

## Observação de aeroluminescência utilizando o fotômetro Multicanal 2: Estudos de ondas de gravidade

Patrícia Almeida Silva

Aluna da Universidade do Vale do Paraíba - Bolsa PIBIC/ CNPq

Orientador: Dr. Hisao Takahashi, Pesquisador da Divisão de Aeronomia.

Avenida dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515

Sol e a lua geram forças na atmosfera, que produzem marés. Esse fenômeno é conhecido com ondas de marés, uma vez que essas forças produzem uma certa movimentação do ar. Tal movimentação de ar induz forças eletromotivas através do campo geomagnético, causando variações geomagnéticas. O sistema de campo elétrico, correntes e cargas elétricas, produzidos pelo processo acima, tem uma importância muito grande na dinâmica da ionosfera. Além disso, o conceito de marés atmosféricas é muito útil para se compreender a dinâmica da termosfera. As marés na termosfera são também afetadas pelos processos que ocorrem na baixa atmosfera. Marés que tem origem na baixa atmosfera, causada pelo aquecimento solar, podem se propagar para cima e assim modificar a dinâmica da termosfera.

As ondas de gravidade podem ser geradas por inúmeras fontes na troposfera e também podem ser geradas por eventos relacionados à atividade geomagnética.

Para caracterizarmos as ondas de marés atmosfera e ondas de gravidade observamos suas características amplitudinais assim com seu comprimento de onda e frequência respectivamente.

A observação da fase, comprimento de onda e amplitude é feita através da relação entre as variações noturnas das emissões de aeroluminescência (OI 5577, NaD, OH, OI6300 nm). Esses dados são representados por séries temporais com intervalo médio de 3,3 minutos e comprimento de 6 a 10 horas por noite.

Assim sendo, o objetivo desse trabalho é de analisar as variações periódicas dessas séries temporais, para caracterizarmos as ondas de marés/ gravidades.

Os dados das variações noturnas, são obtidos pelo fotômetro multicanal 2, que se encontra em Cachoeira Paulista. (serão analisados os dados entre 1995 a 1998.).

Para podermos analisarmos essas séries temporais, realizamos inicialmente organização de um arquivo de dados e uma pré-análise dos dados, com finalidade de selecionarmos as noites que se apresentavam com períodos mais longos. O programa de ajuste de curvas para retirar as tendências de longo tempo, são realizadas através do programa "Fitting e análise espectral" (Delano Gobbi), que utiliza o Método dos Mínimos Quadrados.

Feito isso, selecionamos uma das noites que apresentasse características mais evidentes à ondas de marés/gravidade, a fim de se estudar o melhor método de análise espectral. Na presente fase do projeto, nos encontramos no estudo do Método de Fourier (Fast Fourier Transform) assim como no estudo de um programa que melhor realize essa análise, assim como melhor reproduza os dados

graficamente. Os dados para análise estão sendo testados no Mathematica , e a reprodução dos dados em gráficos está sendo testada no Origin ambos for Windows

Feita essa análise com o Método de Fourier, serão realizadas a análise através de outros métodos, e a escolha do melhor método será realizada através de testes estatísticos. O objetivo final será gerar um arquivo dessas análises e estudar os processos físicos que causam essas perturbações ondulatórias.

**WHITTEN, R.C. and POPPOFF, I.G. Fundamentals of Aeronomy. Wiley, 1971.**

**MORETTI, Analise espectral de séries temporais. Mac Graw Hill, 1987.**

# Observações de aeroluminescência utilizando o fotômetro Multicanal2

## Estudos de ondas de gravidade

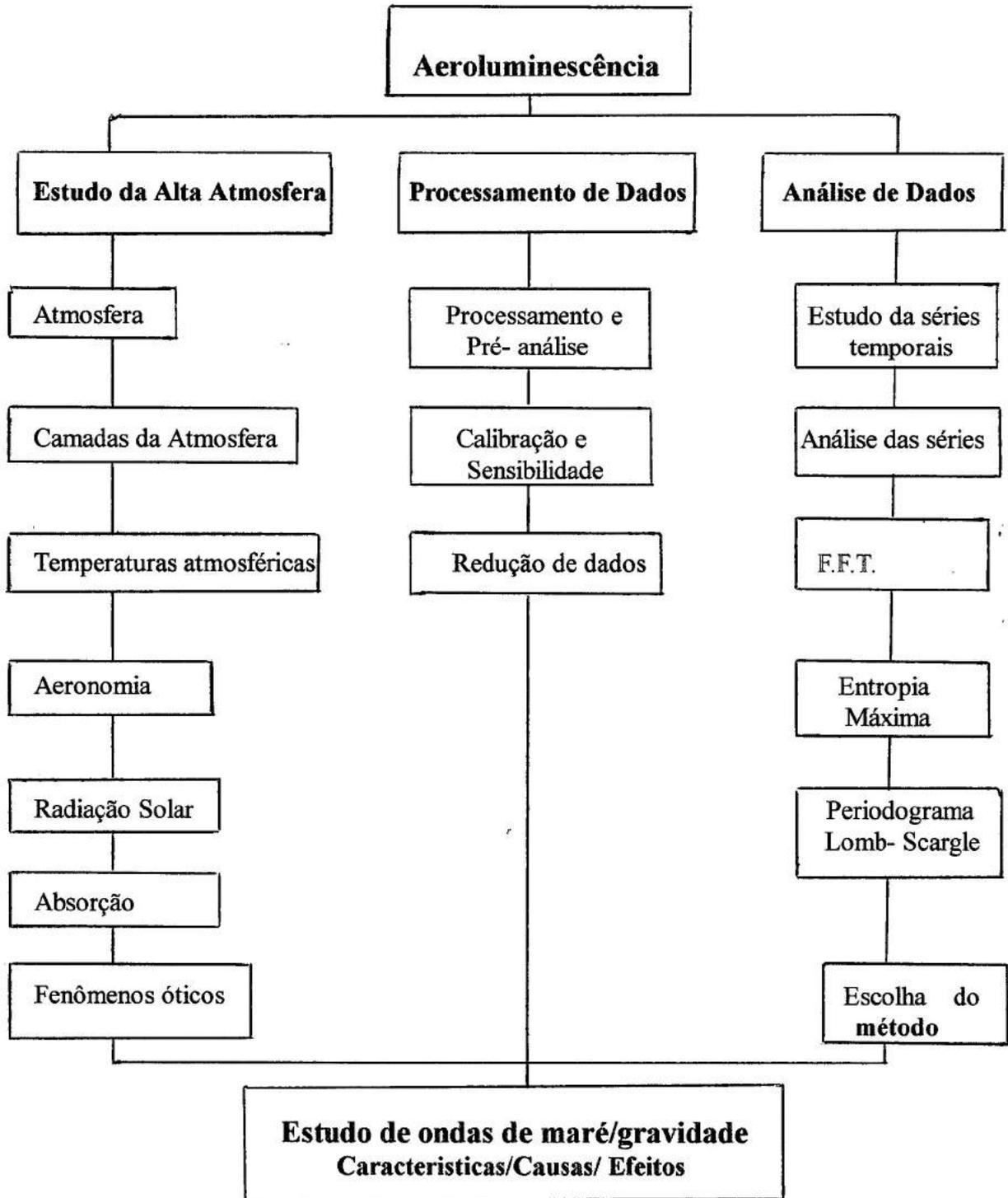
---

**Aluna:** Patrícia Almeida Silva.

**Universidade:** Universidade do Vale do Paraíba - Bolsista PIBIC/ CNPq

**Orientador:** Dr. Hisao Takahashi, Pesquisador da Divisão de Aeronomia

**Estudo das emissões de aeroluminescência através das observações do Fotômetro Multicanal 2 .**



1 - Estudo da Alta Atmosfera.

---

## 1.1 Atmosfera

---

A atmosfera é uma camada de ar gasosa que circunda a Terra e envolve o Globo terrestre como se fosse um oceano de ar no fundo do qual vive o homem.

A atmosfera tem aproximadamente 1.000 Km de altura, mas não é possível determinar exatamente os seus limites, pois pode-se encontrar vestígios de gases atmosféricos a 1.600 Km de altitude e às vezes até mais. O ar é extremamente móvel o que faz com que as condições atmosféricas se modifiquem diariamente. Essa é uma das razões de se querer desenvolver modelos específicos onde se possa prever fenômenos futuros relacionados a atmosfera.

A atmosfera é composta de uma mistura de gases incolores, inodoros e invisíveis, além de vapor d'água (na sua forma gasosa) e diferentes tipos de poeiras.

O ar atmosférico tem quatro propriedades importantes que ajudam e defendem a vida: protege a Terra dos excessos de calor e frio; é fonte de oxigênio para o homem e outras formas de vida; age como filtro contra as radiações perigosas provenientes do Sol e conserva a umidade do nosso planeta.

A até uma altura de 25 Km, os componentes do ar podem ser classificados em dois grupos. O primeiro é formado por misturas chamadas ar seco. Esse tipo de ar tem uma composição praticamente constante de moléculas de Nitrogênio, Oxigênio e uma minúscula quantidade de Hidrogênio e gases nobres, como o Hélio, Argônio, Neônio, Criptônio e Xeônio. O segundo grupo de componentes do ar é o formado por proporções variáveis de gases: vapor d'água, dióxido de carbono, ozônio e outros gases de procedência industrial. Variam também as quantidades de líquidos, como gotas d'água e de sólidos como cristal de gelo que em conjunto, constituem as nuvens. Pode haver também partículas sólidas procedentes das combustões produtoras de fumaças, areia trazida dos desertos pelo vento e pequenos cristais desprendidos do ar. Este segundo grupo de componentes citado acima não interfere tanto no comportamento atmosférico, com exceção do vapor d'água e do ozônio que absorve radiação no infravermelho<sup>1</sup> e interfere na temperatura atmosférica.

A origem da atmosfera faz parte naturalmente da origem da Terra. Calcula-se que esse fato aconteceu há mais ou menos 4 ou 5 bilhões de anos, sob condições que tornaram a Terra extremamente quente. A ar não existia como conhecemos, em volta do planeta, ao invés dele, havia uma espessa camada de gases quentes provavelmente altamente venenosos. A grande velocidade das moléculas gasosas, causadas pela alta temperatura, fez com que muitas delas escapassem do campo gravitacional terrestre para o espaço exterior.

Com o resfriamento da Terra, ocorreram mudanças em sua crosta e em sua atmosfera. Vapor d'água, nitrogênio e dióxido de carbono, que estavam dissolvidos nas rochas líquidas começaram a ocupar a atmosfera. Nos tempos atuais, as erupções vulcânicas nos dão alguma idéia da composição da atmosfera nesse estágio de seu desenvolvimento, era ainda, altamente tóxica.

---

<sup>1</sup> Ver capítulo \*\*\*\*\*

Finalmente a chuva atingiu a Terra, formando rios, lagos e oceanos. Grandes quantidades de dióxido de carbono da atmosfera tornaram-se parte da crosta ou dissolveram-se nos oceanos. Os componentes que tornariam possível o desenvolvimento da vida em épocas futuras, já estavam evidentes na atmosfera. Começaram então a surgir brechas entre as densas nuvens escuras que circundavam o planeta permitindo que a luz solar atingisse pela primeira vez a superfície do globo. Seguiu-se um período de tempestades violentas e de grandes movimentos na crosta terrestre. Durante essa época, as substâncias orgânicas começaram sua fase. Então apareceu o oxigênio, tornando assim possível a evolução de formas mais altas de vida.

### Componentes Constantes na Atmosfera

Componentes	Símbolo	%
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	78.084
Oxigênio	O <sub>2</sub>	20.946
Argônio	A	0.934
Anidrido carbônico	CO <sub>2</sub>	0.033
Neônio	Ne	0.00001818
Hélio	He	0.00000524
Metano	CH <sub>4</sub>	0.000002
Criptônio	Kr	0.00000114
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	0.0000005
Óxido Nítrico	N <sub>2</sub> O	0.0000005
Xeônio	Xe	0.000000087

### Componentes Variáveis da Atmosfera

Componentes	Símbolos
Vapor d'água	H <sub>2</sub> O
Ozônio	O <sub>3</sub>
Peróxido de hidrogênio	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Amônia	NH <sub>3</sub>
Hidrogênio sulfídrico	H <sub>2</sub> S
Anidrido sulfúrico	SO <sub>2</sub>
Monóxido de carbono	CO
Radônio	Rn
Partículas de pó em suspensão, sal e outros	Rn

## 1.2 - Camadas da Atmosfera.

---

A atmosfera terrestre pode ser dividida em camadas, ou zonas, cada uma com suas características próprias. A camada onde nos movemos é chamada *troposfera*. Acima da troposfera está uma camada delgada, a *tropopausa*, que separa a troposfera da estratosfera. Além da estratosfera existem mais duas camadas: *ionosfera* e a *exosfera*.

A altura da troposfera varia com a altitude, e também de estação para estação. Nos pólos ela alcança uma altura média de 8Km, no Equador 18Km e em altitudes intermediárias mais ou menos 11 Km. Geralmente, quanto mais quente a superfície da Terra, mais alta é a troposfera. Isto ocorre, devido ao aquecimento provocado nas diferentes estações do ano, com isso o ar se torna menos denso. É na troposfera que se formam todas as condições meteorológicas.

A medida que subimos a troposfera, observamos que a temperatura e a pressão decrescem. No ar calmo, o decréscimo de temperatura é de aproximadamente 6°C para cada 1000 metros de altitude. A estratosfera estende-se até 60 ou 70 Km acima da Terra. Como seu nome indica, é uma camada de movimento horizontal do ar. Aqui os ventos são sempre fortes e constantes. Não há poeira nem vapor d'água e em consequência, o céu está sempre claro. Por essa razão, muitas linhas aéreas comerciais voam nessa zona.

Na parte inferior da estratosfera, a temperatura é muito baixa, sendo em média de -55°C nas latitudes médias. Observações recentes mostram que a temperatura, à medida que se sobe nessa camada, começa a aumentar, atingindo 10°C por volta dos 50 a 60 Km de altitude, quando começa a cair novamente até atingir -30°C, no limite máximo da estratosfera, nível que é conhecido como *estratopausa*.

Acima da estratosfera existe uma região que contém um grande número de moléculas de ar carregadas eletricamente, ou seja, ionizada, é a *ionosfera*, na qual os íons reúnem-se em camadas, todas diferentes entre si, determinando assim suas características. A ionosfera é a principal camada, responsável pela absorção da radiação ultravioleta proveniente do Sol. Em alguns níveis da ionosfera os íons refletem certos tipos de ondas de rádio, permitindo comunicação radiônica a grandes distâncias. É nela que se produzem as auroras polares, um caso típico de aeroluminescência, pois os íons são excitados eletricamente por determinadas radiações emitidas pelo Sol, razão pela qual libera energia luminosa. O fenômeno da aurora está ligado ao ciclo das manchas solares.

Na parte mais externa da ionosfera o ar se dispersa no espaço progressivamente, e assim, nessa região a força gravitacional age muito fracamente sobre as partículas de ar, sendo que muitas delas escapam para o espaço, essa camada é conhecida como *exosfera*.

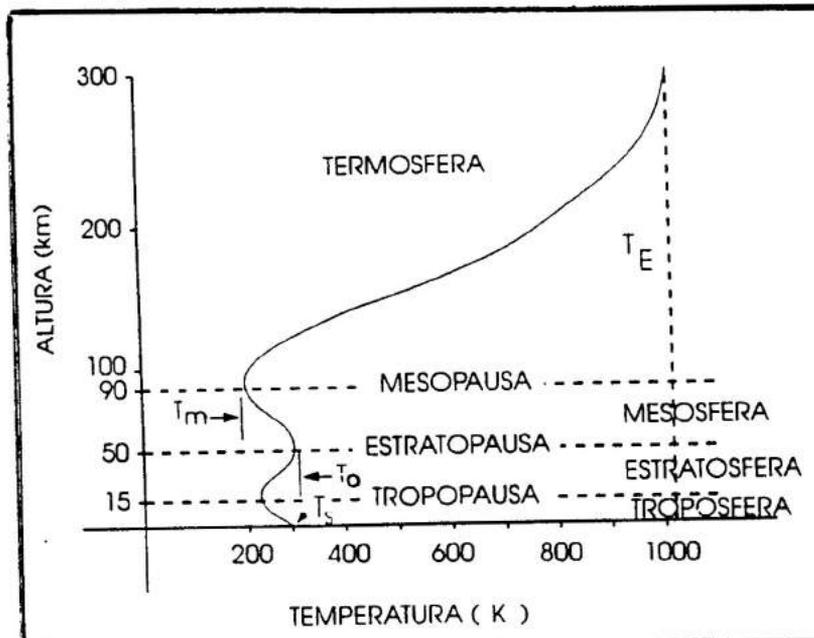
### 1.3 - Temperaturas Atmosféricas

O efeito de aquecimento causado pela radiação solar, pode ser visto na figura abaixo, onde mostra como a temperatura varia com as altitudes médias na atmosfera da Terra. Há três pontos de máximos no perfil da temperatura: o primeiro é na superfície, onde a temperatura é de cerca de  $290^{\circ}\text{K}$ ; o segundo está no nível da estratopausa, numa altura de  $50\text{Km}$ , onde a temperatura é de cerca de  $280^{\circ}\text{K}$ ; e o terceiro ocorre em uma altura acima de  $200\text{Km}$ , na termosfera, onde as temperaturas podem elevar-se até  $1000^{\circ}\text{K}$ .

A alta temperatura de termosfera é causada pelo aquecimento solar depositado em grandes alturas, como resultado da absorção da radiação ultravioleta extrema. Esse processo de absorção é conhecido como fotoionização.

O aquecimento da segunda camada na atmosfera da Terra, numa altura de cerca de  $50\text{Km}$ , é o resultado da absorção pelo ozônio, da radiação ultravioleta com comprimento de onda entre  $2000$  e  $3000\text{A}$ . Este é o processo que dissocia o ozônio.

A terceira camada quente, que se localiza na parte inferior da atmosfera, resulta da absorção da radiação solar no comprimento de onda infravermelho e luz visível. É a camada a qual devemos dar mais atenção, pois é a camada onde vivemos, a troposfera.



## **1.4 - Aeronomia.**

---

A aeronomia é o estudo da química e da física que analisa a alta atmosfera. Parece ser uma definição completa, todavia esse conceito deve ser entendido de maneira geral, não restringindo a aeronomia ao estudo destinto de calor, quimiluminescência, e/ou fotólise e/ou difusão.

Nesse trabalho vamos direcionar o estudo da aeronomia ao fenômeno conhecido como Aeroluminescência ou Airglow.

Podemos dividi-lo em três partes: identificação das emissões, mecanismos de excitação e aplicação destas emissões nos estudos da temperatura eventos na alta atmosfera. Ela funcionará como um sensoriamento remoto da atmosfera, fornecendo imagens do céu. A aeronomia fornece dados para os estudos de dinâmica na ionosfera e termosfera através das emissões de algumas espécies.

### **1.4.1 - Aeroluminescência.**

---

Existem fontes de luminosidades localizadas na alta atmosfera e fora dela que clareiam o céu. A lua, as estrelas... Entretanto se essas fontes luminosas fossem eliminadas, o céu continuaria iluminado, ou seja, não haveria escuridão total. Um brilho fraco poderia ser visto. Estaríamos observando o fenômeno conhecido como Aeroluminescência ou Airglow, um processo fotoquímico que ocorre na alta atmosfera.

Se observarmos a aeroluminescência aos olhos de um astronauta, veremos que a aeroluminescência se assemelha a um envelope que envolve todo lado externo da Terra. Durante o dia, a intensidade de aeroluminescência possui larga magnitude, mas não pode ser vista pelos olhos porque elas são completamente dominadas pela radiação solar. Essa aeroluminescência diurna recebe o nome de Dayglow. E a aeroluminescência noturna Nithtglow. Quando o Sol está abaixo da linha do horizonte da Terra vindo da alta atmosfera a aeroluminescência é conhecida como Twilight glow.

Existe uma grande relação entre o fenômeno de aeroluminescência e as auroras.

A aeroluminescência ocorre continuamente, é mais fraca e é observada em qualquer latitude. As auroras, são mais intensas, mais irregulares em suas formas e estão restritas as regiões próximas dos pólos. A diferença está nos mecanismos de excitação. A airglow é dirigida por fótons provenientes do Sol, enquanto as auroras são excitadas por impactos de partículas solares energéticas.

As emissões da airglow são caracterizadas na maior parte na atmosfera planetária. A luz consiste de linhas atômicas e moleculares, bandas, e sistemas contínuos de constituintes atmosféricos, ambos neutros ou ionizados. Devido a maioria das emissões serem medidas na superfície da Terra, a investigação da airglow nos dá informações sobre a composição de nossa atmosfera bem como da de outros planetas através de instrumentos como foguetes, satélites e instrumentos fixos como o fotômetro.

Estudar aeronomia consiste em estudar os processos fotoquímicos e dinâmicos da alta atmosfera.

A maior parte das emissões, têm sido caracterizadas por excitação de espécies.

Muitas moléculas e átomos não penetram diretamente na atmosfera da Terra. Elas sofrem ressonância de transição. A ressonância de emissão do hélio ( $\lambda = 58.4\text{nm}$ ), nitrogênio ( $120.0\text{nm}$ ), hidrogênio ( $121,6\text{nm}$ ) e oxigênio ( $130.4; 130.4$  e  $130.6$ ), que poderia de outro modo ser contada como forte, mas não são observadas no chão, na terra, embora eles apareçam em maior número na atmosfera.

Outro processo que ocorre na atmosfera é a absorção e a re-radiação da luz solar pelas espécies. As emissões em grandes comprimentos de ondas as vezes são removidos pelo processo de absorção. Por exemplo. As características mais fortes da dayglow é variada pela transição do primeiro estado excitado do  $\text{O}_2$ , o  $^1\Delta_g$  para o estado mais baixo,  $^3\Sigma_g^-$  e é conhecido como Banda Atmosférica Infra - Vermelho.

Outros processos que produzem a aeroluminescência assim como seus mecanismos serão vistos nas seções que seguem.

#### **1.4.2 - Auroras**

---

Os mistérios do céu tem fascinado o homem desde que ele teve seu primeiro contato com o cosmo, através do instrumento óptico mais acessível ao homem\_ o olho humano. Uma das maravilhas que o homem observou, foi o fenômeno chamado **auroras**. A luminescência mais espetacular visível a olho nú.

Esse tipo de luminescência atmosférica predomina nas grandes latitudes, entretanto nas grandes tempestades magnéticas as auroras são vistas também em latitudes mais baixas.

A forma de excitação entre as auroras e a aeroluminescência são diferentes. As auroras são geradas pelos íons de alta energia acelerada no campo magnético da Terra, ao passo que a aeroluminescência é gerada através da energia química - iônica liberada nas reações químicas, cuja origem da energia é a absorção de energia solar na atmosfera.

Existe vários escritos sobre a observação desse fenômeno. Aristóteles 4<sup>a</sup>.c discutiu sobre as auroras em seu trabalho *Metereologia*, e a chamou de *chamatas* (chamas ou rachaduras no céu).

O matemático francês P. Gassendi, descreveu um excepcional fenômeno ocorrido no sul da França em 12 de setembro de 1621 e chamou-o de **Aurora Boreal**. Um século mais tarde em 16 de março de 1716 o astrônomo Halley observou uma grande aurora em Londres. Ele formulou a teoria que envolveu partículas magnéticas fluindo ao longo de linhas magnéticas de forma de excitação luminosa da atmosfera, sua teoria incluiu linhas de campo ao redor de esferas. Considerando os dados, ele chegou a resultados brilhantes.

O primeiro trabalho desenvolvido inteiramente para auroras, foi escrito por um membro da Academia Francesa de Ciências, J.J. Mariam, em 1733. Ele desenvolveu a noção popular que auroras eram simplesmente a reflexão de luzes solar na neve ou gelo.

A associação de distúrbios magnéticos ligados a aurora foi descoberto em 1741 por Celcius e Hioter. Benjamin Franklin propôs uma teoria sobre auroras em 1779. O químico atomístico Dalton foi entre muitos o que analisou as auroras, mas a notória

linha do amarelo - verde de emissão foi descoberta por Angstron, embora tenha sido identificado anos mais tarde.

## 1.5-Radiação Solar

---

Podemos comparar o Sol a uma grande usina de transformação de matéria e produção de energia .A maior parte dessa energia é emitida na forma de luz e calor e a variação dessas energias é conhecida como Radiação ou Radiação Eletromagnética.

Denominamos algumas dessas radiações como sendo: Radiação de raio X, de rádio ou ondas de calor .Essas energias possuem grande facilidade de se propagar no espaço e chegam a atingir uma velocidade aproximada de 300.000Km/s .

Devido a distância entre a Terra e o Sol essas radiações emitidas pelo Sol chegam até a extra - atmosfera e na atmosfera do nosso planeta interagindo e interferindo direta ou indiretamente na evolução da vida na Terra.

Essas radiações relacionam-se de diferentes maneiras e em diferentes setores da alta atmosfera, o nosso propósito é conhecer melhor as relações dinâmicas existentes entre as energias em forma de radiação e os elementos químicos compostos na alta atmosfera, afim de que possamos interpretar com mais clareza o fenômeno de Aeroluminescência.

O que vai nos direcionar a uma classificação dos diferentes tipos de radiação provenientes do Sol é a diferença entre o seu comprimento de onda, ou seja, a distância de uma crista a outra.

As ondas de rádio possuem um longo comprimento de onda , havendo um repique em 10 Km . As ondas gama, são as mais curtas , seu comprimento de onda é menor que um bilhão de um centímetro ou seja,  $10^{-12}$  .A luz visível é a porção do espectro que podemos ver e é geralmente referida como luz branca. Usando um prisma onde a luz pode ser dividida e entre as cores do arco-íris observamos que essa referência se verifica, uma vez que cada cor corresponde a um comprimento de onda específico. O violeta tem o menor comprimento de onda - 0.4 micrômetro (1 micrômetro = 0.0001 cm) encontrando no vermelho o comprimento de onda mais longo - 0.7 micrômetro.

Logo após o vermelho, encontramos a radiação infravermelho ,que possui um longo comprimento de onda e que embora não possamos vê-la podemos detectá-la como uma sensação de quente. Os raios ultravioletas estão localizados próximos do visível para o violeta e são responsáveis pelas queimaduras de Sol, obtidas após longo período de exposição . Apesar de classificarmos as energias de radiação baseada em nossa percepção de visualizá-la todas as formas de radiação são basicamente as mesmas.

A maioria da energia radiante proveniente do Sol está concentrada na parte visível e próxima do visível do espectro. A banda estreita da luz do visível entre 0.4 e 0.7 micrômetros ,corresponde a 43% do total emitido , o volume da linhas restantes próximas ao infravermelho corresponde a 49% e a radiação ultravioleta a 7%. Os 1% restante é emitida como raio x , gama e ondas de calor .

Para obter uma melhor apreciação de como a energia radiante interage com a atmosfera da Terra e sua superfície, é necessário ter um conhecimento geral das leis que regem a radiação:

- Todo objeto ,a qualquer temperatura emite energia radiante. Portanto , não somente corpos quentes como o Sol , mas Terra e as calotas polares têm a capacidade de emitirem energia continuamente. Mesmo tendo um relação incomparável entre a

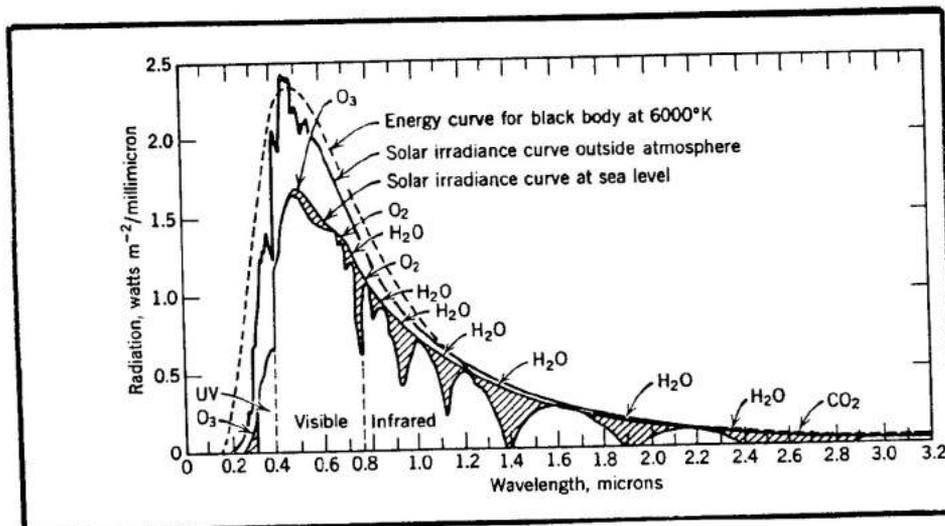
interferência da radiação solar na atmosfera da Terra e a radiação terrestre no espaço que a circunda (incluindo o próprio Sol).

- Objetos mais quentes irradiam mais energia por unidade de área, que objetos mais frios. O Sol que tem uma temperatura na superfície de  $6.000^{\circ}\text{K}$ , emite mil vezes mais energia que a Terra, que possui em média uma temperatura superficial de  $288^{\circ}\text{K}$ .

- A radiação de um corpo quente, com menor comprimento de onda tem radiação máxima. O Sol irradia energia máxima nos 0.5 micrômetros que está na extensão do visível. A radiação máxima da Terra acontece no comprimento de onda de 10 micrômetros, na extensão do infravermelho (quente). Devido a radiação máxima da Terra, ser vinte vezes maior que a radiação do Sol, a radiação terrestre é frequentemente referida como ondas longas de radiação, e as radiações solares são chamadas de ondas curtas de radiação.

- Objetos que são bons absorventes de radiação são também bons emissores. A absorção perfeita (emissão), é teoricamente um objeto chamado Blackbody que significa corpo negro, embora o objeto não tenha que ser necessariamente negro.

Para um objeto ser classificado como corpo - negro teoricamente ele deve emitir a intensidade máxima de radiação para a temperatura vigente. Para que haja radiação perfeita o corpo deve absorver e emitir 100% da energia. Os gases são seletivos absorventes e radiadores, dentro dessa observação podemos acrescentar que existe uma variação de quantidade absorção e emissão de elemento para elemento. É por isso que nas diferentes camadas da atmosfera observamos o fenômeno de transparência - quando não ocorre a absorção, em comprimentos de onda próximo ao visível, e o opaco - quando ocorre boa absorção. Esse é um das causas para o aparecimento do fenômeno de Aeroluminescência: A absorção de radiação Solar, que estudaremos na próxima seção.



## 1.6 - Absorção

Conforme mencionado anteriormente, o Sol emana radiações que chegam na atmosfera terrestre em forma de energia. Entretanto, somente 25 % dessa energia é absorvida pela superfície da terra.

Outra parte dessa energia é absorvida em diferentes comprimentos de onda, podendo assim variar de intensidade desde a mais forte absorção até a menos intensa.

Quando uma molécula de gás absorve ondas de luz ( energia livre) esta, é transformada em movimento molecular interno, que pode ser percebido como uma elevação na temperatura. Desta maneira, esses gases fazem o papel de aquecedor da atmosfera como um todo.

A figura.1 mostra os principais gases atmosféricos nos vários comprimentos de onda. Como podemos ver na figura.2 nenhum desses gases são efetivos absorventes, ou seja, são fortes absorventes de energia, isso provoca uma grande “fresta” na alta atmosfera facilitando a entrada de energia radiante sobre a terra. A deficiência desse volume é um fator importante para a dinâmica da “máquina do tempo”.

Vamos observar o comportamento de alguns elementos na atmosfera que realizam a absorção de energia radiante.

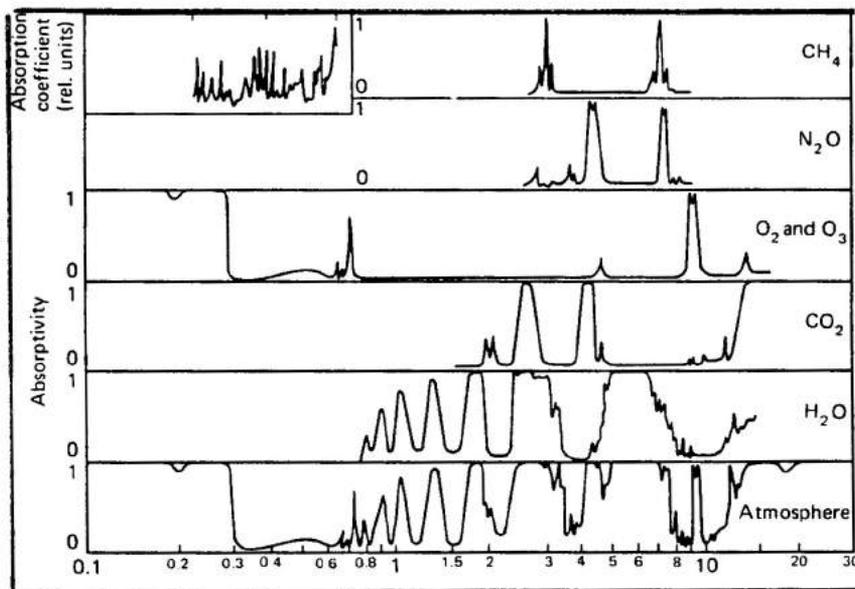


Figura 1  
Absorção de gases na atmosfera e  
seus respectivos comprimentos de ondas.

### Absorção do oxigênio molecular:

O oxigênio molecular absorve fortemente a luz no ultravioleta num comprimento de onda abaixo de ~200nm (como mostra a figura.3).

Em relação ao processo fotoquímico da atmosfera, a transmissão eletrônica mais importante na absorção vem do estado terra( mais baixo) : Sistema Herzberg ( $A^3\Sigma_u^+ \leftarrow X^3\Sigma_g^-$ ), no qual tem uma fraca dissociação estendendo-se de 185nm para 242nm, e o Sistema Schumann-Runger ( $B^3\Sigma_u^- \leftarrow X^3\Sigma_g^-$ ), no qual tem uma banda bem definida de 175nm a 200nm, com uma intensa dissociação entre 137 e 175nm. Entre a fotoionização o limite do O<sub>2</sub> em 102.7nm e o continuo Schumann-Runger são um número de bandas coincidentes difusas e contínuas, com uma série de “janelas” entre a banda abaixo de 130nm. Uma dessas janelas coincide com o Sistema Lyman- $\alpha$  em 121.6nm. Abaixo, o limite em 102.7 nm, é uma região complexa de bandas, que tem sido estudada com uma continua fonte de luz abaixo do 60nm, e com fontes que permitem que as medidas sejam feitas somente em comprimentos de ondas discretos. Abaixo de 60nm a fotoionização das camadas são inúteis; entre 60nm e 100nm ele varia entre 0.2 unidades, passando através de um mínimo nas proximidades de 80nm.

Esse comportamento é interpretado em termos de competição entre predissociação e preionização.

A medida da área de colisão do O<sub>2</sub>, como resultado pelos sistemas Ditchburn Young na região de Herzberg continua são mostradas na figura 4.

Os sistemas Hasson e Nicholls tem obtido resultados bons, que estão de acordo com os Ditchburn e Young entre 200 e 230nm. Isto foi necessário para trabalhar na em alta resoluções para obter a área de colisão em comprimentos de ondas localizadas entre as linhas de absorção de Schumann-Runger. Contudo Hudson tinha apontado entre 200 e 210 nm a possibilidade da área de colisão, podendo ser quase em sua totalidade, ocasionado pela absorção em uma pressão tolerante na banda Schumann-Runger, então ambas as formas e intensidades de Herzberg devem ser ainda considerada um tanto incerta.

A figura 5 e 6 mostra a absorção na área de colisão medida por Watanabe, Inn e Zelikoff na região da banda Schumann-Runger, e Schumann-Runger continua.

Nas observações de Hudson esses resultados são comparados com dados obtidos por outros grupos de trabalhos. Em geral o acordo está na combinação limite de erros experimentais, mas existem pequenos pontos que não se verificam o acordo. No importante caso de Schumann-Runger continuo ( área de colisão) é conhecido provavelmente dentro de  $\pm 5\%$  ( excluindo erro sistemático), alcançando 137\_180nm, mas as formas atuais não são muito bem conhecidas.

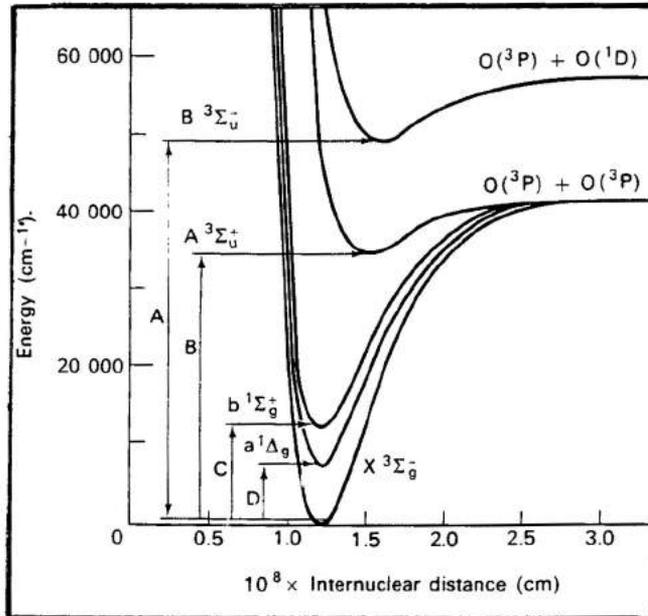


Figura 3

Curva da energia potencial do O<sub>2</sub>  
 Sistema A Schumann- Runge, B.Herzberg,  
 C. Atmospheric, D. Infrared Atmospheric

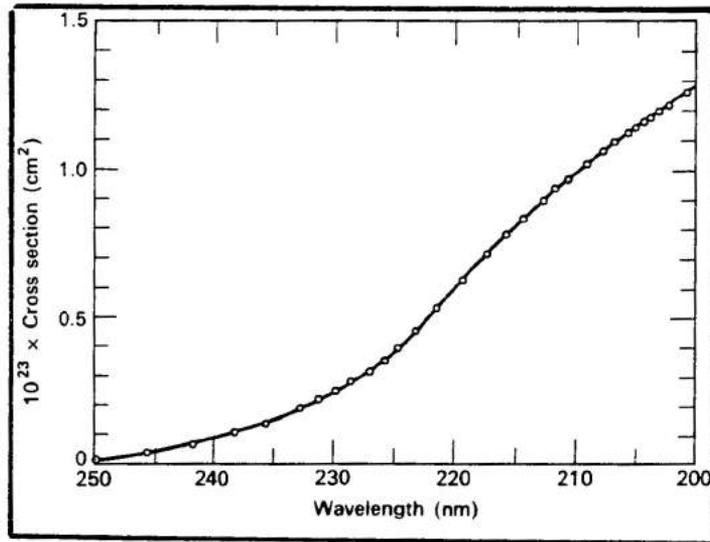


Figura 4

Absorção pelo O<sub>2</sub> na região de Herzberg continua.

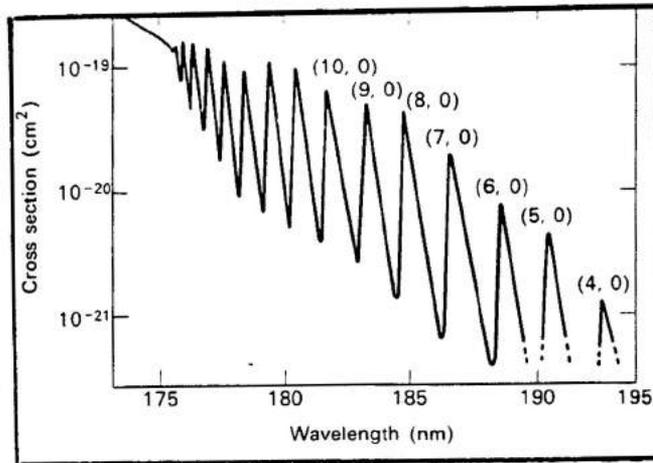


Figura 5

Banda Schumann - Runge do O<sub>2</sub> abaixo de 195nm.

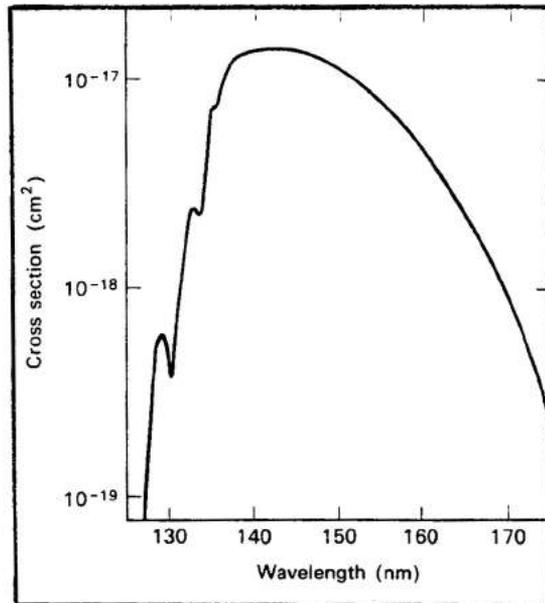


Figura 6

Schumann- Runge contínua

### Absorção do nitrogênio molecular:

O nitrogênio molecular absorve muito suavemente radiações no comprimento de onda abaixo de 100nm. A absorção mais importante caracteriza-se em  $(v',0)$ , progressão do sistema Lyman-Birge-Hopfield ( $a^1 \Pi_g \leftarrow X^1 \Sigma_g^+$ ), na linha entre 110nm e 145nm. O estado  $a^1 \Pi_g$  é fracamente predisassociado acima de  $v=6$ , mas a área de colisão para a fotoionização é baixa para esta absorção produzir um percentual significativo na dissociação do  $N_2$  na atmosfera. Entre 60 e 100nm existe um número de bandas fortes que resolvem bem a estrutura rotacional. Bandas no 97.2 e 82.8 nm mostram evidências de predissociação na forma de anomalia nas amplas linhas rotacionais. Tem-se sugerido a presença de uma dissociação continua inferior com uma área de colisão de  $2,4 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$  entre 85 e 100nm. Devido a preionização a estrutura rotacional normalmente aparece difusa abaixo do limite de ionização em 79.58nm. Abaixo de 60nm a absorção pelo  $N_2$  é quase inteiramente contínua. A ionização produzida do  $N_2$  está constantemente no comprimento de onda 1.0 abaixo de 70nm, com um valor que flutua entre 0.4 e 1.0, especialmente nas proximidades das bandas máximas, acima de 70nm. No comprimento de onda abaixo de 60nm o processo de ionização dão origem ao fenômeno de fluorescência, oriundos do  $N_2^+$  excitado.

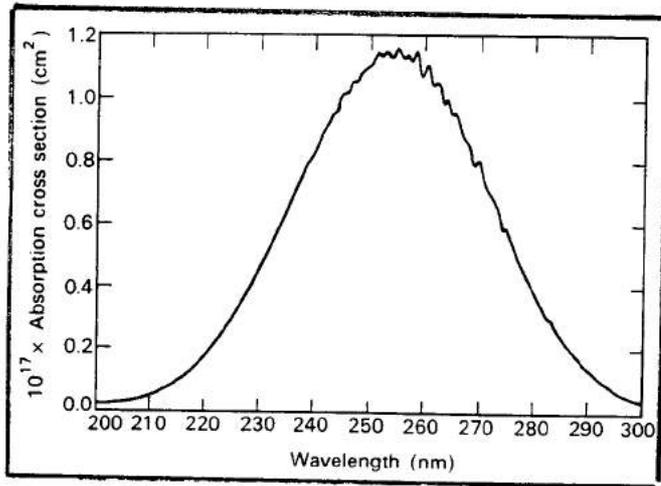
### Absorção do ozônio:

A característica mais importante na absorção do  $O_3$  consiste da Banda de Hartley e a continua entre 200nm e 300nm. Este sistema, mostrado na figura 7, está ao lado da banda Huggins, localizada entre 300nm e 350nm, como mostra a figura.8 O ozônio também absorve radiação na região do visível, na banda de Chappuis, mostrada na figura.9.

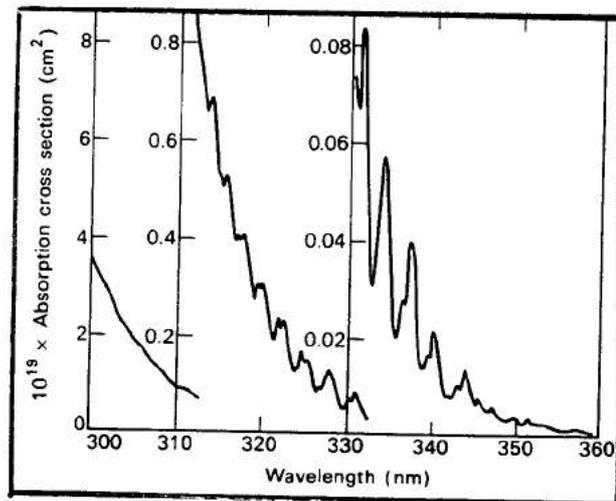
Abaixo de 200nm a absorção consiste de amplas bandas. Isto é energeticamente possível para a fotoionização do ozônio no comprimento de onda acima de 1.14  $\mu\text{m}$  próximo do infravermelho. Em comprimentos curtos de ondas ocorre uma variação da dissociação produzida. A tabela 1, mostra os comprimentos de ondas, para a produção dos diferentes estados do O e do  $O_2$ .

Tabela 1. Comprimento de ondas nm na fotoionização do ozônio.

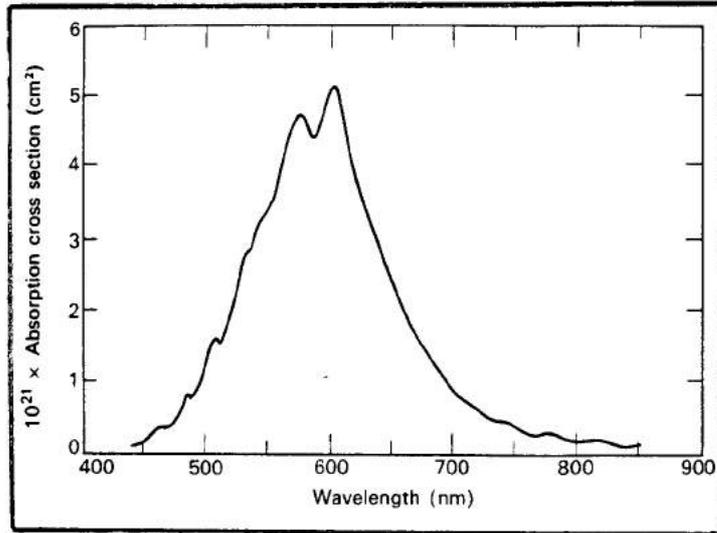
	$O_2 (^3\Sigma_g^-)$	$O_2 (^1\Delta_g)$	$O_2 (^1\Sigma_g^+)$	$O_2 (^3\Sigma_u^+)$	$O_2 (^3\Sigma_u^-)$
O ( $^3P$ )	1140	590	460	230	170
O ( $^1D$ )	410	310	260	167	150
O ( $^1S$ )	234	196	179	129	108



**figura 7**  
Banda Hartley e continua do ozônio



**Figura 8**  
Banda Huggins do ozônio



**Figura 9**  
**Banda Chappuis di ozônio**

### Absorção Vapor d'água:

A absorção no espectro ultravioleta do  $H_2O$  se encontra na região da absorção contínua entre 145 e 186nm, na banda difusa entre 69 e 145 nm, além da absorção contínua abaixo de 69n. O primeiro limite de ionização ocorre em 98.4 nm, e as bandas abaixo deste comprimento de onda são superpostos sobre a ionização contínua. A figura.10 ,mostra os dados de Watanabe e Zelikoff para a região entre 120 e 180nm.

A absorção em longos comprimentos de ondas contínuos, é suposta para o resultado na dissociação da molécula de vapor d'água ,a qual se difunde para cima da mesosfera. Nicolet havia calculado a razão da fotodissociação do vapor d'água na mesosfera e na baixa termosfera, na variação solar dos ângulos zenith. Este resultado pode ser observado na figura.11a 11b e indica que Lyman\_α é responsável pela maioria das fotodissociações que ocorrem entre 70 e 100 Km.

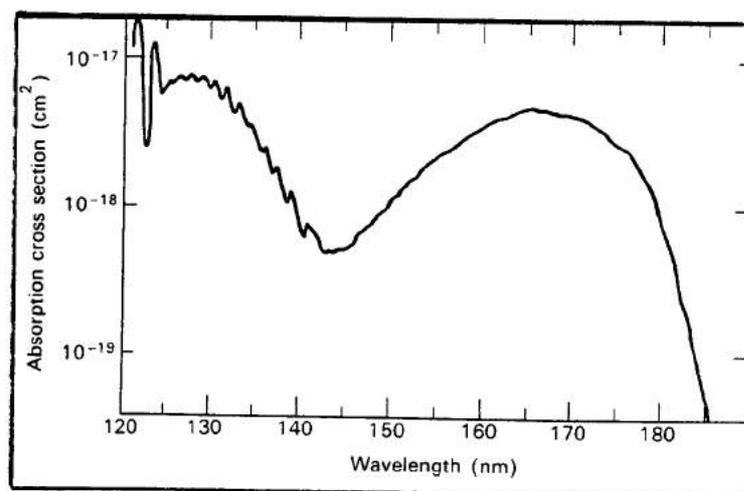
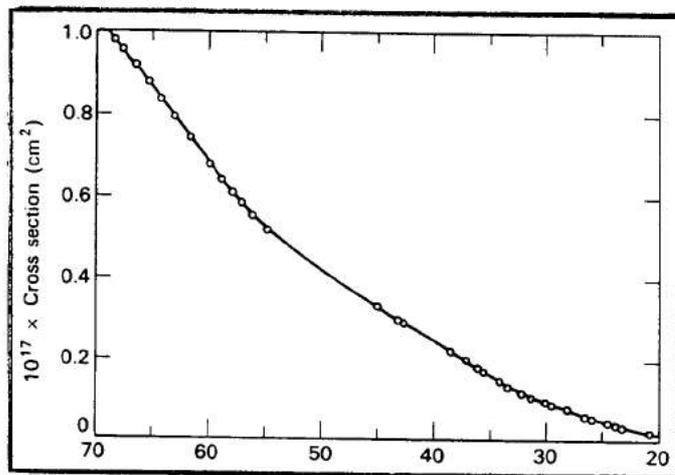


figura 10

Absorção do vapor d'água abaixo de 120nm

### Absorção do Hidrogênio Molecular:

A absorção do espectro do  $H_2$  consiste na absorção bem definida entre 84nm e sobre 115nm, nas bandas superpostas na dissociação contínua entre 80nm e 84nm, nas bandas superpostas na ionização contínua entre 74nm e 80nm, e na absorção contínua entre 74nm. A figura 12 mostra a dependência do comprimento de onda em relação a área de colisão da absorção entre 70nm. Abaixo de 70nm a ionização produzida é de 1.0; acima deste comprimento de onda este valor pode variar, existindo diferenças para as diferentes linhas rotacionais dentro de bandas individuais.



**Figura 12**  
Absorção do  $H_2$  abaixo de 70nm

## **1.7 - Fenômenos óticos na Alta Atmosfera.**

---

Como vimos anteriormente, o fenômeno ótico de aeroluminescência e auroras ocorrem na alta atmosfera sendo caracterizados pela excitação de alguns elementos atmosféricos e subsequêntemente pela radiação de fótons .

Nesse trabalho, vamos nos deter a estudar somente os mecanismos da aeroluminescência, embora o fenômeno de auroras esteja estreitamente relacionado.

### **1.7.1) Mecanismos de emissões da aeroluminescência**

#### **# Ressonância e Fluorescência.**

O espalhamento ressonante é a absorção e emissão de fótons sem a troca de energia entre os fótons, a radiação é absorvida e reemitida sem a mudança no comprimento de onda.

A fluorescência é a absorção de fótons de uma certa energia e emissão de fótons de menos energia. A radiação num comprimento de onda é absorvida e emite uma radiação num comprimento longo de onda.

#### **# Quimiluminescência.**

No processo de quimiluminescência o excesso de energia da radiação química exosterna pode ser encontrada como energia dinâmica vibracional, rotacional ou excitação elétrica. Essa energia é armazenada temporariamente num estado excitado , e é emitido como radiação eletromagnética. A reação química que resulta nessa emissão de fótons geram o fenômeno de quimiluminescência .

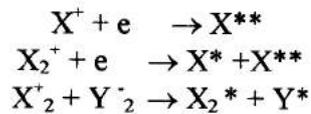
No caso específico da aeroluminescência esse processo de excitação pode ser detonado por colisão, recombinação ou fotodissociação.

**# Colisão:** Uma rápida troca de energia pode excitar átomos ou moléculas. Elas abandonam uma pequena quantidade de energia no impacto , excitando assim um átomo ou molécula para um estado mais alto de energia.

Pode haver a dissociação molecular, onde ocorre a excitação de uma ou mais moléculas.

# **Recombinação:** A recombinação de íons e elétrons, positivos ou negativos resulta em excesso de energia que pode ser dissipada em energia dinâmica ou excitação.

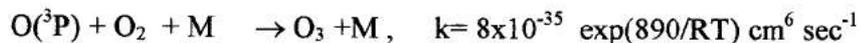
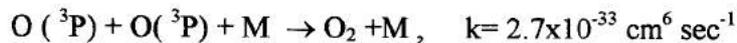
Vamos observar o processo de recombinação com alguns componentes básicos no fenômeno de aeroluminescência:



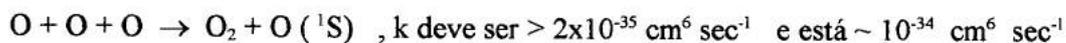
Por conveniência as recombinações poderão ser agrupadas de acordo com as principais reações que ocorrem na aeroluminescência.

Quando a temperatura dependente for dada, estará em graus Kelvin e R será uma constante igual a 1.986 (mole °K).

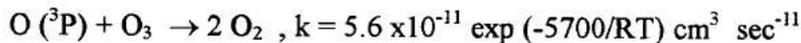
**Oxigênio\_ Ozônio:** O oxigênio atômico recombina, dando origem ao oxigênio molecular e combina com o oxigênio molecular para formação do ozônio. Estas são as reações:



O caso específico da segunda reação, é portanto responsável pelo “escurecimento” da linha verde (5.577A) nas baixas altitudes e é conhecida como Reação de Chapman.

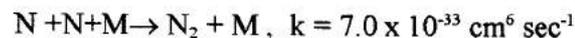


O ozônio e o oxigênio não podem interagir.

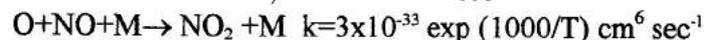
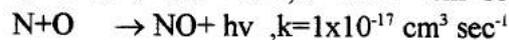


A existência do oxigênio atômico no estado  $O(^1D)$  é uma importante consideração na atmosfera do planeta, porque o  $O(^1D)$  pode entrar nas reações que o estado atômico não pode. A concentração de  $O(^1D)$  encontrada na atmosfera não depende somente das reações químicas subsequentes, mas também das reações de excitação.

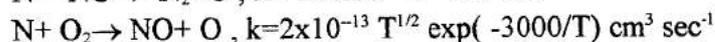
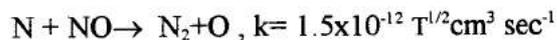
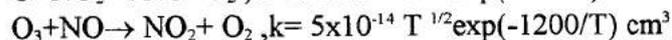
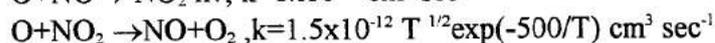
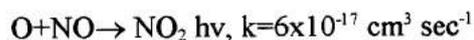
**Nitrogênio\_ Oxigênio:** O nitrogênio atômico pode desaparecer pela recombinação:



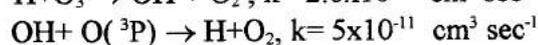
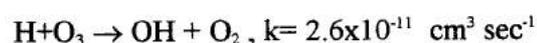
Na reação com o oxigênio, o nitrogênio faz o papel mais importante na atmosfera, produzindo óxido nítrico. Vejamos algumas destas reações:



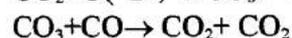
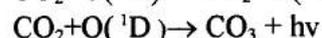
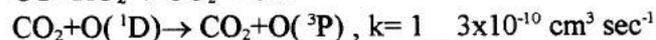
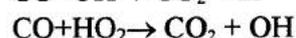
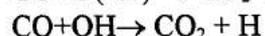
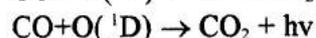
sec<sup>-1</sup>



**Hidrogênio\_ Oxigênio:** A produção de vapor d'água na fotólise pode reagir com o oxigênio e o ozônio. Assim, a reação hidrogênio - oxigênio deve ser considerada na atmosfera contendo vapor d'água. A importância de cada processo para o equilíbrio químico do ozônio na alta atmosfera foi demonstrada por Hunt, que considerou 17 possíveis reações. Vejamos duas reações como exemplo:



**Carbono\_ Oxigênio:** Não é certo o conhecimento das recombinações que envolvem a fotólise na produção do CO<sub>2</sub>. Esta incerteza envolve a impossibilidade de ocorrer a reação e as medidas nas reações que envolvem O( <sup>1</sup>D ) ( embora esta seja conhecida). Uma lista é dada, levando-se em conta que as razões não são dadas.



**# Fotodissociação:** Fotodissociação é um processo onde ocorre a dissociação das moléculas e átomos causados pela absorção de fótons.

Uma das reações mais importantes ocorre com os átomos de oxigênio, nitrogênio, com moléculas de ozônio, óxido nítrico, o hidrogênio e o vapor d'água.

**Fotodissociação do oxigênio:** A fotodissociação da molécula de oxigênio ocorre principalmente no comprimento de onda entre 1000 e 2000 Å e a razão da fotodissociação está no máximo a uma altitude perto dos 100Km. Podemos descrever o processo de fotodissociação como uma reação química entre uma molécula de oxigênio e um fóton de radiação ultravioleta, produzindo dois átomos de oxigênio.



Esse processo mostra que o átomo de oxigênio é produzido mais rapidamente perto dos 100Km. Nós já temos portanto, algum conhecimento do porque o oxigênio atômico ser abundante na alta atmosfera, mas não nas baixas altitudes como mostra a figura.1. deve existir mais reações com O+ oxigênio atômico. Se somente o processo fosse a fotodissociação das moléculas de oxigênio, nós poderíamos achar que todo oxigênio da atmosfera poderia ser convertido da forma molecular para a atômica. O que não sabemos é o processo de recombinação do oxigênio atômico para a forma de oxigênio molecular.

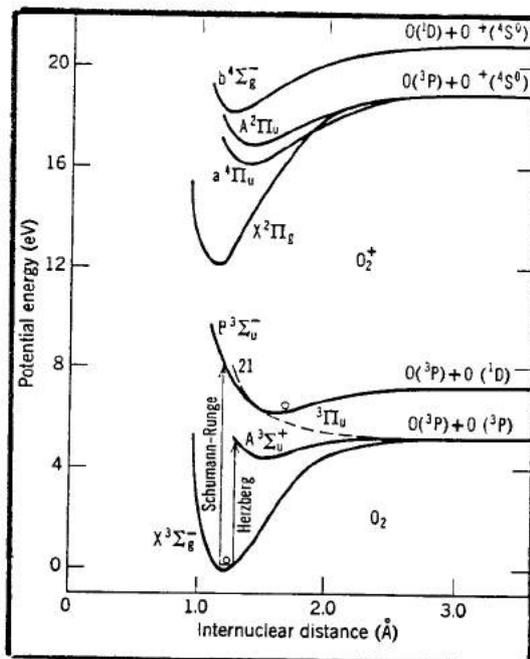


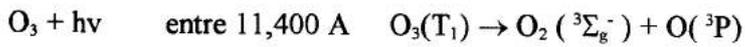
Figura 1  
Diagrama da camada de energia potencial do oxigênio

**Fotodissociação do Ozônio:** O ozônio é produzido pelo  $O(^3P) + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$ ,  $k=8 \times 10^{-35} \exp(890/RT) \text{ cm}^6 \text{ sec}^{-1}$ , na qual é controlada pela fotólise da molécula do oxigênio; o ozônio por sua vez é um forte absorvente de radiação ultravioleta. O coeficiente de absorção está presente na figura 2. Na banda de difusão ultravioleta Hartley(2100\_3200Å), a absorção da radiação conduz para as dissociações abaixo:

- |    |                                      |             |                              |
|----|--------------------------------------|-------------|------------------------------|
|    | $O_3(S_0) + hv \rightarrow O_3(S_1)$ | entre 3100Å | $O_2(^1\Delta_g) + O(^1D)$   |
| ou |                                      | entre 2600Å | $O_2(^1\Sigma_g^+) + O(^1D)$ |
| ou |                                      | entre 1690Å | $O_2(^1\Delta_g) + O(^1S)$   |
| ou |                                      | entre 1790Å | $O_2(^1\Sigma_g^+) + O(^1S)$ |

Grandes absorções pelo ozônio também ocorrem no ultravioleta, entre 1600. A absorção na banda Huggins ocorre fracamente mas bem definida entre 3200 e 3600 Å, e na banda de Chappius fracamente entre o espectro visível 4400 e 7400Å). Na banda

do visível o estado triplo do ozônio é provavelmente excitado conduzindo para a formação dos seguintes estados:



Esta reação é energeticamente possível, mas é proibido por Wigner na regra dos spins.

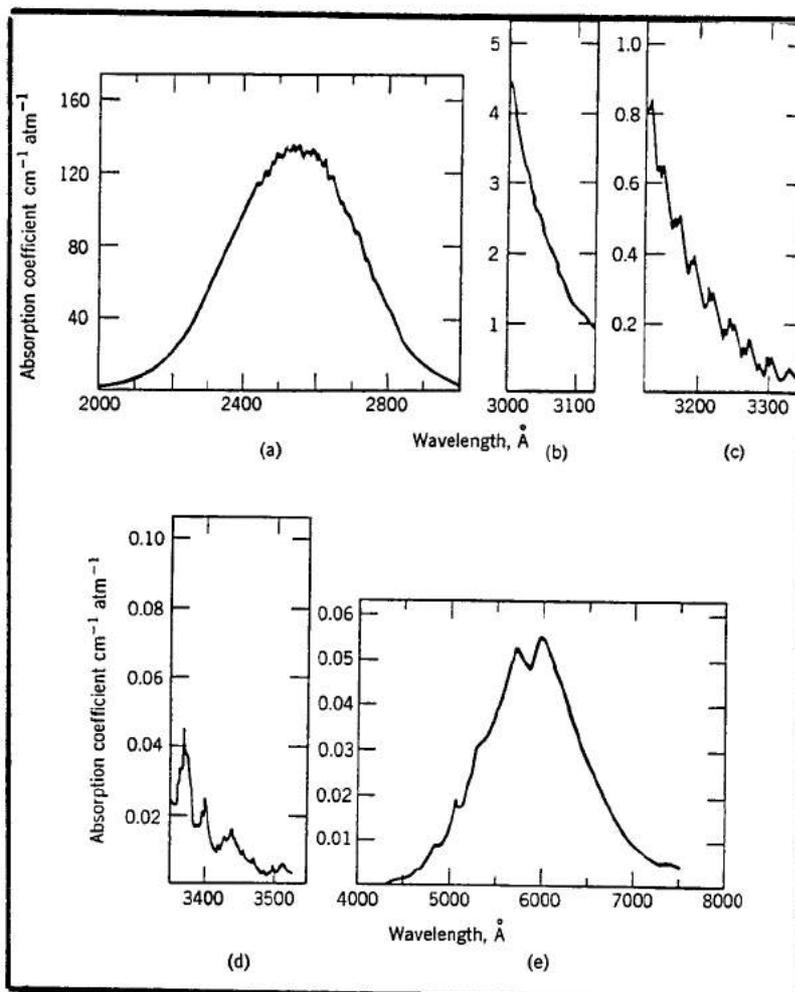
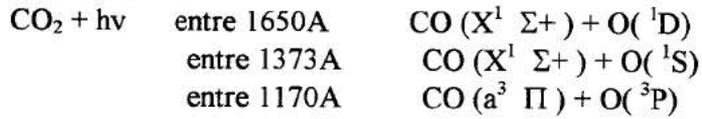


Fig.2

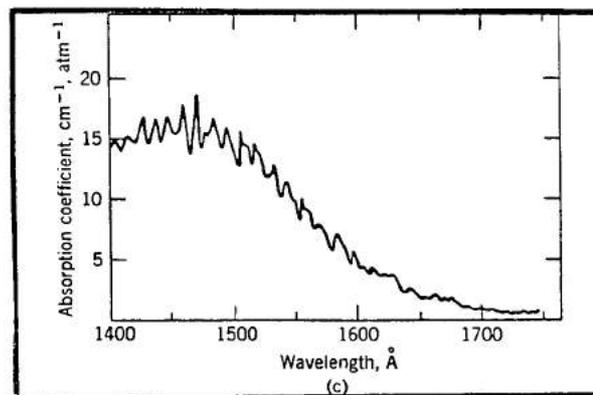
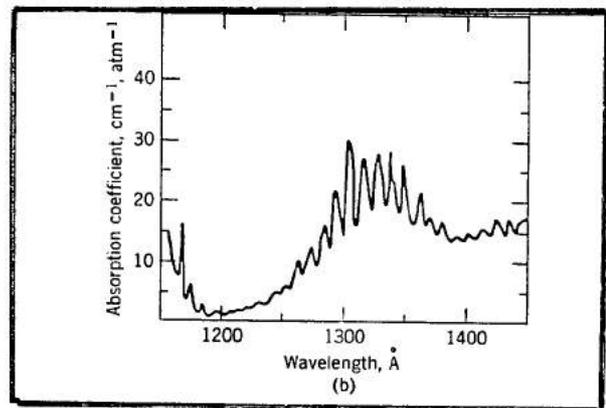
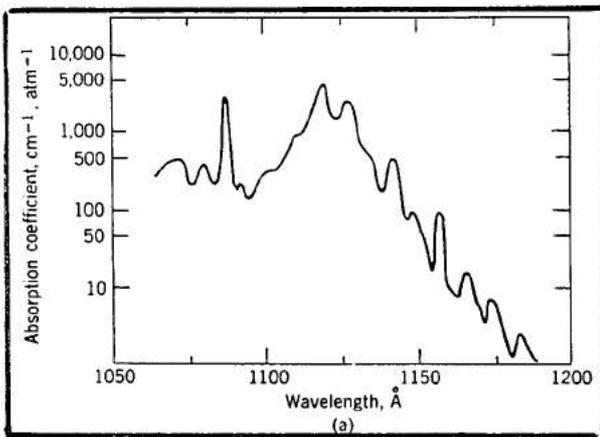
Espectro de absorção do O<sub>3</sub>  
 Fonte: Fundamental of Aeronomy

**Fotodissociação do dióxido de carbono:** A fotodissociação do dióxido de carbono é importante para a química da ionosfera de Marte e Vênus.

De alguma maneira o dióxido de carbono de Marte e Vênus equivalem ao oxigênio terrestre. A fotodissociação ocorre nas três menores regiões do espectro ultravioleta. Nas ondas de comprimento entre 1650Å, são possíveis as seguintes reações de dissociações:



Podemos notar que a baixa resolução da absorção nas medidas da área de colisão (figura 3) não é possível separar a absorção das linhas de radiação (na qual poderia causar excitação e fluorescência) e a absorção da radiação contínua (que poderia causar a dissociação).



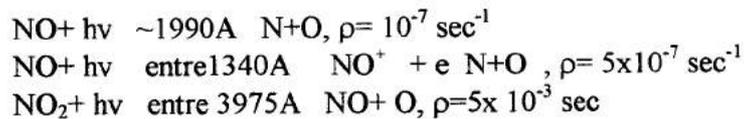
**Figura 3.**

*Absorção espectro do dióxido de carbono*

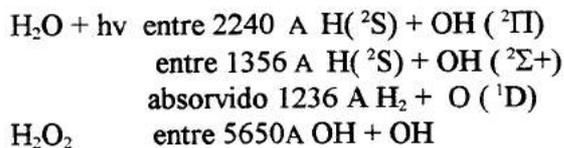
**Fotodissociação do Hidrogênio:** O hidrogênio não realiza fotodissociação.

**Fotodissociação do Nitrogênio:** O nitrogênio é um fraco absorvente de radiação no comprimento de onda que abrange 900A. A fotodissociação das áreas de colisão não são bem conhecidas, mas parece que a reação importante do fóton para a produção do nitrogênio atômico é a pré-dissociação seguindo a absorção na banda Lyman-Birge-Hopfeild. Esta banda é fraca. A absorção máxima está aproximadamente em  $10^{-21}$  cm<sup>2</sup> a 1226 A, e a pré-dissociação que produz o nitrogênio atômico deve ocorrer com uma eficiência menor que 100%. Nas linhas de emissão solar L $\alpha$  e L $\beta$ , a área de colisão está a  $6 \times 10^{-23}$  cm<sup>2</sup> e  $1.1 \times 10^{-20}$  para  $4 \times 10^{-21}$  cm, respectivamente. Reações de íons neutrons e íons elétricos são mais importantes que reações fotolíticas como fontes de nitrogênio atômico na atmosfera terrestre.

**Fotodissociação do óxido nítrico:** Vamos descrever algumas reações de fotodissociação do óxido nítrico.



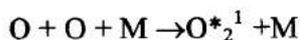
**Fotodissociação do vapor d'água:** O vapor d' água parece estar presente na atmosfera de Marte e Vênus, assim como na atmosfera da terra. Sua fotodissociação resulta nas seguintes reações:



## # Emissões

### Emissão do Oxigênio atômico (OI 557.7nm)

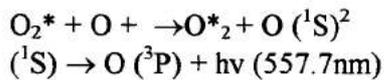
Recombinação do átomo de oxigênio atômico.



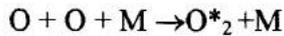
Colisão e transferência de energia.

---

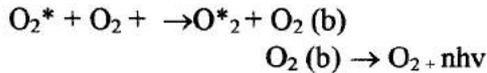
<sup>1</sup> O<sup>\*</sup><sub>2</sub>, estado excitado do oxigênio



### Emissão do Oxigênio molecular (OI 6300nm)

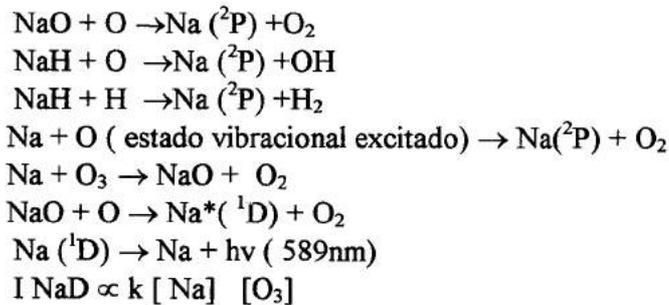


Colisão e transferência de energia



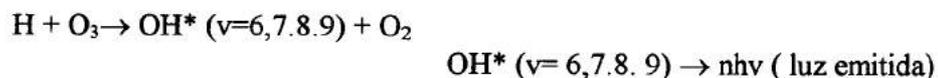
### Emissão do Sódio ( NaD<sub>1,2</sub> 589.0 e 589.6nm)

A emissão do sódio é explicada através de reações fotoquímicas. Estas reações não são estáveis e podem ser entendidas nas reações abaixo:

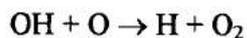


### Emissão da hidroxila

As emissões de hidroxila são provenientes das luzes do céu. Sua produção é atribuída pelos ciclos que seguem:



O hidrogênio pode ser produzido novamente por:

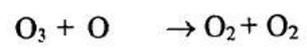


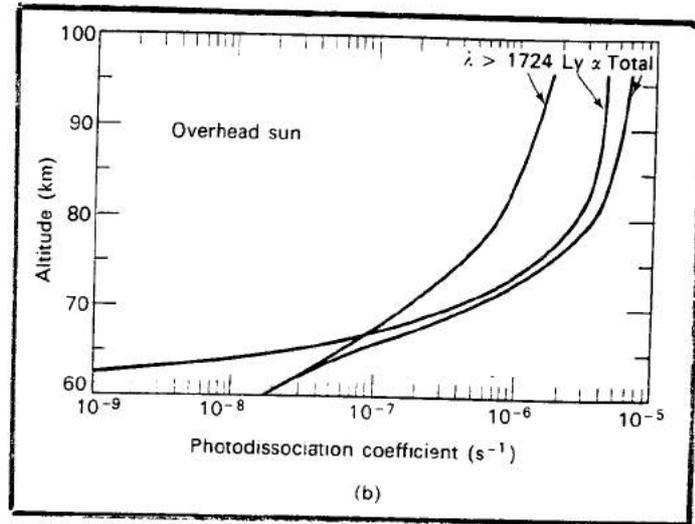
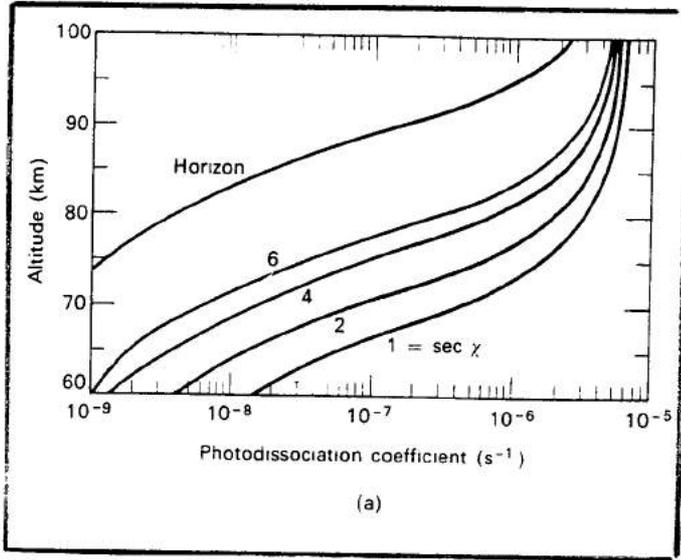
E o ozônio por:




---

<sup>2</sup> (<sup>1</sup>S)<sup>2</sup>, nível de energia





**Figura 11**  
 Fotodissociação do vapor d'água pelo Lyman- $\alpha$ .  
 (a) total de radiação, como uma função do ângulo zenity; (b) importância do Lyman- $\alpha$ .

## 2 - Processamento dos dados de aeroluminescência.

## **2.1- Processamento e pré - análise de dados.**

---

Conforme observamos nos temas anteriores, a luminescência atmosférica é em sua maioria muito fraca para ser observada a olho nú. Se faz necessário a utilização de um instrumento óptico mais sensível a essas emissões. Para isso utilizamos o *fotômetro*.

O fotômetro é um instrumento capaz de medir a intensidade de radiação de um fluxo de fótons. Nesse trabalho foram analisadas as emissões do OI557.7nm, OI630nm(oxigênio atômico), NaD( Sódio), OH( Hidroxila) e O<sub>2</sub>( Oxigênio molecular).

O fotômetro possui um sistema com filtros de interferência inclinável em relação ao seu eixo óptico que possibilita a obtenção de uma varredura em comprimentos de ondas, o que permite também conhecer a contaminação devido aos “ruídos” de fundos estelares; a radiação desejada assim como a temperatura rotacional associada a essas emissões.

O fotômetro encontra-se em cachoeira Paulista e possui a denominação de “*Fotômetro Multicanal. 2*”.

## **2.2 - Calibração e Sensibilidade do Fotômetro.**

---

Sendo o fotômetro um instrumento de alta sensibilidade, se faz necessário a sua calibração, para que possamos estimar com maior precisão a intensidade da emissão de uma aeroluminescência. No Multicanal 2, devemos conhecer a transmissão e a sensibilidade absoluta de cada filtro. A sensibilidade absoluta do filtro pode ser conseguida através da comparação entre uma lâmpada calibrada ES 8.315 e um monocromador.

## **2.3 - Redução de Dados.**

---

A redução de dados é realizada através de um softwer ( que utiliza a linguagem Visual Basic em ambiente Windows), no qual se processam todas a operações necessárias para a obtenção das sensibilidades de laboratório( Eppley, Kriptônio e L2), gráficos de contagens, gráficos de radiância ( R ), temperatura rotacional (K) e fundo espectral (Fotômetro Multicanal 2, Inpe 1992). Esse processo é realizado através da entrada de dados em linguagem Asc II que transforma as contagens das fotomultiplicadoras em séries temporais de intensidade e d temperatura das emissões de aeroluminescência.

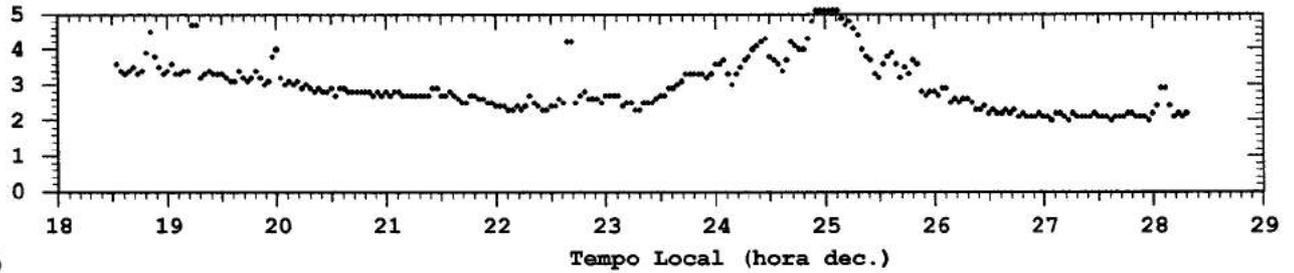
No período de agosto/96 a fevereiro/97 foi realizada a pré - análise de dados no que diz respeito a sensibilidade e calibração, de 112 noites. Sendo que dessas 12 noites o fotômetro se encontrava em Alcântara. Assim como a pré - análise dos dados do Multicanal 3 fixado em Fortaleza, num total de 162 noites.

Realizou-se juntamente , a organização de um banco de dados referentes as noites acima citadas.

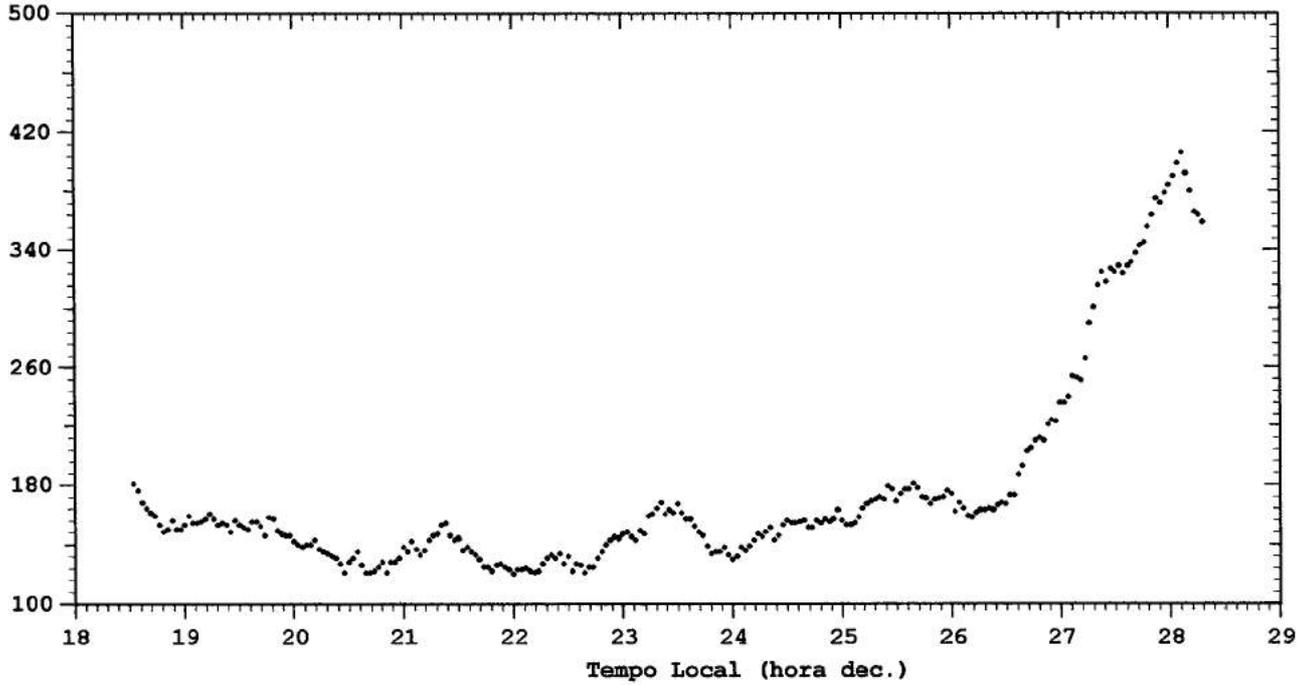
A seguir podemos observar os gráficos gerados pelo softwer de redução.

MULTI-2 (Cachoeira Paulista) Emissão: OI 557.7 nm --- data: 970610

background Espectral (R/Å)



Radiância (R)



Filtro de Interferência F1 - Informações da calibração

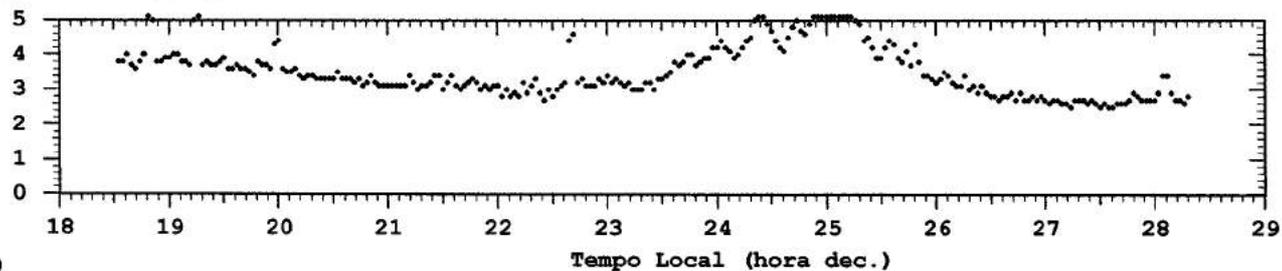
---- Canal principal do Sinal de airglow ----  
 Largura efetiva do filtro óptico ( Å ) = 11.95  
 Radiância Espectral de L2 ( R / Å ) = 3.74  
 Resposta do fotômetro c/ L2 ( Hz ) = 2001  
 Sensibilidade média via L2 ( 1/ R s ) = 44.77211  
 ---- Canal principal do sinal de fundo (BG) ----  
 Largura efetiva do filtro óptico ( Å ) = 14.26  
 Radiância Espectral de L2 ( R / Å ) = 3.588  
 Resposta do fotômetro c/ L2 ( Hz ) = 1264  
 Sensibilidade média via L2 ( 1/ R s ) = 24.70444

Filtro de Interferência F1 - Informações da observação

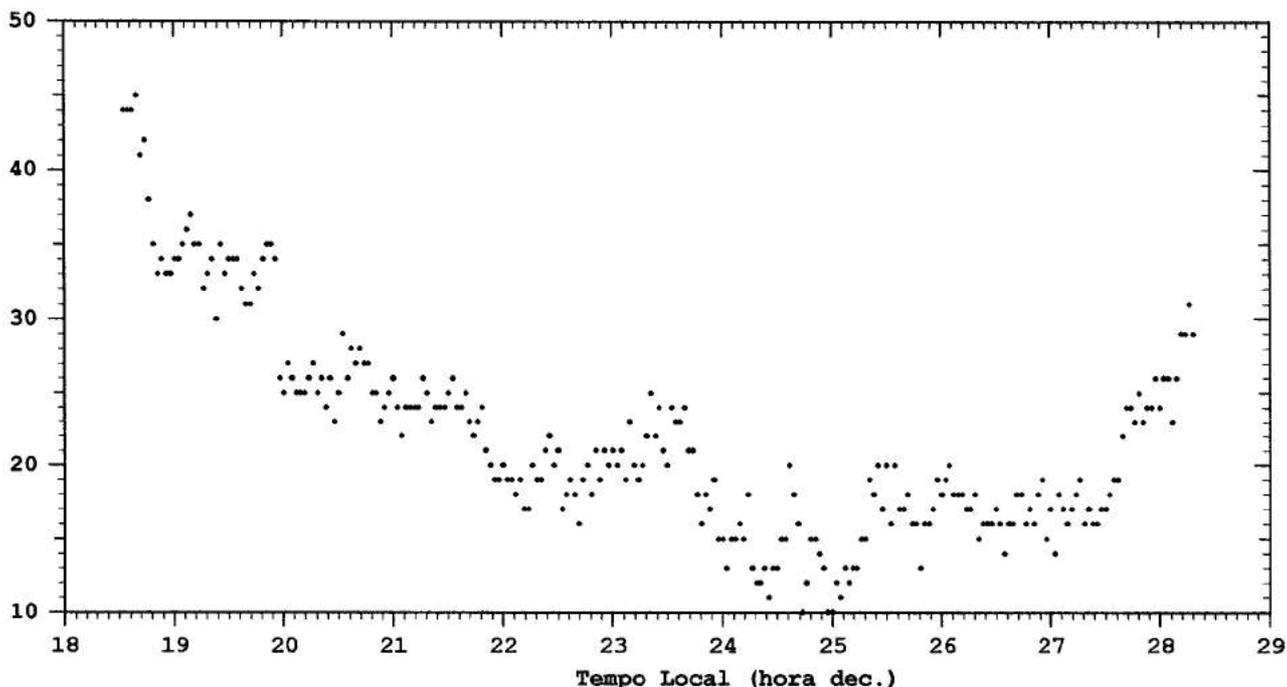
Média Noturna da emissão airglow (R) = 175.2  
 Desvio Padrão da média noturna (R) = 67.36483  
 Variância Fracional da intensidade = .1472623  
 Coef. Correlação-Cruzada Sinal - BG = -.2491416

MULTI-2 (Cachoeira Paulista) Emissão: Na (D1,D2) --- data: 970610

Background Espectral (R/Å)



Radiância (R)



## Filtro de Interferência F2 - Informações da calibração

---- Canal principal do Sinal de airglow ----

Largura efetiva do filtro óptico ( Å ) = 12.105

Radiância Espectral de L2 ( R / Å ) = 6.431

Resposta do fotômetro c/ L2 ( Hz ) = 2825

Sensibilidade média via L2 ( 1/ R s ) = 36.28901

---- Canal principal do sinal de fundo (BG) ----

Largura efetiva do filtro óptico ( Å ) = 16.565

Radiância Espectral de L2 ( R / Å ) = 5.816

Resposta do fotômetro c/ L2 ( Hz ) = 881.5

Sensibilidade média via L2 ( 1/ R s ) = 9.149693

## Filtro de Interferência F2 - Informações da observação

Média Noturna da emissão airglow (R) = 22.00784

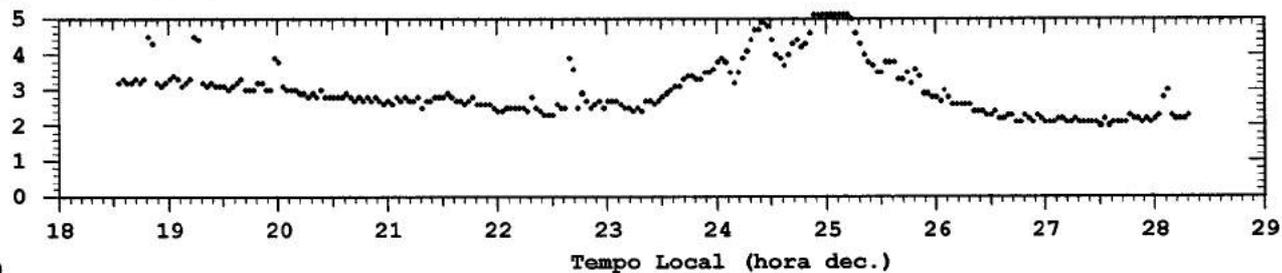
Desvio Padrão da média noturna (R) = 7.059361

Variância Fracional da intensidade = .1024871

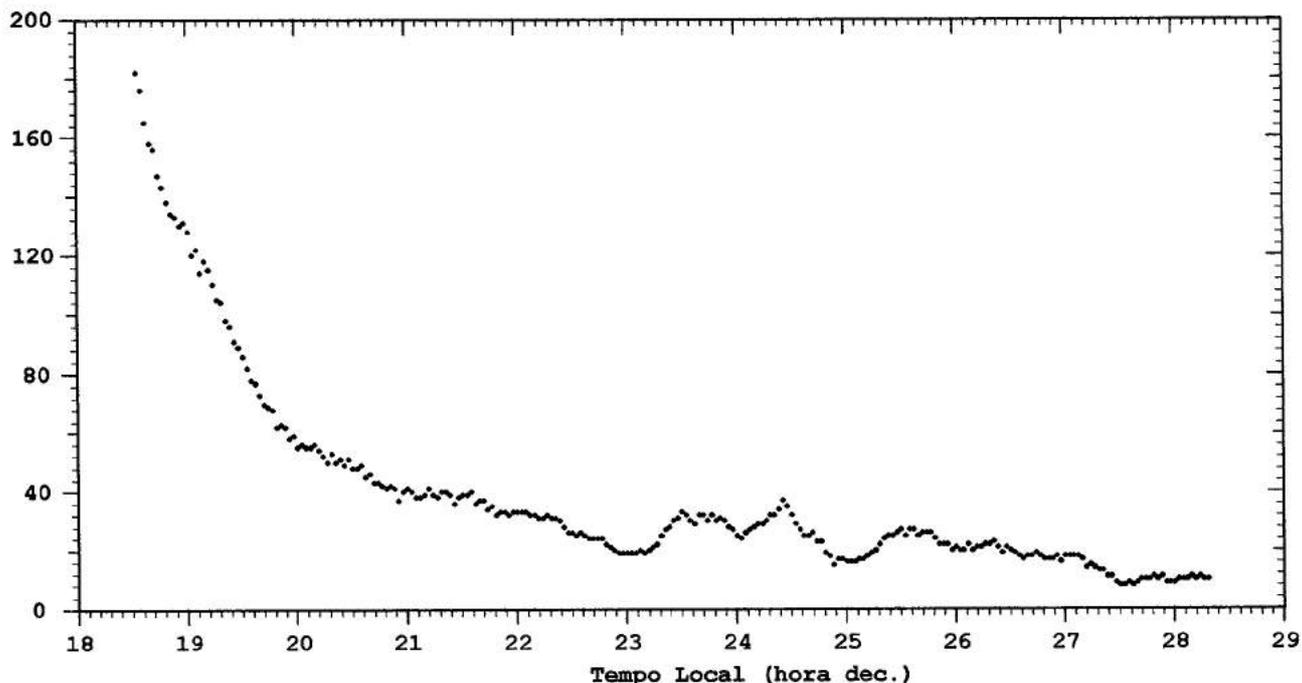
Coef. Correlação-Cruzada Sinal - BG = .7828643

MULTI-2 (Cachoeira Paulista) Emissão: OI 630.0 nm --- data: 970610

## background Espectral (R/Å)



## Radiância (R)



## Filtro de Interferência F3 - Informações da calibração

---- Canal principal do Sinal de airglow ----

Largura efetiva do filtro óptico ( Å ) = 10.81

Radiância Espectral de L2 ( R / Å ) = 11.353

Resposta do fotômetro c/ L2 ( Hz ) = 6233

Sensibilidade média via L2 ( 1/ R s ) = 50.78796

---- Canal principal do sinal de fundo (BG) ----

Largura efetiva do filtro óptico ( Å ) = 11.47

Radiância Espectral de L2 ( R / Å ) = 10.932

Resposta do fotômetro c/ L2 ( Hz ) = 5252.5

Sensibilidade média via L2 ( 1/ R s ) = 41.88929

## Filtro de Interferência F3 - Informações da observação

Média Noturna da emissão airglow (R) = 38.81569

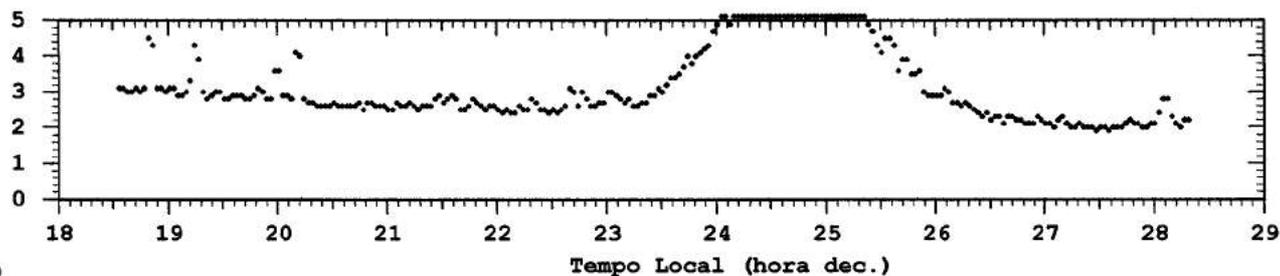
Desvio Padrão da média noturna (R) = 33.74699

Variância Fracional da intensidade = .7529206

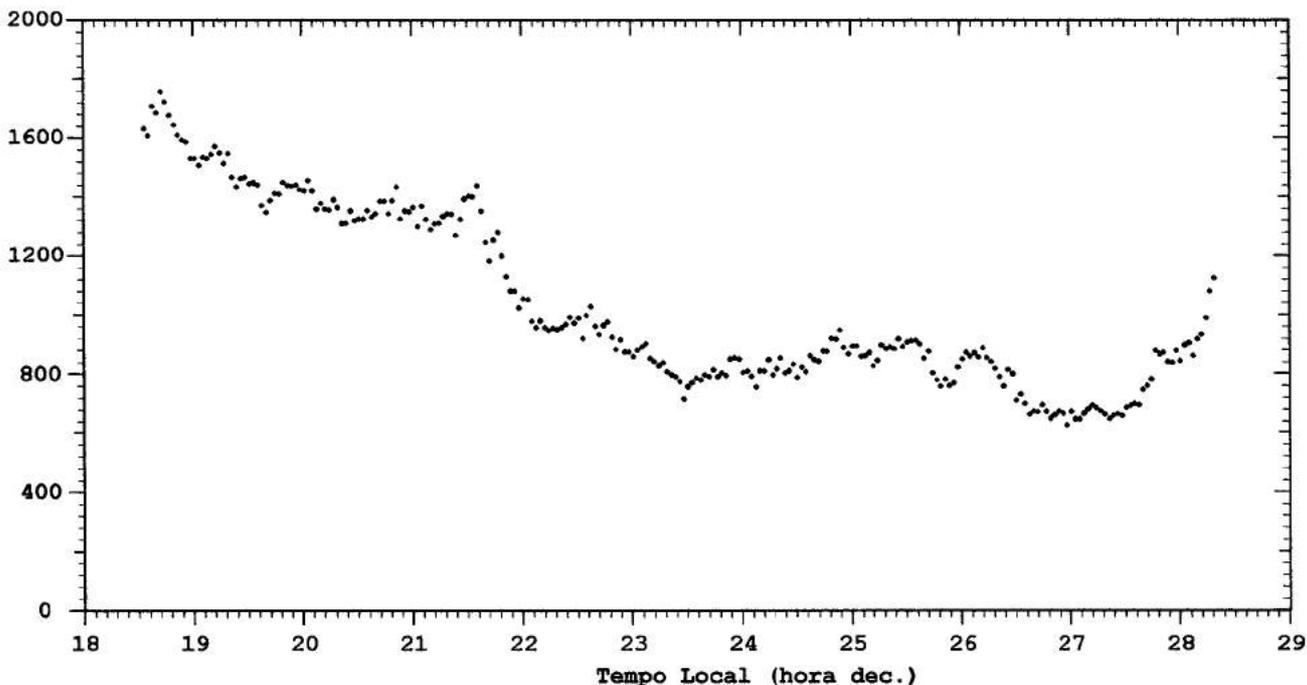
Coef. Correlação-Cruzada Sinal - BG = .4029358

MULTI-2 (Cachoeira Paulista) Emissão: OH (6-2) --- data: 970610

Background Espectral (R/Å)



Radiância (R)



## Filtro de Interferência F4 - Informações da calibração

---- Canal principal do Sinal de airglow ----

Largura efetiva do filtro óptico ( Å ) = 11.605

Radiância Espectral de L2 ( R / Å ) = 72.637

Resposta do fotômetro c/ L2 ( Hz ) = 31950.5

Sensibilidade média via L2 ( 1/ R s ) = 37.90309

---- Canal principal do sinal de fundo (BG) ----

Largura efetiva do filtro óptico ( Å ) = 11.535

Radiância Espectral de L2 ( R / Å ) = 72.802

Resposta do fotômetro c/ L2 ( Hz ) = 33245

Sensibilidade média via L2 ( 1/ R s ) = 39.58817

## Filtro de Interferência F4 - Informações da observação

Média Noturna da emissão airglow (R) = 1035.082

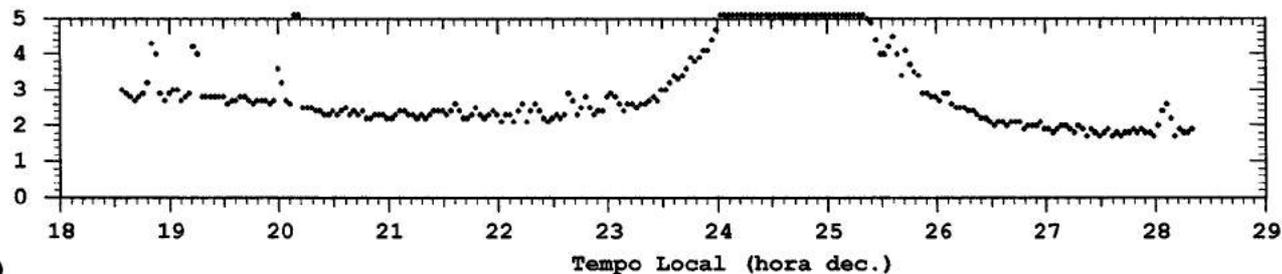
Desvio Padrão da média noturna (R) = 297.914

Variância Fracional da intensidade = 8.251367E-02

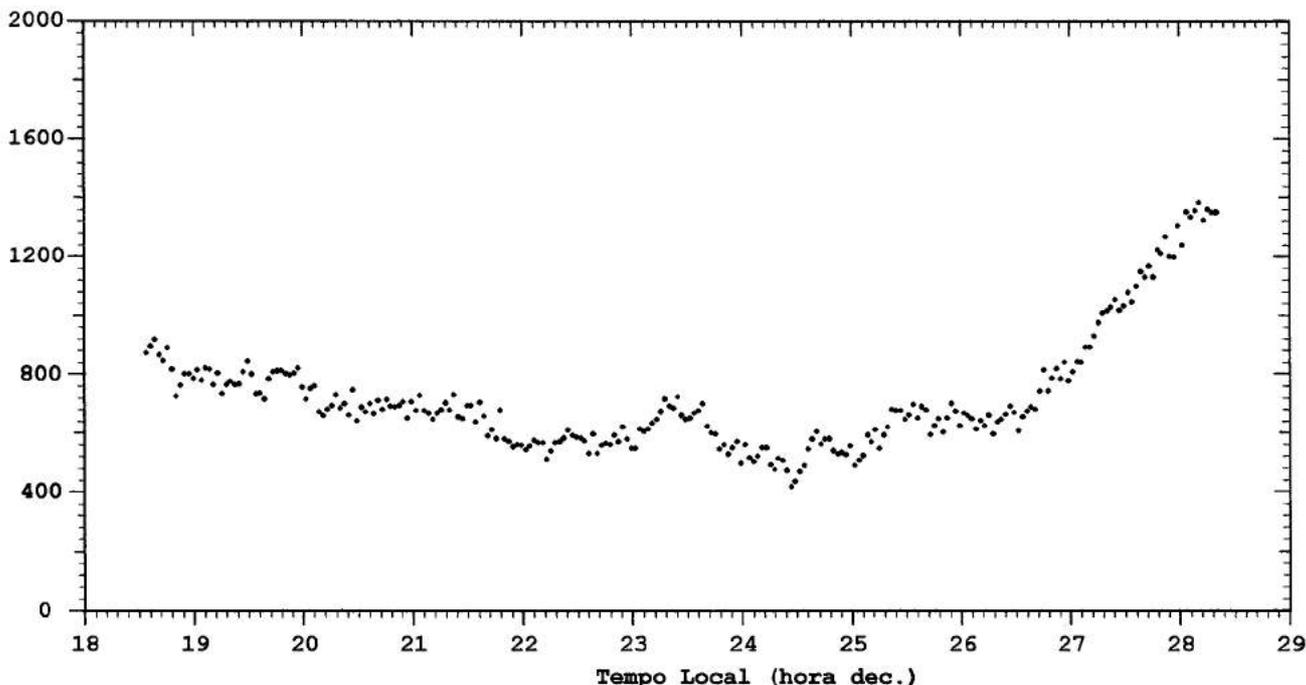
Coef. Correlação-Cruzada Sinal - BG = .5214596

MULTI-2 (Cachoeira Paulista) Emissão: O2 A(0-1) --- data: 970610

## background Espectral (R/Å)



## Radiância (R)



## Filtro de Interferência F5 - Informações da calibração

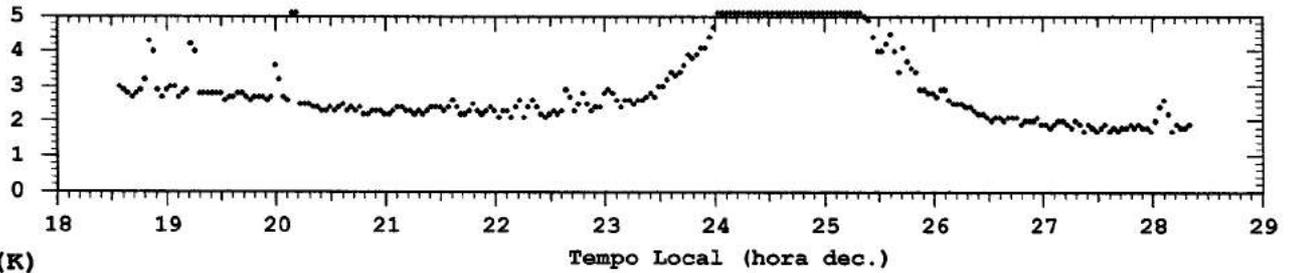
---- Canal principal do Sinal de airglow ----  
 Largura efetiva do filtro óptico ( Å ) = 12.796  
 Radiância Espectral de L2 ( R / Å ) = 78.15  
 Resposta do fotômetro c/ L2 ( Hz ) = 22739  
 Sensibilidade média via L2 ( 1/ R s ) = 22.73883  
 ---- Canal principal do sinal de fundo (BG) ----  
 Largura efetiva do filtro óptico ( Å ) = 11.286  
 Radiância Espectral de L2 ( R / Å ) = 81.98  
 Resposta do fotômetro c/ L2 ( Hz ) = 27815.5  
 Sensibilidade média via L2 ( 1/ R s ) = 30.06346

## Filtro de Interferência F5 - Informações da observação

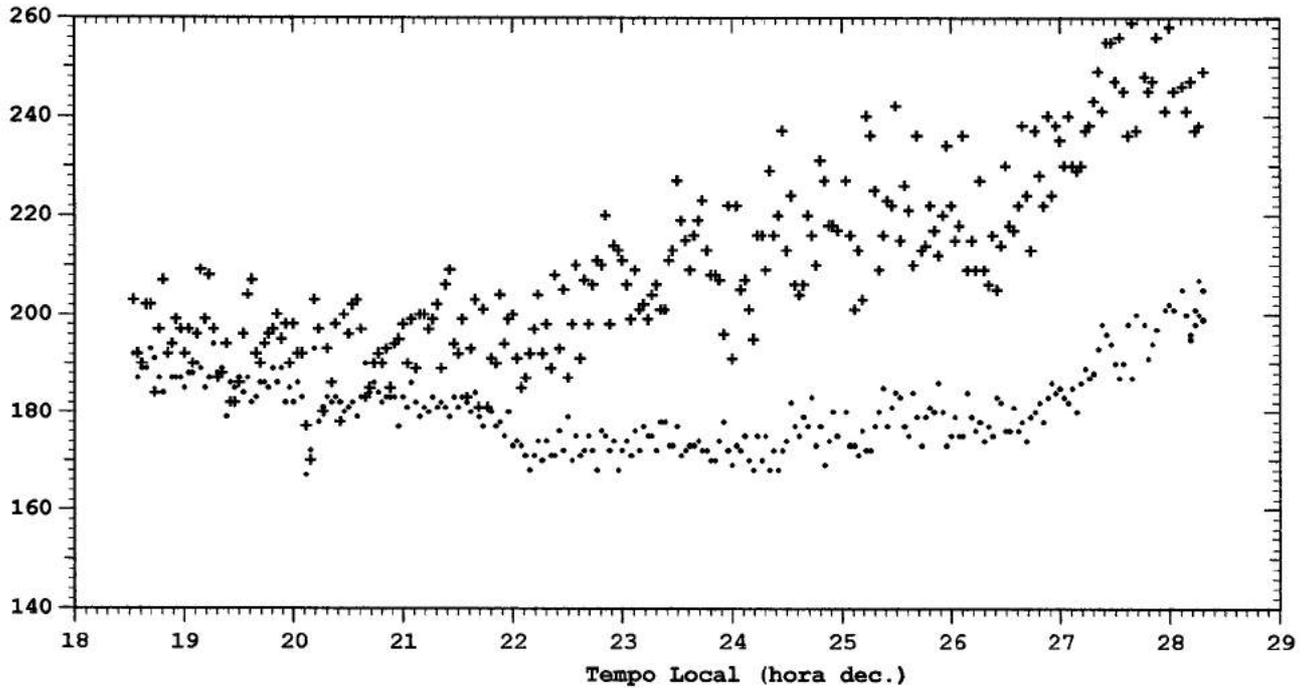
Média Noturna da emissão airglow (R) = 720.2392  
 Desvio Padrão da média noturna (R) = 198.2198  
 Variância Fracional da intensidade = 7.544558E-02  
 Coef. Correlação-Cruzada Sinal - BG = .5892857

MULTI-2 (Cachoeira Paulista) Temperaturas Rot. --- data: 970610

background Espectral (R/Å)



Temperatura (K)



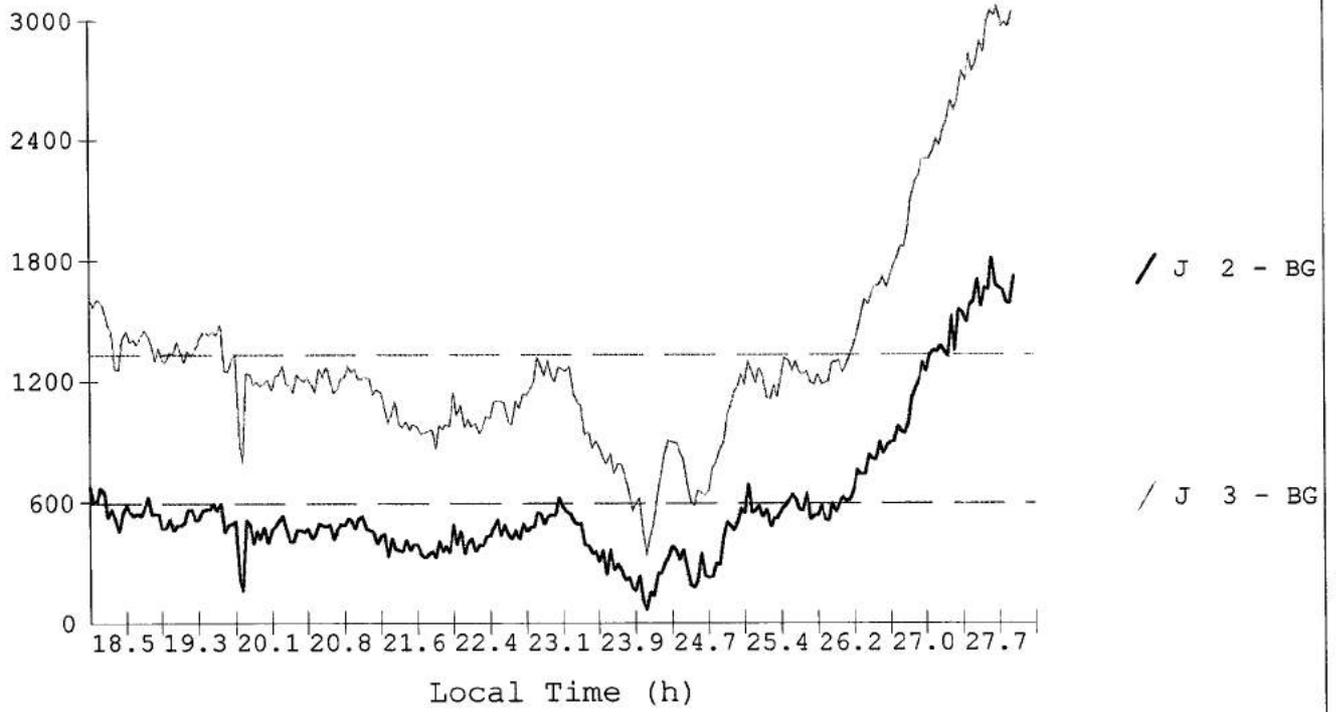
Temperatura rotacional via OH (6-2) - modelo POS2 / POS4 (Mies) - Informações da observação  
 Média Noturna da temperatura rotacional (K) = 180.9451  
 Desvio Padrão da média da temperatura (K) = 8.187554  
 Variância Fracional da temperatura = 2.039436E-03

Temperatura rotacional via O<sub>2</sub> (0-1) banda Atmosférica - Informações da observação  
 Média Noturna da temperatura rotacional (K) = 210.1793  
 Desvio Padrão da média da temperatura (K) = 18.70334  
 Variância Fracional da temperatura = 7.887164E-03

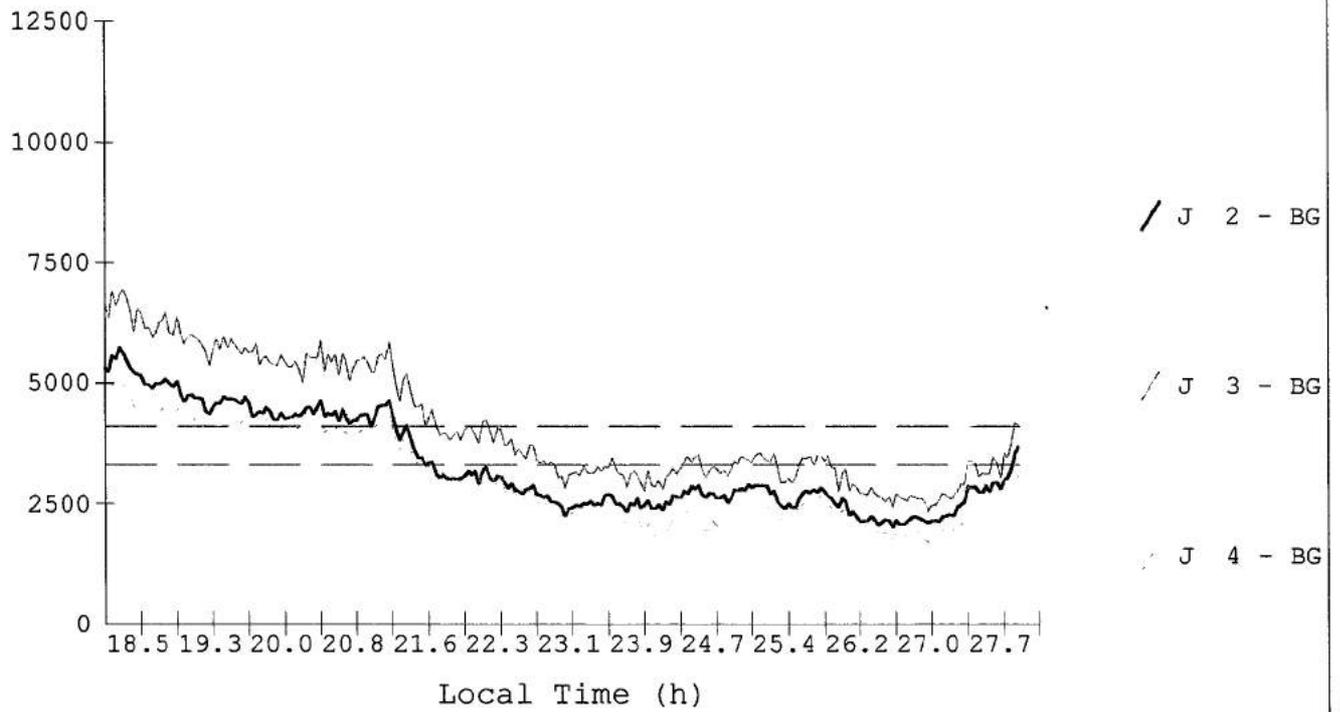
## LEGENDA

- Temperatura OH (6-2)
- + Temperatura O<sub>2</sub> (0-1)

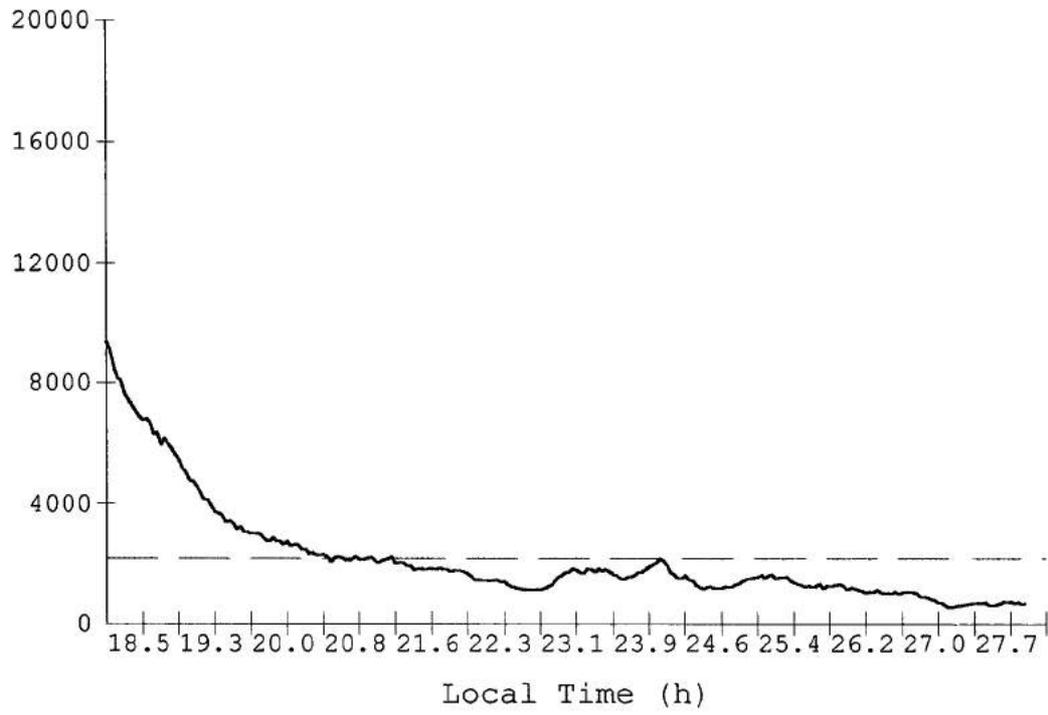
Multi 2 - Airglow signal O<sub>2</sub> (0-1) (cont./s) 970610



Multi 2 - Airglow signal OH (6-2) (cont./s) 970610

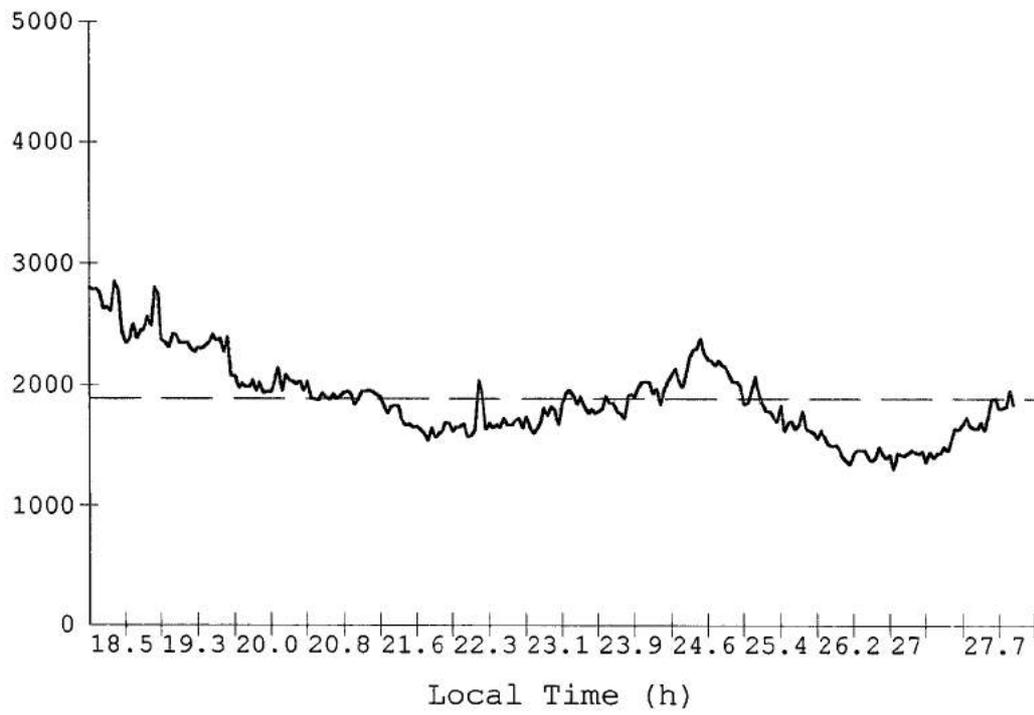


Multi 2 - Airglow signal OI 630.0 nm (cont./s) 970610



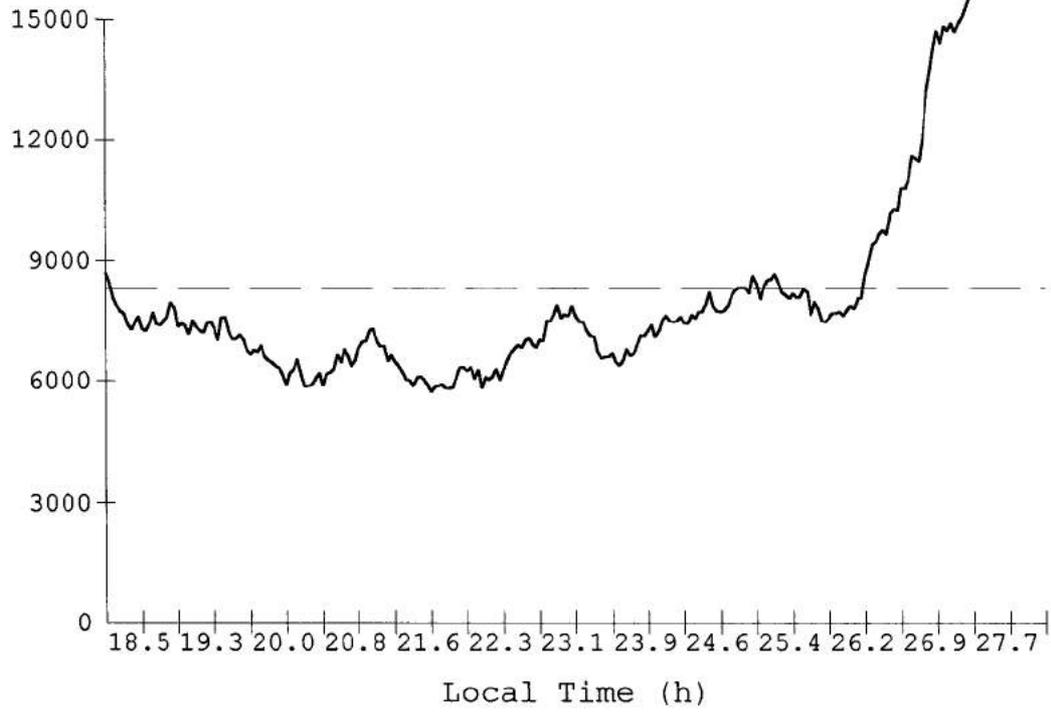
/ J 1 - BG

Multi 2 - Airglow signal NaD (cont./s) 970610



/ J 1 - BG

Multi 2 - Airglow signal OI 557.7 nm (cont./s) 970610



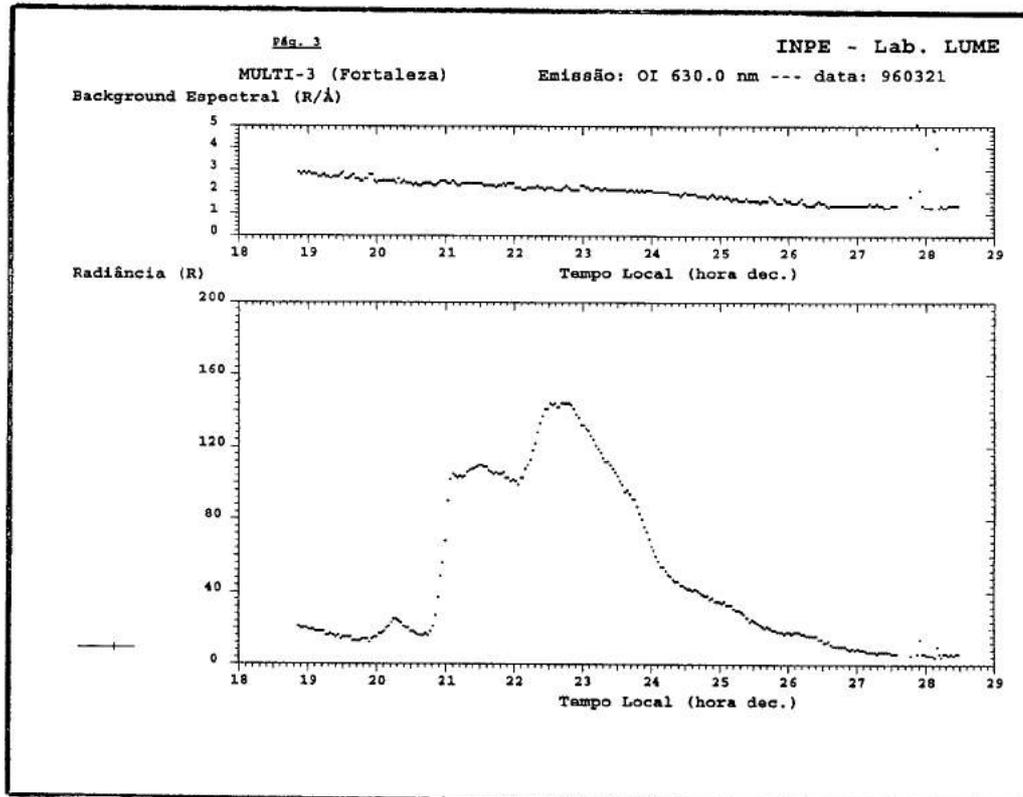
/ J 1 - BG

### 3 - Análise dos métodos espectrais aplicados aos dados de aeroluminescência.

---

### 3.1- Estudo das séries temporais .

Como podemos observar na fig.1 , os dados de aeroluminescência se apresentam em função do tempo, ou seja , o fenômeno é observado em tempos determinados, comumente em intervalos iguais.



**Figura 1**

Gráfico gerado através dos dados de emissão de aeroluminescência

A esse fenômenos dá-se o nome de Série Temporais.

Nosso objetivo ,é analisar essa série temporal, determinando seus componentes básicos<sup>1</sup>. Tendo esses componentes e admitindo a existência de algum padrão geral e não aleatório eles poderão admitir uma função matemática que a descreva . Com isso será possível prever comportamentos futuros desse fenômeno num determinado instante.

A existência desse comportamento não aleatório (variações não esporádicas e previsíveis) é de fundamental importância para a análise. Sua inexistência indica um processo aleatório fora de controle, isto é , sem a capacidade de se prever o fenômeno futuramente e isso se torna inútil para qualquer análise de suas propriedades.

A série temporal em estudo ,é caracterizada por movimentos oscilatórios e aproximadamente regulares dos dados, ao longo de um período de doze a oito horas( possui componentes cíclicos e sazonais).

Esses períodos podem ser representados através de funções trigonométricas seno/ cosseno, cuja diferença básica é a posição em que se encontra a origem dos tempos.

$$y = A \text{ seno}[\omega t - \varphi ] \text{ ou}$$

$$y = A \text{ cos}[\omega t - \varphi ] \text{ onde}$$

### 1- Componentes Básicos.

$y$  = variável em estudo.

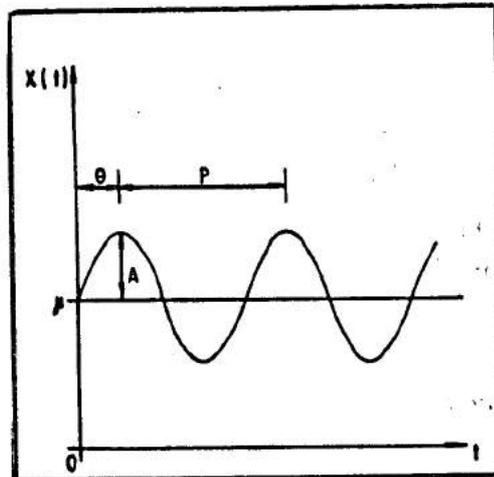
$A$  = A amplitude, que é a distância da média  $\mu$  da série ao pico ou “fundo do vale”.

$T$  = período do ciclo. Tempo necessário para a série temporal se repetir.

$\varphi$  = fase .Distância entre a origem da série temporal, no caso  $t=0$  e o pico mais próximo.

$\omega = 2\pi/T$  ou  $2\pi f$  onde  $f$  é a frequência.

A figura abaixo representa um harmônico, de uma função do tempo  $x(t)$  , $-\infty < t < +\infty$ .



**Figura 2**  
representação de um harmônico

Entretanto, verificamos que essas funções devem ser periódicas, ou seja, deve existir uma continuidade<sup>2</sup>. E não é o que acontece com a função geradora da radiação. Como vemos na figura 1 nosso gráfico apresenta certas descontinuidades. Para resolvermos esse problema, expandimos nossa função em Série de Fourier, uma vez que para isso a função não precisa ter uma forma bem comportada e apresentar sua derivada em todos os pontos.

Uma série de Fourier é representada pela combinação de ondas harmônicas. E sua expansão pode ser escrita através de:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \{ A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t \}$$

e seus coeficientes são representados por:

$$x(t) = A_0/2 + A_1 \cos x + A_2 \cos 2x + A_3 \cos 3x + \dots \\ B_1 \sin x + B_2 \sin 2x + B_3 \sin 3x + \dots$$

$$A_0 = 1/T \int_{-T}^{+T} x(t) dt$$

$$A_n = 1/T \int_{-T}^{+T} x(t) \cos n t dt$$

$$B_n = 1/T \int_{-T}^{+T} x(t) \sin n t dt$$

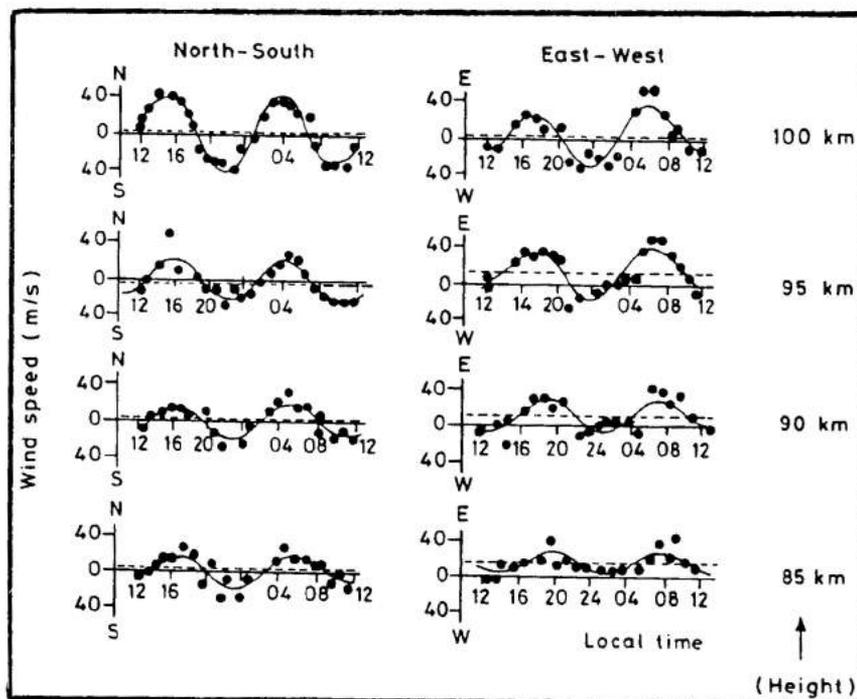
Ao decompor essa nova série em uma soma de harmônicos  $\cos \omega t$  ou  $\sin \omega t$  a partir de registros de comprimentos finitos estamos realizando uma Análise Espectral desta série temporal.

Basicamente, a análise de uma série temporal procura localizar períodos e identificar fenômenos correspondentes às linhas espectrais. Para analisarmos os fenômenos de aeroluminescência, relacionamos suas linhas espectrais ao fenômeno atmosférico conhecido como Ondas de Maré.

As ondas de maré e seus respectivos harmônicos, são gerados pelas forças da lua e do sol caracterizadas num período de 24 horas (solar) e 24.8 (lunar diurna). Essas ondas de maré na atmosfera resultam em movimento do ar, e a atmosfera responde

diferentemente a forças com diferentes períodos .O movimento do ar através do campo geomagnético induz forças eletromotivas, que por sua vez induzem correntes elétricas na ionosfera , causando assim variações geomagnéticas com períodos solar e lunar. O sistema de campo elétrico correntes e cargas elétricas, produzidos pelas ondas de maré ,tem uma importância muito grande na dinâmica da ionosfera. Além disso, as marés na termosfera são também afetadas por processos que ocorrem na baixa atmosfera. Marés que tem origem na baixa atmosfera, causadas pelo aquecimento solar, podem se propagar para cima e assim modificar a dinâmica da termosfera.

É por esse motivo ,que correlacionamos o fenômeno de aeroluminescência as ondas de maré.



**Figura 3**  
Ondas de maré

<sup>2</sup> Uma função será contínua  $\Leftrightarrow \exists f(x); \exists \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \text{ e } f(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$

### 3.2- Estudos dos métodos de análise espectral.

Há várias maneiras de se analisar uma série temporal, isso dependerá dos objetivos que se quer chegar. Nesse trabalho, o objetivo será prever valores futuros, assim como observar as descrições da série em questão. Para isso teremos que realizar a redução de longos termos (através do software "Fitting & Análise Espectral, Gobii,D, Inpe s/d). Construir um novo gráfico da série e verificar a existência de tendências, ciclos e variações sazonais. Será necessário então considerarmos algum modelo ou método que descreva o comportamento da série. A escolha desse método pode ser um ponto crítico na análise.

Antes de estudarmos os métodos a serem utilizados nesse trabalho, devemos ter atenção as observações que seguem:

Com a unidade de tempo constante, com exceção da média, que tem período infinito, a maior curva periódica (a mais lenta) que pode ser observada é aquela com o período igual a  $T$ , ou frequência angular  $2\pi/T$ . Isto ocorre porque esta onda pode repetir-se somente uma vez em  $T$  observações se ela tem período  $T$ .

A menor curva periódica (a mais veloz) que pode ser observada é aquela com período igual a duas vezes o período da amostra (espaçamento entre dois pontos; para o série em estudo esse valor estaria em torno dos três minutos), desde que é necessário pelo menos  $2T$  para uma curva completar o ciclo. Assim, a curva mais veloz que pode ser observada tem frequência angular  $2\pi/2 = \pi$  radianos. Esta frequência é a mais alta e é denominada Frequência de Nyquist. Essa condição de Nyquist garante trabalhar com períodos de maior amplitude (como vemos nas ondas de marés) e frequências mais baixas.

Para Fourier esse período não deve ser maior que o período da série, e através do Método de Entropia Máxima, determina-se um processo "artificial" para se obter o período mínimo. No caso dos dados da radiação o ideal seria que esse período estivesse entre trinta e quarenta minutos.

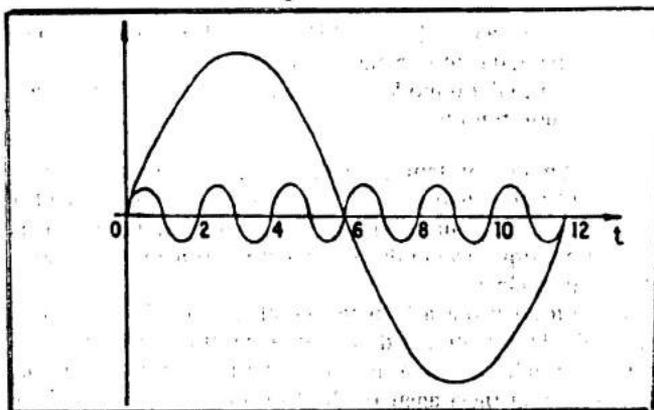
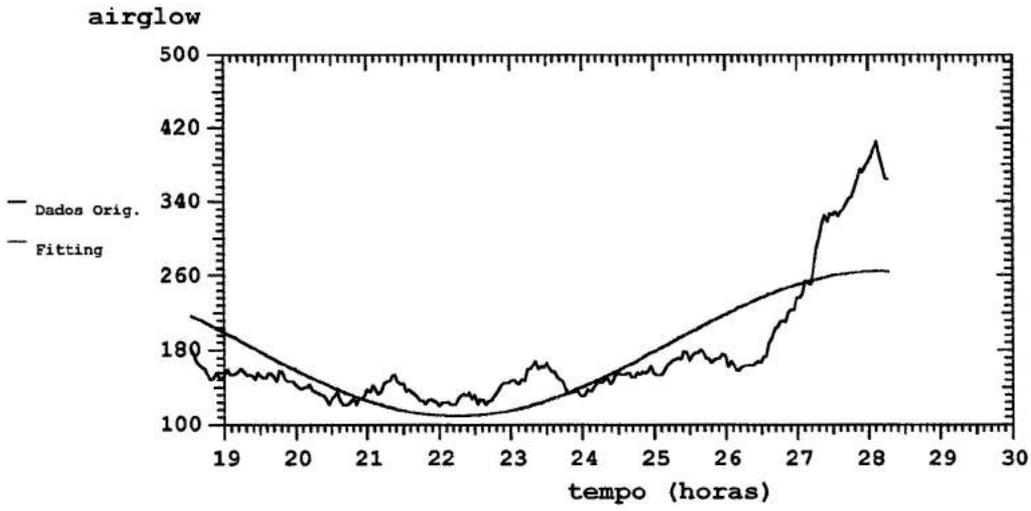


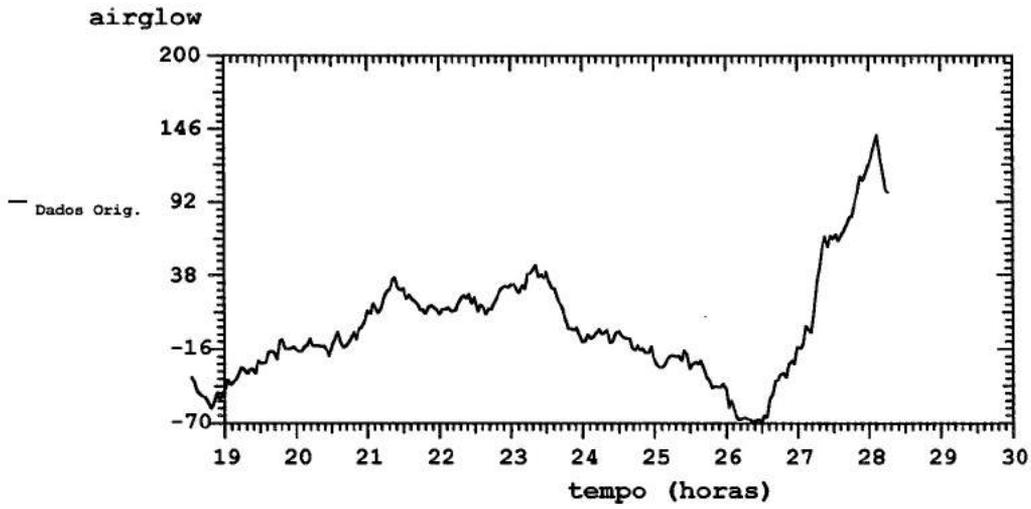
Figura 1.

Curvas de frequências mais alta( Nyquist) e mais baixas.

Dados do MULTI2 (970610MC.II) - emissão:



Dados do MULTI2 (970610MC.II) - emissão:



Vamos nos limitar a analisar os dados de aeroluminescência a partir do Método da F.F.T ( Fast Fourier Transform ), Método de Periodograma de Lomb - Scargle assim como o de Entropia Máxima.

### **3.2.1 - F.F.T ( Fast Fourier Transform )**

---

O método da Transformada Rápida de Fourier, (F.F.T ) nada mais é do que um algoritmo para se calcular mais rapidamente o espectro de uma dada função ou uma série. Ao encontrarmos os componentes <sup>1</sup> de uma função através da expansão em série pela Transformada de Fourier, realizamos operações aritméticas que envolvem adições e multiplicações. Esses cálculos aritméticos ,geralmente são feitos por periodogramas requer um tempo computacional muito longo. Para suavizar esse tempo , utiliza-se a técnica da F.F.T.

A idéia básica da F.F.T pode ser ilustrada no caso em que T ( período) pode ser fatorado na forma T=rs. Supondo que T seja par, no mínimo um dos fatores , digamos r, será par.

Os coeficientes de Fourier podem ser escritos como:

$$A_n + B_n = 2/T \left( \sum_{t=1}^T X(t) \exp (2\pi i p t / T) \right)$$

Existem rs funções do tipo X(t) . Para ser calculada, cada uma requer s multiplicações e adições dando no total rs<sup>2</sup> operações. Também requer r adições para cada p , e existem T/2 valores de p a considerar. Então, o número total de operações exigidas é:

$$rs^2 + Tr/2 = Ts + Tr/2 = T( s+r/2)$$

que é bem menos do que se não utilizarmos esse método<sup>1</sup>. Por exemplo, se T = 414 então o cálculo direto requer 85.698 operações. Por outro lado, se usarmos a F.F.T. esse cálculo cairá para 13.248 operações.

Por uma extensão do procedimento acima, pode-se reduzir ainda mais os cálculos quando T é altamente composto, isto é, tem muitos fatores pequenos. Em particular, se T é da forma 2<sup>q</sup>, o número de operações é da ordem T<sub>q</sub> (ou Tlog<sub>2</sub> T) em vez de T<sup>2</sup>. Uma redução considerável pode ser feita quando T tem vários fatores.

---

<sup>1</sup> Ver seção 3.1

<sup>1</sup> Vide "Análise espectral de séries temporal, Basilo B.P.( et.al), Eletrobras, 1986."

Na prática, quando  $T$  não é da forma  $2^n$ , pode-se fazer  $T$  altamente composto omitindo algumas observações. Também pode-se adicionar zeros à amostra (dados) observadas e aumentar o valor  $T$  até um inteiro adequado.

Adicionar zeros aos dados originais, naturalmente não afetará o valor numérico dos coeficientes de Fourier, mas afetará as frequências em que os coeficientes são acumulados. Assim, ao se adicionar zeros para aumentar  $T$ , digamos para  $T'$ , os coeficientes serão acumulados nas frequências  $w'_p = 2\pi p/T'$  e não  $w_p = 2\pi p/T$ . Isto deveria ser acompanhado por um esquema chamado tapering para suavizar os dados.

Para exemplificar usaremos  $T = 382$ . Este valor não é altamente composto. Então deve-se proceder como segue:

- (a) Remover qualquer tendência linear dos dados e usar os resíduos (que tem média zero) para as análises subsequentes. Se não existir tendências, simplesmente substituiremos a média total de cada observação. No caso específico dos dados de aeroluminescência há tendências de longo termo e elas são removidas como especificamos anteriormente.
- (b) Aplicar um taper linear em cerca de 5% dos dados em cada extremo. Neste exemplo, denotando-se os dados corrigidos por  $X_0, X_1, \dots, X_{381}$  a série temporal será dada por:

$$\begin{aligned} X_t &= (t+1)X_t/20 & , t = 0,1,\dots,18 \\ & (382-t) X_t/20 & , t = 363,\dots,381 \\ & X_t & , t = 19,20,\dots,362 \end{aligned}$$

- (c) Adicionar  $(512-382) = 130$  zeros em um extremo da série tapered, de forma que  $T' = 512 = 2^9$ .

- (d) Aplicar a F.F.T aos dados e calcular os coeficientes de Fourier,  $A_n$  e  $B_n$

De fato com  $T$  tão baixo como 382, a vantagem computacional da F.F.T. é limitada, neste caso é melhor calcular o periodograma diretamente, o que evita a necessidade de tapering e da adição de zeros. A F.F.T. é realmente válida para  $T > 1000$ .

Os cálculos da F.F.T estão sendo verificados através do software Mathematica 2.2 em ambiente Windows. E os gráficos serão transportados para o Origin, também em ambiente Windows devido a sua melhor resolução gráfica (possui mais ferramentas e opções).

Após o estudo da série através da F.F.T. pretende-se observar a série através do Método de Entropia Máxima (Gobbi.D, Inpe).

## Referências Bibliográficas

---

- BRIMBLECOMB, Peter - Air Composition and chemistry, Cambridge, 1986.
- KRASOVSKYI, V.I - Aurora and Airglow.
- ROBERT, H. E - Majestic lights, the aurora in science, history and the arts, American Geophysical Union, 1980.
- RICHARD P.W - Chemistry of atmosphere, Clarendon Press, Oxford, 1985.
- McEWAM and PHILLIPS - Chemistry of atmosphere, Eduard Arnold, 1975.
- McCORMAC, Billy M. - Aurora and Airglow, Reinhold Publishing Corporation, 1967.
- CHAMBERLAIN, Joseph W. - Physics of the Aurora and Airglow, International Geophysical series, volume 2, 1961.
- MILONE, Giuseppe e ANGRLINI, Flávio - Estatística Aplicada (Métodos de séries temporais), Editora Atlas, 1995.
- FRANCO, A. Santos - Transformadas de Fourier - Inpe.
- GOBBI, Delano - Estudo de Ondas de Gravidade na Alta Atmosfera através de observações de luminescência atmosférica da Hidroxila OH ( 9-4 ) e Oxigênio O<sub>2</sub> ( 0-1 ), Tese de Doutorado, Inpe, 1993.
- ZHANG, Shengpan - Gravity waves from O<sub>2</sub> airglow, Université York Universit, 1991.
- PRESS, Willian H. / TEUKOLHY Saul A./ FLANNEERY, Brian P./ VITTERLING, Willian T. - Numerical Recipes in C, the art of scientific computing, Cambridge, 1988.
- KIRCHHOFF, Volker. W.J.H - Curso de Aeronomia básica, Inpe, 1978.
- RICHARD, C.G. Walker - Atmosphere, Foudation of science series, 1972.
- R.C. Whitten and I.G. Poppof - Fundamental of Aeronomy, Space science text series, 1971.
- MELO, Stella Maris Ludovico - Processo fotoquímico das emissões de liminescência, Inpe, 1992.
- MELLO, Stella Maris Ludovico - Aeronoluminescência da região equatorial via experimento foguete, Inpe,, 1994.
- MORETTIN, P.A, Análise Harmônica de Processos Estocrásticos, e.d .
- PEREIRA, B. B (et.al), Análise Espectral de Séries Temporais, Eletrobras. 1986.
- WILLIAN, A.G, Statistical Spectral Análise, A nonprobabilistic theory, e.d