/08/2015. . . . . 98
5.12 Imagens originais das frentes mesosféricas em MAN - 17/08/2015. . . . . 99
5.13 Imagens linearizadas das frentes mesosféricas em MAN - 17/08/2015. . . 100

5.14 Temperatura de topo de nuvem em MAN na noite de 17/08/2015. . . . . 102
5.15 Frente mesosférica em MAN na noite de 09/08/2016. . . . . 103
5.16 Temperatura de topo de nuvem na noite de 09/08/2016. . . . . 104
5.17 Imagem original primeira frente mesosférica na noite de 27/07/2017. . . . 105
5.18 Imagem original segunda frente mesosférica na noite de 27/07/2017. . . . 106
5.19 Imagem linearizada da primeira frente mesosférica da noite de 27/07/2017.107
5.20 Imagem linearizada da segunda frente mesosférica da noite de 27/07/2017.107
5.21 Imagem linearizada de interação entre ondas de ondas de gravidade observadas em MAN na noite de 27/07/2017. . . . . 108
5.22 Temperatura de topo de nuvem na noite de 27/07/2017. . . . . 108

6.1 Variação sazonal da Es. . . . . 115
6.2 Número de meteoros por dia e ocorrência de camada Es ao longo do ano para o Hemisfério Norte. . . . . 116
6.3 Média anual de $foEs$ e contagem de meteoros. . . . . 117
6.4 Perfis de altura da densidade total de plasma obtido com simulação para Arecibo (18°N; 67°O). . . . . 118
6.5 Perfil de camada Es obtida em simulações para SMS (29,4°S; 53,8°O). . . 119
6.6 Mapa global da camada Es. . . . . 120
6.7 Perfil de densidade e temperatura da atmosfera usado para simulações. . 122
6.8 Amplitude das ondas de gravidade-acústica para simulações de aquecimento Joule. . . . . 123
6.9 Amplitude das ondas de gravidade-acústica no plano horizontal em ≈ 100 km de altura. . . . . 124
6.10 Simulação para uma forçante troposférica. . . . . 128
6.11 Simulação para duas forçantes troposféricas idênticas. . . . . 129
6.12 Simulação para duas forçantes troposféricas com distribuição espacial distintas. . . . . 131
6.13 Simulação para três forçantes troposféricas idênticas. . . . . 132

A.1 Espectro de transmissão dos filtros ópticos do NaD, BG, O5, O6 e O7. . 146

B.1 Onda de gravidade observada simultaneamente em diferentes filtros na estação de SMS em 24/07/2011. . . . . 148
B.2 Onda de gravidade observada simultaneamente em diferentes filtros na estação de SMS em 25/07/2011. . . . . 149

## LISTA DE TABELAS

**Pág.**

5.1 Parâmetros de onda observados na noite de 15/08/2015. . . . . 97
5.2 Parâmetros de onda observados na noite de 17/08/2015. . . . . 98
5.3 Parâmetros de onda observados na noite de 09/08/2016. . . . . 103
5.4 Parâmetros de onda observados na noite de 27/07/2017. . . . . 107

## LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|---|---|---|
| $A_{\delta T}$ | – | amplitude percentual da perturbação térmica |
| $A_{CT}$ | – | amplitude percentual da perturbação devido à convecção troposférica |
| $B_0$ | – | campo magnético terrestre |
| $c$ | – | velocidade de fase da onda |
| $c_{obs}$ | – | velocidade de fase observada |
| $c_p$ | – | calor específico a pressão constante |
| $c_s$ | – | velocidade do som |
| $c_v$ | – | calor específico a volume constante |
| $C(k,l)$ | – | espectro cruzado |
| $\frac{d}{dt}$ | – | derivada total em relação ao tempo |
| $\frac{D}{Dt}$ | – | operador de Stokes |
| $E$ | – | campo elétrico |
| $\vec{F}$ | – | forçantes externas |
| $F(k,l)$ | – | Transformada de Fourier Discreta |
| $f_m$ | – | fluxo de entrada de meteoros |
| $f_{m0}$ | – | fluxo de fundo de meteoros |
| $f_oEs$ | – | frequência crítica da camada E-esporádica |
| $\vec{g}$ | – | aceleração da gravidade |
| $G(el)$ | – | função da lente |
| $h\nu$ | – | emissão de fótons |
| $j_{oP}$ | – | corrente de fundo |
| $k$ | – | número de onda zonal |
| $k_h$ | – | número de onda horizontal |
| $k_B$ | – | constante de Boltzmann |
| $l$ | – | número de onda meridional |
| $m$ | – | número de onda vertical |
| $M_x$, $N_y$ | – | dimensões da imagem original |
| $n_0$ | – | concentração ambiente de partículas ionizadas |
| $N$ | – | frequência de Brunt-Väisälä |
| $p$ | – | pressão atmosférica |
| $p_0$ | – | estado básico da pressão atmosférica |
| $p_1$, $P$ | – | estado perturbado da pressão atmosférica |
| $q$ | – | carga elétrica |
| $Q$ | – | quantidade de calor por unidade de massa e tempo |
| $R$ | – | constante dos gases ideais |
| $S(r,\theta,\phi)$ | – | função espacial da forçante |
| $t$ | – | tempo |
| $T$ | – | temperatura |
| $T_0$ | – | temperatura de fundo |
| $u$ | – | componente zonal do vento neutro |

| | | |
|---|---|---|
| $u_0$ | – | estado básico da componente zonal do vento neutro |
| $u_1$, $U$ | – | estado perturbado da componente zonal do vento neutro |
| $\vec{v}$ | – | vetor vento neutro |
| $v$ | – | componente meridional do vento neutro |
| $v_0$ | – | estado básico da componente meridional do vento neutro |
| $v_1$, $V$ | – | estado perturbado da componente meridional do vento neutro |
| $w$ | – | componente vertical do vento neutro |
| $w_0$ | – | estado básico da componente vertical do vento neutro |
| $w_1$, $W$ | – | estado perturbado da componente vertical do vento neutro |
| $W_p$ | – | amplitude do vento vertical simulado |
| $W_p^{max}$ | – | amplitude máxima do vento vertical simulado |
| $\hat{x}$ | – | direção meridional (horizontal para norte) |
| $\hat{y}$ | – | direção zonal (horizontal para leste) |
| $\hat{z}$ | – | direção zenital (vertical para cima) |
| $\frac{\partial}{\partial t}$ | – | derivada parcial em relação ao tempo |
| $\frac{\partial}{\partial x}$ | – | derivada parcial em relação a x |
| $\frac{\partial}{\partial y}$ | – | derivada parcial em relação a y |
| $\frac{\partial}{\partial z}$ | – | derivada parcial em relação a z |
| $\delta t$ | – | intervalo de tempo |
| $\delta j$ | – | incremento de corrente |
| $\delta n$ | – | perturbação na densidade eletrônica |
| $\delta Q$ | – | taxa de aquecimento por unidade de densidade |
| $\delta T$ | – | perturbação da temperatura |
| $\delta\phi)$ | – | diferença de fase |
| $\varepsilon$ | – | termo de proporcionalidade do desvio do estado médio |
| $\lambda_h$ | – | comprimento de onda horizontal |
| $\lambda_x$ | – | comprimento de onda zonal |
| $\lambda_y$ | – | comprimento de onda meridional |
| $\lambda_z$ | – | comprimento de onda vertical |
| $\mu_P$ | – | mobilidade Pedersen para íons |
| $\nu$ | – | frequência de colisão de partículas |
| $\rho$ | – | densidade atmosférica |
| $\rho_0$ | – | estado básico da densidade atmosférica |
| $\rho_1$ | – | estado perturbado da densidade atmosférica |
| $\sigma_P$ | – | condutividade Pedersen |
| $\tau_{obs}$ | – | período observado |
| $\phi(k,l)$ | – | fase da onda |
| $\omega$ | – | frequência angular aparente da onda |
| $\hat{\omega}$ | – | frequência angular intrínseca da onda |
| $\omega_a$ | – | frequência de corte acústica |
| $\omega_g$ | – | frequência de Brünt-Väisälä |
| $\Omega$ | – | girofrequência |

| | | |
|---|---|---|
| $\vec{\Omega}$ | – | velocidade angular da Terra |
| $\Omega_y$ | – | componente meridional da velocidade angular da Terra |
| $\Omega_z$ | – | componente vertical da velocidade angular da Terra |
| $\Gamma$ | – | coeficiente de Eckart |
| $\nabla$ | – | gradiente |
| $\nabla\cdot$ | – | divergente |
| $(az, el)$ | – | coordenadas em azimute e elevação |
| $(f, g)$ | – | coordenadas padrão |
| $(i, j)$ | – | coordenadas da imagem original (pixel) |
| $(r, \theta, \phi)$ | – | coordenadas de altitude, latitude e longitude |
| $(r_0, \theta_0, \phi_0)$ | – | coordenadas de altitude, latitude e longitude central |
| $(x, y)$ | – | coordenadas geográficas |
| $\rightarrow$ | – | reação química |
| $^*$ | – | conjugado complexo |

## SUMÁRIO

**Pág.**


**1 INTRODUÇÃO . . . . . 1**

1.1 Objetivos . . . . . 1

1.2 Estrutura da Tese . . . . . 2

**2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . . 3**

2.1 Atmosfera Terrestre . . . . . 3

2.2 Luminescência Atmosférica . . . . . 4

2.2.1 Emissão da Camada de Sódio . . . . . 6

2.2.2 Emissão do OI 557,7 nm . . . . . 6

2.3 Ondas de Gravidade . . . . . 8

2.3.1 Equações das Ondas de Gravidade . . . . . 9

2.3.2 Propagação de Ondas de Gravidade . . . . . 13

2.3.3 Canalização de Ondas de Gravidade . . . . . 14

2.3.4 Absorção e Filtragem de Ondas de Gravidade . . . . . 16

2.3.5 Fontes de Ondas de Gravidade . . . . . 16

2.4 Observações de Ondas de Gravidade na Luminescência da Alta Atmosfera no Setor Brasileiro . . . . . 17

**3 METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO . . . . . 23**

3.1 Dados da Luminescência Atmosférica . . . . . 23

3.2 Imageador All-sky . . . . . 28

3.2.1 Operação do Imageador . . . . . 32

3.2.2 Filtros Ópticos de Banda Estreita . . . . . 33

3.2.2.1 Contaminação das Bandas do OH . . . . . 36

3.3 Processamento dos Dados de Imageador . . . . . 40

3.3.1 Redimensionamento da Imagem Original . . . . . 40

3.3.2 Calibração das Imagens . . . . . 41

3.3.3 Análise Espectral Usando Transformada de Fourier Discreta . . . . . 45

**4 OBSERVAÇÕES EM SÃO MARTINHO DA SERRA . . . . . 51**

4.1 Parâmetros das Ondas Observadas em SMS . . . . . 51

4.2 Análise das Possíveis Fontes . . . . . 58

4.3 Estudo de Casos da Estação SMS . . . . . 65

4.3.1 Frente Mesosférica de 25/08/2011 . . . . . 65
4.3.2 Frente Mesosférica de 24/11/2011 . . . . . 76
4.4 Discussões dos Resultados de SMS . . . . . 77

**5 OBSERVAÇÕES NA REGIÃO AMAZÔNICA . . . . . 83**
5.1 Parâmetros das Ondas Observados em MAN . . . . . 83
5.2 Análise das Possíveis Fontes . . . . . 90
5.3 Estudo de Casos da Estação MAN . . . . . 95
5.3.1 Intensa Atividade de Ondas e Frente Mesosférica na Noite de 15/08/2015 95
5.3.2 Frente Mesosférica Dupla na Noite de 17/08/2015 . . . . . 97
5.3.3 Frente Mesosférica e Ondas na Noite de 09/08/2016 . . . . . 101
5.3.4 Frente Mesosférica Dupla na Noite de 27/07/2017 . . . . . 104
5.4 Discussões dos Resultados de MAN . . . . . 106

**6 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE ONDAS DE GRAVIDADE-ACÚSTICA . . . . . 111**
6.1 Teoria de Aquecimento Joule Associado à Perturbação na Densidade Iônica na Região E . . . . . 111
6.2 Simulações de Aquecimento Joule na Região E . . . . . 121
6.3 Simulações de Múltiplas Fontes Troposféricas . . . . . 125

**7 CONCLUSÃO . . . . . 133**
7.1 Trabalhos Futuros . . . . . 135

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . . 137**

**APÊNDICE A - ESPECTRO DE TRANSMISSÃO DOS FILTROS ÓPTICOS DE INTERFERÊNCIA . . . . . 145**

**APÊNDICE B - EVENTOS DE CONTAMINAÇÃO DO OH . . . . 147**

**APÊNDICE C - ROTINA EM VISUAL BASIC PARA PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS DE SMS . . . . . 151**

# 1 INTRODUÇÃO

As ondas de gravidade são perturbações na atmosfera com características oscilatórias regidas pelo desequilíbrio entre força de gravidade e gradientes de pressão. A principal força restauradora dessas perturbações está associada a flutuabilidade (*buoyancy*). As ondas de gravidade podem apresentar propagação da componente vertical possibilitando a dissipação e transferência de energia e momento para o fluxo básico da alta atmosfera. Os primeiros relatos na literatura de movimentos de pequena escala observados na alta atmosfera foram feitos por Munro (1950) e Hines (1960), que estabeleceram a teoria básica de ondas de gravidade na mesosfera.

Diversos trabalhos científicos sobre ondas de gravidade na alta atmosfera foram realizados no setor brasileiro. Porém, a maior parte destes trabalhos concentram-se nas regiões Sudeste, Centro e Nordeste do território nacional. A motivação desta tese foi investigar as características das ondas de gravidade nas regiões Norte e Sul do Brasil, visto o pouco conhecimento que se tem a respeito deste fenômeno nestas duas regiões. Os dados analisados nesta tese são observações na luminescência atmosférica obtidas com um imageador tipo all-sky utilizando imagens das emissões do oxigênio OI 557,7 nm e do sódio NaD em 589,3 nm. Na região Norte as observações foram feitas na reserva biológica de Cuieiras, em meio a floresta Amazônica, na estação MAN (2,589°S; 60,221°O). Os dados de MAN analisados compreendem o período de julho de 2015 a agosto de 2017. Na região Sul as observações foram realizadas no Observatório Espacial do Sul, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais CRS/INPE, na cidade São Martinho da Serra, RS. A estação da região Sul é denominada SMS (29,442°S; 53,822°O) e está localizada na fronteira entre baixas e médias latitudes. Os dados de SMS analisados foram coletados entre março de 2011 a maio de 2012.

A seguir são apresentados os objetivos deste trabalho e uma descrição da estrutura e divisão dos principais tópicos em capítulos.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral desta tese é estudar e comparar as características das ondas de gravidade observadas na mesosfera e baixa termosfera (MLT - *Mesosphere and Lower Thermosphere*) na região Norte e Sul do Brasil uma vez que pouco se sabe sobre esse fenômeno nessas duas regiões.

Como objetivos específicos deste estudo são citados:

- Determinar os parâmetros de onda: comprimento de onda horizontal, direção de propagação, período observado e velocidade de fase observada;
- Estudar as características e o comportamento sazonal das ondas de gravidade nas duas regiões de interesse;
- Investigar os principais mecanismos de geração das ondas de gravidade nas duas regiões
- Efetuar estudo de casos de eventos distintos observados.
- Investigar possíveis mecanismos de geração através de simulações numéricas.

## 1.2 Estrutura da Tese

Esta tese está dividida em sete capítulos e três apêndices. A organização dos conteúdos em cada capítulo é descrita a seguir:

- **Capítulo 1:** Introdução – Introdução do tema, motivação, objetivos e estrutura do trabalho.
- **Capítulo 2:** Revisão Bibliográfica - Apresentação dos conceitos básicos, teoria sobre ondas de gravidade e revisão de trabalhos na literatura.
- **Capítulo 3:** Metodologia e Instrumentação - Funcionamento da instrumentação utilizada e apresentação das técnicas usadas para processamento e análise dos dados.
- **Capítulo 4:** Observações em São Martinho da Serra - Apresentação dos parâmetros de onda de gravidade observados na região Sul do Brasil, discussão sobre possíveis fontes e estudo de casos.
- **Capítulo 5:** Observações na região Amazônica - Apresentação dos parâmetros de onda de gravidade observados na região Norte do Brasil, discussão sobre fontes e estudo de casos.
- **Capítulo 6:** Simulações Numéricas de Ondas de Gravidade-Acústica - Proposição de mecanismo para geração de ondas de gravidade-acústica na MLT, discussões de resultados de simulações numéricas.
- **Capítulo 7:** Conclusão - Discussões finais e trabalhos futuros.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 Atmosfera Terrestre

A classificação mais usual da atmosfera terrestre é baseada na variação vertical da temperatura. O perfil de temperatura em altura dado pelo modelo MSIS-E-90 para baixa atividade solar é apresentado na Figura 2.1. Conforme observado na figura, a temperatura decresce a partir da superfície até aproximadamente 17 km de altura na região denominada troposfera. O aquecimento dessa região deve-se principalmente à absorção da radiação infravermelha solar. A queda de temperatura a taxa aproximada de 10 K/km é consequência da expansão adiabática das células de ar ascendentes. A tropopausa define o limite da troposfera e o início da estratosfera, onde a temperatura passa a aumentar com a altura. O aumento de temperatura na estratosfera esta associado à absorção de radiação ultravioleta e infravermelha pelo ozônio ($O_3$ gerado pela luz solar). Um máximo de temperatura situa-se a aproximadamente 50 km de altura e define a região limite da estratosfera chamada estratopausa. A inversão na curva da temperatura acima de 50 km de altura define o início da mesosfera (atmosfera média), que estende-se até a mesopausa a cerca de 100 km de altura. A diminuição da produção de $O_3$ e a taxa de resfriamento do meio proporcionam o declínio da temperatura observado na mesosfera. Acima da mesopausa a temperatura cresce assintoticamente com a altura na região chamada termosfera. O aquecimento devido a ionização eleva a temperatura na termosfera assintoticamente até 800 K no período de baixa atividade solar podendo chegar a 1000 K na atividade solar máxima. A termosfera estende-se até cerca de 400 km de altura, onde inicia-se a exosfera e a densidade de partículas é extremamente baixa e a temperatura permanece praticamente estável (CHAMBERLAIN; HUNTEN, 1990).

A atmosfera terrestre é influenciada ainda pelo movimento planetário, ocasionando a distribuição de energia de forma distinta em regiões diurnas e noturnas. Uma série de oscilações são geradas devido ao gradiente de energia na atmosfera, dentre elas algumas de grande escala como ventos médios, ondas planetárias e marés atmosféricas. As ondas de gravidade podem ser considerados eventos de pequena escala quando comparados aos ventos médios e ondas planetárias, porém estão entre as principais formas de transporte de fluxo de momento e energia da baixa para a alta atmosfera. O depósito de fluxo de momento transportado pelas ondas de gravidade é considerável na região da MLT onde há maior taxa de quebra das ondas de gravidade.

Figura 2.1 - Variação vertical de temperatura da atmosfera.

Perfil da variação vertical de temperatura na atmosfera obtido com o modelo MSIS-E-90 para as coordenadas 29°S, 53°O e baixa atividade solar.

Fonte: Adaptado de Virtual Ionosphere, Thermosphere, Mesosphere Observatory (VITMO) (2018).

## 2.2 Luminescência Atmosférica

A alta atmosfera é uma região onde uma série de constituintes emitem fótons em diferentes faixas de frequência devido a reações físico-químicas. Luminescência atmosférica, aeroluminescência ou *airglow* são termos dados à radiação óptica, amorfa, tênue e emitida continuamente pela atmosfera planetária (CHAMBERLAIN; HUNTEN, 1990). Estas emissões se estendem do ultravioleta até próximo ao infravermelho e ocorrem devido a excitação de moléculas e átomos acima de seu nível energético normal. A unidade padrão utilizada para mensurar estas emissões é o Rayleigh (R). Um Rayleigh corresponde à intensidade de uma fonte isotrópica que emite um milhão

de fótons por centímetro quadrado de coluna, por segundo (1 R = $10^6$ fótons/cm$^2$s). Essa unidade é integrada em altura, tal como observado por um fotômetro em solo.

A luminescência noturna da Terra é dominada, no visível, pelas linhas verde e vermelha do oxigênio atômico neutro OI e pela ressonância amarela do sódio NaD (CHAMBERLAIN; HUNTEN, 1990). O oxigênio atômico apresenta a linha verde em 557,7 nm (5577 Å) e a doublet vermelha em 630,0 e 636,4 nm (6300 e 6364 Å). Estas linhas são emitidas quando o oxigênio atômico no estado $^1$S volta ao estado fundamental $^3$P passando pelo $^1$D. Na primeira transição (mais curta com duração 0,74 s) o fóton emitido resulta na linha verde. A segunda transição (duração de 110 s) produz a linha vermelha. Uma terceira emissão em 297,2 nm (ultra-violeta UV) é produzida quando a transição ocorre diretamente para o estado fundamental, porém sua intensidade é muito baixa e não desperta interesse para a luminescência (HARGREAVES, 1992). Como o tempo de duração da linha vermelha é muito longo, esta emissão não é adequada para a observação de eventos transientes. As emissão em 557,7 nm provem de duas regiões, uma em aproximadamente 96 km e outra entre 250 e 300 km. A linha 630,0 nm tem origem na região F entre 250 e 300 km de altura.

Uma importante porção das emissões têm origem centrada na atmosfera a cerca de 90 km de altura. O espectro da luminescência noturna na mesosfera está repleto de bandas de Meinel provenientes do radical hidroxila OH cujos comprimentos de onda variam do visível ao infravermelho. Na mesma faixa de altura existem as emissões dos metais alcalinos (sódio Na, potássio K, lítio Li e cálcio Ca) por meio de espalhamento ressonante.

Outro tipo de luminescência atmosférica que ocorre em alturas bem mais elevadas em torno de 500 a 600 km. A emissão gerada pode ser muito mais intensa do que a luminescência chegando a tornar-se visível a olho nu. Estas são chamadas de auroras e geralmente ocorrem apenas em altas latitudes, porém podem ser visíveis em médias latitudes na ocorrência de eventos muito fortes (associados a tempestades geomagnéticas super intensas). A fonte deste fenômeno deve-se a precipitação de partículas elétricas aprisionadas no campo geomagnético que ao colidirem com os átomos e moléculas presentes na termosfera levam a excitação dos mesmos.

A luminescência atmosférica é um importante meio para medir as densidades de partículas excitadas, temperatura cinética e estudar diversos processos dinâmicos em diferentes alturas na atmosfera superior. Através da luminescência é possível estudar: processos químicos, iônicos e dinâmicos de constituintes da atmosfera; mecanismos

de excitação que produzem as emissões; geração e propagação de irregularidades de plasma na região F da ionosfera noturna, tais como bolhas de plasma; deposição de partículas energéticas; acoplamento termosfera-ionosfera; ondas atmosféricas e ondas de gravidade, etc. (PIMENTA, 2002).

### 2.2.1 Emissão da Camada de Sódio

A presença de átomos metálicos como Na, Ca, K, Fe, Li e outros na alta atmosfera deve-se à ablação de meteoróides provenientes de duas fontes principais: chuvas de meteoros e fragmentos do cinturão de asteroides e partículas de poeira de trilhas cometárias (AMORIM, 2015). As reações postuladas por Chapman (1939) são consideradas como principal mecanismo de origem dos átomos excitados de Na capazes de emitir fótons quando estes decaem para o estado normal. Estas reações são as seguintes:

$$Na + O_3 \rightarrow NaO + O_2 \tag{2.1}$$

$$NaO + O \rightarrow Na(^2P) + O_2 \tag{2.2}$$

$$Na(^2P) \rightarrow Na(^2S) + h\nu(589,3\ nm) \tag{2.3}$$

Segundo Plane (2003) as reações 2.1 e 2.2 são capazes de emitir de 30 a 150 R. A emissão do sódio é denominada linda NaD com comprimento de onda de 589,3 nm com centroide da camada em alturas entre 90 e 92 km (CLEMESHA et al., ; CLEMESHA et al., 2003). Takahashi et al. (1995) observaram em Cachoeira Paulista uma variação semi-anual na taxa de emissão da linha NaD com máximas nos equinócios e mínimos nos solstícios.

### 2.2.2 Emissão do OI 557,7 nm

A emissão da linha verde do oxigênio atômico OI 557,7 nm é proveniente de duas camadas distintas da alta atmosfera. A camada mais baixa localiza-se aproximadamente entre 90 e 110 km de altura na parte mais baixa da região E da ionosfera. A outra camada fica entre 250 e 300 km na região F. Em médias latitudes a maior parte da emissão do OI 557,7 nm é proveniente da recombinação do oxigênio atômico na mesopausa em torno de 100 km. Na região equatorial e baixas latitutes boa parte da emissão é proveniente de processos de recombinação dissossiativa da região F (PIMENTA, 2002). Observações da emissão do OI 557,7 nm feitas em solo integram

a emissão das duas camadas.

Pelo processo proposto por Barth (1964), uma molécula do $O_2$ precursora origina o surgimento do oxigênio atômico excitado $O(^1S)$ pelo mecanismo de transferência de energia:

$$O + O + M \rightarrow O_2^* + M \tag{2.4}$$
$$O_2^* + O \rightarrow O(^1S) + O_2 \tag{2.5}$$

Havendo reações de desativação no processo, estas são dadas por:

$$O_2^* + M \rightarrow \text{produtos desativados} \tag{2.6}$$
$$O(^1S) + M \rightarrow \text{produtos desativados} \tag{2.7}$$

As reações de decaimento radioativo que geram a emissão no comprimento de onda de 557,7 nm na região E, completando o processo proposto, são:

$$O_2^* \rightarrow O_2 + h\nu \tag{2.8}$$
$$O(^1S) \rightarrow O(^3P,^1D) + h\nu(total) \tag{2.9}$$
$$O(^1S) \rightarrow O + h\nu(557,7\ nm) \tag{2.10}$$

As reações que envolvem a emissão do OI 557,7 nm devido ao processo de recombinação dissociativa com origem na região F são dadas por:

$$O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O \tag{2.11}$$
$$O_2^+ + e \rightarrow O + O^*(^1S) \tag{2.12}$$
$$O(^1S) \rightarrow O(^1D) + h\nu(557,7\ nm) \tag{2.13}$$

## 2.3 Ondas de Gravidade

Ondas de gravidade são perturbações em uma parcela de fluido atmosférico capazes de quebrar o equilíbrio hidrostático do fluido. O mecanismo físico que possibilita o surgimento de ondas de gravidade é o desequilíbrio entre força de gravidade e gradientes de pressão. A principal força restauradora dessas perturbações está associada a flutuabilidade (*buoyancy*) que resulta do deslocamento adiabático de parcelas de ar (FRITTS; ALEXANDER, 2003). As ondas de gravidade que se propagam verticalmente (para cima) sofrem o aumento da amplitude exponencialmente devido a diminuição da densidade atmosférica. Caso a onda não seja absorvida em camadas mais baixas, o crescimento da amplitude encontrará um nível crítico, sendo que a partir desse nível as ondas podem quebrar e dissipar-se, transferindo a sua energia e momento para o fluxo básico (BEER, 1974).

Movimentos de pequena escala na alta atmosfera foram primeiramente observados e discutidos por Munro (1950). Mais tarde, Hines (1960) propôs uma justificativa para que as distorções nos traços de meteoros fossem associadas a ventos médios na alta atmosfera e ação de ondas de gravidade propagando-se ascendentemente. Foi neste trabalho que Hines (1960) estabeleceu a teoria básica de ondas de gravidade na mesosfera.

A força de arraste zonal existente na mesosfera, que gera os ventos nessa região, foram atribuídas ao balanço de calor e de momento por Leovy (1964). Hines (1972) veio a sugerir que as ondas de gravidade podem transferir momento para a atmosfera, afetando a circulação média da mesma. Estas constatações desencadearam a evolução nas técnicas de observação de ondas de gravidade. Uma revisão completa da teoria e observações de ondas de gravidade pode ser encontradas em Fritts (1984) e Fritts e Alexander (2003).

Entre as várias técnicas observacionais de ondas de gravidade feitas a partir do solo pode-se relacionar: radares de frequência média (*Medium Frequency* - MF) que medem ventos entre 60 e 100 km; radares de espalhamento incoerente que podem observar a baixa termosfera; radares *Mesosphere Stratosphere and Thermosphere* (MST); radares *Middle and Upper atmosphere* (MU); radares de laser capazes de medir concentrações e temperatura na mesosfera e baixa termosfera; instrumentos ópticos, fotômetro, câmera fotográfica e de vídeo, imageadores com CCD (*Charge Coupled Device*), interferômetro Farby Perot, interferômetro de Michelson. Mais recentemente observações através de satélites têm contribuído para observações globais desse fenômeno. Um histórico da evolução nas observações de ondas de gravidade

com maiores detalhes é apresentado por Medeiros (2001).

### 2.3.1 Equações das Ondas de Gravidade

As ondas de gravidade podem ser descritas utilizando a teoria da perturbação de primeira ordem. Esta teoria é válida para movimentos ondulatórios de pequena amplitude onde a velocidade do fluído (vento neutro) é menor que a velocidade de fase da onda. Abaixo são apresentados os princípios matemáticos para descrição das ondas de gravidade pela teoria da perturbação de primeira ordem. Essa descrição foi desenvolvida por Gossard e Hooke (1975). A derivação das equações utilizando a mesma teoria linear porém com outra abordagem matemática pode ser encontrada em Fritts e Alexander (2003).

A análise matemática inicia-se pelas equações básicas que regem os movimentos atmosféricos e são previamente conhecidas, sendo estas a conservação de momento, conservação de massa (equação da continuidade), conservação de energia e lei dos gases ideias. Estas equações, quando escritas no sistema de referências Euleriano, onde $\hat{x}$, $\hat{y}$ e $\hat{z}$ representam as direções norte, leste e zênite, são expressas da seguinte forma:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \frac{1}{\rho}\nabla p - \vec{g} = \frac{1}{\rho}\vec{F} \tag{2.14}$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho\nabla \cdot \vec{v} = 0 \tag{2.15}$$

$$c_v\frac{dT}{dt} + p\frac{DT}{Dt}\left(\frac{1}{\rho}\right) = Q \tag{2.16}$$

$$\rho RT = p \tag{2.17}$$

A Equação 2.14 descreve a conservação de momento. O primeiro termo é a taxa de variação temporal da velocidade do vento neutro $\vec{v} = (u, v, w)$, onde $u$ é a velocidade zonal (positiva para leste), $v$ a velocidade meridional (positiva para norte) e $w$ a velocidade vertical (positiva para cima). O segundo termo representa a contribuição da força de Coriollis onde $\vec{\Omega} = (0, \Omega_y, \Omega_z)$ é a velocidade angular da Terra. A aceleração da gravidade é representada por $\vec{g}$, $\rho$ é a densidade atmosférica e $p$ a pressão atmosférica. Ao lado direito da igualdade, $\vec{F}$ representa as forçantes externas que podem ser forças hidromagnéticas e forças dissipativas. A equação da continuidade é expressa em (2.15), descrevendo a conservação de massa. A Equação 2.16 representa

a conservação de energia, onde o termo $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla$ é denominado operador de Stokes e representa a derivada total no sistema Euleriano. O parâmetro $c_v$ é o calor específico a volume constante e $Q$ é a quantidade de calor recebido por unidade de massa e tempo. O termo $p\frac{D}{Dt}\left(\frac{1}{\rho}\right)$ é o trabalho realizado pela massa de ar ao sofrer expansão ou compressão. Por fim, a Equação 2.17 é a equação dos gases ideais, que pode ser aplicada para a condição de baixa umidade do ar, onde $R$ é a constante dos gases ideais e $T$ a temperatura.

A teoria linear de ondas de gravidade permite tratar o sistema de Equações 2.14 a 2.17 como perturbações de primeira ordem, ou seja, um estado básico sobreposto por uma perturbação. Isso desde que a suposição de uma atmosfera não-ionizada, sem turbulência e viscosidade seja válida. Os parâmetros de vento, pressão e densidade das Equações 2.14 a 2.17 podem então ser escritos em função de um estado básico mais um estado perturbado, tal que:

$$(u, v, w, p, \rho) = (u_0, v_0, w_0, p_0, \rho_0) + \varepsilon(u_1, v_1, w_1, p_1, \rho_1) \tag{2.18}$$

onde os termos com subscrito zero $(u_0, v_0, w_0, p_0, \rho_0)$ representam o estado básico e os termos com subscrito um $(u_1, v_1, w_1, p_1, \rho_1)$ o estado perturbado. A constante $\varepsilon$ é um termo de proporcionalidade relativo ao desvio do estado médio. Substituindo (2.18) no sistema de Equações 2.14 a 2.16 obtêm-se o conjunto de expressões:

$$\rho_0\left(\frac{\partial u}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla u\right) + \frac{\partial p}{\partial x} - 2\rho_0\Omega_z v = 0 \tag{2.19}$$

$$\rho_0\left(\frac{\partial v}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla v\right) + \frac{\partial p}{\partial y} + 2\rho_0\Omega_z u = 0 \tag{2.20}$$

$$\rho_0\left(\frac{\partial w}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla w\right) + \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \tag{2.21}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla \rho + w\frac{\partial \rho_0}{\partial z} + \rho_0 \cdot \nabla v = 0 \tag{2.22}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla p + w\frac{\partial p_0}{\partial z} = c_s^2\left(\frac{\partial p}{\partial t} + v_0 \cdot \nabla \rho + w\frac{\partial \rho_0}{\partial z}\right) \tag{2.23}$$

onde $c_s$ é a velocidade do som e $\rho_0$ a densidade do gás majoritário. Admitindo uma solução do tipo onda-plana, os parâmetros atmosféricos em (2.18) podem ser transformados para:

$$(U, V, W, P) = (u_0, v_0, w_0, p_0)e^{i(\omega t - kx - ly - mz)} \tag{2.24}$$

onde $(U, V, W, P)$ são as quantidades perturbadas $(u_1, v_1, w_1, p_1)$ reescritas e $k, l, m$ são números de onda zonal, meridional e vertical, respectivamente. Para um modelo de atmosfera básica, compressível, com rotação da Terra desprezível[1], sem difusividade e com cisalhamento vertical de ventos, utilizando (2.24) as Equações 2.19 a 2.23 podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\frac{DU}{Dt} + Wu_0' + \frac{1}{\rho_s}\frac{\partial P}{\partial x} = 0 \tag{2.25}$$

$$u_0' = \frac{\partial u_0}{\partial z} \tag{2.26}$$

$$\frac{DV}{Dt} + Wv_0' + \frac{1}{\rho_s}\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \tag{2.27}$$

$$v_0' = \frac{\partial v_0}{\partial z} \tag{2.28}$$

$$\frac{1}{\rho_s c_s^2}\frac{DP}{Dt} + \frac{\partial U}{\partial x} + \left(\frac{\partial}{\partial z} - \Gamma\right)W = 0 \tag{2.29}$$

$$\left(\frac{D^2}{Dt^2} + N^2\right)W + \frac{1}{\rho_s}\frac{D}{Dt}\left(\frac{\partial}{\partial z} + \Gamma\right)P = 0 \tag{2.30}$$

onde $\rho_s$ é a densidade a uma altura de referência, $\Gamma$ o coeficiente de Eckart[2] e $N$ a frequência de Brunt-Väisälä. O coeficiente de Eckart $\Gamma$ é dado por:

$$\Gamma = \frac{1}{2\rho_0}\frac{\partial \rho_0}{\partial z} + \frac{g}{c_s^2} \tag{2.31}$$

A frequência de Brunt-Väisälä $N$ em rad/s é dada por:

$$N^2 = -g\left(\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \rho_0}{\partial z} + \frac{g}{c_s^2}\right) \tag{2.32}$$

Usando a aproximação hidrostática em que $\rho \propto p \propto e^{-gz/RT}$ obtêm-se a expressão para $N$:

[1] Com rotação terrestre desprezível pode-se considerar $\Omega_z = 0$.

[2] Faz referência a influência do gradiente de densidade nos termos inerciais.

$$N^2 = \frac{g^2}{RT}\left(1 - \frac{RT}{c_s^2}\right) = \frac{g^2}{RT}\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma}\right) \tag{2.33}$$

onde $\gamma = c_p/c_v$, sendo $c_p$ o calor específico a pressão constante e $c_v$ o calor específico a volume constante. As variáveis $c_p$ e $c_v$ se relacionam entre si em função da constante dos gases ideais tal que $R = c_p - c_v$, $c_v = \frac{3}{2}R$ e $c_p = \frac{5}{2}R$.

Reescrevendo o operador de Stokes da forma $\dfrac{D}{Dt} = \dfrac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla$ para

$$\frac{D}{Dt} = ik[u(z) - c] = -i\omega \tag{2.34}$$

onde $c$ é a velocidade de fase da onda e $\omega$ a frequência angular aparente, tal que $c = \omega/k$. A frequência angular aparente é dada por:

$$\omega = k[c - u(z)] \tag{2.35}$$

e a frequência intrínseca da onda, observada por um referencial que se move junto com o vento médio de fundo, é expressa por:

$$\hat{\omega} = \omega - \vec{k} \cdot \vec{u} \tag{2.36}$$

Quando a onda se move mais rápido que o vento médio de fundo $\hat{\omega} > 0$ e quando o vento é mais rápido do que a onda $\hat{\omega} < 0$.

Na Equação 2.34 assume-se que as soluções são proporcionais a $e^{i(kx-\omega t)}$. Substituindo (2.34) nas Equações 2.25 a 2.30 é possível chegar a expressão:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \left[\frac{N^2}{(u_0 - c)^2} - \frac{u_0''}{u_0 - c} - \frac{2\Gamma u_0'}{u_0 - c} - k^2 - \Gamma^2\right] W = 0 \tag{2.37}$$

onde

$$u_0'' = \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2} \tag{2.38}$$

Tomando o coeficiente de Eckart como $\Gamma = 0$ e desprezando os efeitos de compres-

sibilidade, (2.37) pode ser expressa na forma conhecida como equação de Taylor-Goldstein:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \left[\frac{N^2}{(u_0 - c)^2} - \frac{u_0''}{u_0 - c} - k_h^2\right] W = 0 \tag{2.39}$$

onde $k_h$ é o número de onda horizontal, o qual pode ser escrito em função dos números de onda zonal e meridional $k$ e $l$, respectivamente, como $k_h^2 = k^2 + l^2$.

Uma vez que $N^2$ e $u_0$ são funções da altura e desde que suas variações espaciais sejam suaves comparadas ao comprimento de onda, pode-se aplicar a aproximação de Wentzel-Kramer-Brillouin (WKB) para encontrar a solução da equação diferencial 2.39. Dessa forma, chega-se a relação de dispersão para as ondas de gravidade dada por:

$$m^2 = \frac{N^2}{(u_0 - c)^2} - \frac{u_0''}{u_0 - c} - k_h^2 \tag{2.40}$$

onde $m = 2\pi/\lambda_z$ é o número de onda vertical, $\lambda_z$ o comprimento de onda vertical, $k_h = 2\pi/\lambda_h$ o número de onda horizontal e $\lambda_h$ o comprimento de onda horizontal. Da mesma forma, o comprimento de onda zonal é $\lambda_x = 2\pi/k$ e meridional $\lambda_y = 2\pi/l$.

### 2.3.2 Propagação de Ondas de Gravidade

A equação de Taylor-Goldstein (2.39) pode ter dois tipos de solução. Uma delas representa o caso em que a onda tem liberdade para se propagar livremente na vertical (em altura). Neste caso a onda é dita propagante e ocorre quando $m^2 > 0$. A outra solução representa os casos em que a onda sofre reflexão no solo, em uma ou entre duas regiões evanescentes. As ondas deste tipo são chamadas evanescentes e são observadas quando $m^2 < 0$. As ondas propagantes têm liberdade para se propagar na vertical e na horizontal. Por outro lado, as evanescentes são caracterizadas por propagarem-se apenas na horizontal.

As ondas de gravidade que se propagam verticalmente têm o número de onda vertical $m$ real. Uma convenção deve ser adotada para indicar o sentido de propagação da onda, por exemplo: $m < 0$ propagação para cima e $m > 0$ propagação para baixo. Se $m$ for um valor complexo isso indica que parte da onda se propaga e outra parte é absorvida (PAULINO, 2012).

As ondas do tipo propagante que se deslocam verticalmente (para cima) sofrem aumento da amplitude devido a diminuição da densidade na atmosfera. Na Figura 2.2(a) são apresentadas as características de propagação vertical dessas ondas. Pode-se notar que a energia da onda se propaga perpendicularmente a velocidade de fase da mesma (HARGREAVES, 1992). A Figura 2.2(b) mostra o espectro de frequência das ondas de gravidade, acústicas e evanescentes.

Figura 2.2 - Propagação de ondas e regiões de $m^2$.

(a) - Propagação horizontal e vertical de ondas de gravidade-acústica. (b) - Espectro de frequência $\omega$ em função do número de onda $k$ e regiões de $m^2$

Fonte: Bageston (2010) adaptado de Beer (1974) e Hargreaves (1992).

Na Figura 2.2(b) são apresentados os regimes de ondas de curto período em função da frequência $\omega$ e do número de onda horizontal $k$. O número de onda vertical elevado ao quadrado $m^2$ indica em que condição de propagação a onda se encontra. As ondas com frequência $\omega > \omega_a$ são denominadas ondas acústicas, enquanto que as ondas na região onde $\omega < \omega_g$ são as ondas de gravidade. A frequência $\omega_a$ é definida como frequência de corte acústica e $\omega_g = N$ é a frequência de Brünt-Väisälä. Na faixa onde $\omega_g < \omega < \omega_a$ estão localizadas as ondas evanescentes (BAGESTON, 2010).

### 2.3.3 Canalização de Ondas de Gravidade

A reflexão de uma onda de gravidade acontece quando esta encontra um nível de reflexão (ou *turning level*), que por sua vez ocorre na atmosfera na interface entre uma região propagante ($m^2 > 0$) e uma região evanescente ($m^2 < 0$) (PAULINO, 2012). Quando a onda de gravidade se encontra entre dois níveis de reflexão ocorre

o que é chamado de canalização da onda. Os dois níveis de reflexão formam um tipo de duto, onde a onda pode encontrar condições para se propagar por extensas distâncias horizontais sem grande perda de energia. A Figura 2.3 (a) apresenta a característica de reflexão de uma onda canalizada e a Figura 2.3 (b) mostra as características de um duto.

Figura 2.3 - Formação de dutos de propagação.

(a) - Reflexão e transmissão de uma onda entre dois níveis de reflexão. (b) - Perfil do número de onda vertical em um canal Doppler.

Fonte: Alencar Filho (2007).

Se a largura vertical do duto for múltipla do número de onda vertical, pode ocorrer interferência construtiva, tal que a onda tenha condições de se propagar por distâncias ainda maiores. Por outro lado, se a espessura do duto não for múltipla a onda pode sofrer interferência destrutiva. Um duto pode ser formado devido ao gradiente vertical de temperatura, sendo denominado de duto térmico. Outra possível origem é devido ao gradiente vertical do vento horizontal. Neste último caso o canal recebe o nome de duto Doppler. A combinação dos dois fatores, gradiente vertical de temperatura e dos ventos horizontais, pode originar um canal denominado como duto dual.

### 2.3.4 Absorção e Filtragem de Ondas de Gravidade

Quando uma onda de gravidade está numa região da atmosfera em que o vento básico apresenta a mesma direção e mesma velocidade de fase da onda acontece a absorção desta. A frequência intrínseca da onda tende à zero, tal que esta região fica conhecida como nível crítico ou nível de absorção. A propagação vertical da onda torna-se muito lenta e a propagação horizontal não é possibilitada, pois $m$ tende para infinito. Nessas condições a onda é rapidamente absorvida pela atmosfera (PAULINO, 2012).

A existência de níveis críticos e de reflexão na atmosfera são como filtros para as ondas de gravidade. As ondas refletidas, canalizadas ou absorvidas em uma região da atmosfera limitam o espectro de ondas observadas em regiões da mesosfera e baixa termosfera. De maneira geral, pode-se dizer que ondas com velocidade de fase mais baixa são mais propicias de serem absorvidas. Já as ondas com velocidade de fase elevadas tem maior tendência de serem refletidas. Consequentemente, ondas com período intermediário são as mais prováveis para chegar até regiões mais altas na termosfera-ionosfera. Essa classe de ondas é chamada ondas de gravidade de média escala e apresentam comprimentos de onda verticais de dezenas até centenas de quilômetros e períodos superiores a 30 minutos (TAYLOR et al., 2009).

### 2.3.5 Fontes de Ondas de Gravidade

As formas de geração das ondas de gravidade são atribuídas a algumas fontes conhecidas sendo as principais ventos na troposfera atuando sobre o relevo de montanhas (denominado efeito orográfico), convecção térmica de grandes massas de ar e cisalhamento de ventos em diferentes altitudes. Entretanto, outras fontes podem ser significativas em regiões específicos associadas a efeitos dinâmicos locais de larga escala. Outras possíveis fontes de ondas de gravidade são ajuste geostrófico nas vizinhanças de correntes de jato (*jet streams*) e sistemas de frentes, interações onda-onda e forças associadas a dissipação de ondas. Em menor escala, mas fontes que podem contribuir para geração de ondas de gravidade são aquecimento auroral e resfriamento devido a eclipses (FRITTS; ALEXANDER, 2003). Tempestades elétricas na troposfera associadas a nuvens cumulonimbus também foram observadas como fontes de ondas de gravidade na mesosfera (TAYLOR; HAPGOOD, 1988; TAYLOR et al., 1995).

Em Cachoeira Paulista (23°S; 45°O), Medeiros (2001) associou ondas de gravidade observadas a uma forte zona de convecção a cerca de 1000 km a oeste do sítio de

observações. Wrasse (2004) utilizou a técnica de *ray tracing* (traçador de trajetória) com o intuito de recuperar a trajetória de propagação das ondas de gravidade observadas e possivelmente localizar suas fontes de geração. As observações foram realizadas em Cachoeira Paulista (22°S; 45°O) e São João do Cariri (7°S; 36°O). Nesse estudo observou-se que entre as fontes troposféricas os sistemas frontais, principalmente as frentes frias, foram atribuídas a 22% dos eventos de ondas de gravidade na região sudeste do Brasil. Outros 25% dos eventos tiveram associados como fontes geradoras convecção de nuvens cumulonimbus e 33% a efeitos orográficos. Os outros 20% foram relatados como devido a fontes diversas. Quanto às ondas de gravidade observadas em Cachoeira Paulista foi constatado que 78% das retrotajetórias levariam crer que suas origens deram-se na mesosfera, e na região de São João do Cariri cerca de 76% dos eventos teriam origem na mesma região.

Muitos dos mecanismos de geração de ondas de gravidade ainda não são conhecidos detalhadamente. Diversos estudos vêm sendo realizados para conhecer em mais detalhes as características das fontes de ondas de gravidade nas diferentes regiões da atmosfera terrestre.

## 2.4 Observações de Ondas de Gravidade na Luminescência da Alta Atmosfera no Setor Brasileiro

Diversos trabalhos científicos de relevância foram realizados para investigar as características das ondas de gravidade no setor brasileiro. Nesta seção é abordada uma sucinta revisão das principais conclusões de alguns destes trabalhos realizados nas últimas décadas. Esta revisão foca em trabalhos que utilizaram dados de luminescência, semelhantes aos utilizados nesta tese, em diferentes regiões brasileiras. A maioria dos trabalhos abordados a seguir utilizaram séries temporais de dados maiores do que (ou pelo menos aproximadamente) 12 meses, sendo possível inferir características climatológicas das ondas de gravidade sobre as regiões de estudo.

Entre os trabalhos de grande contribuição nesta área está o de Medeiros (2001), pioneiro no estudo de ondas de gravidade na alta atmosfera no Brasil. Neste trabalho foi construída a climatologia das ondas de gravidade observadas na MLT sobre o sudeste brasileiro com base em observações realizadas em Cachoeira Paulista (23°S; 45°O) utilizando imageador all-sky nas emissões do OH, OI (557,7 nm) e do O2, além de dados complementares de um radar meteórico para determinação do vento local. Medeiros (2001) determinou os parâmetros de onda observados (período, comprimento de onda horizontal, velocidade de fase horizontal e direção de propagação) e os parâmetros intrínsecos para os casos possíveis quando haviam medidas de vento

simultâneas às observações do imageador. No total foi analisado cerca de um ano de dados deste instrumento, coletados entre Outubro de 1998 e Setembro de 1999.

Medeiros (2001) separou os eventos de onda de gravidade em bandas, ripples e eventos denominados tipo escada, constatando a predominância de 64% de bandas sobre 36% de ripples. A análise sazonal revelou uma forte tendência de eventos durante o verão e inverno, principalmente nos meses de Janeiro e Julho. Foi observada uma nítida tendência de propagação para sudeste no verão e para noroeste no inverno, caracterizando uma anisotropia na direção de propagação. No entanto, os ripples não demonstraram tendência na direção de propagação. Os eventos do tipo escada apresentaram características muito mais semelhantes às bandas (inclusive na direção de propagação).

A principal fonte de ondas de gravidade sobre a região de Cachoeira Paulista atribuída por Medeiros (2001) foi a intensa convecção troposférica. No verão, as convecções ocorrem a oeste e acima de Cachoeira Paulista sobre o continente. No inverno, o cenário se inverte e ocorre convecção ao sul e a leste de Cachoeira Paulista sobre o mar. Esta sazonalidade na localização das fontes geradoras foi atribuída como a causa da anisotropia na direção de propagação das ondas somada ao efeito de filtragem de ondas pelos ventos estratosféricos.

Wrasse (2004) investigou as fontes de geração de ondas de gravidade e sua propagação na atmosfera. Os dados utilizados neste estudo foram observações de imageadores feitas em Cachoeira Paulista (23°S; 45°O) (sudeste do Brasil) e em São João do Cariri (7°S; 36°O) no Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba - OLAP. Wrasse (2004) utilizou a técnica de traçador de trajetória (*ray tracing*) para identificar a posição de origem das ondas observadas. Uma vez determinado a possível região de origem das ondas foi feito um levantamento dos fenômenos meteorológicos e outros fatores candidatos a fontes geradoras. Dos eventos observados em Cachoeira Paulista por Wrasse (2004) 16% mostraram indícios de que as fontes localizavam-se na troposfera, a cerca de 400 km de distância das observações. Para estas ondas concluiu-se que as fontes estavam associadas principalmente a frentes frias, zonas de convecção troposférica e efeito orográfico da Serras da Mantiqueira e Serra do Mar. Para São João do Cariri, as retrotajetórias indicaram a troposfera como região de origem de 23% das ondas. O ponto específico das fontes dessas ondas foi identificado afastado em média 250 km do sítio de observação. A forte convecção troposférica existente na região foi apontada como principal geradora das ondas. No entanto, as Linhas de Instabilidade formadas por nuvens cumulunimbus mostrou-se

como fenômeno mais efetivo e predominante na geração de ondas de gravidade na região.

Outro trabalho realizado na região de Cachoeira Paulista utilizando dados da luminescência para o ano de 1999 foi o de Vargas (2003). Sobre a sazonalidade dos eventos observados, Vargas (2003) concluiu que os eventos classificados como ripples não apresentaram sazonalidade quanto a direção de propagação. Já as ondas classificadas como bandas apresentaram direção preferencial de propagação para leste no verão e noroeste na primavera, sendo que no outono e inverno não houve direção preferencial definida. Vargas (2003) salienta que algumas diferenças quanto a direção de propagação preferencial observadas por ele e por Medeiros (2001) podem em parte ser explicadas pelas diferenças de critérios adotados por ambos autores para classificação das ondas de gravidade em bandas e ripples.

Na região central do Brasil foi realizado a caracterização de ondas de gravidade observadas em Palmas, TO (10,16ºS; 48,26ºO) por Almeida (2010). Neste trabalho utilizou-se observações da emissão do OH no período de Setembro de 2007 a Dezembro de 2008 analisando 160 eventos. O autor apresentou resultados em que a direção de propagação preferencial concentrou-se no eixo norte-sul independente da época do ano. Almeida (2010) apresenta uma comparação dos resultados obtidos em Palmas, TO, com outras observações no Brasil, concluindo que em geral as ondas no setor brasileiro apresentam características semelhantes, sendo que na região equatorial as velocidades de fase relatadas tendem a ser maiores que nas demais latitudes.

Santos (2007) investigou o transporte de fluxo de momento de ondas de gravidade propagando-se até a região da MLT. Neste trabalho foram utilizados dados de luminescência de Cachoeira Paulista e São João do Cariri. A respeito da sazonalidade das ondas observadas, Santos (2007) concluiu que na região de Cachoeira Paulista as ondas de gravidade propagam-se preferencialmente para norte durante o inverno, o que estaria relacionado a atividade convectiva que ocorre a sudoeste da região nesse período do ano. No verão em São João do Cariri as ondas se propagam preferencialmente para o leste, sugerindo que ocorrência de filtragem de ondas pelo vento zonal direcionado a oeste na média atmosfera.

Um estudo da propagação vertical de ondas de média escala (MSGW - *Medium-Scale Gravity Waves*) observadas durante a campanha *Spread F Experiment* (SpreadFEx) em São João do Cariri (7,4°S; 36,5°O) foi realizado por Paulino (2012). A campanha foi realizada entre setembro e novembro de 2009 e foram estudadas 26 ondas de

gravidade de média escala. Neste trabalho utilizou-se além das imagens de aeroluminescência, perfis de vento e temperatura desde a superfície até 400 km de altitude construídos a partir de dados de radar meteórico, interferômetro Fabry-Perot, dados dos satélites TIMED/SABER e modelos. Constatou-se que as ondas de gravidade que apresentaram frequência intrínseca maior que a frequência observada, na região da mesosfera e baixa termosfera, foram capazes de se propagar até grandes altitudes. Um evento em especial atingiu cerca de 200 km de altitude com intensidade suficiente para influenciar a geração de irregularidades de plasma na região F.

Uma conclusão marcante do trabalho de Paulino (2012) é que foi possível estabelecer uma linearidade entre os parâmetros das MSGWs e as características de propagação na termosfera-ionosfera. Segundo o autor, conhecendo os parâmetros das MSGWs nas altitudes da MLT pode-se determinar a posição e tempo aproximados para que as mesmas atinjam o fluxo de momentum máximo e sejam dissipadas na termosfera-ionosfera. Segundo Paulino (2012) contatou-se que quando uma onda de gravidade tem sua frequência intrínseca aumentada devido ao vento horizontal na MLT a mesma pode se propagar a altitudes mais elevadas. A maior parte dos eventos observados por Paulino (2012) se dissiparam entre 150 e 200 km de altitude e a uma distância horizontal do local de observação entre 200 a 800 km. O tempo entre a detecção dos eventos nas imagens e a sua dissipação foi de 1 a 3 horas.

Além dos trabalhos realizados no setor brasileiro, outro trabalho nacional notável foi a investigação de ondas de gravidade na Estação Antártica Comandante Ferraz - EACF (62°S; 58°O) realizada por Bageston (2010). No período de Abril a Outubro de 2007 foram analisados 234 eventos de onda de gravidade que apresentaram comprimento de onda horizontal entre 10 e 65 km, períodos observados na grande maioria entre 5 e 35 minutos e velocidade de fase entre 5 a 120 m/s. A análise de direção de propagação apresentou forte anisotropia para sudoeste no inverno e para noroeste na primavera. Bageston (2010) utilizou a técnica de *ray tracing* e constatou que 78% das ondas foram interrompidas na mesosfera, indicando possível geração local ou onda canalizada. Das ondas que foram identificadas com origem na troposfera, dez eventos foram associados a instabilidades convectivas, oito devido a efeitos orográficos, um evento relacionado a frente fria e um caso relacionado a atividade de ciclone. Ainda foi realizado o estudo de três casos de ondas classificadas como frentes mesosféricas com propagação canalizada em dutos. Dois dos eventos foram classificados como frentes mesosféricas propagando-se em ductos térmicos. O evento mais marcante foi classificado como uma pororoca mesosférica e foi associado a um duto dual devido aos efeito Doppler e térmico. Segundo Bageston (2010) a configuração

deste tipo de duto teve grande contribuição das marés semidiurna e terdiurna.

# 3 METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO

## 3.1 Dados da Luminescência Atmosférica

As ondas de gravidade que se propagam na mesosfera e termosfera produzem alterações nas densidades dos constituintes atmosféricos que podem ser observadas nas emissões da luminescência atmosféricas. A Figura 3.1 mostra uma sequência de imagens obtidas na estação SMS de uma onda de gravidade do tipo frente mesosférica. Os parâmetros de comprimento de onda horizontal, período, velocidade de fase e direção de propagação das ondas de gravidade podem ser extraídos a partir dessas imagens. Entretanto, o período e velocidade de fase são medidas aparentes, uma vez que apenas com dados da luminescência não é possível inferir a velocidade do vento básico na altitude da emissão. Utilizando dados dos ventos atmosféricos é possível encontrar o período e velocidade de fase intrínsecos da onda.

Os dados utilizados nesta tese são imagens da luminescência atmosférica noturna obtidas na região Norte e Sul do Brasil. Os dados analisados foram obtidos com um imageador tipo all-sky utilizando filtros para as emissões do OI 557,7 nm e da linha NaD em 589,3 nm. As observações da luminescência precisam ser realizadas no período noturno quando não há luz da lua no céu ou de fontes de iluminação artificial (como cidades, casas, postes de iluminação pública, etc.). Esses cuidados são necessários pois a luminescência atmosférica é uma emissão extremamente fraca em que uma pequena fonte de luz artificial é o bastante para contaminar as imagens.

Na região Norte as observações foram feitas na reserva biológica de Cuieiras, em meio a floresta Amazônica, localizada próxima da linha do equador (2,589°S; 60,221°O) a cerca de 60 km ao norte da cidade de Manaus, AM. Os dados da região Norte foram identificados com a sigla MAN. Na região Sul as observações foram realizadas no Observatório Espacial do Sul, localizado na fronteira entre baixas e médias latitudes (29,442°S; 53,822°O) na cidade São Marinho da Serra, RS. O Observatório Espacial do Sul (OES) é uma unidade do Centro Regional Sul de Pesquisas Espacias - CRS/INPE que abriga diversos instrumentos passivos para pesquisas nas áreas de geomagnetismo, clima espacial, aeronomia, meteorologia e biologia, entre outras. As localizações geográficas das estações SMS e MAN são apresentadas na Figura 3.2. A distância entre as duas localidades é de mais de 3130 km.

Na estação SMS o imageador operou entre o período de fevereiro de 2011 a maio de 2012. Nesta campanha foram utilizados seis filtros para diferentes emissões que possibilitam a observação de ondas de gravidade, bolhas de plasma e TIDs entre

Figura 3.1 - Frente mesosférica seguida de trem de ondas de gravidade.

Imagens originais de uma onda de gravidade do tipo frente mesosférica observada na estação SMS em 25 de Agosto de 2011.

Fonte: Produção do autor.

Figura 3.2 - Localização dos sítios de observação SMS e MAN.

Ao norte da imagem está localizada a estação MAN e ao sul a estação SMS. A distância entre os dois locais de observação é de mais de 3000 km.

Fonte: Adaptado de Google Maps (2018).

outros fenômenos da alta atmosfera. Entre os filtros de interferência utilizados estão o BG (*background* centrado em 598,5 nm) para emissão da luz de fundo, o Na para a emissão da linha NaD do sódio em 589,3 nm e filtro para o $N_2^+$. Além destes ainda foram obtidos imagens com três filtros de interferência do oxigênio atômico sendo O5 para a linha em 557,7 nm, O6 para a linha em 630,0 nm e O7 para a linha em 777,4 nm. No estudo de ondas de gravidade foram usadas apenas as imagens dos filtros do sódio (589,3 nm) e do OI 557,7 nm (e o BG para auxiliar a descartar imagens com nuvens).

O tempo de exposição do filtro do BG foi de 90 segundos e dos demais filtros de 120 segundos. Somando-se o tempo necessário para ativar a roda de filtros e iniciar a exposição do filtro seguinte (aproximadamente 12 segundos entre trocas de filtro) o intervalo entre imagens subsequentes do Na e do O5, utilizados nesta tese, foi em média de 768 segundos ou 12 minutos e 48 segundos. A Figura 3.3 mostra uma sequência de imagens de cinco filtros obtidas durante um ciclo da roda de filtros. A imagem do $N2^+$ foi suprimida pois a mesma apresenta somente ruído para a data

Figura 3.3 - Imagens dos filtros do imageador de SMS.

Imagens originais de um ciclo da roda de filtro utilizada em SMS na data de 25 de Agosto de 2011. A sexta imagem que vem em sequência após o filtro do Na é a da emissão de $N2^+$ que não foi incluída na figura pois a mesma apresenta apenas ruído para a data.

Fonte: Produção do autor.

apresentada.

O intervalo de tempo entre imagens do mesmo filtro obtidas em SMS é muito grande para analisar ondas de gravidade com períodos menores do que 25 minutos. Por este motivo, a análise dos parâmetros de onda de gravidade para SMS foi limitada a eventos de períodos mais longos. Na Seção 3.3.3 são abordados em mais detalhes a metodologia utilizada para análise dos dados.

Na campanha realizada no norte do Brasil foram utilizados apenas quatro filtros para: BG, Na, O5 e O6 (tempo de exposição de 90 segundos para cada filtro). Afim de diminuir o intervalo de tempo entre imagens subsequentes dos filtros Na e O5, o imageador foi programado para gravar apenas uma imagem do BG e do O6 a cada três imagens do Na e O5. Dessa forma foi possível obter imagens do Na e O5 com

Figura 3.4 - Imagens dos filtros do imageador de MAN.

Imagens originais de um ciclo da roda de filtro utilizada em MAN na data de 10 de Setembro de 2015.

Fonte: Produção do autor.

intervalo em média a cada 210 segundos ou 3 minutos e 25 segundos. Isto permitiu a análise de parâmetros de onda de gravidade mais rápidas do que em SMS a partir de períodos de 6,5 minutos. Na Figura 3.4 é apresentado um ciclo completo da roda de filtros. Os dados analisados na estação MAN são para o período entre julho de 2015 a julho de 2017.

Os dados de luminescência atmosférica de SMS e MAN foram inspecionados visualmente para identificar os dias em que existem eventos de onda de gravidade. Os dados selecionados passaram por um pre-processamento para redimensionamento, linearização, remoção das estrelas e filtragem das imagens. Em seguida as imagens são processadas utilizando a análise espectral em duas dimensões para obter os parâmetros de onda. Estas etapas são descritas na Seção 3.3.

## 3.2 Imageador All-sky

Nesta seção são descritas as partes e o funcionamento geral do fotômetro imageador monocromático all-sky utilizado nesta tese. O equipamento foi projetado e construído pela empresa KEO Scientific Ltd. Um imageador consiste basicamente de um sistema óptico acoplado a uma câmera capaz de registrar as emissões da luminescência da média e alta atmosfera. O imageador utilizado para o desenvolvimento desta tese é composto por uma lente do tipo olho de peixe (*fisheye*), uma roda de filtros ópticos (6 posições), o sistema óptico para alinhamento da imagem, uma câmera CCD (*Charge Coupled Device*), sistema de refrigeração, fonte de alimentação e computador para operação. A Figura 3.5 mostra uma foto do equipamento na bancada durante testes e rotinas de manutenção.

Figura 3.5 - Fotômetro imageador all-sky.

Foto do imageador montado com roda de filtro, sistemas de lentes e CCD após desmontagem na bancada do laboratório óptico do LASER para limpeza das lentes e filtros.

Fonte: Produção do autor.

Uma breve descrição das principais partes do imageador são fornecidas abaixo:

- **Sistema óptico**: Inclui o conjunto apropriado de lentes para formar uma imagem telecêntrica próximo ao filtro de interferência e uma imagem acromática sobre o chip da CCD.
- **Câmera CCD**: O sistema óptico é projetado para ser usado com uma CCD de 27,6 x 27,6 mm$^2$. O imageador foi equipado com uma câmera CCD da Princeton Instruments PI/Acton Pixis:2048B *back-illuminated* e2v 42-40 (*Scientific Grade 1*, AIMO, 2048x2048, pixeis de 13,5 x 13,5 $\mu$m$^2$).
- **Sistema de controle do imageador**: Inclui duas unidades eletrônicas, uma montada próximo ao computador de aquisição e outra próxima a roda de filtros, ambas utilizadas para controlar a roda de filtros, o obturador e leitura do estado do sensor de brilho.
- **Computador de operação**: Computador com software de operação que comanda a data e hora para ligar a CCD, tempo de exposição, sequência de filtros, aquisição e armazenamentos das imagens.

O sistema óptico do imageador é formado por cinco partes principais: lentes primárias frontais, obturador, lente telecêntrica, roda de filtro de seis posições e lentes de reconstrução da imagem sobre a CCD. A lente frontal é do tipo Mamiya *fisheye* com campo de visão próximo a 180° e comprimento focal de 37 mm, $f/4{,}5$. O obturador é um Uniblitz de 65 mm com vida útil para mais de um milhão de ciclos. Entre o obturador e a roda de filtros existe um par de lentes plano-convexas com a finalidade de garantir que a imagem formada sobre os filtros (plano focal primário) seja telecêntrica. Estas lentes têm a finalidade de garantir que os raios de luz cheguem perpendiculares ao plano dos filtros, visto que o comprimento de onda transmitido através dos filtros de interferência de banda estreita (2 nm) é diretamente dependente do ângulo de incidência dos raios de luz.

Os filtros compatíveis com a roda de filtro são de 4 polegadas[1] de diâmetro e cerca de 1/4 de polegada de espessura. Um par de lentes acromáticas de 100 mm de diâmetro é utilizada na seção de reconstrução de imagem abaixo da roda de filtros. Ao passar pelo filtro de interferência, a imagem é reconstruída para tornar-se telecêntrica ao atingir a área de detecção da CCD.

[1] 1 polegada = 25,4 milímetros.

A banda passante dos filtros de interferência são dependentes da temperatura, derivando à ordem de 1 Å para cada 5°C de variação. Por esta razão, um controlador de temperatura (Omega CNI32) é utilizado para manter a temperatura dos filtros estável a mesma temperatura ambiente da sala de operação, que deve ser entre aproximadamente 22 a 27°C. A temperatura desejada nos filtros pode ser configurada e o controlador de temperatura mantém a mesma dentro de uma faixa de +-0,1°C. Contudo, o controlador de temperatura dos filtros tem apenas a capacidade de aquecimento e não de resfriamento, portanto é necessário que a temperatura ambiente da sala de operação seja em torno de ou menor que 20°C (KEO SCIENTIFIC LTD., 2009).

A imagem primária formada sobre o filtro é reconstruída para uma CCD refrigerada termo eletricamente através de uma lente rápida $f/1{,}2$. O detector CCD é um sensor de imagens de estado sólido. A superfície deste sensor é composta por uma matriz de linhas e colunas de microdetectores. A dimensão dos microdetectores, neste equipamento 13,6 $\mu$m, define o tamanho do pixel da CCD, que é o menor elemento formador da imagem detectada. Quanto maior o tamanho da matriz e menor a área de cada pixel maior é a resolução da CCD. A CCD PI/Acton Pixis:2048B, Figura 3.6, apresenta uma eficiência quântica acima de 95% para comprimentos de onda entre 500 e 650 nm, faixa de luz visível em que estão localizados as emissões do NaD 589,3 nm e OI 557,7 nm. A eficiência quântica da CCD representa a percentagem de fótons incidentes no sensor que são detectados e convertidos em sinal elétrico em cada pixel.

Um obturador é colocado no topo do sistema de lentes abaixo da lente olho de peixe. A principal função do obturador é não deixar a CCD exposta continuamente à luminosidade da atmosfera e à radiação de fundo vindo do meio interplanetário. Durante o intervalo de tempo que o sinal armazenado por cada pixel é transmitido para o sistema de controle o ideal é que a CCD não esteja exposta a radiação de fundo e a emissão que passa pelos filtros. O obturador pode ser visto na Figura 3.7 e tem a função de evitar que a passagem de luz pelo sistema ótico.

A exposição à radiação intensa e o aumento de temperatura podem danificar as lentes internas, os filtros de interferência e causar algum dano a CCD. Um sensor de luz no topo do imageador é usado como um atuador automático para evitar sobrexposição e danos aos filtros devido, por exemplo, a incidência direta de raios solares. A roda de filtro, vista na Figura 3.7, possibilita que o mesmo equipamento seja utilizado para detectar diferentes emissões da luminescência em imagens independentes. Os

Figura 3.6 - Câmera CCD.

Sensor CCD acoplado a lentes e sistema de refrigeração..

Fonte: Produção do autor.

Figura 3.7 - Roda de filtros e lente olho de peixe.

A roda de filtros do imageador comporta até seis filtros. A lente de peixe utilizada tem um campo de visão de aproximadamente 180°.

Fonte: Produção do autor.

filtros de interferência ópticos são do tipo passa-banda que permitem a passagem apenas da faixa de comprimento de onda de interesse para cada emissão atenuando as frequências fora da banda passante. A luz filtrada é transmitida para o interior do sistema óptico enquanto o obturador estiver aberto, atravessando o sistema de lentes e atingindo a CCD.

O movimento da roda de filtro é controlada por um servo motor CC (corrente contínua) que possui CPU embarcada, memória EEPROM e portas auxiliares de entrada e saída. O sistema de controle do servo motor possui um servo amplificador, um *encoder* (decodificador da posição atual do eixo do motor) e o próprio motor montados todos em uma mesma carcaça. A alimentação do motor é feita por uma fonte de 1,4 A e 24 Vcc. A comunicação com o computador de operação pode ser feita via porta serial RS-232, possibilitando que a interface de controle do servo motor possa ser usada para controlar o obturar localizado acima da roda de filtros e monitorar o sensor de luz.

A roda de filtros tem um sensor de efeito Hall acoplado a carcaça e um ímã natural fixado na própria roda que é utilizado como um sensor de localização (*home sensor*). Antes do início da operação do programa de controle, a roda de filtros se move lentamente até se alinhar com o sensor de localização para calibrar a posição do *encoder*. A partir deste passo um decodificador de incremento é usado para determinar precisamente posição da roda de filtros.

### 3.2.1 Operação do Imageador

O imageador all-sky é operado automaticamente através de um software que controla o equipamento. Antes do início de cada operação, o software faz a checagem das conexões e funcionamento dos subsistemas (fontes, controle da roda de filtros, CCD, etc). A CCD é ligada um determinado tempo antes do início das observações para que o subsistema de refrigeração atinja um nível de temperatura adequado. Durante esta etapa de preparação, o imageador grava imagens com o obturador fechado que permitem inferir o nível de ruído térmico na CCD. São tomadas medidas de ruído térmico com diferentes tempos de exposição antes do inicio e ao final do período de coleta de dados. Após essas etapas iniciais de preparação do imageador, o equipamento entra no modo de observação. A sequência de filtros e os tempos de exposição de cada um deles são pré-definidos e podem ser alterados segundo a necessidade do usuário.

A data e hora de início e fim de funcionamento do imageador é configurado através

da agenda de operação. Os horários de operação devem ser definidos durante os intervalos em que a luz do dia e lunar não sejam captadas no campo de visão do imageador. A agenda é programada com antecedência, em formato .xml, baseado nos horários em que estes astros nascem e se põem na região de observação. Estes horários podem ser obtidos para diferentes localidade e datas em Time and Date AS (2018). Na Figura 3.8 é apresentado o formato da agenda para o mês de Agosto de 2015, com horário de início e fim das observações para cada dia. As observações sempre começam cerca de 30 a 40 minutos após o por do sol para evitar expor a CCD a luz solar refletida na atmosfera durante o crepúsculo do anoitecer. O mesmo intervalo de tempo é configurado para encerrar a operação do equipamento antes do nascer do sol. Nota-se que em torno do dia 14/08/2015 o período de observação ocorre durante toda a noite devido a fase de lua nova. Nas demais fases da lua ainda é possível ter observações durante parte da noite nos intervalos em que a luz lunar não interfere as medições.

### 3.2.2 Filtros Ópticos de Banda Estreita

Os filtros de interferência ópticos utilizados neste trabalho são do tipo passa-banda e permitem a passagem de luz em comprimentos de onda no visível. A banda passante de cada filtro é estreita com largura entre 1,8 a 2,0 nm. Neste trabalho utilizaram-se as imagens dos filtros de BG, OI 557,7 e Na. Na Figura 3.9 é apresentado o espectro de transmissão do filtro BG projetado para comprimento de onda central de 598,5 nm e largura da banda passante de 2 nm. Medidas de verificação realizadas com espectrômetro indicaram pico de transmissão em 598,38 nm e a banda passante de de 2,1 nm. O mesmo teste realizado com o filtro do OI 557,7 apresentou o pico de transmissão em 558,035 nm e banda passante de 1,93 nm sendo que os valores especificados de projeto foram 557,7 e 2,0 nm, respectivamente. O resultado da medição do espectro para o filtro do OI 557,7 é apresentado na Figura 3.10. Para o filtro do Na, cujas especificações de projeto são comprimento de onda central de 589,3 nm e banda passante de 2,0 nm, o pico de transmissão foi registrado em 589,56 nm e a banda passante igual a 2,02 nm. O espectro de transmissão do filtro do Na é apresentado na Figura 3.11.

Os gráficos de transmissão em função do comprimento de onda dos filtros do OI 630 e OI 777,4 são apresentados no Apêndice A. Este filtros não foram utilizados como objeto de estudo nesta tese, porém foi observado um caso particular de observação de ondas de gravidade incluindo estes filtros. Este tópico é abordado na Seção 3.2.2.1 em maiores detalhes.

Figura 3.8 - Modelo de agenda de operação do imageador.

```
<Agenda>

<D080115 Agendado="01/08/15  Inicio: 18:18 --  Fim: 19:24"/>
<D080215 Agendado="02/08/15  Inicio: 18:18 --  Fim: 20:21"/>
<D080315 Agendado="03/08/15  Inicio: 18:18 --  Fim: 21:16"/>
<D080415 Agendado="04/08/15  Inicio: 18:17 --  Fim: 22:10"/>
<D080515 Agendado="05/08/15  Inicio: 18:17 --  Fim: 23:04"/>
<D080615 Agendado="06/08/15  Inicio: 18:17 --  Fim: 23:58"/>
<D080715 Agendado="07/08/15  Inicio: 18:17 --  Fim: 00:52"/>
<D080815 Agendado="08/08/15  Inicio: 18:17 --  Fim: 01:46"/>
<D080915 Agendado="09/08/15  Inicio: 18:17 --  Fim: 02:39"/>
<D081015 Agendado="10/08/15  Inicio: 18:17 --  Fim: 03:30"/>
<D081115 Agendado="11/08/15  Inicio: 18:17 --  Fim: 04:20"/>
<D081215 Agendado="12/08/15  Inicio: 18:17 --  Fim: 05:08"/>
<D081315 Agendado="13/08/15  Inicio: 18:16 --  Fim: 05:43"/>
<D081415 Agendado="14/08/15  Inicio: 18:16 --  Fim: 05:43"/>
<D081515 Agendado="15/08/15  Inicio: 18:46 --  Fim: 05:43"/>
<D081615 Agendado="16/08/15  Inicio: 19:30 --  Fim: 05:43"/>
<D081715 Agendado="17/08/15  Inicio: 20:13 --  Fim: 05:43"/>
<D081815 Agendado="18/08/15  Inicio: 20:56 --  Fim: 05:42"/>
<D081915 Agendado="19/08/15  Inicio: 21:40 --  Fim: 05:42"/>
<D082015 Agendado="20/08/15  Inicio: 22:25 --  Fim: 05:42"/>
<D082115 Agendado="21/08/15  Inicio: 23:11 --  Fim: 05:41"/>
<D082215 Agendado="22/08/15  Inicio: 00:00 --  Fim: 05:41"/>
<D082315 Agendado="23/08/15  Inicio: 00:51 --  Fim: 05:41"/>
<D082415 Agendado="24/08/15  Inicio: 01:45 --  Fim: 05:40"/>
<D082515 Agendado="25/08/15  Inicio: 02:40 --  Fim: 05:40"/>
<D082615 Agendado="26/08/15  Inicio: 03:36 --  Fim: 05:40"/>
<D082715 Agendado="27/08/15  Inicio: 04:32 --  Fim: 05:40"/>
<D082815 Agendado="28/08/15  Inicio: 05:39 --  Fim: 05:39"/>
<D082915 Agendado="29/08/15  Inicio: 05:39 --  Fim: 05:39"/>
<D083015 Agendado="30/08/15  Inicio: 18:14 --  Fim: 19:02"/>
<D083115 Agendado="31/08/15  Inicio: 18:14 --  Fim: 19:59"/>

</Agenda>
```

Datas e horários para início e término da operação programada do imageador.

Fonte: Produção do autor.

Figura 3.9 - Espectro do filtro óptico do BG.

Espectro de transmissão em função do comprimento de onda do filtro óptico de interferência do BG (*background*).

Fonte: Adaptado de Keo Scientific Ltd. (2009) .

Figura 3.10 - Espectro do filtro óptico do O5.

Espectro de transmissão em função do comprimento de onda do filtro óptico de interferência do OI 557,7 nm.

Fonte: Adaptado de Keo Scientific Ltd. (2009) .

Figura 3.11 - Espectro do filtro óptico do Na.

Espectro de transmissão em função do comprimento de onda do filtro óptico de interferência do Na.

Fonte: Adaptado de Keo Scientific Ltd. (2009).

#### 3.2.2.1 Contaminação das Bandas do OH

O trabalho de processamento dos dados usados nesta tese iniciou-se pela análise visual da imagens de SMS e identificação dos dias com atividade de ondas de gravidade. Nesta análise foi feita a animação dos dados originais incluindo em cada quadro as imagens das emissões do BG, 630, 777,4, 557,7 e do Na, conforme mostrado na Figura 3.3. Dessa forma é possível analisar a animação de cada emissão e ao mesmo tempo tem-se uma visão geral do que está sendo observado nas demais camadas. Este processo auxilia na identificação de nuvens, ruídos (luzes artificiais) e fenômenos visualizados simultaneamente na luminescência atmosférica em diferentes camadas, *e.g.*, ondas de gravidade, bandas claras, bolhas de plasma, TIDs, etc.

Três noites em especial chamam atenção nas observações realizadas em SMS por apresentarem eventos com características e assinatura de ondas de gravidade. Os eventos foram observados nas noites de 31 de Maio, 24 e 25 de Julho de 2011. O atípico nestes casos trate-se de que o mesmo fenômeno foi observado simultaneamente nos filtros do BG, 630, 777,4, 557,7 e Na. A Figura 3.12 apresenta uma sequência de quadros contendo a imagem obtida de cada filtro para a data de 31 de Maio de 2011 em SMS. A estrutura pode ser vista inicialmente na imagem do Na às 21:55. Após este horário a estrutura da onda passa a ser visualizada na imagem dos demais

filtros de forma nítida nas imagens do Na e 777,4 e mais tênue no BG, 630 e 557,7.

A primeira possibilidade é de as estruturas vistas nas imagens nestes três dias mencionados tratam-se simplesmente de nuvens no campo de visão do imageador. Essa hipótese foi descartada pois analisando as imagens em detalhe pode-se observar que: 1 - são oscilações com periodicidade e características de onda de gravidade; 2 - as oscilações aparecem durante a noite próximas ao centro do campo de visão do imageador e não surgindo da linha do horizonte; 3 - o campo de estrelas no fundo da imagem, principalmente no BG, é observado claramente sendo que quando uma nuvem entra no campo de visão do imageador o brilho das estrelas é atenuado ou totalmente encoberto. Descartando a possibilidade de nuvens acredita-se que este efeito é uma contaminação devido a bandas de emissão da hidroxila OH.

As imagens da onda de gravidade observada na Figura 3.12 a principio não poderiam ser proveniente das camadas de emissão dos filtros correspondentes, pelo menos não de todos. Caso fosse a mesma onda de gravidade observada em camadas de emissão diferente deveria haver diferenças na fase e nas dimensões do comprimento de onda horizontal visto que cada camada está a uma altura distinta (NaD $\approx$ 90 km; OI 557,7 nm $\approx$ 96 km na região E e entre 250 a 300 km na região F; OI 630 nm entre 250 e 300 km; OI 777,4 nm entre 300 e 400 km). As banda do OH usualmente utilizadas para observações de fenômenos na luminescência atmosférica estão localizadas na região do espectro do infravermelho. Contudo, existem outras bandas do OH localizadas na faixa do visível e que se sobrepões as linhas de emissão do NaD, 557,7, 630 e 777,4 nm, inclusive na faixa utilizada para o BG em 598,5 nm.

O atípico notado nestes casos é que as observações transcorreram em SMS por mais de um ano e todos os dados foram visualmente analisados com a animação quadro a quadro utilizando todos os filtros. Apenas nessas três datas foram observados essa provável contaminação nos filtros. O mesmo vale para os dados de MAN, cujo período é ainda maior e em nenhum dia foi observado esse tipo de efeito. Levanta-se a hipótese de que algum fenômeno específico possa ter causado o aumento considerável na taxa de emissão das diferentes bandas do OH. A emissão das banda do OH é uma das mais intensas da alta atmosfera, porém a intensidade elevada só é obtida quando integrado em uma faixa larga do espectro. Observações do OH são feitas normalmente utilizando filtros de banda larga, *e.g.*, Garcia et al. (1997) utiliza um filtro na região do espectro próximo ao infravermelho para comprimentos de onda entre 715 e 930 nm e largura de banda passante de 215 nm, 10 vezes maior do

Figura 3.12 - Onda de gravidade observada simultaneamente na imagem de diferentes filtros em SMS 31/05/2011.

Quadros contendo imagens de um ciclo completo da roda de filtros do imageador. O espaço em branco em cada quadro representa a posição do filtro de $N_2^+$ que foi suprimido pois apresenta apenas ruído térmico para esta data. O surgimento de uma estrutura de onda nas imagens dessa noite pode ser observado a partir das 21:55 e que passa a ser vista nos demais filtros após este horário. Este efeito acredita-se tratar de um caso de contaminação do OH nos filtros.

Fonte: Produção do autor.

que a banda passante[2] dos filtros utilizados nesta tese. Se considerado apenas uma faixa estreita, da ordem de 2 nm (largura de banda média dos filtros utilizados), a intensidade de emissão do OH normalmente seria muito baixa frente a intensidade das linhas contidas nas respectivas faixas dos filtros utilizados.

Observações feitas com fotômetro em São José dos Campos (23,2° S 45,9°O) e Cachoeira Paulista (22,7°S 45,2°O) por Takahashi et al. (1977) mostram que alterações na taxa de produção da molécula OH excitada em torno da meia-noite que podem estar relacionadas a difusão turbulenta e a maré solar. Na maioria dos casos foi observado o declínio da intensidade do OH(8,3) no período pré meia-noite e o aumento dessa intensidade no período pós meia-noite. Ainda foi observado uma variação sazonal sendo a mudança na taxa de produção da molécula OH excitada maior no inverno e outono, e menor durante o verão e primavera. No mesmo trabalho, Takahashi et al. (1977) apresentam a variação anual da intensidade do OH(8,3) onde há um máximo em torno do mês de fevereiro e os mínimos em dezembro e julho[3]. Gao et al. (2010) apresentam uma distribuição global das oscilações semianual (SAO – *semiannual oscillation*), anual (AO – *annual oscillation*) e quase bianual (QBO – *quasi-biennial oscillation*) para o pico da taxa de emissão do OH observadas usando o satélite TIMED/SABER. Nesse trabalho foram encontrados três picos para as oscilações SAO e QBO no equador, em 35ºS e 35ºN. Para a oscilação AO foi encontrado dois picos em 20°S e 20°N. A estação de SMS está localizada na latitude 29,4°S, entre os picos de ambas oscilações.

Takahashi et al. (1977) ainda sugere que as observações indicam haver um pequeno aumento na intensidade do OH durante atividade geomagnética. Batista et al. (1994) investigaram a relação entre a intensidade da emissão do OH(9,4) e atividade solar encontrando uma correlação positiva. O índice Dst para 31/05/2011 apresenta mínimo de -33 nT em torno das 23h UT. Em torno das 22:00 LT em SMS o Dst foi de -25 nT, o que indica baixa atividade geomagnética. Para os dias 24 e 25/07/2011 o Dst foi ainda mais calmo registrando -4 e -11 nT em torno de 21:00 LT.

Não foi possível chegar a conclusões mais apuradas sobre o que poderia ter causado o aumento da intensidade do OH de forma que o mesmo fosse detectado nos filtros de banda estreita de 2 nm. Nas datas mencionadas em SMS não havia dados de fotômetro ou qualquer instrumento medindo a emissão do OH. Contudo chama-se atenção para este caso e o cuidado que deve-se considerar ao analisar imagens da

[2]Com uma linha de atenuação em 865 nm afim de suprimir a emissão do $O_2$(0,1).

[3]Justamente no mês de Julho 2011 é que foram observadas em duas noites, dias 24 e 25, casos de possível contaminação.

luminescência noturna de forma individual (analisando apenas um filtro). Em alguns casos seria possível a indução ao erro ao imaginar que algum fenômeno está sendo proveniente de uma emissão quando a fonte poderia ser de outra camada em altitude e mecanismos fotoquímicos bastante diferentes. As imagens dos dias 24 e 25/07/2011 são apresentadas no Apêndice B.

## 3.3 Processamento dos Dados de Imageador

### 3.3.1 Redimensionamento da Imagem Original

As emissões de luminescência noturna são muito tênues, logo o menor nível de ruído deteriora a relação sinal/ruído da imagem. Cada pixel da CCD do imageador é um detector de fótons, os quais são teoricamente idênticos uns aos outros e com a mesma sensibilidade. A contagem de fótons em cada pixel, por intervalo de exposição, define a intensidade da imagem que será associada ao mesmo. A Figura 3.13 (a) representa uma seção da CCD com 4x4 pixeis onde os quadrados pretos e brancos são pixeis com contagem nula e máxima de fótons, respectivamente. Os dispositivos CCD, de forma geral, possuem um nível de ruído intrínseco a sua operação gerado pela eletrônica do equipamento, por efeitos de corrente escura (*dark current*), devido a influência sobretudo da temperatura. A técnica de binning consiste em agrupar pixeis adjacentes da CCD para formar um "super pixel"na imagem resultante.

O agrupamento de pixeis pode ser feito via hardware, durante a captura da imagem ou via software no processamento das imagens. A Figura 3.13 (b) representa o binning de uma imagem 4x4, onde os pixeis resultantes apresentam uma contagem de fótons que pode ser dado pela média dos pixeis originais ou pela mediana (dependendo do método utilizado). Dessa forma, em uma região escura da imagem onde há apenas um ou poucos pixeis claros, provavelmente devido a ruído se a área é predominantemente escura, este pixel será substituído por um de cor escura. Neste exemplo a sensibilidade dos pixeis da imagem resultante é 4 vezes superior a da imagem original, porém a resolução cai pela metade. Esta técnica de processamento de imagens acaba sendo uma relação entre sensibilidade e resolução.

Os dados originais do imageador de SMS estão na resolução máxima da CDD que é de 2048x2048. Estas imagens foram submetidas a um binning 2x2 transformando a sua resolução para 1024x1024. Uma rotina utilizando a linguagem Visual Basic (Apêncide C) foi elaborada para aplicar o binning 2x2 nos dados de SMS usando o software WinView/32. Os dados na resolução 2048x2048 são a entrada da rotina e como saída são geradas as imagens 1024x1024 em dois formatos Tiff (24 bits) e Tiff

Figura 3.13 - Redução da dimensão da imagem original.

Representação da aplicação do binning 2x2 com agrupamento de 4 pixeis adjacentes em um "super pixel".

Fonte: Produção do autor.

8 bits. O arquivo de saída no formato Tiff 8 bits é gerado para facilitar a visualização das imagens, pois que o formato padrão Tiff dos arquivos originais usa uma escala de cores que não é suportada por visualizadores convencionais de sistemas operacionais Windows e Linux.

Na estação MAN as imagens originais estão na resolução 1024x1014 pixeis, sendo realizado o binning 2x2 via hardware na coleta das imagens. Para o processamento das imagens e determinação dos parâmetros de onda as imagens tanto de SMS quanto MAN foram redimensionadas para 512x512 pixeis. As imagens de SMS no formato Tiff 8 bits e as de MAN foram redimensionadas utilizando o software IDL. Foram feitas comparações dos resultados obtidos utilizando as funções CONGRID e REBIN do IDL 6.4. A utilização da função CONGRID permite redimensionar a imagem para qualquer tamanho enquanto a função REBIN possibilita apenas redimensionar a imagem para múltiplos e submúltiplos da imagem original. A função REBIN utiliza o método de interpolação bilinear dos pixeis vizinhos e apresentou uma imagem de saída com melhor relação sinal/ruído, sendo esta a função utilizada para redimensionar as imagens para a etapa de processamento e analise espectral.

### 3.3.2 Calibração das Imagens

As primeiras observações históricas da luminescência atmosférica foram obtidos usando lentes planas com campo de visão onde as distâncias na camada observada

são lineares em relação às distâncias na imagem gerada, isto é, cada pixel da imagem corresponde a igual distância em  km no céu e a resolução em pixel/km é linear. Este tipo de imagem tem a vantagem de não apresentar distorção espacial devido a curvatura na imagem, porém limita consideravelmente o campo de visão do observador em torno de 40°. Atualmente os imageadores utilizam em grande parte um campo de visão maior, de até 180°, com o uso das lentes olho de peixe. Este tipo de lente projeta a imagem sobe a CCD de forma que cada pixel corresponde a um arco, em graus, de igual ângulo do céu. Dessa forma, a resolução da imagem em pixel/km não é linear. A Figura 3.14 mostra uma imagem de onda de gravidade observada na imagem original. Este tipo de dados não pode ser utilizado com algumas metodologias para determinação de parâmetros de onda, como a análise espectral bidimensional que requer que a resolução espacial ao longo da imagem seja constante. Para que o uso desse tipo de metodologia seja possível é necessário mapear a imagem original sobre uma grade onde a resolução em pixel/ km seja linear.

Figura 3.14 - Onda de gravidade observada na imagem não linearizada.

Imagem original de uma onda de gravidade observada na emissão do OI 557,7 nm em 15/08/2015 na estação de MAN.

Fonte: Produção do autor.

No processo de mapeamento ocorre uma distorção dos pixeis que representam ângulos de elevação mais baixos do campo de visão do imageador. Os pixeis que estão no centro da imagem representam uma distância muito menor em km do que os pixeis da borda da imagem. Esta distorção é representada pela Figura 3.15. A Fi-

gura 3.15-(a) representa uma imagem de 18x18 pixeis onde cada pixel varre um arco de 10° do céu completando 180° de campo de visão. A Figura 3.15-(b) mostra o mapeamento dos pixeis sobre uma grade com distâncias horizontais lineares em km. Nota-se claramente o tipo de distorção que há entre a área do céu que os pixeis do centro e da borda da imagem representam.

Figura 3.15 - Distorção da imagem original mapeada em escala linear de km.

Efeito da projeção da imagem de céu inteiro nas coordenadas geográficas. (a) Imagem original do céu inteiro onde cada pixel representa 10° x 10° em relação ao zênite. (b) Projeção correspondente a uma área de 1000 x 1000 km$^2$.

Fonte: Adaptado de Garcia et al. (1997).

Para obter a imagem com resolução espacial linear são utilizadas transformações entre quatro sistemas de coordenadas, conforme ilustrado na Figura 3.16. Esta metodologia para linearização das imagens é descrita em detalhes por Garcia et al. (1997). A imagem original captada pela CCD tem cada pixel dado como uma coordenada (i,j). Cada ponto (i,j) pode ser transformado linearmente em uma coordenada (f,g) onde o zênite da imagem é posicionado no centro e o norte geográfico alinhado com o topo da imagem. Um sistema de coordenadas auxiliar relaciona os pontos (f,g) com o azimute e elevação (az,el). Por fim, este sistema é transformado em coordenadas geográficas (x,y) onde as distâncias espaciais são lineares. Todas as transformadas entre os sistemas têm uma transformada inversa, sendo possível mapear um ponto

dado em um sistemas para os demais:

$$(i, j) \Leftrightarrow (f, g) \Leftrightarrow (az, el) \Leftrightarrow (x, y) \tag{3.1}$$

A imagem original e a em coordenadas padrão são relacionadas pela transforação linear:

$$\begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 \\ b_0 & b_1 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i \\ j \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

onde os coeficientes $a$ e $b$ são determinados utilizando a posição das estrelas de fundo como referência de posições (f,g) e (i,j) conhecidas. A relação entre $(f, g)$ e $(az, el)$ é expressa por:

$$\begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix} = G(el) \begin{bmatrix} sen(az) \\ cos(az) \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

onde $G(el)$ é uma função que depende do formato da lente e relaciona o ângulo de elevação e distância do centro da imagem.

A calibração das imagens consiste em determinar a função da lente all-sky, o zênite real da imagem e a rotação para alinhar a imagem com o norte geográfico. O processo para determinar estes três itens inicia-se com a escolha de uma imagem com céu limpo, com boa nitidez e visibilidade das estrelas. Em seguida é selecionado um conjunto de estrelas para serem tomadas como pontos de referência na imagem. A posição (i,j) de cada estrela selecionada na imagem é relacionada a sua posição real em azimute e altura. Os dados de posição real (azimute e altura) de cada estrela são obtidos a partir de um mapa ou catálogo estrelar que pode ser obtido por softwares, *e.g.*, SkyMap ou Stellarium. A Figura 3.17 mostra a imagem do OI 630 nm selecionada para calibração do mês de Maio de 2011 na estação SMS. As estrelas selecionadas estão circuladas em vermelho e as direções aproximadas dos eixos norte-sul e leste-oeste estão representadas na imagem. Na Figura 3.18 é apresentada a reta da função da lente do imageador.

O processo de *unwarping*, ilustrado na Figura 3.15 é realizando efetuando a série de transformações entre os sistemas de coordenadas da Equação 3.1. A imagem da Figura 3.17 mapeada para alturas de 96 km de altura para área 512x512 e 256x256 km$^2$

Figura 3.16 - Mapeamento de coordenadas da imagem original para geográficas.

Coordenadas usadas para transformar os dados entre o formato original e coordenadas geográficas.

Fonte: Adaptado de Garcia et al. (1997).

é apresentado na Figura 3.19. Alterações na posição e montagem do sistema óptico do imageador podem mudar a função da lente, a posição do zênite e a direção do Norte nas imagens. Portanto, pode ser necessário fazer nova calibração para cada alteração no equipamento.

### 3.3.3 Análise Espectral Usando Transformada de Fourier Discreta

Para obter os parâmetros de ondas de gravidade (comprimento de onda horizontal, direção de propagação, período observado e velocidade de fase aparente) foi utilizada a técnica de análise espectral em duas dimensões descrita por Wrasse et al. (2007). O código fonte foi o mesmo utilizado por Bageston (2010) adaptado para os dados das estações SMS e MAN. Esta técnica consiste em aplicar a Transformada de Fourier Discreta (TFD) a uma sequência de imagens afim de obter o espectro de potência

Figura 3.17 - Seleção das estrelas para determinação da função de lente.

Escolha das estrelas que serão utilizadas para determinação do polinômio da função de lente do imageador.

Fonte: Produção do autor.

destas. Antes da aplicação da TFD, as imagens passam por uma sequência de pré-processamento que inclui a rotação e alinhamento com o norte geográfico, remoção das estrelas, mapeamento obtido através da função de transferência da lente, cálculo da fração da flutuação de intensidade, filtragem e janelamento (WRASSE et al., 2007).

O espectro de potência em duas dimensões é dado por $|F(k,l)|^2$, onde $F(k,l)$ é a Transformada de Fourier Discreta em duas dimensões (TFD-2D) expressa por:

$$F(k,l) = \sum_{x=0}^{M_x-1} \sum_{y=0}^{N_y-1} \left(e^{-i\frac{2\pi xk}{M_x}}\right) \left(e^{-i\frac{2\pi yl}{N_y}}\right) f(x,y), \tag{3.4}$$

onde $F(k,l)$ é a transformada da função f(x,y), $k$ e $l$ são, respectivamente, os números de onda zonal e meridional e $M_x \times N_y$ é a dimensão da imagem analisada. O espectro resultante da análise de um sequência de $n$ imagens é a média aritmética dos $n$ espectros.

Como o espectro de potência é simétrico em relação à origem, $|F(k,l)|^2 =$

Figura 3.18 - Função da lente.

Reta representando a função da lente do imageador dado pela posição de cada estrela em pixel versus a distância zenital em graus.

Fonte: Produção do autor.

$|F(-k,-l)|^2$, existe uma ambiguidade de 180° quanto a direção de propagação da onda. O sentido de propagação da onda não pode ser determinado diretamente através do espectro de potência. É possível eliminar essa ambiguidade analisando visualmente a animação das imagens e determinando a direção de propagação ou utilizando o espectro cruzado entre duas imagens sucessivas. Dadas duas imagens sucessivas $f(x,y)$ e $g(x,y)$, o espectro cruzado entre as duas imagens é dado por:

$$C(k,l) = F(k,l) \cdot G^*(k,l), \tag{3.5}$$

onde $C(k,l)$ é o espectro cruzado, $F(k,l)$ e $G(k,l)$ são as TDF de $f(x,y)$ e $g(x,y)$ e $G^*(k,l)$ representa o complexo conjugado de $G(k,l)$. Para um número $n$ de imagens sucessivas, conforme representado na Figura 3.20, serão gerados $n-1$ espectros cruzados e o espectro resultante será a média destes. A amplitude do espectro cruzado é dada pelo módulo $|C(k,l)|$, e a fase $\phi$ é expressa por:

$$\phi(k,l) = \arctan\left\{\frac{\operatorname{Im} C(k,l)}{\operatorname{Re} C(k,l)}\right\}, -\pi \leq \phi \leq \pi. \tag{3.6}$$

Para o número de onda $(k,l)$ cujo espectro cruzado tem amplitude máxima, a fase dada pela Equação 3.6 representa a diferença de fase $\delta\phi(k,l)$ entre as duas imagens

Figura 3.19 - Mapeamento da imagem original.

Imagens mapeadas de 512x512 e 256x256 km$^2$ com distância espacial linear.
Fonte: Produção do autor.

que geram este espectro cruzado. A velocidade de fase observada $c_{obs}$ é dada por:

$$c_{obs} = \frac{1}{\sqrt{k^2 + l^2}} \cdot \frac{\delta\phi(k,l)}{360^\circ} \cdot \frac{1}{\delta t}, \tag{3.7}$$

onde $\delta t$ é o intervalo de tempo entre duas imagens sequentes. O comprimento de onda horizontal $\lambda_h$ é determinado usando as frequências espaciais $(k, l)$ em:

$$\lambda_h = \frac{1}{\sqrt{k^2 + l^2}}. \tag{3.8}$$

Por fim o período observado da onda pode ser determinado por:

$$\tau_{obs} = \frac{\lambda_h}{c_{obs}}. \tag{3.9}$$

A fase do espectro cruzado é anti-simétrica em relação a origem, *i.e.*, $\delta\phi(k,l) = -\delta\phi(-k,-l)$. Pela Equação 3.6 o sentido de propagação da onda corresponde aos números de onda que apresentam $\delta\phi < 0$, ou seja, diferença de fase negativa.

Figura 3.20 - Janelamento da imagem para análise FFT.

Janelamento de imagens para análise espectral bidimensional.

Fonte: Produção do autor.

Figura 3.21 - Espectro cruzado médio resultante da análise espectral.

Espectro cruzado médio de potência e fase.

Fonte: Produção do autor.

# 4 OBSERVAÇÕES EM SÃO MARTINHO DA SERRA

Neste Capítulo são apresentados os resultados obtidos com os dados da região Sul do Brasil. Os parâmetros de onda observados foram obtidos aplicando a técnica de análise espectral usando a transformada de Fourier discreta para eventos de propagação lenta. Uma discussão sobre as possíveis fontes de geração é abordada e o estudo de alguns casos específicos são apresentados.

## 4.1 Parâmetros das Ondas Observadas em SMS

As observações na estação de São Martinho da Serra – SMS (29,442°S; 53,822°O) foram realizadas entre março de 2011 e maio de 2012. A Figura 4.1 apresenta o calendário de dados disponíveis para este período, que somam um total de 165 noites de observações. Os dados foram divididos entre noites com céu encoberto (nublado ou com chuva) e de céu limpo, com dados úteis para observação da luminescência atmosférica.

Entre os dados úteis analisados neste trabalho, poucos foram os casos em que não se observou nenhum tipo de onda de gravidade, no total apenas 7 noites. Entre as noites com observações de onda de gravidade, subdividiu-se os casos em dois tipos, sendo estes denominados OG tipo I e OG tipo II. As noites denominadas com ondas de gravidade tipo I (total de 30 noites) compreendem apenas eventos mais "rápidos", em que a velocidade de fase é muito elevada para acompanhar o deslocamento da onda entre imagens do mesmo filtro[1]. Os eventos do tipo I representam uma grande parte do espectro de ondas de gravidade e elevado número de casos observados em SMS[2]. Estas ondas não foram analisadas neste trabalho devido a limitação de resolução temporal nos dados de SMS. Nas noites classificadas com eventos do tipo II (total de 37 noites), houve a observação de pelo menos uma onda de gravidade mais "lenta", ou seja, em que a velocidade de fase é menor, sendo possível aplicar a técnica de análise espectral bidimensional para determinação dos parâmetros de onda.

Os eventos do tipo II foram analisados e os parâmetros de onda de gravidade são apresentados nesta Seção. As noites classificadas como OG tipo II não excluem a possibilidade de observação de eventos do tipo I na mesma noite. Há noites em que foram observadas ondas de ambos os tipos, inclusive simultaneamente. Estas

[1] O intervalo de tempo entre imagens dos filtros de NaD 589,3 nm e OI 557,7 nm para a estação SMS é de $\approx$ 12 min, o que é elevado para observação de ondas de gravidade com velocidade de fase maiores.

[2] O número exato de ondas tipo I observadas em SMS não foi contabilizado neste trabalho.

Figura 4.1 - Calendário de dados analisados de SMS.

As noites com dados são classificadas em céu encoberto, céu limpo sem ondas de gravidade e céu limpo com ondas de gravidade. As noites com ondas de gravidade são subdivididas em ondas tipo I (eventos rápidos não analisados) e tipo II (eventos lentos analisados).

Fonte: Produção do autor.

noites estão identificadas com as duas legendas de OG tipo I e II no calendário da Figura 4.1. Ainda foram observados três casos de frentes mesosféricas, cujos parâmetros não são abordados nesta Seção. Dois dos eventos de frentes mesosféricas mais marcantes são discutidos na Seção 4.3.

A ocorrência de ondas de gravidade no NaD 589,3 e OI 557,7 nm em função do número de noites úteis de observação é apresentada nas Figuras 4.2 (a) e (b). As noites úteis de observação compreendem aquelas em que o céu está limpo durante ao menos algumas horas do período de observação. Nota-se que a maior parte dos eventos observados no filtro do NaD 589,3 nm ocorreram nos meses de abril, maio e junho, durante parte do outono e máximo no mês de julho durante o inverno. A razão entre o número de eventos e número de noites de observação úteis (curva em azul) desta emissão ocorre nos meses de junho e julho. Na emissão do OI 557,7 nm o maior número de eventos é observado nos meses de janeiro e março. A curva azul

indica, no entanto, um máximo em janeiro e valores aproximadamente constantes entre os meses de março a junho na razão entre o número de eventos e número de noites de observação úteis. Durante setembro e outubro não há noites úteis de observação devido ao equipamento não ter operado nesses meses (apenas no final de outubro com céu encoberto). Na Figura 4.2 (c) é apresentada a contagem total de ondas de gravidade observada em cada mês. Nota-se dois picos na curva azul nos meses de janeiro e junho. O mês com maior número de eventos observados foi julho e com menos observações foi fevereiro. Os eventos classificados como tipo II totalizam 63 ondas de gravidade. Destas, 24 foram observadas na emissão do NaD 589,3 nm e 39 no OI 557,7 nm.

Os parâmetros de comprimento de onda horizontal, período observado, velocidade de fase observada e direção de propagação são apresentados na Figura 4.3. Os comprimentos de onda horizontal encontrados estão entre 10 e 65 km, sendo que $\approx 70\%$ dos eventos estão entre 20 e 35 km. O período observado (período aparente) das ondas analisadas variam de pouco mais de 20 a 130 min. Cerca de 80% dos eventos apresentaram período observado entre 25 e 55 min. No total, 10 eventos tiveram período maior do que uma hora, dentre os quais 2 eventos tiveram período superior a duas horas. Como consequência da análise limitada a eventos de longo período, as velocidades de fase observadas são menores, ficando na faixa de 2,5 a 25 m/s. Cerca de 58% das ondas de gravidade apresentaram velocidades de fase observada (velocidade aparente) entre 7,5 a 15 m/s.

O gráfico inferior direito da Figura 4.3 representa a direção e sentido de propagação horizontal das ondas de gravidade analisadas. Uma escala de cores indica as velocidades observadas em cada direção. O azimute de propagação das ondas de gravidade (0º a 360º) é dividido em 16 arcos[3] com ângulo de 22,5°. Nota-se uma anisotropia na direção de propagação das ondas de gravidade analisadas, tendendo ao alinhamento na direção noroeste - sudeste (NO-SE). Mais de 30% dos eventos apresentam sentido de propagação NO e NNO, com azimutes entre 303,75° e 348,75°. Cerca de 15% das ondas propagaram-se para SSE com azimutes entre 146,25° e 168,75°. Pouco mais de 15% dos eventos propagaram-se para oeste e ONO entre azimutes de 258,75° e 303,75°. Destaca-se ainda a quase ausência de ondas se propagando para norte, nordeste e leste. Menos de 10% das ondas de gravidade analisadas propagaram-se nestes sentidos entre azimutes de 348,75° e 101,25°.

[3]Representam 16 sentidos, sendo 4 pontos cardeais - norte (N), sul (S), leste ou este (L ou E) e oeste (O); 4 pontos colaterais - nordeste (NE), sudoeste (SO), noroeste (NO), sudeste (SE) e 8 pontos subcolaterais - NNE, ENE, SSO, OSO, NNO, ONO, SSE e ESE.

Figura 4.2 - Contagem de ocorrência de ondas de gravidade e de noites úteis de observação para o período analisado.

(a) e (b) mostram a ocorrência de ondas de gravidade observadas nos filtros do NaD e OI 557,7 e o número de contagem de noites úteis de observação. (c) representa o número de eventos total observados em cada mês. A curva em azul representa a razão entre número de eventos e número de noites de observação úteis.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.3 - Parâmetros de onda observados em SMS.

Parâmetros das ondas de gravidade observadas em SMS. O período e velocidade de fase são parâmetros aparentes (não intrínsecos).

Fonte: Produção do autor.

Dividindo os 63 eventos de ondas de gravidade observadas em SMS entre as estações do ano, observam-se algumas diferenças entre os parâmetros das ondas analisadas. As Figuras 4.4 a 4.7 apresentam os parâmetros de onda observados para as estações do outono, inverno, primavera e verão entre março de 2011 a abril de 2012. Nestas figuras, os parâmetros observados em cada estações do ano são sobrepostos ao total de eventos. Os dados para as estações são identificados nas cores laranja (outono), azul (inverno), amarelo (primavera) e vermelho (verão). Ressalta-se que para o período da primavera (entre 22 de setembro a 20 de dezembro de 2011) há um número baixo de ondas de gravidade observadas, sendo apenas 3 eventos. Isto deve-se principalmente ao equipamento não ter operado durante boa parte deste período nos meses de setembro e outubro conforme a Figura 4.1.

O comprimento de onda horizontal dos eventos observados em SMS apresenta uma distribuição semelhante no outono e inverno. Nestes dois períodos o parâmetro concentra-se entre 20 e 30 km, como pode ser visto na Figura 4.4. Durante o ve-

Figura 4.4 - Comprimento de onda horizontal em SMS nas estações do ano.

Comprimentos de onda observados em SMS em relação a sazonalidade. As barras na cor vermelho claro representam a contagem total de eventos, em amarelo outono, azul o inverno, laranja a primavera e vermelho no verão.

Fonte: Produção do autor.

rão a distribuição é mais homogênea, com ocorrência em todos os comprimentos de onda. Na primavera os três eventos que foram observados aprestam comprimento de onda entre 20 e 30 km. O período observado das ondas de gravidade, Figura 4.5, apresenta uma distribuição concentrada entre 25 e 55 min. no outono. Durante o inverno observaram-se as ondas de períodos mais longos entre os dados analisados, com eventos acima de 60 min. até 130 min. No verão nota-se um pico de eventos com período entre 30 e 35 min. e na primavera os três eventos apresentaram períodos distintos entre 25 e 50 min. As velocidades de fase observadas, Figura 4.6, apresentam um pico durante o outono em torno de 10 m/s. Durante o inverno e o verão as velocidades se distribuem de forma mais homogênea. Os eventos com maior velocidade são observados no verão e no outono.

A anisotropia na direção de propagação das ondas de gravidade, mostrada na Figura 4.3, chama ainda mais atenção quando dividida nas estações do ano. A Figura 4.7 apresenta a direção de propagação das ondas observadas em SMS para os períodos de outono, inverno, primavera e verão. Observando os gráficos referen-

Figura 4.5 - Período observado em SMS nas estações do ano.

Período observado em SMS em relação a sazonalidade. As barras na cor vermelho claro representam a contagem total de eventos, em amarelo outono, azul o inverno, laranja a primavera e vermelho no verão.

Fonte: Produção do autor.

tes ao outono e inverno, percebe-se claramente a grande concentração de ondas propagando-se para noroeste, ONO e NNO. Durante o inverno, além das direções citadas, parte significativa das ondas propaga-se no sentido oeste. Na primavera, embora hajam apenas três eventos, todos tem o mesmo sentido de propagação, que coincide exatamente com o mesmo sentido de propagação das ondas no verão. Portanto, pode-se dizer que há uma clara tendência de propagação das ondas entre o norte e oeste durante o outono e inverno para o ano analisado e entre o sul e sudeste no verão e, menos significativo devido a baixa amostragem, na primavera.

O período de observações em SMS, de pouco mais de um ano, é pequeno para se falar em comportamento sazonal das ondas de gravidade. Além disso, as ondas de gravidade analisadas representam apenas parte do espectro devido a limitação na resolução temporal dos dados. Entretanto, pode-se dizer que para o espectro de ondas analisado é perceptível a distinção dos parâmetros de onda, sobretudo na direção e sentido de propagação, em função das estações do ano. Acredita-se que a anisotropia na direção de propagação NO-SE deva-se as fontes de geração e filtragem

Figura 4.6 - Velocidade de fase observada em SMS nas estações do ano.

Velocidade de fase observada em SMS em relação a sazonalidade. As barras na cor vermelho claro representam a contagem total de eventos, em amarelo outono, azul o inverno, laranja a primavera e vermelho no verão.

Fonte: Produção do autor.

de ventos na mesosfera.

## 4.2 Análise das Possíveis Fontes

Nesta seção é apresentada uma discussão sobre as possíveis fontes de geração associadas às ondas de gravidade observadas na MLT em São Martinho da Serra (SMS). Devido a ausência de dados complementares de vento e temperatura na mesosfera simultâneos às observações do imageador, não foi possível determinar com maior confiabilidade a origem das fontes. Uma discussão e uma análise qualitativa são abordadas visando apontar prováveis mecanismos de geração das ondas de gravidade observadas em SMS. Para essa discussão são levados em consideração os resultados observacionais da luminescência em SMS, imagens de satélite da troposfera e dados da média dos ventos mesosféricos de estudos anteriores às observações realizadas. São apresentadas possíveis explicações para as características da anisotropia de propagação das ondas de gravidade observada em SMS.

Inicialmente foram analisados dados de satélite com informação das condições tro-

Figura 4.7 - Azimute de propagação observado em SMS nas estações do ano.

Azimute de propagação observado em SMS em relação a sazonalidade.

Fonte: Produção do autor.

posféricas para cada noite em que se observaram ondas de gravidade em SMS. Esta análise tem o objetivo de avaliar a existência de sistemas convectivos na troposfera que poderiam gerar ondas de gravidade propagantes. Foram analisadas imagens do canal do visível e de infravermelho do satélite GOES-12, disponibilizadas por CPTEC/INPE (2018b), cerca de até quatro horas antes da observação das ondas de gravidade. Nas imagens do canal do visível é possível identificar a presença de nuvens e circulação das massa de ar na troposfera. As imagens de infravermelho indicam a temperatura de topo de nuvem, parâmetro indicativo da presença de sistemas convectivos na troposfera. Quanto menor a temperatura registrada, mais alto se encontra o topo da nuvem, indicando a provável atuação de sistemas convectivos. Com base nas imagens de temperatura de topo de nuvem buscou-se identificar zonas de convecção troposférica nas regiões próximas a estação SMS. Trata-se de uma análise qualitativa com a finalidade de avaliar a correlação entre a observação de ondas de gravidade em SMS e a presença de sistemas convectivos troposféricos.

No entanto, não é possível afirmar que as ondas de gravidade estão sendo geradas por uma determinada célula convectiva na troposfera, mesmo que haja indício da presença da mesma pelos dados de satélite.

Quando identificados nas imagens de satélite, a distância e posição de um sistema convectivo em relação a estação SMS e foram considerados para avaliar qualitativamente se o mesmo poderia ser um candidato a fonte do evento de onda de gravidade. Levando em consideração a velocidade de fase, direção de propagação e intervalo de tempo entre a passagem da zona de convecção e observação da onda de gravidade pode-se traçar uma possível relação entre a fonte do evento e o sistema convectivo.

Na Figura 4.8 são apresentados exemplos de imagem de satélite da região em torno da estação SMS. Os círculos representam raios de 500 e 1000 km de distância em relação a estação SMS (localizada no centro dos círculos). As linhas indicam o sentido de propagação de uma onda de gravidade observada na MLT na mesma data. A Figura 4.8-(a) apresenta uma condição típica observada durante o verão em SMS onde existe a presença de vários sistemas convectivos deslocando-se do Norte e Centro do continente. Estas zonas de convecção atuam em regiões próximas a estação e que são condizentes com a direção de propagação e velocidade de fase do evento observado. Um evento de onda de gravidade observada durante o inverno, em que existem sistemas convectivos na troposfera nas proximidades da estação é observado na Figura 4.8-(b). Ressalta-se que esta é uma análise qualitativa e a presença de sistemas convectivos atuantes na troposfera não é determinante para afirmar que estes sejam as fonte das ondas de gravidade observadas na MLT. A Figura 4.8-(c) representa as condições da troposfera para um caso em que a fonte da onda observada provavelmente não está associada a convecção na troposfera, uma vez que não há indícios da presença convecção. Embora exista um grande sistema convectivo presente na imagem, o mesmo está distante horizontalmente, não sendo condizente com os parâmetros de onda observados.

A análise das imagens de satélite indicam que em 57% dos eventos de onda de gravidade observados no período do outono não há indícios de fonte devido a convecção troposférica. Em 43% dos casos existe a presença de sistemas convectivos que podem estar relacionado a fonte de geração. Em relação ao número de noites de observação, em 59% das noites de observação no período do outono existe indícios de fonte convectiva na troposfera. Ressalta-se que a diferença entre percentuais de número de eventos e número de noites deve-se ao fato de que em algumas noites são observadas mais de uma onda de gravidade. No inverno para 56% dos eventos e

Figura 4.8 - Temperatura de topo de nuvem.

Imagens de satélite indicando a temperatura de topo de nuvem. Os círculos brancos marcam distâncias radiais de 500 e 1000 km da estação SMS.

Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE (2018b).

55% das noites de observação existe a possibilidade da fonte ser de origem convectiva na troposfera. Na primavera para as únicas três ondas de gravidade analisadas haviam sistemas convectivos na troposfera condizentes com os parâmetros de onda observados. Durante o período do verão observou-se que em 50% dos eventos e das noites com observação de ondas de gravidade existem prováveis fontes convectivas na troposfera. Para todo o período de dados analisados, pouco mais da metade dos casos, $\approx 51\%$ dos eventos, existe a possibilidade da fonte estar associada a convecção na troposfera. Para os casos, em que não há indícios de fontes na troposfera a geração pode estar associadas a outros mecanismos tais como cisalhamento de ventos na estratosfera e mesosfera, turbulência de céu claro, e geração *in situ* devido ao efeito Joule de possíveis fontes térmicas na região E. O quadro a esquerda da Figura 4.9 mostra a ocorrência de eventos de ondas de gravidade com e sem a presença de sistemas convectivos na troposfera. A figura da direita apresenta a ocorrência em função do número de noites de observação para os mesmos casos.

Figura 4.9 - Ocorrência de ondas de gravidade com e sem a presença de possíveis fontes convectivas na troposfera.

A esquerda ocorrência de eventos de onda de gravidade com e sem sistemas convectivos na troposfera que podem ser as fontes dos eventos. A direita ocorrência de noites de observação.

Fonte: Produção do autor.

Nota-se que para cerca da metade das ondas de gravidade observadas em SMS existiam sistemas convectivos na troposfera capazes de gerar ondas com as características de propagação observadas. Para os demais casos as fontes podem estar na estratosfera, mesosfera ou mesmo acima da mesopausa. Machado (2018) apresenta

uma discussão e resultados de simulações numéricas que mostram a possibilidade de geração de ondas de gravidade na região da baixa termosfera devido a precipitação de partículas na região da AMAS (Anomalia Magnética da América do Sul). As ondas produzidas devido precipitação de partículas são apontadas como gatilhos para geração de instabilidades Perkins em médias latitudes e MSTIDs (*Medium Scale Traveling Ionospheric Disturbances*). No mesmo trabalho Machado (2018) mostra que estas ondas de gravidade, geradas na região E, podem se propagar tanto para cima como para baixo, podendo chegar às camadas de luminescência da MLT.

A anisotropia na direção de propagação das ondas de gravidade apresentada na Figura 4.7 pode ser explicada devido a dois principais fatores: atuação das fontes convectivas e filtragem por ação dos ventos. Os dados de satélite analisados mostram que a presença de sistemas convectivos atuando ao sul da estação SMS foi predominante durante o outono e inverno. Essas zonas de convecção troposférica, em geral associados a sistemas frontais polares e atuação das correntes de jato, deslocam-se de sul para norte, favorecendo a geração de ondas de gravidade que se propagam nos sentidos NO, N e NE. Portanto, a direção de propagação preferencial no sentido NO durante outono e inverno, observada nos dados da luminescência, é consistente com a geração de ondas devido a zonas de convecção na troposfera. Da mesma forma, poderia esperar-se que houvesse maior número de ondas de gravidade propagando-se para NE e E. No entanto, nota-se que justamente nestes sentidos praticamente não há observação de ondas em SMS. A inibição da propagação de ondas de gravidade na MLT nos sentidos NE e E, apesar da abundância de possíveis fontes na troposfera, pode ser explicada devido a atuação dos ventos mesosféricos.

A média dos ventos zonal e meridional entre 80 e 100 km de altitude acima da cidade de Santa Maria, RS (a cerca de 35 km a sudoeste da estação SMS) foram calculados por Andrioli et al. (2013). Os valores dos ventos foram obtidos com dados de 2005 a 2009 do radar meteórico de Santa Maria. A Figura 4.10 mostra a média do vento zonal e meridional para os meses de abril, maio, junho e julho. Estes meses correspondem ao período de outono e inverno em que há maior ocorrência de ondas de gravidade observadas em SMS em 2011 e 2012. Nota-se que a média do vento zonal tem amplitude máxima em abril em torno de 95 km com oscilação semidiurna e fase descendente nos meses de maio, junho e julho. Entre 21:00 e 08:00 UT, horário correspondente as observações da luminescência em SMS entre 18:00 e 05:00 LT, nota-se que a amplitude da média do vento zonal entre 80 e 90 km é positiva e atinge valores superiores a 50 m/s. Isso indica que em média o vento zonal nessa faixa de altitude e horário se propaga para leste, favorecendo a filtragem de ondas

de gravidade que poderiam se propagar na mesma direção. A fase descendente do vento zonal pode indicar que a filtragem de ondas se propagando para leste tende a ocorrer em altitudes abaixo de 80 km nos meses de maio, junho e julho.

A média do vento meridional na Figura 4.10 apresenta valores positivos entre 80 e 90 km entre aproximadamente 00:00 e 08:00 UT (21:00 e 05:00 LT) no mês de abril. Nos meses de maio, junho e julho o vento meridional apresenta redução na amplitude e passa a ser negativo nessa faixa de horário e altitude, o que significa que o vento meridional tem sentido preferencial para sul e tende a favorecer a propagação de ondas de gravidade no sentido norte. Embora não haja medidas de vento mesosférico simultâneos às observações de onda de gravidade em SMS, os resultados apresentados por Andrioli et al. (2013) mostram um panorama do comportamento médio padrão dos ventos na região MLT. É possível que a quase ausência de ondas de gravidade observadas propagando-se para NE e E em SMS durante o outono e inverno, apesar da grande quantidade de possíveis fontes troposféricas existentes, esteja associada a filtragem de ondas se propagando para E e favorecimento da propagação para N e O.

Durante os meses de observação que correspondem ao verão, as ondas de gravidade observadas em SMS apresentaram sentido de propagação predominante para SE. O mesmo comportamento foi observado nos eventos observados durante o final da primavera. As imagens de satélite das condições troposféricas para o período mencionado mostram um comportamento semelhante ao da imagem da esquerda na Figura 4.8. Nesse período do ano foi observado a predominância de zonas de convecção vindas da região amazônica e Centro do continente. Esse comportamento favorece que as ondas geradas na troposfera tenham sentido de propagação preferencial para S e SE. As médias dos ventos zonal e meridional nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março são apresentados na Figura 4.11. Observa-se que a direção de propagação do vento meridional é preferencialmente para sul entre 21:00 e 24:00 UT, o que favorece a propagação de ondas para norte. No entanto, entre 00:00 e 08:00 UT a média do vento meridional inverte o comportamento e passa a ser para norte (valores positivos) com aumento de intensidade nos meses de fevereiro e março. Este cenário de vento meridional favorece a propagação de ondas no sentido sul. No entanto, a média do vento zonal tem em geral valores positivos para o horário de interesse, indicando tendência de filtragem de ondas que se propagam para leste. Este cenário de vento não é tão favorável a propagação de ondas no sentido leste, salvo os meses de dezembro e janeiro onde a intensidade da a média do vento zonal é menor chegando a valores negativos (vento para oeste) em determinadas alturas e

horários. A propagação preferencial no sentido SE observada nas ondas de gravidade em SMS indica que a atuação das fontes convectivas na troposfera durante o verão são mais relevantes para determinar o azimute de propagação dos eventos. A média do ventos zonais indicam que pode ocorrer filtragem de ondas se propagando para leste, porém a a média do vento meridional indica que há condições favoráveis para propagação na mesosfera no sentido sul de ondas de gravidade.

## 4.3 Estudo de Casos da Estação SMS

Nesta Seção são apresentadas as imagens de duas noites onde foram observadas frentes mesosféricas na região Sul do Brasil. Nos dois casos é nítida a ocorrência do efeito de complementariedade nas emissões do OI 557,7ñm e NaD 589,3 nm.

### 4.3.1 Frente Mesosférica de 25/08/2011

Na noite de 25 de agosto de 2011 foi observado a passagem de uma frente mesosférica sobre a estação SMS. A Figura 4.12 mostra as imagens originais obtidas com o fotômetro imageador onde observa-se o evento no filtro do OI 557,7 nm. Na Figura 4.13 observa-se o mesmo evento na emissão do NaD em 589,3 nm. A frente de onda surge nas imagens às 21:30, hora local, e as oscilações podem ser vistas até o final do período de observação próximo às 05:17 do dia 26 de agosto de 2011. Nota-se que a frente mesosférica é mais nítida na emissão do OI 557,7 nm do que na linha NaD. Nas imagens do OI 557,7 nm o evento aparece como uma região escura propagando-se sobre uma região clara. O oposto é observado nas imagens do NaD 589,3 nm onde a frente aparece como uma região clara propagando-se sobre uma região escura.

As regiões claras e escuras observadas nas imagens do NaD e OI 557,7 nm, cujos picos de emissão são considerados em 92 e 96 km de altura, respectivamente, podem ser explicadas pelo efeito de complementariedade proposto pelo modelo de Dewan e Picard (1998). Este modelo prevê que quando uma frente mesosférica se propaga em um duto formado entre duas camadas de emissões de luminescência, separadas por um plano de simetria, é gerado um efeito de complementariedade na emissão das camadas. A ilustração desse modelo é mostrada na Figura 4.14 usando como exemplo as camadas do $O_2$ em 94 km e do OH em 87 km de altura. Neste caso a camada mais baixa do OH é empurrada adiabaticamente para uma altura menor, encontrando uma região mais densa da atmosfera, podendo sofrer aumento na temperatura (dependendo da altura da mesopausa) e consequentemente a taxa de emissão é intensificada. O oposto ocorre com a camada mais alta, neste caso do

Figura 4.10 - Média do vento zonal e meridional em Santa Maria durante meses de outono e inverno.

Média do Vento zonal e meridional em Santa Maria (próximo a estação SMS) para os meses de outono e inverno no hemisfério sul. Média da velocidades de vento obtidas entre 2005 e 2009 com dados de radar meteórico. Eixo vertical representa altura em km e eixo horizontal hora UT.

Fonte: Andrioli et al. (2013).

Figura 4.11 - Média do vento zonal e meridional em Santa Maria durante meses de verão.

Média do vento zonal e meridional em Santa Maria (próximo a estação SMS) para os meses de parte da primavera e verão no hemisfério sul. Média da velocidades de vento obtidas entre 2005 e 2009 com dados de radar meteórico. Eixo vertical representa altura em km e eixo horizontal hora UT.

Fonte: Andrioli et al. (2013).

Figura 4.12 - Frente mesosférica observada em SMS na emissão do OI 557,7 nm – 25/08/2011.

Imagens originais do OI 557,7 nm. Observa-se a passagem de uma frente mesosférica que surge no horizonte próximo às 21:43 LT e cruza o zênite às 22:21 LT.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.13 - Frente mesosférica observada em SMS na emissão do NaD 589,3 nm – 25/08/2011.

Imagens originais do NaD 589,9 nm.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.14 - Efeito de complementariedade.

Diagrama que representa o efeito de complementariedade em duas camadas de emissão quando existe um duto formado entre as duas e a propagação de uma frente mesosférica neste duto.

Fonte: Adaptado de Medeiros et al. (2005).

$O_2$, que é empurrada em direção ao uma zona mais rarefeita da atmosfera, sofrendo decréscimo na temperatura, ocasionando a diminuição da taxa de emissão.

O efeito de complementariedade pode explicar a característica observada para o caso em questão observado em SMS na noite de 25/08/2011. A camada do OI 557,7 nm deve estar sendo empurrada para cima pela passagem da frente mesosférica, portanto diminuindo a intensidade da emissão e sendo observada como uma região mais escura. A camada do NaD 589,3 nm, por sua vez, deve estar sendo empurrada para baixo, logo a mesma sofre um aumento na intensidade de emissão e pode ser observada como uma região mais clara após a passagem da frente.

O norte geográfico está rotacionado -4,6° em relação ao topo das imagens originais. Devido a ser uma observação do céu a partir da superfície, o lado direito e esquerdo da imagem correspondem aos sentidos oeste e leste geográfico, respectivamente. O alinhamento com o norte geográfico e espelhamento horizontal foi realizado no pro-

Figura 4.15 - Imagens linearizadas da frente mesosférica de 25/08/2011.

As imagens representam um quadrado de dimensões 300x300 km$^2$ na altura da camada de emissão.

Fonte: Produção do autor.

cesso de linearização das imagens, cujo resultado é apresentado na Figura 4.15. Uma região quadrada com área de 300x300 km$^2$ é representada nas imagens linearizadas.

A frente mesosférica passa pelo zênite próximo às 22:21 LT propagando-se no sentido norte-nordeste, com azimute igual a 18,4°. O comprimento de onda horizontal encontrado é de $20,2 \pm 3,2$ km na camada do OI 557,7 nm (96 km de altura) e de $19,63 \pm 2,5$ km na camada do NaD (92 km de altura). Os parâmetros temporais de velocidade e período observados deste evento não puderam ser determinados utilizando a técnica de análise espectral. Devido ao longo intervalo de tempo entre as imagens do mesmo filtro, não há amostragem suficiente no janelamento espacial para aplicação da técnica espectral. Contudo, pode-se observar que o avanço da frente de onda nas imagens do OI 557,7 nm pode ser delimitada com razoável precisão em relação as dimensões do evento. Para este e outros casos de frentes mesosféricas analisados na estação SMS, a velocidade de propagação foi determinada pelo deslocamento da frente de onda nas imagens linearizadas. Assumindo uma incerteza de $\pm 2,7$ km na determinação da linha de frente de onda, a velocidade de deslocamento do evento encontrada utilizando as imagens do OI 557,7 foi de $58,2 \pm 3,5$ m/s ($209,5 \pm 12,6$ km/h) e o período observado igual a $5,8 \pm 1,2$ min.

A condição da troposfera na data do evento foi analisada utilizando dados de temperatura de topo de nuvem. A temperatura de topo de nuvem é obtida pelo canal de infravermelho do satélite GOES-12 e representada nas imagens de realce de temperatura disponibilizadas no banco de dados de imagens do CPTEC/INPE (2018b). A temperatura de topo de nuvem está associada à altitude que a nuvem se encontra em relação ao solo. Temperaturas mais baixas indicam que o topo da nuvem está em altitudes mais elevadas da troposfera. As variações observadas no mapa de temperatura de topo de nuvem (gradientes de temperatura) indicam mudanças na altitude da nuvem, que por sua vez estão associada a sistemas convectivos. Pode-se dizer que as imagens realçadas de temperatura de topo de nuvem são indicativos de sistemas convectivos. Regiões de convecção troposférica são atribuídas como principais fontes de geração de ondas de gravidade.

As imagens de temperatura de topo de nuvem na região da estação SMS horas antes da observação da frente mesosférica são apresentadas nas Figuras 4.16 e 4.17. Segundo o boletim técnico do CPTEC/INPE (2018a) para a data do evento, entre o estado do Rio Grande do Sul e o oceano Atlântico observa-se um chamado cavado frontal, que é contornado pelo ramo norte e ramo sul do Jato Polar (RNJP e RSJP, respectivamente), favorecendo a formação de um sistema frontal. A oeste, vindo

da região do Pacífico existe outro cavado frontal contornado pelo RNJP e pelo Jato Subtropical (JST), favorcendo igualmente a formação de um sistema frontal na região. Observa-se na imagens de satélite que o sistema convectivo a sudoeste, sobre a região da Argentina, apresenta temperaturas de topo de nuvem entre -30 e -50°C. Acima do o oceano Atlântico as temperaturas de topo de nuvem são ainda mais baixas atingindo -60°C, indicando nuvens mais altas e provavelmente um sistema convectivo mais intenso. A localização da estação SMS é marcada no mapa por um asterisco vermelho e os círculos tracejados na cor branca indicam regiões a 250, 500 e 1000 km de distância da estação.

Tomando como referência a velocidade observada de propagação horizontal da frente mesosférica, calculou-se a distância que uma estrutura com velocidade média $\approx 58,2$ m/s estaria da estação SMS em determinados instantes de tempo. Os círculos verdes nas Figuras 4.16 e 4.17 representam essas distâncias para cerca de 4, 6 e 8 horas antes da passagem da frente mesosférica pelo zênite da estação SMS. Observa-se que entre 6 a 8 horas antes da observação da frente mesosférica os dois sistemas frontais (sobre o continente e sobre o oceano) estão dentro do circulo verde. Isto sugere que, havendo condições favoráveis na atmosfera, a fonte geradora da frente mesosférica observada poderia estar associada a qualquer um desses dois sistemas frontais.

No caso da fonte estar associada ao sistema convectivo a sudoeste da estação SMS, a geração da onda poderia ter ocorrido entre 6 a 8 horas antes da observação do evento. A distância da fonte nestas circunstâncias estaria aproximadamente entre 1300 a 1700 km de distância horizontal do local de observação. Considerando a segunda possibilidade de a fonte estar na região do sistema convectivo sobre o Atlântico Sul, a geração da onda poderia ter ocorrido cerca de 5 a 6 horas antes da observação. Neste caso a fonte estaria a cerca de 1000 a 1300 km de distância horizontal da estação SMS. A formação de um duto poderia possibilitar a propagação da frente mesosférica por distâncias dessa magnitude, porém não foi possível determinar se haviam condições de formação de duto (e de qual tipo – térmico ou doppler) pois não haviam dados de vendo e temperatura da mesosfera disponíveis para o período.

A discussão apresentada nesta seção sobre as possíveis fontes da frente mesosférica observada é bastante simplificada devido a ausência de dados complementares para aprofundar tais hipóteses. Informações mais detalhadas poderiam ser inferidas, tais como velocidade intrínseca e velocidade vertical da onda, caso houvesse dados de temperatura e velocidade dos ventos mesosféricos e na estratosfera. Contudo, é pos-

Figura 4.16 - Temperatura de topo de nuvem $t_0$ - 8 e $t_0$ - 6 horas da observação de frente mesosférica em SMS – 25/08/2011.

Imagens de satélite mostram a temperatura de topo de nuvem. Imagem 8 e 6 horas antes da passagem da frente pelo zênite.

Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE (2018b).

Figura 4.17 - Temperatura de topo de nuvem $t_0$ - 4 e $t_0$ - 0 horas da observação de frente mesosférica em SMS – 25/08/2011.

Imagens de satélite da temperatura de topo de nuvem. Imagem mostra condições 4 horas antes e durante a passagem da frente pelo zênite.

Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE (2018b).

sível que um dos dois sistema convectivos presentes na região sejam a fonte geradora da frente mesosférica observada. Neste caso o evento estaria associado a sistemas frontais troposféricos que foram influenciados pela ação do Jato Subtropical e Jato Polar.

### 4.3.2 Frente Mesosférica de 24/11/2011

Um segundo evento de frente mesosférica foi observado na estação SMS na noite de 24 de novembro de 2011 nas emissões do OI 557,7 nm e NaD 589,3 nm. A Figura 4.18 apresenta as imagens originais da passagem da frente de onda pelo campo de visão do imageador. O início do evento pode ser observado a partir das 23:33 LT e o mesmo estende-se pelo restante do período de observação até próximo às 04:14 LT. Da mesma forma que o evento do dia 25/11/2011, nas imagens do OI 557,7 nm a frente mesosférica aparece como uma região escura propagando-se sobre uma região clara e na emissão do NaD a frente aparece como uma região clara propagando-se para uma região escura.

As imagens linearizadas para uma área de 300x300 km$^2$ são apresentadas na Figura 4.19. A frente mesosférica passa pelo zênite às 00:11 LT propagando-se no sentido sul com azimute igual a 180°. O comprimento de onda horizontal encontrado pelas imagens do OI 557,7 nm é de aproximadamente $21,3 \pm 2,7$ km. Assumindo uma incerteza de $\pm 2,7$ km na determinação da linha de frente de onda, a velocidade de deslocamento a frente de onda encontrada foi de $38,5 \pm 3,5$ m/s e período observado de $9,4 \pm 2$ min.

As imagens de satélite de realce da temperatura de topo de nuvem são apresentadas nas Figuras 4.20 e 4.21 seguindo a mesma metodologia discutida na Seção 4.3.1. Nota-se a presença de pequenos sistemas convectivos a noroeste da estação SMS com topo de nuvem entre -30 a -40°C e um sistema convectivo com topo de nuvem com temperaturas abaixo de -50°C se desenvolvendo a sudoste de SMS. Estes estão sobre influência do Jato Subtropical (JST) que atua no sul do continente vindo do oceano Pacífico chegando até o Atlântico (CPTEC/INPE, 2018a). Assumindo que o sistema convectivo a noroeste da estação SMS seja a possível fonte da frente mesosférica, se a velocidade horizontal da onda for da mesma ordem de grandeza da velocidade observada nas imagens de $38,5 \pm 3,5$ m/s, a onda que gerou a frente mesosférica pode ter sido gerada entre 4 a 6,2 horas. A possível fonte estaria localizada entre cerca de 500 e 900 km. Novamente trata-se de uma análise simplista visto que não há informação sobre velocidade vertical, velocidade dos ventos e temperatura na estratosfera e mesosfera. Não houve observação de ondas de gravidade com sentido

de propagação norte ou nordeste que pudessem ser associados ao sistema convectivo em desenvolvimento com temperaturas de topo de nuvem abaixo de -50°C a sudoeste de SMS.

## 4.4 Discussões dos Resultados de SMS

O estudo de ondas de gravidade na MLT apresentado é o primeiro a ser realizado no extremo sul do Brasil com dados de São Martinho da Serra, RS. Devido a limitação de resolução temporal dos dados, foi possível analisar somente parte do espectro de ondas de gravidade para eventos de longo período e baixas velocidades de fase. Com auxílio de dados de satélite foi possível inferir que cerca de 50% das ondas observadas poderiam ter origem na troposfera devido a presença de zonas de convecção. Contudo, não há como determinar se os eventos estão realmente sendo gerados na troposfera. Para a outra parte dos eventos não há indícios de que a fonte pode ser de origem troposférica. Para estes casos outros mecanismos devem estar associados a geração das ondas de gravidade na estratosfera, mesosfera ou mesmo acima da mesopausa.

A característica mais marcante observada foi a anisotropia na direção de propagação bem pronunciada no eixo NO-SE. Os eventos analisados durante o outono e inverno apresentaram propagação preferencial para NO enquanto que as ondas analisadas no período da primavera e verão apresentaram propagação preferencial para SE. A praticamente ausência de ondas observadas na direção NE, apesar da presença de sistemas frontais que poderiam gerar ondas em tal direção, pode estar associada a filtragem de ventos na região da mesosfera.

Dois casos de frentes mesosféricas observadas em SMS simultaneamente nas camadas do NaD 589,3 nm e do OI 557,7 nm foram apresentados. Nos dois eventos observa-se o efeito de complementariedade na emissão das duas camadas. No caso da frente mesosférica observada na noite de 25/08/2011 existe a possibilidade da fonte ser uma das duas zonas convectivas de grande escala presentes em locais diferentes. Estas duas possíveis fontes estariam associadas a sistema frontais na troposfera.

Figura 4.18 - Frente mesosférica 24/11/2011 SMS imagem original.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.19 - Frente mesosférica 24/11/2011 SMS imagem linearizada 300x300 km$^2$.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.20 - Temperatura de topo de nuvem $t_0$ - 6 e $t_0$ - 4 horas da observação de frente mesosférica em SMS – 24/11/2011.

Imagens de satélite da temperatura de topo de nuvem. Imagem mostra condições 6 e 4 horas antes da passagem da frente pelo zênite.

Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE (2018b).

Figura 4.21 - Temperatura de topo de nuvem $t_0$ - 2,5 e $t_0$ - 0 horas da observação de frente mesosférica em SMS – 24/11/2011.

Imagens de satélite da temperatura de topo de nuvem. Imagem mostra condições 2,5 horas antes e durante a passagem da frente pelo zênite.

Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE (2018b).

# 5 OBSERVAÇÕES NA REGIÃO AMAZÔNICA

Neste Capítulo são apresentados os resultados obtidos com os dados da região Amazônica no Norte do Brasil. Os parâmetros de onda observados foram obtidos aplicando a técnica de análise espectral usando a transformada de Fourier discreta. Uma discussão sobre as possíveis fontes de geração é abordada e o estudo de alguns casos específicos são apresentados.

## 5.1 Parâmetros das Ondas Observados em MAN

O imageador utilizado em São Martinho da Serra, RS entre 2011 e 2012 foi posteriormente instalado no Norte do Brasil na região da floresta Amazônica. O equipamento entrou em operação em julho de 2015 sendo instalado na reserva biológica de Cuieiras do Instituto Nacional de Pesquisas Amazônicas (INPA/MCTIC). O imageador e computador de controle foram alocados em um contêiner localizado na base de apoio ZF2 nas coordenadas 2,589°S de latitude e 60,221°O de longitude. O local fica a aproximadamente 60 km a noroeste da cidade de Manaus, AM. Devido a proximidade e a forma de acesso ser através da cidade de Manaus, a estação foi denominada MAN na base de dados. Os dados analisados neste trabalho incluem as observações desde julho de 2015 até agosto de 2017. O imageador continuou operando e coletando dados após agosto de 2017, porém estes dados não foram incluídos neste trabalho de tese. A Figura 5.1 mostra o calendário de dados da estação MAN utilizados neste trabalho. No total foram analisadas 322 noites de observações da luminescência atmosférica nas emissões do NaD 589,3 nm e do OI 557,7 nm. No ano de 2015 foram realizadas observações durante 65 noites, em 2016 foram 116 noites e em 2017 142 noites.

As noites de observação foram classificadas em noites com céu encoberto (nublado ou com chuva), céu limpo sem ondas, céu limpo com ondas de gravidade[1] e noites com frentes mesosféricas. Uma característica comumente observada na região Amazônica é a presença de nebulosidade a noite em todas as estações do ano, o que pode ser constado dos dados de MAN devido ao alto número de noites com céu encoberto. Entre as 116 noites de observações úteis (com visibilidade das estrelas), apenas durante 11 noites não foram observadas ondas de gravidade na luminescência atmosférica. Como o intervalo de tempo entre imagens nos dados de MAN é menor do que o utilizado em SMS foi possível analisar um espectro mais amplo de ondas

[1]Em muitas noites o céu permanece limpo apenas parte da noite devido a alta nebulosidade do clima da região Amazônica. Algumas ondas de gravidade são observadas durante alguns minutos de abertura das nuvens.

Figura 5.1 - Calendário de dados analisados de MAN.

As noites com dados são classificadas em céu encoberto, céu limpo sem ondas de gravidade e céu limpo com ondas de gravidade.

Fonte: Produção do autor.

de gravidade, não adotando a divisão em ondas tipo I e II abordadas na Seção 4.1.

A ocorrência de ondas de gravidade no NaD 589,3 e OI 557,7 nm em função do número de noites úteis de observação em MAN é apresentada nas Figuras 5.2 (a) e (b). As noites úteis de observação compreendem aquelas em que o céu está limpo durante ao menos algumas horas do período de observação. As maiores ocorrências de ondas de gravidade observadas no NaD 589,3 nm são nos meses de agosto, setembro e principalmente em novembro, onde o número de eventos é cerca de duas vezes maior que o número de noites de observação úteis. Para o OI 557,7 nm os maiores índices de observação ocorrem nos meses de julho, agosto e setembro. Ressalta-se que o mês de agosto é o único na série de dados que tem noites úteis de observações nos três anos analisados (2015, 2016, 2017), causando uma distorção no número total de eventos para este mês especificamente. No entanto, percebe-se que a proporção de número de eventos em relação ao número de noites de observação úteis no mês de agosto ainda é maior do que na maioria dos demais meses do ano. A Figura 5.2 (c) apresenta a ocorrência de ondas observadas nas duas emissões, as quais totalizam 254 eventos analisados. Nota-se que a maior parte dos eventos é observada durante o inverno nos meses de julho, agosto e setembro, havendo um pico na primavera no mês de novembro. Durante o verão, nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, o baixo número de observações em parte pode ser atribuída a grande quantidade de dias com céu encoberto durante toda a noite, impedindo a observação da luminescência atmosférica.

A distribuição dos valores de comprimento de onda horizontal, período observado, velocidade de fase observada e direção de propagação das ondas de gravidade em MAN são apresentados na Figura 5.3. Os comprimentos de onda horizontal variam entre 10 e 85 km, sendo que $\approx 85\%$ dos eventos apresentam valores entre 15 e 40 km. O período observado (período aparente) varia de 5 a 40 min com $\approx 64\%$ dos eventos tendo períodos entre 10 e 20 min. As ondas observadas apresentaram velocidades de fase que variam desde 5 a 70 m/s e um evento com velocidade $\approx$ 107 m/s. Cerca de 70% das velocidades de fase estão entre 20 e 45 m/s. Nota-se que o número de ondas de gravidade cai abruptamente para os eventos com velocidades acima de de 45 m/s. De forma mais branda, porém similar, há uma diminuição do número de eventos com comprimentos de onda horizontal maiores do que 40 km. Estas variações bruscas na distribuição dos parâmetros das ondas observadas podem estar relacionadas entre si, porém não foram investigadas possíveis razões para este comportamento em específico. Quanto ao azimute de propagação dos eventos, observa-se

Figura 5.2 - Ocorrência de ondas de gravidade entre julho de 2015 e agosto de 2017 na estação MAN.

(a) e (b) mostram a ocorrência de ondas de gravidade observadas nos filtros do NaD e OI 557,7 e o número de noites úteis de observação. (c) representa o número total de eventos observados em cada mês. A curva em azul representa a razão entre número de eventos e número de noites de observação úteis.

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.3 - Parâmetros de onda observados em MAN.

Parâmetros das ondas de gravidade observadas em MAN. O período e velocidade de fase são parâmetros aparentes (não intrínsecos). O gráfico do azimute é em escala relativa de ocorrência.

Fonte: Produção do autor.

que há uma distribuição com tendência preferencial em torno do eixo N-S[2]. Existe um percentual de pelo menos 12% dos eventos propagando-se para leste e o sentido com menor propagação é para oeste.

As ondas de gravidade observadas em MAN foram divididas entre as estações do ano e os parâmetros para cada época podem ser observados da Figura 5.4 a 5.7. Os parâmetros observados nas estações do ano foram plotados sobrepostos aos parâmetros para o período inteiro (barras na cor vermelho claro). Os eventos em cada estação do ano específica são identificados nas cores laranja (outono), azul (inverno), amarelo (primavera) e vermelho (verão).

A distribuição do comprimento de onda horizontal dos eventos observaras em MAN nas estações do ano pode ser observada na Figura 5.4. Nota-se que a queda abrupta

[2]O azimute de propagação das ondas de gravidade (0° a 360°) é dividido em 16 arcos de 22,5°

Figura 5.4 - Comprimento de onda horizontal em MAN nas estações do ano.

Comprimentos de onda observados em MAN em relação a sazonalidade. As barras na cor vermelho claro representam a contagem total de eventos, em laranja outono, azul o inverno, amarelo a primavera e vermelho no verão.

Fonte: Produção do autor.

no número de eventos com comprimento de onda maior do que 40 km, mencionada anteriormente, ocorre no período do inverno. No verão, apesar do baixo número de eventos, nenhum destes apresentou comprimento de onda maior do que 40 km. O pico de eventos com comprimento de onda entre 25 e 30 km destaca-se do período da primavera. O período aparente das ondas de gravidade em cada estação do ano é apresentado na Figura 5.5. Observa-se que o máximo de ocorrência de períodos observados entre 10 e 15 min. coincide em três das estações do ano, outono, inverno e primavera.

As velocidades de fase observadas distribuídas pelas estações do ano são apresentadas na Figura 5.6. No outono e verão a distribuição das velocidades de fase é mais plana que nas demais estações. Durante o inverno e primavera observa-se um aumento da ocorrência de eventos com velocidade de fase até a faixa de 45 m/s. Nota-se uma queda significativa no número de ondas de gravidade com velocidades de fase maiores que 45 m/s tanto no inverno quanto na primavera.

Figura 5.5 - Período aparente em MAN nas estações do ano.

Período aparente em MAN em relação a sazonalidade. As barras na cor vermelho claro representam a contagem total de eventos, em laranja outono, azul o inverno, amarelo a primavera e vermelho no verão.

Fonte: Produção do autor.

O azimute de propagação das ondas de gravidade para cada estação do ano pode ser observado na Figura 5.7. Observa-se que durante o outono há uma tendência de propagação para N e N-NO. O período de inverno apresenta uma distribuição quase isotrópica do azimute de propagação. Neste período, apenas os azimutes em torno do sentido oeste apresentam uma redução na ocorrência. Na primavera o sentido de propagação das ondas analisadas concentra-se entre o sentido N-NE e sul, havendo um pico na ocorrência de eventos no sentido sudeste. Durante o verão, a distribuição dos eventos não mostrando concentração em torno de uma direção preferencial, porém a maior parte dos eventos ocorre no sentido S-SO.

Os parâmetros observados em MAN para a porção do espectro de ondas de gravidade, correspondente às ondas analisada em SMS (período maior que 24 minutos), são apresentados na Figura 5.8. Comparando esta porção do espectro de ondas com os resultados observados em SMS pode-se notar que o comprimento de onda horizontal em ambas as estações concentram-se entre 15 e 50 km, apresentando escalas espaciais semelhantes para a maioria dos eventos. Embora a maior parte dos eventos

Figura 5.6 - Velocidade de fase das ondas de gravidade observadas em MAN nas estações do ano.

Velocidade de fase observada em MAN em relação a sazonalidade. As barras na cor vermelho claro representam a contagem total de eventos, em laranja outono, azul o inverno, amarelo a primavera e vermelho no verão.

Fonte: Produção do autor.

em MAN apresente velocidades entre 5 e 25 m/s, mesmo range de velocidades de fase encontrado nas observações de SMS, em MAN puderam ser observadas ondas com velocidades superiores até aproximadamente 55 m/s. Nota-se que em MAN não foram observados eventos com período maior do que 40 min. enquanto que em SMS houveram observações de ondas de mais de 120 min de período aparente. Quanto ao azimute de propagação em MAN os eventos com períodos maiores que 24 min. estão mais concentrados em torno da direção N-S do que para o espectro inteiro desta estação, enquanto que em SMS observou-se uma anisotropia no eixo NO-SE.

## 5.2 Análise das Possíveis Fontes

Uma análise qualitativa das características troposféricas na região da estação MAN foi realizada afim de indicar possíveis fontes de ondas de gravidade na localidade. O clima da região é denominado como tropical úmido e tem como característica o alto nível de pluviosidade ao longo de todo o ano. Esta característica climatológica dificulta a observação das emissões da luminescência atmosférica devido ao campo

Figura 5.7 - Azimute de propagação observado em MAN nas estações do ano.

Azimute de propagação observado em MAN em relação a sazonalidade.

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.8 - Parâmetros de onda observados em MAN para eventos com período superior a 24 minutos.

Parâmetros de onda observadas em MAN para eventos com período superior a 24 minutos para fins de comparação com os resultados observados na estação SMS. O período e velocidade de fase são parâmetros aparentes (não intrínsecos).

Fonte: Produção do autor.

de visão do imageador estar encoberto por nuvens em boa parte das horas de observação. Poucas são as noites em que se tem visão do céu limpo durante toda a noite. Os meses de julho, agosto e setembro em geral são os que apresentam menor média de chuva, o que condiz com o maior número de observações nestes meses.

A análise das condições troposféricas foi baseada nas imagens de satélite para a região da estação MAN e datas de observação de ondas de gravidade na MLT. As imagens utilizadas são do realce da temperatura de topo de nuvem captadas pelo canal de infravermelho do satélite GOES-13 e disponibilizados por CPTEC/INPE (2018b). De forma semelhante a análise conduzida para os dados de SMS, pretendia-se avaliar a correlação entre a observação de ondas de gravidade em MAN e a presença de zonas de convecção na troposfera. Através das imagens de satélite é possível identificar em praticamente todo os eventos de ondas de gravidade em MAN a presença de sistemas convectivos nas proximidades da estação. A condição típica

é observar a presença de múltiplas células convectivas dentro de uma distância de até 1000 km da estação MAN.

Exemplos de condições usuais da troposfera para a grande maioria dos casos são apresentados nas Figura 5.9, que mostram imagens de satélite da região em torno da estação MAN. Os círculos representam raios de 500 e 1000 km de distância em relação a estação MAN (localizada no centro dos círculos). As linhas indicam o sentido de propagação de uma onda de gravidade observada na MLT para a data. A presença de sistemas convectivos atuantes na troposfera não é determinante para afirmar que estes sejam as fonte das ondas de gravidade observadas na MLT. Contudo, devido a intensa atividade convectiva troposférica observada durante todas as estações do ano na região Amazônica, supõem-se que as fontes de ondas de gravidade dessa origem sejam significativamente relevantes para grande parte dos eventos observados.

Diferente das condições observadas na região da estação SMS, onde as zonas convectivas e sistema frontais normalmente apresentam dimensões horizontais bem maiores (chegando até alguns milhares de quilômetros de extensão), observa-se que na região Amazônica a atividade troposférica, embora seja mais frequente e regular, os sistemas convectivos são divididos em múltiplas células com dimensões menores. Outro fato interessante é que em grande parte das noites com pelo menos algumas horas de céu limpo normalmente são observadas várias ondas de gravidade em pelo menos duas direções preferenciais de propagação. As direções de propagação para noites com observação de várias ondas são em geral condizentes com a localização de múltiplos sistemas convectivos troposféricos, como apresentado e discutido em alguns dos casos abordados na Seção 5.3.

As características da direção de propagação, apresentadas na Figura 5.7, não puderam ser explicadas apenas com a análise das imagens de satélite. Outras dados complementares, como dos ventos na alta atmosfera, seriam necessários para verificar se ocorre, por exemplo, a filtragem de ondas em alguma direção, proporcionando uma direção preferencial de propagação como observado durante o outono. Nos meses de inverno, período com maior número de noites de observação (devido a menor pluviosidade) e ocorrência de 50% dos casos de ondas de gravidade observadas em MAN, nota-se uma característica quase isotrópica na propagação, sem uma direção preferencial claramente definida. Essa característica indica a existem múltiplas fontes presentes na região Amazônica em praticamente todo o entorno da estação MAN.

Figura 5.9 - Temperatura de topo de nuvem na região da estação MAN.

Imagens de satélite indicando a temperatura de topo de nuvem. Os círculos brancos marcam distâncias radiais de 500 e 1000 km da estação MAN.

Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE (2018b).

## 5.3 Estudo de Casos da Estação MAN

Nesta Seção são apresentadas as imagens de quatro noites onde foram observadas a propagação de frentes mesosféricas na região Amazônica. Em dois casos específicos observou-se o fenômeno de frente mesosférica dupla, com a propagação de duas frentes consecutivas.

### 5.3.1 Intensa Atividade de Ondas e Frente Mesosférica na Noite de 15/08/2015

O caso abordado nesta seção representa uma noite com intensa atividade de ondas de gravidade observadas na estação MAN em 15 de agosto de 2015, conforme pode ser observado nas imagens da Figura 5.10. Após às 20:00 LT foram observadas diversas ondas em horários diferentes ao longo da noite com direções de propagação preferenciais NE e SO. Uma frente mesosférica foi observada surgindo no campo de visão do imageador próximo às 20:30 e suas oscilações são visíveis até o final da noite pouco depois das 05:00 LT do dia 16. Ao longo da noite são observadas ondas que se propagam em direções transversais a frente mesosférica produzindo padrões de interferência entre ondas.

As imagens originais da passagem do trem de ondas associado a frente mesosférica são visualizadas na Figura 5.10. A propagação da frente é no sentido NE e podem ser observadas ondas perpendiculares a mesma que propagam no sentido SO. No total foi possível determinar os parâmetros de seis ondas no campo de visão do imageador. Os parâmetros observados são apresentados na Tabela 5.1, onde $\lambda_h$ é o comprimento de onda horizontal, $\tau_{obs}$ o período observado e $c_{obs}$ a velocidade de fase observada. Os eventos que tem aproximadamente a mesma direção de propagação apresentam parâmetros de onda semelhantes, embora ocorram em horário diferentes.

Supõem-se que devido a semelhança dos eventos, a fonte de geração possa estar localizada na mesma região da atmosfera, ou até mesmo que a fonte seja a mesma para mais de um evento. Na Figura 5.11 são apresentadas as imagens de satélite com a temperatura de topo de nuvem no entorno da estação MAN. As linhas representam a direção e sentindo de propagação das ondas de gravidade observadas durante a noite. As imagens de satélite indicam a presença de múltiplas zonas de convecção na troposfera localizadas a norte, noroeste e oeste da estação MAN. A posição das zonas de convecção são condizentes com as direções de propagação das onda observadas, bem como com o tempo entre a aproximação das zonas de convecção e as velocidades de fase dos eventos.

Figura 5.10 - Sobreposição de ondas durante evento de frente mesosférica em MAN - 15/08/2015.

Imagens não linearizadas da emissão do NaD 589,3 nm mostrando a passagem de um trem de ondas de uma frente mesosférica e a sobreposição de onda perpendicular. Observações foram feitas em MAN na noite de 15/08/2015.

Fonte: Produção do autor.

Tabela 5.1 - Parâmetros de onda observados na noite de 15/08/2015.

| $\lambda_h$ (km) | $\tau_{obs}$ (min.) | $c_{obs}$ (m/s) | Azimute (graus) |
|---|---|---|---|
| $19,0 \pm 0,4$ | $14,6 \pm 0,3$ | $21,3 \pm 0,1$ | $144 \pm 9$ |
| $18,8 \pm 0,4$ | $10,5 \pm 0,2$ | $29,6 \pm 0,1$ | $143 \pm 9$ |
| $22,6 \pm 0,3$ | $8,6 \pm 0,1$ | $43,4 \pm 0,1$ | $135 \pm 11$ |
| $19,9 \pm 3,3$ | $8,9 \pm 0,4$ | $37,3 \pm 5,0$ | $38 \pm 1$ |
| $18,8 \pm 3,1$ | $7,4 \pm 0,1$ | $42,1 \pm 6,8$ | $36 \pm 2$ |
| $11,8 \pm 0,6$ | $18,0 \pm 2,6$ | $10,9 \pm 1,0$ | $166 \pm 5$ |

A noite de 15/08/2015 é um caso interessante devido a ocorrência de uma frente mesosférica em conjunto com outras ondas de gravidade. As ondas de gravidade são observadas antes e durante a passagem da frente mesosférica e aparentam ser de origem independente devido às direções de propagação e parâmetros de onda. Entre as noites com boas condições de observação na estação MAN, são frequentes as ocasiões em que se observam várias ondas de gravidade na mesma noite com parâmetros e direções de propagação distintas. As condições troposféricas no entorno da estação (presença de múltiplos sistemas convectivos) são semelhantes às observadas durante todo o período de dados analisados. Embora sem dados de vento e temperatura na estratosfera e mesosfera não seja possível afirmar a origem das ondas analisadas, as características acima citadas reforçam a hipótese de que as principais fontes de ondas de gravidade na região Amazônica sejam de origem troposférica.

### 5.3.2 Frente Mesosférica Dupla na Noite de 17/08/2015

Na noite de 17 de agosto de 2015, apenas dois dias após o caso abordado na Seção 5.3.1, ocorreu um evento em que se observou uma frente mesosférica dupla. Este evento é caracterizado pela passagem de duas frentes bem definidas propagando-se sobre o campo de visão do imageador. Ambas frentes propagam-se na mesma direção (SE) com parâmetros semelhantes e são seguidas por trem de ondas. Na Figura 5.12, nas imagens do OI 557,7 nm, pode-se observar que a primeira frente surge no campo de visão do imageador pouco depois das 02:30 LT (madrugada do dia 18), passando pelo zênite aproximadamente uma hora depois às 03:28 LT. A segunda frente surge logo após este horário e passa pelo zênite da imagem às 04:17 LT. A propagação das duas frentes pode ser visualizada nas imagens linearizadas na Figura 5.13.

Os parâmetros de onda encontrados para este evento são apresentados na Tabela 5.2. A primeira frente é acompanhada por oscilações com comprimento de onda horizontal de aproximadamente 27 km e velocidade de fase de $\approx 48,9$ m/s. O comprimento

Figura 5.11 - Temperatura de topo de nuvem em MAN na noite de 15/08/2015.

Imagens do satélite GOES-13 mostrando a temperatura de topo de nuvem. A esquerda a imagem da condições troposféricas cerca de três horas antes da observação das primeiras ondas. A direita a imagem a meia-noite local, horário em que observa-se a passagem do trem de ondas e ondas perpendiculares ao mesmo.

Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE (2018b).

Tabela 5.2 - Parâmetros de onda observados na noite de 17/08/2015.

| $\lambda_h$ (km) | $\tau_{obs}$ (min.) | $c_{obs}$ (m/s) | Azimute (graus) |
|---|---|---|---|
| $27,7 \pm 0,7$ | $9,4 \pm 0,3$ | $48,9 \pm 0,4$ | $139 \pm 13,5$ |
| $35,5 \pm 2,1$ | $12,1 \pm 0,6$ | $48,8 \pm 0,4$ | $123 \pm 16,8$ |

de onda encontrado para as oscilações da segunda frente é um pouco superior, em torno de 35 km e velocidade de fase é praticamente idêntica.

A observação de eventos de múltiplas frentes mesosféricas com parâmetros semelhantes foi relatada primeiramente por Medeiros et al. (2016) e tal fenômeno recebeu o nome de *twin mesospheric bores* (frentes mesosféricas gêmeas). O evento mencionado foi observado na região Nordeste do Brasil em duas estações diferentes: São João do Cariri(36,5°O; 7,4°S) e Monteiro (37,1°O; 7,9°S), distantes uma da outra aproximadamente 85 km. Outra interessante peculiaridade observada por Medeiros et al. (2016) foi que a primeira frente aparece como uma região escura nas imagens

Figura 5.12 - Imagens originais das frentes mesosféricas em MAN - 17/08/2015.

Imagens não linearizadas da emissão do OI 557,7 nm.

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.13 - Imagens linearizadas das frentes mesosféricas em MAN - 17/08/2015.

Imagens linearizadas da emissão do OI 557,7 nm.

Fonte: Produção do autor.

da luminescência e a segunda frente surge como uma região clara, característica atribuída ao efeito de complementariedade descrito por Dewan e Picard (1998). Um fenômeno semelhante encontrado na literatura foi descrito posteriormente por Smith et al. (2017) e foi observado na Europa (45.9°N, 11.5°E) na cidade de Asiago, Itália. Este segundo caso apresenta o efeito de complementariedade na intensidade da emissão, porém a primeira frente é clara e a segunda escura.

Nota-se que no evento observado em MAN as duas frente mesosféricas são caracterizadas pela propagação de uma região clara para um região mais escura. Esse efeito pode ser explicado pelo modelo de (DEWAN; PICARD, 1998) em que supõem-se que a posição do duto está localizado acima da camada do OI 557,7 nm (em torno de 96 km). Nesse caso supõem-se que a passagem das duas frente mesosférica pelo duto empurra a camada de luminescência para baixo, em direção a uma região mais densa e quente da atmosfera, proporcionando o aumento na intensidade da emissão. Nesse aspecto a frente mesosférica dupla observada em MAN diferencia-se dos eventos descritos por Medeiros et al. (2016) e Smith et al. (2017).

Próximos a região da estação MAN podem ser observadas pelo menos quatro sistemas convectivos a norte, noroeste e oeste da estação a cerca de 500 km de distância. Estas zonas de convecção troposférica são observadas nas imagens de satélite na Figura 5.14. Pela posição dos sistemas convectivos e direção de propagação das frentes mesosféricas é possível que a fonte de geração do evento observado na MLT tenha origem em algum desses sistemas convectivos na troposfera.

### 5.3.3 Frente Mesosférica e Ondas na Noite de 09/08/2016

Duas ondas de gravidade com direção nordeste e leste são observadas em MAN na noite de 9 de agosto de 2016 em torno da meia-noite local, conforme pode ser visto na Figura 5.15. Por volta dàs 02:15 da madrugada do dia 10 surge no campo de visão do imageador uma frente mesosférica se propagando para sul. A passagem da frente pelo zênite da imagem ocorre próximo às 02:49 LT. O trem de ondas que seguem a frente mesosférica apresentaram a maior velocidade de fase observada nos dados analisados de MAN com valor de cerca de 107 m/s. Os parâmetros de onda dos eventos observados nesta noites são relacionados na Tabela 5.3.

Na noite de 09/08/2017 as observações e coleta de dados tiveram início às 23:57 LT. A primeira imagem obtida na emissão do OI 557,7 nm foi às 00:04 LT e a onda propagando-se para SE já estava atuante nesta camada de emissão. Essa onda com direção SE e azimute 113° continua sendo observada ao longo da noite até o

Figura 5.14 - Temperatura de topo de nuvem em MAN na noite de 17/08/2015.

Imagens do satélite GOES-13 mostrando a temperatura de topo de nuvem. A esquerda a imagem da condições troposféricas cerca de duas horas antes da observação da primeira frente. A direita a imagem próximo ao horário que a primeira frente passa pelo zênite.

Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE (2018b).

encerramento das observações, da mesma forma que o trem de ondas que surge às 02:30 LT e propaga-se para o sul com azimute 180°. Pelas características de duração e dimensões horizontais, é possível que a onda observada propagando-se para SE seja um trem de ondas associado a passagem de outra frente mesosférica propagando-se na mesma direção que poderia ter passado pelo campo de visão antes do início das observações nesta noite. Este caso poderia tratar-se de uma observação de duas frente mesosféricas independentes, uma propagando-se para S e outra para SE, e que cruzaram suas trajetórias sobre a estação MAN.

As imagens de satélite das condições troposféricas podem ser observada na Figura 5.16. Nota-se a presença de sistemas convectivos a norte, noroeste, oeste e sudoeste da estação MAN. A localização das zonas de convecção é condizente com a direção de propagação da frente mesosférica e das ondas observadas. É possível considerar a hipótese de que a fonte esteja associado a estes sistemas convectivos.

Figura 5.15 - Frente mesosférica em MAN na noite de 09/08/2016.

Imagens originais do OI 557,7 nm da passagem de uma frente mesosférica propagando-se para sul sobre a estação MAN.

Fonte: Produção do autor.

Tabela 5.3 - Parâmetros de onda observados na noite de 09/08/2016.

| $\lambda_h$ (km) | $\tau_{obs}$ (min.) | $c_{obs}$ (m/s) | Azimute (graus) |
|---|---|---|---|
| $33,6 \pm 3,2$ | $13,2 \pm 0,6$ | $42,3 \pm 2,2$ | $113 \pm 15$ |
| $31,7 \pm 9,4$ | $14,8 \pm 0,7$ | $35,7 \pm 8,9$ | $60 \pm 4,7$ |
| $51,2 \pm 7,9$ | $7,9 \pm 0,2$ | $107,5 \pm 13,8$ | $180 \pm 9,3$ |

Figura 5.16 - Temperatura de topo de nuvem na noite de 09/08/2016.

Imagens obtidas pelo satélite GOES-13 com realce da temperatura de topo de nuvem. A esquerda imagem três horas antes da observação das primeiras ondas. A direita imagem três horas antes da observação da frente mesosférica.

Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE (2018b).

### 5.3.4 Frente Mesosférica Dupla na Noite de 27/07/2017

Um segundo evento de frente mesosférica dupla foi identificado na estação MAN na noite de 27 de julho de 2017. A primeira frente surge no campo de visão próximo às 01:21 LT da madrugada do dia 28 propagando-se para sudeste. A frente cruza o zênite da imagem às 02:24 LT, como pode ser visto na Figura 5.17. A primeira frente mesosférica aparece mais tênue nas imagens originais, sendo mais claro de identifica-la nas imagens linearizadas apresentadas na Figura 5.19. Esta frente desloca-se com uma velocidade aproximada de 53 m/s na direção sudeste com azimute de 135° e comprimento de onda horizontal aproximado de 30,1 km.

A segunda frente pode ser vista nitidamente nas imagens não linearizadas, apresentada na Figura 5.18. A mesma surge no campo de visão em torno das 03:00 LT e passa pelo zênite por volta das 04:05 LT. A velocidade de fase encontrada para a segunda frente foi de aproximadamente 67 m/s propagando-se na mesma direção com azimute igual a 113° e comprimento de onda horizontal de aproximadamente

Figura 5.17 - Imagem original primeira frente mesosférica na noite de 27/07/2017.

Imagem não linearizada da emissão do OI 557,7 nm.
Fonte: Produção do autor.

33,6 km.

Observa-se que as duas frentes mesosféricas podem ser caracterizadas como regiões claras propagando-se em direção a regiões mais escuras na camada de emissão do OI 557,7 nm. Esta característica é a mesma apresentada no evento da noite de 17/08/2015 abordado na Seção 5.3.2. As imagens do BG (*background*) mostram que o céu esteve limpo durante toda a noite de observação. Nas imagens do NaD 589,3 nm é possível observar o momento da passagem das frentes, porém o aumento na intensidade da emissão é muito tênue, sendo difícil identificar com clareza as bordas das frentes mesosféricas.

Pouco antes da passagem da primeira frente mesosférica, foram observadas duas ondas de gravidade na emissão do OI 557,7 nm propagando-se nas direções leste e sul. A Figura 5.21 da esquerda mostra uma imagem linearizada em que é possível observar a sobreposição das duas ondas. A figura da direita mostra o espectro de potência cruzado onde é possível identificar dois picos de maior intensidade referentes

Figura 5.18 - Imagem original segunda frente mesosférica na noite de 27/07/2017.

Imagem não linearizada da emissão do OI 557,7 nm.
Fonte: Produção do autor.

as duas ondas observadas. Os parâmetros das ondas de gravidade observadas nesta noite são apresentados na Tabela 5.4.

De forma semelhante aos demais casos relatados na estação MAN, as condições troposféricas na noite do evento analisadas através de dados de satélite indicam a presença de várias células convectivas na região. Zonas de convecção podem ser observadas a norte e noroeste da estação MAN nas imagens de satélite da Figura 5.22. Novamente a direção de propagação dos eventos e a posição das zonas de convecção são condizentes com a possibilidade de geração de ondas na troposfera.

## 5.4 Discussões dos Resultados de MAN

As observações de ondas de gravidade na estação MAN mostram que a região Amazônica tem intensa atividade de ondas na MLT com observação frequente de múltiplos eventos numa mesma noite, desde que haja condições favoráveis de observação por várias horas (céu limpo). Apenas para as ondas analisadas no período que corres-

Figura 5.19 - Imagem linearizada da primeira frente mesosférica da noite de 27/07/2017.

Imagem linearizada da emissão do OI 557,7 nm. Área equivalente de 256x256 km$^2$.
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.20 - Imagem linearizada da segunda frente mesosférica da noite de 27/07/2017.

Imagem linearizada da emissão do OI 557,7 nm. Área equivalente de 256x256 km$^2$.
Fonte: Produção do autor.

Tabela 5.4 - Parâmetros de onda observados na noite de 27/07/2017.

| $\lambda_h$ (km) | $\tau_{obs}$ (min.) | $c_{obs}$ (m/s) | Azimute (graus) |
|---|---|---|---|
| $28,4 \pm 4,8$ | $19,6 \pm 0,7$ | $24 \pm 3,2$ | $90 \pm 10$ |
| $16,7 \pm 2,0$ | $8,4 \pm 0,5$ | $33 \pm 2,0$ | $191 \pm 4,7$ |
| $30,1 \pm 0,7$ | $9,3 \pm 0,5$ | $53,8 \pm 1,7$ | $135 \pm 14$ |
| $33,6 \pm 3,2$ | $8,3 \pm 0,5$ | $67,3 \pm 2,3$ | $113 \pm 15$ |

Figura 5.21 - Imagem linearizada de interação entre ondas de ondas de gravidade observadas em MAN na noite de 27/07/2017.

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.22 - Temperatura de topo de nuvem na noite de 27/07/2017.

Imagens obtidas pelo satélite GOES-13 com realce da temperatura de topo de nuvem. A esquerda imagem três horas antes da observação das primeiras ondas. A direita imagem próximo ao horário de observação das frentes mesosféricas.

Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE (2018b).

ponde ao outono houve uma direção preferencial bem definida de propagação para norte. Nas demais estações os eventos não apresentam uma direção de propagação preferencial bem definida. No período do inverno, que corresponde a cerca de 50% das ondas analisadas, a direção de propagação é quase isotrópica. Acredita-se que estas características estejam associadas a distribuição das fontes na região.

As imagens de satélite mostram que a região Amazônica apresenta atividade convectiva intensa na troposfera. Praticamente em todos os eventos de ondas de gravidade observadas na MLT haviam indícios de zonas de convecção agindo na troposfera próximos a estação MAN. A característica dessas zonas de convecção é de serem divididas em múltiplas células espalhadas pela região. A análise dos dados de luminescência e imagens de satélite mostram que há uma grande correlação entre a posição dessas zonas de convecção e a direção de propagação das ondas observadas. Portanto, é possível que as fontes troposféricas sejam as que mais contribuem para a geração de ondas de gravidade que se propagam até a MLT.

Entre os eventos analisados na estação MAN alguns casos foram de frentes mesosféricas. Entre estes, dois casos específicos foram classificados como múltiplas frentes propagando-se na mesma direção (*twin mesospheric bores*. Nas noites de 17 de agosto de 2015 e 27 de julho de 2017 foram observados eventos similares, em que duas frentes mesosféricas são vistas propagando-se na mesma direção com intervalos de aproximadamente 50 e 100 minutos. Nos dois casos apresentados ambas as frentes apresentam uma região clara propagando-se em direção a uma região escura.

O estudo conduzido mostra a característica geral dos parâmetros horizontais das ondas observadas na mesosfera e baixa termosfera sobre a região Amazônica. Para aprimorar a compreensão dessas características é necessário acrescentar informações mais detalhadas das condições na atmosfera, sobretudo sobre o comportamento dos ventos e perfis de temperatura na região.

# 6 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE ONDAS DE GRAVIDADE-ACÚSTICA

As ondas de gravidade-acústica podem ser geradas por uma variedade de fontes como convecção troposférica e aquecimento Joule na alta atmosfera. Uma discussão abordada por Machado (2018) propõe a geração de ondas de gravidade-acústica, na baixa termosfera, devido a precipitação de partículas na região da AMAS (Anomalia Magnética da América do Sul). A precipitação de partículas seria capaz de produzir um forçante, por aquecimento Joule, associado às correntes de íons e elétrons na região E.

A possibilidade de geração de ondas de gravidade-acústica, devido ao aquecimento Joule, pode estar relacionada com diversas forçantes capazes de produzir uma perturbação térmica na atmosfera. Neste Capítulo, é proposto um mecanismo que pode atuar como uma forçante térmica na região E. Tal forçante teria origem devido à perturbação da densidade de plasma associada a íons (originados pelo fluxo de entrada de meteoros) e as camadas E-esporádicas. Uma abordagem matemática preliminar para a perturbação da densidade de plasma e modulação da forçante térmica é discutida.

Simulações numéricas foram conduzidas para testar a atuação de tal mecanismo. Para isso, foi empregado o sistema de equações hidrodinâmicas que governam as ondas de gravidade-acústica, descritas no modelo numérico desenvolvido por Kherani et al. (2011), Kherani et al. (2012). A teoria proposta encontra-se em estágio inicial de desenvolvimento, sendo necessário aprofundar as discussões e o embasamento matemático. Os resultados preliminares das simulações numéricas para forçante térmica na região E são apresentados.

Outras simulações, independentes do mecanismo proposto mencionado acima, são apresentadas na Seção 6.3. Foram conduzidas simulações numéricas para quatro casos de forçantes troposféricas associadas à convecção. O objetivo destas simulações foi investigar a interação entre múltiplos sistemas convectivos na troposfera e a geração de ondas de gravidade-acústica na MLT devido a estas forçantes.

## 6.1 Teoria de Aquecimento Joule Associado à Perturbação na Densidade Iônica na Região E

Na região E ionosférica, aproximadamente entre 80 e 150 km de altitude, ocorre com certa frequência o surgimento de picos na densidade eletrônica chamadas de cama-

das E-esporádicas. A nomenclatura camada E-esporádica (Es) refere-se ao fenômeno devido ao adensamentos do plasma compostos por íons metálicos. Essa camada vem sendo estudada por meio de observações usando ionossondas, radares de espalhamento incoerente, foguetes e satélites. No trabalho de Resende (2014) é abordada uma ampla revisão sobre o tópico, bem como mecanismos responsáveis pelo surgimento da Es associados a competição entre ventos e campo elétrico na região E. Em linhas gerais, a formação da Es depende da altitude e latitude. Na região de médias e baixas latitudes, o acréscimo na ionização, responsável pelo surgimento da Es, deve-se ao mecanismo de cisalhamento de ventos (WHITEHEAD, 1989). Nas regiões equatoriais, a camada Es é atribuída à irregularidades de gradiente (COHEN; BOWLES, 1963).

Para derivar a expressão para o aquecimento Joule, devido ao incremento de corrente ($\delta j$) e a perturbação na densidade eletrônica ($\delta n$) na região E, pode-se partir da relação entre a variação de corrente e densidade eletrônica:

$$\frac{\delta j}{j_{oP}} = \frac{\delta n}{n_0} \tag{6.1}$$

onde $j_{oP} = \sigma_P E$ é a corrente de fundo na região E devido aos íons, $\sigma_P$ é a condutividade Pedersen, $E$ o campo elétrico e $n_0$ a concentração ambiente de partículas ionizadas.

A energia dissipada ou taxa de aquecimento ($\delta Q$) por unidade de densidade pode ser expressa por:

$$\delta Q = \frac{1}{n_0} \delta j E \tag{6.2}$$

substituindo $\delta j$,

$$\delta Q = \frac{1}{n_0} \frac{\delta n}{n_0} j_{oP} E \tag{6.3}$$

$$\delta Q = \frac{1}{n_0} \frac{\delta n}{n_0} \sigma_P E^2 \tag{6.4}$$

$$\delta Q = \frac{\delta n}{n_0} q \mu_P E^2 \tag{6.5}$$

onde $\mu_P = \dfrac{\sigma_P}{n_0 q}$ é a mobilidade Pedersen para íons e $q$ a carga elétrica.

Para a região E, pode-se escrever $\mu_P = \dfrac{1}{B_0}\dfrac{\kappa}{1+\kappa^2} \approx \dfrac{1}{B_0}\dfrac{\Omega}{\nu}$, onde $\kappa = \dfrac{\Omega}{\nu}$, $\Omega$ é a girofrequência, $\nu$ a frequência de colisão e $B_0$ o campo magnético (KELLEY, 2009). Reescrevendo a Equação 6.5, obtém-se:

$$\delta Q = \alpha \frac{\delta n}{n_0} \tag{6.6}$$

onde

$$\alpha = \frac{q}{B_0}\frac{\kappa}{1+\kappa^2} E^2 \approx \frac{10^{-19}}{0,25 \cdot 10^{-5}} \frac{\Omega}{\nu} E^2 \tag{6.7}$$

O campo elétrico na região E apresenta variações ao longo do dia, podendo ter variabilidade sazonal (MORO et al., 2016b) e em função da atividade solar (DENARDINI et al., 2015). Denardini et al. (2013) obteve valores médios da variação diurna do campo elétrico zonal ($E_y$) entre 0,13 a 0,49 mV/m e entre 1 a 5 mV/m para o campo elétrio vertical ($E_z$). Estes valores foram inferidos para alturas na faixa de 100 a aproximadamente 107 km usando medidas de radar coerente no setor brasileiro. No mesmo trabalho, Denardini et al. (2013) indica que $E_y$ pode atingir valores próximos a 1 mV/m em torno de 110 km de altura devido ao gradiente vertical positivo nos dos campos elétricos vertical e zonal na região E. Moro et al. (2016a) conclui em seu estudo, com base e mais de 600 dias de dados analisados dos radares de São Luiz (2,33°S; 44,20°O) e de Jicamarca (11,95°S; 76,87°O), que a média diurna da componente zonal ($\bar{E}_y$) variou na faixa de 0,04 a 1,75 mV/m enquanto que a média diurna da componente vertical ($\bar{E}_z$) oscilou entre 1,2 e 30 mV/m em São Luiz, no setor brasileiro para a faixa de altitude de 100 a 110 km.

Conforme indicado na literatura, o campo elétrico na região E apresenta variações em função da hora local, da longitude, latitude, sazonalidade, altitude, entre outros fatores. A fim de inferir valores da perturbação térmica que pode ser gerada em altitudes em torno de 110 km, assumiremos de forma simplista que o campo elétrico na Equação 6.7 seja $E \approx 1$ mV/m. Tomando $\kappa = \Omega/\nu \approx 0,1$, temos que:

$$\alpha \approx \frac{10^{-19} \cdot 10^{-7}}{0,25 \cdot 10^{-5}} \approx 0,4 \cdot 10^{-20} \text{ J/s} \tag{6.8}$$

A perturbação $\delta T$ da temperatura em K/s pode então ser escrita como:

$$\delta T = \frac{\delta Q}{k_B} = \frac{\alpha}{k_B} \frac{\delta n}{n_0} \tag{6.9}$$

onde $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K é a constante de Boltzmann. Tomando $\frac{\alpha}{k_B} \approx 4 \cdot 10^2$ K/s, a perturbação térmica na região E pode ser expressa por:

$$\delta T = 400 \frac{\delta n}{n_0} \tag{6.10}$$

Um comportamento sazonal, com máximos no verão e mínimos no inverno, é característico das camadas Es. Esse comportamento ocorre em ambos os hemisférios e pode ser observada na Figura 6.1, que mostra séries temporais das médias diárias da frequência crítica de E-esporádica ($foEs$). A frequência $foEs$ é muito usada para determinar a intensidade e variabilidade de camadas E-esporádicas, contudo, não determina a frequência de ocorrência da camada. Outros estudos de ocorrência de Es mostram que os máximos seguem o mesmo padrão, com máximos no verão e mínimos no inverno (ARRAS, 2010). Tal dependência sazonal não é explicada pela teoria de formação de Es por cisalhamento de ventos.

As camadas Es são formadas principalmente por íons metálicos provenientes da ablação de meteoros. Logo, pode-se esperar que a intensidade e frequência de ocorrência das Es sejam diretamente proporcionais ao número de íons metálicos presentes na atmosfera. De fato existe uma concordância entre as variações, porém enquanto a taxa de ocorrência da Es diminui significativamente, quase tendendo a zero, durante o período de inverno, a contagem de meteoros mantêm-se em aproximadamente 3000 por dia, conforme pode ser observado na Figura 6.2 (medidas tomadas no Hemisfério Norte). A quantidade de íons metálicos é determinada pela deposição devido ao fluxo de entrada de meteoros, a perda por recombinação em reações de três elementos e a foto ionização de átomos metálicos (HALDOUPIS et al., 2007). O fluxo de entrada de meteoros esporádicos não é isotrópico e apresenta característica sazonal com máximo durante o verão. Estudos realizados por Hawkins (1956) revelaram que a incidência de meteoros esporádicos não é aleatória, mas direcionada ao plano

Figura 6.1 - Variação sazonal da Es.

Variação anual típica da frequência crítica $foEs$ da camada Es medida simultaneamente nos Hemisférios Norte (Boulder, 40°N) e Sul (Conpeccion, 36,6°S). A variação sazonal é dominada por um forte máximo no solstício de verão.

Fonte: Adaptado de Haldoupis et al. (2007).

Figura 6.2 - Número de meteoros por dia e ocorrência de camada Es ao longo do ano para o Hemisfério Norte.

Variação anual da ocorrência da camada Es e contagem diária de meteoros. Dados obtidos para o Hemisfério Norte (55°N) durante o ano de 2007. O inverno corresponde aproximadamente ao período entre o dia 330 e 60 e o verão entre o dia 150 ao 240.

Fonte: Adaptado de Arras (2010).

eclíptico, fornecendo uma explicação para o máximo no verão e mínimo no inverno observado em ambos os hemisférios.

A variação média anual de $foEs$ e da contagem de meteoros observada por Haldoupis et al. (2007) é apresentada na Figura 6.3. Nota-se que há uma boa concordância entre a variação anual dos dois parâmetros. Algumas diferenças podem ser atribuídas às chuvas de meteoros, que elevam consideravelmente a contagem em um período curto. Assumindo que haja uma proporcionalidade entre as variações anuais de Es e fluxo de entrada de meteoros, pode-se dizer que $\frac{\delta n}{n_0} \propto \frac{\delta f_m}{f_{m0}}$, permitindo assim reescrever a Equação 6.10 na forma

$$\delta T \propto 400 \frac{\delta f_m}{f_{m0}} \tag{6.11}$$

onde $f_m =$ é o fluxo de entrada de meteoros e $f_{m0}$ é o fluxo de fundo.

Figura 6.3 - Média anual de $foEs$ e contagem de meteoros.

Comparação entre a média anual de contagem de meteoros e $foEs$. Dados de Juliusruh (54,6°N) entre 1999 e 2005 (esquerda) e Athens (38,0°N) de 2000 a 2005 (direita).

Fonte: Adaptado de Haldoupis et al. (2007).

A densidade de plasma total obtida pela soma da densidade de íons metálicos e íons ambientes é representada na Figura 6.4. Os perfis foram obtidos por simulação para localização de Arecibo (18°N,67°O). As curvas representam a evolução da densidade total de plasma no tempo para horários diurnos e noturnos. Nota-se claramente que a perturbação na densidade é muito mais proeminente no período noturno. Resultados de simulação usando modelo MIRE são observados na Figura 6.5. Estes perfis foram obtidos usando a metodologia desenvolvida por Resende (2014). Comparando os perfis das Figuras 6.4 e 6.5 pode-se concluir que a ordem da perturbação na densidade iônica pode variar significativamente. Tais variações dependem, dentre outros fatores, das condições de ventos, campos elétricos e constituintes ionizados na região E.

As camadas Es apresentam variações espaciais de grande ordem (ARRAS, 2010). Conforme observado nas Figuras 6.4 e 6.5, em altitude a camada Es está localizada entre 80 e 130 km. Pela Figura 6.6 nota-se que a ocorrência de Es é limitada principalmente a baixas e médias latitudes. Na mesma figura nota-se claramente que a ocorrência de Es é máxima durante o verão, em ambos os hemisférios. Pode-se observar ainda que existe um gap na ocorrência de Es no Hemisfério Sul durante o verão. Isto é causado por influência da AMAS, uma vez que a formação da Es

Figura 6.4 - Perfis de altura da densidade total de plasma obtido com simulação para Arecibo (18°N; 67°O).

Perfis verticais de densidade total de plasma mostrando a evolução da camada descendente durante o dia (a) e a noite (b). Cada curva (contínua, pontilhada e tracejada) corresponde ao comportamento da camada em um determinado horário local. São contabilizados os íons metálicos e ambientes nos perfis.

Fonte: Adaptado de Carter e Forbes (1999).

depende diretamente da intensidade do campo magnético horizontal (ARRAS, 2010).

Em geral, a camada meteórica tem uma variação espacial gaussiana e a taxa $\delta T$ pode ser modulada pela expressão:

$$\frac{\delta T}{T_0} = A_{\delta T} e^{-(r-r_0)^2/10^2} e^{-(\theta-\theta_0)^2/10^2} e^{-(\phi-\phi_0)^2/10^2} = A_{\delta T} S(r,\theta,\phi) \tag{6.12}$$

onde $(r, \theta, \phi)$ são altitude, latitude e longitude, $(r_0, \theta_0, \phi_0)$ são o pico da variação gaussiana correspondente e $A_{\delta T}$ é a amplitude da perturbação em percentual (%). Supondo inicialmente que a perturbação na densidade da camada Es seja de cerca de 10%, $\delta n/n_0 \approx 0,1$. Logo, a perturbação térmica dada pela Equação 6.10 pode ser $\delta\ T\ \approx\ 40$ K. Na faixa de altitude entre 80 e 130 km a temperatura ambiente varia entre 200 a 300 K. Portanto, a amplitude de $\delta T$ pode chegar a faixa de 10% a

Figura 6.5 - Perfil de camada Es obtida em simulações para SMS (29,4°S; 53,8°O).

Evolução da densidade eletrônica de camada Es usando modelo MIRE para região da estação SMS (29,4°S; 53,8°O) para período de verão de 2011/2012.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 6.6 - Mapa global da camada Es.

Ocorrência global da camada Es, derivada de dados dos satélites CHAMP, GRACE e COSMIC. Cada mapa contém medidas obtidas durante três meses: verão (dezembro, janeiro e fevereiro), outono (março, abril, maio), inverno (junho, julho, agosto) e primavera (setembro, outubro e novembro). As estações são consideradas para o Hemisfério Sul.

Fonte: Adaptado de Arras (2010).

20% do valor ambiente, para as condições consideradas.

O tempo de vida dos íons metálicos depende da altitude e pode variar desde cerca de 20 minutos podendo chegar a até cerca de 27 horas (ZAMLUTTI, 2005). Dentro da camada metálica formada, o tempo de vida pode ser de aproximadamente 20 minutos. Portanto, a escala de tempo mínima da perturbação térmica associada às camadas Es da ordem de 20 minutos. Com base nisso, foi acrescentado um termo de amortecimento exponencial na Equação 6.12 para contemplar essa ordem de variação temporal:

$$\frac{\delta T}{T_0} = A_{\delta T} S(r, \theta, \phi) e^{-(t-t_0)^2/20^2} \tag{6.13}$$

O mecanismo de aquecimento Joule associado a perturbação na densidade iônica na região E é um tema inédito nas discussões sobre geração de ondas de gravidade-acústica. Conforme apresentado, existem muitas questões para a formação de uma perturbação na densidade iônica na região E, tais como sazonalidade do fluxo de meteoros, sazonalidade de ocorrência de Es, condições de ventos e campos elétricos, entre outros. A abordagem apresentada nesta seção encontra-se em estágio inicial e necessita ser discutida de forma mais aprofundada. As variações, principalmente sazonais, da ocorrência de Es e fluxo de meteoros devem ser consideradas em maiores detalhes em futuras discussões sobre este mecanismo.

## 6.2 Simulações de Aquecimento Joule na Região E

Simulações de geração de ondas de gravidade-acústica foram conduzidas para a região de baixas e médias latitudes, semelhante a localização da estação SMS. A forçante considerada foi o aquecimento Joule associado a perturbação na densidade iônica na região E. Os resultados preliminares são apresentados e discutidos nesta seção.

Baseando-se em alguns possíveis valores que a amplitude $A$ pode assumir na Equação 6.13, três simulações (*Numeric Experiments - NEs*), NE1, NE2 e NE3 com $A_{\delta T} = 20\%$, 10% e 1%, respectivamente, foram conduzidas a fim de obter as características de propagação das ondas de gravidade-acústica geradas. A amplitude da fonte tem uma distribuição gaussiana no tempo com sigma igual a 20 minutos (1200 segundos). O pico da amplitude nas simulações foi centrado em 110 km de altitude. As condições iniciais de temperatura e densidade atmosféricas variam apenas com altura, conforme representadas na Figura 6.7. Nas simulações apresentadas o vento

Figura 6.7 - Perfil de densidade e temperatura da atmosfera usado para simulações.

Densidade da atmosfera neutra e temperatura em função da altura usados para as simulações.

Fonte: Produção do Autor.

básico foi considerado nulo.

A amplitude do vento vertical gerado pelas ondas de gravidade-acústica são plotadas na Figura 6.8 em função da altura e do tempo. Nota-se que para todas NEs são geradas ondas de gravidade-acústica devido ao aquecimento Joule. A principal diferença entre as simulações está na amplitude das oscilações. Nota-se ainda que o primeiro mínimo em cada simulação ocorre com alguns minutos de defasagem, sendo atingido em pouco mais de 10 min. na NE1 e próximo a 20 min. para NE3. Uma razão para o deslocamento no tempo deve-se ao formato gaussiano da fonte. Uma vez que os três casos foram simulados com o mesmo valor de sigma, quanto maior o valor da amplitude (pico da gaussiana), maior será a taxa de aumento da temperatura ambiente, gerando uma maior gradiente de temperatura e pressão. A oscilação da amplitude para o instante de simulação NE1 em que $t = 20$ minutos pode ser observado na Figura 6.9. Nota-se que na baixa termosfera as frentes de onda circulares são formadas no plano horizontal.

Entre as características em comum pode-se citar: (a) as maiores amplitudes concentram-se na região entre 90-130 km, nas vizinhanças da forçante térmica; (b) a

Figura 6.8 - Amplitude das ondas de gravidade-acústica para simulações de aquecimento Joule.

Propagação vertical da amplitude das ondas de gravidade-acústica. Perfil em altura versus tempo fixo em latitude e longitude $(\theta_0, \phi_0)$, ou seja, na localização do pico da forçante. A amplitude máxima do vento vertical atingida para cada simulação é indicada pelo valor de $W_p^{max}$.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 6.9 - Amplitude das ondas de gravidade-acústica no plano horizontal em ≈ 100 km de altura.

Amplitude das ondas de gravidade-acústica para $t = 20$ minutos. Corte em altura em torno de 100 km.

Fonte: Produção do Autor.

forçante está localizada no interior de uma região de duto, ocasionando a canalização das ondas e amplificação da amplitude devido a interferência construtiva dentro do duto; (c) as amplitudes das ondas oscilam com periodicidade semelhante ao da fonte térmica igual a 1200 segundos; (d) após cerca de 50 minutos as ondas canalizadas rompem o duto e "escapam"para a termosfera e mesosfera, propagando-se tanto para cima quanto para baixo chegando a atingir a tropopausa. Nota-se que a amplitude máxima do vento $W_P$ depende da amplitude da forçante, embora a relação não seja proporcional devido a efeitos de não linearidade. Para o caso NE1 a amplitude da forçante foi de 10% e $W_P^{max} = 17$ m/s enquanto que para NE3 a amplitude da forçante foi de 1% e $W_P^{max} = 14$ m/s. Mesmo com uma perturbação 10 vezes maior a amplitude máxima do vento vertical em NE1 foi apenas 20% maior do que em NE3. Isso pode implicar que mesmo uma pequena perturbação térmica pode gerar ondas de gravida-acústica na MLT.

Os resultados apresentados nesta seção indicam que o aquecimento Joule associado às camadas meteóricas e Es pode gerar ondas de gravida-acústica na baixa termosfera. Tais ondas geradas na MLT podem propagar-se verticalmente tanto para cima quanto para baixo. É pouco provável que este mecanismo possa ter gerado ondas de gravidade observadas em MAN, na região Amazônica. Esta possível fonte provavelmente não deve ser tão atuante na região equatorial devido a menor ocorrência de Es, conforme mostrado na Figura 6.6. A analise de ondas de gravidade conduzida para os dados da estação SMS (Capítulo 4) indica que uma parcela significativa dos eventos observados na MLT provavelmente não tem origem na região da troposfera. O mecanismo de geração de ondas de gravidade-acústico proposto pode estar associado a alguns dos eventos observados na MLT na estação SMS.

## 6.3 Simulações de Múltiplas Fontes Troposféricas

A atuação de zonas de convecção troposférica na geração de ondas de gravidade-acústica é conhecida há várias décadas. Diversos trabalhos abordando simulações desse tipo de fonte foram publicados tratando do assunto (VADAS; FRITTS, 2004; VADAS; FRITTS, 2006; VADAS; FRITTS, 2009; KHERANI et al., 2011). Nesta seção são apresentados resultados preliminares de simulações feitas para fonte troposféricas na região equatorial. Como observado no Capítulo 5 de resultados da estação MAN, a região Amazônica apresenta frequente atividade convectiva durante o ano inteiro.

A característica predominante observada na troposfera da região Amazônica, próximo a estação MAN, é a presença de vários sistemas convectivos. Simulações para múltiplas zonas de convecção troposféricas foram realizadas com o objetivo de compreender melhor o desenvolvimento das frentes de onda observadas na MLT. Foram simuladas apenas fontes com duração temporal relativamente pequenas (cerca de 15 minutos) a fim de otimizar o tempo necessário para rodar cada uma das simulações. Isso devido ao tempo total necessário para a simulação ser proporcional a duração da fonte. O objetivo das simulações apresentadas é analisar qualitativamente a morfologia e interação das frentes de onda.

As fontes convectivas podem ser modeladas de forma equivalente a fontes de aquecimento Joule ou de momento (VADAS; FRITTS, 2009). Nesse caso, uma forçante devido a convecção troposférica (CT) pode ser expressa por:

$$\frac{\delta T}{T_0} = A_{CT} e^{-(r-r_0)^2/10^2} e^{-(\theta-\theta_0)^2/10^2} e^{-(\phi-\phi_0)^2/10^2} = A_{CT} S(r,\theta,\phi) \tag{6.14}$$

onde $(r, \theta, \phi)$ são altitude, latitude e longitude, $(r_0, \theta_0, \phi_0)$ é a localização do pico da variação gaussiana do forçante, e $A_{CT}$ é a amplitude da perturbação em percentual (%). Nas simulações a seguir, a amplitude da perturbação térmica para os testes realizados foi de 10%, mesmo valor utilizado por Machado (2018) nas simulações para fonte troposférica. A forçante utilizada tem distribuição gaussiana no tempo, com período de 15 minutos. Acrescentando o termo de amortecimento exponencial obtém-se a expressão:

$$\frac{\delta T}{T_0} = A_{CT} S(r, \theta, \phi) e^{-(t-t_0)^2/15^2} \tag{6.15}$$

O resultado da simulação para uma fonte troposférica, centrada em 10 km de altitude, pode ser observado na Figura 6.10. Os três painéis superiores mostram a amplitude do vento vertical $W_p$ (m/s) em função da posição zonal (x) e meridional (y) para um corte em 95 km de altura (altitude aproximada das emissões da luminescência da MLT). Os painéis inferiores mostram a amplitude do vento, porém em um corte vertical para uma posição fixa de x (longitude fixa passando pelo centro do volume de simulação). Observa-se no corte em altura para $t = 5$ minutos o início da formação de frentes de onda em 95 km de altura. Para $t = 20$ minutos, nota-se a formação de várias cristas e vales, cuja propagação horizontal ocorre radialmente a partir do centro da forçante.

Nos painéis inferiores da Figura 6.10 (x=487,5 km) pode-se observar a característica vertical das ondas de gravidade-acústica. Para t=5 minutos observa-se que a propagação é principalmente vertical, com a amplitude da onda aumentando em função da altura devido a diminuição da densidade atmosférica. A partir de t=10 minutos observa-se a difusão das ondas na termosfera e a propagação de ondas na horizontal.

O caso para duas forçantes troposféricas com distribuições espaciais e temporais idênticas pode ser observado na Figura 6.11. As duas forçantes foram colocadas em 10 km de altitude com período de 15 minutos, mesma condição usada no caso para uma forçante. Até cerca de 10 minutos as ondas de gravidade-acústica geradas propagam-se de forma quase independente, similar ao primeiro caso. Para tempos superiores a 15 minutos pode-se observar a interação entre as frentes de onda em 95 km de altitude. Observa-se ainda que em uma posição fixa (x,y) podem ocorrer ondas que se propaguem em mais de uma direção na horizontal, diferente do primeiro caso em que num ponto fixo a propagação sempre é na mesma direção.

O terceiro caso simulado foi para a condição de duas forçantes troposféricas com distribuições espaciais diferentes, conforme pode ser observado na Figura 6.12. Neste caso as duas fontes tem distribuição temporal idêntica, porém as dimensões horizontais são distintas. Uma das fontes têm dimensões de 10 km nas direções zonal e meridional. A outra fonte tem 20 km de largura na direção zonal e 40 km na direção meridional. A localização em altura é em 10 km, a mesma dos demais casos. A posição relativa horizontal das duas forçantes difere do segundo caso, em que a distância entre o centro das fontes era cerca de 400 km. O centro das forçantes para o terceiro caso está mais próximo, a apenas algumas dezenas de quilômetros de distância. Percebe-se que a interação das frentes de onda ocorre com geometria totalmente diferente do segundo caso. Para $t = 28$ minutos pode-se dizer que as frentes de onda mais externas, observadas em 95 km de altitude, têm uma morfologia quase semelhante ao caso com uma única forçante troposférica. Devido a proximidade das duas fontes, pode-se dizer que o efeito é similar a uma única célula convectiva de maior escala. Contudo, pode-se observar que existem distorções de menor escala nas frentes de onda e na propagação horizontal, que não são sempre na mesma direção para um ponto fixo qualquer.

Figura 6.10 - Simulação para uma forçante troposférica.

Amplitude do vento vertical $W_P$ em m/s para perfis fixos em altura (painéis superiores) e em x (painéis inferiores). Condição para uma forçante troposférica em 10 km de altitude.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 6.11 - Simulação para duas forçantes troposféricas idênticas.

Amplitude do vento vertical $W_P$ em m/s para perfis fixos em altura (painéis superiores) e em x (painéis inferiores). Condição para uma forçante troposférica em 10 km de altitude.

Fonte: Produção do Autor.

Por fim, um quarto caso com três forçantes troposféricas foi simulado e os resultados podem ser observados na Figura 6.13. Novamente, a dimensão espacial e distribuição temporal das forçantes são iguais, com máximo em 10 km de altitude. Percebe-se que passados 10 minutos existem regiões de interferência, como por exemplo no centro das fontes em 95 km de altitude, onde a amplitude é próxima a zero. Em uma localização entre as fontes percebe-se que as frentes de onda podem assumir diferentes direções de propagação em função do tempo.

As características morfológicas das simulações apresentadas nesta seção podem contribuir para a compreensão das formas de ondas observadas na MLT nos dados de luminescência atmosférica. A análise dos dados de MAN, na região Amazônica, mostrou diversos casos em que várias ondas com direções de propagação distintas foram observadas durante a mesma noite. Em alguns eventos pode-se notar características que se assemelham a morfologia dos casos simulados e apresentados nesta seção. Isto reforça a hipótese de que na região Amazônica uma parte significativa das ondas observadas seja de origem troposférica devido a múltiplas zonas de convecção.

A interação entre cristas e vales de ondas pode ser observada quando são inseridas mais de uma forçante. Além de interferência construtiva ou destrutiva na amplitude da onda, percebe-se que com o aumento do número de fontes multiplicam-se as possibilidades de direções de propagação das frentes de onda. Os resultados apresentados compreendem testes preliminares da análise de propagação de ondas de gravidade-acústica geradas por múltiplas fontes convectivas na troposfera. A realização de outras simulações, variando os parâmetros espaciais e temporais das fontes, são recomendadas para aprimorar a compreensão deste fenômeno.

Figura 6.12 - Simulação para duas forçantes troposféricas com distribuição espacial distintas.

Amplitude do vento vertical $W_P$ em m/s para perfis fixos em altura (painéis superiores) e em x (painéis inferiores). Condição para uma forçante troposférica em 10 km de altitude.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 6.13 - Simulação para três forçantes troposféricas idênticas.

Amplitude do vento vertical $W_P$ em m/s para perfis fixos em altura (painéis superiores) e em x (painéis inferiores). Condição para uma forçante troposférica em 10 km de altitude.

Fonte: Produção do Autor.

# 7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou e discutiu os primeiros resultados de observações de ondas de gravidade no extremo Sul e na região Amazônica. Os dados foram obtidos no Observatório Espacial do Sul na cidade de São Martinho da Serra, RS e na reserva biológica de Cuieiras a 60 km da Manaus, AM, na região Amazônica brasileira. No total foram analisados 15 meses de dados (março de 2011 a maio de 2012) na região Sul e 26 meses de dados inéditos (julho de 2015 a agosto de 2017) na região Amazônica. Embora a resolução temporal entre imagens nos dados da região Sul fossem de aproximadamente 12 minutos e 48 segundos, ainda foi possível determinar os parâmetros de uma porção do espectro de ondas de gravidade de longo período. A resolução temporal entre imagens nos dados da região Amazônica foi de aproximadamente 3 minutos e 25 segundos, possibilitando a análise de um espectro mais amplo de ondas de gravidade e eventos de menor período quando comparado aos dados da região Sul.

A característica mais marcante das ondas de gravidade observadas na região Sul em SMS foi uma anisotropia na direção de propagação bem pronunciada no eixo NO-SE. Durante o outono e o inverno, os eventos observados apresentaram propagação preferencial para NO, enquanto que na primavera e verão, a propagação preferencial ocorreu no sentido SE. O baixo número de ondas observadas na direção NE, apesar da frequente presença de sistemas frontais na troposfera que poderiam gerar ondas em tal direção, pode estar associada a filtragem de ventos na região da mesosfera.

Em aproximadamente metade dos casos das ondas observadas em SMS, existiam sistemas convectivos presentes na troposfera. Contudo, não foi possível determinar se estes eventos de fato têm origem troposférica. Para o restante dos eventos, acredita-se que as fontes estejam associadas a processos na estratosfera, mesosfera e baixa termosfera. Dois casos de frentes mesosféricas observadas simultaneamente em duas emissões na estação SMS foram apresentados. Nos dois eventos, observou-se o efeito de complementariedade nas emissões do NaD 589,3 nm e do OI 557,7 nm, com o aumento na intensidade da primeira e diminuição da segunda.

No Norte do Brasil, na região Amazônica, observou-se uma intensa atividade de ondas de gravidade na MLT durante o período estudado, de julho de 2015 a agosto de 2017. Apenas no período do outono notou-se uma direção preferencial de propagação das ondas para N. Nas demais estações do ano, os eventos observados não apresentaram direção preferencial bem definida. No período do inverno, em que foram observadas cerca de 50% das ondas analisadas, a direção de propagação foi quase

isotrópica. As causas dessas características na direção de propagação estão provavelmente associadas a distribuição das fontes, as quais acredita-se que a convecção troposférica represente papel preponderante. As ondas de gravidade observadas na região Amazônica apresentaram alta correlação com a presença de sistemas convectivos na troposfera. Geralmente as zonas de convecção que foram observadas eram constituídas de múltiplas células.

O estudo de casos de alguns eventos de frentes mesosféricas observadas em MAN foi abordado. Entre estes, dois casos específicos foram observados de frentes mesosféricas duplas, com defasagens de aproximadamente 50 a 100 minutos entre as frentes consecutivas observadas propagando-se na mesma direção (*twin mesospheric bores*). Nos dois casos apresentados, ambas as frentes vistas na emissão do OI 557,7 nm apresentam uma região clara propagando-se em direção a uma região escura, o que pode estar associado ao fato do duto formado estar empurrando a camada da emissão para baixo.

Um mecanismo de geração de ondas de gravidade-acústica in situ na MLT foi proposto como possível fonte para eventos observados em baixas e médias latitudes. O forçante neste caso estaria associado ao aquecimento Joule gerado pela perturbação na densidade de plasma na região E devido às camadas E-esporádicas e íons meteóricos. Simulações numéricas simplificadas do mecanismo proposto foram conduzidas apresentando resultados preliminares da geração de ondas de gravidade-acústica. As simulações indicam que a propagação da componente vertical das ondas de gravidade-acústica geradas podem ocorrer tanto na ascendente (em direção a termosfera) quanto na descendente (até a tropopausa). Acredita-se que deva haver uma característica sazonal neste mecanismo, haja vista que a ocorrência e intensidade da camada Es e fluxo de meteoros apresentam comportamento sazonal com máximos no verão (em ambos os hemisférios). Contudo, o efeito da sazonalidade no mecanismo proposto não foi definido neste estudo e necessita ser investigado em maiores detalhes.

As simulações numéricas de múltiplas forçantes troposféricas mostraram que a interação entre ondas pode produzir frentes de onda com novas direções de propagação. Os resultados destas simulação são consistentes com as observações de ondas na MLT realizadas na estação MAN na região equatorial sobre a Amazônia.

## 7.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros sugere-se realizar novas observações na região sul por períodos mais longos e com menor intervalo de tempo entre imagens (entre 1 a 5 minutos). Dessa forma poderá ser estudado um espectro mais completo das ondas de gravidade na alta atmosfera nesta região. Sugere-se ainda uma investigação mais ampla dos casos de frentes mesosféricas observados no Sul e na região Amazônica brasileira, procurando definir as condições atmosféricas (ventos e temperatura) e tipos de dutos formados. Outra possibilidade de trabalhos futuros com os dados de luminescência é investigar as diferenças entre os parâmetros de ondas para eventos observados simultaneamente nas emissões do OI 557,7 nm e NaD 589,3 nm, visto que o centroide de cada camada encontra-se em altitudes diferentes.

Recomenda-se aprofundar as discussões e estudos sobre o mecanismo proposto de geração de ondas de gravidade-acústica devido a perturbação na densidade iônica na região E. O efeito da sazonalidade das Es e fluxo de meteoros sobre este mecanismo ainda não é bem compreendido e deve ser levado em consideração, sendo sugerido estudos futuros sobre este tópico. Novas simulações, ampliando a gama de condições atmosféricas e das forçantes térmicas, são recomendados afim de testar as proposições elaborados sobre a forçante de aquecimento Joule associado aos íons meteóricos e camadas Es.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ALENCAR FILHO, J. F. d. **Estudo de frentes mesosféricas na região equatorial**. 313 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.07.11.35>. Acesso em: 04 mar. 2018. 15

ALMEIDA, L. M. d. **Características das ondas de gravidade observadas na região central do Brasil**. 63 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <http://biblioteca.univap.br/dados/000002/000002E7.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2018. 19

AMORIM, D. C. d. M. **Estudo do mecanismo de geração das camadas esporádicas de sódio**. 108 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.06.13.02>. Acesso em: 04 mar. 2018. 6

ANDRIOLI, V. F.; FRITTS, D. C.; BATISTA, P. P.; CLEMESHA, B. R.; JANCHES, D. Diurnal variation in gravity wave activity at low and middle latitudes. **Annales Geophysicae**, v. 31, n. 11, p. 2123–2135, 2013. Disponível em: <https://www.ann-geophys.net/31/2123/2013/>. 63, 64, 66, 67

ARRAS, C. **A global survey of sporadic E layers based on GPS radio occultations by CHAMP, GRACE and FORMOSAT–3 / COSMIC**. 119 p. Tese (Doutorado) — Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2010. Disponível em: <http://doi.org/10.2312/GFZ.b103-10097>. 114, 116, 117, 118, 120

BAGESTON, J. V. **Caracterização de ondas de gravidade mesosféricas na Estação Antártica Comandante Ferraz**. 176 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2009/11.25.17.35>. Acesso em: 04 mar. 2018. 14, 20, 45

BARTH, C. A. Three-body reactions. **Annales Geophysicae**, v. 20, p. 182–198, 1964. 7

BATISTA, P.; TAKAHASHI, H.; CLEMESHA, B. Solar cycle and the QBO effect on the mesospheric temperature and nightglow emissions at a low latitude station. **Advances in Space Research**, v. 14, n. 9, p. 221–224, 1994. 39

BEER, T. **Atmospheric waves**. [S.l.]: New York: John Wiley and Sons, 1974. 8, 14

CARTER, L. N.; FORBES, J. M. Global transport and localized layering of metallic ions in the upper atmospherer. **Annales Geophysicae**, v. 17, n. 2, p. 190–209, 1999. Disponível em: <https://www.ann-geophys.net/17/190/1999/>. 118

CHAMBERLAIN, T. P.; HUNTEN, D. M. **Theory of planetary atmospheres: an introduction to their physics and chemistry**. [S.l.]: Academic Press, 1990. 3, 4, 5

CHAPMAN, S. Notes on atmospheric sodium. **The Astrophysical Journal**, v. 90, p. 309, 1939. 6

CLEMESHA, B. R.; BATISTA, P. P.; SIMONICH, D. M. Long-term variations in the centroid height of the atmospheric sodium layer. **Advances in Space Research**, v. 32, n. 9, p. 1707–1711, 2003. 6

CLEMESHA, B. R.; SIMONICH, D. M.; TAKAHASHI, H.; MELO, S. M. L. A simultaneous measurement of the vertical profiles of sodium nightglow and atomic sodium density in the upper atmosphere. **Geophysical Research Letters**, v. 20, n. 13, p. 1347–1350. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/93GL01121>. 6

COHEN, R.; BOWLES, K. L. Ionospheric VHF scattering near the magnetic equator during the International Geophysical Year. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v. 67, p. 459–480, 1963. 112

CPTEC/INPE. **Boletim técnico**. 2018. Disponível em: <http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>. Acesso em: 27 mar. 2018. 72, 76

_____. **Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DAS): banco de dados e imagens**. 2018. Disponível em: <https://satelite.cptec.inpe.br/acervo/>. Acesso em: 26 mar. 2018. 59, 61, 72, 74, 75, 80, 81, 92, 94, 98, 102, 104, 108

DENARDINI, C.; AVEIRO, H.; SOBRAL, J.; BAGESTON, J.; GUIZELLI, L.; RESENDE, L.; MORO, J. E region electric fields at the dip equator and anomalous conductivity effects. **Advances in Space Research**, v. 51, n. 10, p. 1857–1869, 2013. 113

DENARDINI, C. M.; MORO, J.; RESENDE, L. C. A.; CHEN, S. S.; SCHUCH, N. J.; COSTA, J. E. R. E region electric field dependence of the solar activity. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 120, n. 10, p. 8.934–8.941, 2015. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015JA021714>. 113

DEWAN, E.; PICARD, R. Mesospheric bores. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 103, n. D6, p. 6295–6305, 1998. 65, 101

FRITTS, D. C. Gravity wave saturation in the middle atmosphere: a review of theory and observations. **Reviews of Geophysics**, v. 22, n. 3, p. 275–308, 1984. 8

FRITTS, D. C.; ALEXANDER, M. J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. **Reviews of Geophysics**, v. 41, n. 1, 2003. 8, 9, 16

GAO, H.; XU, J.; WU, Q. Seasonal and QBO variations in the OH nightglow emission observed by TIMED/SABER. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 115, n. A6, 2010. 39

GARCIA, F.; TAYLOR, M. J.; KELLEY, M. Two-dimensional spectral analysis of mesospheric airglow image data. **Applied Optics**, v. 36, n. 29, p. 7374–7385, 1997. 37, 43, 45

GOOGLE MAPS. 2018. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps>. Acesso em: 07 mar. 2018. 25

GOSSARD, E. E.; HOOKE, W. H. **Waves in the Atmosphere**. [S.l.]: New York: Elsevier, 1975. 456 p. 9

HALDOUPIS, C.; PANCHEVA, D.; SINGER, W.; MEEK, C.; MACDOUGALL, J. An explanation for the seasonal dependence of midlatitude sporadic E layers. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 112, n. A6, 2007. 114, 115, 116, 117

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace-the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1992. 5, 14

HAWKINS, G. S. A radio echo survey of sporadic meteor radiants. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 116, n. 1, p. 92–104, 1956. 114

HINES, C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. **Canadian Journal of Physics**, v. 38, n. 11, p. 1441–1481, 1960. 1, 8

_____. Momentum deposition by atmospheric waves, and its effects on thermospheric circulation. **The Upper Atmosphere in Motion**, p. 760–768, 1972. 8

KELLEY, M. C. **The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics**. [S.l.]: Academic press, 2009. 113

KEO SCIENTIFIC LTD. **All-Sky Imager: for National Institute for Space Research (INPE)**. Calgary, Canada: Keo, 2009. (Manual do fabricante). 30, 35, 36, 146

KHERANI, E. A.; ABDU, M. A.; FRITTS, D. C.; PAULA, E. R. de. The acoustic gravity wave induced disturbances in the equatorial ionosphere. In: ABDU, M. A.; PANCHEVA, D.; BHATTACHARYYA, A. (Ed.). **Aeronomy of the Earth's atmosphere and ionosphere**. [S.l.]: Springer, 2011. cap. 10, p. 141–162. 111, 125

KHERANI, E. A.; LOGNONNE, P.; HÉBERT, H.; ROLLAND, L.; ASTAFYEVA, E.; OCCHIPINTI, G.; COÏSSON, P.; WALWER, D.; PAULA, E. D. Modelling of the total electronic content and magnetic field anomalies generated by the 2011 Tohoku-Oki tsunami and associated acoustic-gravity waves. **Geophysical Journal International**, v. 191, n. 3, p. 1049–1066, 2012. 111

LEOVY, C. Simple models of thermally driven mesopheric circulation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 21, n. 4, p. 327–341, 1964. 8

MACHADO, C. S. **Estudo de distúrbios ionosféricos propagantes de média escala no hemisfério sul utilizando técnicas óticas, de rádio e simulações numéricas**. 212 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2018. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/11.13.11.46>. Acesso em: 18 abr. 2018. 62, 63, 111, 126

MEDEIROS, A.; FECHINE, J.; BURITI, R.; TAKAHASHI, H.; WRASSE, C.; GOBBI, D. Response of OH, O2 and OI5577 airglow emissions to the mesospheric bore in the equatorial region of Brazil. **Advances in Space Research**, v. 35, n. 11, p. 1971–1975, 2005. 70

MEDEIROS, A. F.; PAULINO, I.; TAYLOR, M. J.; FECHINE, J.; TAKAHASHI, H.; BURITI, R. A.; LIMA, L. M.; WRASSE, C. M. Twin mesospheric bores observed over brazilian equatorial region. **Annales Geophysicae**, v. 34, n. 1, 2016. 98, 101

MEDEIROS, A. F. d. **Observações de ondas de gravidade através do imageamento da aeroluminescência**. 187 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/04.16.14.15>. Acesso em: 04 mar. 2018. 9, 16, 17, 18, 19

MORO, J.; DENARDINI, C. M.; RESENDE, L. C. A.; CHEN, S. S.; SCHUCH, N. J. Equatorial E region electric fields at the dip equator: 1. variabilities in eastern Brazil and Peru. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 121, n. 10, 2016. 113

_____. Equatorial E region electric fields at the dip equator: 2. seasonal variabilities and effects over Brazil due to the secular variation of the magnetic equator. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 121, n. 10, p. 10.231–10.240, 2016. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2016JA022753>. 113

MUNRO, G. H. Travelling disturbances in the ionosphere. **Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 202, n. 1069, p. 208–223, 1950. ISSN 0080-4630. Disponível em: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/202/1069/208>. 1, 8

PAULINO, I. **Estudo da propagação de ondas de gravidade na termosfera-ionosfera**. 274 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.07.16.25>. Acesso em: 04 mar. 2018. 13, 14, 16, 19, 20

PIMENTA, A. Á. **Estudos da deriva zonal e dinâmica das bolhas de plasma na região tropical**. 194 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1905/2005/08.03.21.20.41>. Acesso em: 04 mar. 2018. 6

PLANE, J. M. Atmospheric chemistry of meteoric metals. **Chemical Reviews**, v. 103, n. 12, p. 4963–4984, 2003. 6

RESENDE, L. C. A. **Estudo sobre a formação e dominância das camadas E-esporádicas considerando a competição entre ventos e campos elétricos**. 214 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/09.23.20.10>. Acesso em: 30 abr. 2018. 112, 117

SANTOS, F. A. V. d. **Investigação do fluxo de momento das ondas de gravidade na alta atmosfera através da aeroluminescência**. 217 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/07.18.12.20>. Acesso em: 04 mar. 2018. 19

SMITH, S. M.; STOBER, G.; JACOBI, C.; CHAU, J. L.; GERDING, M.; MLYNCZAK, M. G.; RUSSELL, J. M.; BAUMGARDNER, J. L.; MENDILLO, M.; LAZZARIN, M.; UMBRIACO, G. Characterization of a double mesospheric bore over Europe. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, p. 9738–9750, 2017. 101

TAKAHASHI, H.; CLEMESHA, B.; BATISTA, P. Predominant semi-annual oscillation of the upper mesospheric airglow intensities and temperatures in the equatorial region. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 57, n. 4, p. 407–414, 1995. 6

TAKAHASHI, H.; SAHAI, Y.; CLEMESHA, B.; BATISTA, P.; TEIXEIRA, N. Diurnal and seasonal variations of the OH (8, 3) airglow band and its correlation with OI 5577 Å. **Planetary and Space Science**, v. 25, n. 6, p. 541–547, 1977. 39

TAYLOR, M. J.; HAPGOOD, M. Identification of a thunderstorm as a source of short period gravity waves in the upper atmospheric nightglow emissions. **Planetary and Space Science**, v. 36, n. 10, p. 975–985, 1988. 16

TAYLOR, M. J.; PAUTET, P.-D.; MEDEIROS, A. F.; BURITI, R.; FECHINE, J.; FRITTS, D. C.; VADAS, S. L.; TAKAHASHI, H.; SABBAS, F. T. São. Characteristics of mesospheric gravity waves near the magnetic equator, Brazil, during the SpreadFEx campaign. **Annales Geophysicae**, v. 27, n. 2, p. 461–472, 2009. Disponível em: <https://www.ann-geophys.net/27/461/2009/>. 16

TAYLOR, M. J.; TAYLOR, V.; EDWARDS, R. An investigation of thunderstorms as a source of short period mesospheric gravity waves. **The Upper Mesosphere**

**and Lower Thermosphere: A Review of Experiment and Theory**, p. 177–184, 1995. 16

TIME AND DATE AS. **Moonrise, moonset, and phase calendar**. 2018. Disponível em: <https://www.timeanddate.com/astronomy/>. Acesso em: 08 mar. 2018. 33

VADAS, S. L.; FRITTS, D. C. Thermospheric responses to gravity waves arising from mesoscale convective complexes. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, n. 6-9, p. 781–804, 2004. 125

_____. Influence of solar variability on gravity wave structure and dissipation in the thermosphere from tropospheric convection. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 111, n. A10, 2006. 125

_____. Reconstruction of the gravity wave field from convective plumes via ray tracing. **Annales Geophysicae**, v. 27, n. 1, p. 147–177, 2009. Disponível em: <https://www.ann-geophys.net/27/147/2009/>. 125

VARGAS, F. A. **Estudo do espectro das ondas de gravidade observadas em Cachoeira Paulista (23ºS)**. 123 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/05.07.10.30>. Acesso em: 04 mar. 2018. 19

VIRTUAL IONOSPHERE, THERMOSPHERE, MESOSPHERE OBSERVATORY (VITMO). 2018. Disponível em: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html>. Acesso em: 04 mar. 2018. 4

WHITEHEAD, J. D. Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 51, n. 5, p. 401–424, 1989. 112

WRASSE, C. M. **Estudos de geração e propagação de ondas de gravidade atmosféricas**. 253 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/05.24.10.59>. Acesso em: 04 mar. 2018. 17, 18

WRASSE, C. M.; TAKAHASHI, H.; MEDEIROS, A. F. d.; LIMA, L. M.; TAYLOR, M. J.; GOBBI, D.; FECHINE, J. Determinaçao dos parâmetros de

ondas de gravidade através da análise espectral de imagens de aeroluminescência. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 3, p. 257–265, 2007. 45, 46

ZAMLUTTI, C. J. The formal equations of the low latitude lower ionosphere and their applications. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 2, p. 113–122, 2005. 121

# APÊNDICE A - ESPECTRO DE TRANSMISSÃO DOS FILTROS ÓPTICOS DE INTERFERÊNCIA

Figura A.1 - Espectro de transmissão dos filtros ópticos do NaD, BG, O5, O6 e O7.

Espectro de transmissão em função do comprimento de onda dos filtros ópticos de interferência. Especificações dos filtros: NaD comprimento de onda 589,3 nm, banda passante de 2 nm; BG comprimento de onda de 598,5 nm e banda passante de 2 nm; O5 comprimento de onda de 557,7 nm e banda passante de 2 nm; O6 comprimento de onda de 630,0 nm e banda passante de 2 nm; O7 comprimento de onda de 777,4 nm e banda passante de 2 nm.

Fonte: Adaptado de Keo Scientific Ltd. (2009).

# APÊNDICE B - EVENTOS DE CONTAMINAÇÃO DO OH

Figura B.1 - Onda de gravidade observada simultaneamente em diferentes filtros na estação de SMS em 24/07/2011.

Quadros contendo imagens de um ciclo completo da roda de filtros do imageador. O espaço em branco em cada quadro representa a posição do filtro de $N_2^+$ que foi suprimido pois apresenta apenas ruído térmico para esta data. Nota-se uma onda de gravidade observada em todos os filtros que acredita-se tratar de um caso de contaminação das bandas do OH.

Fonte: Produção do autor.

Figura B.2 - Onda de gravidade observada simultaneamente em diferentes filtros na estação de SMS em 25/07/2011.

Quadros contendo imagens de um ciclo completo da roda de filtros do imageador. O espaço em branco em cada quadro representa a posição do filtro de $N_2^+$ que foi suprimido pois apresenta apenas ruído térmico para esta data. Nota-se uma onda de gravidade observada em todos os filtros que acredita-se tratar de um caso de contaminação das bandas do OH.

Fonte: Produção do autor.

## APÊNDICE C - ROTINA EM VISUAL BASIC PARA PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS DE SMS

Os dados originais de SMS foram gravados em resolução 2048x2048 no formato TIFF. A visualização dos dados originais pode ser efetuada utilizando o software proprietário WinView32 ou no IDL. No entanto, a escala de cores dos dados originais não possibilita a visualização das imagens usando softwares padrões dos sistemas operacionais Windows e Linux. A rotina apresentada abaixo foi implementada para efetuar o binning de um vetor de imagens originais de SMS no software WinView (software do fabricante da CCD PI/Acton 2048B) e salvar a imagem de saída no formato TIFF 8 bits, que permite a fácil visualização em softwares padrão. O binning das imagens reduz o tamanho da imagem original de 2048x2048 para 1024x1024 pixels, melhorando significativamente a relação sinal/ruído da imagem e diminuindo o tamanho do arquivo final.

```
#####
'Versao 1.1
'Descricao: faz binning e salva arquivo reduzido e imagem como formato Tiff 8 bits.
'Entrada de dada como um vetor Array_data.
'Implemento em relacao a versao anterior: -Elimina a variavel Var_name
'redundante com os argumentos de Array_data
##########################################
Option Explicit
Sub Main()
Dim WinX: Set WinX = CreateObject("WinX32.WinX32App")
Dim ExpVB: Set ExpVB = CreateObject("WinX32.ExpSetup")
Dim Docs: Set Docs = CreateObject("WinX32.DocFiles")
Dim Winds: Set Winds = CreateObject("WinX32.DocWindows")
' Do Not Edit Above This Line!
'<><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><><>
'set data array and variables
Dim Array_data ' set array data
Array_data = Array("NA_SMS_07052011_213241.Tif",
"NA_SMS_07052011_214554.Tif", "NA_SMS_07052011_215906.Tif",
"NA_SMS_07052011_221218.Tif", "NA_SMS_07052011_222530.Tif",
"NA_SMS_07052011_223841.Tif", "NA_SMS_07052011_225153.Tif",
"NA_SMS_07052011_230505.Tif", "NA_SMS_07052011_231817.Tif",
"NA_SMS_07052011_233129.Tif", "NA_SMS_07052011_234441.Tif",
```

```
"NA_SMS_07052011_235753.Tif", "NA_SMS_08052011_001104.Tif",
"NA_SMS_08052011_002417.Tif")
Dim AD : AD = UBound(Array_data)
Dim i 'define counter
' set directories
Dim Var_MMDD : Var_MMDD ="0507"
Dim Var_datadir: Var_datadir = "F:\hraw\2011_SMS\"+ Var_MMDD + "\"'
set the data input directory
Dim Var_saveon: Var_saveon =
"F:\reduzidos\imageador\2011_SMS\1024x1024\"+ Var_MMDD + "\"' set
directory to save binned image
Dim Var_save8bits: Var_save8bits =
"F:\reduzidos\imageador\2011_SMS\1024x1024\"+ Var_MMDD + "\8bits\"' set
directory to save 8bits image
'loop to open and work on data array
For i=0 To AD
'open the raw image
Dim Var1: Var1 = dt_TIFF ' Get file type
Dim Var2: Var2 = Var_datadir + Array_data(i) 'Get name of file
Dim Doc1: Set Doc1 = CreateObject("WinX32.DocFile") ' Create a DocFile
Doc1.Open Var2 ' Open the file
Dim Wnd1: Set Wnd1 = Doc1.GetWindow
Wnd1.SetParam DI_NEEDAUTO, 2 ' Do 5%-95% autoscale
'do binning of the raw image and save it
Dim Var3: Var3 = dt_TIFF ' Get file type
Dim Obj1: Set Obj1 = CreateObject("Winx32.ProcInput")
Obj1.Value = Doc1.GetParam(DM_FILENAME)
Obj1.XStart = Doc1.GetWindow.GetROI.Left
Obj1.XEnd = Doc1.GetWindow.GetROI.Right
Obj1.YStart = Doc1.GetWindow.GetROI.Top
Obj1.YEnd = Doc1.GetWindow.GetROI.Bottom
Obj1.ZStart = 1
Obj1.ZEnd = Doc1.Get Param(DM_NUMFRAMES)
Obj1.DataType = Doc1.GetParam(DM_DATATYPE)
Dim Obj2: Set Obj2 = CreateObject("Winx32.ProcBinSkip")
Obj2.SetParam BINSKIP_AVGFLAG, False ' use average
Obj2.SetParam BINSKIP_BINX, 2 ' set X bin size
```

```
Obj2.SetParam BINSKIP_BINY, 2 ' set Y bin size
Obj2.SetParam BINSKIP_SKIPX, 0 ' set X skip size
Obj2.SetParam BINSKIP_SKIPY, 0 ' set Y skip size
Obj2.SetProcParam PRC_DISPLAYOUTPUT, True ' display the result
Dim Doc2: Set Doc2 = Obj2.Run(Obj1, Var_saveon + Array_data(i),
X_FLOAT) ' Run the math process
Dim Wnd2: Set Wnd2 = Doc2.GetWindow
Wnd2.SetParam DI_NEEDAUTO, 2 ' Do 5%-95% autoscale
Set Obj1 = Nothing
Set Obj2 = Nothing
'save the binned imagem in 8bits format
Dim Var5: Var5 = dt_TIF8 ' Get file type
Doc2.SaveAs Var_save8bits + Array_data(i) , Var5 ' Save File As <name>,
<type> 'close files
Doc2.Close
Doc1.Close
Next
MsgBox("Processo completo.")
End Sub : Main ' finish and run this script
##########################################
```

## PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

### Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.

### Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.