



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-12989-PRE/8266

**ESTUDO DAS EMISSÕES ÓTICAS DA ALTA ATMOSFERA NA
REGIÃO ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL**

Elói Alberto Grellmann*

*Bolsista UFSM

Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE), orientado pelos
Dr. Hisao Takahashi

INPE
São José dos Campos
2005



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**PROGRAMA DE AEROLUMINESCÊNCIA PROJETO
RADIOASTRONOMIA, COOPERAÇÃO BRASIL – JAPÃO
CONVÊNIO: INPE - UFSM**

**ESTUDO DAS EMISSÕES ÓTICAS DA ALTA ATMOSFERA NA
REGIÃO ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL**

**RELATÓRIO FINAL
ATIVIDADES DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
PIBIC/ INPE – CNPq/MCT**

Elói Alberto Grellmann (UFSM, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)

E-mail: eloi@lacesm.ufsm.br

Dr. Hisao Takahashi (Orientador, LASER/DAE/CEA/INPE – MCT)

E-mail: hisotak@laser.inpe.br

Santa Maria, Maio de 2005.

Dados de Identificação:

Processo N°:

Processo CNPq N° 103552/2005-7

Bolsista:

Elói Alberto Grellmann
Acadêmico do Curso de Física Bacharelado
Universidade Federal de Santa Maria

Orientador:

Dr. Hisao Takahashi
Divisão de Aeronomia – DAE/CEA/INPE – MCT
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

Título do Projeto:

**ESTUDO DA ALTA ATMOSFERA ATRAVÉS DA
AEROLUMINESCÊNCIA NA REGIÃO DA ANOMALIA MAGNÉTICA
DO ATLÂNTICO SUL.**

Local de execução do projeto:

- Laboratório de Óptica e Luminescência Atmosférica –
LOLA/OES/CRSPE/INPE - MCT

Pesquisadores e Estudantes Colaboradores:

- Dr. Nelson Jorge Schuch – CRSPE/INPE – MCT
- Dr. Hisao Takahashi – DAE/CEA/INPE – MCT
- Dr. Delano Gobbi – DAE/CEA/INPE – MCT
- Dr. Cristiano Max Wrasse – DAE/CEA/INPE – MCT
- Mestrando Jose Valentin Bageston – DAE/CEA/INPE – MCT

- Acadêmico Gustavo R. Wrasse – CURSO DE FÍSICA - UFSM
- Acadêmico Henrique Orlando Goulard – CURSO DE FÍSICA - UFSM

Participantes da Cooperação Brasil – Japão em Ciências Espaciais Básicas diretamente envolvidas no Projeto:

- Dr. Kazuo Makita – Takushoku University
- Dr. Hiromasa Yamamoto – Rikkyo University

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. Nelson J. Schuch, chefe da Unidade Regional Sul de Pesquisas Espaciais e Coordenador da Ação de Implantação do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE-MCT e Observatório Espacial do Sul – OES/RSU/INPE-MCT, por proporcionar um ambiente com grande suporte para desenvolvermos nossos trabalhos, criando um clima favorável ao desenvolvimento da criatividade, induzindo a um constante melhoramento no desempenho de nossas funções e produtividades.

Aos Drs. Hisao Takahashi e Cristiano M. Wrasse pela orientação e incentivo, um agradecimento especial ao Dr. Kazuo Makita pela cooperação e amizade demonstrada aos acadêmicos do Laboratório de Mesosfera e Luminescência Atmosférica. Ao mestrando José Valentin pela força e apoio. Agradeço os demais integrantes do Laboratório de Luminescência Atmosférica - LUME/DAE/INPE-MCT, São José dos Campos/SP pelo apoio no desenvolvimento do Projeto.

Aos colegas do Curso de Física da UFSM e que também desenvolvem projetos no LACESM, obrigado pelo companheirismo e força no decorrer da nossa vida acadêmica.

Finalmente, gostaria aqui de expressar meus sinceros agradecimentos ao Programa e Coordenação do PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela bolsa a pouco concedida, que seja mais um importante incentivo no desenvolvimento de minhas atividades como novo acadêmico bolsista deste importante Programa.

RESUMO

O presente trabalho relata as atividades desenvolvidas pelo aluno Elói Alberto Grellmann, acadêmico do curso de Bacharelado em Física, da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, durante o período compreendido entre *Abril e Maio de 2005*, correlata à Linha de Pesquisa: *“Estudo da Alta Atmosfera através da Aeroluminescência na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul”*. As atividades foram desenvolvidas dentro da parceria da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM-MEC – através do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT/UFSM-MEC – com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE-MCT – através da Unidade Regional Sul de Pesquisas Espaciais - RSU/CEP/INPE-MCT e Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE-MCT. O acadêmico responde como Responsável Discente pelo **"Programa de Aeroluminescência do Projeto Radioastronomia, Cooperação Brasil - Japão, Convênio: INPE - UFSM"**, desde Novembro de 2004 até o presente momento, atuando no “Laboratório de Mesosfera e Luminescência Atmosférica - LMLA/CRSPE/INPE-MCT - e Laboratório de Óptica e Luminescência Atmosférica - LOLA/OES/CRSPE/INPE-MCT” que realiza pesquisas no âmbito geral da dinâmica, propriedades físicas e químicas, da Alta Atmosfera Terrestre.

SUMÁRIO

RESUMO.....	5
CAPÍTULO 1.....	7
LINHAS DE PESQUISA	7
1.1 Estudo da Alta Atmosfera através da Aeroluminescência na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul:.....	7
CAPÍTULO 2.....	8
INTRODUÇÃO.....	8
2.1. Atmosfera Terrestre	8
2.1.1. A atmosfera segundo seu perfil de temperatura.....	9
2.1.2. A atmosfera segundo seus processos físicos.....	10
2.1.3. A atmosfera segundo sua composição iônica.....	11
2.2 Luminescência Atmosférica	15
2.3 OI6300.....	16
2.4 OI5577.....	18
2.5 Irregularidades na Região F Ionosférica	19
2.6 Deriva Eletromagnética de Plasma	20
2.7 Dispersão Equatorial F e a Instabilidade Rayleigh – Taylor.....	20
2.8 Instrumentação de Luminescência Atmosférica.....	22
2.8.1. Imageador All Sky	23
2.8.2. Cameras CCD – Charge Couple Device.....	23
2.8.3. Fotômetro Zenital – FOTSUL.....	24
2.8.4 Espectro Imageador de Varredura Meridional – MIS.....	25
CAPÍTULO 3.....	27
ATIVIDADES DESENVOLVIDAS.....	27
3.1. Atividades Principais.....	27
3.2. Atuação junto a Cientista Japoneses.....	28
3.3. Grupo de Aeronomia	28
3.4. Aquisição de dados de Luminescência Atmosférica no Laboratório de Ótica e Luminescência Atmosféricas – LOLA/OES/RSU/INPE – MCT.....	28
3.5. Artigos Submetidos	29
CAPÍTULO 4.....	30
RESULTADOS E ANÁLISES.....	30
4.1. Estudo da Aeroluminescência emitida pelo Oxigênio Atômico nas linhas espectrais do OI 630 nm e OI 557,7 nm.....	30
4.1.1. Noites calmas:.....	30
4.1.2. Noites com ocorrência de bolhas de plasma:.....	33
CAPÍTULO 5.....	38
CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

CAPÍTULO 1

LINHAS DE PESQUISA

1.1 Estudo da Alta Atmosfera através da Aeroluminescência na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul:

Estudar os processos físicos da Ionosfera Terrestre, de 80 a 500 km de altitude, através de observação de aeroluminescência das linhas de emissão do Oxigênio Atômico OI 557,7 nm e OI 630,0 nm. Para tal, são operados 3 Imageadores Ópticos de alta resolução e um Fotômetro Zenital. O objetivo principal do Programa é detectar as variações espaciais e temporais das emissões das OI5577 e OI 6300, bem como sua dinâmica, no Sul do País em São Martino da Serra (29°S, 53°, -34 dip latitude) e a comparação dos resultados obtidos em outros locais como de Cachoeira Paulista (22.7°S, 45°W, -34 dip latitude).

CAPÍTULO 2

INTRODUÇÃO

2.1. Atmosfera Terrestre

A atmosfera terrestre é subdividida em regiões, apresentando uma complexa estrutura. A FIGURA 2-1 mostra o perfil desta estrutura, baseada na temperatura, na composição química e nos processos físicos dominantes.

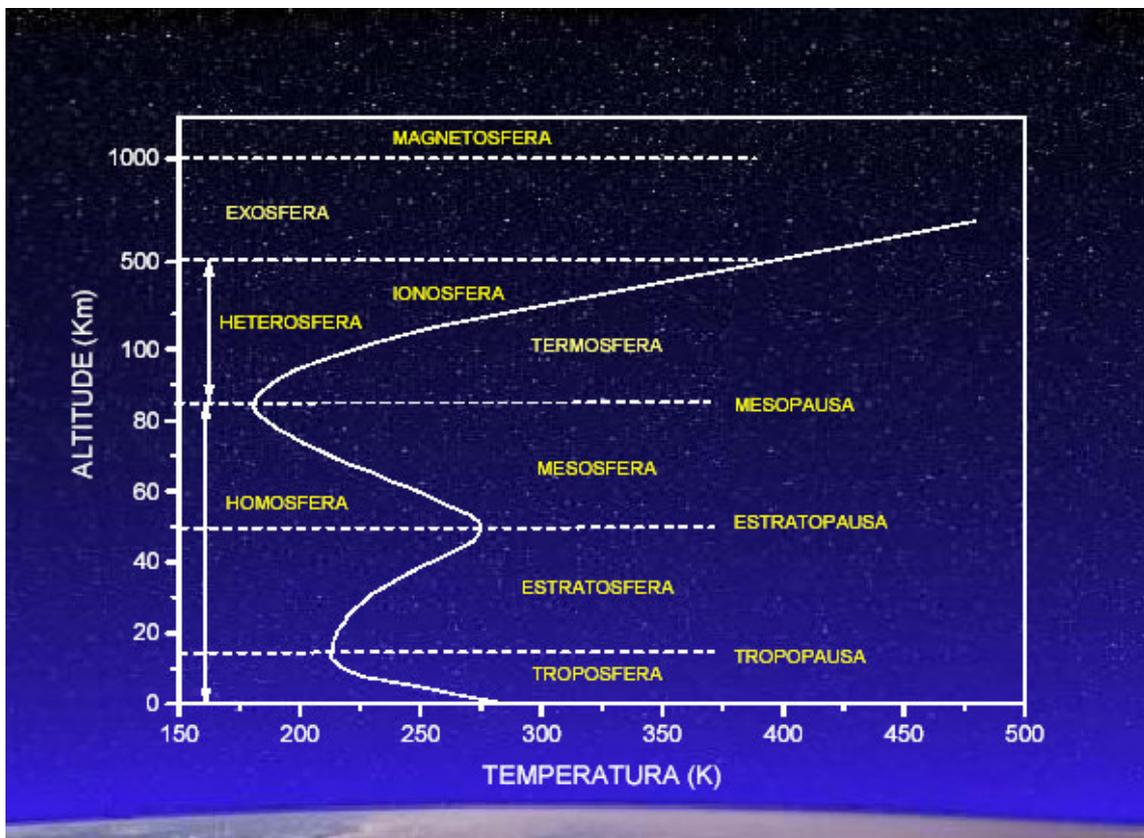


FIGURA 2-1: A Atmosfera Terrestre de 0 a 1000 km, dividindo-se de acordo com o seu perfil de temperatura ou de acordo com sua composição.

Fonte: Brasseur & Solomon, 1986 - p.33, modificada.

2.1.1. A atmosfera segundo seu perfil de temperatura

Troposfera: A região que compreende desde o solo até a altitude de aproximadamente 15 km podendo variar de acordo com a Latitude. A temperatura decresce a uma taxa de cerca de $6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ até um mínimo de 40°C negativo. Esta diminuição é devida à expansão adiabática da Atmosfera aquecida pelo calor do solo, por sua vez, absorvida da Radiação Solar incidente. A obtenção de dados para o estudo da dinâmica e composição desta região é a mais fácil entre todas as Camadas Atmosféricas, pois podem ser coletados dados in situ através de sensores instalados a bordo de aviões, balões ou mesmo na Superfície Terrestre. Seu limite superior é a Tropopausa, a região de temperatura mínima - uma vez que a temperatura diminui com a altitude.

Tropopausa: localizada entre a Troposfera e Estratosfera, de 10 a 15 km, ocorre nessa região, em torno de 15 Km, um mínimo da temperatura de aproximadamente -78°C .

Estratosfera: a camada compreendida entre 15 e 50 km de altura, nesta camada a temperatura aumenta com a altura, chegando a um máximo em 50 km, atingindo uma temperatura de 27°C . Este aumento da temperatura é resultado da absorção da radiação solar no ultravioleta (200 - 300nm).

Estratopausa: separa a alta Estratosfera e a baixa Mesosfera, localizada em torno de 50 Km de altitude com temperatura em torno de -3°C .

Mesosfera: a camada cuja temperatura decresce com a altura, localizada entre 50 e 90 km de altura, esta é a região mais fria da Atmosfera, atingindo um mínimo de -83°C em aproximadamente 90 km de altura. Como praticamente não existe absorção de radiação em altitudes bem acima da Estratopausa (região que separa a alta Estratosfera e a baixa Mesosfera), a Mesosfera tende a diminuir sua temperatura devido à expansão adiabática do ar, como no caso da Troposfera. A Estratosfera e a Mesosfera constituem a chamada Média Atmosfera.

Mesopausa: a região que separa a Mesosfera da Termosfera, localizada aproximadamente em 85 Km de altitude, com temperatura em torno de -83°C , que é

considerada a mais baixa temperatura da Atmosfera.

Termosfera: A camada mais externa, onde a temperatura cresce rapidamente com a altura, caracterizada por altas temperaturas, atingindo um máximo de aproximadamente 1000°C, denominada temperatura exosférica e denotada por T^∞ ou TE. A maior absorção da radiação ultravioleta nessa região, que é responsável pelas altas temperaturas. Os processos de remoção de calor são: convecção na Troposfera, condução na Termosfera e radiação na Mesopausa.

2.1.2. A atmosfera segundo seus processos físicos

Quanto à composição química a Atmosfera Terrestre é uma mistura de gases, dos quais o nitrogênio é o mais abundante, dessa maneira podemos dividi-la também em camadas, segundo a abundância de constituintes. Até uma altura de aproximadamente 100 km, a mistura de gases é praticamente constante, i.e., até essa altura a proporção de mistura de um certo gás se mantém. Esta região inferior da Atmosfera é chamada **Homosfera**. Na Homosfera, a proporção volumétrica de N₂ é de 78% e de O₂ de 21%, sendo os gases restantes o argônio (Ar), dióxido de carbono (CO₂), os gases nobres e outros em proporções ainda menores. Embora pouco abundantes, CO₂, H₂O e O₃ têm grande importância devido a sua capacidade de absorver diretamente a radiação solar. O ozônio tem a função de uma verdadeira cortina protetora, pois absorve os raios ultravioletas solares, letais para a vida animal.

A **Heterosfera** é região onde os gases se distribuem quase independente um do outro, ou seja, se distribuem de acordo com suas próprias escalas de altura e não há mais mistura proporcional, esta região fica aproximadamente entre de 100 km e 500 Km. Porém já acima de 200 km, o nitrogênio e o oxigênio moleculares deixam de ser os componentes majoritários, esta função passa respectivamente para oxigênio atômico, hélio e hidrogênio, à medida que aumenta a altura. Existe ainda a região denominada Exosfera, que é a região localizada acima de 500 Km, onde predominam os gases leves (hélio, hidrogênio, nitrogênio).

Na FIGURA 2-2 mostra-se a variação da concentração de alguns componentes atmosféricos em função da altura, da superfície terrestre até 1000 Km, de acordo com o

Modelo U.S. Standard 1976.

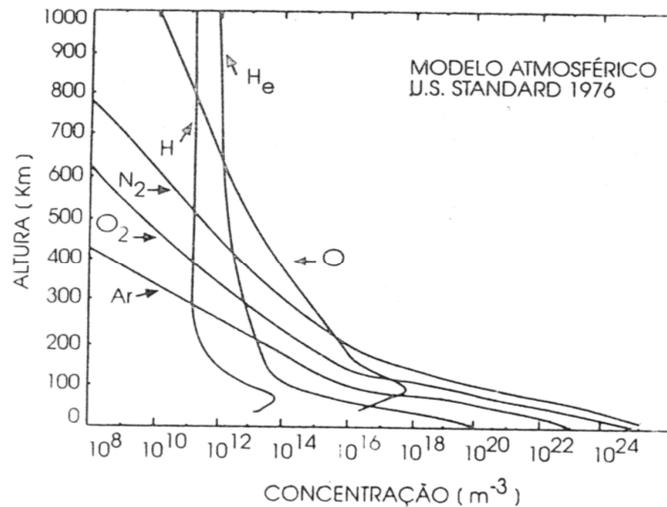


FIGURA 2-2: Variação de alguns componentes do ar atmosférico com a altura.

Fonte: Kirchoff, 1991.

Na região mais externa da Atmosfera, Exosfera (acima de 500 Km), as colisões entre moléculas e átomos são pouco freqüentes, as partículas neutras deslocam-se, portanto, em órbitas balísticas no campo gravitacional. Esta é uma região onde há perda constante de partículas para o espaço. Na Exosfera pode referir-se à Heliosfera em que predomina o Hélio (He) e à Protonosfera em que o Hidrogênio é o mais abundante.

2.1.3. A atmosfera segundo sua composição iônica

A Ionosfera é uma camada condutora, constituída de um plasma fracamente ionizado, onde as camadas mais baixas apresentam um alto grau de partículas neutras de forma que as forças colisionais predominam.

Nas camadas mais altas da Ionosfera, as forças coulombianas tendem a dominar, devido à diminuição da freqüência colisional com a altitude. Este meio ionizado sofre constante transformação de ordem físico-químico e ainda que as partículas neutras predominem frente às carregadas, elas exercem grande influência na atmosfera neutra.

A ionosfera estende-se de, aproximadamente, 60 km a alturas superiores a 1000 km. A fonte primária de ionização provem da fotoionização dos componentes atmosféricos promovida pelos Raios Solares na faixa de comprimento de onda no Extremo Ultravioleta – EUV, e de Raios – X. Fontes secundárias de ionização constituem-se de processos colisionais entre partículas excitadas – elétrons, íons ou moléculas neutras. A ionosfera é constituída em sua maior parte por íons monovalentes positivos (O^+ , O_2^+ , N^+ , NO^+ , N_2^+ , H^+ , He^+) e elétrons.

Em consequência das diferentes Taxas de Absorção e diferentes Constituintes Atmosféricos são formadas distintas regiões na Ionosfera, sendo designadas por D, E e F. Na FIGURA 2-3 apresenta-se a ilustração de um Perfil típico da densidade eletrônica da Ionosfera. A camada F ainda é sub-dividida em duas outras camadas F1 (mais baixa) e F2 (mais alta). Atualmente se estuda uma terceira camada (F3).

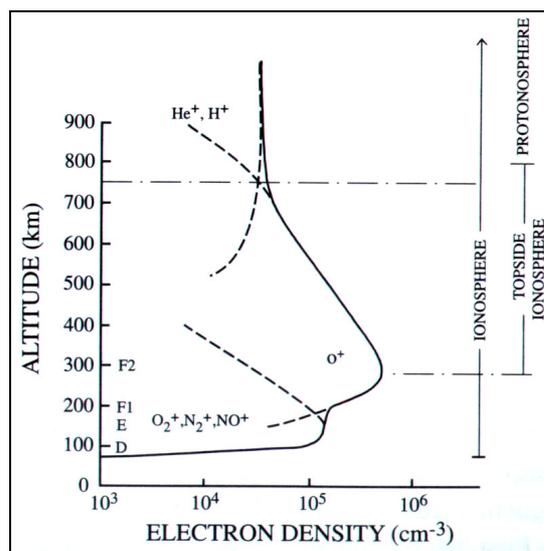


FIGURA 2-3: Perfil típico da densidade eletrônica da Ionosfera, mostrando as regiões de concentração dos principais íons que formam a ionosfera e a estrutura das camadas.

Fonte: Robert & Andrew, 2000 – Figura 2.16

A camada D (50 – 100) é fracamente ionizada devido à fraca Radiação Solar que recebe. A ionização desta camada é altamente dependente da Atividade Solar, aumentando consideravelmente em Períodos Conturbados. Esta camada desaparece após o Pôr do

Sol devido à rápida recombinação dos íons existentes.

Logo acima (100 – 150 km) situa-se a camada E, que tem como grande fonte de ionização a Radiação Solar no espectro dos Raios – X. Nesta região as reações químicas não são complicadas, ela é constituída basicamente por íons NO^+ , O_2^+ e N_2^+ . A densidade total dos íons é da ordem de 10^5 cm^{-3} , enquanto que a densidade de partículas neutras predomina na ordem de 10^{11} cm^{-3} .

Temos que a região E é constituída de plasma fracamente ionizado, e colisões entre partículas carregadas não são importantes. A camada F pode ser dividida em F₁, F₂ e se estuda uma terceira F₃. Estas camadas da região F produzem um máximo de ionização após o meio – dia, sendo que os átomos que a compõem permanecem ionizados por um longo período após o Pôr do Sol, e durante atividades solares intensas, podem ficar ionizados durante toda a noite. Na camada F₂ (150 – 250 km), trocas íons – átomos e processos de transporte começam a ficar importantes, nesta camada a principal fonte de ionização é a Radiação Solar no espectro do EUV. Geralmente durante a noite, a camada F₁ desaparece, pois a concentração eletrônica é controlada, fundamentalmente pelo ângulo zênite solar.

A variação sazonal e a atividade solar influenciam no comportamento dessa camada, que é mais pronunciados no período de verão e durante a ocorrência de Perturbações Ionosféricas (Davies, 1990). A camada F₂ estende-se até o início da Plasmafera (250 – 1000 km), tem como característica principal a existência de uma região de máxima concentração eletrônica que se situa entre 250 e 400 km de altitude, cujo máximo de ionização acontece com o resultado de equilíbrio entre transporte de plasma e processos de perda química.

A densidade de íons no cume da região F₂ é de 10^6 cm^{-3} que é aproximadamente 10 vezes maior que na região E, enquanto que a densidade neutra é de 10^8 cm^{-3} , ainda 2 vezes maior que a densidade de íons. O plasma nesta região é ionizado parcialmente, e a colisão entre diferentes partículas carregadas e neutras deve ser levada em conta. A radiação ionizante dessa camada é basicamente a mesma radiação responsável pela ionização da camada F₁, porém a camada F₂ não segue a mesma variação diurna e

sazonal (Davis, 1990).

A Radiação Solar desempenha um papel limitado na produção e manutenção de elétrons livres, pois os processos de transportes e as perturbações associadas às Tempestades Magnéticas tornam a variação tempo-espacial desta camada extremamente complexa. Um pico de densidade eletrônica tende a atingir um valor máximo logo após o pôr do Sol, e a camada F2 pode persistir por toda a noite, embora sua intensidade diminua continuamente, pois a Atmosfera Neutra nesta região é suficientemente tênue para evitar que haja recombinação significativa (Beard, 1975). Valores mínimos na densidade eletrônica ocorrem pouco antes do amanhecer, devido à recombinação dos elétrons durante o período noturno (McNamara, 1991), aumentam gradativamente no decorrer do dia.

Dados de Perfil de Composição Iônica para a Ionosfera Diurna e Noturna em Arecibo, Porto Rico - medidas de Radar de Espalhamento Incoerente em 10 de Fevereiro de 1972, são apresentados na FIGURA 2-4.

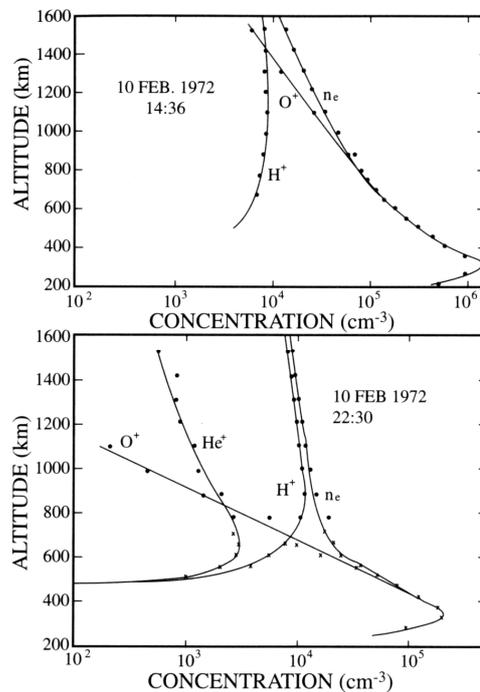


FIGURA 2-4: Perfil de concentração de alguns íons para a Ionosfera Diurna –acima – e Ionosfera Noturna - abaixo.

Fonte: Robert & Andrew, 2000 – Figura 11.14

2.2 *Luminescência Atmosférica*

Segundo Chamberlain (1961), Luminescência Atmosférica, do inglês *Airglow*, pode ser definida como a radiação amorfa continuamente emitida pela Atmosfera Planetária, estendendo-se do Ultravioleta Distante ao Infravermelho Próximo. A Luminescência Atmosférica é um fenômeno óptico da alta atmosfera sendo basicamente emissões de fótons pelo componente atmosférico excitado, tais como oxigênio atômico e molecular, hidroxila e sódio.

A produção desta luminosidade é devida a diversos processos físico-químicos e em geral, ocorre através da emissão de linhas espectrais discretas. Esta radiação relativamente constante cobre todas as latitudes.

A Aurora é emitida em latitudes superiores, numa região de formato oval em torno de 67° de Latitude Geomagnética e está associada ao influxo de partículas solares na Atmosfera Superior.

Aurora ocorre mais intensamente durante e após Distúrbios Solares, na qual partículas carregadas penetram na Atmosfera, vindo da Magnetosfera Exterior, energizando os constituintes atmosféricos por colisões, ficando claro a correlação do fenômeno da Aurora com a Atividade Magnética.

A Alta Atmosfera Terrestre é responsável por um contínuo de emissões de *Airglow*. Esta emissão ocorre devido à absorção de Radiação Ultravioleta Solar por espécies químicas presentes a cerca de 70 km de altitude tais como N_2 , O , O_2 e N_a . A absorção de Radiação Ultravioleta por estes átomos e moléculas leva-os a um estado quântico excitado, de maior energia e muitas vezes meta-estável, do qual estes tendem a decair, retornando a seu estado fundamental através da emissão de Radiação Eletromagnética.

Os processos de excitação/emissão mais comuns são a ressonância, a fluorescência, a quimiluminescência e a excitação por colisões. Os processos de emissão ocorrem em competição com processos de perda de energia pela molécula ou átomo devido a colisões com outros constituintes da Atmosfera, nas quais as espécies excitadas perdem energia e retornam a seu estado padrão sem emissão de radiação.

A emissão de radiação, classificada genericamente como Luminescência Atmosférica, pode ser do tipo emissão instantânea, denominada *Dayglow*, no qual as radiações absorvidas são de frequências de ressonâncias das moléculas, ou pode ser do tipo *Nightglow*, de emissão retardada, ocorrendo quando a energia armazenada pela absorção de radiação solar é liberada a noite por vários processos de relaxação energética. O *Nightglow* contribui, em uma noite sem lua entre 40 a 50% da luminosidade total do céu noturno, fazendo parte da luminosidade emitida pelas estrelas. Observações espectroscópicas revelam muitas linhas de emissão e bandas, e um *continuum* que se estendem desde comprimentos de onda inferiores a 0.4μ ao Infravermelho.

O estudo da Luminescência Atmosférica cobre questões de distribuição Geofísica de constituintes, a intensidade de várias linhas e a determinação precisa dos seus comprimentos de onda, e particularmente, a identificação da transição eletrônica responsável por cada linha. Uma aplicação importante é observar o desvio Doppler de uma linha conhecida para assim encontrar a velocidade da espécie emissora e conseqüentemente medir ventos termosféricos. Algumas das linhas de emissão de Aeroluminescência mais importantes são as linhas do Oxigênio Atômico em 557,7 nm – linha verde - e em 630,0 nm – linha vermelha - a linha do Sódio em 589,3 nm e as bandas de emissão espectral do Radical OH.

2.3 OI6300

A emissão vermelha do Oxigênio Atômico - OI6300 - é a mais utilizada para o estudo da dinâmica da região F Ionosférica - Termosfera noturna. Ela provém de uma camada emissora de aproximadamente 50 km de espessura localizada, próximo a 250 km de altitude, a abaixo do pico da região F.

A intensidade da Aeroluminescência aumenta quando o Plasma Ionosférico – o pico da região F - move-se para baixo e diminui quando ocorre o contrário - Plasma Ionosférico move-se para cima. Da mesma forma, a intensidade desta emissão varia de acordo com a Densidade de Elétrons Ionosféricos, sendo mais intensa quando existe uma maior Densidade de Elétrons e menos intensa quando a Densidade é menor.

A linha vermelha (630 nm) do OI é emitida pelo átomo de oxigênio no nível de energia

$O(^1D)$, que ao decair $O(^1D) \rightarrow O(^3P) + h\nu(630nm)$, libera o excesso de energia na forma de radiação eletromagnética. A FIGURA 2-5 ilustra os níveis de energia do oxigênio atômico relativos às várias transições eletrônicas deste átomo.

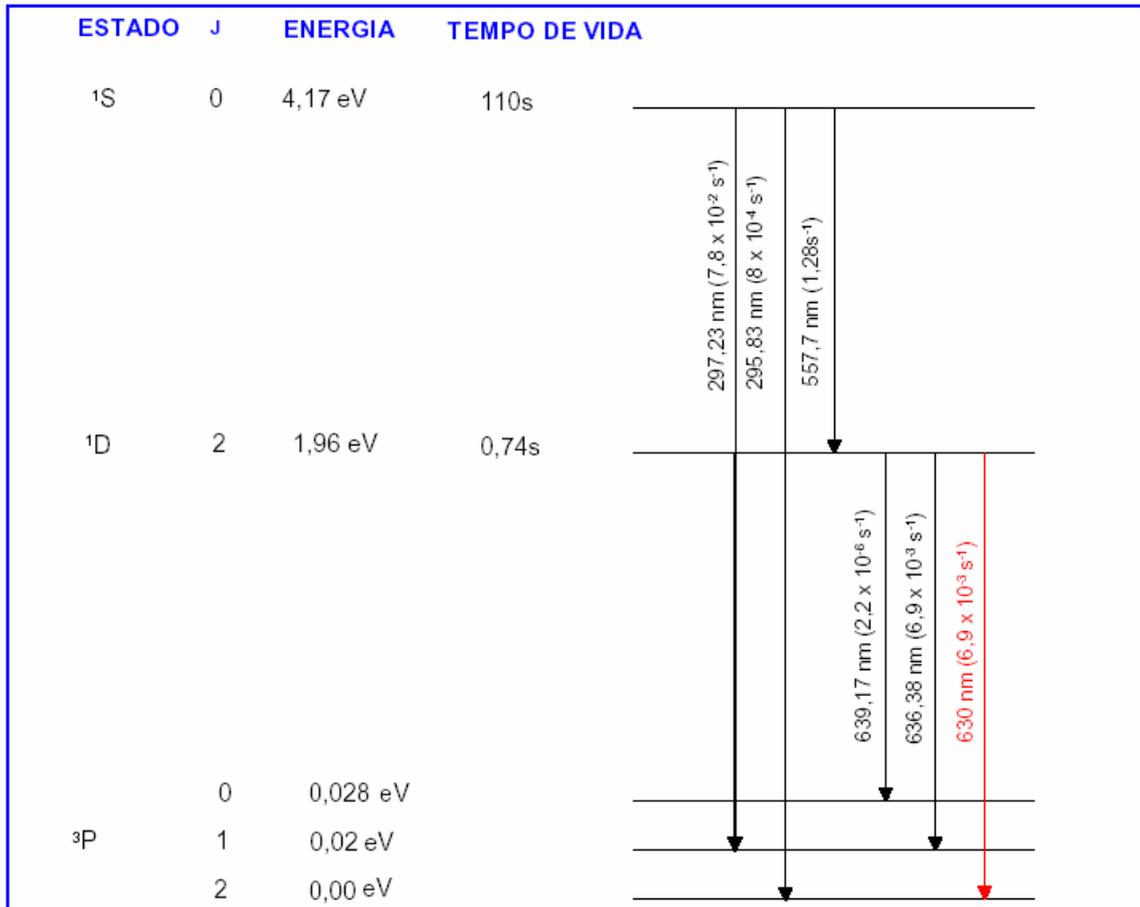


FIGURA 2-5: Diagrama de nível de energia para o oxigênio atômico.

FONTE: Krassovsky, 1962 - p. 912, modificada (Pedrina).

O nível $O(^1D)$ é gerado a partir do processo de recombinação dissociativa do íon molecular O_2^+ com elétrons da região F Ionosférica, o qual é expresso pela reação (1):



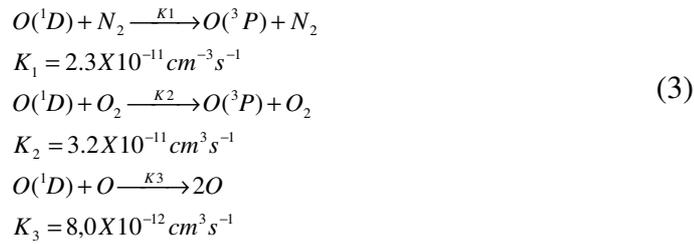
Onde h é a constante de Planck, ν é a frequência correspondente ao comprimento de onda 630 nm e $h\nu$ é a energia que poderá excitar um ou dois dos átomos de oxigênio. O símbolo (*) indica que o átomo está no estado excitado. A relação de rendimento para o $O(^1D)$ produzido como uma função de altura pode ser calculada das taxas de emissão

volumétrica. Neste cálculo a produção e perda são esquemas apresentados por Link e Cogger (1988), veja (2), (3), (4) e (5).

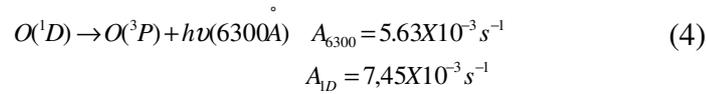
Produção:



Perda do $O(^1D)$:



Radiação:



Com estes dados podemos ainda calcular a taxa de emissão volumétrica pela seguinte reação:

$$V_{6300} = f(^1D) \alpha_1 [O_2^+] [e] \times \frac{A_{6300}}{A_{1D} + K_1 [N_2] + K_2 [O_2] + K_3 [O]} \quad (5)$$

Observações das variações de intensidade desta emissão têm sido usadas para o estudo da Química e da dinâmica da região F Ionosférica.

2.4 OI5577

A linha verde do Oxigênio Atômico possui duas fontes de emissão, uma na Região da Mesosfera e outra na Ionosfera, região F. Em Médias Latitudes, a maior parte desta emissão é decorrente da recombinação do Oxigênio Atômico na Mesopausa. Entretanto, em Baixas Latitudes e Regiões Equatoriais, uma significativa fração desta emissão surge de processos de recombinação dissociativa na região F. Observações de solo desta

emissão medem a intensidade integrada que emana das duas fontes - Regiões da mesosfera e na ionosfera. O processo de produção do Oxigênio Atômico excitado $O(^1S)$ na região F à noite é o mesmo da emissão da linha OI6300, porém a fração de produção, é diferente, aproximadamente 20 % da mesma.

2.5 Irregularidades na Região F Ionosférica

Na Ionosfera Terrestre existem extensas regiões alinhadas ao longo das linhas do Campo Geomagnético, e cujo, interior ocorre um alto grau de rarefação do plasma ionosférico (Hanson e Sanatomi, 1973; McClure et al.; 1977; Sahai, 1981; Sobral et al.; 1980 a, b). As irregularidades ionosféricas de grande escala são normalmente denominadas “Bolhas de Plasma”. As “Bolhas de Plasma” se desenvolvem na base da camada F, logo após o Pôr do Sol e estende-se a altas altitudes, de até 1500 km. Possuem dimensões horizontais Norte – Sul muito grande, da ordem de 5000 km ao longo das linhas do Campo Magnético, na extensão Leste – Oeste entre a região de distúrbios de dezenas a centenas de km. Após se formar, as “Bolhas” derivam para cima com uma velocidade que geralmente varia de 100 m/s a 500 m/s. As “Bolhas de Plasma” apresentam uma deriva zonal ao longo da linha do Equador Magnético, representada na FIGURA 2-6, que pode chegar a aproximadamente a 200 m/s.

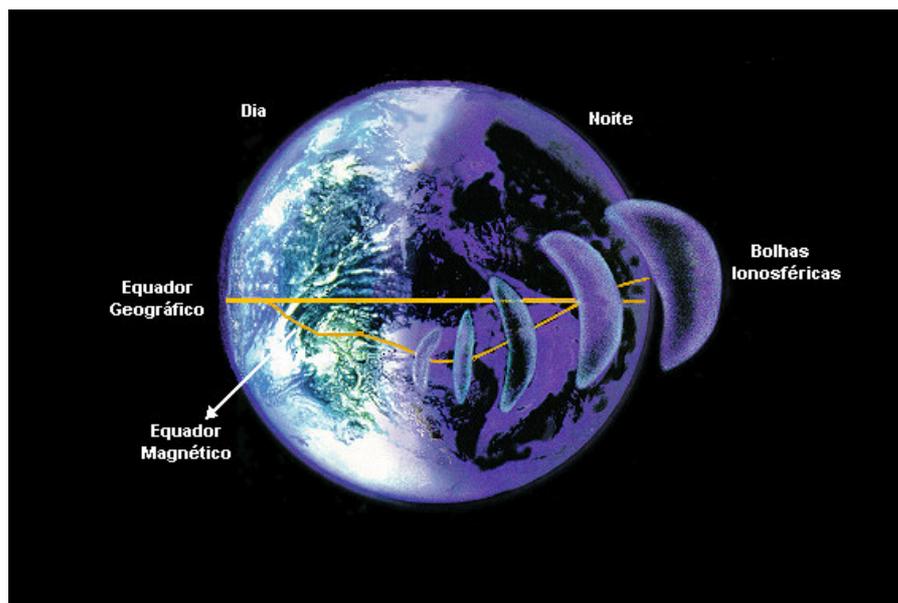


FIGURA 2-6: Ilustração do deslocamento de uma bolha de plasma ao longo do equador

magnético.

Fonte: <http://www.dae.inpe.br/iono/entrada.htm>

O mecanismo mais aceito na formação das “Bolhas de Plasma”, são os processos de Instabilidade de Rayleigh – Taylor (Haerendel, 1973) e a Deriva $E \times B$ (Reid, 1968).

2.6 Deriva Eletromagnética de Plasma

A combinação da ação de Campos Elétricos E e Magnéticos B , causam a deriva eletromagnética de plasma. O transporte de plasma acontece na direção perpendicular ao Campo Magnético, e é controlado pela Deriva $E \times B$. O Campo Elétrico durante o dia tem sua fonte nos Ventos Neutros de Marés que é responsável pelo Dínamo da Região E, neste período o plasma move-se para cima e tem direção Oeste. A noite acontece o contrário, os Ventos Termosféricos responsáveis pelo Dínamo da Região F formam um Campo Elétrico, que faz o plasma mover-se para baixo e ter direção Leste. Na formação da Deriva Eletromagnética Vertical tem como exemplo durante o dia a existência de uma excelente camada condutora (110 km), esta camada está localizada na Região E, é conhecida como a Região do Dínamo Atmosférico. Seu comportamento é semelhante a um Dínamo, quando forças externas representadas pelos Ventos Neutros de Marés a movimentam através do Campo Geomagnético geram os Campos Elétricos Zonais que conseqüentemente causam a Deriva Eletromagnética Vertical $E \times B$, neste caso com direção Oeste e para cima. Apresentando o “Pico de Pré – Reversão” ao anoitecer, caracterizado por um aumento abrupto na Deriva Vertical.

2.7 Dispersão Equatorial F e a Instabilidade Rayleigh – Taylor

O perfil vertical da densidade eletrônica da Ionosfera Terrestre modifica-se do dia para a noite e logo após o Pôr do Sol adquire características dinâmicas e morfológicas que favorecem a formação das “Bolhas de Plasma”, esta instabilidade do plasma da Região F Equatorial tem o nome genérico de Dispersão Equatorial F - ESF (“Equatorial Spread F”). E para melhor explicar a origem da ESF, Dungey em 1956 sugeriu a Teoria de Instabilidade Rayleigh – Taylor, desde então vários modelos teóricos foram desenvolvidos. Após o Pôr do Sol a região E inicia um processo rápido de recombinação e não há condutividade suficiente para curto – circuitar os Campos Elétricos da Região

F. Devido à recombinação e aos efeitos eletrodinâmicos (movimento vertical da Região F devido a Deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$), o gradiente de ionização da parte inferior da Camada F começa a aumentar. Quando a camada suficientemente alta, ou o gradiente de ionização este suficientemente elevado para superar os efeitos de recombinação, haverá o crescimento das flutuações na densidade, devido à instabilidade Rayleigh – Taylor representado na FIGURA 2-7.

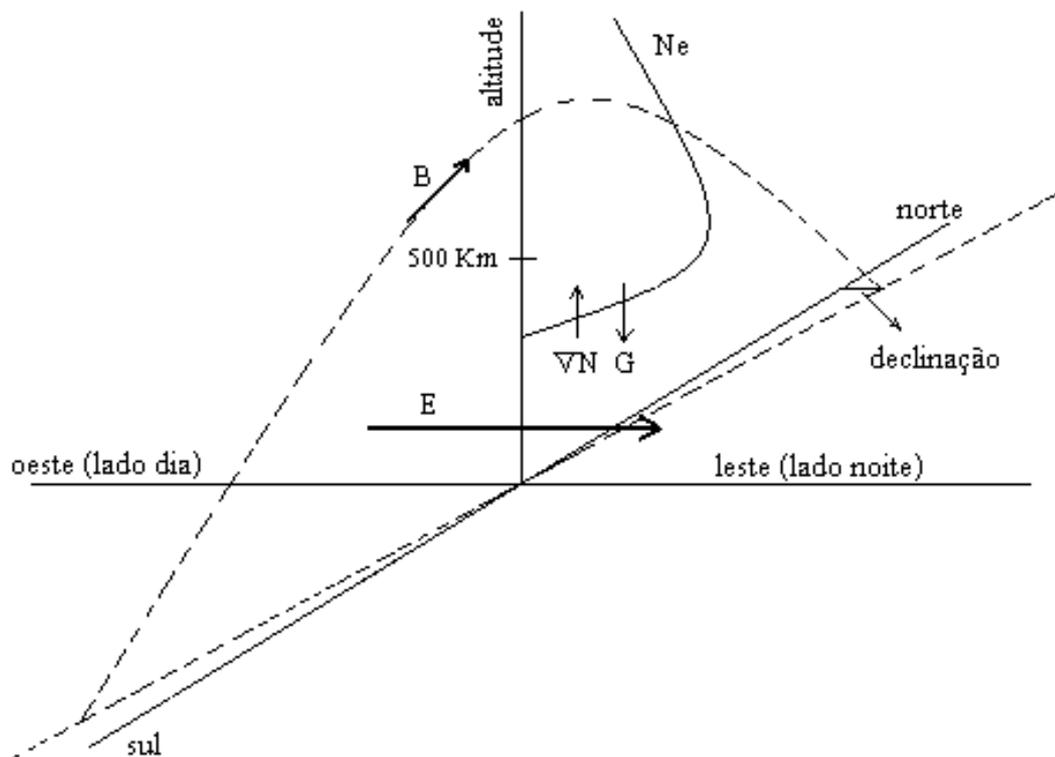


FIGURA 2-7: Exibição do diagrama da configuração clássica para a Instabilidade Rayleigh-Taylor. A Camada F sobe com o aumento do Campo Elétrico e um gradiente de densidade começa a aumentar na Base da Camada F.
 Fonte: Robert & Andrew, 2000 – Figura 11.29, modificada.

Essas flutuações dão origem as bolhas de plasma na parte inferior da camada, que sobem não – linearmente pelo movimento de polarização $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, acima do pico da Região F, estendendo as irregularidades para a parte superior da camada (Pimenta, 2002).

As “Bolhas de Plasma” apresentam um deriva zonal Oeste – Leste ao longo da Linha do Equador Magnético, com uma velocidade aproximada de 200 m/s.

A Deriva Zonal do Plasma Ionosférico é causada por Campos Elétricos Verticais na região F, que por sua vez são gerados pela ação de ventos neutros zonais. A FIGURA 2-8 apresenta o mapa da América Latina, destacando a localização do Observatório Espacial do Sul, destacando o Equador Magnético e a Latitude Geomagnética.

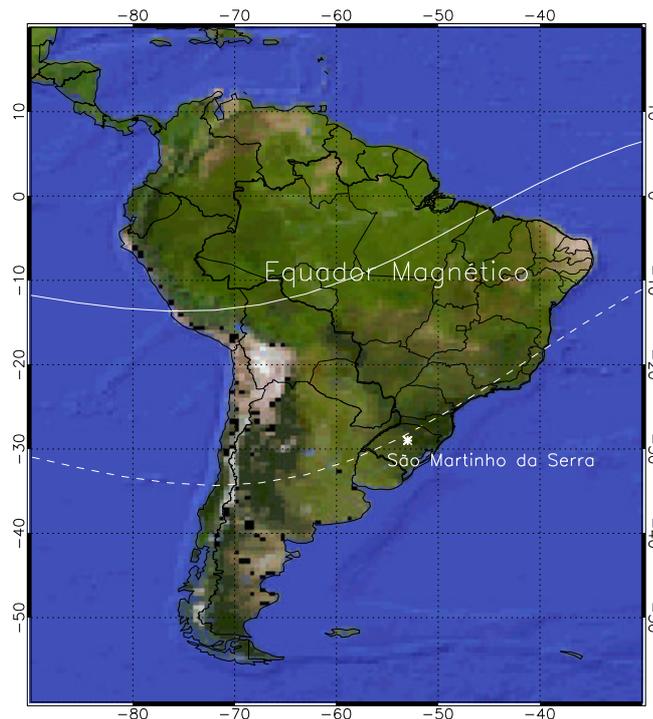


FIGURA 2-8: Localização do Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra – RS, juntamente com a linha do Equador Magnético e a Latitude Geomagnética que passa próxima ao observatório.

Fonte: Cristiano Max Wrasse

2.8 Instrumentação de Luminescência Atmosférica

Das várias técnicas utilizadas para se realizar medidas e monitoramento de Luminescência Atmosférica, estão sendo operados no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE, junto ao Laboratório de Ótica e Luminescência Atmosférica – LOLA/OES/CRSPE/INPE, veja FIGURA 2-9. Estão instalados os seguintes

equipamentos provenientes da Cooperação Brasil-Japão: Imageador All Sky, 2 Câmeras CCD, Fotômetro Zenital e o Espectrômetro Imageador de varredura Meridional.



FIGURA 2-9: Laboratório de Ótica e Luminescência Atmosférica no Observatório Espacial do Sul – Prédio 5.

2.8.1. Imageador All Sky

O Imageador tipo all sky possui uma câmera de vídeo com a lente tipo all-sky. Com a sensibilidade de detecção de sinal de cerca de 500 R (Rayleigh), permite observar fenômenos óticos cuja variação de intensidade maior que 1 KR. A parte ótica consiste de uma lente *fisheye*, um visor noturno mais uma lente *relay* (*night-viewer intensifier*) e de uma Câmera CCD de TV (Figura 3-7). No topo da estrutura onde estes dispositivos estão montados, uma janela semi-esférica de acrílico incolor protege a lente. O sinal de vídeo obtido pela Câmera de TV é enviado ao *timer* do vídeo e posteriormente é separado no monitor de TV e no gravador do vídeo.

2.8.2. Cameras CCD – Charge Couple Device

Uma das câmeras possui o sistema óptico constituído por uma lente tipo *wide angle*,

sendo operada em 1 minuto (tempo integrado) possuindo uma sensibilidade de detecção de intensidade acima de 100 R, enquanto o outro sistema óptico é constituído por lentes do tipo *all sky*, também operada com tempo de integração de 1 minuto, possui sensibilidade de 1KR, ambas com visor noturno.

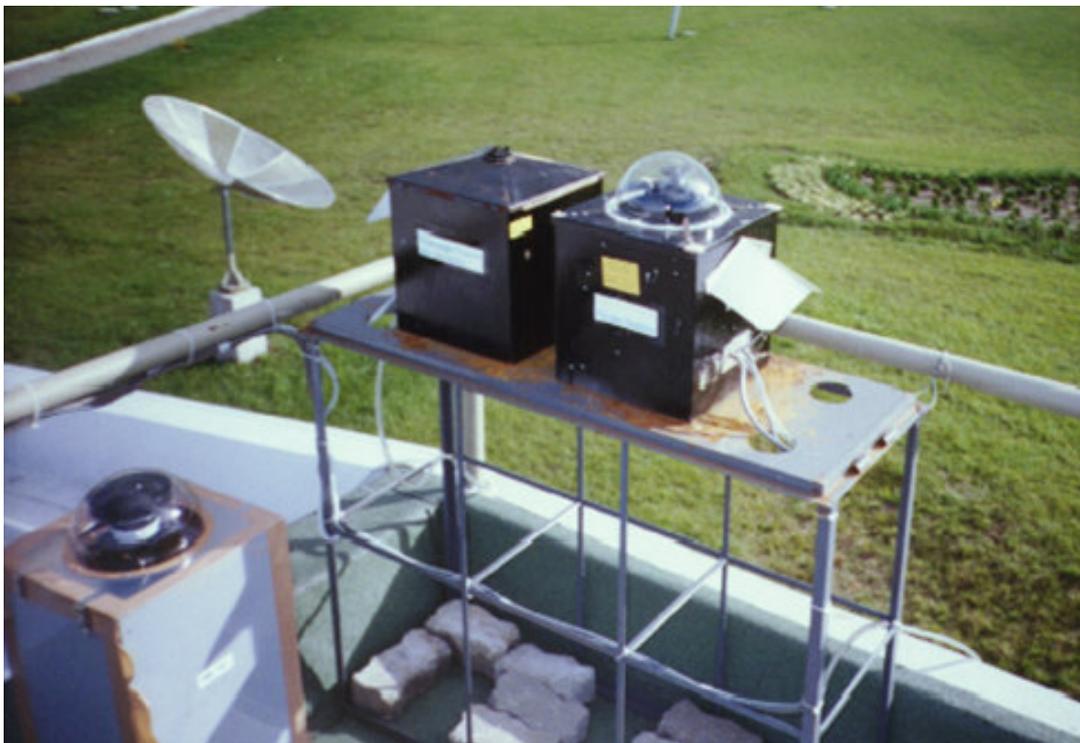


FIGURA 2-10: Equipamentos que compõem o sistema de observação da emissão Airglow do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE. Câmeras montadas sobre a plataforma.

2.8.3. Fotômetro Zenital – FOTSUL

Fotômetro (detector ótico) com sistema de filtros de interferência ótica (um caso especial do interferômetro *Fabry-Perot*) capaz de selecionar comprimentos de onda distintos das transições eletrônicas do Oxigênio Ionizado nos comprimentos de onda 557,7 nm e 630 nm. O fotômetro é composto por 2 filtros que se alternam, registrando os dois comprimentos de onda, num período de 2 segundos em cada. O sistema de filtros está acoplado com um tubo fotomultiplicador e um sistema eletrônico de amplificação de sinal. Na FIGURA 2-11 tem-se o detector propriamente dito (fotômetro).

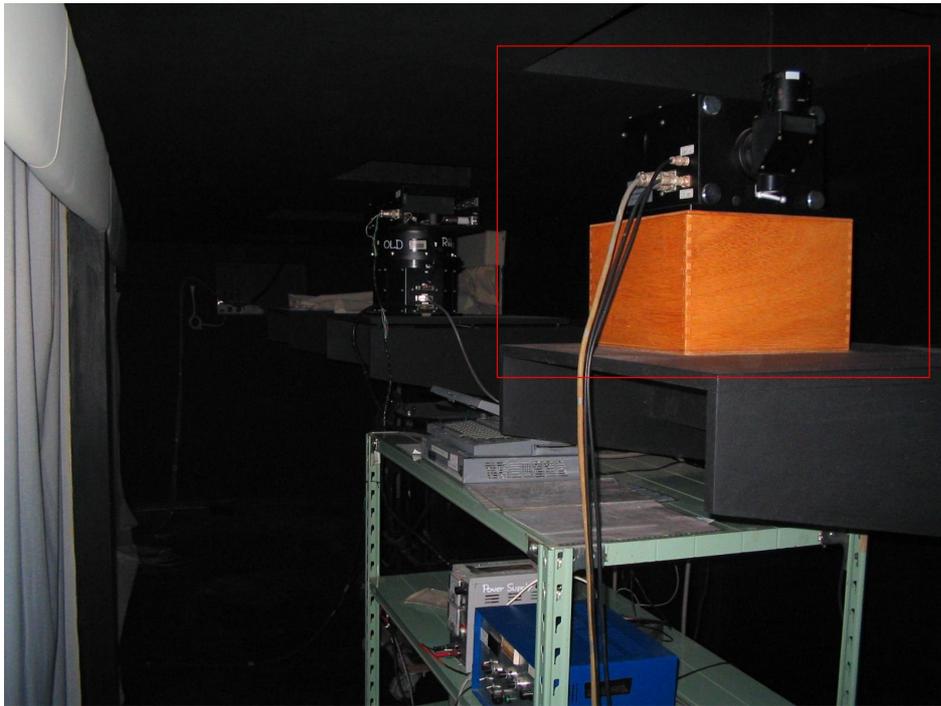


FIGURA 2-11: Sistema do fotômetro instalado no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE /INPE.

2.8.4 Espectro Imageador de Varredura Meridional – MIS

O Espectro-Imageador de Varredura Meridional – MIS têm resolução espectral média entre 0.5 nm e 1.0 nm, podendo observar uma região espectral de aproximadamente 80 nm e com um campo de visão meridional de aproximadamente 160°. O equipamento inclui uma Câmera tipo CCD, altamente sensível e sofisticada que só deve ser usada em condições apropriadas, ou seja, em noites de Lua Nova. Além da câmera, acompanha o equipamento um sistema de refrigeração composto da unidade de refrigeração e a unidade peltier. Este sistema permite o ajuste da temperatura interna da Câmera CCD que deve ficar praticamente constante, de modo a diminuir o ruído térmico da mesma e assim os dados não sofram muita interferência. A unidade peltier é responsável pelo controle e monitoramento da temperatura, ajustada em torno de 5°C. O MIS ainda é constituído por um Conjunto de Lentes, Espelhos e Rede de Difração. As lentes têm finalidade de colimar os raios de luz, enquanto os espelhos têm objetivo de direcionar os feixes de luz de modo a chegarem à câmera. Esta radiação é colimada pela fenda e é

então transmitida e resolvida pela rede de difração, resultando em linhas espectrais que podem ser observadas na escala de difração. A Unidade de Intensificação é responsável principalmente pela intensificação do sinal e ainda transferência destes para a placa de aquisição - DT 3152 - que está alojada no Microcomputador onde estes dados serão adquiridos e gravados em arquivos binários, podendo também serem salvos como outros tipos de arquivos, como por exemplo: *.jpg, *.bmp. Estes são mais utilizados para uma visualização da imagem sem tratamento e aqueles para análise em programas específicos escritos na linguagem de programação IDL (Interactive Data Language). Atualmente, o MIS está em fase de calibração, a qual consiste na mudança da faixa espectral de observação de 470-530 nm para aproximadamente 555-635 nm. Foram realizadas algumas observações com a nova configuração, e os resultados estão sendo analisados. Como trabalhos futuros, está sendo desenvolvido alguns programas em IDL para a leitura, visualização das imagens e posterior análise.

O Fotômetro, Câmeras CCD e o MIS, são operadas somente na ausência de fontes de luz artificiais, em noites de lua nova, pois uma fonte luminosa intensa causaria danos aos equipamentos. Os períodos preferenciais para observações são aqueles que coincidem com períodos de grande atividade solar, quando podem ocorrer fenômenos de precipitação de partículas de alta energia na Atmosfera, ocasionando um aumento na emissão de Luminescência Atmosférica, causada por desexcitação de elementos, envolvidos em processos colisionais. A FIGURA 2.12 mostra a bancada principal onde são operados os computadores que controlam todos os equipamentos instalados no observatório.



FIGURA 2-12: Central de controle instalado no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE, no Prédio 5.

CAPÍTULO 3

ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

Nesta etapa do Relatório, apresentamos a atividade do Bolsista no período final do Projeto, iniciado no mês de Abril, com término previsto para Agosto de 2005, dando continuidade às atividades desenvolvidas e em substituição do Bolsista Daniel Michelin dos Santos, que se desligou do projeto por motivos particulares.

3.1. Atividades Principais

- Coleta de dados no Observatório Espacial do Sul – Monitoramento Noturno;
- Redução, análise e interpretação dos dados, na qual tive conhecimentos de alguns programas como: An Aurora, Bitran Câmera CCD, ORIGIN, etc;
- Constante revisão teórica em livros, artigos, seminários e revistas especializadas, bem como a busca diária de compreender os fenômenos relacionados à atmosfera terrestre.
- Ajuda na manutenção e preservação dos equipamentos dos laboratórios,

abrigados dos Prédios 5 e 6 no Observatório Espacial do Sul.

3.2. Atuação junto a Cientista Japoneses

Durante o período de atividade neste relatório descrito, o bolsista esteve em constante comunicação com Cientistas Japoneses, do **Programa de Aeroluminescência do Projeto Radioastronomia, Cooperação Brasil – Japão, Convênio: INPE - UFSM**, seja por e-mails ou acompanhando a visitas Técnicas – Científicas ao Observatório Espacial do Sul – OES/RSU/INPE – MCT.

3.3. Grupo de Aeronomia

A atuação do acadêmico é no Centro Regional de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT, junto ao grupo de Aeronomia. Este grupo que realiza pesquisas relacionadas à dinâmica da Alta Atmosfera, desde agosto de 2004, com Iniciação Científica e estudos da Alta Atmosfera.

Desde novembro de 2004 o acadêmico foi designado para atuar a nível discente como responsável do Programa de Aeroluminescência, respondendo pelo Programa, atividades e pelos equipamentos de observações ópticas instalados no Observatório Espacial do Sul.

3.4. Aquisição de dados de Luminescência Atmosférica no Laboratório de Ótica e Luminescência Atmosféricas – LOLA/OES/RSU/INPE – MCT

Foram realizados campanhas para aquisição de dados da Aeroluminescência Noturna, como o acompanhamento no concerto e calibração do MIS, ocorrida em abril de 2005, bem como a aquisição de dados efetuado com as Câmeras CCD e o Fotômetro FOTSUL e demais sistemas de aquisição de dados instalados no Observatório Espacial do Sul – OES/RSU/INPE – MCT.

As observações são realizadas em dias com condições climáticas aceitáveis e sem Lua, tomando sempre cuidado com mudanças climáticas durante a noite de imageamento, o que poderia danificar os equipamentos no caso de chuva pôr exemplo.

3.5. Artigos Submetidos

1. Título: “OBSERVAÇÕES SIMULTÂNEAS DA EMISSÃO DO OI 630 NM DA AEROLUMINESCÊNCIA NOTURNA ATRAVÉS DE FOTÔMETROS NOS OBSERVATÓRIOS ESPACIAIS DE SÃO MARTINHO DA SERRA (OES) E CACHOEIRA PAULISTA (CP)”.

Autores: Elói A. Grellmann, José V. Bageston, Cristiano M. Wrasse, Kasuo Makita, Hisao Takahashi, Nelson J. Schuch.

Evento: Ninth International Congress of the Brazilian Geophysical Society

Local: Salvador/BA, Brazil

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. Estudo da Aeroluminescência emitida pelo Oxigênio Atômico nas linhas espectrais do OI 630 nm e OI 557,7 nm

A seguir veremos as observações das emissões espectrais da Aeroluminescência Atmosférica do OI 630 nm OI 557,7 nm, datadas de março de 2005, medidas com o Fotômetro Zenital - FOTSUL instalado no Observatório Espacial do Sul (29°S, 53°, -33 dip latitude).

4.1.1. Noites calmas:

Dados reduzidos das medidas de intensidade da emissão linha verde e linha vermelha do oxigênio atômico quando não houve variação rápida de intensidade são apresentados nas FIGURAS 4-1, 4-2, 4-3. A emissão de OI5577 apresenta a intensidade média de aproximadamente 100 Rayleigh, variando de 50 a 100 R durante o período da noite. Por outro lado à intensidade do OI 630 nm é baixa, mantendo-se de 0 a 70 R durante toda a noite.

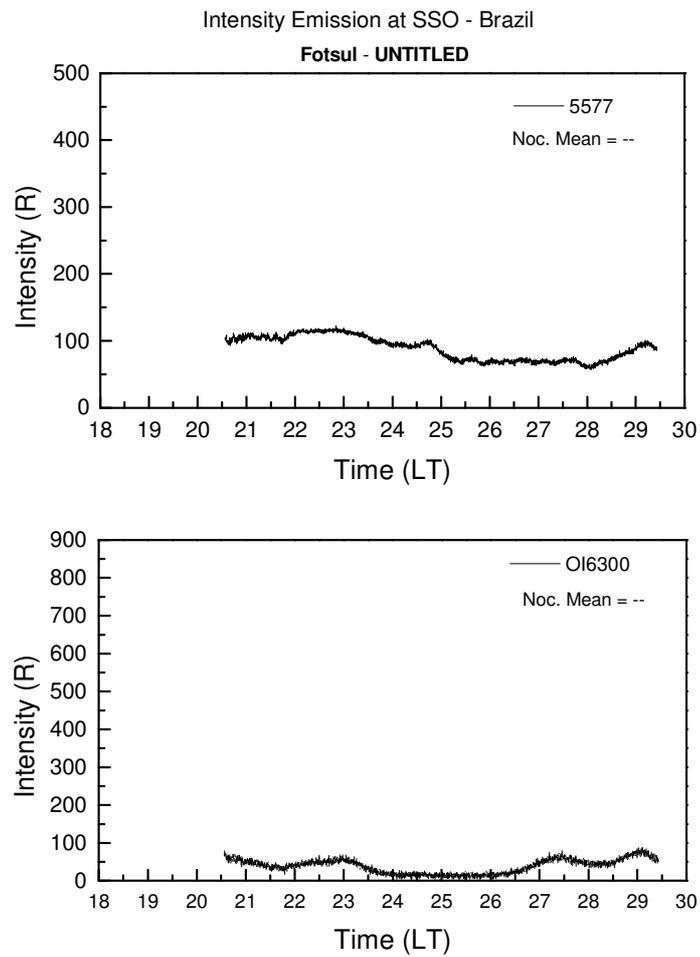


FIGURA 4-1: Medida do Fotômetro Zenital FOTSUL instalado no Observatório Espacial do Sul, apresentando a intensidade de emissão do OI6300 e do OI5577 na noite de 09/03/05.

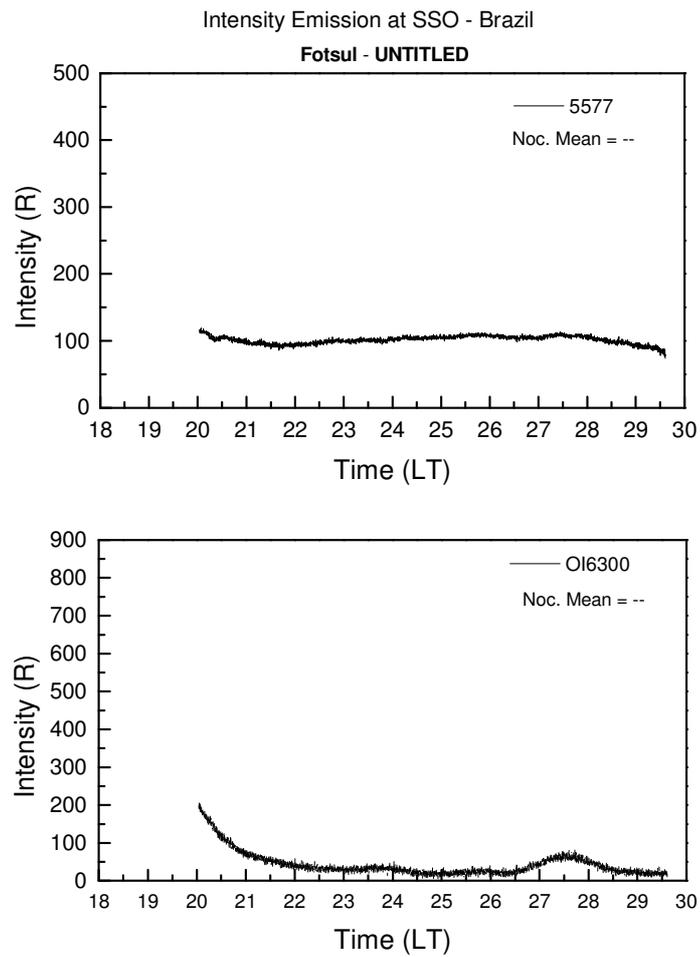


FIGURA 4-2: Medida do Fotômetro Zenital FOTSUL instalado no Observatório Espacial do Sul, apresentando a intensidade do OI6300 e do OI5577 na noite de 10/03/05.

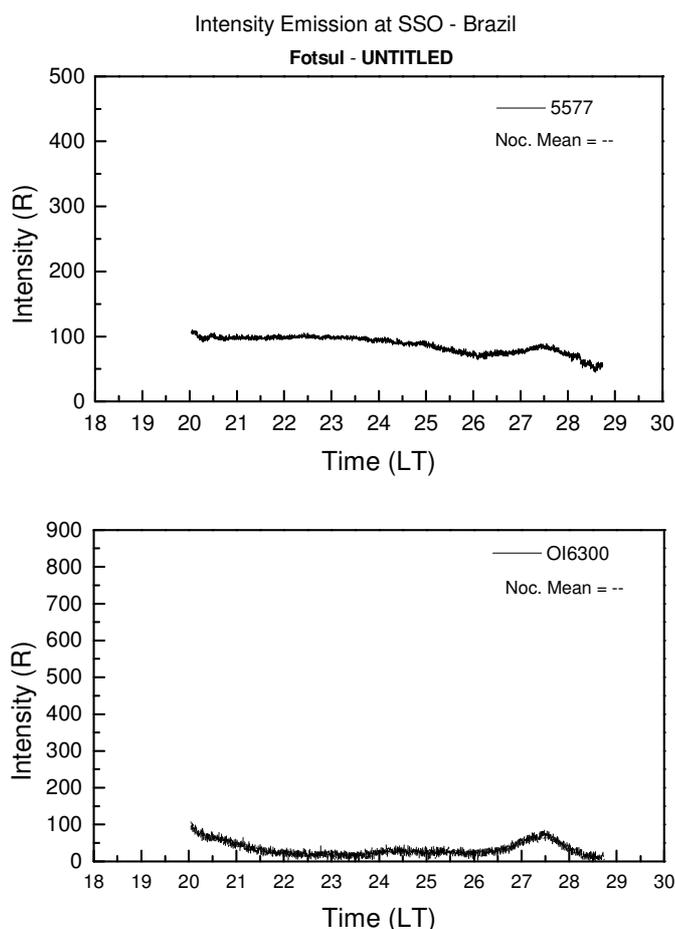


FIGURA 4-3: Medida do Fotômetro Zenital FOTSUL instalado no Observatório Espacial do Sul, apresentando a intensidade do OI6300 e do OI5577 na noite de 11/03/05.

4.1.2. Noites com ocorrência de “Bolhas de Plasma”:

A variação da emissão do OI6300 para a noite de 5 de março de 2000, mostrado pelas grandes flutuações na intensidade medida pode ser observada na FIGURA 4-4. Entre 22h:00min e 23h:30min observa-se a diminuição em mais de 50% na intensidade de emissão, neste período percebe-se várias depleções de plasma, que são devido à passagem da “Bolha de Plasma” sobre o sítio de observação. A partir das 24h:00min tem-se uma diminuição acentuada da intensidade de emissão devido à subida da Camada Ionosférica ou pela diminuição da concentração de íons, que vai até o amanhecer.

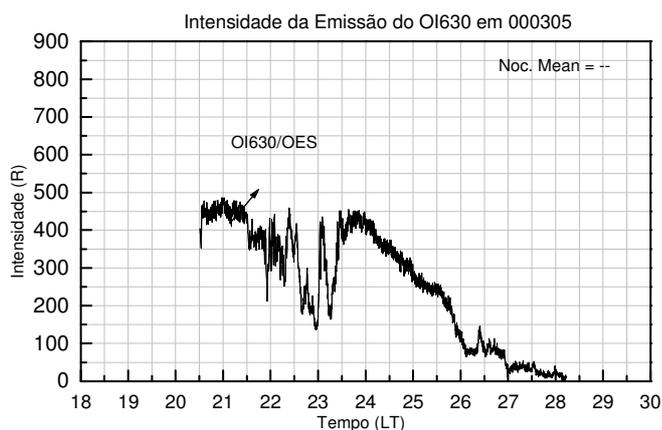


FIGURA 4-4 Intensidade de emissão do OI6300 medida no Observatório Espacial do Sul, note que a escala temporal varia das 18 às 30 LT, observação feita no dia 05/03/00.

A variação da intensidade da emissão do OI6300 para a noite de 6 de março de 2000 é apresentada na FIGURA 4-5. Observa-se uma queda brusca da intensidade exatamente às 22h:00min. E no decorrer da noite percebem-se várias depleções na intensidade entre 21h:30min até 23h:30min, demonstrando que diversas “Bolhas” passaram na visão do Fotômetro.

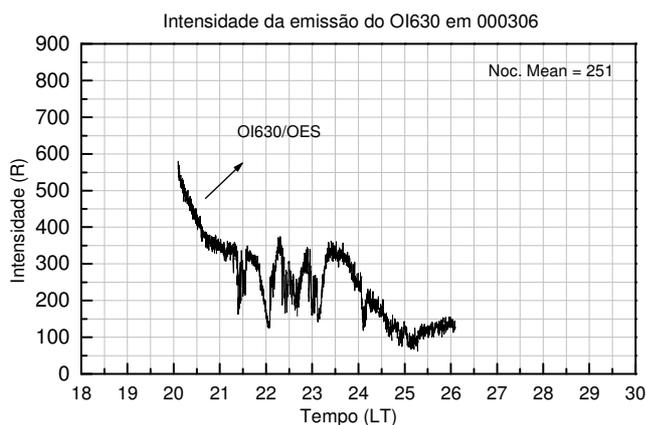


FIGURA 4-5 Intensidade da emissão do OI6300 detectada no OES, mostrando à presença das “Bolhas de Plasma” na noite do dia 06/03/00.

Os dados apresentados nas FIGURAS 4-5 e 4-6 mostraram uma maior variação na intensidade de emissão do OI6300 observado no OES/CRSPE/INPE - MCT. Entretanto na FIGURA 4-6 coletados na noite do de 15 de fevereiro de 2002, onde ocorreu uma mudança de comportamento noturno do OI6300. A observação desta noite apresenta uma alternância do nível de intensidade da Luminescência Atmosférica, sendo verificada pequenas depleções entre 21h:00min e 24h:00min. Em torno das 25h:00min a intensidade tem um mínimo para posteriormente aumentar até um máximo às 28h:00min e ir diminuindo no restante da madrugada, neste período não há a formação de “Bolhas de Plasma”.

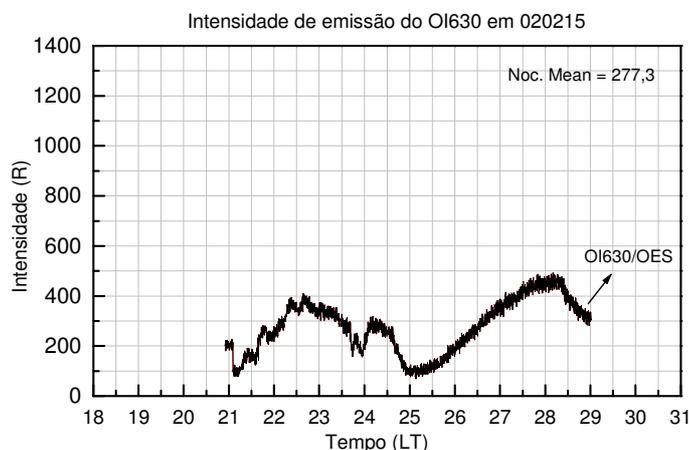


FIGURA 4-6: Intensidade da emissão do OI6300 detectada no OES, mostrando a presença das “Bolhas de Plasma” na noite do dia 15/02/02.

As imagens das Câmeras Imageadoras CCD instaladas no Observatório Espacial do Sul (29°S, 53°S, -34° dip latitude), apresentaram a passagem de “Bolhas de Plasma” sobre o sítio de observações. A análise da FIGURA 4-8 coletada em 14 de março de 2002 revela movimentos de deriva zonal das “Bolhas de Plasma”, sendo que os movimentos zonais são gerados a partir da combinação de Campos Elétricos Ionosféricos e o Campo Magnético Terrestre. As “Bolhas” são identificadas pelas regiões mais escuras na imagem.

A parte mais escura revela a menor densidade eletrônica na Ionosfera Terrestre, estas regiões escuras podem significar uma densidade eletrônica 2 vezes menor que a média

circunvizinha, o que significa a menor intensidade luminosa. Como a câmera faz uso de um sistema ótico constituído por uma lente All – Sky, ela é capaz de mostrar a deriva zonal das “Bolhas de Plasma” ao longo do seu ângulo de visão, que é de 180°, vemos que a deriva se dá na direção Leste. Esta Câmera CCD não é possível fazer uma filtragem dos comprimentos de ondas medidos, ela detecta toda emissão da Luminescência Atmosférica.

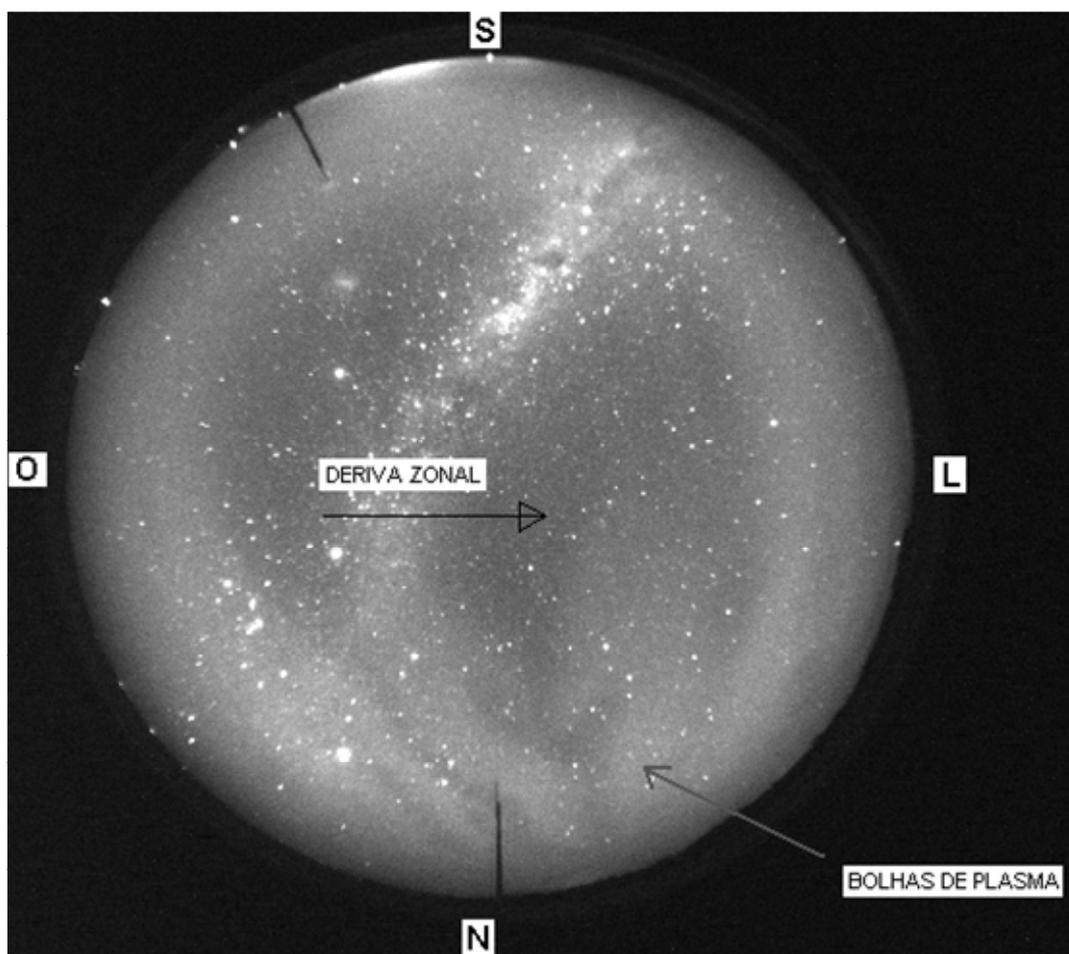


FIGURA 4-7: Irregularidades do plasma observado através da emissão da Aeroluminescência Noturna sobre o céu do Observatório Espacial do Sul no dia 14 de março de 2002.

A presença das “Bolhas de Plasma” pode ser vista através de um Keograma, que é elaborado com o Programa *AnAurora*, as manchas mais escuras mostram a diminuição

da Aeroluminescência Noturna. Na realização deste Keograma foram carregadas 400 imagens do imageamento realizado nos 14 e 15 de março de 2002, no qual houve a formação das Irregularidades Ionosféricas. Em trabalho futuro estuda-se o uso dos Keogramas para cálculo da velocidade de Deriva Zonal do plasma, veja um exemplo na FIGURA 4-8.

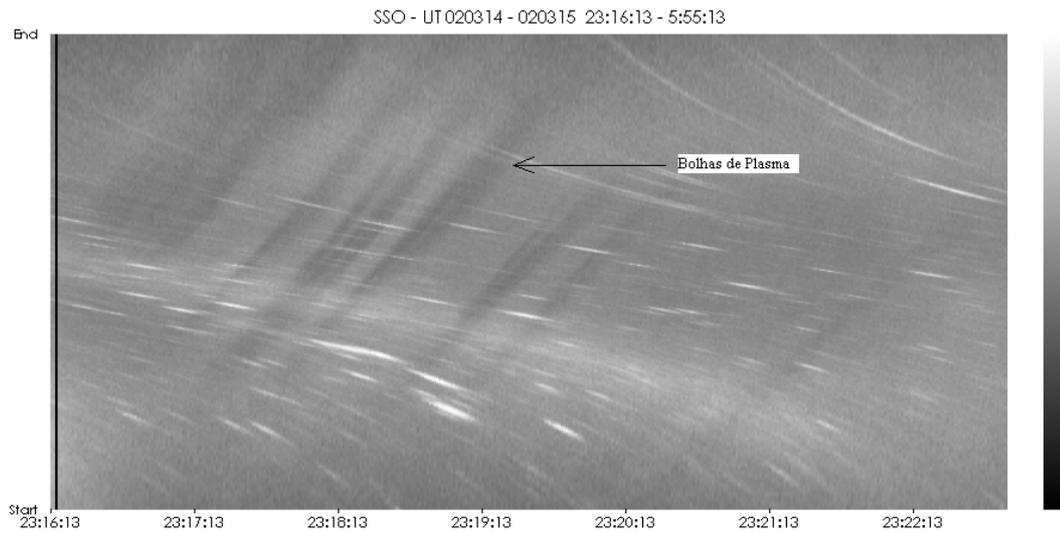


FIGURA 4-8: As manchas um pouco mais escuras mostram a diminuição da Aeroluminescência Noturna, devido à passagem das “Bolhas de Plasma”. Dados do imageamento realizado no dia 14/03/02.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

O acadêmico, através da atividade de Iniciação Científica, no Sistema PIBIC/INPE – CNPq/MCT no período de abril a maio de 2005, estudou a teoria básica da “Física e Química da Atmosfera”, especialmente a “Física da Ionosfera”, aprendendo a utilizar e a importância dos instrumentos ópticos para observação da luminescência atmosférica, além de efetuar as observações das emissões de oxigênio atômico na Ionosfera, OI5577 e OI6300.

As atividades de Iniciação Científica realizadas no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT, em Parceria com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT/UFSM, e com o Laboratório de Luminescência Atmosférica – LUME/DAE/INPE – MCT, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT significaram uma nova perspectiva em relação à Física pelo acadêmico estudada no Curso de Graduação em Física da UFSM, aplicando na prática os conhecimentos adquiridos, tanto nos laboratórios como na elaboração de artigos. O aprimoramento científico desde cedo nas áreas de Geofísica Espacial e Geomagnetismo, na área específica de Aeronomia e Luminescência Atmosférica é de grande utilidade para o desenvolvimento científico do aluno.

Vale enfatizar o contato com cientistas de nível internacional que foi de fundamental importância no desenvolvimento profissional quanto pessoal do bolsista e essencialmente para as atividades desenvolvidas.

A pesquisa realizada nas áreas da Aeronomia e Luminescência Atmosférica mostram um lado essencialmente útil, a melhor compreensão da Atmosfera é de grande importância na vida Terrestre. Tudo isso leva o acadêmico cada vez crescer e se interessar mais pelas pesquisas desenvolvidas, no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais e no seu sentido mais amplo no nosso País.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Robert, W. S.; Andrew, F. N.; Ionospheres, Physics, Plasma Physics, and Chemistry, Cambridge University Press, p. 554, 2000.
2. Chamberlain, J. W.; Physics of the Aurora and Airglow, American Geophysical Union, p. 704, 1995.
3. Santo, P. M. T. Estudo das derivas zonais das irregularidades de plasma ionosférico na região brasileira. São José dos Campos, p. 117. (INPE-8208-TDI/763). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.
4. Wrasse, C. M. Observação da temperatura rotacional da hidroxila através da aeroluminescência na região da mesosfera terrestre. São José dos Campos, p. 125. (INPE-8003-TDI/751). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.
5. Pimenta, A. Á. Estudo da deriva zonal e dinâmica das bolhas de plasma na região tropical. São José dos Campos, p. 194. (INPE-9546-TDI/827). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003.
6. Takahashi, H., Clemesha, B. R., Batista, P. P., Sahai, Y., Abdu, M. A. and Muralikrishna, P. (1989) Equatorial F- Region OI 6300 A and OI 5577 A emission profiles observed by rocket-borne airglow photometers. Planet. Space Sci.
7. Makita, K.; Change of Earth Environment Due to Decreasing Geomagnetic Field The Necessity of Observation in Brazilian Geomagnetic Anomaly Region; Rev. Takushoku University, 40, 15-24, 1996.
8. Kirchoff, V.W.; Introdução A Geofísica Espacial, Editora da Universidade de São Paulo, 1991.