



**ESTUDO DAS ONDAS DE GRAVIDADE MESOSFÉRICA DE  
PEQUENA ESCALA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL  
(OES/CRS-INPE)**

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

Paulo Henrique de O. Gomes  
UFSM, Bolsista PIBIC/CNPq  
E-mail: hgomes.academic@gmail.com

Dr. José Valentin Bageston  
CRCRS/COCRE/INPE-MCTIC, Orientador  
E-mail: bageston@gmail.com

Dr. Juliano Moro  
CRCRS/INPE; CBJLSW/NSSC/CAS, Co-Orientador  
E-mail: julianopmoro@gmail.com

**COLABORADORES**

Dr. Cristiano Max Wrasse (DIDAE/INPE)  
Dr. Nelson Jorge Schuch (CRCRS/INPE)  
Bel. Gabriel Augusto Giongo (PPGMet/UFSM – CRCRS)

Julho de 2019



## DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:

TÍTULO: Estudo das ondas de gravidade mesosférica de pequena escala no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS-INPE)

PROCESSO: 129966/2018-5

## BOLSISTA:

Paulo Henrique de O. Gomes

Acadêmico do Curso de Meteorologia – Departamento de Física – CCNE/UFSM  
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

## ORIENTADOR:

Dr. José Valentin Bageston

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRCRS/COCRE/INPE - MCTIC

## CO - ORIENTADOR:

Dr. Juliano Moro

China-Brazil Joint Laboratory for Space Weather - CBJLSW/NSSC/CAS  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRCRS/COCRE/INPE - MCTIC

## COLABORADORES:

Dr. Cristiano Max Wrasse

Divisão de Aeronomia – DIDAE/CGCEA/INPE – MCTIC  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – MCTIC

Dr. Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRCRS/COCRE/INPE – MCTIC

Bel. Gabriel Augusto Giongo

Programa de Pós Graduação em Meteorologia – PPGMet/UFSM – CRCRS

## LOCAL DE TRABALHO/EXECUÇÃO DO PROJETO:

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRCRS/INPE/MCTIC;  
Laboratório de Mesosfera e Luminescência Atmosférica – CRCRS/INPE;  
Observatório Espacial do Sul – OES/CRCRS/INPE.



“O Esclarecimento é a saída do homem da condição de menoridade autoimposta. Menoridade é a incapacidade de servir-se de seu entendimento sem a orientação de outro. Essa menoridade é autoimposta quando a causa da mesma reside na carência não do entendimento, mas de decisão e coragem em fazer uso de seu próprio entendimento sem orientação alheia. SAPERE AUDE! Tenha coragem em servir-se de teu próprio entendimento! Esse é o mote do Esclarecimento”

*Kant, Immanuel*

“Você deve manter sua mente aberta, mas não tão aberta que o cérebro caia”

*Sagan, Carl*



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha amada mãe e professora Salete Regina de Oliveira, por desde cedo, mesmo que inconscientemente, incentivar-me a seguir na carreira acadêmica e fazer da ciência minha vida. Fixando os fundamentos que regem hoje meu caráter e princípios e por ter dado importância ao desenvolvimento de meu senso crítico e criativo.

A todos aqueles que vieram antes de mim, movidos pela mesma curiosidade questionaram a natureza do Universo e na busca pela verdade não deixaram-se enganar por falácias, profetas ou tiranos.

Ao Dr. José Valentin Bageston, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CRCRS/INPE – MCTIC), que disponibilizou seu tempo e conhecimento na orientação de minhas atividades de Iniciação Científica.

Ao Dr. Juliano Moro (CRCRS/INPE – MCTIC, CBJLSW/NSSC/CAS) por demonstrar, com tamanha simplicidade e sutileza, atenção a meus projetos e carreira.

Ao Dr. Nelson Jorge Schuch, Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRCRS/INPE – MCTIC), por ser uma referência acadêmica e possibilitar a existência do CRCRS/INPE, fortalecendo a interiorização do conhecimento.

Ao CNPq/MCTIC por financiar a execução deste projeto e ao CRCRS/INPE por disponibilizar suas instalações assim sediando minhas atividades.

No geral, agradeço a todos aqueles que de alguma maneira auxiliaram na constituição deste projeto.



## RESUMO

O presente trabalho apresenta as atividades desenvolvidas pelo acadêmico Paulo Henrique de Oliveira Gomes, durante o período de agosto de 2018 a julho de 2019. Acadêmico da graduação em Meteorologia pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria – Brasil e bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCTIC com concentração em Geofísica Espacial, foco em Aeronomia. A linha de pesquisa foi voltada a luminescência atmosférica e instrumentação aeronômica aplicadas ao estudo das ondas de gravidade atmosféricas de pequena escala na mesosfera e baixa termosfera (MLT). O estudo desenvolveu-se inicialmente por meio de embasamento bibliográfico e familiarização com instrumentos e técnicas, seguido de obtenção e análise de dados ópticos, objetivando classificação e caracterização de eventos do fenômeno em discussão. Os dados são oriundos de uma câmera imageadora *All-Sky*, alocadas no Observatório Espacial do Sul (OES/CRCRS/INPE). As atividades teóricas foram seguidas pela realização de trabalhos de campo, ou seja, observações rotineiras de luminescência atmosférica no OES, possibilitando contato direto com a instrumentação utilizada. O desenvolvimento das atividades do projeto ocorreram no Centro Regional Sul do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CRCRS/INPE – MCTIC) em Santa Maria, RS e no OES em São Martinho da Serra, RS.



## SUMÁRIO

1 OBJETIVOS DO TRABALHO	8
2 INTRODUÇÃO	10
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
3.1 atmosfera terrestre	11
3.1.1 Divisões da atmosfera terrestre	11
3.1.1.1 Perfil vertical segundo a temperatura	11
3.1.1.2 Perfil vertical segundo a composição química	12
3.1.1.3 Perfil vertical segundo o escape gasoso	13
3.1.1.4 Perfil vertical segundo a composição iônica	13
3.2 Luminescência atmosférica	15
3.2.1 Pesquisas em luminescência atmosférica	16
3.2.2 Principais linhas de emissão	16
3.3 Ondas de gravidade atmosféricas	17
3.3.1 histórico das pesquisas	18
3.3.2 fontes de geração de ondas de gravidade	18
3.3.3 ondas de gravidade e luminescência atmosférica	19
4 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA	20
4.1 Imageador de luminescência atmosférica	20
4.2 Imagens de luminescência atmosférica	22
4.3 Processamento de imagens	23
4.4 Análise espectral das imagens	24
5 RESULTADOS	26
6 CONCLUSÃO	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> As camadas de emissão de aeroluminescência e o perfil de temperatura da atmosfera da Terra	11
<b>Figura 2:</b> Perfil vertical segundo a temperatura média	12
<b>Figura 3:</b> Perfil vertical da densidade eletrônica da Ionosfera (dia/noite)	14
<b>Figura 4:</b> Magnetosfera terrestre	15
<b>Figura 5:</b> Espectro eletromagnético	17
<b>Figura 6:</b> Espectro da aeroluminescência noturna de algumas emissões mais importantes	18
<b>Figura 7:</b> Esquema de um imageador <i>All-Sky</i>	21
<b>Figura 8:</b> Diagrama esquemático ilustrando o sistema óptico do imageador, o qual focaliza as emissões ópticas da luminescência sobre o dispositivo CCD	22
<b>Figura 9:</b> Prédio secundário do OES (esquerda) e imageador <i>All-Sky</i> (direita)	23
Figura 10 Exemplo de imagens de luminescência atmosférica	24
<b>Figura 11:</b> A esquerda imagem obtida com um imageador <i>All-Sky</i> , a direita mesma imagem, porém linearizada	25
<b>Figura 12:</b> Imagem linearizada e filtrada, com identificação de evento de onda de gravidade, pronta a análise espectral	26
<b>Figura 13:</b> Análise espectral aplicada a uma sequencia de quatro imagens com um evento de onda de gravidade, a esquerda amplitude do espectro e a direita fase do espectro aplicada a transformada de Fourier	26
<b>Figura 14:</b> Relação total de observações versus observações classificadas como úteis	27



## 1 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho consiste no estudo das ondas de gravidade de pequena escala na mesosfera e baixa termosfera, seguido de classificação, análise e caracterização de dados ópticos obtidos por uma câmeras imageadoras *All-Sky* instaladas no Observatório Espacial do Sul (OES). As atividades desenvolvidas ocorreram no Centro Regional Sul do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CRCRS/INPE – MCTIC em Santa Maria, RS e no Observatório Espacial do Sul (OES) – CRCRS/INPE – MCTIC em São Martinho da Serra, RS. Os objetivos específicos do presente trabalho consistem em:

- Estudar os fenômenos da luminescência atmosférica e a teoria das ondas de gravidade na alta atmosfera.
- Ter familiaridade com os instrumentos utilizados no estudo: imageador *All-Sky* para observar as emissões de luminescência atmosférica, radar meteorológico e satélites TIMED/SABER e AURA/MLS.
- Saber identificar o fenômeno das ondas de gravidade em imagens de luminescência atmosférica.
- Familiarizar-se com a linguagem de programação IDL e utilizar/modificar programas de análise para o processamento das imagens.
- Realizar visitas e observações rotineiras no OES/INPE em São Martinho da Serra – RS.
- Gerar animações (vídeos .avi) das observações e classificar as imagens em "úteis" (céu limpo) e "não úteis" (céu nublado ou com contaminação luminosa), para posterior análise.
- Estudar os processos de linearização das imagens (projeção em coordenadas geográficas) e pré-processamentos, tais como remoção das estrelas e filtragem digital.
- Analisar os dados de imagens da emissão do OH observadas em São Martinho da Serra-RS, interpretar e discutir esses resultados em termos comparativos com observações em outros sítios de observação.





## 2 INTRODUÇÃO

Em nosso Sistema Solar todos os planetas, e certos satélites naturais, possuem atmosfera. Esses envoltórios gasosos são distinguíveis por apresentarem propriedades intimamente relacionadas às condições iniciais de formação como de evolução destes corpos.

A atmosfera do planeta Terra é secundária, isto significa que a atmosfera não foi constituída nos primórdios da formação do planeta. A atual atmosfera originou-se a partir de processos de vulcanismo com principalmente liberação de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{SO}_2$ .

Acredita-se que a atmosfera terrestre teve sua origem pela liberação de gases do interior da Terra. Na atmosfera primordial, os gases mais abundantes eram provavelmente o gás carbônico, o vapor d' água e o hidrogênio, liberados por erupções vulcânicas. A única fonte de produção de oxigênio era a dissociação do vapor d' água pela radiação solar. O oxigênio liberado era rapidamente consumido em outras reações, especialmente com rochas da superfície, oxidando os materiais nela presentes (Kirchhoff, 1991).

A quantidade de oxigênio na atmosfera passou a ser significativa com o surgimento das algas e pequenos microrganismos, que sintetizam suas moléculas orgânicas usando gás carbônico e água nos processos de fotossíntese, e assim, liberando o oxigênio. Esta produção de oxigênio superou as perdas por oxidação e permitiu um acúmulo na atmosfera (Kirchhoff, 1991).

A atmosfera terrestre é caracterizada como um fluido, suportando a propagação de oscilações mecânicas das mais diversas escalas espaciais e temporais.

As ondas de gravidade atmosféricas resultam do desequilíbrio entre as forças de gravidade e de gradiente de pressão, sendo o resultado de uma perturbação em uma atmosfera estável e estratificada, com a gravidade atuando como força restauradora. São importantes pela transporte de momentum e energia.

A luminescência atmosférica, fenômeno óptico da atmosfera, é utilizado como um importante traçador das ondas de gravidade que se propagam nas camadas de luminescência da atmosfera terrestre.

A instrumentação tipicamente utilizada para detectar a luminescência e analisar bidimensionalmente as ondas de gravidade na mesosfera e estratosfera são os imageadores *All-Sky* de alta definição. Além de luminescência atmosférica, outros métodos observacionais tais como os diversos tipos de radares e satélites também são muito utilizados para estudos das ondas de gravidade na alta atmosfera.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

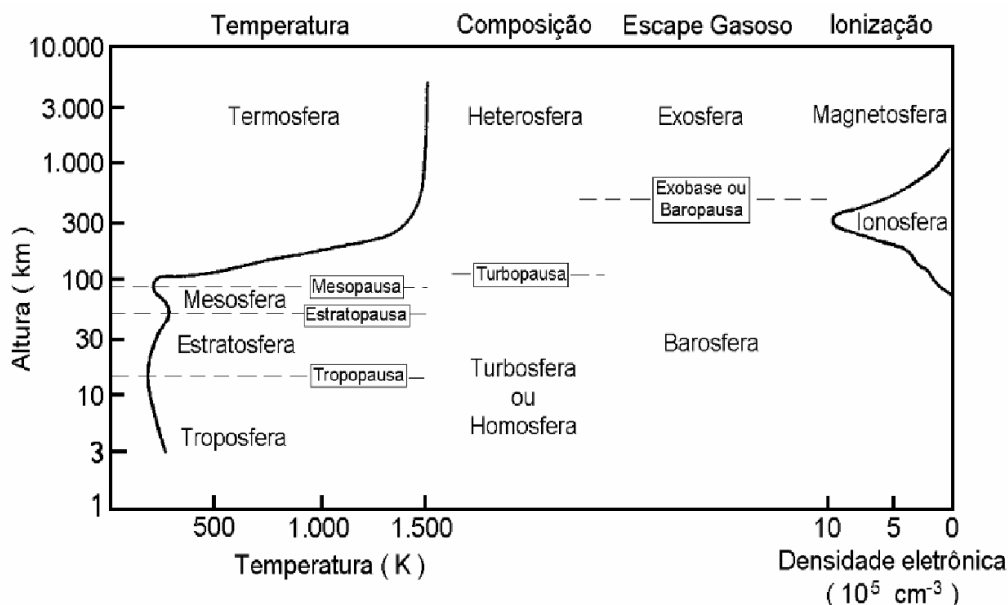
#### 3.1 ATMOSFERA TERRESTRE

A atmosfera é uma camada relativamente fina de gases e material particulado (aerossóis) que envolve a Terra. De fato, 99% da massa da atmosfera está contida numa camada de ~0,25% do diâmetro da Terra (~32 km). A composição do ar não é constante nem no tempo, nem no espaço. Contudo se removêssemos as partículas suspensas, vapor d'água e certos gases variáveis, presentes em pequenas quantidades, encontraríamos uma composição muito estável sobre a Terra, até uma altitude de ~ 80 km (GRIMM, 1999).

Esta camada é essencial para a vida e o funcionamento ordenado dos processos físicos e biológicos sobre a Terra. A atmosfera protege os organismos da exposição a níveis arriscados de radiação ultravioleta, contém os gases necessários para os processos vitais de respiração celular e fotossíntese e fornece a água necessária para a vida (GRIMM, 1999).

##### 3.1.1 DIVISÕES DA ATMOSFERA TERRESTRE

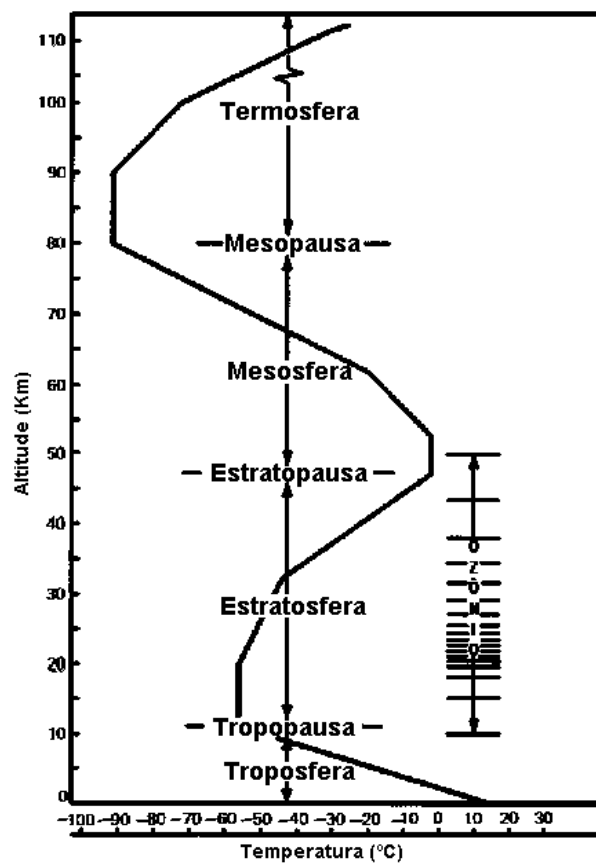
No estudo da atmosfera da Terra, é comum dividi-la em camadas, segundo esquemas de classificação que levam em conta a temperatura, o grau de ionização, a mistura dos constituintes e a composição da atmosfera (HARGREAVES, 1992). A atmosfera é dividida em função de parâmetros físicos e químicos, organizando-a em camadas com características próximas. Na Figura 01 é possível observar algumas das divisões propostas para a atmosfera terrestre.



**Figura 01:** Camadas da atmosfera. Fonte Hargreaves (1992)

### 3.1.1.2 PERFIL VERTICAL SEGUNDO A TEMPERATURA

O perfil vertical de temperatura é baseado na temperatura média predominantemente encontrada na atmosfera terrestre. Nomeadas, respectivamente em valores de altitude, de troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. Existe ainda regiões de transição, com inflexões ou gradientes nulos de temperatura conhecidas por “pausas”, são elas a tropopausa, estratopausa e mesopausa. Na Figura 02 é possível observar a divisão propostas segundo o perfil térmico.



**Figura 02:** Perfil vertical segundo a temperatura média. Fonte: adaptado de GRIMM (1999).

A troposfera estende-se até uma altitude média de 12 Km ( ~20 km no Equador e ~8 km nos pólos). Dentre todas é a troposfera a camada mais inferior da atmosfera, tendo a temperatura decrescendo com o aumento da altitude. Nesta os fenômenos atmosféricos que condicionam o tempo atuam intensamente. Na troposfera transferências verticais de ar são rapidamente concretizados por turbulências, podendo ocorrer na escala de horas a dia, diferentemente da estratosfera. Seu limite superior é a tropopausa.



Na camada seguinte encontra-se a estratosfera, a qual estende-se até ~50 Km. Caracterizada pelo gradativo aumento da temperatura com a altitude, sendo até ~20 Km relativamente constante e posteriormente crescente até seu limite superior, a estratopausa. Esse aumento da temperatura próprio da camada é explicado pela presença concentrada do ozônio ( $O_3$ ), molécula formada pela associação de uma molécula de oxigênio ( $O_2$ ) com um átomo de oxigênio (O), o qual absorve radiação ultravioleta no processo de fotodissociação, logo a estratosfera é aquecida.

Na mesosfera, assim como na troposfera, a temperatura decresce com a altitude até seu limite superior a mesopausa (~80 Km), onde a temperatura atinge aproximadamente 90 °C. A mesopausa é caracterizada pelo mínimo global de temperatura, da ordem de 190 K (WRASSE, 2000).

Localizada acima a mesosfera, a termosfera não possui limite superior definido e inicialmente sua temperatura é isotérmica, crescendo rapidamente com o aumento da altitude. Nesta camada a temperatura cresce indefinidamente com a altitude até um valor assintótico, chamado temperatura exosférica (KIRCHHOFF, 1991). O perfil térmico apresenta tal comportamento devido a absorção de fótons altamente energéticos, provenientes do Sol, por átomos de oxigênio e nitrogênio (GRIMM, 1999).

### 3.1.1.3 PERFIL VERTICAL SEGUNDO A COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Quanto a composição química a atmosfera pode ser dividida em homosfera e heterosfera. Estendendo-se até ~100 km de altitude, seu limite superior é delimitado pela turbopausa, na homosfera a razão de mistura dos componentes atmosféricos não apresentar considerável variação com a altitude, sendo o oxigênio e nitrogênio moleculares os constituintes majoritários.

Acima de 100 km localiza-se a heterosfera, região onde cada gás constituinte tem sua escala de altura definida. A heterosfera pode ser subdividida em protonosfera onde ocorre predomínio de oxigênio e heliosfera onde o elemento hélio domina a constituição atmosférica.

### 3.1.1.4 PERFIL VERTICAL SEGUNDO O ESCAPE GASOSO

Segundo o escape gasoso a atmosfera neutra pode ser dividida em barosfera e a exosfera. Localizada acima de 600 km a exosfera é caracterizada pelo constante escape de constituintes para o espaço, resultado do enfraquecimento da força gravitacional com a altitude. A base da exosfera é a exobase ou baropausa. A barosfera é a região abaixo da baropausa, onde predomina a concentração dos constituintes atmosféricos do planeta Terra.

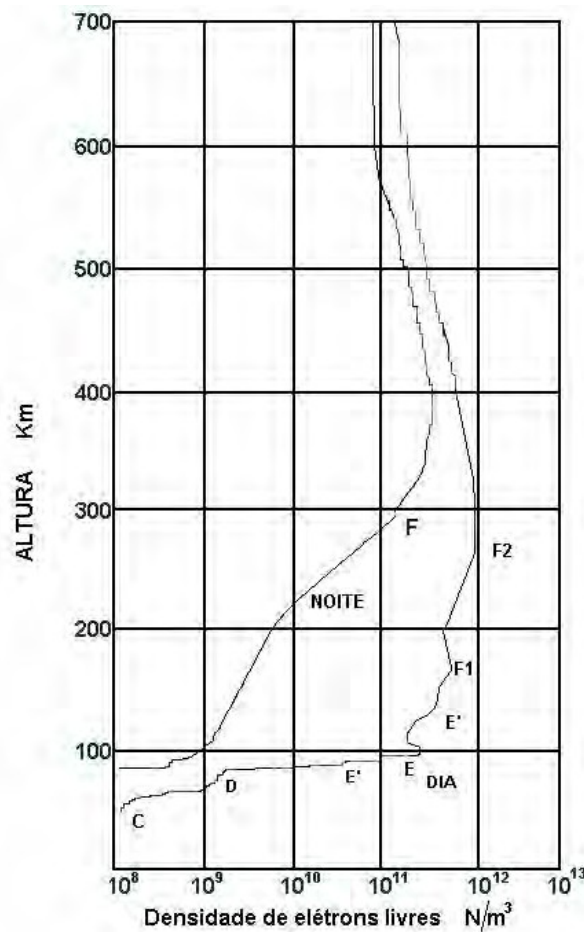
### 3.1.1.5 PERFIL VERTICAL SEGUNDO A COMPOSIÇÃO IÔNICA

De acordo com o perfil de densidade eletrônica, a atmosfera terrestre pode ser dividida em atmosfera neutra, Ionosfera e Magnetosfera (São Sabbas, 1999, p. 28).

Estendendo-se até ~60 Km a atmosfera neutra é caracterizada como a região onde há pouca incidência de fótons para promover a ionização dos átomos e moléculas da atmosfera. Devido às camadas anteriores da atmosfera que absorvem grande parte da radiação solar incidente.

A ionosfera é a camada ionizada da atmosfera terrestre e é subdividida, considerando os picos do perfil de densidade eletrônica, em camadas concêntricas. Com extensão de ~60 a 1000 Km de altitude, é caracterizada pela ocorrência de ionização parcial dos constituintes atmosféricos pela radiação solar incidente na faixa do ultravioleta, dos raios X e cósmicos. Esta absorção por átomos e moléculas de radiação solar da origem, por meio do processo de fotoionização, ao plasma ionosférico. Suas subdivisões são D, E, F1, F2 e F3.

A figura 03 ilustra o perfil vertical da densidade eletrônica da ionosfera.



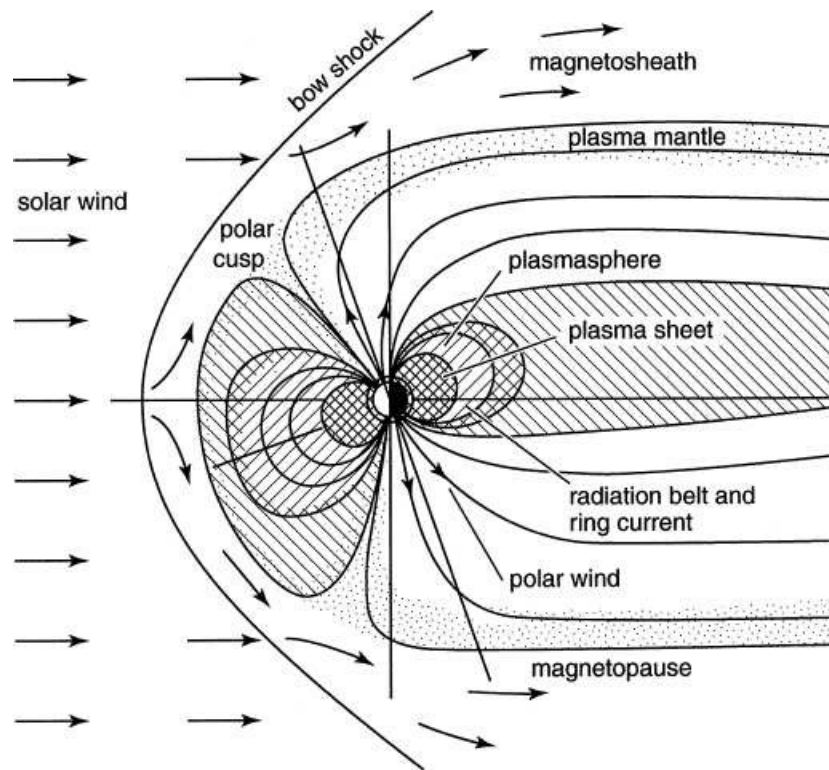
**Figura 03:** Perfil vertical da densidade eletrônica da Ionosfera (dia/noite). Fonte: adaptado de Lia, 2013.



- Região D: Considerada a baixa ionosfera, localiza-se entre ~60 e 90 km e é dentre todas as regiões a com menor densidade eletrônica. Sua ionização é intensamente dependente da radiação solar, durante a noite a região D praticamente desaparece.
- Região E: Situada entre ~90 e 150 km, é a região com maior condutividade elétrica da ionosférica. Subdivide-se em duas outras camadas a E2, com maior densidade, e Es, instável. Tem como fonte de ionização a radiação X e ultravioleta.
- Região F: Localizada entre ~150 e 1000 km de altitude, a região F configura-se como o limite superior da ionosfera. Subdividida nas respectivas camadas concêntricas F1, F2 e F3, cada uma dotada de características próprias. A camada F1, entre ~150 e 250 km, tem como fonte para ionização de seus constituintes a radiação solar incidente no espectro do ultravioleta. Localizada entre ~250 e 1000 km, na camada F2 ocorre o pico da concentração iônica, a camada é caracterizada pelos processos dinâmicos fortemente interligados e influenciados pela ionosfera superior e ventos termosféricos. A camada F3 tem sua altitude fortemente interligada as condições solares e atmosféricas.

Localizado entre a ionosfera e magnetopausa, limite entre o campo geomagnético e o campo magnético interplanetário, está a magnetosfera, camada que envolve a Terra e exerce função protetora contra os ventos solares. Nesta região o campo magnético terrestre rege os movimentos do plasma, exercendo influência dominante sobre os processos físicos ocorrentes na região. A magnetosfera possui uma forma característica, resultado da interação do campo geomagnético com os ventos solares. Internamente localiza-se a plasmasfera.

Na figura 04 é possível ver esquematicamente representada a magnetosfera terrestres.



**Figura 04:** Magnetosfera terrestre. Fonte: Rycroft et al. (2000)

### 3.2 LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA

A luminescência atmosférica ou aeroluminescência (*airglow*) é um fenômeno óptico ocorrente na atmosfera terrestre caracterizado pela contínua emissão de fótons liberados por átomos e moléculas excitadas acima de seus níveis normais de energia. Tem natureza direta ou indireta no armazenamento por elementos constituintes da atmosfera de energia radioativa incidente emitida pelo Sol, sendo esta mais tarde reemitida em grande parte na faixa do visível, contribuindo assim para o brilho do céu noturno. Estes elementos são encontrados de forma estratificada na Mesosfera e Baixa Termosfera (~80 - 100 km) e na Ionosfera (~250 km).

O estudo da luminescência atmosférica é de suma importância para:

- compreensão da dinâmica atmosférica em elevadas altitude;
- estudo da ionosfera, visando utilização nas comunicações;
- precisão de sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*);
- previsão de clima espacial;
- proteção de equipamento e pessoal em sistemas aeroespaciais.

Classificada conforme o ângulo zenital da radiação solar, a luminescência atmosférica pode ser diurna (*dayglow*), crepuscular (*twilight*) ou noturna



(*nightglow*). Sendo durante o período noturno favorável à observação, pois a incidência direta de radiação solar torna o espectro ruidoso. Seu estudo tem agregado constantes contribuições a pesquisa da dinâmica da Mesosfera e Baixa Termosfera.

Diferentemente das auroras, cuja origem está ligada à interação do vento solar com a atmosfera terrestre, a fonte da aeroluminescência está ligada principalmente a reações químicas que ocorrem entre constituintes atmosféricos (GOMES, 2013). Diferentes processos são responsáveis por resultar em fenômenos ópticos de luminescência. Tem-se como principal processo desencadeador a excitação de átomos e moléculas pela radiação incidente proveniente do Sol. Outros estão relacionados a reações fotoquímicas, os mais comuns são a fluorescência, quimiluminescência, ressonância e excitação por colisões.

### 3.2.1 PESQUISAS EM LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA

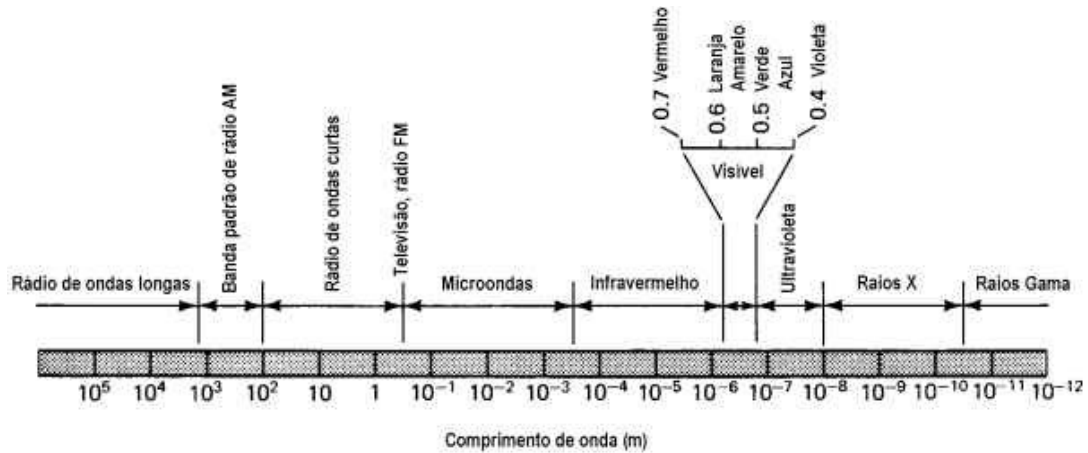
Inicialmente, a aeroluminescência era confundida com as auroras, que ocorrem nas regiões polares durante a noite. Posteriormente, análises mais cuidadosas do espectro emitido pelo céu noturno levaram a uma boa diferenciação desses dois tipos de radiação (Bageston, 2005).

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 (Bageston, 2005).

### 3.2.1 PRINCIPAIS LINHAS DE EMISSÃO

A partir do processo de relaxação energética átomos e moléculas excitadas emitem uma tênue radiação de longa faixa espectral, abrangendo bandas do ultravioleta ( $\lambda \sim 250$  nm) ao infravermelho ( $\lambda \sim 4 \mu\text{m}$ ). A figura 05 ilustra o espectro eletromagnético, com atenção a faixa do visível.





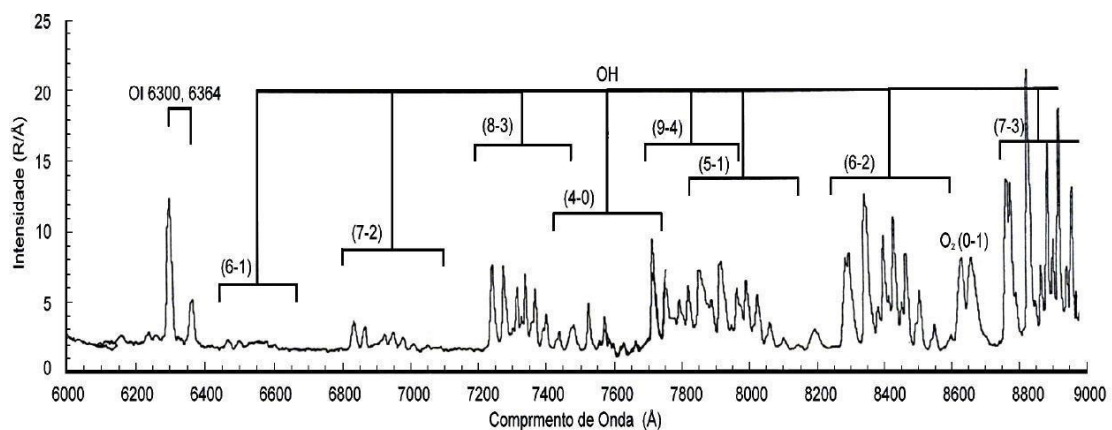
**Figura 05:** Espectro eletromagnético. Fonte: GRIMM (1999)

A principal origem das emissões da luminescência atmosférica são do oxigênio molecular, encontrado na mesosfera e termosfera, produto da absorção da radiação solar incidente na faixa do ultravioleta. No espectro visível as principais emissões são:

- 1) bandas da hidroxila;
- 2) emissões do oxigênio atômico e molecular;
- 3) emissões de átomos metálicos (sódio, cálcio, potássio e magnésio).

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).

Na Figura 06 é possível observar as emissões mais importantes do espectro da luminescência noturna.



**Figura 06:** Espectro da aeroluminescência noturna de algumas emissões mais importantes. Fonte: Adaptada de BAGESTON (2005)



### 3.3 ONDAS DE GRAVIDADE ATMOSFÉRICAS

A atmosfera terrestre comporta-se como um fluido, suportando a propagação de oscilações mecânicas de diferentes escalas espaciais e temporais. Ondas de gravidade são perturbações mecânicas que propagam-se em uma atmosfera estável e estratificada, resultantes do desequilíbrio entre forças de gravidade e do gradiente de pressão, tendo a força gravitacional como força restauradora.

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).

Dos tipos de ondas de gravidade existentes, são:

- Bandas: série de ondas quase monocromáticas, seu comprimento de onda horizontal vai da ordem de dezenas a centenas de quilometro e a escala temporal de até oito horas;
- Ripples e Ladders: onda de pequena escala, com 10 a 15 km de comprimento para onda horizontal, com duração de algumas dezenas de minutos;
- Pororoca: frente de onda seguida as vezes por varias ondas, normalmente ocupando vasta porcentagem do céu e ocorrendo a 80 e 100 km de altitude.

Em larga escala, ondas de gravidade exercem grande influência na dinâmica e estrutura da atmosfera, sendo responsáveis pelo transporte de energia e momentum entre diferentes camadas, a partir da troposfera até a termosfera.

#### 3.3.1 HISTÓRICO DAS PESQUISAS

Os estudos sobre as ondas de gravidade na alta atmosfera iniciaram-se com o advento do lançamento de foguetes nos anos 50, onde as medidas de vento nesta região da atmosfera apresentavam características bastante diferentes às dos ventos observados na baixa atmosfera. Os ventos na alta atmosfera apresentavam valores intensos e grande variação em função da altura. Por este motivo, estes foram inicialmente chamados de “ventos irregulares”. Porém, a partir do trabalho de Hines (1960) e de uma série de artigos publicados desde os anos 50 até a década de 90, explicaram-se que estes ventos não eram tão irregulares assim, mas podiam ser interpretados como sendo provenientes de uma soma de modos de propagação de ondas internas (BAGESTON, 2010).



### 3.3.2 FONTES DE GERAÇÃO DE ONDAS DE GRAVIDADE

As típicas fontes de geração das ondas de gravidade incluem os efeitos orográficos, a convecção térmica e o cisalhamento local de ventos. No entanto, outras fontes podem também ser significativas em locais preferenciais ou em associação com a dinâmica específica de larga escala (FRITTS; ALEXANDER, 2003). Outros exemplos de fontes importantes são as correntes de jatos (*jet streams*) na troposfera e os sistemas frontais. Interações entre ondas de pequena escala, que ocorrem na atmosfera, também podem gerar ondas de maior escala (FRITTS; ALEXANDER, 2003). Em altas latitudes, as ondas de gravidade podem ser geradas por efeito Joule, na região da oval auroral durante intensas tempestades magnéticas, e pelo eletrojato auroral (TAYLOR; HAPGOOD, 1988). Os trabalhos de Taylor e Hapgood (1988) e Taylor et al. (1995a), por exemplo, mostram que as atividades de tempestades elétricas na atmosfera, associadas às nuvens cumulimbus, também podem ser geradoras das ondas de gravidade observadas na mesosfera. A geração dessas ondas ocorre a partir das intensas convecções no interior dessas nuvens (BAGESTON, 2010).

Podendo classificar ondas de gravidade em propagante e evanescente. O que as diferencia concerne na orientação da propagação, ondas propagantes propagam-se tanto na horizontal quanto na vertical, já as ondas evanescentes 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).

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. Quando isso acontece, chama-se esta região de nível crítico (BAGESTON, 2010).

### 3.3.3 ONDAS DE GRAVIDADE E LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA

Tem-se a luminescência atmosférica como importante meio traçador para as ondas de gravidade. Ao propagarem-se através das camadas emissoras de luminescência as ondas de gravidade deixam assinaturas típicas, úteis ao seu estudo.

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



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

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).

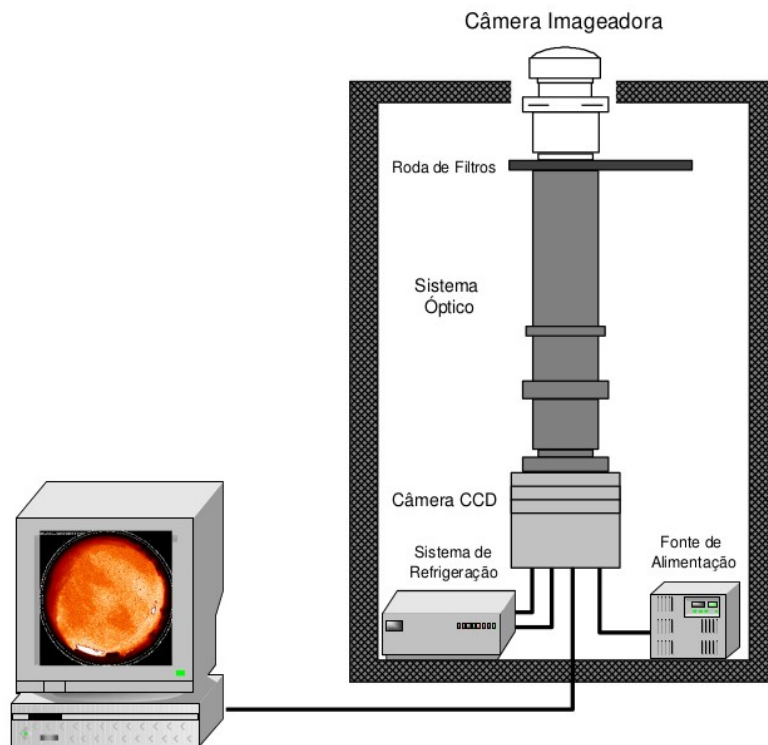
## 4 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

### 4.1 IMAGEADOR DE LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA

A incorporação de imageadores no estudo da dinâmica da Mesosfera teve início com a introdução de dispositivos CCD (*Charge Coupled Device*), capazes de realizar registros remotamente da luminescência atmosférica com grande resolução espacial e temporal.

Imageadores são constituídos basicamente por um dispositivo CCD, conjunto de lentes e filtros para emissões ópticas de interesses distintos, como: estudos de ondas de gravidade, distúrbios ionosféricos propagantes e bolhas de plasma.

A Figura 7 apresenta um desenho esquematizado de um imageador *All-Sky*, usado para registrar a luminescência atmosférica e no estudo das ondas de gravidade.



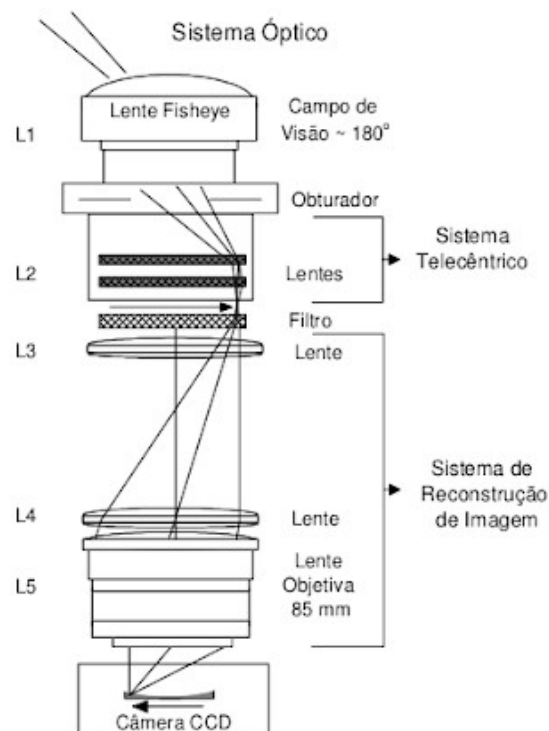
**Figura 7:** Esquema de um imageador *All-Sky*. Fonte: Wrasse (2004)

O imageador é um equipamento basicamente constituído por um sistema de alinhamento óptico e de uma câmera *Charge Coupled Device* (CCD), que é capaz de detectar as variações na intensidade das emissões de aeroluminescência noturna na região mesosférica e registrá-las através de imagens em arquivos digitais (MEDEIROS, 2001).

Detalhadamente um imageador é constituído por:

- Sistema óptico: formado por uma lente *All-Sky* cujo campo de visão é  $180^\circ$ , possui a capacidade de captar todo céu noturno observável;
- sistema de lentes telecêntricas: desenvolvidas para o uso em medições de alta precisão, essas buscam eliminar distorções criando uma condição onde a luz incide perpendicularmente no sensor;
- filtros de interferência: uteis para seleção de linhas de emissão de interesse da luminescência atmosférica;
- dispositivo CCD (*Charge Coupled Device*): responsável pela captura da imagem, quando exposto diferentes seções do CCD geram cargas elétricas proporcional à intensidade da luz incidente, permitindo a partir dessas cargas quantificar com precisão a incidência radiativa de cada fração da imagem;
- sistema de refrigeração;
- fonte de alimentação.

A Figura 8 apresenta esquematicamente o sistema óptico de um imageador.



**Figura 8:** Diagrama esquemático

ilustrando o sistema óptico do imageador, o qual focaliza as emissões ópticas da luminescência sobre o dispositivo CCD. Fonte: Wrasse (2004).

As principais vantagens na técnica do imageamento no estudo da dinâmica da aeroluminescência e na observação e estudo das ondas de gravidade é a alta resolução espacial na visualização de uma grande área horizontal coberta pelo imageador (MEDEIROS, 2001).

A Figura 9 mostra o prédio secundário do OES utilizado para sediar os

instrumentos de observação (esquerda) e o imageador *All-Sky* (direita).

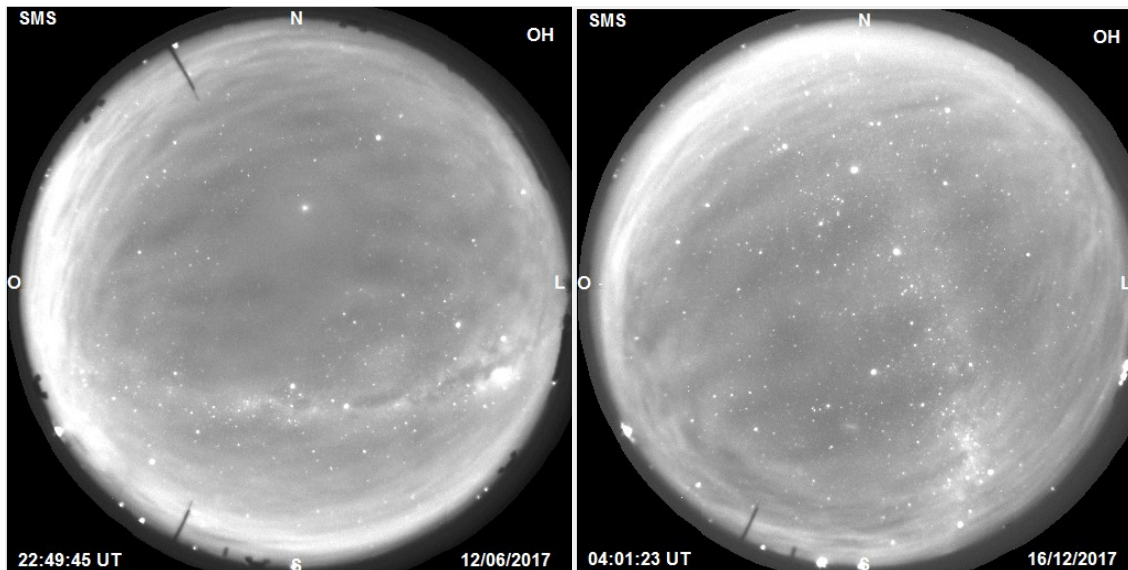


**Figura 9:** Prédio secundário do OES (esquerda) e imageador *All-Sky* (direita). Fonte: arquivo pessoal

#### 4.2 IMAGENS DE LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA

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

A Figura 10 mostra duas imagens de luminescência atmosférica ambas obtidas pelo imageador *All-Sky* localizado no OES respectivamente para as noites de 12/06/2017 e 16/12/2017.



**Figura 10:** Exemplo de imagens de luminescência atmosférica. Fonte: Autoria própria

### 4.3 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Posterior ao registro do céu noturno pelo imageador é necessário a análise das imagens, será através delas determinado as características das ondas. Porém anteriormente a análise é necessário estabelecer um sistema de coordenadas que relacione a distância entre pixels na imagem com uma distância real da altura da camada de luminescência.

Fundamental para o georreferenciamento das imagens é o processo de linearização, por meio desse destina-se remover os efeitos de borda. A partir disso relaciona-se os pixel (sistema de referência da CCD) das imagens linearizadas ao sistema de coordenadas geográficas.

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

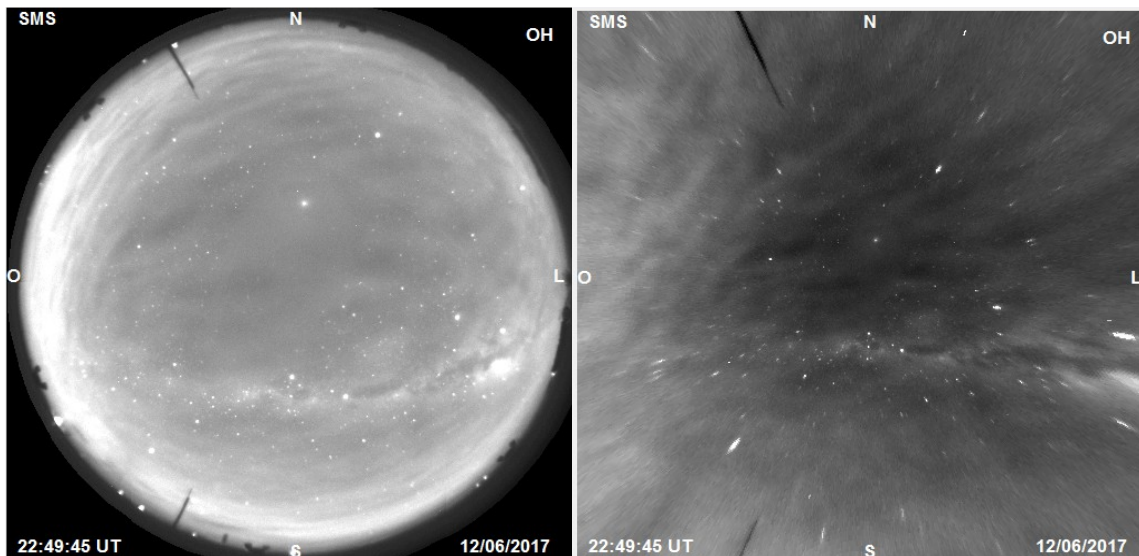
A transformação de coordenada da imagem original para coordenada geográfica é na prática, um processo moroso, pois envolve o mapeamento das estrelas mais brilhantes da imagem original  $(i, j)$  para a coordenada de azimuth e elevação  $(az, el)$ . Este procedimento em geral é feito manualmente e necessita 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 figura 11 apresenta uma imagem obtida pelo imageador do OES para o filtro OH (esquerda) e a mesma após o processo de linearização e filtragem (direita).

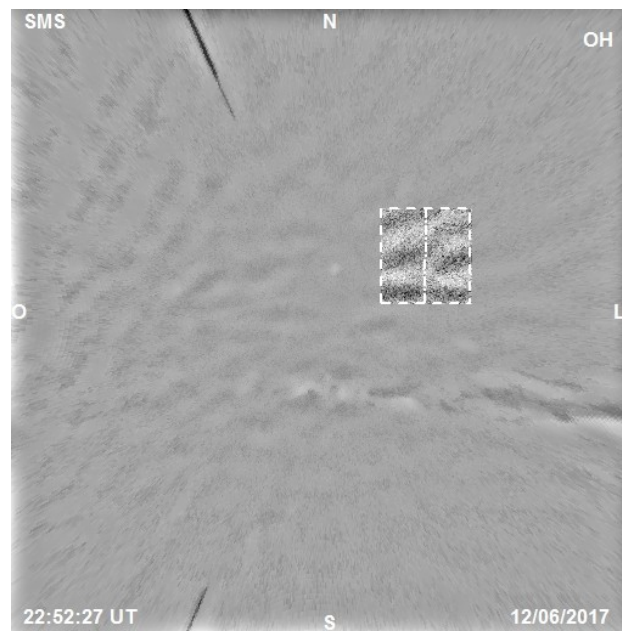


**Figura 11:** A esquerda imagem obtida com um imageador *All-Sky*, a direita mesma imagem, porém linearizada. Fonte: autoria própria.

#### 4.4 ANÁLISE ESPECTRAL DAS IMAGENS

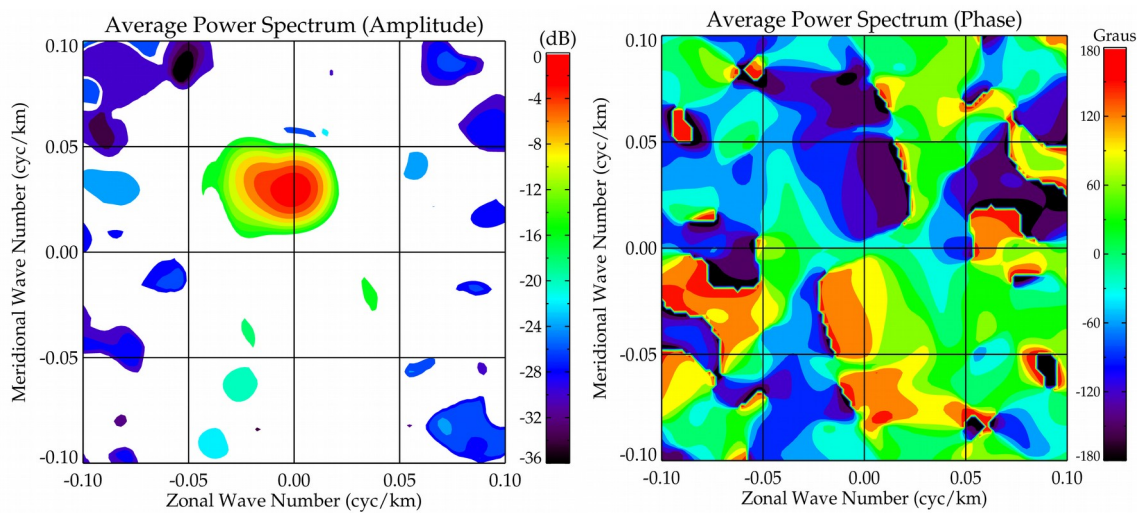
Para realizar a análise espectral primeiro é necessário escolher um ou mais eventos de onda de gravidade nas imagens da aeroluminescência. Assim, escolhe-se uma sequência de imagens que contenham as informações sobre o evento em questão. Após, é necessário animar o conjunto de imagem com objetivo de reconhecer e selecionar a região de interesse. O último passo é aplicar a transformada de Fourier na região selecionada do conjunto de imagens (ALMEIDA, 2010).

A Figura 12 é uma imagem de luminescência atmosférica linearizada e filtrada, observa-se uma onda de gravidade selecionada a aplicação da transformada de Fourier e análise espectral.



**Figura 12:** Imagem linearizada e filtrada, com identificação de evento de onda de gravidade, pronta a análise espectral. Fonte: autoria própria.

Na Figura 13 é possível visualizar o resultado da análise espectral num conjunto de quatro imagens para 12/06/2017, espectro de amplitude (esquerda) e de fase (direita).



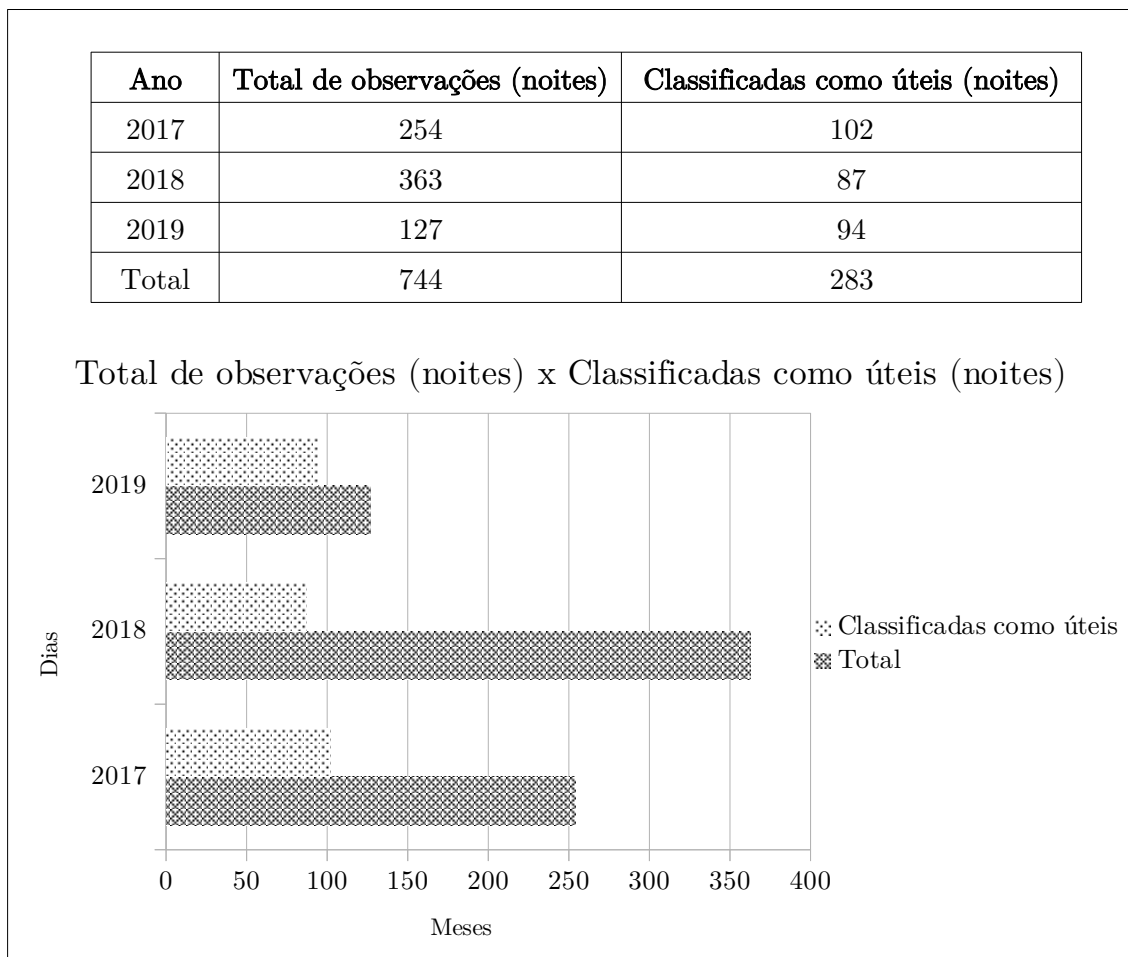
**Figura 13:** Análise espectral aplicada a uma sequencia de quatro imagens com um evento de onda de gravidade, a esquerda amplitude do espectro e a direita fase do espectro aplicada a transformada de Fourier. Fonte: autoria própria.

## 5 RESULTADOS

Na posse dos dados coletados primeiramente realizou-se uma classificação, com uso da linguagem IDL, das imagens obtidas por um imageador *All-Sky* alocado no Observatório Espacial do Sul – OES. Como critério para classificação foi levado em consideração a presença excessiva de luminosidade natural ou artificial, nebulosidade ou outra variável que possa interferir na futura análise das ondas.

O período de coleta de dados ópticos foi de 22/04/2017 a 07/05/2019. Foram contabilizados 744 noites de exposição. Foram classificadas como “úteis” 283 noites de observação da luminescência, passíveis para estudo de eventos de onda e análise espectral.

Na Figura 14 observa-se a acima quadro com valores e abaixo gráfico com relação do total de observações e observações classificadas como uteis.



**Figura 14:** Relação total de observações versus observações classificadas como úteis. Fonte: autoria própria.

Posteriormente foi dado início a análise espectral do conjunto de imagens, processos de linearização, filtragem e aplicação da transformada de Fourier, para estudo dos parâmetros das ondas de gravidade.



## 6 CONCLUSÃO

Durante o transcorrer do projeto o acadêmico realizou estudos teóricos, em literatura científica especializada, na grande área de física espacial, com devida atenção a alta atmosfera terrestre e seus fenômenos, fundamentalmente de luminescência atmosférica e das ondas de gravidade na mesosfera e baixa termosfera.

Desenvolveu familiarização com técnicas e instrumentação utilizadas na observação e registro remoto da luminescência atmosférica, como na metodologia de análise e processamento de imagens. Secundariamente, dedicou-se a estudos teóricos direcionados a ELTs, de forma a colaborar com projeto sob coordenação da Dra. Eliah Fernanda de São Sabbas.

Como parte do processo de aprendizagem e desenvolvimento o aluno participou de eventos científicos. Redigindo um resumo a respeito das técnicas de observação das Ondas de Gravidade, o qual foi apresentando (em pôster) e publicado no VII Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia sob o título “Técnicas Observacionais de Ondas de Gravidade em Alta Atmosfera”.

Na qualidade de coautor participou do XII Congresso Argentino de Meteorología (CONGREMET XII), durante o período de 16 a 19 de outubro de 2018 na cidade de Rosario - Argentina, e da 33<sup>a</sup> Jornada Acadêmica Integrada (JAI) da UFSM.

Assim como participou, na qualidade de ouvinte, da 17<sup>a</sup> Semana Acadêmica Integrada do Centro de Ciências Naturais e Exatas, de 22 a 26 de outubro de 2018, e do Seminário Internaonal América do Sul na Era Nuclear: Riscos, Desafios e Perspectivas, promovido pela Universidade Federal de Santa Maria e pela Pugwash Conferences on Science and World Affairs nos dias 20 e 21 de agosto de 2018.

Campanhas para familiarização, observação e coleta de dados do imageador de luminescência atmosférica foram realizadas no Observatório Espacial do Sul – OES/CRCRS/INPE. Inclusive possibilitando aprendizado com Prof. Dr. Kazuo Makita, Takushoku University – Tóquio, presente em uma das campanhas.

O atual projeto despertou questões a serem respondidas em trabalho futuro, onde usar-se-á imagens coletadas e analisadas para estudo do acoplamento atmosfera neutra – ionosfera (mesosfera – ionosfera), relacionando propagações das ondas de gravidade com ocorrência de fenômenos ionosféricos, como bolhas de plasma, a partir dos dados obtidos por imageadores e Digissondas. Esta temática é de grande importância para o monitoramento do clima espacial, visto a preservação e mitigação de danos a sistemas aeroespaciais e em solo.



## 7 REFERÊNCIAS 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.

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

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, 2010.

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

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

GARDNER, C. S.; Taylor, M. J., Observational limits for lidar, radar, and airglow imager measurements of gravity parameters, **J. Geophys. Res.**, v. 103, n. 6, p. 6427-6437, 1998.

GOMES, Fábio do Egito. **Efeitos das ondas planetárias na aeroluminescência / Fábio do Egito Gomes**. – São José dos Campos : INPE, 2013. xxviii + 213 p.; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.24.13.54-TDI)

GOODY, R.M.; WALKER, J.C.G. **Atmosferas planetárias**. São Paulo: Edgard Blücher, 1975, 138p.

GRIMM, A. M. **Meteorologia Básica - Notas de Aula**. Disponível em: <http://sica.ufpr.br/grimm/aposmeteo>. Primeira versão: 1999. Acesso em: 12 de março de 2019.

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 420 p.

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

KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP, 1991. 141 p.



LIA, Claudia Vogel. **Estudo da ionosfera da região brasileira com dados dos satélites FORMOSAT-3 / COSMIC e de Digissondas** / Claudia Vogel Ely. - São José dos Campos: INPE, 2010. xxiv + 123 p. ; (INPE-16695-TDI / 163

MEDEIROS, A. F. **Observações de ondas de gravidade através do imageamento da aeroluminescência** / A.F. Medeiros. - São José dos Campos: INPE, 2001. 187p. - (INPE-10478-TDI/932).

MERIWETHER, J. W. A Review of the photochemistry of selected Nightglow emissions from the mesopause. **J. Geophys. Res.**, v.94, n.D12, p.14629- 14646, 1989.

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.

SÃO SABBAS, F. T. **Estudo da relação entre sprites e os relâmpagos das tempestades associadas**. 142 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

TAVARES, M.; Santiago, M. A. M. Eletricidade atmosférica e fenômenos correlatos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 24, n. 4, 2002.

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.