



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



## **ESTUDO DAS ONDAS DE GRAVIDADE DE MÉDIA ESCALA OBSERVADAS NA ESTAÇÃO ANTÁRTICA COMANDANTE FERRAZ (EACF) E NO BRASIL**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/INPE – CNPq/MCTIC)**

**Gabriel Augusto Giongo**

(UFSM, Bolsista PIBIC/CNPq)

CRS/COCRE/INPE–MCTIC

E-mail: gabrielgiongo@hotmail.com

**Dr. José Valentin Bageston**

(Pesquisador do CRS/COCRE/INPE–MCTIC, Orientador).

E-mail: bageston@gmail.com

### **COLABORADORES**

Dr. Nelson Jorge Schuch (CRS/COCRE/INPE)

Dr. Cristiano Max Wrasse (DAE/INPE)

Dr. Cosme Barros Figueiredo (DAE/INPE)

**Julho de 2017**



## **DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:**

### **Título:**

**ESTUDO DAS ONDAS DE GRAVIDADE DE MÉDIA ESCALA  
OBSERVADAS NA ESTAÇÃO ANTÁRTICA COMANDANTE  
FERRAZ (EACF) E NO BRASIL.**

**Processo:** 114037/2016-7

### **Aluno Bolsista no período de agosto/2016 a Julho/2017:**

**Gabriel Augusto Giongo**

Acadêmico do Curso de Física Bacharelado

Centro de Ciências Naturais e Exatas – CCNE/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

### **Orientador:**

**Dr. José Valentin Bageston**

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE – MCTIC

### **Co-Orientador:**

**Dr. Nelson Jorge Schuch**

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE-MCTIC

### **Local de Trabalho/Execução do Projeto:**

Laboratório de Mesosfera e Luminescência Atmosférica – CRS/COCRE/INPE

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCTIC & UFSM, por meio do Laboratório de Mesosfera e Luminescência Atmosférica - LMLA/CRS/COCRE/INPE – MCTIC e com apoio do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT – UFSM.



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiro aos meus pais Jair Valentin Giongo e Sandra Elisa Pertile Giongo, por estarem sempre ao meu lado me apoiando e me ensinando a viver. Agradeço aos meus irmãos Jorge Luiz e Jair Henrique, e a toda minha família por todo apoio, carinho e incentivo que recebo.

Ao Dr. José Valentin Bageston, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRS/COCRE/INPE–MCTIC), por sua dedicação e orientação nas minhas atividades de Iniciação Científica.

Ao Dr. Nelson Jorge Schuch do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/COCRE/INPE-MCTI, meu Co-orientador e Mentor, por todo apoio, dedicação e orientação que tem me prestado.

Ao grupo de alunos graduandos e pesquisadores do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – (CRS/COCRE/INPE-MCTIC), meus sinceros agradecimentos.

De maneira geral, agradeço a todos que de alguma forma colaboraram com a execução deste Projeto de Pesquisa.



## RESUMO

O presente relatório apresenta as atividades desenvolvidas pelo bolsista Gabriel Augusto Giongo, acadêmico do curso de Física Bacharelado, da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, durante o período de Agosto de 2015 a Julho de 2017, no Projeto de Pesquisa: **“Estudo Das Ondas De Gravidade De Média Escala Observadas Na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) e No Brasil”**. O objetivo deste trabalho é o estudo dos eventos de ondas de gravidade atmosféricas de média e pequena escala, assim como a análise, caracterização e classificação das mesmas, de acordo com seus parâmetros físicos (comprimento de onda, velocidade de fase, amplitude e direção de propagação), para os anos 2014, 2015 e 2016. Para a identificação e análise das ondas foram utilizados dados obtidos com um imageador *all-sky* instalado na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF). A análise dos eventos de onda foi feita utilizando programas computacionais desenvolvidos em IDL (*Interactive Data Language*), onde a técnica utilizada para extração dos parâmetros de onda é a Análise de Fourier bidimensional (FFT-2D). As ondas de pequena escala observadas no ano de 2015 apresentaram comprimentos de onda variando entre 10 e 50 km, períodos observados principalmente entre 5 e 15 minutos e a velocidade abrangendo um grande intervalo, desde 5 a 100 m/s, com concentração principal entre 15 e 60 m/s. As direções de propagação das ondas foram em todos os quadrantes, mas com a maioria dos eventos propagando-se para noroeste e as ondas mais rápidas para sul e leste. As ondas de média escala observadas na EACF foram identificadas 146 ondas, que apresentaram as seguintes características: 1) comprimento de onda horizontal variando desde aproximadamente 50 km até próximo de 500 km, com maior ocorrência de ondas entre 50 e 200 km; 2) período observado concentrando-se principalmente entre 15 e 35 minutos; 3) velocidade de fase observada com variação desde 20 a 200 m/s, com maior ocorrência de 50 a 110 m/s. As direções de propagação foram bem variáveis, com a maioria das ondas se propagando para nordeste, leste, sudeste e sul, enquanto que a minoria (25%) das ondas se propagou para sudoeste, oeste, nordeste e norte.



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2 A ATMOSFERA TERRESTRE .....</b>	<b>8</b>
<b>3 ONDAS DE GRAVIDADE .....</b>	<b>10</b>
<b>4 LUMINESCENCIA ATMOSFÉRICA.....</b>	<b>12</b>
<b>5 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA .....</b>	<b>13</b>
<b>5.1 Imageador <i>All-Sky</i> .....</b>	<b>13</b>
<b>5.2 Linearizações das Imagens .....</b>	<b>15</b>
<b>5.3 Análise das Ondas de Pequena Escala.....</b>	<b>17</b>
<b>5.4 Análises das Ondas de Média Escala .....</b>	<b>20</b>
<b>6 RESUSTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>23</b>
<b>6.1 Resultados para as Ondas de Pequena Escala .....</b>	<b>23</b>
<b>6.2 Resultados Para as Ondas de Média Escala.....</b>	<b>26</b>
<b>6.3 Instalação Do Imageador No Observatório Do CRS/INPE.....</b>	<b>28</b>
<b>7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>35</b>
<b>8 TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>36</b>
<b>9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>37</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: perfil de temperatura da atmosfera da Terra.....	8
Figura 2: Esquema de propagação de uma onda de gravidade.....	11
Figura 3: Esquema de um imageador .....	13
Figura 4: (A) Fotografia do modulo de observações de airglow, onde se encontra o imageador all-sky. (B) Cúpula da lente all-sky. ....	14
Figura 5: Exemplos de imagens obtidas com o imageador all-sky. ....	14
Figura 6: Função de lente do imageador all-sky instalado na Estação Antartica Comandante Ferraz.....	17
Figura 7: Mesma imagem da figura 6, linearizada, filtrada e com as estrelas removidas. ....	17
Figura 8: Tela do programa desenvolvido em IDL para a análise espectral.. ....	18
Figura 9: Espectro cruzado da onda indicada no canto inferior da Figura 8.....	19
Figura 10: Espectro de fase associado ao espectro de potencia mosrado pela Figura 10. ....	20
Figura 11: Exemplo de <i>keograma</i> , obitido da noite de 27/08/2011. ....	21
Figura 12: Resultado da análise do keograma mostrado na Figura 12.....	22
Figura 13: Distribuição de horas totais e horas uteis de observação em função dos meses .....	24
Figura 14: Número de eventos de ondas de gravidade observados para o ano de 2015 em função dos parâmetros físicos.....	25
Figura 15: Diagramas das direções dos eventos de onda de gravidade de pequena escala observados para o ano de 2015.....	26
Figura 16: Número de eventos de ondas de gravidade de média escala observados na EACF em função dos parâmetros físicos. ....	27
Figura 17: Gráfico do numero de eventos em função da direção de propagação para os eventos de ondas de gravidade de média escala. ....	28
Figura 18: Foto do imageador que foi instalado no OES. ....	29
Figura 19: Imageador instalado no OES.....	30
Figura 20: Foto do sistema automático de proteção da cúpula do imageador.....	30
Figura 21: Função de lente calculada na calibração através do método manual.....	31
Figura 22: Tela do programa utilizado para a calibração. ....	32
Figura 23: Tela do programa utilizado na calibração após o calculo da função de lente. ....	33
Figura 24: Mapas gerados na calibração do imageador instalado no OES. ....	34



## **1 INTRODUÇÃO**

O estudo da atmosfera terrestre é de grande importância, pois nela ocorrem diversos fenômenos físicos e químicos, muitos deles estão fortemente relacionados entre si. Um exemplo de fenômeno químico que ocorre na Média/Alta atmosfera, região entre 80 e 100 km de altura, são as camadas de aeroluminescência ou airglow, que é uma radiação amorfa e muito tênue emitida por átomos e moléculas da atmosfera durante o dia e a noite. A aeroluminescência pode ser estudada com o uso de vários equipamentos, dentre eles o imageador all-sky, destacado como o principal equipamento utilizado nesse trabalho. Como exemplo de fenômeno físico que ocorre na atmosfera podemos citar o movimento de ondas de diversas escalas espacial e temporal.

Uma das propriedades mais importantes da atmosfera é sua capacidade de suportar movimentos de ondas (ANDREWS et al., 1987), sendo que tais ondas podem ser de diferentes tipos, de acordo com suas escalas espacial e temporal. As ondas na atmosfera são geradas quando uma parcela de ar é perturbada do seu estado de equilíbrio. Esta perturbação pode ser de origem mecânica, por exemplo, quando uma parcela de ar desloca-se sobre uma elevação terrestre; ou térmica, por convecção. O movimento dessas ondas na atmosfera comunica a influência de uma região para a outra através da transferência de energia e momentum (SALBY, 1996).

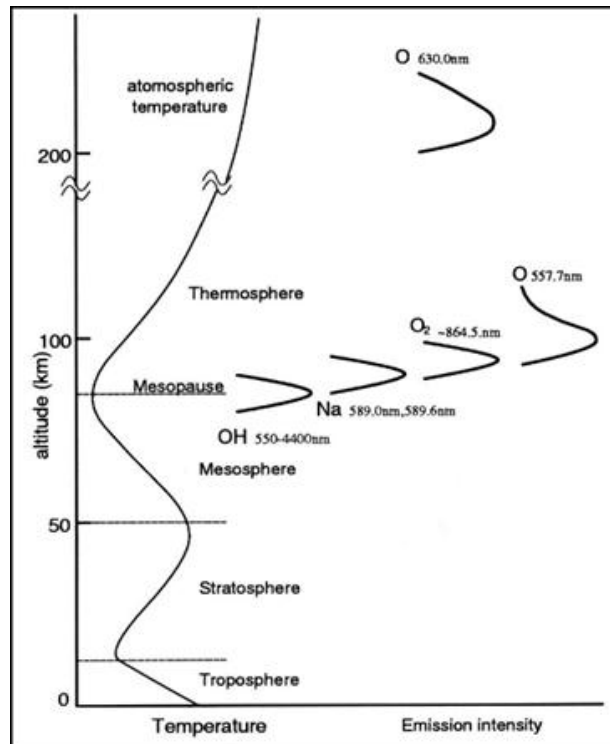
As ondas atmosféricas podem se manifestar na variabilidade de vários campos da atmosfera neutra, tais como na velocidade dos ventos, na densidade, na pressão, na temperatura e na radiação das emissões de airglow (BAGESTON, 2010).

No presente trabalho, as ondas a serem estudadas são as ondas de gravidade de curto período, as quais são conhecidas por desempenharem um importante papel na dinâmica da média atmosfera. A importância das ondas de gravidade se dá pela influência destas na circulação atmosférica e no estado térmico da média atmosfera (VINCENT, 1994).

## 2 A ATMOSFERA TERRESTRE

A atmosfera terrestre é a camada gasosa que rodeia e acompanha o movimento da Terra e foi formada há cerca de 4,6 bilhões de anos. Inicialmente os gases presos no interior da Terra ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ ), escapavam e a envolviam; com as plantas a atmosfera evoluiu até se tornar o espesso manto de ar que é hoje (KIRCHHOFF, 1991).

Para estudar a atmosfera ela pode se dividi-la em camadas de acordo com determinados parâmetros, por exemplo, temperatura ou densidade de elétrons e íons. A classificação da atmosfera, de acordo com o perfil vertical de temperatura é mostrada de forma esquemática na Figura 1. Nesta figura observam-se quatro camadas: Troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. As inflexões ou gradientes nulos de temperatura são chamados de “pausas”, ou seja, Tropopausa, Estratopausa, Mesopausa. A Figura 1 mostra as principais camadas de emissão da aeroluminescência, que serão descrita em detalhes no Capítulo 4.



**Figura 1:** As camadas de emissão de aeroluminescência estão representadas esquematicamente, juntamente com o perfil de temperatura da atmosfera da Terra. Fonte: MAEKAWA (2000, p.4).

As camadas de acordo com a variação de temperatura são detalhadas a seguir:

- **Troposfera:** é a região da atmosfera que vai da superfície terrestre até aproximadamente 12 km de altura, onde a temperatura diminui em função da altitude, chegando ao primeiro mínimo de temperatura na tropopausa, em torno de 220 K. Essa diminuição se deve principalmente a expansão adiabática da Atmosfera, que foi aquecida pela energia na forma de calor cedida pelo solo que absorveu radiação solar.





- **Estratosfera:** Essa camada inicia acima da tropopausa e estende-se até aproximadamente 50 km de altitude até a estratopausa, a temperatura volta a aumentar principalmente devido à absorção da radiação solar ultravioleta pelas moléculas de ozônio e vapor d'água, chegando a um máximo de aproximadamente 300 K.
- **Mesosfera:** é a camada situada acima da estratosfera nela a temperatura diminui com a altitude até chegar ao mínimo de aproximadamente 190K numa altitude de aproximadamente 90 km, denominada de mesopausa. É nessa camada que se encontra as emissões de aeroluminescência atmosférica de maior importância para o estudo das ondas de gravidade.
- **Termosfera:** é a camada mais externa da atmosfera iniciando acima da mesopausa, a temperatura tende a um máximo e ocorrem fenômenos eletromagnéticos e a emissão do airglow na linha vermelha do oxigênio (OI 630,0 nm).

### **3 ONDAS DE GRAVIDADE**

As ondas de gravidade são perturbações transversais ao vetor de propagação de energia da onda, com períodos característicos desde minutos até horas e escala espacial de alguns quilômetros até centenas de quilômetros. O mecanismo físico que possibilita o surgimento das ondas de gravidade é o desequilíbrio entre a força de gravidade e o gradiente de pressão (ou empuxo). Estas ondas propagam-se ascendentemente na atmosfera e crescem em amplitude de forma exponencial, devido ao decréscimo exponencial da densidade com a altura. Este crescimento ocorre até alcançar um nível crítico, onde a maior parte das ondas quebra e transfere energia e momentum para o fluxo básico (BEER, 1974).

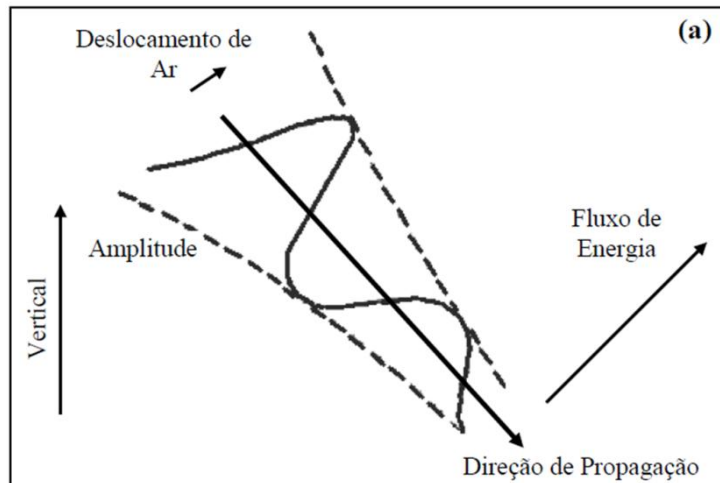
As ondas de gravidade são causadas pelo desequilíbrio entre a força gravitacional e o gradiente de pressão. Estudos recentes sugerem que as ondas de gravidade atuam como importante fonte de perturbação de mesoescala na atmosfera. Em determinadas alturas mesosféricas, as ondas sofrem efeitos de saturação e, conseqüentemente, depositam energia e transferem momento ao fluxo médio, um processo que passa a ser um importante fator na escala de circulação global da alta atmosfera (FRITTS e ALEXANDER, 2003).

A geração das ondas de gravidade depende da condição de estabilidade atmosférica e da presença de algum distúrbio que possa gerar tais instabilidades e levar a formação da onda (WRASSE, 2004). Na troposfera, as possíveis fontes de geração das ondas de gravidade são os fluxos de ar sobre montanhas, as tempestades convectivas, as atividades frontais, o cisalhamento de vento e as interações onda-onda (FRITTS e ALEXANDER, 2003).

As ondas de gravidade podem ser descritas através de uma teoria de perturbação de primeira ordem que é válida para movimentos ondulatórios de pequena amplitude. Porém, nesta aproximação a velocidade do fluido deve ser muito menor que a velocidade de fase da onda, o que resulta na filtragem de todas as interações de ordem superior entre as ondas de diferentes comprimentos de onda e períodos (FECHINE, 2007).

De acordo com a equação de Taylor-Goldstein (ALMEIDA, 2010, P.28), principal equação que descreve a propagação das ondas de gravidade, as ondas podem ser classificadas como propagantes ou evanescentes. As ondas propagantes são caracterizadas por se propagarem tanto na horizontal quanto na vertical, enquanto que as ondas evanescentes se propagam apenas horizontalmente. As ondas propagantes incluem as ondas internas de gravidade, que, ao se deslocarem ascendentemente na atmosfera aumentam sua amplitude, devido ao decréscimo da densidade atmosférica, de forma a manter a conservação da energia (BAGESTON, 2010).

A Figura 2 mostra uma onda de gravidade se propagando. Observa-se na figura que a energia da onda se propaga em um angulo reto em relação à velocidade de fase da onda e a amplitude da onda aumenta com a altitude (HARGREAVES, 1992).



**Figura 2:** Esquema de propagação de uma onda de gravidade, que demonstra que a amplitude e a velocidade de fase crescem com a altitude. Fonte: Adaptado de Hargreaves (1992, p.126)

Uma onda de gravidade, ao se propagar na atmosfera, pode encontrar uma região onde o vento médio apresenta a mesma velocidade de fase (mesma magnitude, direção e sentido) da onda (BAGESTON, 2010). Quando isso acontece, chama-se esta região de nível crítico.

Diversos campos atmosféricos podem influenciar na propagação das ondas de gravidade, sendo que os principais campos são os de ventos e de temperatura. A variação desses campos na atmosfera podem causar reflexão das ondas ou formar canais onde estas podem se propagar. Estes canais são conhecidos como ducto térmico, devido a gradientes de temperatura, ou ducto Doppler, causado por gradientes de vento (ISLER et al., 1997).

O surgimento destes canais na atmosfera limita a propagação vertical das ondas de gravidade e restringe o transporte de energia e momentum destas ondas para a área confinada pelo canal, podendo a onda deslocar-se grandes distâncias horizontais nesses canais (WRASSE, 2004).

#### **4 LUMINESCENCIA ATMOSFÉRICA**

A luminescência atmosférica ou aeroluminescência (do inglês *airglow*) é definida como a luz continuamente emitida pela atmosfera da Terra (*Chamberlain, 1961*). Essa emissão é causada pelas reações químicas dos constituintes atmosféricos, devido à excitação ao absorver a radiação proveniente do sol, ou de outras fontes cósmicas. Esses constituintes, ao relaxarem emitem uma tênue luz, mas de extensa faixa espectral, que denominamos de aeroluminescência.

A aeroluminescência ocorre durante todo o dia e em qualquer latitude, mas é durante a noite que ela se torna útil para o estudo das ondas de gravidade, pois é mais fácil separar as emissões da aeroluminescência do espectro de radiação celeste.

Inicialmente, a aeroluminescência era confundida com as auroras, que ocorrem nas regiões polares durante a noite. Posteriormente, análises mais cuidadosas do espectro emitido pelo céu noturno levaram a uma boa diferenciação desses dois tipos de radiação (*BAGESTON, 2005*).

No início do século XX, sabia-se que o oxigênio era o responsável pela emissão das linhas nos comprimentos de onda 557,7 nm e 630,0 nm. *Rayleigh (1930)*, que foi um grande estudioso da linha 557,7 nm, conseguiu distinguir as auroras da aeroluminescência, chamando esta última de “aurora não-polar”, que mais tarde passou a se chamar de *airglow* ou aeroluminescência. Em homenagem a este pesquisador deve-se o nome da unidade de intensidade absoluta, normalmente utilizado em Aeronomia, o *Rayleigh (R)*, já definido anteriormente (*BAGESTON, 2005*).

Algumas das linhas mais importantes da emissão da aeroluminescência, do ponto de vista da Aeronomia, são as linhas espectrais do oxigênio atômico em 557,7 nm (verde) e 630,0 nm (vermelha); o duplete de sódio, em 589,3 nm; as bandas de emissão do radical hidroxila, OH, ditas bandas de *Meinel*, e as bandas do oxigênio molecular (*BAGESTON, 2005*).

A aeroluminescência atmosférica é utilizada para se estudar ondas de gravidade devido à perturbação que estas ondas causam sobre as camadas emissoras. Parte-se do princípio que, a passagem de ondas pela região emissora pode elevar ou baixar a altura destas camadas adiabaticamente. Assim, é possível relacionar a perturbação na altura da camada também com mudanças de temperaturas pelo processo adiabático. Enquanto a mudança na densidade é responsável pela mudança na intensidade, as mudanças de temperatura irão afetar os coeficientes de taxa de reação nos processos que produzem as camadas, e então a intensidade de luz radiada irá mudar (*MEDEIROS, 2001*).

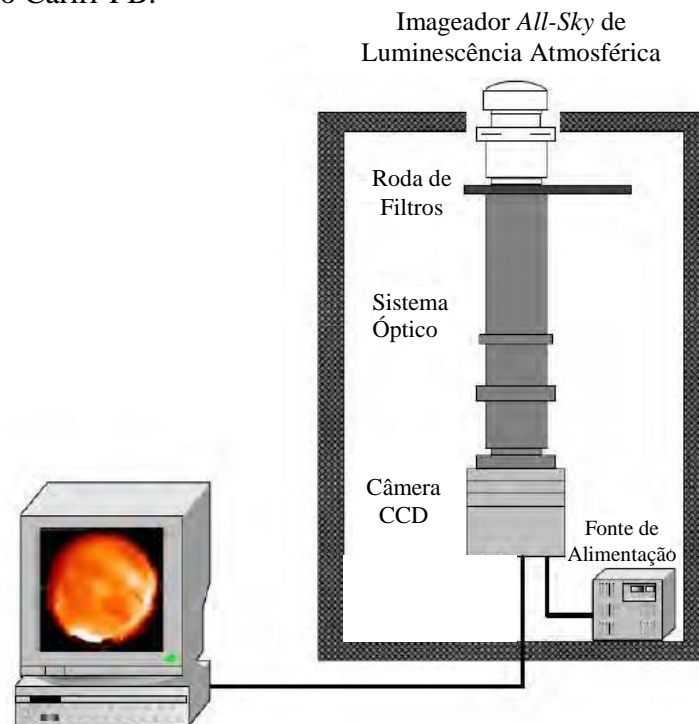
## 5 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

### 5.1 Imageador *All-Sky*

O imageador é um equipamento basicamente constituído por um sistema óptico e por uma câmara com detector CCD, sigla em inglês para *Charge Coupled Device*, que é capaz de detectar as variações na intensidade das emissões de aeroluminescência noturna na região mesosférica e registrá-las por meio de imagens (MEDEIROS, 2001).

O sistema ótico do imageador é constituído de uma lente *all-sky*, ou *fish eye*, com um campo de visão de 180°, que capta toda a luz do céu noturno local; um sistema de lentes telecêntricas e uma roda de filtros que seleciona as linhas ou bandas da luminescência atmosférica (como por exemplo, a banda OH NIR). O imageador também conta com um sistema de refrigeração na própria CCD e uma fonte de alimentação.

A Figura 3 mostra esquematicamente um imageador *all-sky* como os que estão instalados na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), em Cachoeira Paulista-SP e em São João do Cariri-PB.



**Figura 3:** Esquema de um imageador utilizado para medir as emissões da luminescência atmosférica noturna na EACF e em Cacheira Paulista-SP. Fonte: Adaptado de Wrasse (2004).

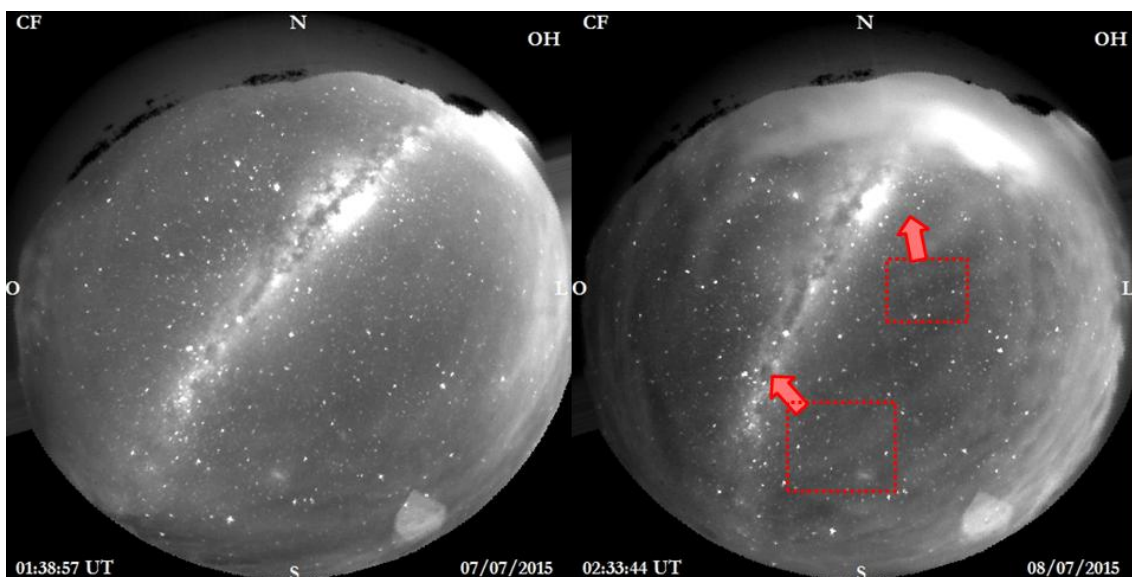
A seguir, na Figura 4 é apresentada, à esquerda, uma foto que mostra uma visão geral do módulo de Punta Plaza e seus arredores (a aproximadamente 1 km de distância à Oeste da EACF), onde se encontra instalado um imageador *all-sky* e um radar meteórico (antenas ao lado do container). A foto à direita na Figura 4 mostra a cúpula de observação com a parte superior do imageador e sua lente *fish-eye* no interior da cúpula.



**Figura 4:** (A) Fotografia do módulo de observações de airglow, na EACF, onde se encontra o imageador *all-sky*. (B) Cúpula onde está instalada a câmera imageadora de ondas de gravidade, destacando-se no interior dela parte do sistema telecêntrico e a lente *fish-eye*.

As principais vantagens na técnica do imageamento no estudo da dinâmica da atmosfera, incluindo os estudos das ondas de gravidade, é a grande área espacial visualizada nas imagens, sendo possível a visualização simultânea de diferentes estruturas ondulatórias nas imagens; a possibilidade de investigar a propagação vertical de ondas com a utilização de dois ou mais filtros de interferência e a investigação de estruturas de ondas com alguns quilômetros (~6) até estruturas de dezenas de quilômetros (MEDEIROS, 2001).

A Figura 5 apresenta dois exemplos de imagens obtidas pelo imageador *all-sky* da EACF, na banda de emissão do OH NIR. Na imagem à direita da Figura 5, apresentamos duas caixas que estão identificando duas de ondas de gravidade presentes nas imagens e setas que estão indicando a direção de propagação das ondas.



**Figura 5:** Exemplos de imagens obtidas com o imageador *all-sky* na emissão do OH NIR na península antártica. A esquerda imagem do dia 07/07/2015 as 01:38 UT, e, a direita, imagem do dia 12/08/2015 as 05:50 UT, em que identifica-se a presença de oscilações. Na figura a direita, há duas caixas sobre as ondas indicando sua posição e setas indicando a direção de propagação.

A partir de observações do airglow por imageadores é possível investigar a estrutura horizontal e as características das ondas de gravidade por meio de técnica de análise espectral. Em geral, as emissões de airglow utilizadas para esse fim são as provenientes da região da Mesosfera (~80–100 km), ou seja, as emissões do OH NIR; do OI 557,7 nm; do Na (<sup>2</sup>P) e do O<sub>2</sub>(0-1). Os imageadores de airglow são mais adequados para observar ondas de gravidade com curtos períodos (tipicamente menores que 1 hora) e com pequenos comprimentos de onda horizontal (<100 km) (BAGESTON, 2010).

A espessura das camadas de emissão da Mesosfera e baixa Termosfera são tipicamente de 6 a 10 km e possibilita estudar ondas de gravidade com comprimentos de onda verticais maiores que estes limites. Além disso, também é possível detectar e estudar ondas de gravidade de grandes dimensões horizontais (comprimentos de onda horizontais de centenas de quilômetros) por meio da técnica dos *keogramas* (detalhes na Seção 5.4).

## 5.2 Linearizações das Imagens

A linearização, ou ajuste das imagens para remover os efeitos de borda, é de extrema importância para determinar as características das ondas de gravidade de forma correta, onde os pixels (sistema de referência da CCD) nas imagens linearizadas podem ser relacionados com o sistema de coordenadas geográficas (GARCIA et al., 1997).

A transformação de coordenadas tem como objetivo mapear as coordenadas da imagem original em coordenadas geográficas, para só então aplicar a análise espectral e determinar o comprimento de onda horizontal, período, velocidade de fase e a direção de propagação das ondas de gravidade (ALMEIDA, 2010).

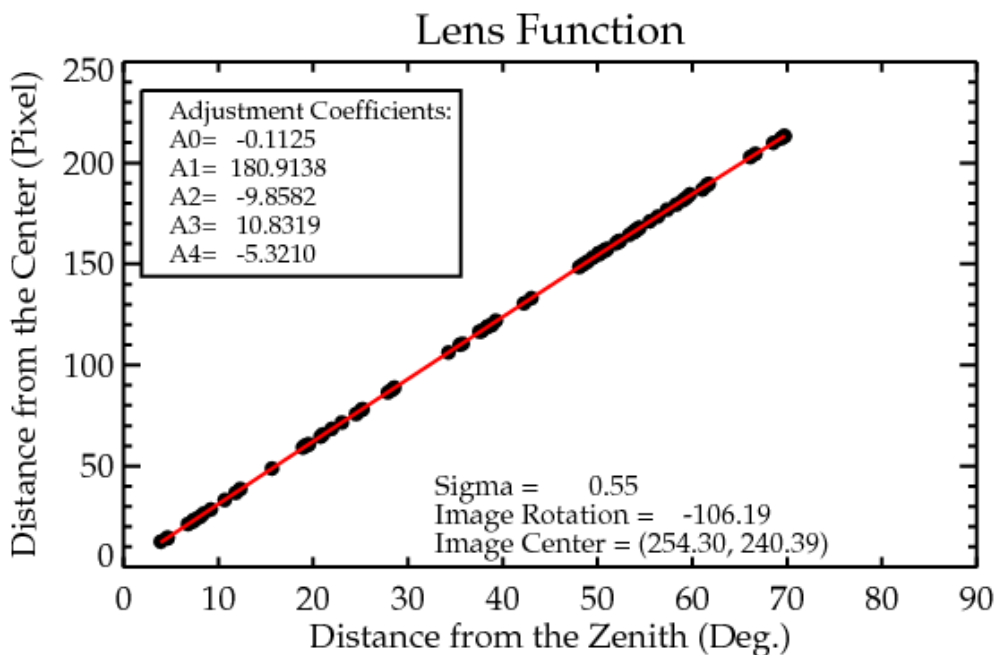
A metodologia utilizada baseia-se no processo de transformação de coordenadas da imagem original para as coordenadas geográficas (HAPGOOD; TAYLOR, 1982; GARCIA et al., 1997). O método utilizado introduz um sistema de coordenada padrão, que é uma transformação linear das coordenadas da imagem original. Esse novo sistema é representado em termos das coordenadas de azimute e elevação, representadas na calibração por cada estrela que foi identificada na imagem. A partir das coordenadas de azimute e elevação, a imagem é então projetada no sistema de coordenadas geográficas. Nesse último sistema, o zênite é localizado no centro da imagem e x e y correspondem aos eixos leste-oeste e norte-sul, respectivamente (MEDEIROS, 2001).

Com a função da lente determinada é possível mapear as coordenadas da imagem padrão da aeroluminescência em coordenadas geográficas (ALMEIDA, 2010). O algoritmo empregado nesta transformação foi desenvolvido por Maekawa (1998) e descrito em detalhes por Medeiros (2001) em sua tese de doutorado.

A transformação de coordenada da imagem original para coordenada geográfica é na prática, um processo moroso, pois envolve o mapeamento das estrelas mais

brilhantes da imagem original (i, j) para a coordenada de azimute e elevação (az,el) . Este procedimento em geral é feito manualmente e necessita de algum software comercial ou livre que forneça uma carta celeste para o mesmo instante em que a imagem da aeroluminescência foi adquirida. Além disto, este mapeamento requer o maior número de estrelas visíveis na imagem da aeroluminescência, em geral em torno de 40 a 50 estrelas, de forma a minimizar os erros na determinação da função da lente. Todo este processo exige paciência e tempo para que se obtenha um resultado mais preciso possível. A cada mudança no posicionamento do imageador é necessário realizar uma nova calibração espacial (ALMEIDA, 2010).

A próxima etapa da calibração consiste em determinar a função da lente em função da elevação de cada estrela selecionada na etapa anterior (ALMEIDA, 2010). A função de lente para o imageador que se encontra atualmente na EACF é apresentada na Figura 6, nela também pode ser visto a posição do zênite real do local e a rotação inicial que deve ser aplicado á imagem, antes de ela ser utilizada para o processamento e análise.



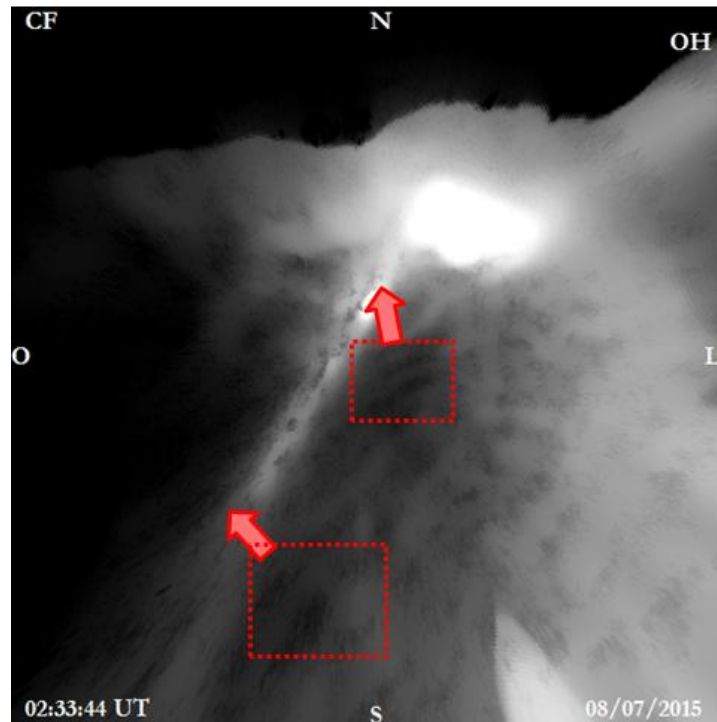
**Figura 6:** Função de lente do imageador all-sky instalado na Estação Antártica Comandante Ferraz.

A partir dos resultados obtidos no cálculo da função de lente a imagem de airglow é alinhada de modo que seu topo fique para o norte e, posteriormente ela é projetada numa área plana, em coordenadas geográficas, na altura da emissão correspondente. Após a linearização é feita a remoção de estrelas, importante para remover os picos de luminosidade acentuados, e a aplicação de um filtro passa alta com frequência de corte de 5 km.

A Figura 7 mostra a mesma imagem da à direita da Figura 5, onde podemos visualizar duas ondas, mas nesse caso a imagem esta linearizada, filtrada e com as



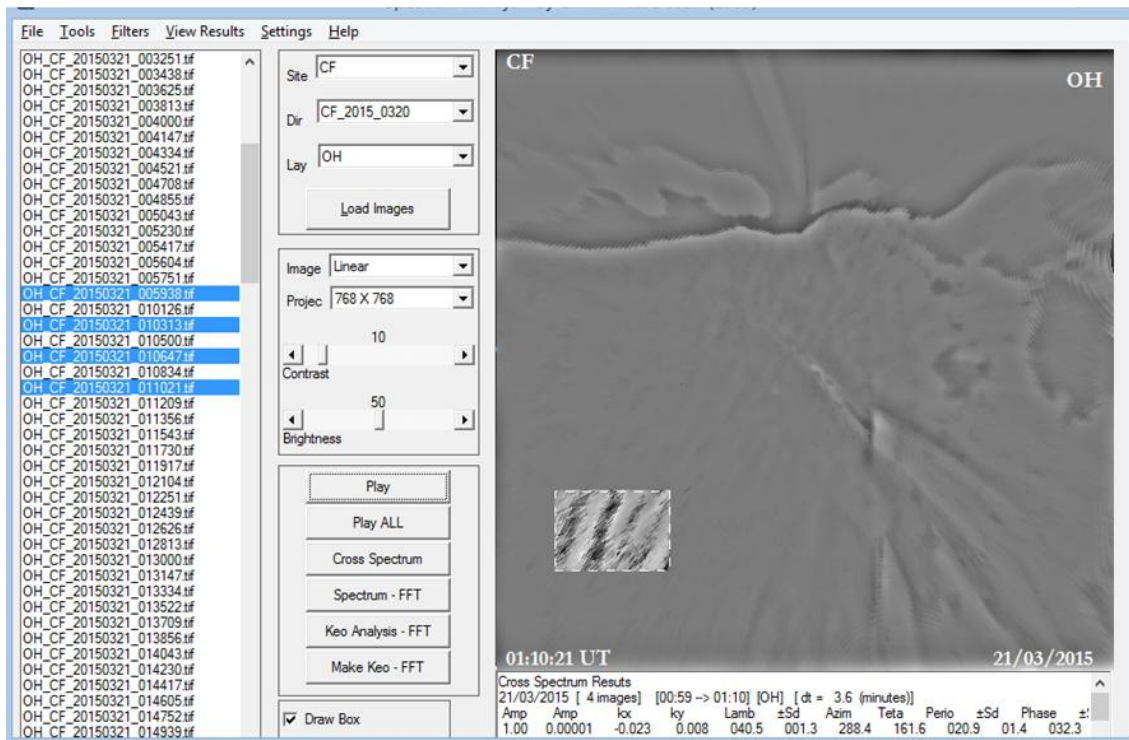
estrelas removidas. Novamente temos setas representando a posição e direção de propagação das ondas.



**Figura 7:** Mesma imagem da figura 6, linearizada, filtrada e com as estrelas removidas. A foto contém as caixas indicando a posição das ondas e as setas indicando a direção de propagação das ondas.

### 5.3 Análise das Ondas de Pequena Escala

Após a identificação dos eventos de onda e o pré-processamento, aplica-se a análise espectral a uma sequência de imagens previamente selecionadas. A Figura 8 mostra a tela do programa desenvolvido para a análise espectral das imagens, em que podemos ver algumas imagens selecionadas, com um evento a ser analisado selecionado com uma ‘caixa’. Nessa imagem podemos ver todo o pré-processamento feito com as imagens, antes de se fazer a análise propriamente dita.



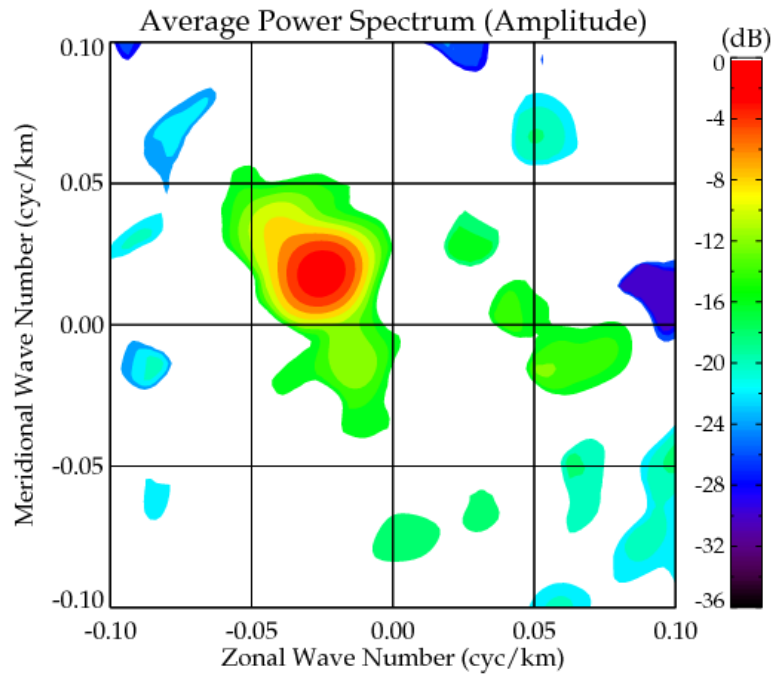
**Figura 8:** Tela do programa desenvolvido em IDL para a análise espectral. Nele podemos ver uma sequencia de imagens pré-processadas com uma ‘caixa’ selecionada no evento a ser analisado.

A análise espectral empregada consiste na aplicação da transformada de Fourier discreta ao conjunto de imagens (BAGESTON, 2010). A descrição completa da aplicação dessa análise nas imagens de airglow pode ser encontrada em Wrasse et al. (2007).

O espectro de potência em duas dimensões é definido pelo modulo quadrático,  $|F(k,l)|^2$ , da Transformada de Fourier Discreta em duas dimensões (TFD-2D). O espectro de potência é aplicado à região de interesse em todo o conjunto de imagens e então é feito o espectro cruzado, que contém informações sobre a amplitude e fase dos sinais e remove a ambiguidade do sentido de propagação do espectro de potencia.

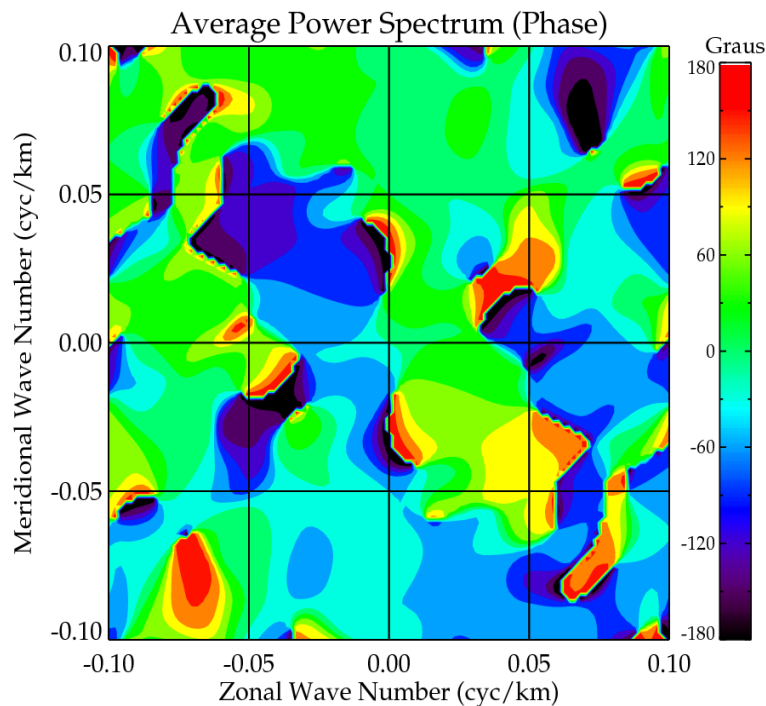
A amplitude do espectro de potencia é expressa pelo módulo do espectro cruzado e a fase é calculada geometricamente (WRASSE, 2004). Para o número de onda na qual a amplitude é máxima, a fase do espectro cruzado representa a diferença de fase causada pela propagação da onda entre estas imagens. Maekawa (2000) também descreve o procedimento utilizado para determinar os parâmetros das ondas de gravidade utilizando os resultados do espectro cruzado. Wrasse et al. (2007) e Bageston (2010) apresentam exemplos práticos, juntamente com o conjunto de equações da TFD-2D, da aplicação dessa técnica para obter os parâmetros físicos das ondas de gravidade. Se existirem medidas do vento na altura da camada de emissão observada, como as medidas de radar meteorológico ou de Média Frequência (MF), simultaneamente às observações das ondas, pode-se determinar o período intrínseco e a velocidade de fase intrínseca das ondas.

A Figura 9 mostra o espectro cruzado de 5 imagens sucessivas da onda indicada na parte inferior da Figura 7. Nele podemos extrair a direção de propagação da onda e o comprimento de onda horizontal.



**Figura 9:** Espectro cruzado da onda indicada no canto inferior da Figura 8

A Figura 10 mostra o espectro de fase médio associado ao espectro cruzado da Figura 9. Com ele podemos calcular a velocidade de fase da onda, e juntamente com o comprimento de onda extraído do espectro de potencia é calculado o período da onda.



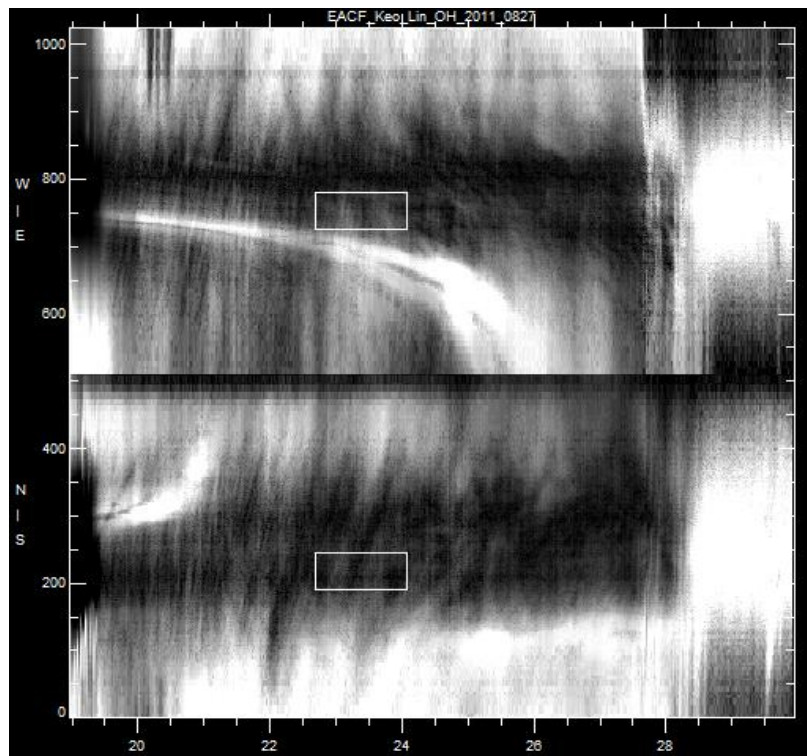
**Figura 10:** Espectro de fase associado ao espectro de potencia mostrado pela Figura 10.

#### 5.4 Análises das Ondas de Média Escala

A melhor técnica para a análise das ondas de gravidade de média escala é a dos *Keogramas*. Essa técnica consiste, basicamente, de cortes meridionais (norte-sul) e zonais (leste-oeste) nas imagens de aeroluminescência, no final de todos os cortes é formado um mosaico ao longo do tempo, sendo mais simples a visualização das oscilações, pois a mesmas estão estáticas (FIGUEIREDO, 2015).

Os cortes utilizados, em geral, atravessam as imagens inteiras e passam pelo centro da imagem (zênite local). Com a utilização de *Keogramas* é possível estudar separadamente as oscilações que ocorrem exclusivamente em cada direção (zonal e meridional) e depois os parâmetros da onda são obtidos por relações geométricas entre as componentes (PAULINO, 2012).

A Figura 11 apresenta um exemplo de *keograma* da noite de 27/08/2011, nela são apresentados os *keogramas* zonal (painel superior), e meridional (painel inferior), os eixos horizontais indicam o tempo em horas UT. As ‘caixas’ em branco indicam a seleção de um evento de onda a ser analisado.

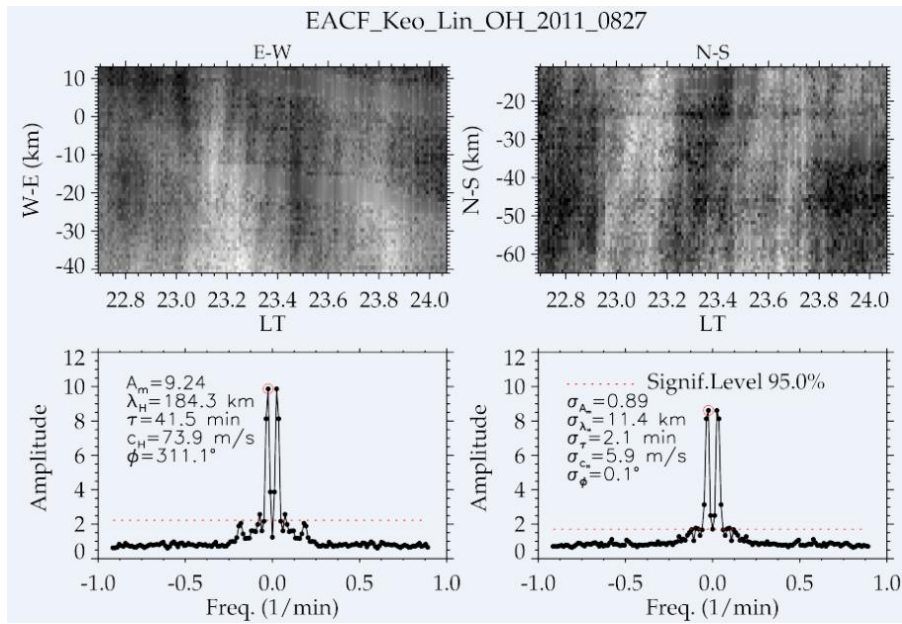


**Figura 11:** Exemplo de *keograma*, obtido da noite de 27/08/2011. O painel superior apresenta o *keograma* zonal (E-O) e o inferior o *keograma* meridional (N-S), e o eixo horizontal representa o tempo. A ‘caixa’ branca mostra a seleção de um evento de onda de gravidade de média escala.

Para realizar a análise espectral dos *keogramas* é escolhida uma região que contenha a oscilação de interesse tanto na componente zonal como na componente meridional, assim como na Figura 11, ressaltando que a dimensão da seleção deve ser igual nos dois *keogramas* (FIGUEIREDO, 2017). Então é aplicada a transformada de Fourier discreta, em seguida é calculado o espectro cruzado. Com o espectro cruzado de potencia unidimensional tem-se a amplitude e a fase do mesmo, e então segue o procedimento:

- Definido a frequência a partir da amplitude máxima, determina-se o período
- Depois, calcula-se a velocidade das componentes zonais e meridionais
- Em seguida, determina-se o comprimento de onda para as componentes zonais e meridionais.
- Por fim, o cálculo do comprimento de onda horizontal, a velocidade de fase horizontal e a direção de propagação podem ser obtidas geometricamente.

A Figura 12 mostra o resultado da análise feita para a onda selecionada no *keograma* da Figura 11, nela podemos ver em destaque as ‘caixas’ selecionadas nos *keogramas*, que claramente demonstram um movimento ondulatório. Podemos ver também a amplitude do espectro cruzado das respectivas ‘caixas’ e os parâmetros calculados para a onda selecionada. A onda analisada teve um comprimento de onda de 184,3 km, período de 41,5 min, velocidade de fase de 73,9 m/s, e direção de propagação de 311,1°.



**Figura 12:** Resultado da análise do keograma mostrado na Figura 11. As imagens superiores mostram em destaque as ‘caixas’ selecionadas nos keogramas zonal e meridional. As imagens inferiores mostram a amplitude do espectro cruzado das respectivas ‘caixas’, também vemos os parâmetros calculados para a onda, e os valores de desvio padrão.

Um ponto que se deve atentar é na hora de selecionar a ‘caixa’. Preocupar-se em escolher a região que tenha a oscilação bem definida e, sobretudo selecionar uma região, no tempo, que englobe o dobro do tamanho da oscilação, porque isso é um fator preponderante no cálculo do período e no restante dos parâmetros da oscilação (FIGUEIREDO, 2015).



## **6 RESUSTADOS E DISCUSSÕES**

As primeiras atividades previstas para o decorrer do projeto era a revisão bibliográfica do assunto relacionado. Foi feita uma revisão mais aprofundada sobre a calibração e o pré- processamento das imagens de aeroluminescência, assim como a instrumentação envolvida, e o uso de programas computacionais desenvolvidos em IDL. Também foram realizados seminários semanais em que participaram os alunos bolsistas e estagiários e pesquisadores do CRS/INPE.

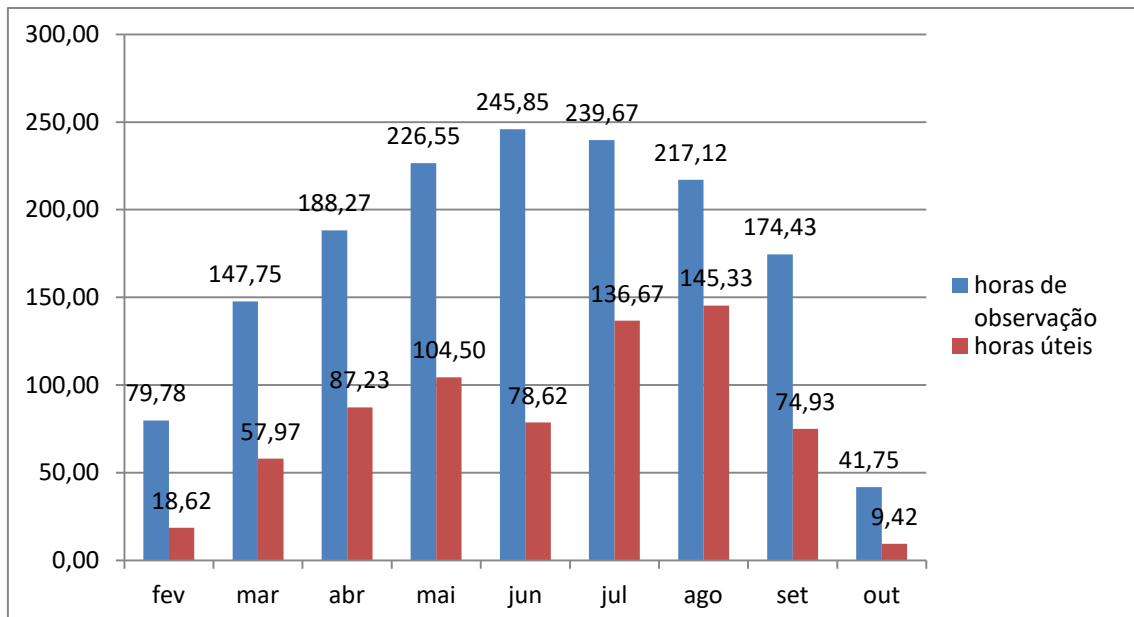
Na primeira parte deste projeto foram adquiridos os resultados aqui apresentados referentes apenas às observações realizadas na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) para os anos de 2014 e 2015, para o caso das ondas de pequena escala.

Na segunda parte deste projeto focou-se na análise das ondas de média escala observadas através dos *keogramas* gerados para os anos citados, e para anos anteriores, também da Estação Antártica Comandante Ferraz.

### **6.1 Resultados para as Ondas de Pequena Escala**

Foram analisados os dados obtidos do imageador da EACF na banda de emissão do OH NIR, correspondentes aos anos de 2014 e 2015. Para o ano de 2015 tivemos 228 dias de observação, desse total apenas 101 dias são uteis para a observação das ondas de gravidade, ou seja, o céu não está totalmente nublado, e sem contaminação luminosa, como o sol ou a lua. Ao todo são aproximadamente 700 horas de observação uteis.

A Figura 13 mostra o gráfico da distribuição de horas totais e uteis de observações distribuídas de acordo com os meses correspondentes. Nele podemos ver que o mês junho foi o mês com mais horas de observação, mas em horas uteis foi um mês de quantidade razoável, já o mês de agosto foi o mês com o maior numero de contagem de horas uteis de observação.



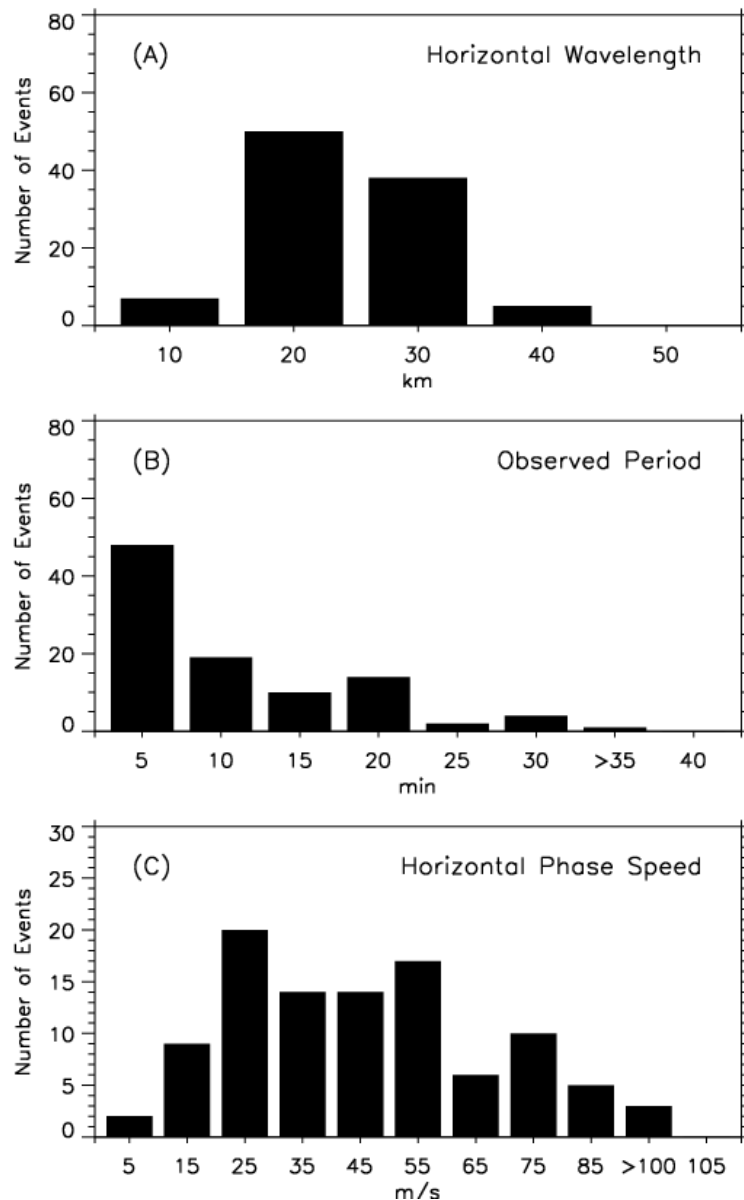
**Figura 13:** Distribuição de horas totais e horas uteis de observação em função dos meses, os números acima das barras são o valor correspondente em horas.

A maior quantidade de eventos observados no ano de 2015 foi de ondas de gravidade de pequena escala, aproximadamente 100 eventos já foram identificados e classificados. Esses eventos foram classificados de acordo com seus parâmetros físicos: comprimento de onda, período, velocidade de fase e direção de propagação.

A Figura 14 mostra os histogramas da distribuição do número de ondas em função de determinado parâmetro físico. O gráfico superior (A) mostra o número de ondas por comprimento de onda horizontal, o gráfico do meio (B) em função do período, e o gráfico inferior (C) em função da velocidade de fase horizontal.

Como vemos no primeiro gráfico, os comprimentos de onda horizontal variaram de 10 a 50 km, com maior ocorrência entre 20 e 30 km. Período variando de 5 mim ate alguns casos com mais de 35 mim, com maior ocorrência entre 5 a 15 mim. A velocidade de fase abrangendo um grande intervalo desde 5 a 100 m/s, mas com uma concentração principal entre 15 e 60 m/s.





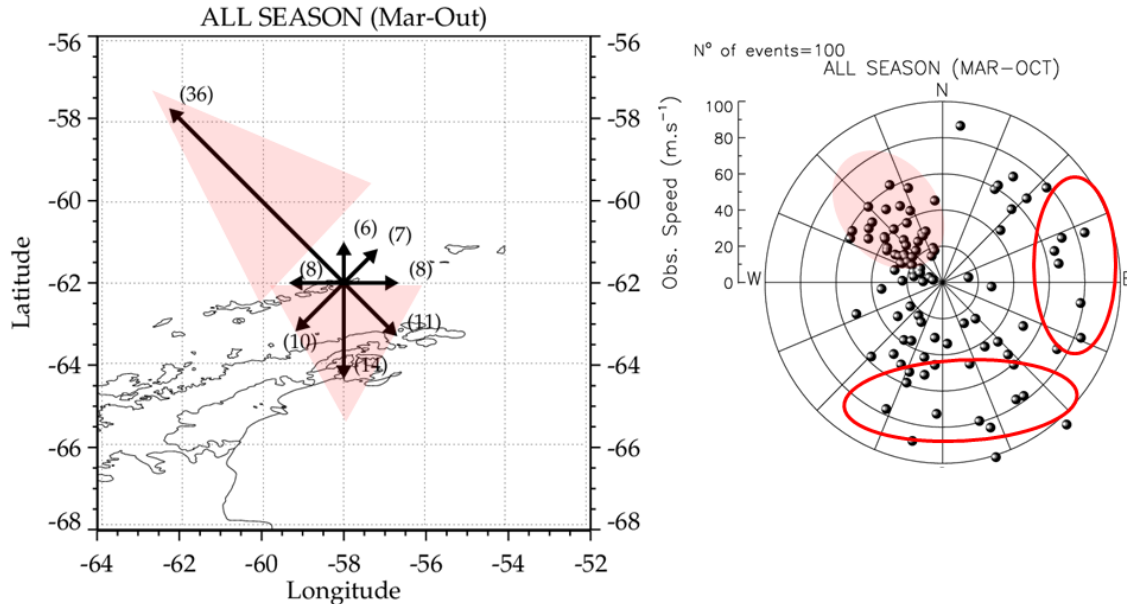
**Figura 14:** Número de eventos de ondas de gravidade observados para o ano de 2015 em função dos parâmetros físicos. (A) numero de eventos por comprimento de onda horizontal. (B) Numero de eventos por período. (C) Numero de eventos por velocidade de fase horizontal.

Quanto a direção de propagação das ondas de gravidade, foram observados eventos se propagando em todas as direções, mas com a maioria dos eventos na direção noroeste, e na direção sul.

A Figura 15 mostra diagramas da direção de propagação das ondas de gravidade observadas. No diagrama da esquerda vemos o numero de eventos identificados em função de sua direção de propagação em que estão representados em seu respectivo quadrante. Identificam-se uma maior quantidade de eventos na direção noroeste, 36 eventos, e na direção sul, 35 eventos.

No diagrama da direita da Figura 15 é mostrada a dispersão das ondas em função de sua direção de propagação e de sua velocidade. Novamente vemos que o maior

número de eventos observados se propaga na direção noroeste, mas dos eventos de maior velocidade, acima de 60 m/s, 16 dos 20 propagam-se preferencialmente na direção sul e leste.



**Figura 15:** Diagramas das direções dos eventos de onda de gravidade de pequena escala observados para o ano de 2015. A esquerda é representado o numero de eventos em função do quadrante de sua orientação. A direita é representado a dispersão dos eventos observados em função da direção e da velocidade.

## 6.2 Resultados Para as Ondas de Média Escala

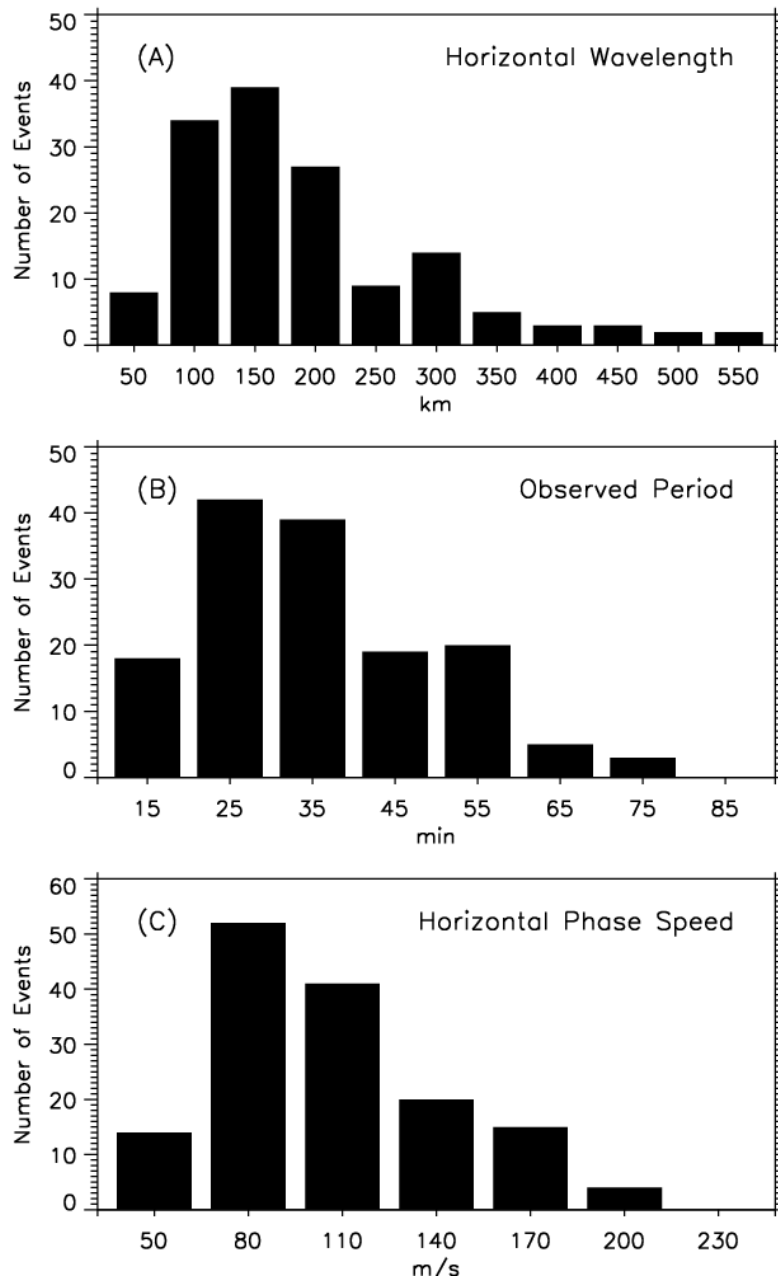
Foram gerados *keogramas* das imagens de airglow da EACF para os anos de 2007, 2010, 2011, 2014, 2015 e 2016, cujos dias tiveram mais de duas horas de observação. Dentre estes foram uteis somente aqueles em que o céu estava limpo e sem contaminação luminosa. Nestes *keogramas* foram identificados eventos de ondas de gravidade de média escala, em que foi feita a análise espectral conforme descrita na seção anterior.

No total, foram 146 eventos de ondas de gravidade de média escala identificados e analisados. Estes eventos foram classificados de acordo com seus parâmetros físicos: comprimento de onda, período, velocidade de fase e direção de propagação.

A Figura 16 mostra os histogramas da distribuição do numero de ondas em função de determinado parâmetro físico. O histograma superior (A) mostra o numero de ondas por comprimento de onda horizontal, o histograma do meio (B) em função do período, e o histograma inferior (C) em função da velocidade de fase horizontal.

Como vemos no primeiro histograma, os comprimentos de onda horizontal variaram de 5 a aproximadamente 500 km, com maior ocorrência entre 50 e 200 km. Período variando de 5 mim ate alguns casos com mais de 60 mim, com maior ocorrência entre 15 a 35 mim. A velocidade de fase abrangendo um intervalo desde

aproximadamente 50 m/s até alguns casos com quase 200 m/s, mas com uma concentração principal menor que 110 m/s.



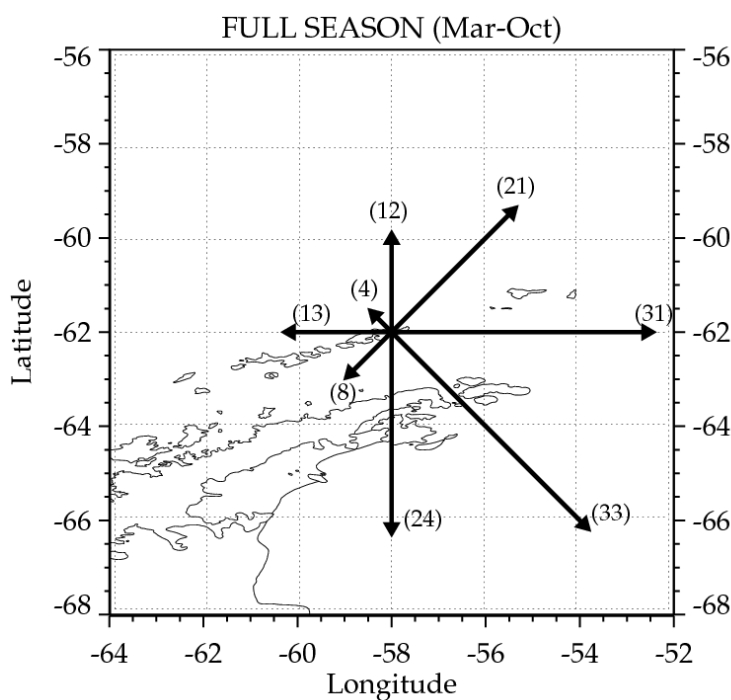
**Figura 16:** Número de eventos de ondas de gravidade de média escala observados na EACF em função dos parâmetros físicos. (A) número de eventos por comprimento de onda horizontal. (B) Número de eventos por período. (C) Número de eventos por velocidade de fase horizontal.

Como mostrado nos histogramas das Figuras 14 e 16, as ondas de média escala possuem dimensões espaciais e temporais muito maiores que as ondas de pequena escala. Em termos de comprimento de onda (estrutura horizontal das ondas), as ondas de média escala possuem aproximadamente seis vezes o comprimento de onda das de pequena escala, sendo que as primeiras apresentam um máximo de ocorrência em torno de 25 km e as de média escala têm um pico de ocorrência em 150 km.

Quanto ao período, as ondas de média escala possuem um período duas vezes maior que as ondas de pequena escala, sendo que o máximo de ocorrência das ondas de média escala é 30 min enquanto que o máximo de ocorrência das de pequena escala é de 15 min. E em termos de velocidade de fase, as ondas de média escala são aproximadamente 3 vezes mais rápidas que as de pequena escala, sendo que o máximo de ocorrência das primeiras é de 90 m/s, e as de pequena escala tem um pico de ocorrência em aproximadamente 30 m/s.

Quanto às direções de propagação das ondas de média escala, tivemos eventos se propagando em todas as direções, mas com a maioria dos eventos se propagando para leste e sul.

A Figura 17 mostra um gráfico do numero de eventos em função da direção de propagação, onde podemos ver que se identifica uma maior quantidade de eventos, na direção sul e sudeste, 57 eventos, e na direção leste e nordeste, 52 eventos.



**Figura 17:** Gráfico do numero de eventos em função da direção de propagação para os eventos de ondas de gravidade de média escala analisadas.

### 6.3 Instalação do Imageador no Observatório Espacial do Sul (OES/INPE)

No inicio do ano foi feita a instalação de um imageador *all-sky* de baixo custo no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/INPE-MCTIC), em que o aluno ajudou na colocação do aparelho e na regulagem do foco, assim como na calibração das imagens.

Foram necessárias varias tentativas da equipe para se conseguir ajustar o foco, e várias dessas vezes o aluno foi ajudar no ajuste. O empecilho que a equipe teve é que o tubo de lentes utilizado não é o tubo próprio da câmera, portanto foi necessário remover

o equipamento e fazer algumas partes extras para o tubo telocêntrico até que se conseguiu o ajuste.

A Figura 18 é uma foto do imageador que foi instalado na sua “versão final”, com os tubos e lentes que se conseguiu ajustar o foco das imagens. Já a Figura 19 é uma foto do imageador instalado em seu suporte, mas sem a cúpula e o sistema de proteção automático que foi desenvolvido.

Na Figura 20 podemos ver o sistema de proteção de cúpula que foi desenvolvido por um aluno de doutorado para abrir automaticamente quando anoitece, e fechar ao amanhecer. Na figura o sistema esta no processo de abertura.



**Figura 18:** Foto do imageador que foi instalado no OES.



**Figura 19:** Imageador instalado no OES.



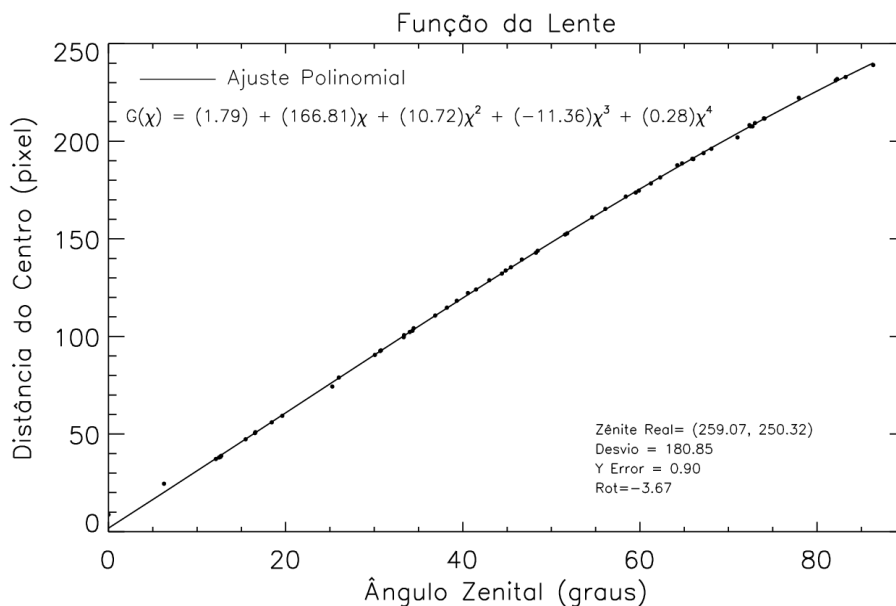
**Figura 20:** Foto do sistema automático de proteção da cúpula do imageador no processo de abertura.

Após o sucesso na instalação e regulagem do imageador foi utilizada a primeira imagem de céu limpo, ainda na mesma noite que conseguimos regular o foco, para fazer a calibração.

Foi feita a calibração de duas formas: a primeira foi feita de forma manual, e a segunda com o auxílio de um programa que automatiza a identificação das estrelas.

Na maneira manual foram escolhidas 65 estrelas em que foram identificadas tanto na imagem como em um mapa celeste, então foi anotado a posição em pixels na imagem, e a posição em azimute e elevação de acordo com o mapa celeste da respectiva estrela. Os valores anotados foram organizados em uma tabela, que foi lida por uma rotina desenvolvida em IDL, que calculou a função de lente para o imageador.

Algumas estrelas tiveram que ser removidas, pois seus valores estavam muito fora da função. A Figura 21 mostra a função de lente resultante desse procedimento.



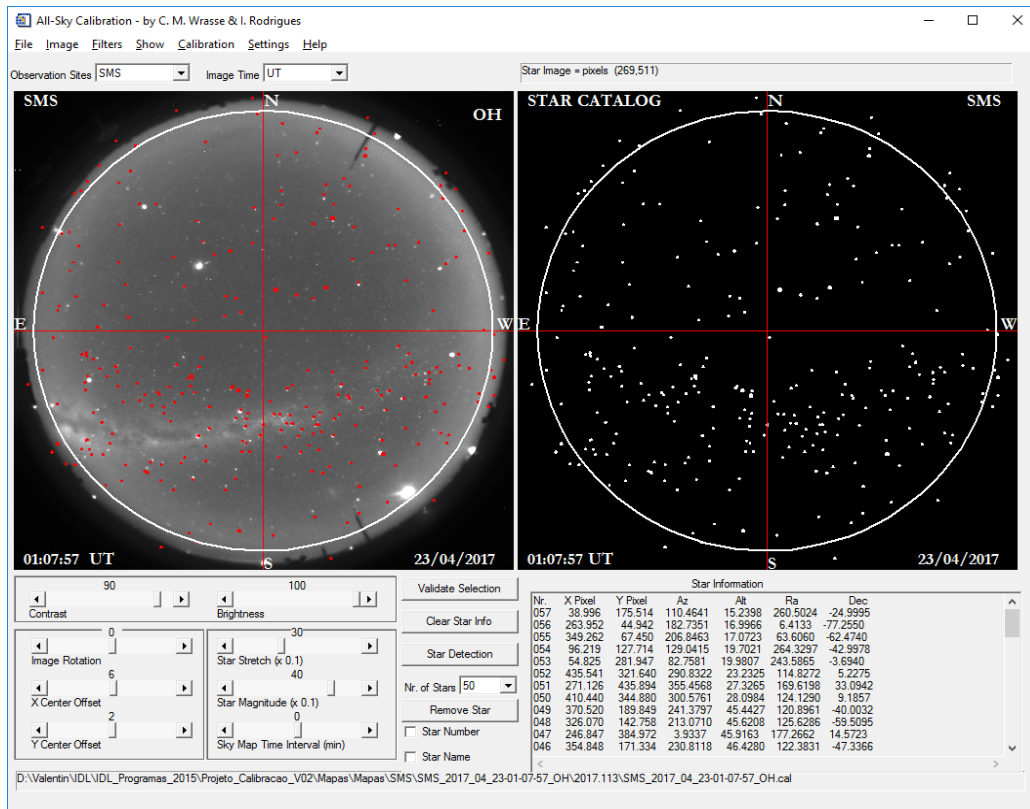
**Figura 21:** Função de lente calculada na calibração através do método manual.

O método automático é feito com a ajuda do programa *all-sky calibration* desenvolvido por C. M. Wrasse e I. Rodrigues. Nesse programa é necessário ajustar a imagem de acordo com o mapa celeste, fazendo com que as estrelas da imagem coincidam com as estrelas do mapa celeste.

A Figura 22 mostra a tela do programa utilizado para a calibração, na imagem da esquerda vemos a imagem *all-sky* com os pontos vermelhos que representam as estrelas da carta celeste, e na imagem da esquerda vemos apenas os pontos das estrelas da carta celeste. Na parte inferior da Figura, vemos os deslocamentos verticais/horizontais aplicados no ajuste, assim como a rotação e o alongamento aplicado na imagem.

Após o ajuste o programa automaticamente detecta as estrelas e sumariza as coordenadas da imagem e da carta celeste, com isso calcula a função de lente. A função

de lente calculada é avaliada, se for necessário retirar alguma estrela, isso pode ser feito manualmente, e se for necessário colocar mais alguma para aumentar a qualidade, também pode ser feito. É calculada novamente a função de lente e avaliada, repete-se o procedimento até que a função esteja o melhor o possível.

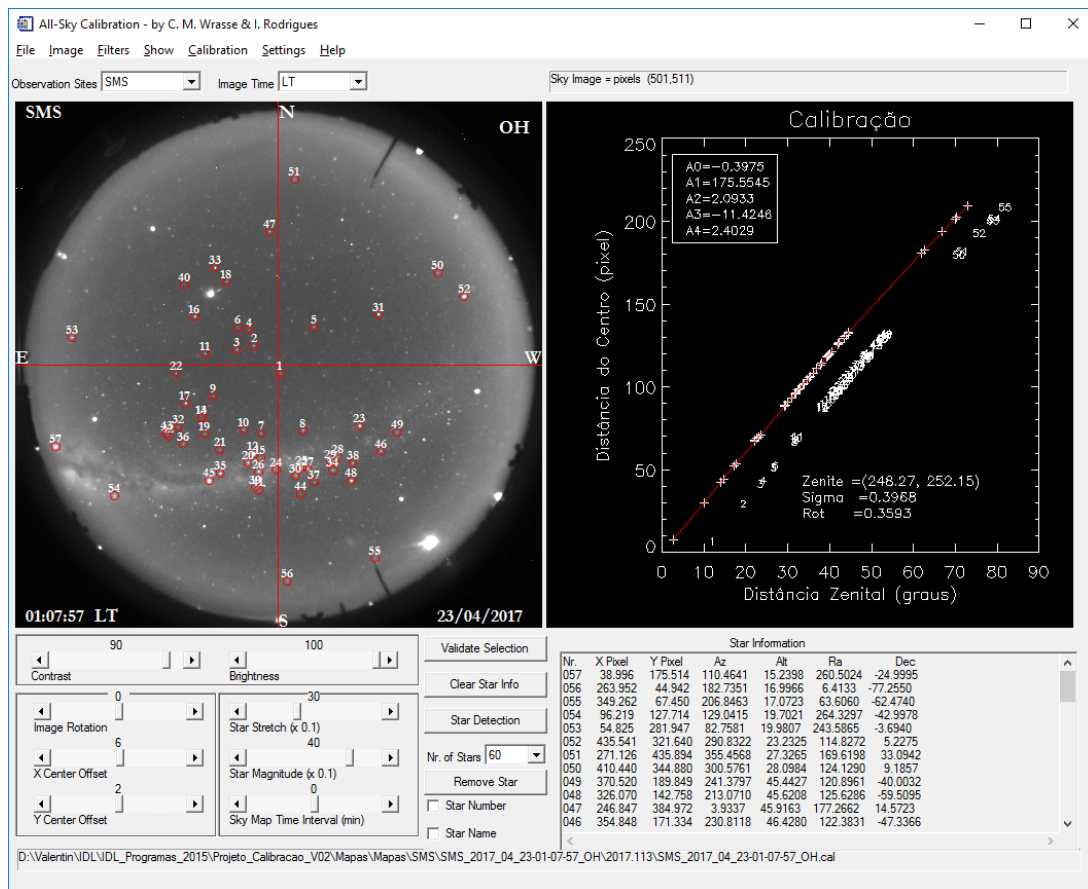


**Figura 22:** Tela do programa utilizado para a calibração. Na parte da esquerda vemos a imagem *all-sky* utilizada na calibração junto com as estrelas do catalogo de estrelas ajustadas, na parta da direita vemos apenas o catalogo de estrelas.

No ajuste mostrado pela Figura 22, o programa identificou 50 estrelas. Na função de lente avaliada, foi retirada uma estrela e foram adicionadas mais 7 estrelas próximas da borda, e uma perto do centro, pois a maioria que foi identificada estavam muito próximas e nenhuma perto da borda.

Na Figura 23 temos á esquerda, a imagem com as estrelas que foram usadas no calculo da lente em destaque por círculos vermelhos, e á direita da Figura 23 a função que foi calculada.

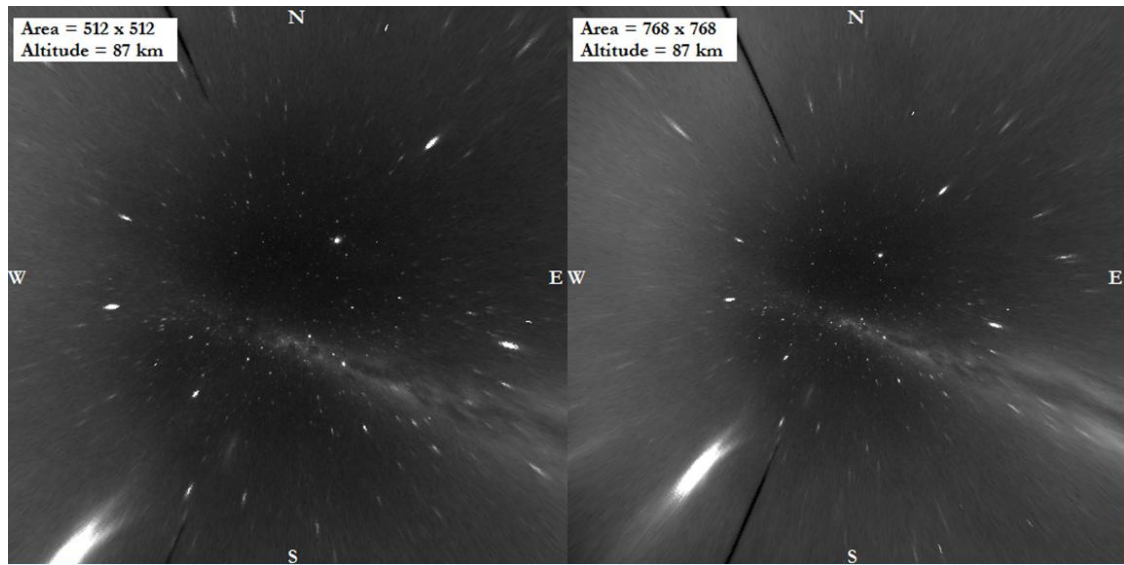




**Figura 23:** Tela do programa utilizado na calibração após o cálculo da função de lente. Na parte da esquerda vemos a imagem *all-sky* com as estrelas utilizadas no cálculo da função de lente em destaque com círculos vermelhos, e na parte da direita vemos a função de lente calculada.

E finalmente o programa gera os mapas, para todas as projeções usualmente utilizadas, e para todas as alturas. Como só tem o filtro da hidroxila (OH NIR), no imageador que instalamos no OES, descartamos todas as projeções em alturas diferentes de 87 km, que é a altura média de emissão do OH NIR.

A Figura 24 mostra as imagens linearizadas com a utilização dos mapas gerados para a altura de 87 km nas projeções de 512x512 e 768x768.



**Figura 24:** Mapas gerados na calibração do imageador instalado no OES.



## **7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente trabalho tinha como objetivo o estudo e a caracterização dos eventos de ondas de gravidade atmosférica, sobre a Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF). Para a observação foi feito o uso de um imageador *all-sky* instalado na estação, na banda de emissão do OH NIR, em que as imagens obtidas foram processadas com o uso de programas computacionais desenvolvidos em IDL.

Após redução das imagens, foi feita a identificação dos eventos de ondas dos dados correspondentes ao ano de 2015. Nisso foram identificados 100 eventos de onda de pequena escala.

Para a análise e caracterização dos eventos foi feita a aplicação da transformada de Fourier discreta, que permitiu a obtenção dos parâmetros físicos das ondas de gravidade, tais como a velocidade de fase, o período, o comprimento de onda e a direção de propagação da onda. Então se analisou as ondas caracterizadas com a análise espectral de acordo com suas características, em histogramas e gráficos.

Para a obtenção de resultados das ondas de média escala, foi feita a geração dos *keogramas* para todos os anos com dados de imagens de airglow, e todos foram analisados com a técnica recentemente desenvolvida, descrita na seção 5.4. Nisso foram identificados e analisados um total de 146 eventos de onda de média escala, que foram analisadas de acordo com suas características em histogramas e diagramas.

O tratamento e redução dos dados ainda estão por ser concluídos, sendo necessário se fazer a análise das ondas de pequena escala para o ano de 2016, e a comparação com dados de outros sítios de aeroluminescência no Brasil.

O aluno também ajudou na instalação e regulagem de um imageador de baixo custo no Observatório Espacial do Sul, tendo adquirido aprendizado prático da instrumentação utilizada no projeto. Também ajudou no processo de calibração das imagens, aprendendo a importância do aprendizado da metodologia.



## **8 TRABALHOS FUTUROS**

Em relação a trabalhos futuros deste projeto é ainda necessário fazer mais análises de ondas de pequena escala para o ano de 2016 na EACF, e fazer a redução e análise dos dados do imageador do OES, recentemente instalado. Também se pretende comparar os resultados para ondas de média escala com resultados de outros sítios do Brasil.

Em relação a planos futuros, com os resultados esperados, temos a intenção de publicar dois artigos científicos em revistas internacionais.



## 9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, L. M. **Características das ondas de gravidade observadas na região central do Brasil**. Dissertação Mestrado Universidade do Vale da Paraíba, São José dos Campos, 2010.

ANDREWS, D. G.; HOLTON, J. R.; LEOVY, C. B. **Middle atmosphere dynamics**. New York: Academic Press, 1987.

BAGESTON, J. V. **Caracterização de ondas de gravidade mesosférica na Estação Antártica Comandante Ferraz**. 176 p. (INPE-16660-TDI/1618). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009-12-16 2010.

BAGESTON, J. V. **Determinação da temperatura da mesosfera superior utilizando um espectro-imagador**. 152 p. (INPE-14129-TDI/1080). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

BEER, T. **Atmospheric waves**. London: Adam Hilger, 1974.

FECHINE, J. **Estudo de frentes mesosféricas na região equatorial**. Tese (Doutorado em Geofísica) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. (INPE-15179-TDI/1295). 2007.

FIGUEIREDO, C. A. **Estudo de distúrbios ionosféricos propagantes no continente sul americano**. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

FIGUEIREDO, C. A. O. B.. **Estudo de distúrbios ionosféricos propagantes no continente sul americano**. Proposta de Doutorado aprovada no Programa de Pós-Graduação em Geofísica Espacial | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015. Comunicação privada.

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

GARCIA, F. J.; TAYLOR, M. J.; KELLEY, M. C. **Two-dimensional spectral analysis of mesospheric airglow image data**. *Applied Optics*, v. 36, n. 29, 1997.

HAPGOOD, M. A.; TAYLOR, M. J. **Analysis of airglow image data**. *Annales De Geophysique*, v. 38, n. 6, 1982.

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

ISLER, J. R.; TAYLOR, M. J.; FRITTS, D. C. **Observational evidence of wave ducting and evanescence in the mesosphere**. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, v. 102, n. D22, 1997.



KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP, 1991.

MAEKAWA, R. **Observations of gravity waves in the mesopause region by multicolor airglow imaging**. 64 p. Dissertação (Master Thesis) — Kyoto University, 2000.

MEDEIROS, A. F. **Observações de ondas de gravidade através do imageamento da aeroluminescência**. 187p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas espaciais, São José dos Campos. (INPE-10478-TDI/932), 2001.

SALBY, M. L. **Fundamentals of atmospheric physics**. San Diego: Academic Press, 1996.

PAULINO, I. S. **Estudo da propagação de ondas de gravidade na termosfera ionosfera**. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial (Ciências Atmosféricas)) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.

VINCENT, R. A. **Gravity-wave motions in the mesosphere and lower thermosphere observed at mawson, antarctica**. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 56, n. 5, 1994.

WRASSE, C. M. **Estudos de geração e propagação de ondas de gravidade atmosféricas**. Tese (Doutorado em Geofísica) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. (INPE-12249-TDI/978), 2004.

WRASSE, C. M.; TAKAHASHI, H.; MEDEIROS, A. F.; LIMA, L. M.; TAYLOR, M. J.; GOBBI, D.; FECHINE, J. **Determinação dos parâmetros de ondas de gravidade através da análise espectral de imagens de aeroluminescência**. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, n. 3, 2007.