



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-12996-PRE/8273

**ESTUDO DA DINÂMICA DAS BOLHAS DE PLASMA NO SETOR
TROPICAL BRASILEIRO**

Fernanda Tortosa Fernandes*

*Bolsista UFSM

Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE), orientado pelo
Dr. Alexandre Alvares Pimenta

INPE
São José dos Campos
2005



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO DA DINÂMICA DAS BOLHAS DE PLASMA NO SETOR TROPICAL BRASILEIRO

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

Fernanda Tortosa Fernandes (FACAP, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: fernanda@laser.inpe.br

Dr. Alexandre Alvares Pimenta (DAE/CEA/INPE, Orientador)
E-mail: pimenta@laser.inpe.br

Junho de 2005

"Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável (...) para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do Espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer."

ALBERT EINSTEIN

*Aos meus pais,
Luis Fernando Fernandes e
Vera Lucia Tortosa Fernandes.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me apoiaram e me ajudaram a vencer mais esta etapa da minha vida.

Ao orientador Dr. Alexandre Alvares Pimenta pelos conhecimentos compartilhados, pela orientação e apoio na realização deste projeto e por acreditar na minha capacidade de fazê-lo.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico) pelo auxílio financeiro de um ano de bolsa.

Ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) pela oportunidade e utilização de suas instalações.

Aos funcionários do laboratório LASER pelo acolhimento e companheirismo ao longo deste ano.

Aos professores e amigos da FACAP (Faculdade de Ciências Aplicadas) pelo apoio, pelo companheirismo e pelos conhecimentos compartilhados que foram muito úteis e aproveitados na realização deste projeto.

Aos meus pais Vera Lucia Tortosa Fernandes e Luis Fernando Fernandes, meu namorado William Schlickmann e a toda minha família pelo amor, carinho, compreensão e apoio que foram fundamentais para a realização deste projeto que antes era um sonho: trabalhar na área de Exatas utilizando o que eu sempre quis e gosto de estudar: Física.

A todos, muito obrigada!

RESUMO

Neste trabalho analisamos um ano de dados da emissão do oxigênio atômico (linha OI 630 nm) obtidos com um imageador “all-sky”, instalado em São João do Cariri, durante o período de setembro de 2000 a outubro de 2001, com a finalidade de estudar o comportamento dinâmico e sazonal das bolhas de plasma durante períodos de atividade solar alta na região tropical brasileira. O estudo estatístico mostrou que a frequência de ocorrência das bolhas de plasma é muito baixa entre os meses de maio a agosto e bastante elevada durante os meses de outubro a março. O estudo da velocidade zonal das bolhas na região tropical mostraram que a deriva zonal das bolhas de plasma durante a noite é para leste, sendo alta no início da noite (20:00 h as 22:00 h) e, após a meia noite, a velocidade diminui lentamente. Uma outra característica observada na velocidade zonal das bolhas é uma acentuada variação latitudinal, entre 20:00 e 23:00 horas, sendo que este comportamento está relacionado com o comportamento latitudinal do vento zonal termosférico.

ZONAL DRIFTS AND DYNAMICAL STUDY OF THE PLASMA BUBBLES OVER THE TROPICAL REGION

ABSTRACT

The large scales ionospheric irregularities (plasma bubbles) are regions where the plasma densities are much less than the ambient plasma densities and are initially generated in the bottomside of the equatorial F-region. All-sky airglow OI 630 nm images obtained at São João do Cariri (7.39°S, 36.5° O) in the period from September 2000 to October 2001 were analyzed to study the seasonal and dynamic behavior of plasma bubbles during high solar activity. The statistics shows that the occurrence frequency of plasma bubbles is very low during the period May-August and maximizes during October-March during high solar activity period. The ionospheric plasma zonal drift velocities in the tropical region, for the period analyzed, show a high eastward velocity during 20:00-22:00 local time and, after midnight, the velocities decrease. Another characteristic observed is a significant latitudinal variation in the ionospheric plasma zonal drift velocities in the tropical region between 20:00-22:00 local time, which may be related to the ionospheric equatorial anomaly and the zonal neutral wind.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	15
LISTA DE SÍMBOLOS.....	17
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	19
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	21
1.1 - Considerações gerais sobre Bolhas de Plasma na região F da Ionosfera Tropical ...	21
1.2 – Observações de Bolhas de Plasma.....	22
1.2.1 – Detecção de Irregularidades de Plasma através de Radares VHF.....	22
1.2.2 – Detecção de Irregularidades de Plasma através do Sistema GPS.....	23
1.2.3 – Detecção de Bolhas de Plasma através de Foguete.....	24
1.2.4 – Observações de Irregularidades Ionosféricas através de Luminescência Atmosférica.....	25
1.2.5 – Observações de Bolhas de Plasma através de Luminescência Atmosférica.....	26
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA DA REGIÃO F.....	29
2.1 – As Principais Emissões de Luminescência Atmosférica da Região F.....	29
2.2 – A Linha Vermelha OI 630,0 nm.....	31
2.2.1 – O Mecanismo de Recombinação Dissociativa.....	32
2.2.2 – A Taxa de Emissão Volumétrica Integrada do OI 630,0 nm.....	34
CAPÍTULO 3 – IRREGULARIDADES DE PLASMA NA REGIÃO F.....	37
3.1 – Teoria Linear das Bolhas de Plasma.....	37
3.1.1 – O Mecanismo de Instabilidade Rayleigh-Taylor.....	37
CAPÍTULO 4 – INSTRUMENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS.....	39
4.1 – O Imageador “All-Sky”.....	39
4.2 – Processo de Linearização das Imagens obtidas com o Imageador “All-Sky”.....	44
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
5.1 – Comportamento Sazonal das Bolhas de Plasma na Região Equatorial.....	49
5.2 – A Deriva Zonal das Bolhas de Plasma.....	54
5.2.1 – A Deriva Zonal das Bolhas de Plasma na Região Tropical durante o período de Atividade Solar Alta e Atividade Geomagnética Calma.....	54
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

LISTA DE FIGURAS

1.1 - Mapas do sinal retroespalhado (Radar de Jicamarca) como função da altura e tempo, mostrando irregularidades no plasma da região F.....	23
1.2 - (a) Sinal do GPS sem flutuações, indicando a não ocorrência de irregularidades no plasma ionosférico. (b) Flutuações no sinal devido à ocorrência de irregularidades no campo de visada transmissor-receptor do sistema GPS.....	24
1.3 - Perfil de densidade eletrônica obtido com foguete.....	25
1.4 - (a) Ionograma ilustrando um sinal sem espalhamento (não há ESF-“Equatorial Spread F”). (b) Espalhamento do sinal no ionograma devido à ocorrência de bolhas de plasma.....	26
1.5 - Variação temporal na intensidade da emissão OI 630,0 nm durante a noite de 10/01/2000.....	27
1.6 - Imagem obtida através da emissão OI 630,0 nm em São João do Cariri, mostrando bolhas de plasma sobre o campo de visão do imageador “All-Sky”.....	28
2.1 - Espectro de luminescência atmosférica em torno da linha OI 777,4nm.....	31
3.1 - Esquema mostrando o crescimento de uma irregularidade no plasma da ionosfera equatorial, análogo à instabilidade Rayleigh-Taylor da hidrodinâmica. Uma pequena perturbação inicial na fronteira entre duas regiões com diferentes densidades, onde a região menos densa é deslocada para cima, gera uma perturbação de maior escala que tende a crescer.....	38
4.1 - Imageador “All-Sky” com câmara fotográfica.....	40
4.2 - Diagrama em blocos do imageador “All-Sky” com câmara CCD.....	42
4.3 - Fotografia do imageador “All-Sky” com câmara CCD onde: (1) rack; (2) lente tipo “all-sky ”; (3) sistema telecêntrico de lentes; (4) roda de filtros de interferência; (5) sistema ótico de reconstrução de imagens; (6) controle de foco; (7) câmara CCD; (8) sistema de refrigeração da câmara CCD; (9) controladora da CCD; (10) microcomputador.....	43
4.4 - Campo de visão do imageador “all-sky ”, mostrando uma imagem obtida através da emissão OI 630,0 nm, supondo a altura da camada de emissão em torno de 250 km.....	44
4.5 - Imagem original obtida através da emissão OI 630,0 nm no dia 02/11/1999, às 23:19:56 LT e as suas respectivas imagens linearizadas para quatro diferentes áreas de projeção.....	47
5.1 - Estatística da frequência de ocorrência de bolhas de plasma na região equatorial após o pôr-do-sol para o período de 09/2000 a 08/2001 (entre 18 e 21LT). (a) Horas de observação da emissão OI 630 nm e (b) frequência de ocorrência de bolhas de plasma. Somente noites com atividade geomagnética relativamente calma ($-30nT \leq Dst \leq 10nT$) foram selecionadas.....	50
5.2 - Variação anual do horário do pôr-do-sol nas regiões E magneticamente conjugadas, localizadas ao norte e ao sul de Fortaleza. O histograma representa a deriva vertical máxima do pico pré-reversão.....	52
5.3 - Médias mensais de deriva vertical na região F sobre Fortaleza, com velocidades obtidas através da relação $\Delta h'F/\Delta t$ usando ionogramas.....	53
5.4 - Comportamento médio da velocidade zonal das bolhas de plasma, para o período de verão na região tropical, durante o período de atividade solar alta.....	56

LISTA DE TABELAS

2.1 - Principais emissões da luminescência atmosférica noturna na região F.....	30
4.1 - Características dos filtros e alturas médias das camadas de luminescência do oxigênio atômico.....	43

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_D - Coeficiente de radiação
- A_j - Coeficiente de transição de Einstein em um nível j
- B - Vetor campo magnético terrestre
- D/Dt - Operador derivada total ou substantiva
- d_D - Coeficiente de desativação colisional
- E - Vetor campo elétrico
- g - Vetor aceleração da gravidade
- $J_{630,0}$ - A taxa de emissão volumétrica integrada do OI 630,0 nm
- k_Q - Coeficiente de reação (quenching)
- M - Massa do íon
- n - Denota a densidade de plasma
- $n(O_2)$ - Densidade numérica do oxigênio molecular
- $n(e)$ - Densidade numérica de elétrons
- $n(N_2)$ - Densidade numérica do nitrogênio molecular
- α_D - Coeficiente de reação (produção)
- α_1 - Coeficiente na reação de recombinação dissociativa do íon O_2^+
- α_2 - Coeficiente na reação de recombinação dissociativa do íon NO^+
- $\frac{\partial}{\partial \tilde{r}}$ - Derivada parcial
- γ_1 - Coeficiente da reação de transferência de carga na produção do O_2^+
- γ_2 - Coeficiente da reação de transferência de carga na produção do NO^+
- $\varepsilon_\lambda(z)$ - Fótons emitidos por unidade de volume por segundo
- $\varepsilon_{630,0}(z)$ - Taxa de emissão volumétrica do OI 630,0 nm

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- GPS - Global Positioning System
- VHF - Very high frequency
- CCD - Couple charge device
- DN - Digital number
- Vzp - Deriva vertical de plasma

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais sobre Bolhas de Plasma na Região F da Ionosfera Tropical

As bolhas de plasma da região F tropical têm sua origem na ionosfera equatorial e constituem-se de regiões onde a densidade de plasma é drasticamente reduzida, representando um dos mais importantes fenômenos da ionosfera noturna nas regiões equatoriais e de baixas latitudes. As irregularidades ionosféricas de grande escala são normalmente denominadas bolhas de plasma. Começam a se desenvolver na base da camada F, após o pôr-do-sol, a partir de perturbações iniciais na ionização e apresentam um movimento ascendente. Possuem dimensões horizontais muito grandes, da ordem de 5.000 km ao longo das linhas de campo magnético, e podem atingir comprimentos de aproximadamente 450 km na direção perpendicular ao campo. As emissões que têm origem na região F, como por exemplo OI 630,0 nm, OI 557,7 nm e OI 777,4 nm, têm sido usadas no estudo da dinâmica e morfologia dessas irregularidades de plasma de grande escala, ou bolhas de plasma (Weber et. al. 1978; Bittencourt et al. 1997; Pimenta et al. 2003).

As técnicas comumente usadas no estudo das irregularidades no plasma da região F são: radares de espalhamento coerente e incoerente, foguetes, satélites, sistema de posicionamento global GPS (do inglês “Global Positioning System”), luminescência atmosférica e ionossondas.

Inúmeras simulações teóricas têm sido também desenvolvidas numa tentativa de explicar e reproduzir as irregularidades no plasma da região F observadas pelas técnicas citadas anteriormente (Ossakow, 1979; Basu and Kelley, 1979; Zalesak, 1982).

Os principais mecanismos de geração dessas irregularidades são os processos de instabilidade Rayleigh-Taylor (Haerendel, 1973) e a deriva \mathbf{ExB} (Reid, 1968). A forte correlação existente entre o movimento vertical da ionosfera, ao entardecer, e a

ocorrência de irregularidades ionosféricas já está bem estabelecida (Booker and Wells, 1938; Farley et al. 1970; Woodman, 1970; Bittencourt et al. 1997). Ao longo do dia, a ionosfera equatorial sofre um deslocamento para cima, devido à deriva eletromagnética **ExB**. Esse movimento vertical do plasma ionosférico na região tropical é devido ao campo elétrico (dirigido para leste) gerado pelo dínamo da região E, na presença do campo magnético (dirigido para norte). À noite, a direção do campo elétrico é invertida provocando um movimento do plasma ionosférico para baixo. Entretanto, antes da inversão, a deriva eletromagnética vertical sofre um aumento abrupto de velocidade ao entardecer, originando um máximo na velocidade de deriva, denominado pico pré-reversão, causado pelo aparecimento de campos elétricos de polarização na região F. Esses campos elétricos são produzidos por ventos termosféricos (dínamo da região F), os quais surgem devido à diminuição da condutividade da região E, imediatamente após o pôr-do-sol (Rishbeth, 1971a,b). A amplitude do pico pré-reversão e a duração do aumento abrupto da velocidade de deriva, logo após o pôr-do-sol, dependem da estação do ano e da declinação magnética, ou seja, do alinhamento relativo entre o plano meridional magnético local e a linha do terminadouro solar (Abdu et al. 1981; Tsunoda, 1985; Batista et al. 1986). Embora haja um consenso entre os pesquisadores de que a instabilidade colisional Rayleigh-Taylor (RT) é o mecanismo responsável pelo desenvolvimento das irregularidades no plasma da região F, as condições iniciais que disparam essas irregularidades ainda não estão totalmente estabelecidas.

1.2 Observações de Bolhas de Plasma

1.2.1 Detecção de Irregularidades de Plasma Através de Radares VHF

Woodman (1970), utilizando o radar de espalhamento incoerente do rádio observatório de Jicamarca (12°S, 76,9°O; dip 2°N) no Peru, mediu a velocidade de deriva vertical da ionosfera entre 260 e 550 km de altitude com resolução de 25 km, mostrando que a velocidade vertical é positiva durante o dia (para cima) e negativa (para baixo) à noite. Através dessas medidas, foi observado que antes da velocidade se tornar negativa, a mesma apresentava um máximo logo após o pôr-do-sol. Esse mesmo radar de Jicamarca

foi utilizado por Farley et al. (1970), onde eles observaram irregularidades com escalas de comprimento da ordem de 3m e relacionaram a ocorrência dessas irregularidades com a subida da camada imediatamente após o pôr-do-sol.

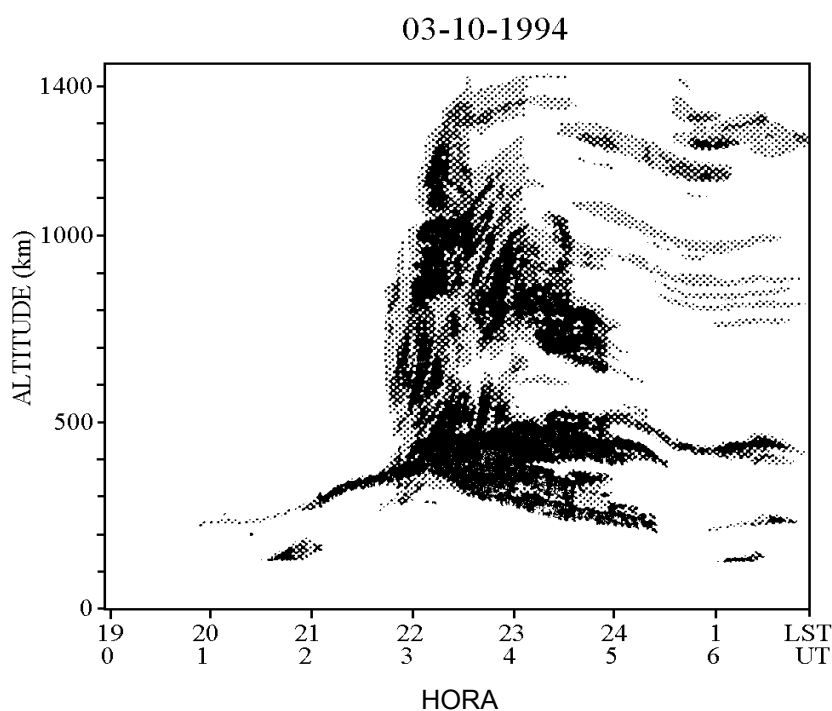


Fig. 1.1 - Mapas do sinal retroespalhado (radar de Jicamarca) como função da altura e tempo, mostrando irregularidades no plasma da região F.
FONTE: Aarons et al. (1996).

1.2.2 Detecção de Irregularidades de Plasma Através do Sistema GPS

Um experimento que tem sido usado nos últimos anos para a detecção das bolhas de plasma diz respeito ao sistema global de posicionamento, GPS. Esta rede de satélites foi declarada operacional em 1995 e consiste de 24 satélites geoestacionários orbitando a Terra a fim de proporcionar uma cobertura global durante 24 horas por dia. Os receptores de GPS são instrumentos passivos, podendo ser utilizado por um número ilimitado de usuários.

Os sinais dos satélites, na faixa de VHF até a banda L, são freqüentemente perturbados pela presença de irregularidades no plasma da região F. Através das perturbações no sinal recebido, isto é, flutuações na amplitude ou na fase do sinal do GPS (receptor), provocadas pelas bolhas de plasma, pode-se estudar a dinâmica e morfologia das irregularidades no plasma da região F (Lanyi et al. 1988; Aarons et al. 1996; Aarons e Mendillo, 1997; Mendillo et al. 2000). A Figura 1.3b mostra as perturbações que ocorrem no sinal do GPS provocadas por irregularidades no plasma da região F.

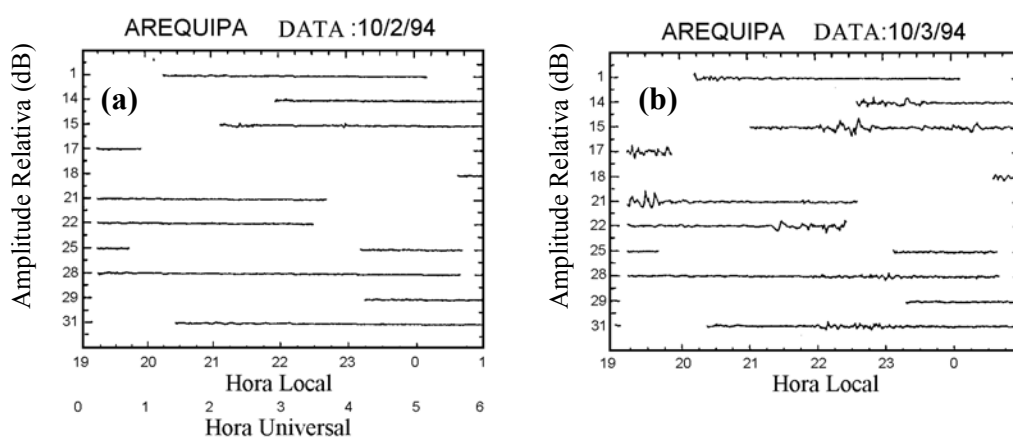


Fig. 1.2 - (a) Sinal do GPS sem flutuações, indicando a não ocorrência de irregularidades no plasma ionosférico. (b) Flutuações no sinal devido à ocorrência de irregularidades no campo de visão do transmissor-receptor do sistema GPS.

FONTE: Aarons et al. (1996).

1.2.3 Detecção de Bolhas de Plasma Através de Foguete

A Figura 1.4 mostra o perfil de densidade eletrônico obtido pelo foguete Sonda III, lançado em 11 de dezembro de 1985 na cidade de Natal, Brasil, às 20:30 LT. Pode-se observar, através da Figura 1.4, que, em torno de 365 km de altitude, o plasma ionosférico sofre uma brusca redução na sua densidade, o que indica a ocorrência de bolhas de plasma.

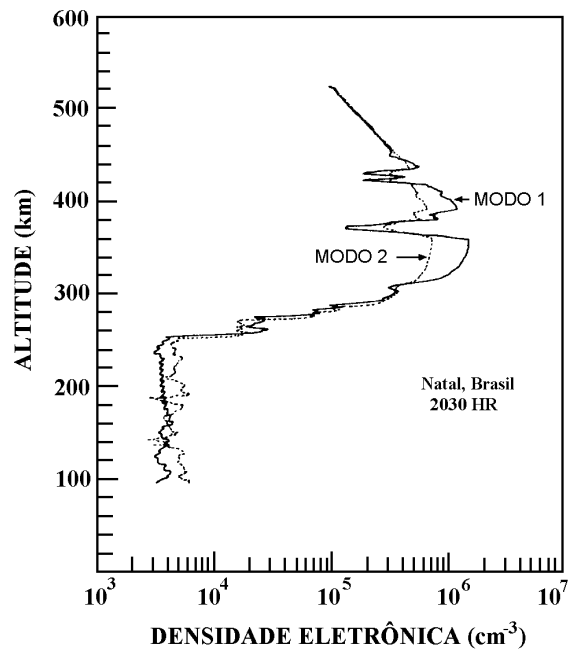


Fig. 1.3 - Perfil de densidade eletrônica obtido com foguete.

FONTE: Abdu et al. (1991).

1.2.4 Observações de Irregularidades Ionosféricas Através de Ionossonda

A ionossonda é essencialmente um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética verticalmente em relação ao solo, tipicamente entre 1 e 25 MHz. Quando existem bolhas de plasma, o sistema transmissor-receptor sai de sincronismo, o que acarreta uma descontinuidade nos ionogramas, onde essa descontinuidade indica a presença de bolhas de plasma. Na Figura 1.5a temos um ionograma ilustrando um sinal sem espalhamento, enquanto a Figura 1.5b mostra a descontinuidade (espalhamento do sinal) no ionograma devido à ocorrência de bolhas de plasma.

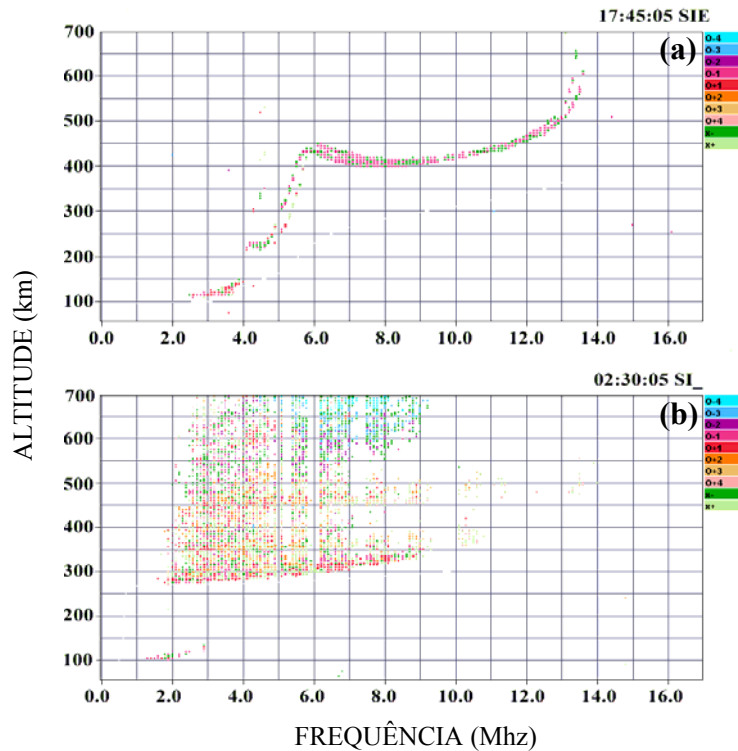


Fig. 1.4 - (a) Ionograma ilustrando um sinal sem espalhamento (não há ESF-“Equatorial Spread F”). (b) Espalhamento do sinal no ionograma devido à ocorrência de bolhas de plasma em Cachoeira Paulista durante a noite 10/01/2000.

1.2.5 Observações de Bolhas de Plasma Através de Luminescência Atmosférica

As emissões de luminescência atmosférica que têm origem na região F, tais como OI 630,0 nm, OI 557,7 nm e OI 777,4 nm, têm sido utilizadas no estudo da dinâmica e morfologia das bolhas de plasma. Utilizando instrumentos óticos, tais como fotômetros e imageadores tipo “all-sky”, é possível detectar estas emissões. As emissões detectadas através de fotômetros mostram frequentemente bruscas variações na sua intensidade, variações estas associadas à passagem de bolhas de plasma sobre o campo de visão do fotômetro (Figura 1.5).

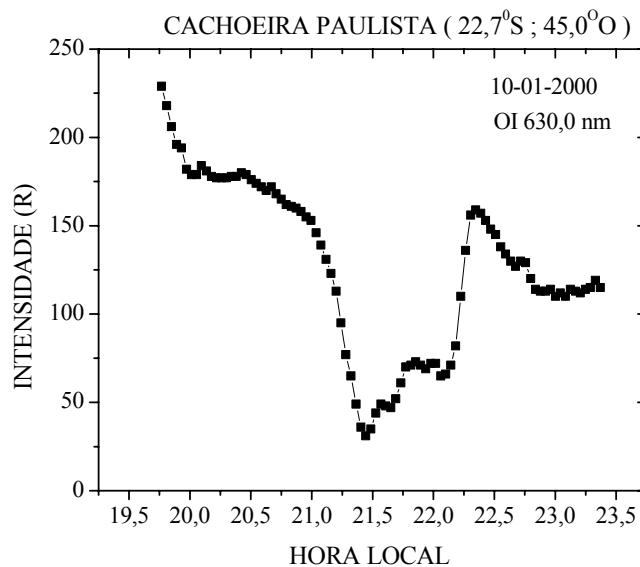


Fig. 1.5 - Variação temporal na intensidade da emissão OI 6300 nm obtida em Cachoeira Paulista durante a noite de 10/01/2000.

Já os imageadores tipo “all-sky” realizam medidas de maior alcance espacial, possibilitando-nos observar grandes áreas horizontais, aproximadamente $14,5^\circ$ de latitude/longitude a partir do zênite, para o caso do OI 630,0 nm, considerando a altura da camada de emissão em torno de 250 km. A Figura 1.7 ilustra a ocorrência de bolhas de plasma sobre o campo de visão dos imageadores. As imagens mostram estruturas escuras que, essencialmente, são regiões onde a densidade de plasma é drasticamente reduzida em relação ao plasma ambiente, na faixa de altura onde ocorrem as emissões. As linhas escuras que aparecem no lado direito da Figura 1.7(a) é uma escada posicionada ao lado da estação de observação.

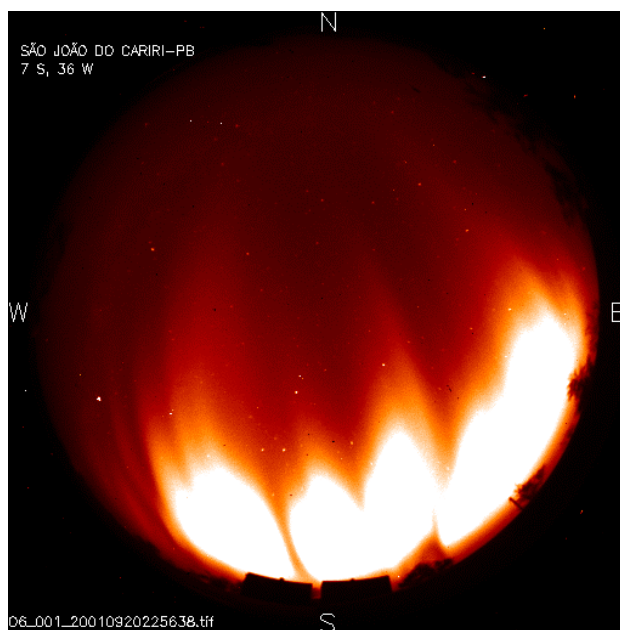


Fig. 1.6 - Imagem obtida através da emissão OI 630,0 nm em São João do Cariri, mostrando bolhas de plasma sobre o campo de visão do imageador "All-sky". A região clara na imagem é o pico da anomalia equatorial no hemisfério sul.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA DA REGIÃO F

2.1 As principais Emissões de Luminescência Atmosférica da Região F

A atmosfera superior da Terra é uma fonte permanente de emissões de fótons que são liberados por átomos ou moléculas excitadas acima de seu nível normal de energia. A produção desta luminescência é devida a diversos processos físico-químicos e, em geral, ocorre através da emissão de bandas e linhas espectrais.

Geralmente, temos duas categorias distintas de emissões da atmosfera superior na faixa de altura que varia de 80 km a 600 km, sendo uma delas denominada aurora e a outra luminescência atmosférica ou aeroluminescência ou ainda “airglow”. A aurora é geralmente causada pela excitação dos constituintes termosféricos pelo impacto de partículas energéticas com os átomos e moléculas da atmosfera e ocorre tipicamente em altas latitudes, enquanto que a luminescência atmosférica são emissões usualmente muito mais fracas causadas por reações químicas dos constituintes atmosféricos. Ambas ocorrem tanto do lado diurno quanto do lado noturno da atmosfera superior da Terra. A aurora, devido ao alto brilho visível a olho nu (principalmente durante tempestades geomagnéticas), foi primeiramente observada. Registros históricos revelam observações aurorais na Grécia antiga nos séculos III, IV e V a.c.

O estudo de emissões atmosféricas teve início com os trabalhos de Gassendi em 1621 sobre as primeiras observações sistemáticas de um fenômeno ocorrido no sul da França, que ele denominou “Aurora Boreal”. Mais tarde, Slipher (1919) observou que existiam emissões na atmosfera mesmo quando auroras não podiam ser notadas. Esse fenômeno foi devidamente demonstrado por Dufay (1933) como sendo auto-luminescência atmosférica e, portanto, distinto de auroras. Mesmo assim o nome “aurora não polar” (Rayleigh, 1931) só foi substituído quando Elvey (1950), sob sugestão de Otto Struve, propôs o uso da palavra “airglow”, que em Português é normalmente denominado luminescência atmosférica. Essa denominação vem sendo usada até hoje para indicar a

radiação ótica amorfa continuamente emitida pela atmosfera de um planeta (Chamberlain, 1978).

Portanto, a luminescência atmosférica pode ser definida como uma radiação de natureza eletromagnética, tênue, amorfa e constante, cuja emissão é proveniente de átomos e moléculas excitadas existentes na atmosfera, principalmente nas altitudes entre 80 km e 400 km. A luminescência atmosférica pode ser observada em qualquer latitude e existe em vários comprimentos de onda.

As emissões noturnas de luminescência atmosférica da região F mais estudadas são as emissões do oxigênio atômico OI 630,0 nm, OI 557,7 nm e OI 777,4 nm. Na tabela 3.1 temos as principais emissões da região F, suas intensidades típicas e comprimentos de onda respectivos, enquanto na Figura 3.1 temos o espectro eletromagnético de luminescência atmosférica ao redor da linha OI 777,4 nm.

TABELA 2.1 – PRINCIPAIS EMISSÕES DA LUMINESCÊNCIA
ATMOSFÉRICA NOTURNA NA REGIÃO F

<i>Emissão Atmosférica</i>	<i>Intensidade Típica (R)</i>	<i>Comprimento de onda (nm)</i>	<i>Altura média da camada de emissão (km)</i>
OI 557,7 nm	60	557,7	250-300
OI 630,0 nm	300	630,0	250-300
OI 777,4 nm	20	777,4	300-400

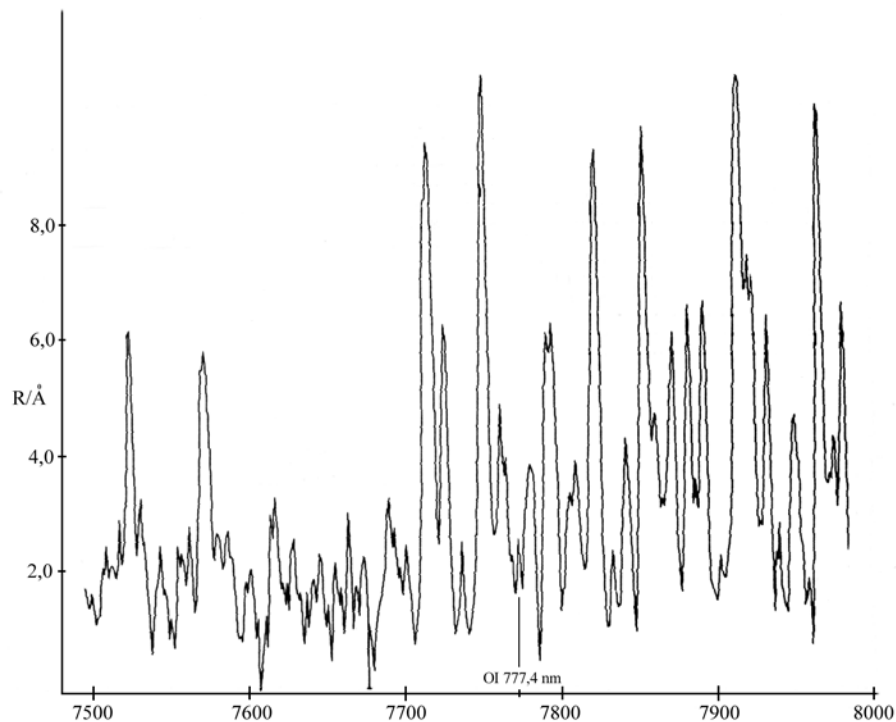


Fig. 2.1 - Espectro de luminescência atmosférica em torno da linha OI 777,4nm.

FONTE: Broadford e Kendall (1968).

2.2 A Linha Vermelha OI 630,0 nm

A linha de emissão OI 630,0 nm é a mais utilizada no estudo da dinâmica da região F noturna. Ela provém de uma camada emissora de aproximadamente 50 km de espessura localizada abaixo do pico da região F (aproximadamente uma altura de escala) com sua fonte de emissão entre 240 e 300 km de altitude. A intensidade do OI 630,0 nm aumenta, ou diminui, quando o plasma ionosférico move-se para baixo, ou para cima, respectivamente. Dessa forma, a intensidade da luminescência é mais, ou menos, intensa quando a densidade de elétrons aumenta, ou diminui. Através da linha de emissão OI 630,0 nm, a geração, dinâmica e morfologia das bolhas de plasma têm sido largamente estudadas nos últimos 20 anos, juntamente com técnicas de ondas de rádio.

2.2.1 O Mecanismo de Recombinação Dissociativa

Já está bem estabelecido que o processo de produção do oxigênio atômico excitado $O(^1D)$ na região F, que leva à geração da linha OI 630,0 nm, é a recombinação dissociativa do íon oxigênio molecular com elétrons. Na reação de recombinação dissociativa



parte da energia da reação é usada para dissociar o íon molecular XY^+ em átomos excitados. A recombinação dissociativa do íon molecular O_2^+ pode produzir os seguintes produtos:



O átomo do oxigênio atômico excitado no nível 1D , ao decair para o estado fundamental espontaneamente ($O^*(^1D) \rightarrow O(^3P) + hv(630,0\text{nm e } 636,4\text{nm})$), libera o excesso de energia na forma de radiação eletromagnética, emitindo linhas discretas nos comprimentos de onda 630,0 nm e 636,4 nm.

Ainda não está bem estabelecido se a recombinação dissociativa do íon NO^+



e



deve ser incluída na teoria da luminescência do OI 630,0 nm.

A taxa de produção do oxigênio excitado, por unidade de volume, devido ao mecanismo de recombinação dissociativa do íon O_2^+ é

$$\frac{dn(O^*)}{dt} = \alpha_1 n(O_2^+) n(e). \quad (2.9)$$

Por outro lado, a taxa de produção do oxigênio excitado, por unidade de volume, devido ao mecanismo de recombinação dissociativa do íon NO^+ é

$$\frac{dn(O^*)}{dt} = \alpha_2 n(NO^+) n(e) \quad (2.10)$$

onde α_1 e α_2 são os coeficientes das reações.

Na região F, durante a noite, o íon molecular, O_2^+ , é produzido através do mecanismo de transferência



A taxa de produção do íon molecular O_2^+ , por unidade de volume, é então dada por

$$\frac{dn(O_2^+)}{dt} = \gamma_1 n(O^+) n(O_2) \quad (2.12)$$

onde γ_1 é o coeficiente da reação a uma temperatura de 1000 K. A partir da reação de recombinação dissociativa do O_2^+ , notamos que a intensidade da emissão da linha OI 630,0 nm depende fortemente das concentrações do íon O_2^+ e elétrons.

O íon molecular NO^+ é produzido através da reação



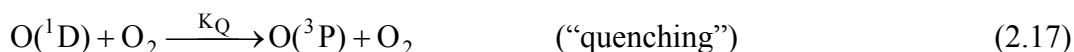
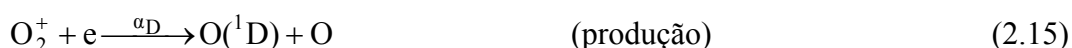
A taxa de produção do íon molecular NO^+ , por unidade de volume, é

$$\frac{dn(NO^+)}{dt} = \gamma_2 n(O^+) n(N_2) \quad (2.14)$$

onde γ_2 é o coeficiente da reação a uma temperatura de 1000 K.

A deriva vertical \mathbf{ExB} observada na região F, após o pôr-do-sol, influencia significativamente a intensidade da emissão OI 630,0 nm. Um movimento de plasma para cima, diminui a concentração do O_2^+ , conseqüentemente diminuindo a concentração do oxigênio atômico excitado no nível 1D , e, diminuindo assim, a intensidade da emissão OI 630,0 nm. Já um movimento de deriva vertical para baixo, aumenta a intensidade da emissão do OI 630,0 nm.

O tempo de vida do oxigênio excitado no nível 1D é ≤ 110 segundos (Peterson et al. 1966), podendo ser desativado durante este período por colisões (“quenching”), sem a emissão de fótons. Os principais constituintes atmosféricos envolvidos na desativação do $O(^1D)$ são as moléculas neutras O_2 e N_2 . Assim sendo, as reações do OI 630,0 nm envolvidas no processo são



onde α_D , k_Q e A_D representam os coeficientes das reações.

2.2.2 A Taxa de Emissão Volumétrica Integrada do OI 630,0 nm

A taxa de emissão volumétrica $\varepsilon_\lambda(z)$ (fótons emitidos por unidade de volume por segundo) de uma linha, tendo comprimento de onda λ , em um nível j , é dado pelo produto do coeficiente de transição de Einstein, A_j , e a densidade numérica $n(j)$ dos átomos no nível j

$$\varepsilon_\lambda(z) = A_\lambda n(j). \quad (2.19)$$

A taxa de emissão volumétrica integrada, na direção vertical, em Rayleighs, é então dada por:

$$J_{\lambda} = 10^{-6} \cdot A_{\lambda} \int_0^{\infty} n(j) dz \quad (2.20)$$

A densidade numérica $n(^1D)$, pode ser determinada, resolvendo-se a equação da continuidade para a “população” do oxigênio excitado no nível 1D , sendo dada por

$$n(^1D) = \frac{k_D}{A_D} \frac{1}{(1 + d_D/A_D)} \frac{\gamma_1 n(O_2) n(e)}{1 + \frac{\gamma_1 n(O_2)}{\alpha_1 n(e)} + \frac{\gamma_2 n(N_2)}{\alpha_2 n(e)}} \quad (2.21)$$

onde

γ_1 é o coeficiente da reação de transferência de carga na produção do O_2^+ ,

γ_2 é o coeficiente da reação de transferência de carga na produção do NO^+ ,

$n(O_2)$ é a densidade numérica do oxigênio molecular,

$n(e)$ é a densidade numérica de elétrons,

$n(N_2)$ é a densidade numérica do nitrogênio molecular,

α_1 é o coeficiente na reação de recombinação dissociativa do íon O_2^+ ,

α_2 é o coeficiente na reação de recombinação dissociativa do íon NO^+ ,

d_D é o coeficiente de desativação colisional.

Para obtermos a taxa de emissão volumétrica para a transição $^1D_2 \rightarrow ^3P_2$, que emite a linha OI 630,0 nm, temos que multiplicar a densidade numérica $n(^1D)$, dada na eq. (3.21), pelo coeficiente de transição de Einstein, $A_{630,0}$. Portanto, a taxa de emissão volumétrica do OI 630,0 nm devido a recombinação dissociativa dos íons O_2^+ e NO^+ é

$$\varepsilon_{630,0}(z) = A_{630,0} \cdot n(^1D). \quad (2.22)$$

A taxa de emissão volumétrica integrada do OI 630,0 nm, na vertical, em Rayleighs, é dada por

$$J_{630,0} = 10^{-6} \int \varepsilon_{630,0}(z) \cdot dz \quad (2.23) \text{ ou}$$

$$J_{630,0} = 10^{-6} \cdot 0,76 \int \frac{1}{(1 + d_D/A_D)} k_D \frac{\gamma_1 n(O_2) n(e)}{\left(1 + \frac{\gamma_1 n(O_2)}{\alpha_1 n(e)} + \frac{\gamma_2 n(N_2)}{\alpha_2 n(e)}\right)} dz \quad (2.24)$$

onde

$$A_{630,0}/A_D = 0,76 \text{ e } k_D = 0,2, \quad (\text{Peterson e Vanzandt, 1969}).$$

CAPÍTULO 3

IRREGULARIDADES DE PLASMA NA REGIÃO F

3.1 Teoria Linear das Bolhas de Plasma

Imediatamente após o pôr-do-sol, a região E inicia um processo rápido de recombinação e não há condutividade suficiente para curto-circuitar os campos elétricos da região F. Devido à recombinação e aos efeitos eletrodinâmicos (movimento vertical da região F devido à deriva $E \times B$), o gradiente de ionização da parte inferior da camada F começa a aumentar. Quando a camada está suficientemente alta, ou o gradiente de ionização está suficientemente elevado para superar efeitos de recombinação, haverá o crescimento das flutuações na densidade, devido à instabilidade Rayleigh-Taylor. Essas flutuações dão origem às bolhas de plasma na parte inferior da camada, que sobem não-linearmente pelo movimento de polarização $E \times B$, acima do pico da região F, estendendo as irregularidades para a parte superior da camada.

3.1.1 O Mecanismo da Instabilidade Rayleigh-Taylor

Considere a Figura 3.1, onde a densidade n_1 é maior que a n_2 e ambas estão submetidas à gravidade g e ao campo magnético B . Uma pequena perturbação inicial está ilustrada na Figura 3.1. As velocidades das partículas são proporcionais às suas massas, portanto há um domínio dos íons. Uma corrente flui na direção x (direção leste-oeste) devido ao gradiente de pressão e gravidade, tendo como magnitude,

$$j_x = \frac{nMg}{B} \quad (3.1)$$

onde n denota a densidade de plasma e M é a massa do íon.

Como a corrente resultante é na direção $g \times B$, que é estritamente horizontal, j_x será grande quando n for grande e pequeno quando n for pequeno. Existe uma divergência no fluxo de corrente devido a perturbação inicial, distribuindo as cargas sobre a perturbação. Devido a essa separação de cargas, surge um campo elétrico de polarização δE , tendo a direção mostrada na Figura 3.1. Esse campo elétrico δE , que surge pela

perturbação, causa uma deriva $\delta \mathbf{E} \times \mathbf{B}$, deslocando a região de baixa densidade para cima, e uma deriva deslocando a região de densidade maior para baixo. Portanto, ocorre uma amplificação na perturbação inicial e o sistema fica instável. Uma condição de instabilidade do sistema ocorre quando g e ∇n são anti-paralelos.

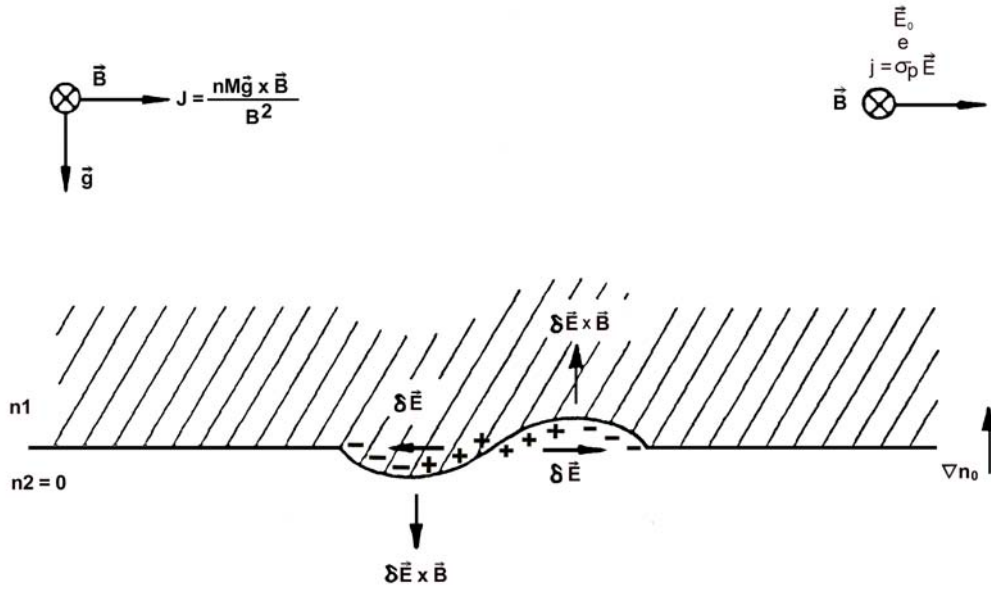


Fig. 3.1 - Esquema mostrando o crescimento de uma irregularidade no plasma da ionosfera equatorial, análogo à instabilidade Rayleigh-Taylor da hidrodinâmica. Uma pequena perturbação inicial na fronteira entre duas regiões com diferentes densidades, onde a região menos densa é deslocada para cima, gera uma perturbação de maior escala que tende a crescer. FONTE: Kelley (1989, p. 122)

A taxa de crescimento da instabilidade é dada pela expressão

$$\gamma_{I,\max} = -\frac{g}{v_{in}} \frac{1}{n_0} \frac{\partial n_0}{\partial q} \quad (3.2)$$

CAPÍTULO 4

INSTRUMENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

Os dados utilizados para o estudo da deriva zonal e morfologia das bolhas de plasma foram obtidos com imageadores tipo “all-sky”. A emissão de luminescência atmosférica usada nesta pesquisa, foi a do oxigênio atômico OI 630,0 nm. O imageador “all-sky” realiza medidas de maior alcance espacial (quando comparadas com medidas por meio de foguetes, digissonda e fotômetros), possibilitando-nos observar grandes áreas horizontais, aproximadamente $14,5^\circ$ de latitude/longitude a partir do zênite, para o caso do OI 630,0 nm, supondo a altura da camada de emissão em torno de 250 km..

4.1 O Imageador “All-Sky”

O primeiro sistema de imageamento “all-sky” entrou em operação em janeiro de 1975 (Mende e Eather, 1976) com o propósito de investigar as emissões com origem na região auroral. Weber et. al (1978), usando um equipamento similar montado a bordo de um avião, realizou uma série de medidas voando sobre a costa oeste da América do Sul, com o objetivo de estudar as irregularidades no plasma da região F equatorial e os seus respectivos efeitos nos sinais transmitidos por satélites. Já as primeiras observações feitas com o sistema de imageamento “all-sky” em solo, na região tropical, foi realizada por Mendillo et. al (1982) em uma campanha na ilha Ascension ($7,95^\circ$ S, $14,38^\circ$ W).

Uma das primeiras versões dos imageadores “all-sky” está mostrada na Figura 5.1. Como podemos observar, a parte superior do imageador é constituída por uma lente denominada “all-sky”, que proporciona um campo de visão de 180° , obtendo, dessa forma, uma imagem completa do céu local. Porém, esse tipo de lente introduz efeitos de compressão e curvatura nas imagens para pequenos ângulos de elevação (nas bordas da lente). A lente de campo garante que toda a luz vinda da lente “all-sky” incida na lente colimadora.

Este sistema ótico utiliza ainda um filtro de 4 polegadas de diâmetro com largura de faixa de 1,35 nm, centrada no comprimento de onda em 630 nm. Filtros de interferência

com banda estreita (bastante seletivo) são necessários, pois as intensidades de determinadas linhas do espectro eletromagnético de luminescência atmosférica noturna, tais como OI 630,0 nm e OI 777,4 nm, possuem intensidades relativamente baixas. Como na região próxima ao equador magnético o conteúdo eletrônico é ainda mais baixo, devido à anomalia equatorial, um intensificador de imagem foi acrescentado ao sistema de forma a amplificar a intensidade da emissão. O registro das imagens monocromáticas é feito por uma câmara convencional (filmes de 35mm) em intervalos de 20 minutos e tempo de exposição de 32 segundos.

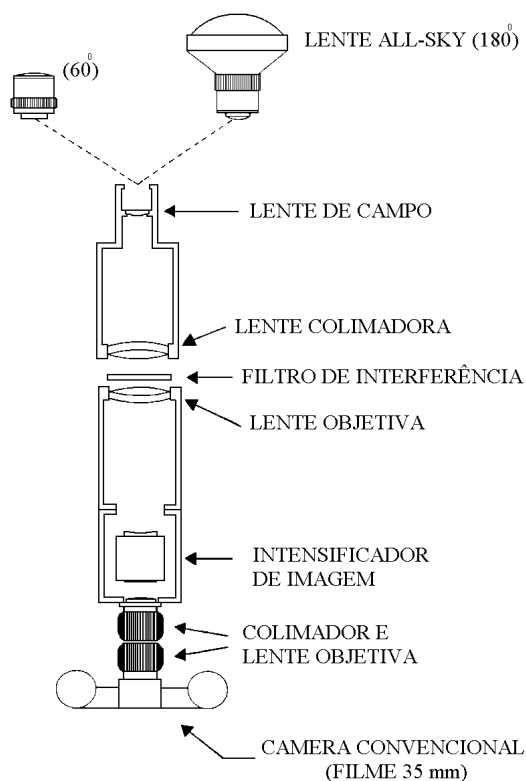


Fig. 4.1 - Imageador "All-Sky" com câmara fotográfica.

FONTE: Mendillo et al. (1982).

As últimas gerações de imageadores "all-sky" são constituídas basicamente por uma lente tipo "all-sky", um sistema telecêntrico, uma roda de filtros de interferência, um

sistema de re-imageamento, uma câmara CCD (do inglês (“Charge Coupled Device”), um sistema de refrigeração e um microcomputador. As Figuras 5.2 e 5.3 mostram, respectivamente, o esquema e foto dos imageadores “all-sky” CCD atuais que estão sendo usados no estudo da velocidade zonal, comportamento espacial e bifurcações das bolhas de plasma.

Através da lente “all-sky”, como dito anteriormente, obtemos um campo de cobertura de 180° do céu noturno. Como nas primeiras gerações de imageadores, esse tipo de lente introduz efeitos de compressão e curvatura nas imagens para pequenos ângulos de elevação. O sistema telecêntrico de lentes torna os feixes perpendiculares à roda de filtro, evitando, assim, o deslocamento na linha de emissão selecionada. Uma das vantagens dos imageadores atuais é a possibilidade da troca de filtro automaticamente e o registro das imagens como arquivos digitais (dispensa o procedimento da digitalização das fotografias como nos primeiros imageadores). A roda de filtros de interferência possui 5 filtros, sendo gerenciada pelo programa de aquisição de dados.

A câmara de detecção CCD é uma matriz de dimensões 1024x1024 pixels, tendo área de 6,54 cm² (para o caso do imageador 2). As imagens foram re-amostradas para 512x512 pixels de forma a melhorar a relação sinal/ruído. A resolução da câmara CCD é determinada pela geometria da mesma. Um pixel pode variar de poucos micrômetros a 48 μm e área total de 1 a 24 cm². A alta eficiência quântica (~80% no visível), o baixo ruído térmico [0,5 (elétrons/pixel)/s], o baixo ruído de leitura (15 elétrons/rms), e a alta linearidade (0,05%) permitem uma excelente capacidade de medidas quantitativas das emissões de luminescência. O sistema de refrigeração reduz a temperatura da câmara CCD, de forma a minimizar o ruído térmico gerado pelos componentes elétricos e eletrônicos da própria câmara. Já o microcomputador é usado no controle da roda de filtros e no processo de aquisição de dados. O sistema é capaz de detectar variações da luminescência noturna na linha OI 630 nm, registrando as imagens como arquivos digitais em intervalos de tempo de 7,15 minutos e tempo de exposição de 90 segundos. Para se conhecer o campo de cobertura dos imageadores “all-sky”, é importante considerar a relação entre o ângulo zenital da lente “all-sky” e a altura da camada de emissão considerada. Pela Figura 5.4, percebe-se que o campo de cobertura do

instrumento corresponde ao setor sudeste e parte do setor sul brasileiro e também a uma área equivalente sobre oceano atlântico. Como a maioria dos instrumentos óticos situados em solo e projetados para medir a luminescência noturna, o imageador CCD “all-sky” necessita de céu claro para operar. Essas condições restringem o período de observação a 13 dias por mês, centrado na lua nova. Portanto, as condições climáticas e o ruído de fundo contaminando o espectro eletromagnético (nuvens, a lua e as luzes circunvizinhas ao ponto de observação) são fatores que limitam os instrumentos óticos nas observações da luminescência atmosférica. Na tabela 5.2 temos as características dos filtros usados nas observações das emissões do oxigênio atômico com origem na região F da ionosfera, consideradas neste trabalho.

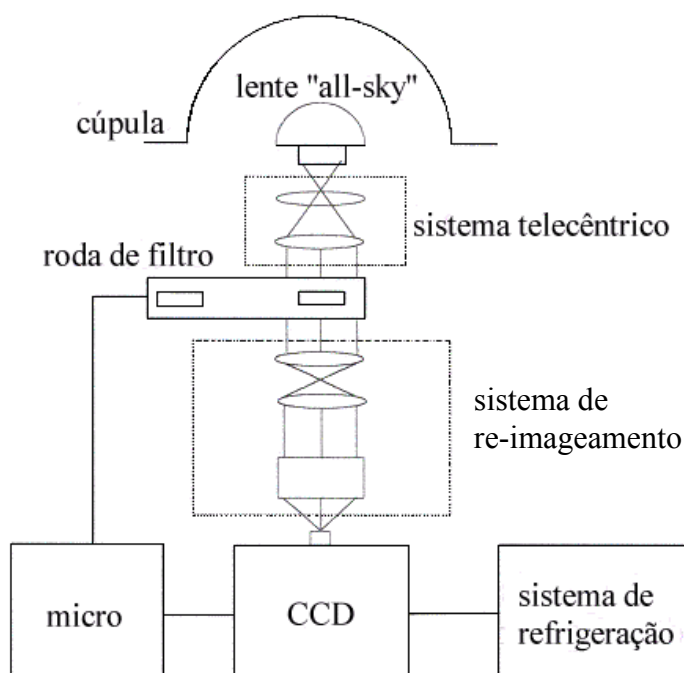


Fig. 4.2 - Diagrama em blocos do imageador “All-Sky” com câmara CCD.

TABELA 4.1 CARACTERÍSTICAS DOS FILTROS E ALTURAS MÉDIAS DAS CAMADAS DE LUMINESCÊNCIA DO OXIGÊNIO ATÔMICO

Comprimento de onda das emissões OI (nm)	Largura de banda (nm)	Altura média da camada (km)
630,0	1,5	250-300
557,7	2,65	250-300
777,4	1,35	300-400

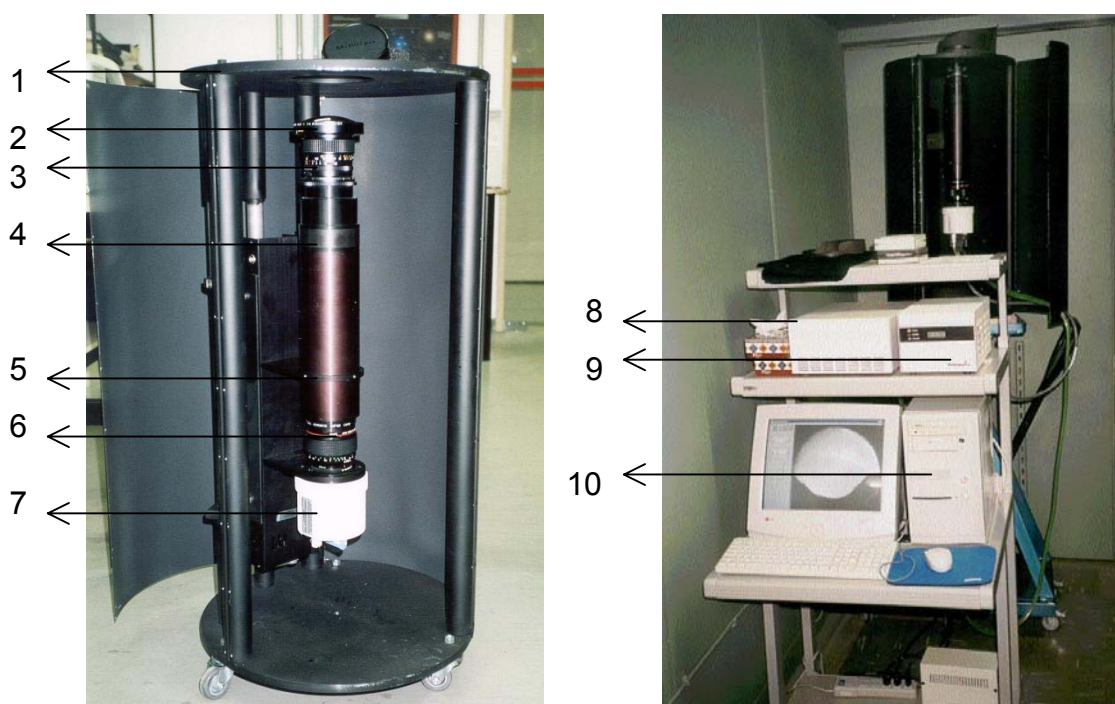


Fig. 4.3 - Fotografia do imageador "All-Sky" com câmara CCD onde: (1) rack; (2) lente tipo "all-sky"; (3) sistema telecêntrico de lentes; (4) roda de filtros de interferência; (5) sistema ótico de reconstrução de imagens; (6) controle de foco; (7) câmara CCD; (8) sistema de refrigeração da câmara CCD; (9) controladora da CCD; (10) microcomputador.

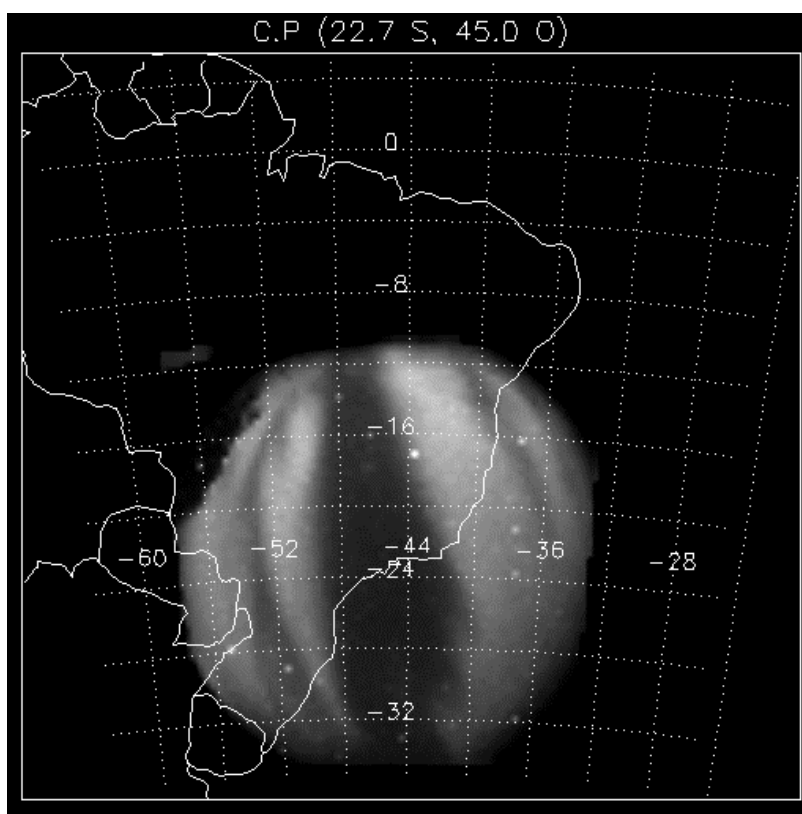


Fig. 4.4 - Campo de visão do imageador “all-sky”, mostrando uma imagem obtida através da emissão OI 630,0 nm, supondo a altura da camada de emissão em torno de 250 km em Cachoeira Paulista durante a noite 02/11/1999.

4.2 Processo de Linearização das Imagens obtidas com o Imageador “All-Sky”.

Como dito anteriormente, um dos problemas associados ao sistema ótico “all-sky” nos estudos da luminescência são os efeitos de compressão e curvatura que ocorrem nas imagens para pequenos ângulos de elevação. Isso ocorre porque a lente “all-sky” projeta a imagem sobre a câmara CCD, de forma que cada pixel, subentende o mesmo ângulo do céu.

Num acordo de cooperação científica entre o grupo de luminescência atmosférica (Lume) do INPE e a universidade de Kyoto, a técnica de linearização de imagens ‘all-

sky”, desenvolvida por Maekawa (1998), foi usada nos estudos das emissões com origem na mesosfera. Tal técnica foi estendida para linearizar as imagens obtidas através das emissões com origem na termosfera/ionosfera.

As imagens obtidas com os imageadores “all-sky”, por sua natureza digital, são constituídas por um arranjo de elementos sob a forma de uma malha ou “grid”. Cada célula desse “grid” tem sua localização definida em um sistema de coordenadas do tipo linha e coluna, representados por x e y , respectivamente. O nome dado a essas células é pixel, derivado do inglês “picture element”. Para uma mesma CCD, cada pixel representa sempre uma área com as mesmas dimensões. Cada célula possui também um atributo numérico z , que indica o nível de cinza dessa célula, que, obviamente, vai variar do preto ao branco. Este nível de cinza é conhecido por DN (do inglês “digital number”). O DN de uma célula representa a intensidade da energia eletromagnética medida pelo sensor, para a área da CCD correspondente ao tamanho do pixel. Uma imagem digital pode então ser vista como uma matriz, de dimensão x linhas por y colunas, com cada elemento possuindo um atributo z (nível de cinza).

Podemos resumir o procedimento para linearização das imagens da seguinte forma:

- a) Escolher uma boa imagem com muitas estrelas próximas ao zênite.
- b) Identificar as estrelas (coordenadas x,y) na imagem original, através de uma rotina apropriada.
- c) Usar o aplicativo “Sky-Map” e identificar as estrelas da imagem original (obter os parâmetros azimute e elevação).
- d) Fazer a correção das coordenadas x e y obtidas no item (b), através de uma segunda rotina.
- e) Criar um arquivo de dados com os valores para azimute, elevação e coordenadas corrigidas de cada estrela.
- f) Obter o zênite real da imagem, o azimute corrigido e os coeficientes da função da lente “all-sky” através de uma terceira rotina.
- g) A partir de uma quarta rotina, gerar os mapas de projeção.

O aplicativo computacional usado no desenvolvimento das rotinas foi o “Interactive Data Language” (IDL). A imagem escolhida para a calibração do imageador all-sky foi a obtida através do fundo estelar do dia 09/06/1999, às 19:21:13 LT. Nessa calibração foram identificadas 50 estrelas. Um número relativamente alto de estrelas se faz necessário (Figura 5.9), pois melhora o ajuste da função da lente “all-sky” (aumenta o número de pontos). Na Figura 5.12 temos um exemplo de uma imagem original obtida através da emissão OI 630,0 nm e as suas respectivas imagens linearizadas para as áreas de projeção 256 km², 512 km², 600 km² e 1024 km². Através dessa técnica de linearização de imagens foi possível inferir a velocidade zonal das bolhas de plasma sobre uma vasta área a partir do zênite.

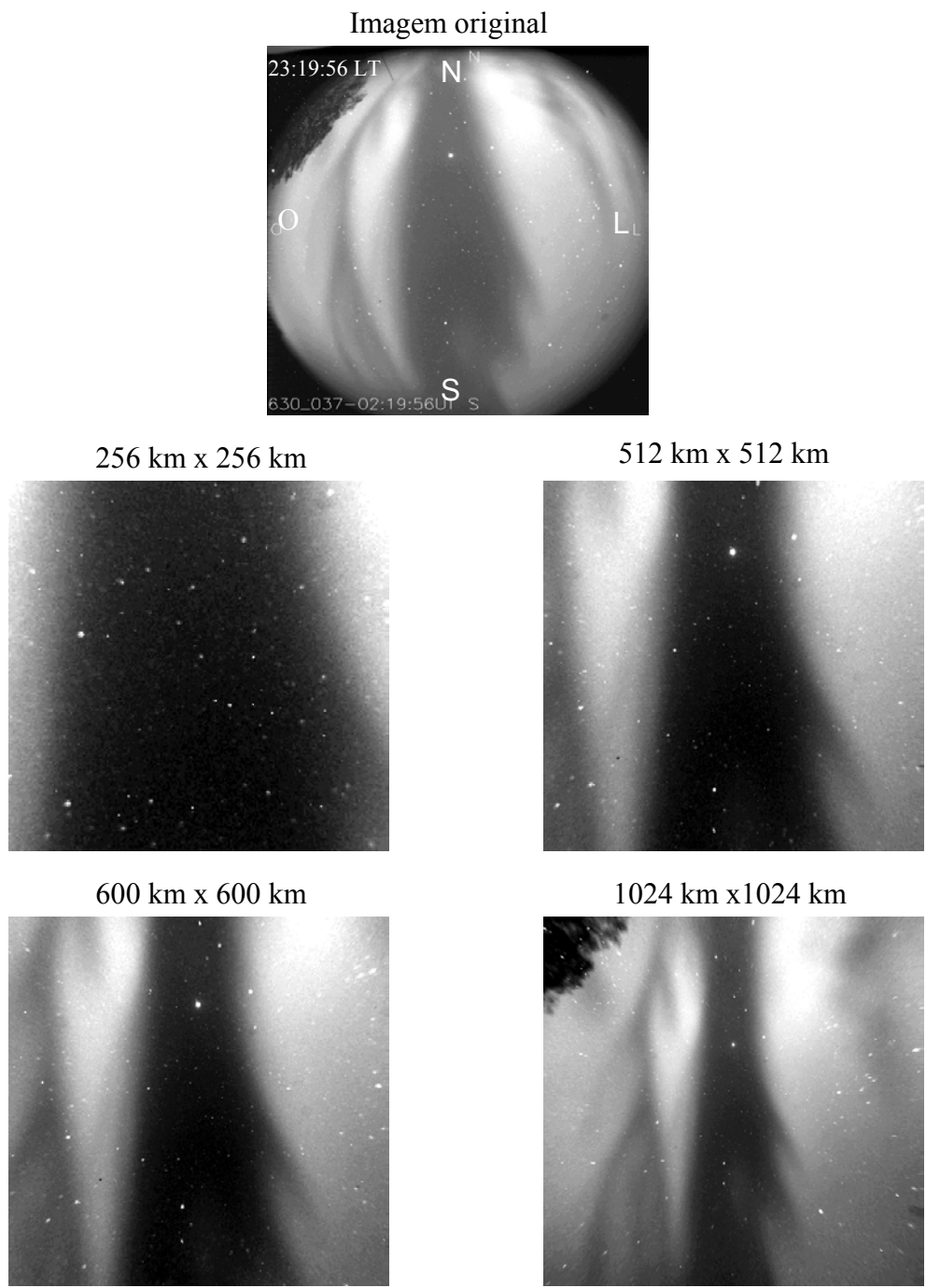


Fig. 4.5 - Imagem original obtida através da emissão OI 630,0 nm no dia 02/11/1999 (com o imageador 2), às 23:19:56 LT e as suas respectivas imagens linearizadas para quatro diferentes áreas de projeção.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Comportamento Sazonal das Bolhas de Plasma na Região Equatorial

Nesse estudo, foram usadas as imagens de bolhas de plasma obtidas com um imageador tipo “all-sky” instalado na cidade de São João do Cariri – Paraíba. As imagens obtidas entre setembro de 2000 a outubro de 2001 (período de atividade solar alta; fluxo solar médio $F_{10.7} > 189 \times 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$) foram usadas no estudo sazonal e deriva zonal das bolhas de plasma. A Figura 5.1 mostra o estudo estatístico da frequência de ocorrência de bolhas de plasma na região equatorial imediatamente após o pôr-do-sol (entre 18 e 21 LT) para o período de 09/2000 a 08/2001. Na Figura 4(a) temos as horas de observação da emissão OI 630 nm enquanto na Figura 4(b) temos a frequência de ocorrência de bolhas de plasma. Somente noites com atividade geomagnética relativamente calma ($-30 \leq \text{Dst} \leq 10 \text{ nT}$) foram selecionadas.

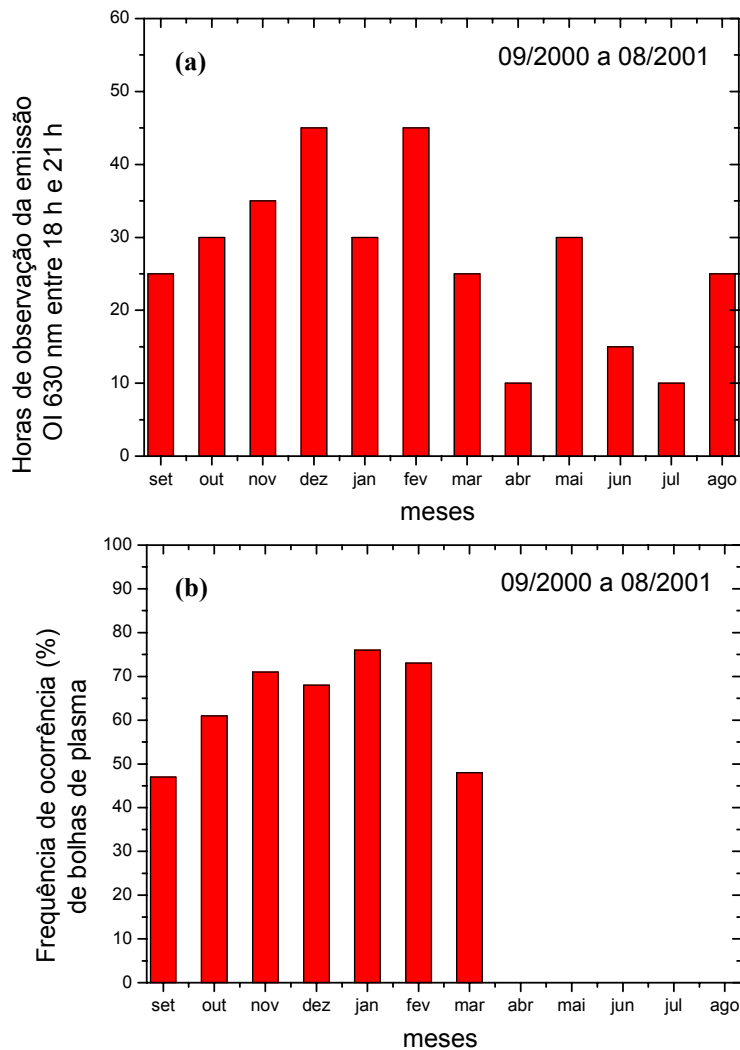


Figura 5.1 – Estatística da frequência de ocorrência de bolhas de plasma na região equatorial após o pôr-do-sol para o período de 09/2000 a 08/ 2001 (entre 18 e 21 LT). (a) horas de observação da emissão OI 630 nm e (b) frequência de ocorrência de bolhas de plasma. Somente noites com atividade geomagnética relativamente calma ($-30 \text{ nT} \leq \text{Dst} \leq 10 \text{ nT}$) foram selecionadas.

A variação sazonal da frequência de ocorrência das bolhas de plasma pode ser interpretada em função do comportamento sazonal do pico pré-reversão, que por sua vez, está relacionado com a variação da condutividade ao longo de linhas de campo entre regiões E conjugadas. Nos trabalho de Tsunoda (1985) e Batista et al. (1986), são

analisadas as assimetrias longitudinais e sazonais das derivas verticais. Os autores mostram que o comportamento apresentado pelas derivas verticais, deve-se principalmente a diferenças nas declinações magnéticas das localidades consideradas e ao alinhamento do terminadouro solar relativo ao meridiano magnético. Esses trabalhos mostram que o comportamento do pico pré-reversão (magnitude e duração), está associado ao alinhamento relativo do meridiano magnético e terminadouro solar. Para os meses de verão, o ângulo formado entre o terminadouro solar e o meridiano magnético (na nossa longitude, onde a declinação magnética é para oeste) é relativamente pequeno (pontos nodais), como mostra a Figura 5.2. Esse alinhamento provoca um desacoplamento quase que instantâneo entre os pontos conjugados das regiões E e F, logo após o pôr-do-sol, favorecendo a aparição de campos elétricos de polarização na região F com magnitudes relativamente maiores, resultando num pico pré-reversão na deriva vertical de plasma maior mais com menor duração.

Nos meses de inverno, o terminadouro solar e o meridiano magnético estão desalinhados, o que provoca um desacoplamento relativo de maior duração entre as regiões E e F durante o pôr-do-sol, reduzindo assim, os campos elétricos de polarização, e, conseqüentemente, gerando uma deriva vertical no pico pré-reversão de menor magnitude mas com maior duração. Podemos notar que a diferença de tempo entre o pôr-do-sol nas regiões conjugadas é máxima em junho (70 min), o que significa uma variação mais lenta da condutividade integrada ao longo das linhas de campo.

Na Figura 5.3, adaptada de Batista et al. (1986), temos as médias mensais das derivas verticais inferidas da relação $\Delta h'F/\Delta t$ (após Bittencourt e Abdu, 1981), a partir de ionogramas de Fortaleza, referentes a um período de um ano (outubro de 1978 a setembro de 1979). Bittencourt e Abdu (1981) mostraram que é possível obter as derivas verticais de plasma a partir dos movimentos verticais da camada ionosférica, observadas a partir de ionogramas, nos períodos em que o pico F2 encontra-se acima de aproximadamente 300 km de altitude (quando os processos de recombinação não mascaram o movimento vertical aparente da camada F).

A partir da Figura 5.3, podemos notar que a velocidade vertical do pico pré-reversão é maior em magnitude e mais estreita em duração, durante os meses de verão, tendo magnitude relativamente menor nos meses de equinócio. Já para os meses que

correspondem ao inverno, a velocidade vertical do pico pré-reversão é ainda menor em magnitude, mas de maior duração. Assim, pode-se notar que o máximo pré-reversão ocorre mais cedo em dezembro e mais tarde em junho sobre Fortaleza.

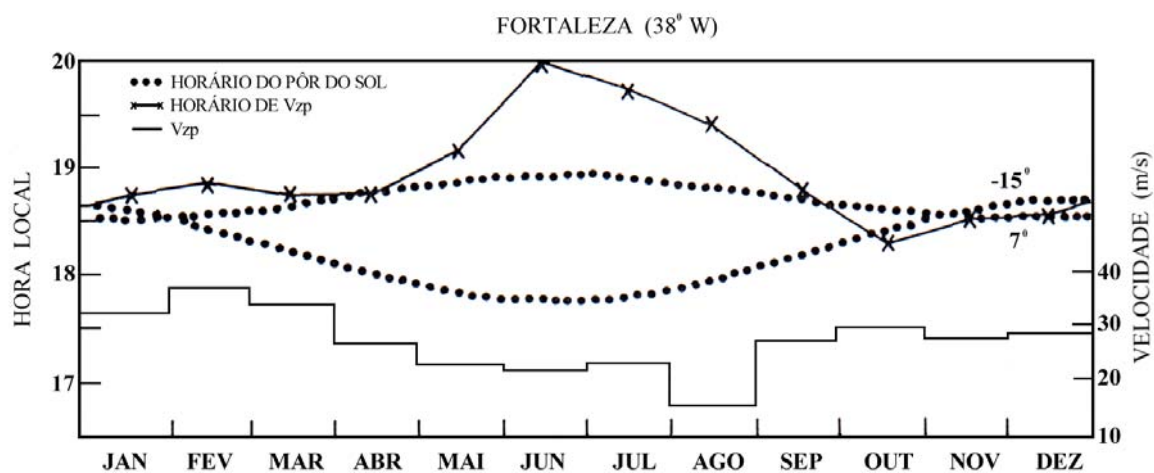


Fig. 5.2 - Variação anual do horário do pôr-do-sol (linhas pontilhadas) nas regiões E magneticamente conjugadas, localizadas ao norte e ao sul de Fortaleza. O histograma representa a deriva vertical máxima do pico pré-reversão.

FONTE: Adaptada de Batista et al. (1986).

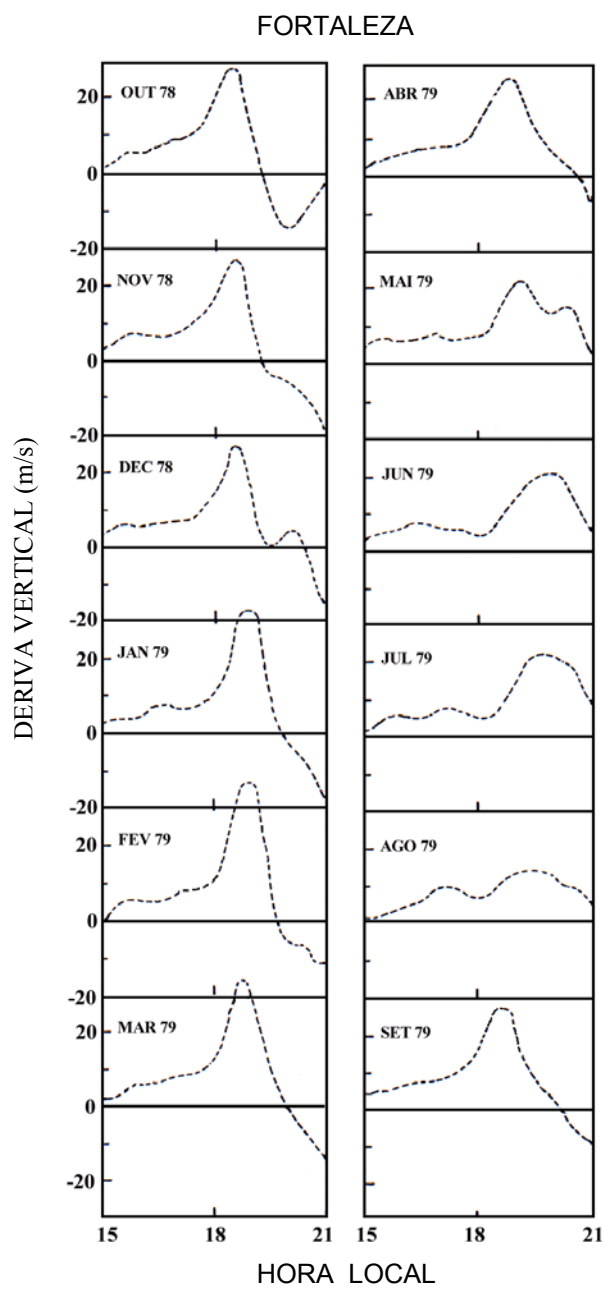


Fig. 5.3 - Médias mensais de deriva vertical na região F sobre Fortaleza, com velocidades obtidas através da relação $\Delta h'F/\Delta t$ usando ionogramas.
 FONTE: Adaptada de Batista et al. (1986).

Observa-se que existe uma boa correlação entre a variação anual do horário do pôr-do-sol nas regiões E magneticamente conjugadas e a ocorrência de bolhas de plasma, isto é, há ocorrência maior das bolhas de plasma nos meses em que V_{zp} é maior e mais estreito devido ao melhor alinhamento relativo entre o terminadouro solar e o meridiano magnético.

5.2 A Deriva zonal das Bolhas de Plasma

Na região tropical, a deriva eletromagnética $E \times B$ tem sido estudada por diversas técnicas, onde podemos citar: radar de espalhamento coerente (e.g. Clemesha, 1964), radar de espalhamento incoerente (e.g. Woodman, 1972; Fejer, 1979,1985), digissonda (Bittencourt e Abdu, 1981; Batista et al. 1986), imageador “all-sky” na emissão OI 630,0 nm (Mendillo e Baumgardner, 1982; Pimenta et al. 2001, 2003), fotômetro de varredura (e.g. Sobral et al. 1985; Sobral et al. 1999) e também através de satélite (e.g. Anderson et al. 1987; Coley e Heelis, 1989).

5.2.1 A Deriva Zonal das Bolhas de Plasma na Região Tropical durante o período de Atividade Solar Alta e Atividade Geomagnética Calma

A deriva zonal da região F é produzida pelo campo elétrico vertical, sendo caracterizada por velocidades para oeste durante o dia e para leste durante a noite. Essa deriva sofre influências principalmente dos campos elétricos de polarização da região F, sendo portanto, influenciada diretamente pelos ventos termosféricos que geram estes campos. Durante o período de setembro de 2000 a abril de 2001, foi realizado o estudo do comportamento noturno e latitudinal da deriva zonal das bolhas de plasma (utilizando as imagens obtidas através da emissão OI 630,0 nm) na região tropical. Como a ocorrência das bolhas de plasma durante o inverno sobre a região brasileira é um fenômeno bastante raro, a deriva zonal das bolhas foi determinada apenas para os meses de verão.

O comportamento noturno para o período de verão mostra que a velocidade zonal das bolhas de plasma é alta no início da noite (20:00 h às 22:00 h) e, após a meia noite, a velocidade diminui lentamente. A velocidade média máxima da deriva zonal das bolhas foi de 170 m/s e ocorreu no verão em torno das 21 LT, na latitude de 9° S. Antes da meia noite, os resultados mostram que a velocidade zonal das bolhas durante o verão é relativamente maior. Entretanto, após a meia noite, a velocidade média das bolhas de plasma é maior durante o equinócio.

O comportamento noturno, latitudinal e sazonal na velocidade zonal das bolhas de plasma pode ser interpretado em termos dos efeitos do vento neutro termosférico zonal e da condutividade Pedersen. Esse vento, fluindo através das linhas de campo magnético na região F, movimentada (por arraste colisional) os íons positivos através dessas linhas, criando assim, campos elétricos de polarização (verticais) que causam a deriva de plasma para leste. Rishbeth (1971b) sugeriu que a deriva zonal de plasma na região equatorial tem aproximadamente a mesma velocidade que o vento zonal termosférico.

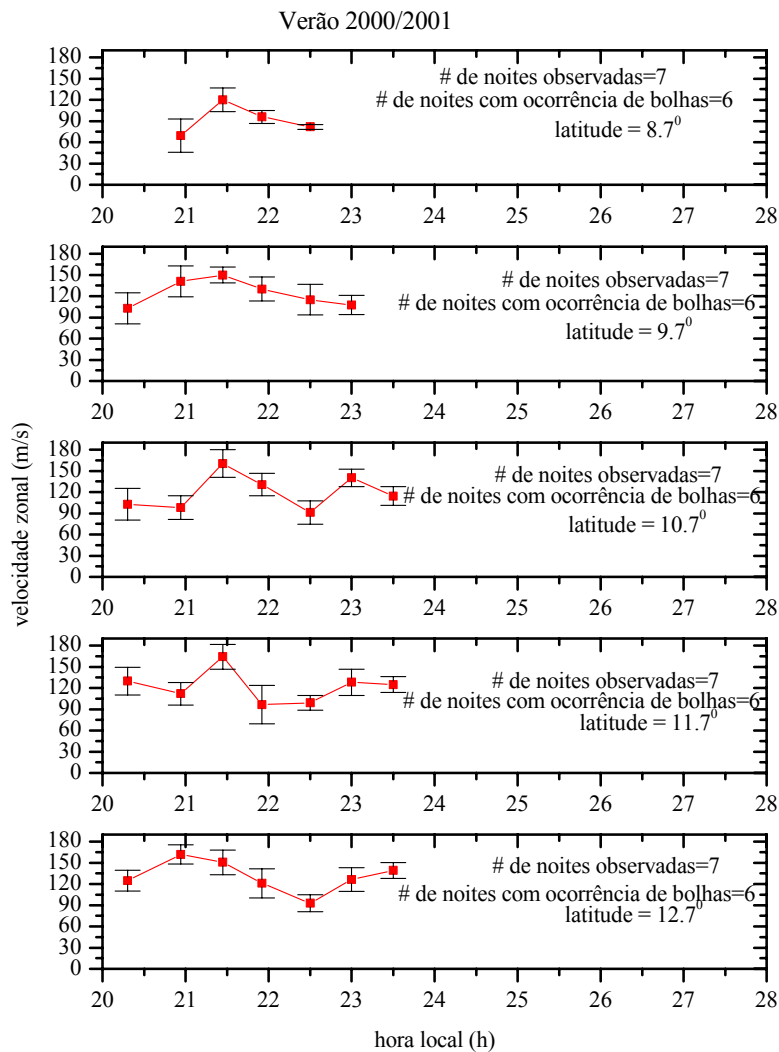


Fig. 5.4 - Comportamento médio da velocidade zonal das bolhas de plasma, para o período de verão na região tropical, durante período de atividade solar alta.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Foi analisado um ano de dados do imageador instalado em São João do Cariri, no período de setembro de 2000 a outubro de 2001 com o objetivo de estudar o comportamento dinâmico noturno e sazonal das bolhas de plasma durante períodos de atividade solar alta. Esse estudo mostra que a frequência de ocorrência das bolhas de plasma é muito baixa entre os meses de maio a agosto e bastante elevada durante os meses de outubro a março.

Conforme foi discutido no Capítulo 5 deste trabalho, já está bem estabelecido que existe uma forte correlação entre a magnitude do pico pré-reversão da deriva vertical da camada F, ao entardecer, e a ocorrência de bolhas de plasma.

Para calcularmos a deriva zonal das bolhas de plasma como função da hora local e latitude, primeiramente linearizamos as imagens como descrito no Capítulo 4.

Durante o período de setembro de 2000 a outubro de 2001, foi realizado o estudo do comportamento noturno e latitudinal da deriva zonal das bolhas de plasma na região tropical, relativo a condições de atividade geomagnética calma e atividade solar alta. O comportamento noturno para o período de verão mostra que a velocidade zonal de plasma é alta no início da noite (20:00h às 22:00 h) e, após esse horário, a velocidade diminui lentamente. A velocidade média máxima de plasma foi de 170 m/s.

Uma outra característica da deriva zonal das bolhas é a presença de uma variação latitudinal entre 20:00 e 23:00 horas, sendo que a magnitude é mais elevada em latitudes menores.

Tendo uma visão global dos resultados aqui obtidos, podemos concluir que este trabalho é mais uma contribuição para o conhecimento do comportamento dinâmico da velocidade zonal e morfologia das bolhas de plasma durante período de atividade magnética calma na região tropical e durante atividade solar alta e baixa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarons, J.; Mendillo, M.; Yantosca, R. GPS phase fluctuations in the equatorial region during the MISETA 1994 campaign. **Journal of Geophysical Research**, v.101, no. A12, p. 26.851-26.862, 1996.
- Abdu, M.A.; Bittencourt, J.A.; Batista, I.S. Magnetic declination of the equatorial F-region dynamo electric field development and spread F. **Journal of Geophysical Research**, v 86, no. A13, p. 11.443 -11.446, 1981.
- Abdu, M.A.; Muralikrishna, P.; Batista, I.S.; Sobral, J.H.A. Rocket observation of equatorial plasma bubbles over natal, Brazil, using a high-frequency capacitance probe. **Journal of Geophysical Research**, v. 66, no. A5, p. 7689-7695, 1991.
- Anderson, D.N.; Heelis, R.A.; Mclure, J.P. Calculated nighttime eastward drift velocities at low latitudes and their solar cycle dependence. **Annales Geophysicae**, v.5, no.3, p. 435-442, 1987.
- Basu, S.; Kelley, M.C. A review of recent observations of equatorial scintillations and their relationship to current theories of F region irregularity generation, **Radio Science**, v. 14, no. 3, p. 471-485, 1979.
- Batista, I.S.; Medeiros, R.T.; Abdu, M.A.; Souza, J.R.; Bailey, G.J.; de Paula, E.R. Equatorial ionospheric vertical plasma drift model over the Brazilian region. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, no. A11, p. 10.887-10.892, 1986.
- Bittencourt, J.A.; Abdu, M.A. A theoretical comparison between apparent and real vertical ionization drift velocities in the equatorial F region. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, no. A4, p. 2451-2454, 1981.
- Bittencourt, J.A.; Sahai, Y.; Fagundes, P.R.; Takahashi, H. Simultaneous observations of equatorial F-region plasma depletions and thermospheric winds. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 59, no.9, p. 1049-1059, 1997.
- Booker, H.G.; Wells, H.W. Scattering of radio waves by the F-region of the ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 43, no.2-3, p. 249-256, 1938.
- Broadfoot, A.L.; Kendall, K.R. Airglow spectrum 3100-10000 A. **Journal of Geophysical Research**, v. 73, no.1, p. 426-429, 1968.
- Chamberlain, J.W. **Theory of planetary atmospheres**. New York: Academic Press, 1978.

Clemesha, B.R. An investigation of the irregularities in the F-region associated with equatorial type spread-F, **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 26, no.1, p. 91-112, 1964.

Coley, W.R.; Heelis, R.A. Low latitude zonal and vertical ion drifts seen by DE-2. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, no.A6, p. 6751-6761, 1989.

Elvey, C.T. Note on the spectrum of the airglow in the red region. **Astrophysics Journal**, v.111, p. 432-433, 1950.

Farley, D.T.; Balsley, B.B.; Woodman, R.F.; McClure, P.J. Equatorial spread F: Implications of VHF radar observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, no. 34, p. 7199-7216, 1970.

Fejer, B.G.; Gonzales, D.T.; Farley, D.T.; Kelley, M.C. Equatorial electric fields during magnetically disturbed conditions 1. The effect of the interplanetary magnetic field. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, no.A12, p. 5797-5802, 1979.

Fejer, B.G.; Kudeki, E.; Farley, D.T. Equatorial F region zonal plasma drifts. **Journal of Geophysical Research**, v.90, no. A12, p. 12.249-12.255, 1985.

Haerendel, G. **Theory of equatorial spread-F**, repot. Berlin: Max Planck Institute fur Extraterrestre Physics, 1973.

Kelley, M.C. The Earth's ionosphere: **Plasma physics and electrodynamics**. Academic Press: San Diego, CA., 1989 (Int.Geophys. Ser43).

Lanyi, G.E.; Roth, T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and Beacon satellite-observations. **Radio Science**, v. 23, no. 4, p. 483-492, 1988.

Maekawa, R. **Development mult-color all sky airglow CCD imaging system**. Kyoto University, Dec, 1998 (RASC Research Report).

Medeiros, A.F. **Observações de ondas de gravidade através do imageamento da aeroluminescência**. São José dos Campos. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – INPE, 2002.

Mende, S.B.; Eather, R.H. Monochromatic all-sky observations and auroral precipitation patterns. **Journal of Geophysical Research**, v.81, no.22, p.3771, 1976.

Mendillo, M.; Baumgardner, J. Airglow characteristics of equatorial plasma depletions. **Journal of Geophysical Research**, v.87, no. A9, p. 7641-7647, 1982.

Mendillo, M.; Lin, B.; Aarons, J. The application of GPS observations to equatorial aeronomy, **Radio Science**, v.35, no.3, p. 885-904, 2000.

Ossakow, S.L.; Zalesak, S.T.; McDonald, B.E.; Chaturvedi, P.K. Nonlinear equatorial spread F: Dependence on altitude of the F peak and bottomside background electron density gradient scale length. **Journal of Geophysical Research**, v.84, no. A1, p.17-29, 1979.

Peterson, V.I.; Steiger, W.R. F-region nightglow emissions of atomic oxygen. **Journal of Geophysical Research**, v.71, no.9, p. 2267-2277, 1966.

Peterson, V.L. e Vanzandt, T.E., O(¹D) Quenching in ionospheric F-region. **Planetary and Space Science**, v.17, no.10, p.1725, 1969.

Pimenta, A.A.; Fagundes, P.R.; Bittencourt, J.A.; Sahai, Y. Relevant aspects of equatorial plasma bubbles under different solar activity conditions. **Advances in Space Research**, v. 27, no.6-7, p. 1213-1218, 2001.

Pimenta, A.A.; Fagundes, P.R.; Bittencourt, J.A.; Sahai, Y.; Gobbi, D.; Medeiros, A.F.; Taylor, M.J.; Takahashi, H. Ionospheric plasma bubble zonal drift: a methodology using OI 630 nm all-sky imaging systems. **Advances in Space Research**, v. 27, no.6-7, p. 1219-12124, 2001.

Rayleigh, IV LORD. Absolute intensity of the aurora line in the night sky and the number of atomic transitions. **Proc. Roy. Soc**, v.A, no.131, p. 376-381, 1931.

Reid, G.C. The formation of small-scale irregularities in the ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v.73, no.5, p. 1627-1640, 1968.

Rishbeth, H., Polarization fields produced by winds in the equatorial Fregion. **Planetary and Space Science**, v.19, no.1-4, p. 357-369, 1971a.

Rishbeth, H. The F-layer dynamo. **Planetary and Space Science**, v.19, no.3, p. 263-267, 1971b.

Sahai, Y.; Aarons, J.; Baumgardner, J.; Bittencourt, J.A.; Takahashi, H. OI 630 nm imaging observations of the equatorial plasma depletions at 16°S dip latitude. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.56, no.11, p. 1461-1475, 1994.

Slipher, V.W. On the general auroral illumination of the sky and the wavelength of the chief aurora line. **Astrophysics Journal**, v.49, no.7, p. 266-275, 1919.

Sobral, J.H.A.; Abdu, M.A.; Sahai, Y. Equatorial plasma bubble eastward velocity characteristics from scanning airglow photometer measurements over Cachoeira Paulista. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.47, no. 8-10, p. 895-900, 1985.

Sobral, J.H.A.; Abdu, M.A.; Takahashi, H.; Sawant, H.; Zamlutti, C.J.; Borba, G.L. Solar and geomagnetic activity effects on nocturnal zonal velocities of ionospheric plasma depletions. **Advances in Space Reserach**, v.24, no.11, p. 1507-1510, 1999.

Tsunoda, R.T. Control of the seasonal and Longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in integrated E region Pedersen conductivity. **Journal of Geophysical Research**, v.90, no. A1, p. 447-456, 1985.

Weber, E.J.; Buchau, J.; Eather, R.H.; Mende, S.B. North-south aligned equatorial airglow depletions. **Journal of Geophysical Research**, v.83, no. A2, p. 712-716, 1978.

Woodman, R.F. East-west ionospheric drifts at the magnetic equator. **Space Research**, v.12, no.12, p. 968-974, 1972.

Zalesak, S.T.; Ossakow, S.L.; Chaturvedi, P.K. Nonlinear equatorial spread F: The effect of neutral wind and background Pedersen conductivity. **Journal of Geophysical Research**, v.87, no. A1, p. 151-166, 1982.