



# MEDIDAS SIMULTÂNEAS DE ONDAS ATMOSFÉRICAS NA REGIÃO F E BOLHAS DE PLASMA USANDO TÉCNICAS ÓTICAS E DE RÁDIO

Aluna: Aline Amorim de Almeida (UNIVAP / bolsista INPE)  
Orientador: Alexandre Alvares Pimenta (DAE /CEA /INPE)

INPE  
São José dos Campos  
2011

“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria, e o homem que  
adquire conhecimento”  
Bíblia Sagrada- Provérbios 3:13

**Dedico este trabalho a duas pessoas Mércio e Ednil, que em nenhum momento mediram esforços para realização dos meus sonhos, me ensinaram a fazer as melhores escolhas, me mostraram que o amor a Deus, a honestidade e o respeito são essenciais à vida, e que devemos sempre lutar pelo que queremos. Tenho muito orgulho por chamá-los de pai e mãe.**

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por tudo e por todas as oportunidades que tem colocado em meu caminho.

Ao Dr. Alexandre Alvares Pimenta, pela orientação e dedicação e por ter acreditado em minha capacidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento e Pesquisa, CNPq, pelo suporte financeiro e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE.

As amigas Vânia e Danielle que me ajudam com os programas (IDL, Origin e afins) e com dicas teóricas do meu trabalho. E aos colegas do Laser pelo suporte em todas as horas.

A minha família, e em especial minha amada avó Albertina que sempre me apoiou e me fez acreditar, que com fé e luta os sonhos se tornam possíveis.

Aos meus amigos de faculdade que são muito queridos e estão sempre me ajudando e dando apoio pra seguir frente ressaltando o companheirismo de todos.

## RESUMO

Neste trabalho apresentamos medidas simultâneas de estruturas ondulatórias ou distúrbios ionosféricos propagantes denominados DBS (Dark Band Structures), Brightness Waves (BW) e bolhas de plasma, utilizando como instrumento principal um imageador “all-sky” instalado em Cachoeira Paulista (22.7°S, 45°O). O fenômeno conhecido como “Dark Band Structures” (DBS) trata-se de uma instabilidade de plasma ionosférico, onde o plasma da camada F é empurrado para alturas superiores, causando a redução na intensidade da emissão OI 630nm. Em imagens “all-sky”, as DBS se manifestam como de onda atravessando o campo de visão do imageador, propagando-se de sudeste para noroeste, passando pelo zênite por volta das 24h (hora local). Neste trabalho, mostramos que existe uma forte tendência de ocorrência dessas estruturas durante período de atividade solar baixa, e que tais eventos não estão relacionados com a atividade geomagnética, pois foram observadas durante períodos calmos. O fenômeno conhecido como Bolhas de Plasma tem origem na ionosfera equatorial. O mesmo ocorre sempre no período da noite, e tem tendência de se alinhar de norte a sul propagando-se para o leste quando observada pelo imageador. As bolhas de plasma ocorrem na faixa da ionosfera, acima de 200 km. Estas têm a propriedade de interferir na propagação de ondas de Rádio-Frequência (RF). Para detectá-la podemos usar, por exemplo, ionossonda (radio) e também o imageador all-sky (ótico). Foi feito um estudo adicional sobre outro fenômeno, conhecido como Brightness Waves (BW) no setor brasileiro, a partir de imagens coletadas no ano de 1987 (atividade solar mínima). As BW tratam-se de uma anomalia na temperatura da termosfera na região tropical, e é decorrente de uma interação não linear entre modos de marés que causam um aumento de temperatura em torno da meia noite. Esse aumento de temperatura causa um gradiente de pressão que modifica os ventos meridionais, os quais, normalmente sopram em direção ao equador. Resultados obtidos através da análise dos referidos fenômenos são apresentados.

## SUMÁRIO

Introdução.....	1
CAPÍTULO 2 .....	2
Instrumentação.....	2
<b>2.1- Imageador All-Sky</b> .....	2
<b>2.2- Ionossonda</b> .....	3
CAPÍTULO 3 .....	6
Luminescência atmosférica na região F .....	6
<b>3.1- Ionosfera</b> .....	6
<b>3.2- Luminescência Atmosférica</b> .....	7
<b>3.3- OI 6300</b> .....	7
CAPÍTULO 4 .....	9
Irregularidades Ionosféricas .....	9
<b>4.1- Aspectos gerais</b> .....	9
<b>4.2- DBS (Dark Band Structures)</b> .....	9
<b>4.3- Brightness Waves</b> .....	11
<b>4.4- Bolhas de Plasma</b> .....	13
CONCLUSÕES .....	15
BIBLIOGRAFIA .....	16

# CAPÍTULO 1

## Introdução

O estudo das irregularidades ionosféricas é muito importante para se entender os processos dinâmicos da alta Atmosfera e Ionosfera. Neste trabalho apresentamos medidas simultâneas de estruturas ondulatórias ou distúrbios ionosféricos propagantes denominados DBS (Dark Band Structures), BW (Brightness Waves) e Bolhas de Plasma. Para DBS as imagens mostram eventualmente frentes de onda atravessando o campo de visão do imageador, propagando-se de sudeste para noroeste, passando pelo zênite por volta das 24h (hora local). Este fenômeno trata-se de uma instabilidade de plasma ionosférico, onde o plasma da camada F é empurrado para alturas superiores, causando a redução na intensidade da emissão OI 630nm. Mostramos que existe uma forte tendência de ocorrência dessas estruturas durante período de atividade solar baixa, esses eventos não estão relacionados com a atividade geomagnética, pois foram observadas durante períodos calmos.

Foram analisadas as imagens com presença de Brightness Waves no setor brasileiro (Cachoeira Paulista – SP) coletadas no ano de 1987 (atividade solar mínima). Este fenômeno trata-se de uma anomalia na temperatura da termosfera na região tropical, e é decorrente de uma interação não linear entre modos de marés que causam um aumento de temperatura em torno da meia noite. Esse aumento de temperatura causa um gradiente de pressão que modifica os ventos meridionais, que normalmente sopram em direção ao equador.

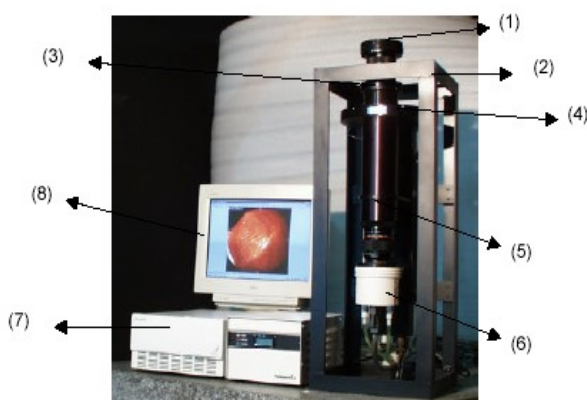
Já as Bolhas de Plasma têm origem na ionosfera equatorial. O fenômeno ocorre sempre no período da noite, têm tendência de se alinhar de norte a sul propagando-se para leste. As bolhas de plasma ocorrem na faixa da ionosfera, acima de 200 km. Estas têm a propriedade de interferir na propagação de ondas de RF. Para detectá-la podemos usar, por exemplo, ionossonda (radio) e também o imageador all-sky (ótico). Com imagens obtidas pelo Imageador All-Sky localizado em Cachoeira Paulista (22.7 S, 45.0 W), apresentamos os resultados obtidos.

## CAPÍTULO 2

### Instrumentação

#### 2.1- Imageador All-Sky

O imageador "All-Sky" é um instrumento óptico utilizado para fazer medidas de luminescência atmosférica em diversos comprimentos de onda. Ele é formado por uma lente tipo all-sky que fornece um campo de visão de aproximadamente 180°, esse tipo de lente introduz efeitos de compressão e curvatura da imagem, conforme se aproxima das bordas da mesma. Uma roda de filtros que possui cinco filtros que giram automaticamente, sendo que cada um se destina a uma emissão, é gerenciada pelo programa de aquisição de dados. O sistema telecêntrico de lentes torna os feixes perpendiculares à roda de filtro, evitando, assim, o deslocamento na linha de emissão selecionada, o sistema telecêntrico que direciona a luz monocromática para a câmara CCD (matriz de células fotossensíveis) que reproduz as imagens do céu, além disso, todo o processo de captação das imagens é controlado por um microcomputador.



**Figura 1- Imageador CCD all-sky sendo: (1) lente do tipo all-sky; (2) rack; (3) sistema telecêntrico de lentes; (4) roda de filtros de interferência ótica; (5) sistema de reconstrução da imagem; (6) câmara CCD; (7) sistema de refrigeração da câmara CCD e (8) microcomputador.**

FONTE: Santana (2000).

O imageador CCD All-sky necessita de céu claro para operar. Com isso, seu período de observação é de aproximadamente 13 dias por mês, durante o período das luas nova e minguante. Se as condições meteorológicas não forem boas neste período, o imageador não opera. Seu campo de cobertura corresponde ao setor sudeste e parte do setor sul brasileiro e também a uma área equivalente sobre oceano atlântico.



Exemplo de imagens obtidas pelo Imageador All-Sky:

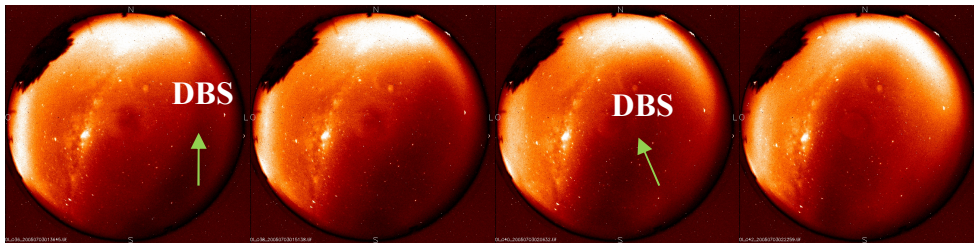


Figura 2- Imagens All-Sky obtida através da emissão OI 630 nm no dia 03 de julho de 2007, das 01h36min às 02h22min. Nesta imagem, a DBS entra pelo sudeste e atravessa o campo de visão do imageador seguindo para noroeste.

## 2.2- Ionossonda

É um dos instrumentos mais representativos para a medida de parâmetros ionosféricos. Trata-se de um equipamento de rádio sondagem com um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética de frequência variável, uma vez o sinal emitido na vertical é refletido pela ionosfera e em função do tempo decorrido entre transmissão e recepção do pulso e resultam em ionogramas. Nas ionossondas analógicas o registro é feito em filmes fotográficos, enquanto que nas ionossondas digitais (digissondas) o registro é feito digitalmente, geralmente em intervalos de 15 min. A figura a seguir mostra um exemplo de ionograma do dia 03 de julho de 2005 às 02h00min LT.

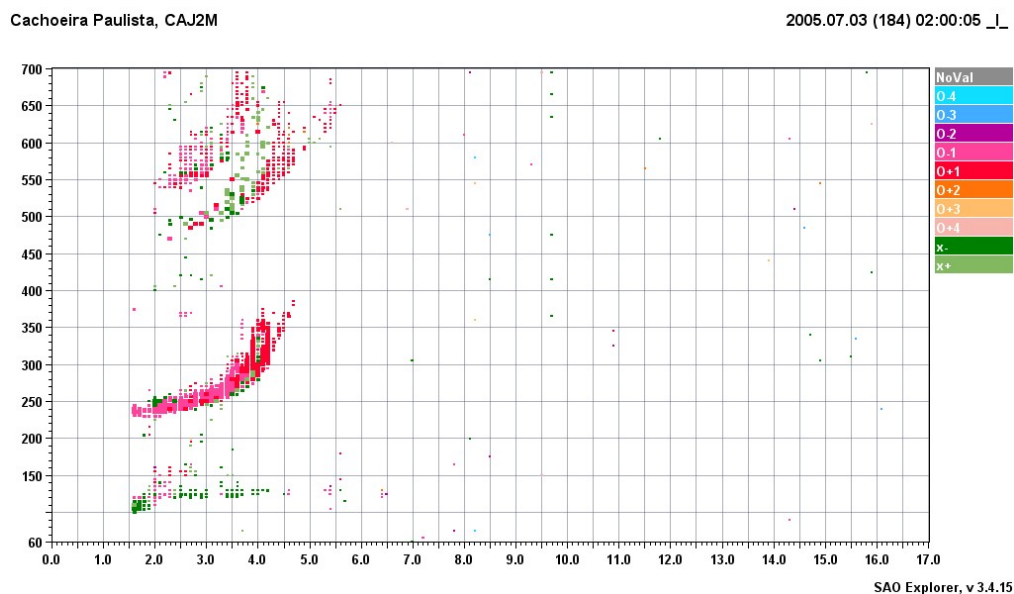
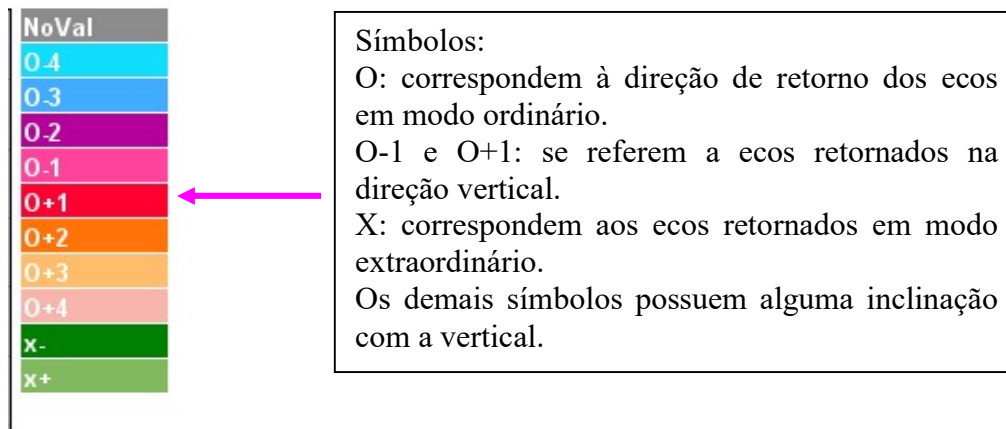


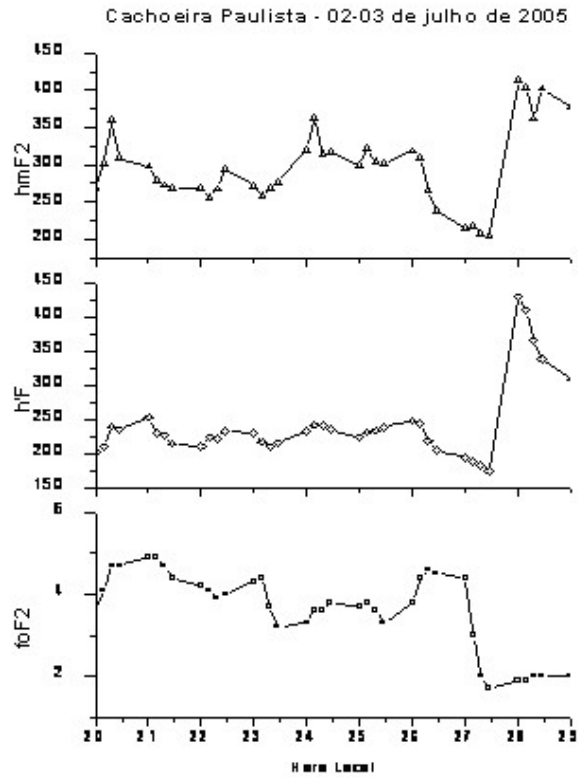
Figura 3- Ionograma obtido em Cachoeira Paulista no dia 03/07/2005 às 02:00:05 LT.



**Figura 4-Código de cores de um ionograma.**

A partir desses ionogramas se podem detectar as irregularidades ionosféricas (Bolhas de Plasma) que começam a surgir a partir dos 250 km de altitude até aproximadamente 1.500 km. Então a ionossonda emite pulsos eletromagnéticos com frequência a partir de 500 kHz até 30 MHz sendo que esses pulsos se propagam para cima sendo refletidos pela densidade de íons que se encontra na alta atmosfera. No tempo de ida e volta desses pulsos é que se elaboram os ionogramas. E essas irregularidades (Bolhas de Plasma) são detectadas devido a espalhamentos de traço na região F.

Através destes ionogramas obtidos, inferimos alguns parâmetros ionosféricos tais como, a altura virtual da base da ionosfera ( $h'f$ ), altura do pico da ionosfera ( $hmF2$ ) e a densidade de plasma (ou elétrons) na altura do pico da ionosfera  $foF2$ . Como mostra a figura a seguir.



**Figura 5-** Gráfico representando a altura de pico da camada ionosférica do dia 02-03 de julho 2005 após ter analisado ionograma coletado pela ionossonda instalada em Cachoeira Paulista – SP.

## CAPÍTULO 3

### Luminescência atmosférica na região F

#### 3.1- Ionosfera

Os primeiros estudos diretos da ionosfera foram realizados através de ondas de rádio. A formação da ionosfera é essencialmente governada pela ação da radiação solar sobre os constituintes atmosféricos, através de processos como a foto ionização. Partículas de alta energia também podem penetrar na atmosfera promovendo a ionização de seus constituintes, embora este processo seja típico de regiões de altas latitudes. A Ionosfera está situada a uma altura de  $\approx 60$  km até  $\approx 1000$  km. De acordo com sua variação com a altura divide-se a ionosfera em diversas regiões, estas variam conforme a hora do dia, estações do ano e condições solares.

As camadas iônicas da ionosfera são: D; E; F; F<sub>2</sub>;

**Região D:** parte inferior da ionosfera, até 80 km, como a densidade atmosférica é maior nesta região as colisões entre elétrons, íons e partículas neutras são relativamente freqüentes, causando atenuações nos sinais de rádio que interagem com a ionosfera. Quando há radiação solar a camada D desaparece.

**Região E:** Sua altitude média é entre os 80 e 130 km, é uma região importante, pois é onde se desenvolvem as correntes elétricas ionosféricas. A região E está presente durante o dia e à noite, sua concentração diminui sensivelmente.

**Região F:** engloba regiões F<sub>1</sub>; F<sub>2</sub> e a recém descoberta F<sub>3</sub>.

A região F<sub>1</sub> é formada pela ionização do oxigênio atômico O pelos raios EUV (extremo ultravioleta), o que produz elétrons livres e O<sup>+</sup>. Sua concentração de elétrons depende do ângulo zenital do sol e da atividade solar.

A região F<sub>2</sub> também é composta, principalmente, de elétrons livres e O<sup>+</sup>. Sua concentração de elétrons varia com a atividade solar. Durante o dia, apresenta os maiores valores de concentração de elétrons livres. Durante a noite, a concentração sofre uma diminuição, mas a camada não desaparece. E o presente estudo se concentra nessa região.

A figura a seguir mostra as regiões ionosféricas em função da densidade eletrônica.

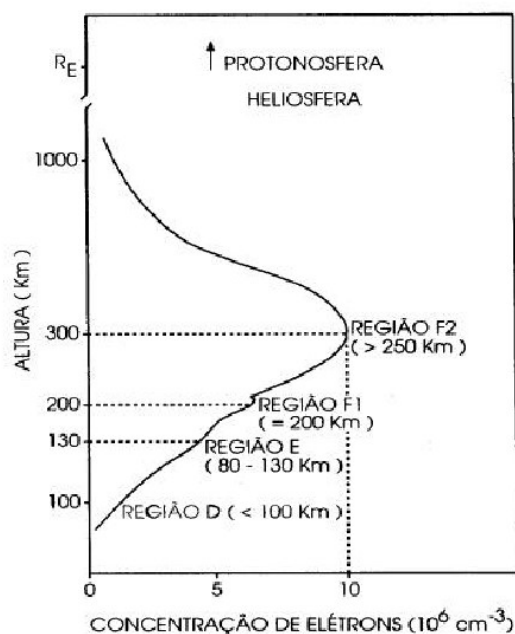


Figura 6- Nomenclatura e localização das camadas ionosféricas.

FONTE: Kirchhoff (1991, p.77)

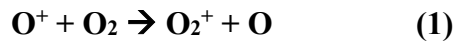
### 3.2- Luminescência Atmosférica

Na atmosfera noturna, íons e elétrons se recombinam formando átomos neutros que, sendo excitados, liberam energia na forma de fótons. Esse fenômeno é conhecido como luminescência atmosférica. As emissões noturnas na região F da ionosfera mais estudadas são: OI 630 nm; OI 557,7 nm e OI 777,4 nm. Em torno de aproximadamente 250 km de altura ocorre a emissão do oxigênio atômico em um comprimento de onda de 6300Å gerando uma luz vermelha. Sua unidade e medida são dadas em Rayleigh (106 fótons por centímetro quadrado de coluna por segundo) e comprimento de onda (da ordem de Ângstrons Å).

Neste estudo serão analisadas emissões de OI 630 nm.

### 3.3- OI 6300

Na região de baixa latitude, a recombinação dissociativa do  $O_2^+$  elétrons na região F é um processo dominante para a produção de átomos de oxigênio excitados, os quais ao decaírem para o estado fundamental liberam o excesso de energia na forma de radiação eletromagnética. O oxigênio atômico se origina na recombinação dissociativa do íon  $O_2^+$  com elétrons livres da região F. As equações a seguir representam as reações químicas que geram a emissão OI 630 nm na região F:



Onde,

$\text{O}_2$  = oxigênio molecular

$\text{O}_2^+$  = íon do oxigênio molecular;

$\text{O}^*$  = átomo de oxigênio excitado;

$e$  = elétron ;

$h$  = energia do fóton;

Trata-se de uma luz vermelha, gerada em uma camada de aproximadamente 50 km de espessura na termosfera a uma altura de aproximadamente 250 km. O pico da emissão OI630 nm ocorre na parte inferior da região F, em torno de 220-300 km.

## CAPÍTULO 4

### Irregularidades Ionosféricas

#### 4.1- Aspectos gerais

As irregularidades de plasma de grande escala da região F equatorial se manifestam como depleções na densidade do plasma devido às instabilidades na base na ionosfera. Tais irregularidades podem interferir na propagação de sinais de radio empregados nas telecomunicações bem como nos sinais empregados em sistemas de navegação e posicionamento, como os GPS. Onde há ocorrência dessas irregularidades é na ionosfera tropical logo depois do pôr-do-sol, quando sob a intensificação de campos elétricos zonais a camada ionosférica se eleva rapidamente na direção vertical dando origem a gradientes abruptos de densidade na base da camada, que através disso originam-se as irregularidades.

#### 4.2- DBS (Dark Band Structures)

O fenômeno das Dark Band Structures (DBS) trata-se de uma instabilidade de plasma ionosférico, onde o plasma da camada F é empurrado para alturas superiores, causando a redução na intensidade da emissão OI 630nm. A instabilidade de plasma Perkins pode estar envolvida na formação das estruturas DBS. A mais notável característica dessas estruturas relatadas aqui é sua tendência de alinhar-se de noroeste para sudeste. Perkins, (1973), criou um modelo para estudar uma possível instabilidade da ionosfera em média latitude, [veja Perkins (1973), Kelley and Miller, (1997); Hamza, (1999); Garcia et al., (2000), para a teoria da instabilidade Perkins].

Com imagens obtidas pelo imageador All-Sky, na linha de emissão OI 630nm, observou-se a propagação de bandas escuras, as quais foram denominadas DBS (Dark Band Structures). A figura 07 ilustra o fenômeno observado na noite de 03 de julho de 2005 das 01:12:51 às 02:37:52 hora local, com um imageador All-Sky localizado em Cachoeira Paulista.

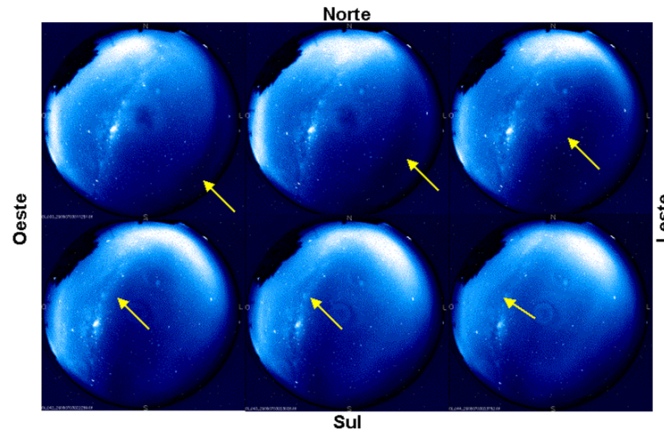


Figura 7- Imagens de emissão OI 630 nm obtidas nos dias 02-03 de julho de 2005, das 01:12:51 às 02:37:52, atravessando o campo de visão do imageador.

O gráfico a seguir mostra a ocorrência de DBS por noites entre os anos de 2005 a 2009 observados pelo imageador de Cachoeira Paulista-SP analisados.

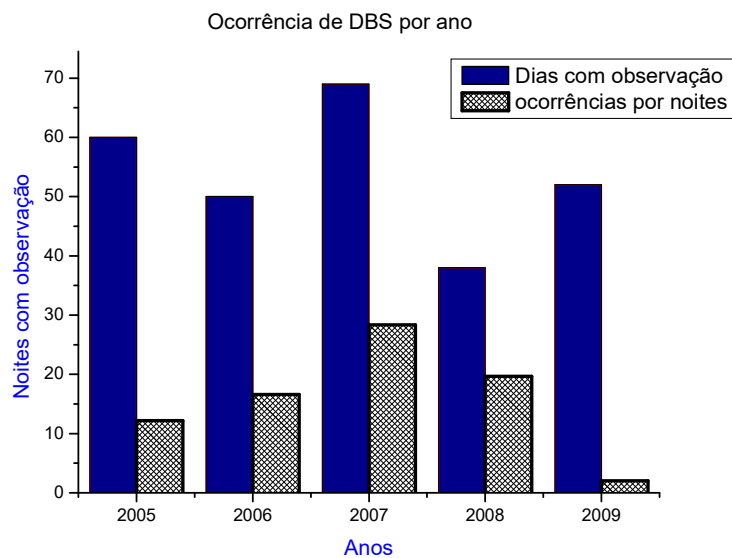


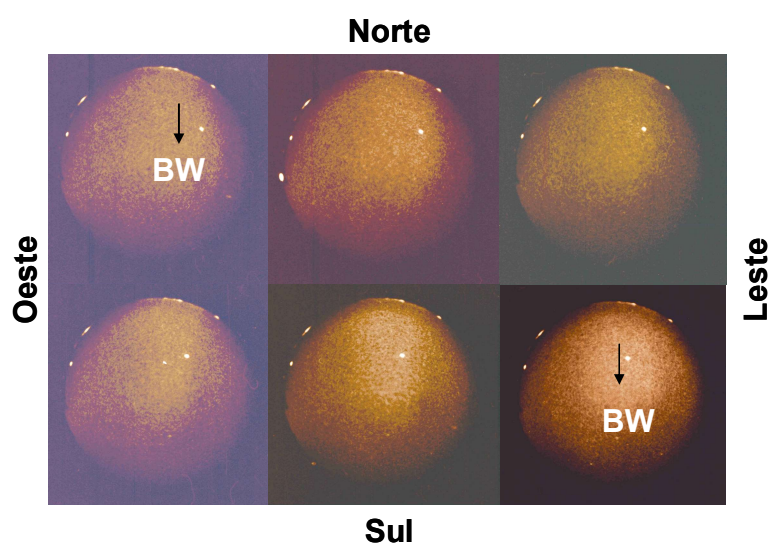
Figura 8- Ocorrência de DBS por noites entre os anos de 2005 a 2009 observados pelo imageador de Cachoeira Paulista-SP.

A mais notável característica das DBS é sua tendência de se alinhar de nordeste a sudoeste, propagando-se para o noroeste. Outra característica importante é que a maior ocorrência do fenômeno se dá em períodos de atividade solar mínima, atividade solar ascendente e descendente, sendo que, em períodos de máxima atividade solar não há registros da ocorrência do fenômeno. Isso implica que a ocorrência das DBS não se deve a condições de distúrbios geomagnéticos.



### 4.3- Brightness Waves

É uma anomalia na temperatura da termosfera na região tropical, e é decorrente de uma interação não linear entre modos de marés que causam um aumento de temperatura em torno da meia noite. Esse aumento de temperatura causa um gradiente de pressão que modifica os ventos meridionais, que normalmente sopram em direção ao equador. Devido a essa anomalia na temperatura termosférica, ocorre uma inversão dos ventos, deslocam do equador para os pólos. Devido à inversão dos ventos, o plasma ionosférico se desloca para baixo ao longo das linhas de campo magnético, caracterizando-se por aumentos na emissão OI 630 nm, que pode ser vistos através de medidas de airglow. Com imagens obtidas pelo imageador All-Sky, na linha de emissão OI 630 nm, observou-se a propagação de bandas claras, as quais foram denominadas BW (Brightness Waves). A figura a seguir ilustra o evento na noite de 28 de agosto de 1987 das 01h00min às 02h40min h em Cachoeira Paulista –SP.



**Figura 9- Sequência de imagens obtidas pelo fotômetro na noite de 28 de agosto de 1987. Nesta imagem, a BW (Brightness Waves) atravessa o campo de visão do imageador.**

O gráfico na Figura 10 mostra um aumento na intensidade da emissão OI 630 nm, detectado com um fotômetro instalado no mesmo sítio. Esse aumento na intensidade da emissão é devido à passagem da banda clara por volta das 01h00minh às 02h40minh na noite de 28 de agosto de 1987. Índices de atividade geomagnética mostram que, neste período, ocorreu uma tempestade magnética muito forte.

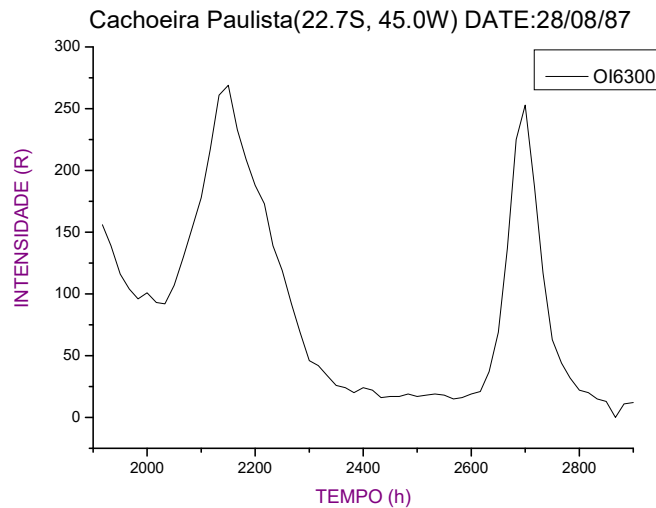


Figura 10- O gráfico, obtido com dados de fotômetro, ilustra um aumento na intensidade da emissão OI 630 nm devido à passagem da BW (Brightness Waves).

O Gráfico a seguir mostra a ocorrência das BW para cada mês no ano de 1987 (período de atividade solar mínima) analisados:

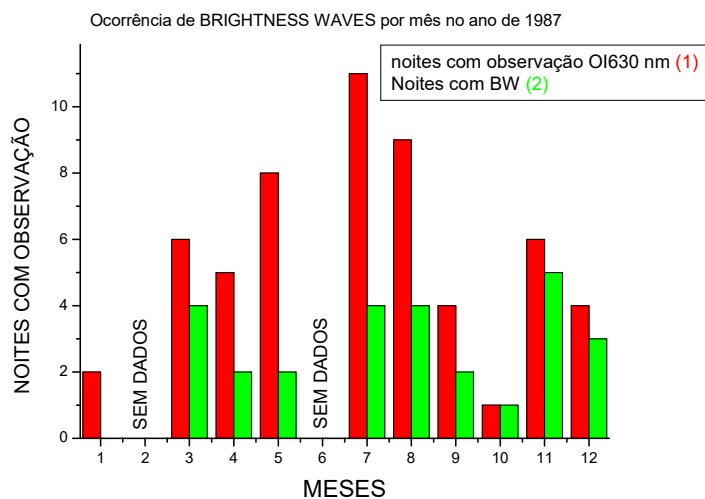
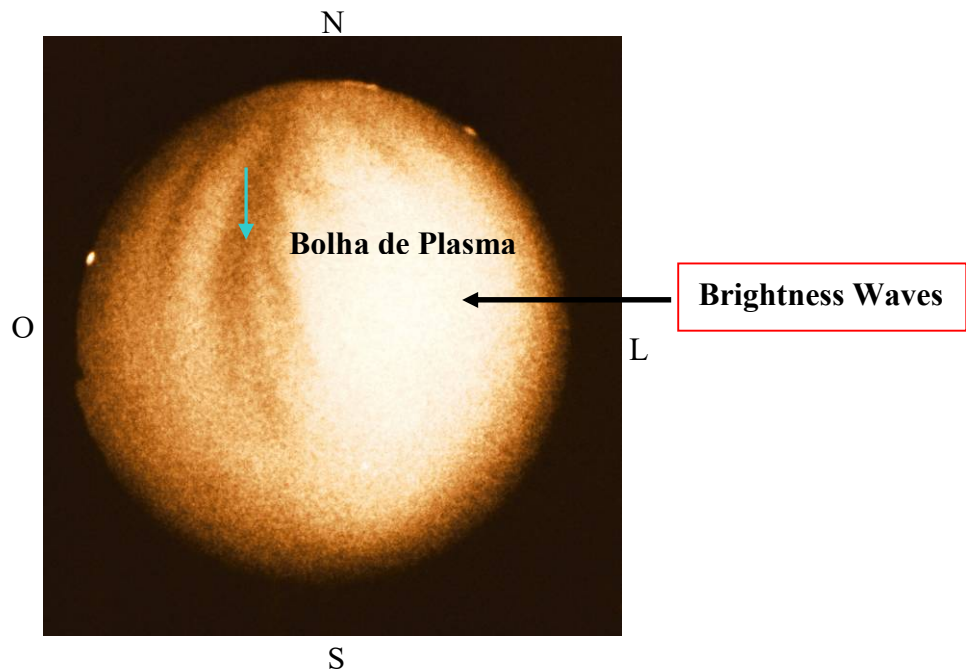


Figura 11- O Gráfico ilustra a ocorrência das BW para cada mês no ano de 1987.

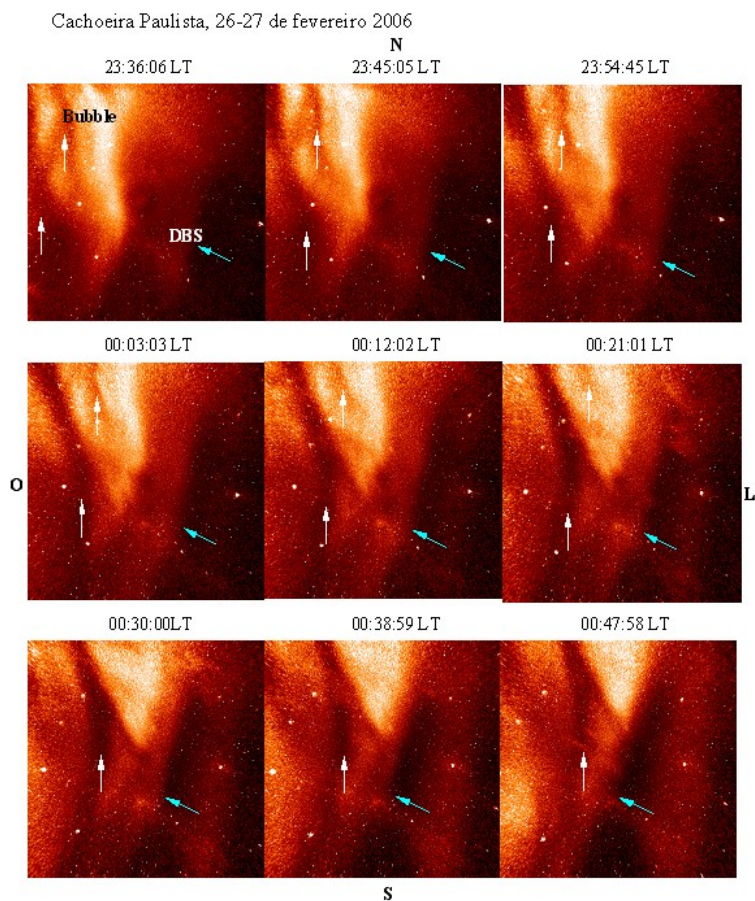
#### 4.4- Bolhas de Plasma

Dentre os fenômenos observados na ionosfera terrestre estão as irregularidades de plasma de grande escala originárias da região equatorial, denominadas Bolhas de Plasma. O fenômeno ocorre sempre no período da noite, têm tendência de se alinhar de norte a sul propagando-se para o leste quando observada pelo imageador. As bolhas de plasma ocorrem na faixa da ionosfera, acima de 350 km de altitude e, portanto, podem ser detectadas através de medições da emissão OI 630 nm. As bolhas podem atingir mais de 2.000 km de altitude. Estas têm a propriedade de interferir na propagação de ondas de RF. Para o estudo das bolhas de plasma temos, por exemplo, a ionossonda (radio) e também o imageador all-sky (ótico). A forma de análises por imageamento é bastante significativa, pois possibilita observar grandes áreas horizontais, uma vez que o imageador tem um campo de visão de 180° na emissão OI630 nm, o que corresponde a aproximadamente 350 km de altura. A figura a seguir mostra a Bolha de Plasma atravessando o campo de visão do imageador All-Sky na linha de emissão OI 630 nm no dia 30/02/1987 às 00h10min hora local e também se observou a propagação de bandas claras (Brightness Waves).



**Figura 12- Bolha de Plasma atravessando o campo de visão do imageador na linha de emissão OI 630 nm no dia 30/02/1987 às 00h10min hora local.**

A Figura 13 ilustra imagens obtidas pelo imageador, localizado em Cachoeira Paulista – SP (22.7S, 45.0W), com os dois fenômenos acontecendo simultaneamente na mesma noite.



**Figura 13- Bolha de Plasma e DBS atravessando o campo de visão do imageador All-Sky na linha de emissão OI 630 nm no dia 27/02/2006 das 00:03:03 às 00:47:58 hora local.**

## CONCLUSÕES

Foram analisadas imagens obtidas pelo imageador all-sky na emissão OI630 nm localizado em Cachoeira Paulista. Com base nos resultados, apresentamos as principais características dessas irregularidades ionosféricas:

**DBS** – Têm tendência de se alinhar do nordeste a sudoeste, propagando-se para o noroeste a uma altitude de aproximadamente 300 km. Tal fenômeno não está relacionado a distúrbios geomagnéticos e ocorre, preferencialmente, em períodos de atividade solar mínima e atividade solar ascendente e descendente.

**BW** – Tratam-se de uma anomalia na temperatura da termosfera que se origina na região tropical, e é decorrente de uma interação não linear entre ondas de marés que causam um aumento de temperatura em torno da meia noite. As BW têm tendência de se propagar do norte a sul, a uma altitude de aproximadamente 300 km e estão relacionadas a distúrbios geomagnéticos.

**Bolhas de Plasma** – Têm tendência de se alinhar de norte a sul, propagando-se para o leste. As mesmas têm a propriedade de interferir na propagação de ondas de RF.

## BIBLIOGRAFIA

Amorim, D.C.M. CARACTERIZAÇÃO DE DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS PROPAGANTES NA REGIÃO DE BAIXAS LATITUDES NO SETOR BRASILEIRO ASSOCIADOS À INSTABILIDADE DE PLASMA PERKINS GERADA EM MÉDIAS LATITUDES. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Colérico, M., et al. COORDINATED MEASUREMENTS OF F REGION DYNAMICS RELATED TO THE THERMOSPHERIC MIDNIGHT TEMPERATURE MAXIMUM. *Journal of geophysical research*, Vol 101, NO. a 12, Pages 26, 783-26, 793, December 1, 1996.

F. J. Garcia. M. C. Kelley, and J. J. Makela. AIRGLOW OBSERVATIONS OF MESOSCALE LOW-VELOCITY TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES AT MIDLATITUDES. *Journal of geophysical research*, Vol. 105, NO. A8, Pages 18, 407-18, 415, August 1, 2000.

Kirchhoff, V.W.J.H. INTRODUÇÃO À GEOFÍSICA ESPACIAL. São Paulo: Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP, 1991. 152p.

Pimenta, A.A. ESTUDO DA DERIVA ZONAL E DINÂMICA DAS BOLHAS DE PLASMA NA REGIÃO TROPICAL. 2003. 194p. (INPE-9546-TDI/827). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2002.

Pimenta, A.A., Fagundes, P.R., Bittencourt, J.A., Sahai, Y., Gobbi, D., Medeiros, A.F., Taylor, M.J., Takahashi, I. IONOSPHERIC PLASMA BUBBLE ZONAL DRIFT: A METHODOLOGY USING OI630 NM ALL-SKY IMAGING SYSTEMS. *Adv. Space Res.* Vol. 27, n 6-7, p. 1219-1224, 2001.