



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15246-TDI/1333

**ESTUDOS DE IRREGULARIDADES NO PLASMA DA
CAMADA IONOSFÉRICA F EQUATORIAL E DE BAIXAS
LATITUDES NO SETOR LONGITUDINAL BRASILEIRO**

Cláudia Maria Nicoli Cândido

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos
Drs. Paulo Roberto Fagundes e Delano Gobbi, aprovada em 18 de março de 2008.

O original deste documento está disponível em:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.12.12.07>>

INPE
São José dos Campos
2008

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva e Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant'Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15246-TDI/1333

**ESTUDOS DE IRREGULARIDADES NO PLASMA DA
CAMADA IONOSFÉRICA F EQUATORIAL E DE BAIXAS
LATITUDES NO SETOR LONGITUDINAL BRASILEIRO**

Cláudia Maria Nicoli Cândido

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos
Drs. Paulo Roberto Fagundes e Delano Gobbi, aprovada em 18 de março de 2008.

O original deste documento está disponível em:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.12.12.07>>

INPE
São José dos Campos
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C161e Cândido, Cláudia Maria Nicoli.

Estudos de irregularidades no plasma da Camada Ionosférica F Equatorial e de baixas latitudes no Setor Longitudinal Brasileiro/ Cláudia Maria Nicoli Cândido. – São José dos Campos: INPE, 2008.

286p. ; (INPE-15246-TDI/1333)

1. Espalhamento da Região F. 2. Irregularidades de plasma. 3. Distúrbios ionosféricos propagantes. 4. Luminescência atmosférica. 5. Bolhas de plasma. I. Título.

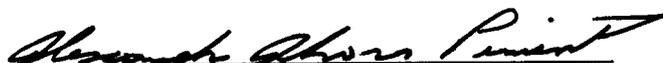
CDU 551.510.535

Copyright © 2008 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, microfilmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2008 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Doutor(a) em
Geofísica Espacial

Dr. Alexandre Alvares Pimenta



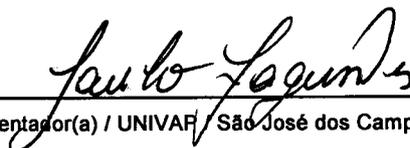
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Delano Gobbi



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Paulo Roberto Fagundes



Orientador(a) / UNIVAP / São José dos Campos - SP

Dra. Alícia Luisa Clúa de Gonzalez Alarcon



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Yogeshwar Sahai



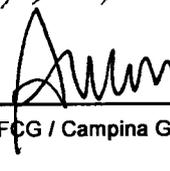
Convidado(a) / UNIVAP / São José dos Campos - SP

Dr. Washington Luiz Carvalho Lima



Convidado(a) / UFRPA / Palmas - TO

Dr. Amauri Fragoso de Medeiros



Convidado(a) / UFCG / Campina Grande - PB

Aluno (a): Claudia Maria Nicoli Cândido

São José dos Campos, 18 de Março de 2008

“A adversidade põe à prova os espíritos”

Shakespeare

Dedico este trabalho a meu pai
Antônio Cândido
(in memoriam)

AGRADECIMENTOS

- Aos Drs. Paulo Roberto Fagundes e Delano Gobbi pela orientação e pela oportunidade de desenvolver este trabalho;
- Ao Conselho Nacional de Pesquisas, CNPq, pelo suporte financeiro;
- Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, pela oportunidade de pesquisa em Geofísica Espacial; aos seus pesquisadores, professores e coordenadores e funcionários, em particular aos Drs. Jonas R. de Souza e Alexandre Álvares Pimenta pelo apoio e pela cordialidade em diversas oportunidades.
- Ao Observ. Nacional de Astrofísica, LNA, pelo suporte técnico ao imageador da UNIVAP;
- Ao Dr. Yogeshwar Sahai pelas sugestões e discussões úteis e respeitadas em diversas oportunidades;
- Ao Dr. Alexandre Álvares Pimenta pela concessão de dados ópticos do imageador do Dr. Mendillo, pela cordialidade e pelas discussões bastante úteis ;
- Aos professores da UNIVAP: Dr. José Ricardo Abalde pela concessão de dados dos imageadores da UNIVAP; Dr. Fabio Becker Guedes pelas discussões e pela ajuda no processamento de dados ionosféricos; Dr. Gabriel Hickel pela amizade e anos de cordial convivência; MSc. Valdir Gil Pillat pela colaboração no desenvolvimento de rotinas computacionais; Dr. Cristiano M. Wrasse pelas sugestões e discussões sobre ondas de gravidade.
- Aos Drs. M. Abdu e Inez S. Batista pela concessão de dados da ionossonda de São Luís e de Cachoeira Paulista e à Maria Goreti pela gentileza e pela presteza no processamento dos mesmos.
- Aos Drs. Delano Gobbi e Hisao Takahashi pela concessão de dados ópticos do imageador de Cachoeira Paulista.
- Aos companheiros de curso: Marcio Muella, pela amizade sincera e pela cordialidade, à Virginia Klausner e Dinalva Ayres, pelos anos de convivência e companheirismo e aos demais colegas de trabalho.
- A Andrea Antunes Pereira, pela amizade sincera e pelo apoio.
- A minha mãe pela colaboração e apoio durante vários anos mesmo nos momentos mais difíceis da sua vida.
- Aos meus amados Fábio e Lucas, as pessoas mais importantes da minha vida, pelo constante e imprescindível afeto de todos os dias.

RESUMO

Nesta tese de doutorado são analisadas duas classes de irregularidades ionosféricas observadas opticamente nas regiões de baixas latitudes do setor brasileiro: Irregularidades de plasma de grande escala, ou Bolhas de plasma, e Distúrbios ionosféricos propagantes de média escala, (do inglês, *MSTIDs – Medium scale traveling ionospheric Disturbances*). As bolhas de plasma são observadas com as imagens das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm obtidas com dois imageadores *all-sky* instalados em São José dos Campos, no campus da UNIVAP no ano de 2000. As imagens das duas emissões obtidas simultaneamente revelaram a presença de estruturas finas presentes nas imagens da emissão OI 777,4 nm e não observáveis nas imagens da emissão OI 630,0 nm. A análise quantitativa das estruturas revelou escalas espaciais entre 10 e 150 km, e grande extensão latitudinal das mesmas. Além disto, inferimos o nível de depleção no interior e exterior das estruturas, e nas regiões externa e interna das bolhas. Em geral o nível de depleção na região das estrias não ultrapassou 3% enquanto entre a região interna e externa da bolha variou entre 11 e 34%. Nós discutimos possíveis mecanismos de formação de estruturas secundárias nas bolhas, como a variação da condutividade Pedersen e a ação de campos elétricos verticais bipolares no interior das depleções. Dentro do tema bolhas de plasma apresentamos também um estudo inédito da altura da emissão OI 630,0 nm determinada com a técnica de triangulação, com imageadores *all-sky* instalados em duas diferentes localidades separadas por algumas dezenas de quilômetros. A função correlação cruzada de duas imagens obtidas simultaneamente revela a altura onde a emissão sofre maior flutuação devido a presença de irregularidades. A segunda classe de irregularidades ionosféricas estudada neste trabalho foram os Distúrbios ionosféricos propagantes de média escala, ou *MSTIDs* (do inglês, *Medium scale traveling ionospheric disturbances*) observadas opticamente na região de baixas latitudes do setor brasileiro. A análise de sete anos de imagens da emissão OI 630,0 nm obtidas com um imageador *all-sky* instalado em Cachoeira Paulista (INPE), revelou que os *MSTIDs* apresentam-se como bandas escuras alternadas ou não com bandas claras alinhadas na direção sudoeste-nordeste, propagando-se para noroeste. A análise estatística destes dados mostrou que a maior taxa de ocorrência é observada em períodos de baixa atividade solar e nos meses próximos ao solstício de inverno no hemisfério sul. Dados ionosféricos complementares mostraram que a passagem dos *MSTIDs* está associada a variações na altura da base da camada F, bem como a depleções na densidade do plasma. Além disto, foi detectada a ocorrência de Spread-F do tipo frequência nas seqüências de ionogramas obtidas durante a passagem das bandas. Estas características indicam fortemente a procedência dos *MSTIDs*, nas médias latitudes do hemisfério sul.

STUDY OF THE IONOSPHERIC IRREGULARITIES OBSERVED ON THE BRAZILIAN LOW LATITUDE SITES

ABSTRACT

In this work we have analyzed two categories of ionospheric irregularities observed over Brazilian low latitudes: plasma bubbles and medium scale traveling ionospheric disturbances. Plasma bubbles have been observed with simultaneous imaging of the OI 630.0 nm and OI 777.4 nm using two similar wide-angle imaging systems installed at Sao Jose dos Campos (23.2 S, 45.6 W) in 2000. The simultaneous OI 630.0 nm and OI 777.4 nm images have revealed the presence of ray-like structures inside the plasma bubbles observed on the OI 777.4 nm and not in the OI 630.0 nm. We have analyzed the zonal width of the fine structures and we have observed spatial scales from 10 to 150 km. The depletion on the electron densities between the ray-like structures have ranged from 1 to 3%, and we have found depletions from 11 to 34% between the outside and inside the bubbles. We have discussed the possible influence of the Pedersen conductivities outside and inside the bubbles and the action of bipolar vertical electric fields on the formation of the secondary structures, like bifurcations and ray-like structures. Also, we have presented a study based on triangulation method to determine OI 630.0 nm emission heights using simultaneous images acquired at two separated sites during the occurrence of the plasma bubbles. Applying cross correlation analysis we have determined the height where the OI 630.0 nm emission is most fluctuated by the presence of the plasma bubbles. Also, we have analyzed medium scale traveling ionospheric disturbances, *MSTIDs* observed with a wide-angle imaging system at Cachoeira Paulista (22,7S, 45,0 W, mag. lat. 13,2 S) during seven years, including low, medium, and high solar activities. The *MSTIDs* are optical signatures in which dark band structures propagates along southeast to northwest direction in the southern hemisphere followed or not by light bands propagating in the same direction. The band structures observed in the OI 630.0 nm emission images are associated with the vertical movements of the F-layer and with depletions in the foF2 values. Also, the occurrence of spread-F during the passage of the *MSTIDs* was observed. Performing a statistical analysis of the *MSTIDs* events we have verified an inverse dependence of the occurrence frequency of the *MSTIDs* with the solar activity and a maximum occurrence near the June-solstice months (winter in the southern hemisphere). All these features seem indicates that the *MSTIDs* observed over Brazilian low latitude sector are originated in South American mid-latitudes.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	27
-------------------------	----

CAPÍTULO 2

A ATMOSFERA NEUTRA E A IONOSFERA	35
2.1 – TERMOSFERA.....	37
2.2 – EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS PARA A TERMOSFERA	38
2.2.1 – Equação da Continuidade	38
2.2.2 – Equação de Estado	38
2.2.3 – Equação de Movimento.....	39
2.2.4 – Equação da Conservação da Energia Termodinâmica.....	41
2.3 – IONOSFERA	42
2.3.1 – Formação e Estrutura	42
2.3.2 – Descrição das Camadas Ionosféricas	44
2.4 – DINÂMICA IONOSFÉRICA	46
2.4.1 – Equação da Continuidade	46
2.4.2 – Equação do Movimento.....	47
2.4.3 – Arraste Iônico – Acoplamento Termosfera-Ionosfera	52
2.4.4 – Derivas do Plasma Ionosférico Da Região Equatorial	53
2.5 – IRREGULARIDADES DO PLASMA DA REGIÃO F EQUATORIAL	56
2.5.1 – Um Breve Panorama Histórico	58
2.5.2 – Quanto à Nomenclatura Empregada no Estudo das Irregularidades	57
2.5.3 – Quanto à Geração e às Causas das Irregularidades.....	60
2.5.4 – Instabilidade de Rayleigh-Taylor	61
2.5.4.1 – Teoria Linear	61
2.5.4.2 – Instabilidade generalizada de Rayleigh-Taylor	63
2.5.4.3 – Gradientes de Condutividade Pedersen.....	64
2.5.5 – Comentários Sobre as Condições ao Desenvolvimento do Spread-F	65
2.5.6 – Bolhas de Plasma.....	66

2.5.6.1 – Morfologia e Dinâmica	66
2.5.7 – Variabilidade	68
2.5.7.1 – Variabilidade com o Ciclo Solar	68
2.5.7.2 – Variabilidade Sazonal	69
2.5.7.3 – Variabilidade Diária	70
2.5.7.4 – Variabilidade com Atividade Magnética	71
2.6 – DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS PROPAGANTES (<i>TIDS</i>)	72
2.6.1 – Aspectos Gerais	72
2.6.2 – Detecção e Observação dos <i>MSTIDS</i>	74
2.6.3 – Manifestação Óptica dos <i>MSTIDS</i>	75
2.6.4 – Instabilidade de Perkins	81

CAPÍTULO 3

FOTOQUÍMICA DAS EMISSÕES FOTOLUMINESCENTES DA REGIÃO TERMOSFÉRICA	87
3.1 – FENÔMENOS RADIATIVOS NA ATMOSFERA SUPERIOR	87
3.2 – COMPOSIÇÃO DA ATMOSFERA SUPERIOR	88
3.3 – PRODUÇÃO DOS ESTADOS EXCITADOS	90
3.4 – TRANSIÇÕES RADIATIVAS	91
3.5 – EMISSÕES DO OXIGÊNIO ATÔMICO	93
3.5.1 – A Emissão OI 630,0 nm	94
3.5.2 – A Emissão OI 777,4 nm	98
3.2.6 – Breve Panorama de Estudos das Emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm	101

CAPÍTULO 4

INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA	105
4.1 – HISTÓRICO	105
4.2 – IMAGEAMENTO ÓPTICO	106
4.2.1 – Sistema de Imageamento <i>All-Sky</i> Equipado com Dispositivo CCD	107
4.2.1.1 – Dispositivo CCD	108
4.2.1.2 – Filtros de Interferência	108
4.2.2 – Condições de Observação	109
4.2.3 – Área de Cobertura da Lente <i>All-Sky</i> ao Redor do Zênite	110
4.2.4 – Sistemas de Imageamento <i>All-Sky</i> Utilizados neste Trabalho	111
4.3 – PROCESSAMENTO DE IMAGENS	115

4.3.1 – Armazenamento de Dados	115
4.3.2 – Redução de Dados	116
4.3.3 – Geometria das Observações da Luminescência Atmosférica	117
4.3.4 – Calibração da Lente e Projeção das Imagens	120
4.3.4.1 – Mapa do Fundo Estelar	120
4.3.4.2 – Cálculo do Centro da Imagem	121
4.3.4.3 – Cálculo do Ângulo de Rotação	121
4.3.4.4 – Calibração da Lente Olho-de-Peixe	122
4.3.4.5 – Projeção das Imagens	122
4.4 – SONDAGEM DA CAMADA POR TÉCNICAS DE RADIOFREQUÊNCIA	124
4.4.1 – Densidade Eletrônica e Frequência de Plasma	124
4.4.2 – Propagação de Ondas em um Plasma Magnetizado	126
4.4.3 – O Ionograma	128
4.4.4 – Altura Virtual da Camada Ionosférica	128
4.4.5 – Ionossonda utilizada neste Trabalho	129

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE ESTRUTURAS SECUNDÁRIAS OBSERVADAS EM BOLHAS DE PLASMA	131
5.1 – <i>SPREAD-F</i> EQUATORIAL E BOLHAS DE PLASMA	133
5.2 – EXTENSÃO ZONAL E LATITUDINAL DAS ESTRIAS	134
5.2.1 - Noite de 23-24 de Outubro de 2000	138
5.2.1.1 – Estruturas Observadas	138
5.2.1.2 – Largura Zonal das Estruturas	142
5.2.1.3 – Evolução Vertical da bolha de Plasma	147
5.2.2 – Noite de 31 de Outubro - 01 de Novembro de 2000	149
5.2.3 – Noite de 15-16 de Outubro de 2001	155
5.2.4 – A Extensão Zonal e Latitudinal das Estruturas Observadas	164
5.3 – Densidade eletrônica no interior e no exterior da bolha – nível de depleção	173
5.3.1 – Calibração da Densidade Eletrônica	175
5.3.2 – Variação Latitudinal da Densidade Eletrônica	177
5.4 – DISCUSSÃO SOBRE PROCESSOS DE FORMAÇÃO E DE EVOLUÇÃO DE ESTRUTURAS SECUNDÁRIAS	185
5.4.1 – A Condutividade Pedersen e a Formação das Estruturas Secundárias	190

5.4.2 – Os Campos Elétricos e a Formação de Estruturas Secundárias.....	192
---	-----

CAPÍTULO 6

DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS PROPAGANTES DE MÉDIA ESCALA

RESULTADOS	197
6.1 – OBSERVAÇÕES ÓPTICAS DAS BANDAS TERMOSFÉRICAS.....	198
6.1.1 – Noite de 27-28 de Maio de 1995	199
6.1.2 – Noite de 30-31 de Agosto de 1995	201
6.1.3 – Noite de 31 de Maio/01 de Junho de 1997	202
6.1.4 – Noite de 07-08 de Setembro de 1997.....	204
6.1.5 – Noite de 11-12 de Junho de 1996	205
6.1.6 – Noite de 18-19 de Julho de 1998.....	210
6.1.7 – Noite de 28-29 de Julho de 1998.....	218
6.1.8 – Noite de 16-17 de Julho de 1999.....	222
6.2 – SUMÁRIO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	226
6.3 – ANÁLISE ESTATÍSTICA	230
6.3.1 – Variação com a Atividade Solar.....	231
6.3.1.1 – Taxa de Crescimento da Instabilidade de Perkins.....	233
6.3.1.2 – Absorção Magnetohidrodinâmica	235
6.3.2 – Variação Anual	238
6.3.3 – Tempo de Vida, Direção e Velocidades de Propagação	242
6.3.4 – Sumário dos Principais Resultados Obtidos com a Análise Estatística	244
6.4 – POSSÍVEIS FONTES DAS BANDAS TERMOSFÉRICAS	245

CAPÍTULO 7

ALTURA DA EMISSÃO OI 630,0 nm DURANTE A OCORRÊNCIA DE BOLHAS DE PLASMA

.....	251
7.1 - MÉTODO DA TRIANGULAÇÃO	254
7.2 - NOITE DE 16-17 DE OUTUBRO DE 2003.....	258
7.3 – NOITE DE 12-13 DE AGOSTO DE 2004	261
7.4 – SUMÁRIO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	264

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES	267
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	275

LISTA DE FIGURAS

2.1: Diagrama esquemático da atmosfera terrestre.....	36
2.2: Perfil de concentração iônica em função da altura	36
2.3: Ilustração representativa da produção da ionização na atmosfera.....	43
2.4: Diagrama esquemático da densidade eletrônica	45
2.5: Velocidades de deriva iônica vertical para várias origens de ventos.....	52
2.6: Representação esquemática do dínamo da região E	54
2.7: Padrão de deriva de plasma em baixas latitudes	55
2.8: Densidade eletrônica calculada ($\log_{10} n_e$).....	55
2.9: Derivas zonais de plasma da região F equatorial.....	56
2.10: Ionogramas representativos sem e com espalhamento.. ..	57
2.11: Diferenças entre <i>Spread-F</i> da base da camada e bolhas de plasma	60
2.12: Diagrama esquemático da instabilidade de Rayleigh-Taylor	61
2.13: Imagens com e sem bolhas obtidas com um imageador <i>all-sky</i>	67
2.14: Imagem de uma banda termosférica obtida com um imageador <i>all-sky</i>	77
2.15: Seqüência de imagens da passagem de bandas termosféricas.....	79
2.16: Ionogramas exibindo espalhamento do sinal de rádio durante a passagem de 80 bandas termosféricas de média escala	80
2.17: Sistema de coordenadas adotado por Perkins (1973).....	83
2.18: Simulações efetuadas Kelley et al. 2003, considerando-se três comportamentos de U_s	85
3.1: Composição atmosférica média em condições de mínimo solar ao longo de um dia calmo, em latitudes médias.....	89
3.2: Diagrama de Níveis de Energia do Oxigênio Atômico.	94
3.3: Diagrama parcial dos níveis de energia para o oxigênio atômico.....	95
4.1: Sistema de imageamento <i>all-sky</i> equipado com dispositivo CCD.	107
4.2: Representação de um espectro continuum, uma linha espectral, um filtro passa-banda e um filtro retangular equivalente.. ..	109
4.3: Geometria da camada para determinação da área de cobertura.. ..	110
4.4: Instalações do imageador e seus elementos principais	112
4.5: Imageador <i>all-sky</i> equipado com câmera fotográfica.	113
4.6: Localização geográfica dos sítios de observação	114
4.7: Imagens originais ou cruas registradas pela câmera CCD.....	116
4.8: Geometria de observação da camada luminescente (<i>airglow</i>)	117

4.9: Representação da transformação de coordenadas.....	119
4.10: Fundo estelar obtido com o programa SkyMap	121
4.11: Imagens linearizadas da emissão OI 630,0 nm.....	123
4.12: Representação gráfica de um Ionograma.....	128
5.1: Variação noturna dos parâmetros $h'F$ e h_mF_2	134
5.2: Imagem linearizada da emissão OI 777,4 nm em 15/16 de out. de 2001.....	137
5.3: Seqüência temporal de imagens linearizadas da emissão OI 777,4 nm na noite 14023/24 de outubro de 2000.....	140
5.4: Seqüência temporal de imagens linearizadas das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4143 nm obtidas na noite 23/24 de outubro de 2000.....	141
5.5: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas nos horários 19:41 LT e 19:51 LT e gráficos das intensidades na noite de 23 de outubro de 2000	143
5.6: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas nos horários 19:55 LT e 20:05 LT e gráficos das intensidades na noite de 23 de outubro de 2000	144
5.7: Imagens da emissão OI 777,4152 nm linearizadas nos horários 20:11 LT e 20:18 LT e gráficos das intensidades na noite de 23 de outubro de 2000.....	145
5.8: Evolução temporal das bolhas de plasma em 23-24 de outubro de 2000 com o imageamento da emissão OI 777,4 nm.	147
5.9: Seqüência temporal de imagens linearizadas das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm obtidas na noite 31 de outubro de 2000 – parte 1.....	151
5.10: Seqüência temporal de imagens linearizadas das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm obtidas na noite 31 de outubro de 2000 – parte 2.....	152
5.11: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas nos horários 19:55 LT e 20:05 LT e gráficos das intensidades na noite de 31 de outubro/01 de novembro de 2000 – parte 1.....	153
5.12: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas nos horários 19:55 LT e 20:05 LT e gráficos das intensidades para 31 de outubro/01 de novembro de 2000 – parte 2	154
5.13: Seqüência temporal de imagens linearizadas das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm para 15-16 de outubro de 2001 – parte 1.....	156
5.14: Seqüência temporal de imagens linearizadas das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm para 15-16 de outubro de 2001 – parte 2.....	157
5.15: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas para 21:13 LT e 21:23 LT e gráficos das intensidades na noite de 15/16 de outubro de 2001 – parte 1	159
5.16: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas para 21:13 LT e 21:23 LT e gráficos das intensidades na noite de 15/16 de outubro de 2001 – parte 2.....	160
5.17: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas para 21:13 LT e 21:23 LT e gráficos das intensidades na noite de 15/16 de outubro de 2001 – parte 1.....	161

5.18: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas para 21:13 LT e 21:23 LT e gráficos das intensidades na noite de 15/16 de outubro de 2001 – parte 2.....	162
5.19a: Número de ocorrência de bolhas em função da sua largura para 23-24 de outubro de 2000 e 15-16 de outubro de 2001.....	165
5.19b: Número de ocorrência de bolhas para 23-24 de outubro de 2000 considerando-se a soma das observações nas três latitudes selecionadas.	166
5.19c: Número de ocorrência de bolhas para 15-16 de outubro de 2001 considerando-se a soma das observações nas três latitudes selecionadas.....	167
5.20a: Número de ocorrências de bifurcações em função da sua largura para 31 de outubro - 01 de novembro de 2000 e 15-16 de outubro de 2001	168
5.20b: Número de ocorrências de bifurcações para 31 de outubro - 01 de novembro de 2000 considerando-se a soma das três latitudes selecionadas	169
5.20c: Número de ocorrências de bifurcações para 15-16 de outubro de 2001 considerando-se a soma das observações nas três latitudes selecionadas.	169
5.21a: Número de ocorrências de estrias em função da sua largura para as noites de 23-24 de outubro de 2000 e 15-16 de outubro de 2001.....	170
5.21b: Número de ocorrências de estrias para 23-24 de outubro de 2000 considerando-se a soma das observações nas três latitudes selecionadas.	171
5.21c: Número de ocorrências de estrias para 15-16 de outubro de 2001 considerando-se a soma das observações nas três latitudes selecionadas.	172
5.22: Calibração da densidade eletrônica	176
5.23a: Imagem-densidade da noite de 15-16 de outubro de 2001	178
5.23b: Varreduras longitudinais da densidade eletrônica obtidas a partir de imagens da emissão OI 777,4 nm para 15-16 de outubro de 2001	178
5.24a: Imagem-densidade para 23-24 de outubro de 2000.....	179
5.24b: Varreduras longitudinais da densidade eletrônica obtidas a partir de imagens da emissão OI 777,4 nm para 23-24 de outubro de 2000	179
5.25a: Imagem-densidade para 31 de outubro - 01 de novembro de 2000.....	180
5.25b: Varreduras longitudinais da densidade eletrônica a partir de imagens da emissão OI 777,4 nm para 31 de outubro – 01 de novembro 2000	180
5.26: Seqüência das imagens da emissão OI 777,4 nm obtidas na noite de 23-24 de outubro de 2000.....	185
5.27: Esboço gráfico bidimensional representativo das bolhas de plasma observadas na noite de 23-24 de outubro de 2000	186
5.28: Seqüência das imagens da emissão OI 777,4 nm obtidas na noite de 31 de outubro/01 de novembro de outubro de 2000.....	187
5.29: Diagrama representativo das bolhas de plasma observadas na noite de 31 de outubro/01 de novembro de 2000	188

5.30: Seqüência das imagens da emissão OI 777,4 nm obtidas na noite de 15-16 de outubro de 2001	189
5.31: Diagrama representativo das bolhas de plasma observadas na noite de 15-16 de outubro de 2001	189
5.32: Diagramas esquemáticos de várias configurações de bolhas de plasma no plano equatorial.....	194
6.1: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador <i>all-sky</i> na noite de 27-28 de maio de 1995 em Cachoeira Paulista.....	200
6.2: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador <i>all-sky</i> na noite de 30-31 de agosto de 1995 em Cachoeira Paulista.....	202
6.3: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador <i>all-sky</i> na noite de 31 de maio/01 de junho de 1997 em Cachoeira Paulista	203
6.4: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador <i>all-sky</i> na noite de 07-08 de setembro de 1997, em Cachoeira Paulista	204
6.5: Seqüência de imagens da emissão OI 630,0 nm obtidas com imageador <i>all-sky</i> na noite de 11-12 de junho de 1996, em Cachoeira Paulista	204
6.6: Variação noturna da altura virtual da base da camada F e da freqüência crítica de plasma na noite de 11-12 de junho de 1996.....	206
6.7: Seqüência de ionogramas obtida na noite de 11-12 de junho de 1996 em Cachoeira Paulista	209
6.8: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador <i>all-sky</i> na noite de 18-19 de julho de 1998 em Cachoeira Paulista	210
6.9: Variação noturna da altura da base da camada F e da freqüência crítica de plasma na noite de 18-19 de julho de 1998.	212
6.10: Variação da altura real da camada F.....	214
6.11: Seqüência de ionogramas obtida na noite de 18-19 de julho de 1998 em Cachoeira Paulista.....	216
6.12: Seqüência de ionogramas obtida na noite de 18-19 de julho de 1998 em Cachoeira Paulista	217
6.13: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador <i>all-sky</i> na noite de 28-29 de julho de 1998 em Cachoeira Paulista	218
6.14: Variação noturna da altura da base da camada F e da freqüência crítica de plasma na noite de 28-29 de julho de 1998.	219
6.15: Variação da altura real da camada F.....	220
6.16: Seqüência de ionogramas obtida na noite de 28-29 de julho de 1998 em Cachoeira Paulista.....	221
6.17: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador <i>all-sky</i> na noite de 16-17 de julho de 1999 em Cachoeira Paulista	222

6.18: Variação da altura virtual da base da camada F e da frequência crítica de plasma na noite de 16-17 de julho de 1999.....	223
6.19: Variação da altura real da camada F na noite de 16-17 de julho de 1999 para as frequências.....	224
6.20: Seqüência de ionogramas obtida na noite de 16-17 de julho de 1999 em Cachoeira Paulista.....	225
6.21: Representação esquemática de diferentes aspectos de superfícies ondulatórias isoiônicas que resultam na observação de <i>Spread-F</i> em ionogramas.....	229
6.22: Relação anual entre número de horas de observação e número de horas de ocorrência dos eventos de bandas termosféricas.....	231
6.23: Percentual anual de ocorrência de bandas termosféricas com relação ao número de horas de observação.....	232
6.24: Taxa de crescimento da Instabilidade de Perkins calculada para atividade solar máxima e atividade solar mínima.....	234
6.25: Padrão de variabilidade sazonal das bandas termosféricas para três diferentes níveis de atividade solar.....	239
6.26: Médias de ocorrência horária mensal das bandas termosféricas determinadas para diferentes níveis de atividade solar.....	239
6.27: Variações anuais da densidade de partículas neutras na atmosfera superior.....	241
6.28: Velocidade de fase e direção de propagação das bandas termosféricas a partir de 28 eventos.....	243
6.29: Polarização de uma zona de baixa condutividade Pedersen na presença de corrente direcionada por ventos.....	244
6.30: Diagrama esquemático das condições de propagação das ondas de gravidade na direção contrária aos ventos, às 22:00 LT.....	248
7.1: Configuração geométrica esquemática da localização dos imageadores e a região comum observada pelos mesmos.....	254
7.2: Imagens da emissão OI 630,0 nm, obtidas simultaneamente em Brazópolis (LNA) e em São José dos Campos (SJC) na noite de 16-17/out./2003, às 21:00 LT.....	256
7.3: Imagens sobrepostas da emissão OI 630,0 nm, obtidas simultaneamente em Brazópolis (LNA) e em São José dos Campos (SJC) na noite de 16-17 de outubro de 2003, às 21:00 LT.....	256
7.4: Região selecionada para análise por correlação cruzada bidimensional das imagens sobrepostas da emissão OI 630,0 nm, obtidas simultaneamente no LNA e em SJC na noite de 16-17 de outubro de 2003, às 21:00 LT.....	257
7.5: Gráfico característico do coeficiente de correlação cruzada em função da altura.....	257
7.6: Seqüência de imagens cruas da emissão OI 630,0 nm obtidas simultaneamente na noite de 16-17 de outubro de 2003 em SJC e no LNA.....	259

7.7: Coeficiente de correlação cruzada, em função da altura para diversos horários na noite de 16-17 de outubro de 2003.....	260
7.8: Variação noturna da altura da emissão OI 630,0 nm na noite de 16-17 de outubro de 2003.....	260
7.9: Comportamento noturno da altura virtual da base da camada F, h'F e da altura do pico da camada, hpF2, na noite de 16-17 de outubro de 2003.....	261
7.10: Seqüência de imagens cruas da emissão OI 630,0 nm obtidas simultaneamente na noite de 12-13 de outubro de 2004 em SJC e no CP	262
7.11: Coeficiente de correlação cruzada, em função da altura para um par de imagens obtido às 22:00 LT, na noite de 12-13 de agosto de 2004.....	263
7.12: Comportamento noturno da altura virtual da base da camada F e da altura do pico da camada, hpF2, na noite de 12-13 de agosto de 2004.....	263

LISTA DE TABELAS

2.1: Características principais dos <i>LSTIDs</i> e <i>MSTIDs</i>	74
3.1: Regras de Seleção para transições atômicas	92
3.2: Produção e Desativação dos Estados Excitados que dão origem a emissões do oxigênio atômico na atmosfera terrestre.	103
4.1: Raio do campo de visão da lente <i>all-sky</i> para diferentes emissão e aberturas da lente.....	111
4.2: Indexação e localização dos imageadores <i>all-sky</i> utilizados neste trabalho	114
4.3: Características da ionossonda CADI.....	130
4.4: Alguns parâmetros ionosféricos extraídos de dados obtidos com ionossondas.....	130
5.1: Intervalos de observação do <i>Spread-F</i>	135
5.2: Nomenclatura adotada na análise das estruturas presentes nas imagens da emissão OI 777,4 nm	138
5.3: Descrição quantitativa das estruturas observadas nas varreduras de intensidade da emissão OI 777,4 nm na noite de 23/24 de outubro de 2000	146
5.4: Variação temporal da latitude da extremidade sul da bolha, altura apex no equador e velocidades médias de deriva vertical de cada bolha.	149
5.5: Larguras zonais das estruturas observadas nas imagens da emissão OI 777,4 nm na noite de 31 de outubro/01 de novembro de 2000.....	156
5.6: Estruturas observadas nas varreduras de intensidade da emissão OI 777,4 nm na noite de 15/16 de outubro de 2001	163
5.7: Níveis de depleção encontrados para diferentes cortes latitudinais para as três noites estudadas.....	181
5.8: Níveis de depleção de bolhas de plasma determinados com diferentes técnicas de observação	184
6.1: Índices de atividade solar e geomagnética.....	199
6.2: Resumo de alguns parâmetros extraídos dos dados ionosféricos	228
6.3: Classificação do ano de observação de acordo com a atividade solar expresso pelo índice F10.7.....	230
6.4: Densidade de partículas neutras em período de alta e baixa atividade solar (Kelley, 1989, original de Johnson, 1961)	234
6.5: Nível de absorção das ondas para diferentes alturas de propagação considerando-se uma velocidade de propagação de 250 m/s.....	237

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A ionosfera terrestre, um plasma fracamente ionizado situado aproximadamente entre 60 e 1000 km de altitude, é cenário contínuo de inúmeros fenômenos de interesse tecnológico e científico. Do ponto de vista tecnológico, há pelo menos dois sistemas para os quais a ionosfera desempenha importante papel: os sistemas de telecomunicações baseados na transmissão de ondas de rádio e os sistemas globais de navegação e posicionamento, como por exemplo, o *Global Positioning Systems* (GPS). Na área de telecomunicações a ionosfera é um importante meio de propagação de ondas de radiofrequência; do ponto de vista dos sistemas de navegação a ionosfera é considerada, quando da ocorrência de irregularidades do plasma, um meio que introduz consideráveis níveis de ruídos e falhas nos sinais transmitidos por satélites.

Do ponto de vista científico a ionosfera é objeto de inúmeras pesquisas, que mostraram nas últimas décadas a grande variedade de fenômenos que nela ocorrem, em amplo intervalo de latitudes, longitudes e altitudes. Segundo Kelley (1989. p.xi), “a ionosfera é um campo de batalha entre a atmosfera neutra terrestre e a atmosfera completamente ionizada do sol, dentro da qual ela está imersa”, e atua como um traçador de processos físicos provocados pela ação solar e de processos originários na baixa atmosfera, como a propagação de ondas de gravidade, por exemplo.

Dentre os fenômenos observados na ionosfera terrestre estão as irregularidades de plasma de grande escala originárias da região equatorial, denominadas bolhas de plasma e genericamente conhecidas como *Spread-F*. As irregularidades de plasma foram detectadas pioneiramente por Booker e Wells em 1938, com instrumentos de radiossondagem. Na ocasião eles observaram que os sinais de rádio refletidos pela ionosfera apresentavam um tipo de degradação ou espalhamento (*spread*) numa determinada faixa de altitudes ou de frequências.

Tais irregularidades têm origem em processos instáveis que surgem ao anoitecer quando a camada ionosférica sofre uma deriva vertical abrupta governada por processos eletrodinâmicos. As irregularidades de plasma de grande escala da região equatorial são caracterizadas por regiões de baixa densidade de plasma embebidas no plasma ambiente, e que se propagam por longas distâncias verticais (até 3000 km). À medida que evoluem verticalmente as bolhas se propagam numa direção quase alinhada às linhas de campo geomagnético devido a efeitos gravitacionais e difusivos (OSSAKOW, 1979, 1980, FEJER, 1980). Além deste movimento, também apresentam um deslocamento na direção zonal, governado pela ação conjunta dos campos elétrico e magnético, $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. Estas irregularidades de grande escala apresentam ampla variedade de escalas espaciais e de densidade e podem provocar diferentes níveis de espalhamento nos sinais de radiossondagem enviados por radares tipo ionossondas (*Spread-F*) ou perturbações nos sinais de rádio enviados por satélites para sensores GPS baseados em solo (cintilação, por exemplo).

O desenvolvimento e aprimoramento de técnicas de sondagem permitiram, sobretudo no início dos anos 70, um grande avanço no estudo das irregularidades da região F equatorial com a apresentação de um grande conjunto de dados obtidos com o radar de espalhamento incoerente de Jicamarca, no Peru (HUNSUCKER, ORIGINAL DE FARLEY, 1970; WOODMAN E LA HOZ, 1976; TSUNODA, 1981, 1982). As diferentes técnicas permitiram verificar que as irregularidades apresentavam flutuações na densidade de plasma entre região interna e externa da irregularidade (~ 50%), grande variabilidade na escala espacial, de centímetros a centenas de quilômetros, etc. (BASU et al., 1976 E 1982; MCCLURE et al., 1974, 1977; BASU, 1978; TSUNODA, 1980, 1982).

Posteriormente, com a modernização das técnicas de sondagem, a aplicação de técnicas digitais de análise e a modelagem teórica dos fenômenos a pesquisa aeronômica avançou consideravelmente. Características como a variabilidade com o ciclo solar (SAHAI et al., 1999, SOBRAL et al., 2002), variabilidade sazonal (ABDU et al., 1981, BATISTA et al., 1986), dependência com a atividade geomagnética (ABDU et al.

1995, SAHAI et al. 1998), influência dos processos eletrodinâmicos (FEJER, 1981, KELLEY, 1989), dinâmica e morfologia (SAHAI et al., 1981, 1999, 2000; SOBRAL, 1980, 1981, 1990, 1997, MENDILLO E BAUNGARDNER, 1982, MENDILLO E TYLER, 1983, PIMENTA et al., 2002, 2003), efeitos do dínamo das regiões E e F (RISHBETH, 1971, 1981, HEELIS et al., 1974), ação de ventos neutros trans-equatoriais (MARUYAMA E MATUURA, 1984; MENDILLO et al., 1992), flutuações de fase introduzidas pelas irregularidades nos sinais de GPS (AARONS et al., 1986, 1997).

O imageamento óptico de emissões luminescentes originárias em altitudes ionosféricas (OI 630,0 nm, OI 777,4 nm, OI 557,7 nm) emergiu no final da década de 70 como poderosa ferramenta no estudo de características dinâmicas e morfológicas das irregularidades observadas na região equatorial e em baixas latitudes (MOORE E WEBER, 1978; WEBER et al. 1978, 1980). Através de imageamento das emissões termosféricas foi possível analisar características como as velocidades de derivas zonais do plasma (SOBRAL et al., 1995, SAHAI et al., 1980, 1985; FAGUNDES et al., 1998), sua relação com a atividade solar e geomagnética (ABDU et al., 1995; SAHAI et al., 1999), extensão latitudinal e longitudinal das estruturas de grande escala, etc.

Uma das particularidades das irregularidades de grande escala previstas teoricamente (ZALESAK et al., 1982) e que permanece relativamente pouco explorada é a ocorrência de estruturas secundárias, como bifurcações e/ou estruturas de menor escala (10 a 100 km). Mendillo e Tyler (1983) observaram bifurcações nas bolhas de plasma observadas nas imagens da emissão OI 630,0 nm e verificaram que estas ocorrem simetricamente em torno do eixo vertical no plano equatorial. Huang e Kelley (1996) afirmaram que a tendência à bifurcação era muito maior no caso de bolhas com grandes dimensões zonais. No entanto, PIMENTA et al. (2003) verificaram que a tendência à formação de bifurcações estava mais fortemente relacionada ao nível de depleção das bolhas durante sua fase de formação. A hipótese de Tsunoda (1983) é que as depleções são submetidas a processos de estruturação secundária pela incidência de ventos neutros soprando para leste sobre a parede oeste da bolha. Estruturas secundárias também foram observadas por

Makella et al. (2006) na parede leste de uma bolha de plasma que se deslocava para leste numa noite geomagneticamente perturbada.

A despeito destas observações ainda há algumas questões não respondidas sobre a estruturação das bolhas de plasma, sobretudo devido à insuficiência de dados experimentais obtidos simultaneamente por diferentes técnicas. Outros níveis de estruturação podem ser observadas através de imagens das emissões termosféricas.

A estrutura fina de bolhas de plasma observadas através de imageamento óptico foi reportada pioneiramente por Tinsley et al. (1997) que verificaram estruturas nas bolhas de plasma na escala entre 10 e 100 km através do imageamento óptico das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm. Posteriormente Takahashi et al. (2001) verificaram que as imagens da emissão OI 557,7 nm apresentavam maior grau de nitidez que as imagens da emissão OI 630,0 nm o que foi atribuído à diferença no tempo de vida das duas emissões. Abalde et al. (2001) verificaram através de imagens da emissão OI 777,4 nm obtidas com um imageador *all-sky* num período de alta atividade solar a existência de estruturas finas como estrias no interior das bolhas de plasma as quais não são observadas nas imagens da emissão OI 630,0 nm. Novamente, a observação destas estrias foi atribuída às diferenças no tempo de vidas das duas emissões. Assim, um estudo das estruturas finas presentes nas imagens da emissão OI 777,4 nm pode contribuir para o entendimento dos processos envolvidos na formação das bolhas de plasma.

A outra classe de irregularidades ionosféricas estudada neste trabalho está relacionada à ocorrência de distúrbios ionosféricos propagantes, ou, *Traveling Ionospheric Disturbances (TIDS)* observadas na região de baixas latitudes do hemisfério sul. Os *TIDs* são interpretados como flutuações na densidade do plasma que se propagam na ionosfera num amplo intervalo de velocidades e frequências. HINES (1960) foi pioneiro ao relacionar os distúrbios observados na ionosfera à propagação de ondas de gravidade através da ionosfera. Posteriormente inúmeros trabalhos reportaram a ocorrência dos *TIDs* nas zonas de médias latitudes (BOWMAN, 1981, 1990, 1991, 1992; MENDILLO et al., 1997; SHIOKAWA, et al., 2003, 2005; KUBOTA

et al. 2000, SAHAI et al., 2001, GARCIA et al., 2000). Os *TIDs* são regularmente classificados como *Medium Scale Travelling Ionospheric Disturbances (MSTIDs)* e *Large scale Travelling Ionospheric Disturbances (LSTIDs)*, dependendo de suas velocidades de propagação e origem. Embora sejam regularmente estudados nas regiões de médias latitudes principalmente do hemisfério Norte, recentes publicações reportaram a observação de *MSTIDs* nas médias latitudes do hemisfério Sul (MARTINIS et al. 2006) e nas baixas latitudes do setor tropical brasileiro (PIMENTA et al., 2008). A assinatura óptica dos *MSTIDs* é a ocorrência de bandas alternadamente claras e escuras nas imagens da emissão OI 630,0 nm, alinhadas na direção nordeste-sudoeste, e se propagando para noroeste (Hemisfério Sul). Estas bandas estão associadas à elevação da base da camada e a uma depleção da densidade eletrônica representada pela diminuição nos valores de foF2. Além destes efeitos as bandas termosféricas de média escala/*MSTIDs* podem estar associadas à ocorrência de *Spread-F* em baixas latitudes.

O estudo desta classe de fenômenos ionosféricos poderá, portanto, contribuir significativamente para o entendimento do comportamento ionosférico na região de baixas latitudes.

OBJETIVOS E ESTRUTURA DA TESE

O objetivo desta tese é o estudo de características dinâmicas e morfológicas de duas classes de irregularidades do plasma ionosférico: as **Bolhas de plasma** e os ***MSTIDs***.

No caso das bolhas de plasma, apresentamos um estudo de estruturas finas de escala espacial entre 20 e 100 km observadas nas imagens da emissão OI 777,4 nm, cuja taxa máxima de emissão ocorre no pico de densidade da camada F₂. Além de determinar as larguras zonais das estruturas, determinamos o nível de depleção entre a bolha e o plasma ambiente, utilizando dados ionosféricos e ópticos concomitantemente. Propomos, ainda, um modelo simplificado de campo elétrico vertical que pode explicar a formação de tais estruturas.

A segunda classe de eventos ionosféricos estudada são os distúrbios ionosféricos propagantes de média escala, **MSTIDs**, observados e reportados inédita e recentemente nas baixas latitudes do setor longitudinal brasileiro (PIMENTA et al., 2008). O estudo destas bandas está dividido em quatro partes: 1) A assinatura óptica das bandas, observadas através do imageamento da emissão OI 630,0 nm; 2) Assinatura dos parâmetros ionosféricos, como $h'F$ (altura virtual da base da camada, em km), f_oF2 (frequência crítica do plasma ionosférico, em MHz), 3) Tipo de espalhamento do sinal da ionosonda, ou *Spread-F* associado à passagem das bandas termosféricas de média escala. 4) Estudo de possíveis fontes troposféricas associadas à ocorrência das bandas termosféricas de média escala.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão de aspectos teóricos referentes à termosfera e ionosfera; uma descrição das irregularidades de plasma de grande escala de origem equatorial, bolhas de plasma, e uma descrição de eventos como as bandas termosféricas de média escala.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão dos processos fotoquímicos presentes na atmosfera superior, e que originam as emissões ópticas OI 630,0 nm e 777,4 nm. O Capítulo 4 apresenta uma descrição da instrumentação utilizada neste trabalho, como os imageadores *all-sky* equipados com dispositivos CCDs, bem como as técnicas de processamento de imagens necessárias para análise. Além disto, uma descrição breve da instrumentação utilizada em análise complementar, como as ionossondas digitais, é apresentada.

O Capítulo 5 apresenta o estudo de estruturas finas presentes nas bolhas de plasma e observadas opticamente com a emissão OI 777,4 nm.

No Capítulo 6 apresentamos o estudo detalhado das bandas termosféricas de média escala observadas nas baixas latitudes do hemisfério sul no setor brasileiro, com a descrição das assinaturas óptica e ionosférica, tipo de *Spread-F* associado à passagem das bandas, uma análise estatística inédita baseada em sete anos de dados ópticos coletados em Cachoeira Paulista e finalmente um estudo sobre

possíveis fontes troposféricas relacionadas à ocorrência de bandas termosféricas de média escala.

No Capítulo 7, apresentamos um estudo relacionado à determinação da altura da camada emissora, através da técnica de triangulação e correlação cruzada bidimensional de imagens da emissão OI 630,0 nm, obtidas simultaneamente em dois sítios de observação separados por dezenas de quilômetros.

O Capítulo 8 encerra esta tese, com um sumário dos principais resultados obtidos, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

A ATMOSFERA NEUTRA E A IONOSFERA

A atmosfera terrestre pode ser descrita em termos de sua distribuição de temperaturas, sua composição química ou dos processos físico-químicos predominantes em cada faixa de altitudes.

Quanto ao perfil de temperatura, ela é dividida, convencionalmente, em: Troposfera, que é a porção mais inferior da atmosfera, começando no solo, caracterizada por um gradiente negativo de temperatura ($\sim 7\text{K/km}$), onde a temperatura decresce até atingir a tropopausa, em aproximadamente 10 km de altitude. Acima da tropopausa está a estratosfera. Nesta região o gradiente de temperatura se inverte, devido à absorção da radiação ultravioleta (UV) do sol pelo ozônio e por vapor de água, e a temperatura atinge seu valor máximo em torno de 50 km de altitude, na estratopausa. Acima de 50 km, na mesosfera, o gradiente de temperatura se inverte novamente devido ao resfriamento radiativo, atingindo o valor mínimo de temperatura da atmosfera (130 - 200K), na mesopausa (~ 85 km de altitude). Acima da mesopausa está a termosfera. Nesta região há predominância do oxigênio atômico, e o gradiente de temperatura é positivo, atingindo temperaturas superiores entre 1000K e 2000 K, dependendo da atividade solar. Tais temperaturas são atingidas devido à absorção da radiação ultravioleta do sol e da impossibilidade de emissão térmica por meio de seus constituintes.

Quanto à sua constituição química a atmosfera superior é classificada em duas regiões: a Homosfera, representante das baixas altitudes e caracterizada por uma constituição relativamente uniforme (devido à alta velocidade de mistura dos gases na região) de seus constituintes predominantes (N_2 , O_2 , Ar, CO_2). A outra região é a Heterosfera, cuja característica principal se deve ao fato de processos de turbulência e ventos não afetarem a distribuição vertical dos seus constituintes. A Figuras 2.1 mostra o perfil de distribuição de temperatura e as diferentes camadas atmosféricas.

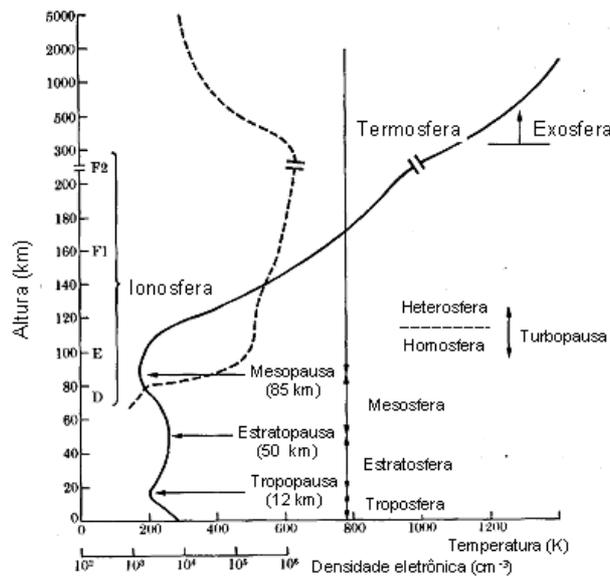


Figura 2.1: Diagrama esquemático da atmosfera terrestre em termos do perfil da temperatura, densidade eletrônica e distribuição da composição química em função da altura.

A figura 2.2 mostra os perfis de densidade eletrônica e composição química da atmosfera terrestre em função da altitude. A composição iônica predominante em altitudes próximas a 100 km, que corresponde à camada E (90- 150 km) é a de O_2^+ e NO^+ . Em torno do pico da camada ionosférica (~250 km) o íon dominante é O^+ , devido a alta concentração de oxigênio atômico na região.

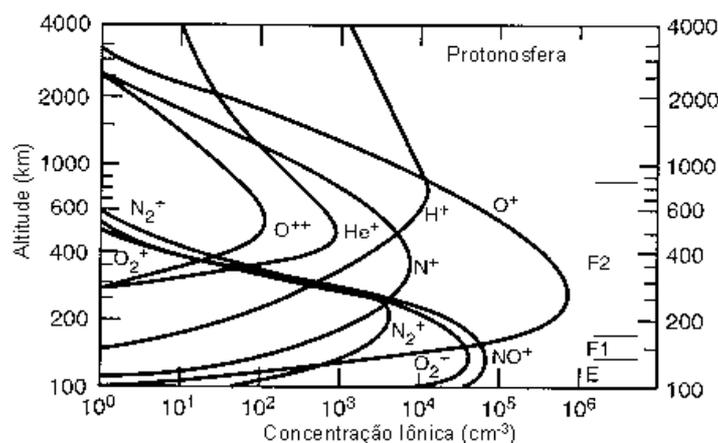


Figura 2.2: Perfil de concentração iônica em função da altura, durante o dia, em médias latitudes e para período de atividade solar alta. Fonte: Goodman (2005), original de Jursa (1985).

2.1 - TERMOSFERA

A termosfera, conforme descrito na seção 2.1, é a região da atmosfera terrestre situada entre 90 e 800 km de altitude onde a temperatura aumenta assintoticamente com a altura atingindo um valor constante entre 1000 e 2000 K, dependendo do nível de atividade solar. O principal constituinte da termosfera é o oxigênio atômico, que pode atingir concentrações de até $10^6/\text{cm}^3$ em torno de 300 km de altitude (atividade solar média), e que é ionizado pela radiação solar na faixa do ultravioleta e extremo ultravioleta. Os processos físicos que ocorrem na região são fortemente governados pelas variações no fluxo de energia solar.

Um fato importante a se considerar é que o aquecimento termosférico não ocorre de maneira uniforme, devido não somente à variação da intensidade da radiação solar, mas também a variação de densidade atmosférica. A absorção da radiação solar provoca uma expansão atmosférica que dá origem a gradientes horizontais de pressão atmosférica, que por sua vez dão origem aos ventos neutros. Como têm origem na região termosférica são denominados ventos termosféricos. Embora sejam influenciados pela força de Coriolis devido à rotação da Terra, os ventos termosféricos sofrem maiores efeitos de forças friccionais como a viscosidade do ar e das colisões entre partículas neutras e íons positivos. Os íons presentes na região promovem uma força de arraste no ar, pois têm baixa mobilidade devido à ação do campo geomagnético, de modo que não podem se movimentar livremente com o vento. Este arraste iônico é um fator que limita a velocidade dos ventos termosféricos. Quanto à direção de propagação, os ventos sopram na direção do gradiente negativo de temperatura, ou seja, do setor da tarde, onde a temperatura é mais elevada para o da manhã, onde a temperatura é mais baixa. O principal efeito dos ventos termosféricos é o transporte da ionização da camada ionosférica F (~300 km) na direção das linhas de campo, o que se refere ao chamado acoplamento termosfera-ionosfera. Dependendo da inclinação das linhas de campo, o movimento dos íons terá uma componente vertical que pode afetar as concentrações iônica e eletrônica, pois os coeficientes de perda da ionização dependem fortemente da altitude. Ventos que sopram na direção dos pólos durante o dia, provocam derivas

verticais para baixo e reduzem a concentração iônica, ventos que sopram na direção ao equador promovem o efeito contrário.

2.2 - EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS PARA TERMOSFERA

Os movimentos do fluido constituinte da atmosfera são regidos pelas leis físicas e por isto devem obedecer a princípios de conservação de massa, de movimento e energia. As equações fundamentais que regem a dinâmica da região termosférica são: 1) a equação da continuidade, 2) a equação de movimento e 3) a equação de estado, 4) Equação da conservação de energia termodinâmica.

2.2.1 – Equação da Continuidade

A equação da continuidade expressa a lei de conservação de massa ou de número de partículas num dado volume, V

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0 \quad (2.1)$$

sendo: $\rho = \sum_i n_i m_i$ é a densidade de massa total, e $\bar{U} = \frac{\sum_i n_i \bar{U}_i}{\sum_i n_i}$ é a velocidade

macroscópica do fluido como um todo.

2.2.2 – Equação de Estado

Na região termosférica a frequência de colisão das moléculas é alta o suficiente de modo que o ar pode ser considerado como um único fluido sujeito à equação de estado dos gases ideais:

$$P = \frac{\rho k T}{M} = \rho g H \quad (2.2)$$

onde P é a pressão, ρ é a densidade, k é a constante de Boltzmann, M é o peso molecular médio, T é a temperatura e H é a escala de altura ($H = kT/mg$).

2.2.3 – Equação de Movimento

A equação geral de momentum do sistema termosférico é:

$$\frac{d\vec{U}}{dt} + 2\vec{\Omega} \times \vec{U} = \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P - \nu_{ni} (\vec{U} - \vec{V}) + \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \nabla^2 \vec{U} + \vec{g} \quad (2.3)$$

onde:

$\frac{d\vec{U}}{dt}$ = Aceleração do vento;

$2\vec{\Omega} \times \vec{U}$ = Termo de Coriolis;

$\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P$ = Gradiente de pressão;

$\nu_{ni} (\vec{U} - \vec{V})$ = Termo de arraste iônico;

$\left(\frac{\mu}{\rho} \right) \nabla^2 \vec{U}$ = Termo de viscosidade;

\vec{g} = Aceleração da gravidade;

\vec{U} , \vec{V} = Velocidades do vento e dos íons respectivamente;

Ω = velocidade angular da Terra;

F = força por unidade de massa devido a gradientes de pressão;

ν_{ni} = freqüência de colisão entre partículas neutras e íons;

$\frac{\mu}{\rho}$ = viscosidade cinemática.

Ao se calcular a velocidade do vento deve-se considerar a rotação da Terra, que gira com velocidade angular Ω . Incluem-se então as forças de Coriolis e centrípeta. Estas forças introduzem um termo advectivo não linear na equação de movimento, o qual é expresso por:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} \quad (2.4)$$

O termo da esquerda representa a variação total da velocidade de uma parcela do fluido. O 1º termo da direita representa a variação da velocidade num ponto genérico fixo (x, y, z). O 2º termo da direita (não linear) representa o fato de que diferentes

parcelas do fluido ocupam a mesma posição em instantes sucessivos. Substituindo a equação 1.4 na equação 1.3 obtém-se:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + (\bar{U} \cdot \bar{\nabla}) \bar{U} + 2\bar{\Omega} \times \bar{U} + \bar{\Omega} \times (\bar{\Omega} \times \bar{R}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P - v_{ni} (\bar{U} - \bar{V}) + \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \nabla^2 \bar{U} + \bar{g} \quad (2.5)$$

sendo que R é o vetor que vai do centro da Terra ao ponto onde se aplicam as equações.

O 3º termo do lado esquerdo é o termo de Coriolis e representa a força por unidade de massa associado ao movimento de rotação da atmosfera num referencial não inercial. A direção desta força é perpendicular a direção da velocidade do fluido, o que promove apenas a mudança na direção da velocidade do mesmo.

O termo da força centrípeta (4º termo) também pode ser desprezado porque sua magnitude é muito próxima do termo de Coriolis. O segundo termo do lado esquerdo da equação 1.4 (não linear) também poder ser desprezado se $U \ll R\Omega$. No entanto, é preciso algum cuidado nas horas próximas ao por do sol e ao amanhecer, em que há gradientes espaciais de U . Em geral, para efeitos de simplicidade nos cálculos, este termo é desprezado.

A força do gradiente de pressão (por unidade de massa) tem origem no abaulamento diurno da atmosfera, devido ao aquecimento da mesma provocado pela absorção da radiação solar. As componentes horizontais deste gradiente é que governam o movimento dos ventos. Há duas componentes desta força: a componente zonal (para leste), F_x , e a meridional (para o norte), F_y , dadas respectivamente por:

$$F_x = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad F_y = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.6)$$

onde ρ é a densidade do ar. Esta força causa o movimento de uma parcela do fluido de uma região de alta pressão para uma região de baixa pressão, ou seja, ela tende a remover os gradientes de pressão existentes no fluido. Há também uma pequena componente vertical, cuja influência no movimento do ar é pequena visto que ela é quase totalmente balanceada pela gravidade.

O 2º termo do lado direito é o termo do arraste iônico, que tem origem nas colisões entre partículas neutras e as ionizadas. Este termo acopla a atmosfera neutra com a ionizada. Tal acoplamento pode acelerar ou desacelerar o ar neutro, dependendo da direção relativa da velocidade dos íons.

A ação de forças viscosas tem origem quando há gradientes espaciais (transversais) de U , representados por ventos de cisalhamento. Embora a derivação deste termo seja complicada, pode ser mostrado com aproximações adequadas, que ele se reduz a $\mu \nabla^2 \vec{U}$, onde μ é o coeficiente de viscosidade. Em geral, apenas a componente vertical do vento de cisalhamento é importante visto que ele promove uma difusão do momentum do ar neutro de modo a suavizar o padrão de velocidade com a altitude. Em altitudes elevadas, onde a densidade é particularmente baixa, o termo μ/ρ torna-se significativo.

2.2.4 - Equação da Conservação da Energia Termodinâmica

A mudança temporal da densidade de energia na termosfera é expressa por:

$$\rho \frac{d}{dt} \left(u + \frac{v^2}{2} \right) + \nabla \cdot (\bar{p} \cdot v + q) = \rho v \cdot g + \rho Q + j \cdot E \quad (2.7)$$

onde

u é a energia interna por unidade de massa;

q é o fluxo molecular de energia interna;

E é o campo elétrico;

$\bar{p} \cdot v = (p_{xx}v_x + p_{xy}v_y + p_{xz}v_z)\hat{x} + (p_{yx}v_x + p_{yy}v_y + p_{yz}v_z)\hat{y} + (p_{zx}v_x + p_{zy}v_y + p_{zz}v_z)\hat{z}$ é um fluxo de energia cinética associado ao fluxo de momentum;

$\rho v \cdot g$ é o trabalho efetuado pela gravidade;

$j \cdot E$ é a taxa de transferência de energia do campo para o meio;

Reescrevendo a equação 2.7 separadamente em termos de energia cinética e energia interna:

$$\rho \frac{d}{dt} \left(\frac{v^2}{2} \right) + \vec{v} \cdot \nabla \cdot \bar{p} = \rho \vec{v} \cdot \vec{g} + \vec{v} \cdot \vec{j} \times \vec{B} \quad (2.8)$$

$$\rho \frac{du}{dt} = -\bar{p} \cdot \nabla v - \nabla \cdot \vec{q} + \rho Q + \vec{J} \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.9)$$

onde:

$$\bar{p} \cdot \nabla \vec{v} = p_{xx} \frac{\partial v_x}{\partial x} + p_{xy} \frac{\partial v_y}{\partial x} + p_{xz} \frac{\partial v_x}{\partial x} + p_{yx} \frac{\partial v_x}{\partial y} + p_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + p_{yz} \frac{\partial v_z}{\partial y} + p_{zx} \frac{\partial v_y}{\partial z} + p_{zy} \frac{\partial v_y}{\partial z} + p_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} \mathbf{e}$$

$\vec{J} \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ é o aquecimento Joule do gás

2.3 – IONOSFERA

2.3.1 – Formação e Estrutura

A ionosfera é definida como um plasma¹ parcialmente ionizado que conduz eletricidade. Está compreendida, convencionalmente, entre 60 e 1000 km de altitude e é caracterizada pela presença de grande quantidade de elétrons livres e íons positivos (densidade $\sim 10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$).

Trata-se de uma região de grande interesse na área de telecomunicações por tratar-se do meio de transmissão e propagação de ondas de rádio. Além disto, seu comportamento dinâmico e suas propriedades físico-químicas fornecem informações importantes sobre os fenômenos relacionados à interação do sistema Sol-Terra, com fortes implicações no chamado Clima-Espacial² (*Space Weather*).

A formação da ionosfera é essencialmente governada pela ação da radiação solar sobre os constituintes atmosféricos, através de processos como a fotoionização e a recombinação (radiativa ou dissociativa), conforme detalhado no apêndice A. Partículas de alta energia também podem penetrar a atmosfera promovendo a ionização de seus constituintes, embora este processo seja típico de regiões de altas latitudes magnéticas.

¹ A neutralidade de cargas é uma condição essencial para um gás ser considerado um plasma.

² O termo Clima Espacial é utilizado para descrever a variabilidade do ambiente espacial circunvizinho ao planeta Terra (Baker, D. N., in *Space Weather – The Physics behind a slogan*, 2005)

A densidade atmosférica decresce com o aumento da altitude, enquanto a intensidade da radiação EUV (extremo ultravioleta) do sol decresce com altitude devido à absorção parcial da radiação pelos constituintes atmosféricos. Estes fatores promovem a formação de uma região onde a taxa de ionização é máxima numa certa altitude, decrescendo acima e abaixo da mesma. Chapman desenvolveu uma teoria, em 1931, que prevê a formação desta região ionosférica (camada de Chapman³), conforme mostra a Figura 2.3.

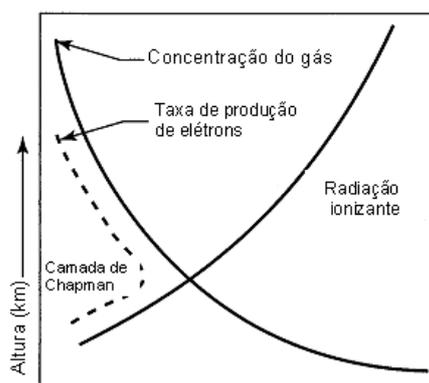


Figura 2.3: Ilustração representativa da produção da ionização na atmosfera, mostrando a interação da radiação solar com os gases atmosféricos, cuja densidade decresce exponencialmente com a altitude, dando origem à camada de Chapman.

Observações experimentais com instrumentos de sondagem baseados na transmissão e recepção de ondas de rádio mostraram a natureza estruturada em camadas, denominadas historicamente de regiões D, E F₁ e F₂. Evidências da ocorrência de uma camada F₃ diurna, entre 450 e 600 km de altitude, já foram relatadas por Balan et al. (1997).

A explicação para a formação em camadas ionosféricas se deve a dois fatores principais: 1) o fato da intensidade da radiação solar não ser constante em todos os comprimentos de onda, podendo ser mais intensa em um comprimento de onda particular, e 2) a composição da atmosfera neutra é altamente variada contendo átomos e moléculas como oxigênio, nitrogênio, óxido nítrico, que podem ser fotoionizados por radiação de diferentes comprimentos de onda.

³ Função produção da ionização tipo Chapman: $q(z) = (\eta I_{\infty} / eH) \exp(1 - z - e^{-z} \sec \chi)$, onde η é a eficiência da ionização, I_{∞} é a intensidade da radiação solar fora da atmosfera, e é a carga eletrônica, H é a escala de altura, z é altura e χ é o ângulo zenital. Ver apêndice B.

2.3.2 - Descrição das Camadas Ionosféricas

A descrição das diferentes regiões ionosféricas é feita com base no perfil de densidade eletrônica em função da altitude. As camadas *E* e *F* são descritas por frequências críticas (f_oE , f_oF_1 , f_oF_2), alturas do pico (h_mE , h_mF_1 , h_mF_2) e meia espessura⁴ (y_mE , y_mF_1 , y_mF_2). A frequência crítica, que é proporcional $n^{1/2}$ (raiz quadrada da densidade eletrônica), é a frequência máxima refletida pela camada. Frequências maiores que esta, transmitidas a partir de baixo da camada atravessam a mesma e se propagam para altitudes superiores. A cada frequência crítica associa-se um pico de densidade (N_mE , N_mF_1 , N_mF_2) ou uma altura de pico (altura onde a densidade é máxima), conforme mostra a Figura 2.4.

As diferentes camadas ionosféricas apresentam características peculiares, que serão brevemente descritas a seguir.

A região D é a porção inferior da ionosfera compreendida entre 70 a 90 km. Sua formação ocorre devido à incidência de raios-X solares e radiação ultravioleta que ionizam gases como O_2 , N_2 e NO . Caracteriza-se pela presença de íons positivos e negativos, íons aglomerados e elétrons. No limite superior predominam íons moleculares como NO^+ e O_2^+ , havendo também íons O^+ metálicos, embora em menor quantidade. Nesta região as reações químicas envolvendo três corpos⁵ são importantes.

⁴ A meia espessura da camada é obtida ajustando-se uma parábola ao perfil de densidade eletrônica variando com altura, centrado na densidade máxima.

⁵ Reações de três corpos: é um tipo de reação química entre três elementos, em que o terceiro elemento tem a função de dissipar o excesso de energia. O ozônio, por exemplo, é produzido numa reação deste tipo: $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$.

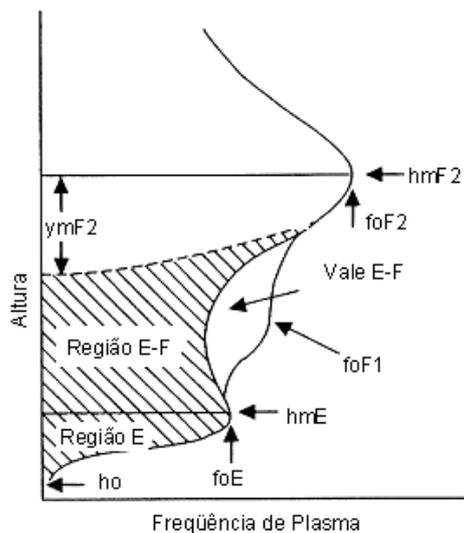


Figura 2.4: Diagrama esquemático da densidade eletrônica mostrando frequências críticas, alturas de pico de densidade e meia-espessura das camadas E, F₁ e F₂. O vale entre as camadas E e F é observado à noite, e a curva representativa da f_oF_1 é observada durante o dia.
 Fonte: Schunk, R. W., Nagy, A. F. – Ionospheres: Physics, Plasma Physics and Chemistry, 2001.

Na região E, acima de 90 km, as reações químicas não são tão complexas, sendo NO^+ e O_2^+ os íons majoritários. A densidade eletrônica máxima (10^6 cm^{-3}) está relacionada à proporção entre NO^+ e O_2^+ , com a predominância de NO^+ em altitudes próximas a 130 km. A densidade iônica total é da ordem de 10^5 cm^{-3} , enquanto a densidade neutra é maior que 10^{11} cm^{-3} . Esta proporção faz da região E um plasma fracamente ionizado, de modo que colisões entre partículas não são tão importantes. Eventualmente são observados aumentos significativos na ionização da região E (aproximadamente uma ordem de magnitude maior que a densidade usual) em altitudes entre 90 e 130 km. Esta camada ocorre esporadicamente sendo por isto denominada camada E-Esporádica e pode ser observada em todas as latitudes.

A região F₁ é a região inferior, onde predominam processos fotoquímicos e onde o elemento majoritário é o íon oxigênio atômico, O^+ . As reações importantes são a fotoionização do oxigênio atômico e processos de perda em reações com o N_2 e O_2 . Durante a noite, quando inexistente o processo de fotoionização a região F₁ desaparece. A região F₂ é caracterizada pela importância dos processos de

transporte como a difusão e as derivas ao longo das linhas de campo (induzidas por ventos neutros) e na direção perpendicular às mesmas ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$). A densidade iônica da região F_2 é dez vezes maior que a da região E, e ainda, a densidade neutra é cem vezes maior que a iônica, de modo que o plasma é parcialmente ionizado, o que torna importantes as colisões entre partículas carregadas e entre partículas carregadas e neutras. A região superior da ionosfera, onde dominam processos difusivos é denominada ionosfera superior.

2.4 – DINÂMICA IONOSFÉRICA

2.4.1 - Equação da Continuidade

Os processos dinâmicos da região ionosférica que determinam o perfil de distribuição iônica são governados por processos físico-químicos responsáveis pela produção e pela perda da ionização e por processos de transporte do plasma ionosférico, que movimentam o plasma na direção perpendicular ao campo geomagnético ou ao longo do mesmo. O plasma ionosférico é sujeito a forças gravitacionais e colisionais como qualquer outro gás, mas por tratar-se de um gás ionizado, também sofre a ação de forças elétricas e magnéticas. Devido a tais forças é preciso construir-se equações de movimento separadas para íons e elétrons. A equação da continuidade expressa a influência de vários processos que alteram a distribuição da concentração eletrônica, como processos físico-químicos e processos de transporte. Considerando-se uma célula de volume unitário, a equação da continuidade é escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = q - l(N) - \text{div}(Nv) \quad (2.10)$$

onde:

$\frac{\partial N}{\partial t}$ representa a taxa de mudança temporal da concentração eletrônica,

q é o termo de produção da ionização,

$l(N)$ é termo de perda da ionização devido a processos de recombinação e

$div(nV)$ representa a mudança na concentração devido a efeitos de transporte.

Reescrevendo a Eq. 2.10 separadamente para íons e elétrons:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + div(n_i V_i) = q_i - l_i \quad (2.11a)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + div(n_e V_e) = q_e - l_e \quad (2.11b)$$

No chamado regime de equilíbrio fotoquímico, característico das regiões abaixo de 200 km de altitude, o termo de transporte é, em geral⁶, desprezível, e a constante de tempo associada ao termo de perda é tão pequena, isto é, a perda acontece tão rapidamente que pode-se considerar que $\partial N / \partial t$ é muito menor que os outros termos, tal que: $q = l(N)$. Este caso se aplica às regiões D, E e F₁ diurnas. Em torno de 250 km de altitude (região F₂), o termo de transporte torna-se dominante, sendo que a produção e perda exercem influência pouco significativa na região. Neste regime de transporte, a Equação 2.10 pode ser escrita: $\partial N / \partial t = \nabla \cdot (nV)$.

2.4.2 – Equação do Movimento

As equações de movimento do plasma ionosférico são as mesmas do gás neutro, mas ao escrevê-las deve-se considerar que a frequência de colisão entre as partículas é tão alta que tanto os elétrons como os íons podem ser tratados como fluidos. Neste caso, as velocidades térmicas aleatórias se cancelam e podem ser completamente ignoradas (Rishbeth, 1969). Os movimentos de transporte a que estão sujeitos íons e elétrons podem ser resumidos da seguinte forma:

1) Íons e elétrons podem ser movidos por campos elétricos. Os movimentos resultantes e as correntes elétricas geradas dependem tanto do campo magnético

⁶ Pode-se eventualmente considerar o termo de transporte como uma pequena perturbação.

como da freqüência de colisão, os quais determinam a mobilidade e a condutividade das partículas carregadas;

2) Outro elemento que pode mover as partículas carregadas são os ventos neutros. O movimento resultante depende da diferença entre a velocidade do vento e a velocidade das partículas carregadas. A origem e a influência dos ventos são distintas para a região E e F. Na região E, os ventos neutros têm origem em fenômenos ligados a marés atmosféricas e dão origem ao chamado dínamo da região E. Na região F, os ventos neutros são originários do aquecimento diferenciado da atmosfera e dão origem ao chamado dínamo da região F, que serão discutidos mais adiante.

3) A atmosfera neutra e as partículas carregadas também são afetadas pelo aquecimento heterogêneo da termosfera, de modo que o plasma ionosférico também sofre expansão e contração junto com a atmosfera neutra.

4) O último processo a ser considerado dentre os processos de transporte de plasma é a difusão, que é um movimento conseqüente da ação de forças gravitacionais e de gradientes de pressão. Em geral, na ausência de campos elétricos muito intensos, elétrons e íons tendem a se movimentar com a mesma velocidade, o que caracteriza a chamada difusão ambipolar. Dois fatores influenciam este movimento: a colisão entre as partículas carregadas e as neutras e a ação do campo geomagnético. Em regiões onde a freqüência de colisão é alta, como a baixa ionosfera, a difusão é mais lenta, sendo mais alta na região F (colisões pouco freqüentes).

De modo geral as equações de movimento do plasma ionosférico, escritas separadamente para íons e elétrons são as seguintes, e que incluem a contribuição de campos elétricos e ventos neutros são:

$$m_i \frac{d\vec{V}_i}{dt} = 0 = m_i \vec{g} - \frac{1}{N_i} \nabla(N_i k T_i) + q_i (\vec{E} + \vec{V}_i \times \vec{B}) - m_i \nu_{in} (\vec{V}_i - \vec{U}) - m_e \nu_{ei} (\vec{V}_i - \vec{V}_e) \quad (2.12a)$$

$$m_e \frac{d\vec{V}_e}{dt} = 0 = m_e \vec{g} - \frac{1}{N_e} \nabla(N_e k T_e) + q_e (\vec{E} + \vec{V}_e \times \vec{B}) - m_e \nu_{en} (\vec{V}_e - \vec{U}) - m_e \nu_{ei} (\vec{V}_e - \vec{V}_i) \quad (2.12b)$$

onde:

$N_i k T_i$ e $N_e k T_e$ são as pressões parciais de íons e elétrons respectivamente, sendo: N a densidade numérica, k a constante de Boltzmann e T a temperatura;
 m_i e m_e são as massas dos íons e elétrons respectivamente;
 g é a aceleração da gravidade,
 u é a velocidade do gás neutro,
 V_e e V_i são as velocidades dos elétrons e íons respectivamente,
 E é o campo elétrico, B é o campo magnético,
 q_e e q_i são as cargas do elétron e do íon respectivamente,
 ν_{ei} é a frequência de colisão entre elétrons e íons.

Uma análise detalhada do movimento das partículas carregadas na região ionosférica deve incluir a origem e a direção de campos elétricos e ventos neutros na região. Ignorando-se os termos de gravidade, as forças devido a gradientes de pressão e as colisões entre elétrons e íons na equação 2.12, a equação de movimento torna-se:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = q\vec{E} + q\vec{V} \times \vec{B} - m\nu(\vec{V} - \vec{U}) \quad (2.13)$$

Pode-se obter após algum desenvolvimento matemático, uma quantidade denominada mobilidade por unidade de carga, k , que relaciona a girofrequência do elétron e do íon, $\Omega = Be/m$, e a frequência de colisão das partículas, ν . Ao se incluir a mobilidade, deve-se considerar a sua direção com relação ao campo magnético e ao campo elétrico. Assim, há três possibilidades:

a) Mobilidade direta ou longitudinal: Paralela a B e a E :

$$k_0 = \frac{1}{m\nu} = \frac{1}{Be} \frac{\omega}{\nu} \quad (2.14a)$$

b) Mobilidade transversal ou Pedersen: Perpendicular a B e paralela a E

$$k_1 = \frac{1}{m\nu} \frac{\nu^2}{(\nu^2 + \omega^2)} = \frac{1}{Be} \frac{\nu\omega}{(\nu^2 + \omega^2)} \quad (2.14b)$$

c) Mobilidade Hall: Perpendicular a B e a E

$$k_2 = \frac{1}{m\nu} \frac{\omega\nu}{(\nu^2 + \omega^2)} = \frac{1}{Be} \frac{\omega^2}{(\nu^2 + \omega^2)} \quad (2.14c)$$

Uma análise do movimento das partículas na presença de campos elétricos e de ventos neutros e suas respectivas orientações com relação ao campo magnético da Terra é feita a seguir (Rishbeth, 1969).

1) E // B, U // B – Campos elétricos e Ventos paralelos ao campo magnético

O campo elétrico promove um movimento $E/m\nu$ em sentidos opostos para íons e elétrons, originando uma corrente ao longo de B.

O vento neutro U causa uma deriva das partículas na direção paralela a B, em qualquer altitude, com velocidade igual à velocidade da componente paralela de U, $V_U = (\vec{U} \cdot \vec{B})\vec{B} / B^2$.

2) E e U \perp B - Campos elétricos e Ventos na direção perpendicular a B

Na região E, onde $\nu \sim \omega$, $k_1 \sim k_0$, os campos elétricos e os ventos produzem movimento numa direção inclinada a eles.

Na região F, onde $\nu \ll \omega$, $k_1 \ll k_2$, o campo elétrico E promove a deriva de íons e elétrons no mesmo sentido $\vec{E} \times \vec{B}$, com velocidade $\vec{V}_E = \vec{E} \times \vec{B} / B^2$.

O vento neutro U provoca um movimento na direção $\vec{U} \times \vec{B}$, com velocidade $(\nu / \omega)\vec{U}$, em direções opostas para íons e elétrons, originando uma corrente \vec{J} na direção $\vec{U} \times \vec{B}$, cuja magnitude é dada por $\vec{J} = \vec{\sigma} \cdot (\vec{U} \times \vec{B})$, onde σ é o tensor condutividade dado por:

$$\text{Condutividade Direta ou longitudinal: } \sigma_0 = Ne^2(k_{0e} + k_{0i}) \quad (2.15a)$$

$$\text{Condutividade Transversal ou Pedersen: } \sigma_1 = Ne^2(k_{1e} + k_{1i}) \quad (2.15b)$$

$$\text{Condutividade Hall: } \sigma_2 = Ne^2(k_{2e} - k_{2i}) \quad (2.15c)$$

Onde: N é a densidade numérica de elétrons, e é a carga eletrônica e $k_{i/e}$ as respectivas mobilidades para íons e elétrons discutidas anteriormente.

O comportamento da ionosfera imersa num campo magnético, na presença de ventos neutros e campos elétricos requer uma explicação que inclui a teoria do dínamo das regiões E e F . A teoria do dínamo por sua vez se apóia no comportamento da condutividade das camadas entre o dia e a noite e na ação de ventos termosféricos na camada F noturna. O dínamo das regiões E e F são acionados basicamente por ventos. Na região E estes ventos têm origem nas oscilações diurnas de marés atmosféricas, causadas pelo aquecimento solar na região E e abaixo dela (RISHBETH, 1974). Estes ventos promovem o movimento de íons e elétrons em direções opostas, configurando assim uma corrente J . A corrente J induzida pelo vento neutro não satisfaz a condição de divergência nula, o que significa que há acúmulo de carga em algumas regiões, tornando a ionosfera polarizada. De modo a alcançar a condição de divergência nula, surgem campos de polarização $E_p = -\nabla\phi$, (ϕ = potencial eletrostático), que forçarão um fluxo de corrente não divergente e horizontal. O campo de polarização depende da densidade de corrente e da condutividade da camada E . Durante o dia, quando a região E é altamente condutora, o campo é pequeno e, durante a noite, quando a região E é fracamente condutora, o campo de polarização é alto. Estes campos de polarização são mapeados para a região F através das linhas de campo geomagnético, e provocam a deriva eletromagnética do plasma ionosférico, $E_p \times B$. O dínamo da região F é regido principalmente pela ação de ventos de origem termosférica, originários de gradientes de pressão que surgem devido ao aquecimento solar desigual da atmosfera superior. Os campos de polarização da região F surgem para manter a continuidade de corrente, e são curto-circuitados pelo fluxo de corrente paralela ao campo magnético entre a região E e F . Durante a noite a condutividade da região E é drasticamente menor que durante o dia, de modo que o campo elétrico de polarização da região F não é suprimido. A componente vertical noturna do campo de polarização produz uma forte deriva para leste do plasma da região F . Embora o campo de polarização seja majoritariamente 'vertical' durante a noite, há uma componente leste-oeste nas proximidades do

terminadouro solar ao entardecer e ao amanhecer, que é influenciado fortemente pela densidade eletrônica da região E. Esta componente leste-oeste provoca uma fraca deriva vertical para baixo do plasma ao amanhecer, pois a densidade da região F é baixa neste horário, e uma forte deriva para cima ao entardecer (Pico Pré-Reversão), quando a densidade da região F é alta. Rishbeth (1971) e Heelis (1974) mostraram a ação do dínamo das regiões E e F nas velocidades de deriva vertical do plasma ionosférico, conforme mostra Figura 2.5.

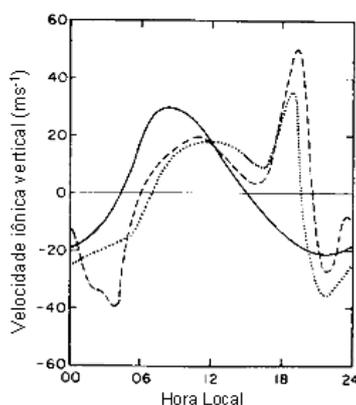


Figura 2.5: Velocidades de deriva iônica vertical para várias origens de ventos. A linha cheia inclui somente dínamo da região E. A linha tracejada: inclui dínamos das regiões E e F. A linha pontilhada ilustra as velocidades medidas com radar em Jicamarca.
Fonte: Heelis et al. (1974).

2.4.3 – Arraste Iônico – Acoplamento Termosfera-Ionosfera

O arraste iônico é a força que acopla o gás neutro e o ionizado e é definido como a força por unidade de volume exercida sobre as partículas neutras devido a interações colisionais entre as mesmas e o plasma ionosférico. (RISHBETH, 2002). Matematicamente, esta força pode ser escrita como:

$$F = \rho v_{in} (\vec{U} - \vec{V}) \quad (2.16)$$

onde ρ é a densidade de massa, v_{in} frequência de colisão entre íons e partículas neutras, U é a velocidade do ar neutro e V a velocidade do plasma. O arraste iônico

existe porque os íons têm seu movimento confinado pelo campo magnético, não podendo se mover livremente com os ventos neutros. Durante o dia o termo do arraste iônico é grande e limita a velocidade dos ventos neutros retirando-lhe momentum. Durante a noite quando a densidade eletrônica é menor o arraste iônico é menor e a magnitude do vento conseqüentemente maior.

2.4.4 - Derivas do Plasma Ionosférico na Região Equatorial

A ionosfera equatorial apresenta características ímpares devido à geometria do campo geomagnético (linhas de campo geomagnético quase horizontais) e o acoplamento das camadas *E* e *F* é responsável pela ocorrência de vários fenômenos na região. O aquecimento solar promove gradientes horizontais de pressão o que por sua vez induz o surgimento de ventos termosféricos horizontais. A ação de ventos termosféricos consiste na indução de movimentos de partículas carregadas na região F. O movimento principal é a deriva de íons e elétrons ao longo das linhas de campo geomagnético. No entanto, há um movimento na direção perpendicular às linhas de campo, resultante da ação conjunta $\mathbf{U} \times \mathbf{B}$. Devido ao sinal oposto das cargas, os íons se movimentam no sentido $\mathbf{U} \times \mathbf{B}$ e os elétrons em sentido contrário, originando, assim, correntes elétricas. As linhas de campo são altamente condutoras, de modo que quaisquer convergência ou divergência nas correntes darão origem a campos elétricos de polarização. Durante o dia quando a condutividade da região E é alta, o circuito é fechado. No entanto, ao anoitecer, quando a região E começa a desaparecer, surgem campos de polarização mais elevados de modo a manter a divergência do fluxo de corrente nula. Uma representação esquemática de tal situação é mostrada na Figura 2.6.

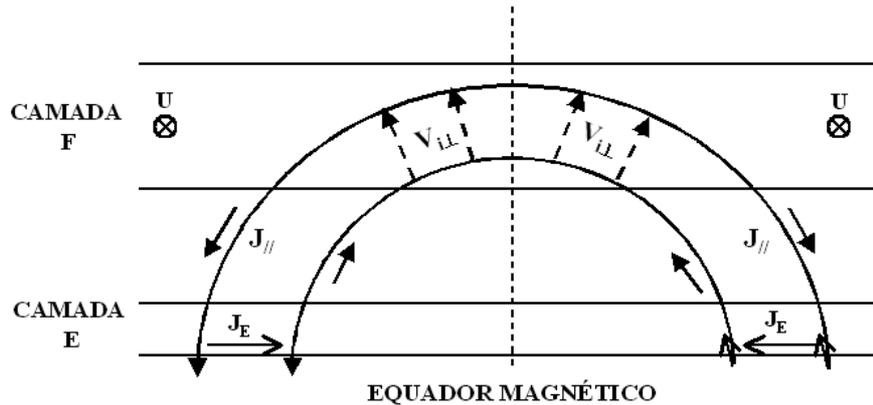


Figura 2.6: Representação esquemática do dínamo produzido por ventos na região F equatorial. O vento \mathbf{U} é perpendicular ao plano da figura e aponta para leste, produzindo a deriva iônica $V_{iL} = Uv/\omega$ (setas tracejadas) normal às linhas de campo. O circuito é fechado pela corrente paralela às linhas de campo, $j_{//}$ e pela corrente da região E (curto-circuito) da região E. Não há ventos na camada E.
 Fonte: Rishbeth (1971, p. 359)

A ação conjunta dos campos elétrico e magnético provoca a deriva eletromagnética vertical para cima do plasma, $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, durante o dia, e para baixo durante a noite, sendo a velocidade de deriva em torno de 10m/s. Ocorre então a difusão do plasma para baixo ao longo das linhas e para longe do equador devido à ação da gravidade. Este movimento assemelha-se ao movimento de uma fonte, motivo pelo qual lhe foi atribuída a denominação de *Efeito Fonte*. O Efeito Fonte provoca um fenômeno bem conhecido e estudado denominado *Anomalia Equatorial* ou *Anomalia de Appleton* (Figura 2.7a), que representa o aumento da densidade de plasma, ou dos picos de ionização, em ambos os lados do equador magnético, assimetricamente, conforme mostra a Figura 2.7b. A anomalia equatorial varia durante o dia, atingindo um pico em torno das 14 horas (hora local), embora também possa haver outro pico de ionização durante a noite em períodos de máxima atividade solar.

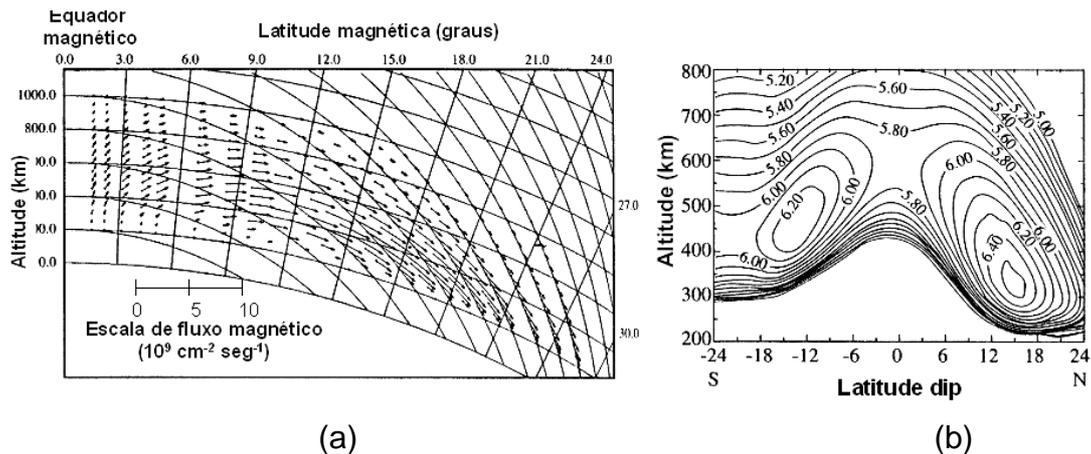


Figura 2.7: a) Padrão de deriva de plasma em baixas latitudes devido à ação conjunta da deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ próxima ao equador magnético e a difusão para baixo ao longo das linhas de campo. b) Densidade eletrônica calculada ($\log_{10} n_e$) em função da altitude e latitude dip às 20:00 (hora local) durante solstício de Dezembro.
 Fonte: Schunk, R. W. e Nagy, A. F. (2001)

As derivas de plasma na região equatorial tem sido estudadas desde 1970, com o radar de espalhamento incoerente de Jicamarca, no Peru. Woodman (1972) verificou derivas do plasma para oeste durante o dia da ordem de 50 m/s e derivas noturnas para leste de até 130 m/s. Diversas outras técnicas, como polarímetros e cintiladores (BASU, 1980; ABDU, 1985) forneceram velocidades de deriva de até 250m/s. Observações da luminescência noturna ionosférica (WEBER, 1978; SOBRAL et al., 1985; SAHAI et al., 1992; FAGUNDES et al., 1998; PIMENTA et al., 2003) mostraram velocidades de deriva entre 100 e 150 m/s.

A Figura 2.9 mostra o comportamento das derivas zonais de plasma obtidas com o radar de espalhamento incoerente de Jicamarca. Na Figura 2.9a é mostrada a deriva zonal para leste próximo ao pico da camada F, enquanto na Figura 2.9b é mostrada a componente vertical. Os círculos e triângulos abertos representam períodos de máximo solar e os símbolos cheios representam períodos de mínimo solar. As principais características das derivas são: 1) a deriva para leste à noite é duas vezes maior que da deriva para oeste durante o dia; 2) as derivas zonais são muito maiores que as verticais; 3) a velocidade de deriva vertical apresenta um pico logo após o anoitecer (pico pré-reversão), embora o mesmo não se observe ao

amanhecer e 4) verifica-se a influência do ciclo solar nas derivas verticais com variações sazonais significantes do pico pré-reversão.

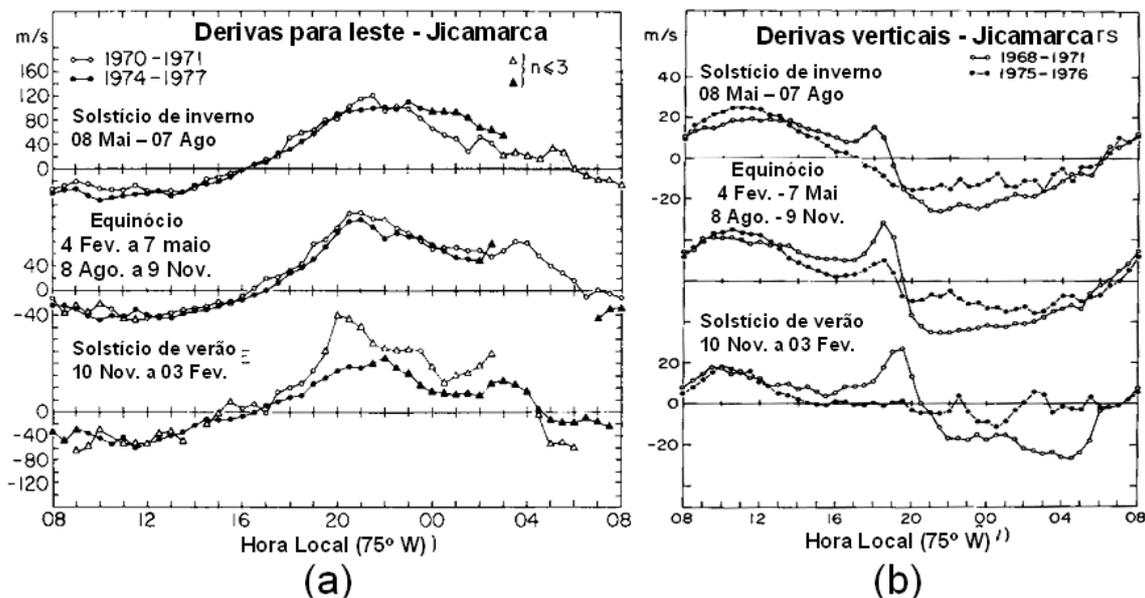


Figura 2.9:(a) Derivas zonais de plasma da região F equatorial para várias estações e condições solares. (b) Componente vertical da deriva, positiva para movimentos verticais para cima.
Fonte: Kelley (1989), original de Fejer et al. (1979).

2.5 - IRREGULARIDADES DO PLASMA DA REGIÃO F EQUATORIAL

As irregularidades de plasma de grande escala da região F equatorial se manifestam como depleções na densidade do plasma devido à instabilidades na base na ionosfera. Tais irregularidades podem interferir drasticamente na propagação de sinais de radio empregados nas telecomunicações bem como nos sinais empregados em sistemas de navegação e posicionamento, como os GPS. Daí a importância de se estudar tais fenômenos, desde o seu surgimento nas primeiras horas da noite até o seu desaparecimento, que em geral ocorre por volta da meia-noite.

O cenário característico para a ocorrência das irregularidades é a ionosfera equatorial ao entardecer, quando sob a intensificação de campos elétricos zonais a camada ionosférica sofre uma rápida subida vertical (ação conjunta de campos

elétrico e magnético, $E \times B$) dando origem a gradientes abruptos de densidade na base da camada, que por sua vez originam situações físicas de instabilidade propícias ao desenvolvimento de irregularidades.

2.5.1 - Um Breve Panorama Histórico

As irregularidades de plasma da ionosfera equatorial são chamadas genericamente de “*Spread-F*” e foram detectadas pioneiramente por Booker e Wells em 1938, com instrumentos de radiossondagem. Na ocasião eles observaram que os sinais de rádio refletidos pela ionosfera apresentavam um tipo de degradação ou espalhamento (*spread*) numa determinada faixa de altitudes ou de freqüências. As irregularidades na densidade de plasma na região F produzem um padrão característico de espalhamento nos sinais das ondas de rádio recebidos por ionosondas e são representados em gráficos denominados ionogramas. Os ionogramas mostram que os sinais refletidos pela região F podem apresentar espalhamento tanto na faixa de altitudes (*Range Spread-F*) como na freqüência (*Frequency Spread-F*), como mostra a figura 2.10.

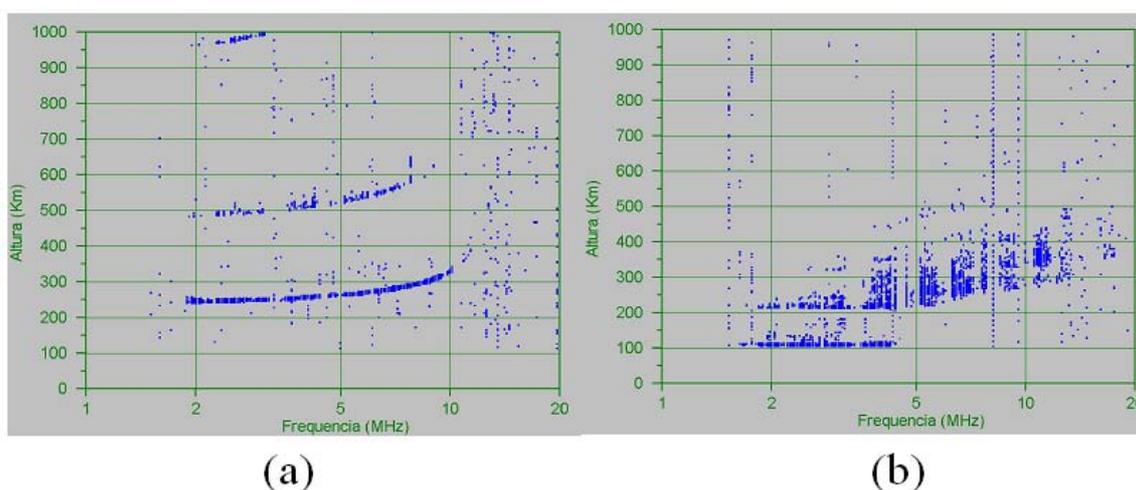


Figura 2.10: Ionogramas representativos de um período noturno, a) sem espalhamento, b) com espalhamento. Dados obtidos com uma digissonda CADI em São José dos Campos no dia 16/10/2003 às 19:50 LT e 21:20 LT respectivamente.

No início dos anos 70 uma grande quantidade de trabalhos foi publicada sobre as irregularidades da região F equatorial com a apresentação de um grande conjunto de dados obtidos com o radar de espalhamento incoerente de Jicamarca, no Peru (HUNSUCKER, ORIGINAL DE FARLEY, 1970). Subseqüentemente diversos pesquisadores (WOODMAN E LA HOZ, 1976, BASU et al., 1976 E 1982; McCLURE, 1974, 1977; BASU, 1978; TSUNODA, 1980, 1982), utilizando-se de diferentes técnicas de sondagem, como radares, satélites, ionossondas e foguetes, observaram que as irregularidades apresentam características significativas como: a) Grandes flutuações na densidade de plasma entre região interna e externa da irregularidade (~ 50%); b) grande variabilidade na escala espacial, podendo atingir até 7 ordens de magnitude (centímetros a centenas de quilômetros); c) Composição iônica dentro das bolhas indicativa de que elas se originavam em altitudes abaixo do pico da camada F; d) Estruturas quase alinhadas ao campo geomagnético.

Desde então com a modernização das técnicas de sondagem, a aplicação de técnicas digitais de análise, e a modelagem teórica dos fenômenos (OSSAKOW, 1980; OTT, 1979; HAERENDEL, 1992; ZALESK, 1982) muito conhecimento foi alcançado sobre estes fenômenos como, por exemplo, a variabilidade com o ciclo solar (SAHAI et al. 1999, 1985, 2002), a variabilidade sazonal (et al. 1981, BATISTA et al.. 1986), sua dinâmica e morfologia (FEJER, 1980, 1985, 1991; KELLEY et al., 1981, 2001, 2006, WEBER et al., 1978, 1980, SAHAI et al., 1981, 1988, 1999, 2000, 2006, SOBRAL et al., 1980A,B, 1981, 1990, 1997, ANDERSON E MENDILLO, 1983, MENDILLO E BAUNGARDNER, 1982, PIMENTA et al., 2002, 2003, a o dínamo das regiões E e F (RISHBETH, 1971, 1981; HEELIS et al., 1974), o efeito de ventos neutros trans-equatoriais (MARUYAMA E MATUURA, 1984, MENDILLO et al., 1992).

2.5.2 - Quanto à Nomenclatura Empregada no Estudo das Irregularidades

A nomenclatura empregada na descrição das irregularidades é variada e está relacionada em geral à técnica de observação. Alguns destes termos serão brevemente mencionados apenas como ilustração. O termo *Spread-F*, proposto por Cohen e Bowles, em 1961 (original de WHALEN, 2000) é utilizado, conforme

mencionado anteriormente, quando o instrumento de sondagem é a ionossonda; quando os instrumentos de sondagem são os radares os termos mais utilizados são plumas e bolhas. A detecção de irregularidades com instrumentos a bordo de satélites, que em geral medem densidade iônica, campos elétricos, ou mesmo o imageamento de emissões ultravioletas, empregam regularmente o termo depleção. O imageamento óptico de emissões ópticas da ionosfera emprega regularmente os termos depleção e bolhas de plasma. Numa publicação recente, Makela et al. (2006), propõe que o termo mais adequado para denominar as irregularidades seja o que se refere a processos físicos semelhantes a tempestades convectivas, ou, *Convective Ionospheric Storm (CIS)*.

Whalen (2000, 2001, 2002), propôs atenção às diferenças entre o *Spread-F* da base da camada e as bolhas de plasma. A Figura 2.11 ilustra a diferença entre os eventos, no que diz respeito a sua localização (latitude, altitude) e dimensão. São mostradas as linhas de campo geomagnético, bem como as cristas da anomalia de Appleton ($\pm 20^\circ$ do equador magnético). O *Spread-F* da base da camada é um evento limitado à região abaixo do pico de densidade da camada e só pode ser detectado por instrumentos localizados em latitudes próximas ao equador magnético. Além disto são irregularidades formadas continuamente após o anoitecer assim como a *Anomalia de Appleton*. As bolhas de plasma são irregularidades de grande escala que se estendem por vasta região latitudinal podendo ser detectadas por instrumentos localizados em regiões distantes do equador magnético, como por exemplo, nas regiões das cristas da anomalia de Appleton (baixas latitudes).

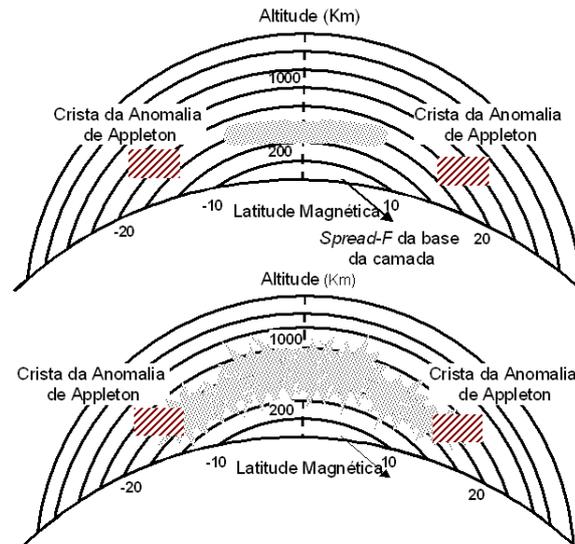


Figura 2.11: Ilustração das diferenças entre *Spread-F* da base da camada (parte superior) e bolhas de plasma (parte inferior da figura) com relação à latitude e ao campo geomagnético. A) O *spread-F* da base da camada é restrito à parte inferior do pico da camada F e se estende via linhas de campo por uma banda estreita em latitude detectável somente por instrumentos próximos ao equador magnético. B) As bolhas de plasma que emergem para altitudes bem mais altas se estendem via campo magnético a latitudes mais altas, podendo ser detectadas quando atingem a região das cristas da anomalia geomagnética.
 Fonte: Baseada em Whalen (2002).

2.5.3 – Quanto à Geração e às Causas das Irregularidades

A formação e desenvolvimento das irregularidades de grande escala do plasma ionosférico é regida principalmente pela eletrodinâmica das regiões E e F equatorial. Ao anoitecer surge um abrupto gradiente de condutividade longitudinal integrada ao longo do tubo de fluxo geomagnético na região próxima ao terminador solar, e a condutividade da camada E diminui drasticamente. A ação conjunta do aumento do vento neutro e do intenso gradiente de condutividade promovem um rápido aumento do campo elétrico zonal para leste, que agindo conjuntamente com o campo magnético, promove uma subida abrupta da camada F, ou deriva vertical $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, denominado *Pico pré-reversão*. A estes eventos soma-se o fato de que após o pôr-do-sol, a baixa ionosfera sofre processos de recombinação (perda de elétrons), dando origem a um gradiente vertical de densidade na base de camada F

configurando uma instabilidade na qual um fluido pesado é sustentado por um fluido mais leve. Este tipo de instabilidade foi proposta primeiramente por Dungey, em 1956, para explicar o desenvolvimento de instabilidades e é denominada Instabilidade de Rayleigh-Taylor (OSSAKOW, 1981; OTT, 1978; BASU E KELLEY, 1979) e será descrita a seguir.

2.5.4 - Instabilidade de Rayleigh-Taylor

2.5.4.1 – Teoria Linear

O mecanismo da Instabilidade de Rayleigh- Taylor é mostrado esquematicamente na Figura 2.12. Na figura observa-se um gradiente de densidade de plasma direcionada para cima, $\bar{\nabla}n$, na direção oposta à aceleração da gravidade, \bar{g} . A densidade da parte superior da interface é n_1 e na inferior é nula. O campo magnético é horizontal na direção que aponta para dentro do papel. As condições iniciais são: existe uma pequena perturbação senoidal local e o plasma local é não colisional, isto é, $\Omega_{i,e} \gg \nu_{i,e}$.

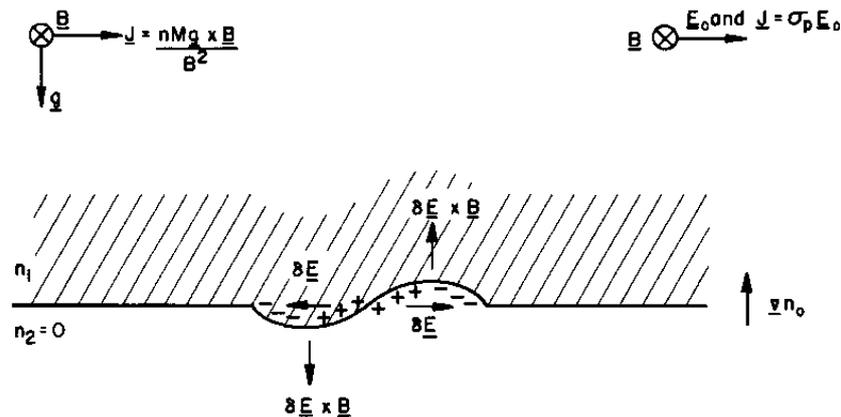


Figura 2.12: Diagrama esquemático da instabilidade de Rayleigh-Taylor na geometria equatorial.
Fonte: Kelley (1988, p. 122).

A interação do campo gravitacional com um campo magnético dá origem a um fluxo de corrente horizontal, J_x , expresso por:

$$J_x = \frac{nM \bar{g}_x \bar{B}}{B^2} \quad (2.17)$$

A corrente J_x é diretamente proporcional a n . Assim, há um acúmulo de cargas nas bordas da região de perturbação inicial. Conseqüentemente um campo elétrico restaurador surgirá, de modo a satisfazer a condição $\nabla J = 0$. Por outro lado, este campo elétrico também interage com o campo magnético, causando uma deriva $\partial \bar{E}_x \bar{B}$ de elétrons e íons para cima na região onde a densidade é baixa e uma deriva para baixo onde a densidade de plasma é mais alta. Esta deriva aumenta a perturbação ainda mais e torna o sistema bastante instável. Este mecanismo se assemelha à instabilidade Rayleigh-Taylor hidrodinâmica, na qual um fluido mais pesado é sustentado por um fluido mais leve. O sistema é instável quando as direções de \bar{g} e $\bar{\nabla}n$ são opostas.

O desenvolvimento matemático da teoria linear gravitacional de Rayleigh-Taylor, que considera apenas a gravidade como o único fator relevante na geração da instabilidade resulta numa taxa de crescimento da instabilidade, γ , dada por:

$$\gamma = \frac{g}{L v_{in}} \quad (2.18)$$

onde, g é a aceleração da gravidade, v_{in} é a freqüência de colisão entre íons e partículas neutras e L é o inverso da escala de gradiente de densidade:

$$L = \left[\left(\frac{1}{n_0} \right) \frac{dn_0}{dz} \right]^{-1} \quad (2.19)$$

A teoria linear de Rayleigh-Taylor fornece uma série de explicações para algumas observações experimentais. As observações com radares mostram que há uma forte tendência de se obter reflexões numa faixa de altitudes onde o gradiente de densidade é direcionado para cima. Estes dados mostram que as reflexões de radares começam a ser observados em um nível onde a densidade é aproximadamente 1% do valor do pico da camada F, ou seja, na base da camada. Assim, a teoria linear parece muito razoável para as observações na base da

camada F. Outro bom resultado obtido com a teoria linear diz respeito ao comportamento da taxa de crescimento γ com a altitude. Como se pode ver na equação 2.18, γ é inversamente proporcional à frequência de colisão. As primeiras observações do *Spread-F* (FARLEY, 1970) já mostravam que as reflexões ocorriam quando a camada F estava em altitudes mais elevadas. Por outro lado, lembrando que acima do pico da camada F o gradiente de densidade inverte de sinal, espera-se que qualquer instabilidade seja amortecida, o que não concorda com as observações experimentais. Assim, a teoria linear não pode explicar a existência de bolhas de plasma acima do pico de densidade da camada. Deste modo uma teoria modificada foi proposta, incluindo outros fatores.

2.5.4.2 – Instabilidade generalizada de Rayleigh-Taylor

A gravidade não é o único fator que gera instabilidades na ionosfera equatorial. Há ainda a influência do campo elétrico ambiente E_0 , bem como a ação dos ventos neutros. Na presença de campos elétricos e de ventos neutros, a densidade de corrente é dada por:

$$J = \sigma E_0' \quad (2.20)$$

onde:

$$\vec{E}_0' = \vec{E}_0 + \vec{u} \times \vec{B} \quad (2.21)$$

O campo elétrico zonal, induzido pelos ventos neutros, está na mesma direção do campo elétrico gravitacional. Assim, a taxa de crescimento da irregularidade calculada pela teoria linear deve incluir o efeito deste campo elétrico substituindo o fator g / ν_{in} por $g / \nu_{in} + E_{x0}' / B$, onde E_{x0}' é o campo elétrico zonal no referencial do vento neutro. Qualquer pequena perturbação na interface plasma-atmosfera neutra promoverá o acúmulo de cargas e o conseqüente aumento na perturbação, assim como no caso gravitacional. A condição necessária para a instabilidade é então que $\vec{E}_0' \times \vec{B}$ seja antiparalelo ao gradiente de densidade de plasma. Sabe-se que a

componente zonal do campo elétrico aumenta logo após o anoitecer (pico pré-reversão) e promove a subida da camada F para altitudes mais elevadas. Esta subida da camada pode aumentar a instabilidade de duas formas: 1) o campo elétrico para leste interage com B fazendo com a onda cresça para cima; 2) quando a camada sobe o fator g/v torna-se muito grande (as colisões em altitudes mais elevadas são menos freqüentes). Para um valor típico de campo elétrico na região, 0,5 mV/m, tanto a ação gravitacional como o campo elétrico zonal tem o mesmo peso no crescimento de uma instabilidade em uma altitude de 360 km. A taxa de crescimento da instabilidade de Rayleigh-Taylor generalizada (SULTAN, 1996; HANSON, 1996) que inclui a contribuição de campos elétricos zonais é dada por:

$$\gamma_L = \frac{\Delta n}{n} \left(\frac{E}{B} - \frac{g}{v_{in}} \right) - \beta_L \quad (2.22)$$

onde: n é a densidade eletrônica ambiente, E é o campo elétrico zonal ambiente, B é a intensidade do campo magnético, g é a aceleração da gravidade, v_{in} é a freqüência de colisão entre íons e partículas neutras e β_L é a taxa de recombinação das espécies iônicas majoritárias.

2.5.4.3 - Gradientes de Condutividade Pedersen

A taxa de crescimento da instabilidade do plasma deve levar em consideração o efeito das condutividades Pedersen integradas ao longo do tubo de fluxo:

$$\gamma_{FT} = \frac{\sum_P^F}{\sum_P^F + \sum_P^E} \left(\frac{E}{B} - U_L^P - \frac{g}{v_{eff}} \right) \times \frac{1}{R_E L^3 N_0^F} \frac{\partial}{\partial L} (L^3 N_0^F) - \beta_{FT} \quad (2.23)$$

onde $\sum_P^{F,E}$ é a condutividade Pedersen integrada ao longo das linhas de campo para as regiões E e F, U_L^P é a condutividade integrada ao longo do tubo de fluxo magnético devido a componente vertical do vento neutro, R_E é o raio da Terra, L é o parâmetro de McIlwain e N_0 é a densidade de plasma ambiente. Esta expressão inclui a contribuição de diversos fatores para a taxa de crescimento da instabilidade.

O termo gravitacional é importante em regiões onde a frequência de colisão é pequena, isto é, nas altitudes superiores a 360 km. Então, para que este termo torne-se importante é necessário que a camada tenha sofrido a deriva vertical para cima, a qual é provocada pelo campo elétrico zonal, que sua vez é gerado pelo vento neutro direcionado para leste.

Outro fator é o gradiente de densidade na base da camada, o qual é controlado pela condição de assimetria ou simetria na ionização que é controlado pelos ventos meridionais. Os ventos meridionais podem diminuir a taxa de crescimento da instabilidade ao diminuir o gradiente de densidade integrada ao longo da linha de campo ao mesmo tempo em que aumenta a condutividade e a taxa de recombinação. Por outro lado, o vento zonal aumenta o campo elétrico zonal pré-reversão o que causa o aumento da taxa de instabilidade. Finalmente, a relação entre as condutividades mostra que um aumento da condutividade integrada da camada E pode diminuir a taxa de crescimento da instabilidade, inibindo, assim, o desenvolvimento das bolhas.

2.5.5 – Comentários Sobre as Condições Favoráveis ou Desfavoráveis ao Desenvolvimento do Spread-F

O desenvolvimento do *Spread-F*, conforme descrito anteriormente, é regido principalmente pela eletrodinâmica das regiões E e F, como a rápida subida camada ao anoitecer (gerando instabilidades no plasma) e o alinhamento entre os tubos de fluxo magnético e o terminador solar (aumento da condutividade Pedersen integrada ao longo do tubo de fluxo magnético). Além destes proeminentes fatores, há duas outras questões de fundamental importância: a fonte das instabilidades e os mecanismos inibidores do *Spread-F*.

Vários trabalhos sugerem que a fonte semeadora das instabilidades são ondas de gravidade (ROTTGER, 1973, ORIGINAL DE NICOLLS et al., 2005; KELLEY et al., 1981, HYSSELL et al., 1990, NICOLLS E KELLEY, 2005). De acordo com a teoria de Beer, a onda de gravidade se propaga através da ionosfera com gradientes verticais de

densidade iônica e provoca flutuações ondulatórias nas densidades de íons e de elétrons, através de colisões entre partículas neutras e plasma. Alguns autores sugerem que as ondas de gravidade atuam como perturbações iniciais, as quais são posteriormente amplificadas pela instabilidade de Rayleigh-Taylor.

Outro fator envolvido com a questão do desenvolvimento ou supressão do *Spread-F* é o vento neutro transequatorial. Maruyama e Matuura (1984) estudaram o efeito de tais ventos no processo de desenvolvimento e supressão do *spread-F* e bolhas de plasma. Verificou-se que o vento tende a elevar a camada ionosférica no hemisfério para ele sopra e diminuir a altura da camada no outro hemisfério causando uma assimetria na contribuição da condutividade Pedersen integrada ao longo das linhas de campo. Deste modo, a presença de fortes ventos transequatoriais inibem a evolução do *spread-F* e das bolhas de plasma.

2.5.6 – Bolhas de Plasma

2.5.6.1 – Morfologia e Dinâmica

As bolhas de plasma ionosférico podem ser estudadas com o imageamento óptico das emissões atômicas que dão origem à luminescência noturna da camada F, como as emissões do oxigênio atômico: OI 630.0 nm, OI 777.4 nm, OI 557.7 nm. As primeiras observações ópticas das bolhas de plasma foram realizadas por Weber (1978, 1980) o qual utilizou um sistema de imageamento óptico do tipo *all-sky*. Suas observações mostraram a presença de bandas de depleção da intensidade da luminescência noturna da emissão OI 630,0 nm que eram quase alinhadas às linhas de campo geomagnético na direção norte-sul.

Subseqüentemente outros pesquisadores empregaram medidas ópticas para o estudo da morfologia e dinâmica das bolhas (SOBRAL et al., 1980A,B, 1981, 1990, 1997; MENDILLO E BAUNGARDNER, 1982; ANDERSON E MENDILLO, 1983; SAHAI et al., 1981, 1988, 1999 E 2000, 2006), FAGUNDES et al., 1995 E 1999, PIMENTA et al., 2001, 2002, 2003, ABALDE et al., 2001, MAKELA et al., 2001, 2003, 2006).

A Figura 2.13 apresenta duas imagens da emissão OI 630.0 nm em horários onde não há a presença de bolhas (19:26 LT – figura 2.13a) e onde se observa a presença de bolhas de plasma – região mais escura ao centro da imagem (21:38 LT - Figura 2.13b) obtidas no dia 16/10/2003 em São José dos Campos.

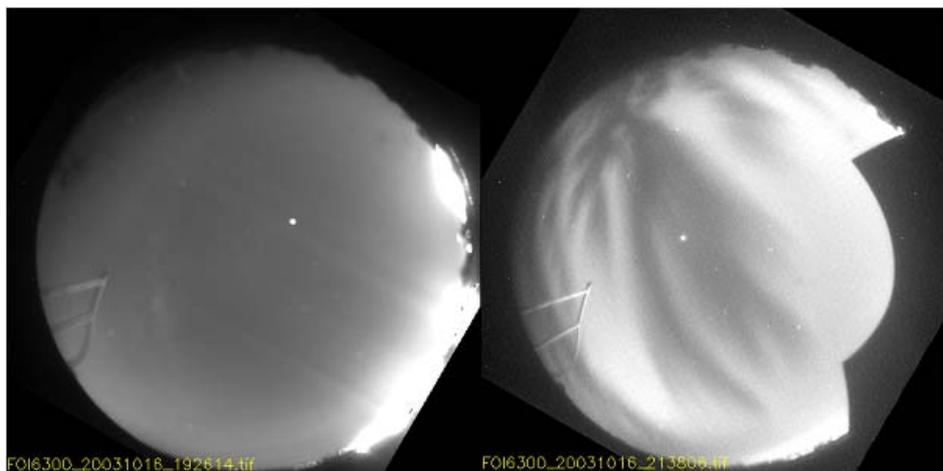


Figura 2.13: Imagens cruas obtidas com imageador *all-sky* no dia 16/10/2003 em São José dos Campos ($23,2^{\circ}$ S; $45,9^{\circ}$ W; $17,6^{\circ}$ S *dip*), às 19:26 LT (sem bolhas) e 21:38 LT (com bolhas).

As dimensões típicas das bolhas de plasma variam de dezenas a centenas de quilômetros na direção leste-oeste (MENDILO E TYLER, 1983, KELLEY et al., 2002, PIMENTA et al., 2003) e sua extensão norte-sul pode variar significativamente dependendo da altura que a irregularidade atinge no equador (*Apex height*). A densidade eletrônica entre o interior e o exterior da bolha pode variar de 30 a 50% segundo Mukherjee (2003) ou até algumas ordens de magnitude (LI et al., 2005, etc.). Estruturas como bifurcações podem ser observadas a leste ou a oeste da bolha, sendo que a quantidade e a dimensão das mesmas apresenta alguma dependência com o ciclo solar, sendo mais numerosas no período de alta atividade solar quando a largura zonal das bolhas é maior (PIMENTA et al., 2001, HUANG E KELLEY, 2006). Estruturas de menor escala podem ser observadas na parede oeste da bolha, que já foi apontada como a mais propensa ao desenvolvimento de instabilidades secundárias (PIMENTA et al., 2003, MENDILLO E BAUNGARDNER, 1982, TSUNODA, 1983). Estruturas finas observadas através do imageamento da emissão OI 777.4 nm, cujo pico de emissão coincide com o pico de densidade eletrônica da

camada F foram brevemente reportadas por Abalde et al. (2001) e maiores detalhes serão discutidos em capítulos posteriores.

Quanto as principais características dinâmicas deve-se mencionar que as bolhas de plasma se deslocam de modo geral de oeste para leste com a mesma velocidade de deriva zonal do plasma ionosférico (SOBRAL et al., 1990, 1991), com velocidades que podem variar de 100 m/s a 200 m/s antes da meia-noite local diminuindo após este horário para 50 m/s. Makela et al. (2005) reportaram um deslocamento zonal para leste de curta duração durante a ocorrência de perturbações magnéticas num sítio de média latitude no Havaí. Além disto, as derivas zonais das bolhas de plasma apresentam variabilidade diária, sazonal, com o ciclo solar, com a latitude e longitude, as quais serão discutidas a seguir.

2.5.7 – Variabilidade

A ocorrência de bolhas e de *spread-F* da base da camada apresenta grandes variações. Além da variabilidade diária do campo elétrico responsável pelo crescimento da instabilidade, ainda observa-se variabilidade sazonal, com o ciclo solar, com a longitude e com a atividade geomagnética, que serão brevemente descritos a seguir.

2.5.7.1 - Variabilidade com o Ciclo Solar

Estudos da deriva vertical da camada F equatorial ao anoitecer mostraram que entre o período de máximo e de mínimo solar a velocidade de deriva duplica, o que é devido à variação imposta pela atividade solar ao padrão de ventos termosféricos e as condutividades longitudinais integradas da camada E, o que afeta o dínamo da região F. Estas variações se refletem na ocorrência do *Spread-F*, uma vez que uma das condições para sua ocorrência é a subida da camada ao anoitecer (FEJER, 1979; ABDU et al., 1981A,B; BATISTA et al., 1986).

Verificou-se que o número de bolhas observadas é menor durante períodos de baixa atividade solar e que nos dois períodos há maior ocorrência de bolhas nos meses de

verão do hemisfério sul. Além disto, maior percentagem de bolhas (66%) atinge a altitude máxima no equador magnético durante o período de máximo solar, contra apenas 34% no período de mínimo (SAHAI et al., 1999, 2000). Pimenta et al. (2001) mostraram variações no padrão das bolhas durante os meses de verão entre um período de máximo e de mínimo solar. Verificou-se que durante o período de máximo, o percentual de ocorrência de bolhas aumenta depois do anoitecer, atinge um máximo por volta das 23:00 LT e decresce gradualmente nas horas posteriores. No período de mínima atividade solar, o percentual aumenta depois do anoitecer, atinge um valor máximo à meia-noite (LT) e decresce rapidamente em seguida. A ocorrência das bolhas de plasma com o ciclo solar tem mostrado que o período próximo aos meses de outubro e março (equinócios) é o que apresenta maior dependência com o ciclo solar, isto é, observam-se mais bolhas em outubro e março no período de máximo solar que no período de mínimo, enquanto nos meses de novembro e fevereiro (período usual de máxima ocorrência de bolhas), há pouca dependência com o ciclo solar (SOBRAL et al., 2002; SAHAI et al., 1999). Já está bem estabelecido que a amplitude do pico Pré-Reversão aumenta significativamente com o fluxo solar (FEJER, 1981). Este aumento da amplitude do pico Pré-Reversão é uma possível causa para o aumento da ocorrência de bolhas entre um período de mínimo e de máximo solar.

2.5.7.2 - Variabilidade Sazonal

A variabilidade sazonal das bolhas de plasma foi verificada por diversos pesquisadores, sendo que a frequência mínima de ocorrência é nos meses do inverno (de maio a agosto) e a frequência de maior ocorrência é entre os meses de setembro a abril, com máxima ocorrência entre dezembro e janeiro no setor brasileiro (ABDU, 1980; SOBRAL, 2002; BATISTA et al., 1986; SAHAI et al., 1994, 1997; PIMENTA, 2001). Esta sazonalidade apresenta dependência longitudinal, com o ângulo de declinação magnética e com o alinhamento do meridiano magnético e o terminador solar (HEELIS, 1974; ABDU, 1981; BATISTA et al., 1986; TSUNODA, 1985). Abdu et al. (1981) realizaram um estudo comparativo do pico pré-reversão na região F equatorial em duas estações do equador magnético situadas em diferentes longitudes: Fortaleza (4°S, 38°W) e Jicamarca (12°S, 77°W). Foram verificadas

significativas diferenças no padrão sazonal do pico pré-reversão nas duas estações. Tais variações foram atribuídas às diferenças nos ângulos de declinação magnética nas duas regiões, que provocam diferenças na duração do anoitecer das regiões E conjugadas, afetando a taxa de desenvolvimento dos campos elétricos de polarização da região F. Batista et al. (1986) estudaram a influência do ângulo de declinação magnética na deriva vertical do plasma da região F. Verificou-se que a máxima ocorrência de *Spread-F* ocorre na estação onde o terminadouro solar estiver mais alinhado ao meridiano magnético, correspondendo a uma situação onde o anoitecer é quase simultâneo nas duas regiões E conjugadas. Abdu et al. (1992) analisaram o padrão de ocorrência do *Spread-F* em Fortaleza (5° W – região equatorial) e em Cachoeira Paulista (28° W – baixa latitude) e sugeriu que pequenos ângulos entre o terminador solar e o meridiano magnético favorecem o desenvolvimento do *Spread-F*. No entanto, o perfeito alinhamento entre os dois tende a decrescer a taxa de crescimento da irregularidade. Além destes fatores o campo elétrico zonal da região F e seu gradiente de altura podem ser fatores cruciais nas condições iniciais de desenvolvimento do *Spread-F*, uma vez que este gradiente pode produzir variações de densidade na base da camada.

As variações sazonais observadas influenciam no aumento pré-reverso do campo elétrico zonal após o anoitecer (Pico pré-reversão) e conseqüentemente determinam se haverá ou não a ocorrência de bolhas. As diferenças sazonais entre períodos de mínima e baixa atividade solar foram estudadas por Sobral et al. (2002) que mostraram a ocorrência das bolhas é similar entre um período de máxima e de mínima atividade solar com exceção dos meses do equinócio (março, abril, setembro, outubro). Para estes meses o percentual de ocorrência de bolhas é 80% maior durante o período de máxima atividade solar.

2.5.7.3 - Variabilidade Diária

A variabilidade diária observada na ocorrência do *spread-F* e bolhas de plasma é tema de estudo de diversos pesquisadores (ABDU et al., 1996; STEPHAN et al., 2002; ABDU et al., 2003; TSUNODA, 2005, 2006, 2007; CARRASCO et al., 2005) e refere-se ao

fato de que mesmo numa estação típica de Spread-F, há dias em que mesmo ocorrendo a subida vertical da camada F não se observa o desenvolvimento do Spread-F. Stephan et al. (2002) analisaram dados de radiossondagem e observaram que a magnitude do pico pré-reversão era menor em cenários em que havia a presença de camada E esporádica, Es, ao anoitecer, e maior quando da interrupção da esporádica antes do anoitecer, com posterior evolução do spread-F. Tais observações levaram a sugestão de que a Es inibe o desenvolvimento do spread-F. O mecanismo proposto foi que a presença das camadas Es esporádicas afetam a relação entre as condutividades das regiões E e F diminuindo a taxa de crescimento da instabilidade de Rayleigh-Taylor em até uma ordem de magnitude. Abdu et al. (2003) verificaram, a partir de análise de dados de radiossondagem em Fortaleza (região equatorial), uma relação entre a amplitude do pico pré-reversão e a interrupção ou não-interrupção da camada E esporádica. Esta relação foi explicada em termos do desenvolvimento dos campos elétricos verticais/zonais associados a ventos termosféricos de grande amplitude e responsáveis pela rápida subida da camada ao anoitecer. Um cenário caracterizado pela competição entre campos elétricos verticais e ventos zonais seria determinante nos processos de formação e interrupção da camada E esporádica e subsequente desenvolvimento do Spread-F. Outros mecanismos físicos têm sido propostos para explicar a variabilidade diária do *Spread-F*. Tsunoda (2005, 2006, 2007)) propôs que a presença de estruturas de ondas de grande escala (*LSWS – Large Scale Wave Structure*) que se desenvolvem na base da camada F podem ser os precursores majoritários do *spread-F*, sobrepujando a influência do pico pré-reversão, uma vez que se observa com dados de radar que o *Spread-F* nem sempre se desenvolve depois do Pico pré-reversão, mas sempre é presente quando as estruturas de ondas mencionadas estão presentes.

2.5.7.4 – Variabilidade com Atividade Magnética

Conforme descrito no item 2.5.7.2, a ocorrência de irregularidades do plasma equatorial predomina na chamada estação do *Spread-F*, entre os meses de setembro e abril, com um máximo em dezembro e janeiro, tanto na região equatorial

como em baixas latitudes. Entre os meses de maio a agosto a observação das irregularidades em baixas latitudes é ocasional e apresenta forte dependência com o nível de atividade magnética. Vários autores descreveram esta correlação: Dabas et al., 1988, Aarons 1991, Sahai et al., 1994, etc. Observou-se que fora da estação do *Spread-F* em baixas latitudes, nos meses próximos ao solstício de junho (taxa de ocorrência mínima) as irregularidades são observadas em baixas latitudes quando associadas a distúrbios magnéticos (Sahai et al., 1994). As rápidas subidas da camada F no equador que levam a ocorrência de *Spread-F* nestas ocasiões seriam provocadas pela penetração de campos elétricos originários de altas latitudes na região equatorial. No entanto, observou que nem todas as noites perturbadas levaram ao desenvolvimento de irregularidades.

2.6 - DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS PROPAGANTES

2.6.1 - Aspectos Gerais

Estruturas ondulatórias que se propagam na região ionosférica, ou distúrbios ionosféricos propagantes denominados (*TIDs*) são geralmente interpretados como flutuações na densidade do plasma que se propagam na ionosfera num amplo intervalo de velocidades e frequências. Hines (1960) foi pioneiro ao relacionar os distúrbios observados na ionosfera à propagação de ondas de gravidade através da ionosfera, de modo que a partir disto, a ionosfera começou a ser amplamente aceita como um traçador de manifestações atmosféricas. Os *TIDs* podem ser classificados em duas categorias: *Large scale TIDs (LSTIDs)*, com períodos superiores a 1 hora e velocidades de propagação maiores que 300 m/s na termosfera e *Medium Scale TIDs*, ou *MSTIDs*, cujos períodos variam entre minutos e horas e velocidades iguais ou inferiores a 300 m/s (HOCKE E SCHLEGEL, 1996). Hargreaves (1995) acrescenta a direção de propagação na classificação, sendo que os *LSTIDs* se movimentam no sentido pólo-equador e os *MSTIDs* se propagam numa direção inclinada com relação à direção vertical, sendo que no hemisfério norte se movimentam predominantemente para sudoeste e no hemisfério sul para noroeste. As fontes dos *LSTIDs* estão relacionados a distúrbios geomagnéticos como auroras, tempestades

geomagnéticas, que aquecem a termosfera pelo efeito Joule. O aquecimento da atmosfera neutra produz uma transferência de energia para latitudes mais baixas na forma de ondas termosféricas. Por outro lado, algumas investigações relacionam os *MSTIDs* a fenômenos meteorológicos como tempestades que produzem ondas de gravidade que, se propagando a regiões da baixa ionosfera, produzem perturbações através de colisões entre partículas neutras e ionizadas (HERNANDEZ-PAJARES et al., 2006, HUNSUCKER, 1982). O grau de interação entre as partículas neutras sob a ação de uma onda de gravidade e as partículas ionizadas obrigadas a se moverem ao longo das linhas de campo depende das densidades de ambas. Francis (1975) apresentou uma revisão dos processos globais de propagação de ondas de gravidade, no qual são listadas as possíveis fontes dos *MSTIDs*. Dentre estas fontes foram relacionados: a) os fenômenos na atmosfera superior como precipitação de partículas em médias latitudes, movimento supersônico do terminador solar, eletrojato equatorial, além dos b) fenômenos troposféricos: fenômenos orográficas (lee waves), tempestades, frentes climáticas. No entanto, apesar de inúmeros estudos na área, a determinação da fonte dos *MSTIDs* é complexa devido à mudança contínua na forma da onda assumida pelos *TIDs*. Segundo Francis (1975), “a mudança na forma da onda dificulta a localização da sua fonte, embora isto não signifique que esta não possa se propagar por longas distâncias”.

É importante ressaltar que os *MSTIDs* também são fenômenos relacionados a processos de instabilidades eletrodinâmicas geradas em médias latitudes explicadas pela teoria de instabilidade de Perkins (MARTINIS et al., 2006, KELLEY E MAKELA, 2001). A propagação vertical de ondas de gravidade tende a modular a base da camada F, movendo-a para cima e para baixo ou, regiões de menor e maior perda química (recombinação), criando assim, o que se pode denominar de bandas ionosféricas. Os *MSTIDs* podem ser detectados tanto em médias latitudes como em baixas latitudes. Ogawa et al. (2006) reportou um estudo envolvendo a observação simultânea de *MSTIDs* e bolhas de plasma na região de baixa latitude/equatorial do setor longitudinal japonês. Neste estudo eles tentam correlacionar a propagação de ondas de gravidade na baixa ionosfera e a ocorrência de *Spread-F* equatorial/bolhas de plasma. Esta relação é sugerida por diversos autores (ROTTGER, 1973, KELLEY et

al., 1981, E OUTROS). A Tabela 2.1 apresenta um resumo das principais características dos *TIDS* de grande e média escala.

Tabela 2.1: Características principais dos distúrbios ionosféricos propagantes de grande escala (*LSTIDs*) e os de média escala (*MSTIDs*).

Estrutura	Período	λ (km)	Veloc. (m/s)	Região de origem	Direção de propagação
<i>LSTIDs</i>	30 minutos a várias horas	> 1000	400-1000	Altas latitudes	Dos pólos para equador Sentido Norte-Sul
<i>MSTIDs</i>	15 a 60 minutos	< 1000	100-300	Altas e médias latitudes	SE para NO (Hemisfério Sul) NE para SO (Hemisfério Norte)

SE= sudeste; NO= noroeste; NE= nordeste; SO= sudoeste

2.6.2 - Detecção multi-instrumental dos *MSTIDs*

Os primeiros trabalhos publicados sobre *MSTIDs* surgiram na década de 50 quando da observação do espalhamento dos sinais de rádio observado nos ionogramas (*spread-F*) com instrumentos situados em regiões de médias latitudes (MC NICOLL ET. AL, 1956; BOWMAN, 2001). Um grande conjunto de eventos foi associado à passagem de *TIDs*, se propagando para noroeste (hemisfério sul) com velocidade entre 40 e 100 m/s. Uma das características marcantes era a relação inversa entre a taxa de ocorrência dos eventos e o nível de atividade solar. Outro traço evidente era a subida da camada F noturna e as depleções na densidade eletrônica associadas ao espalhamento, durante a passagem dos *TIDs*.

Nos anos seguintes os estudos de tais fenômenos se estenderam a diversas técnicas: ionossondas digitais (BOWMAN, 1990, 2002; SHIOKAWA et al.. 2003), radares (FUKAO et al., 1991, OGAWA et al. 1994; KELLEY et al., 2000, GARCIA et al.. 2000), satélites (EVANS et al., 1983, ORIGINAL DE SHIOKAWA, 2003), medidas de absorção de ondas de rádio (LASTOVICKA, 2001), GPS (HERNANDEZ-PAJARES, 2006), imageamento óptico (MENDILLO et al., 1997, GARCIA et al., 2000A, SHIOKAWA et al., 2005, PIMENTA

et al., 2008). A cada técnica está associada uma determinada assinatura o que proporciona a determinação de parâmetros e características associados às ondas (comprimento de onda, velocidade de fase, direção de propagação, por exemplo).

Neste trabalho, o enfoque será dado nas características ópticas do fenômeno e nas informações que delas podem ser extraídas, com uma breve revisão dos trabalhos publicados na área.

2.6.3 - Manifestação Óptica dos *MSTIDS*

As técnicas de imageamento óptico são amplamente utilizadas no estudo das características morfológicas e dinâmicas dos *MSTIDS* (MENDILLO et al., 1997; GARCIA et al., 2000A, 2000B, SHIOKAWA et al., 2005, OGAWA et al., 2006, MARTINIS et al., 2006, OTSUKA et al., 2004, PIMENTA et al., 2008). Observações ópticas com imageadores *all-sky* revelam estruturas bidimensionais dos *MSTIDS* se manifestam como bandas de depleção da emissão termosférica OI 630.0 nm, se propagando na direção sudeste para noroeste no hemisfério sul e de nordeste para sudoeste no hemisfério norte (KUBOTA et al., 2000; OTSUKA et al., 2007). A bandas de depleção estão associadas aos movimentos verticais da base da camada F, moduladas por ondas de gravidade. Como foi descrito no capítulo 3, a intensidade da emissão OI 630.0 nm é proporcional à densidade eletrônica na base da camada e aos movimentos verticais da mesma. O movimento vertical para cima diminui a intensidade da emissão por deslocar a camada para regiões de baixa concentração de O_2^+ e conseqüente menor taxa de recombinação química. O movimento vertical para baixo leva a camada a zonas de maior recombinação e maior produção dos estados excitados que resultam na emissão OI 630.0 nm. Nesta seção faremos uma revisão dos principais estudos baseados em imageamento óptico e por questão de simplicidade as estruturas observadas com imagens da emissão OI 630.0 nm serão denominadas, neste trabalho, ***bandas termosféricas de média escala***.

Mendillo et al. (1997) apresentaram um dos primeiros trabalhos sobre a observação de bandas termosféricas através do imageamento óptico da emissão OI 630.0 nm,

numa estação de média latitude no hemisfério Norte, em Arecibo (18.3° N, 66.7°W). Eles verificaram que estas bandas se propagavam para sudoeste com velocidades de fase em torno de 100 m/s. As características dinâmicas destas bandas levaram-nos a concluir que se tratavam de ondas de gravidade se manifestando na região F como *TIDs*.

Taylor et al. (1998) observaram a presença de estruturas ondulatórias nas imagens da emissão OI 630.0 nm deslocando-se de nordeste para sudoeste no setor japonês, com velocidades de 100 m/s. Tais estruturas foram associadas à ocorrência de distúrbios ionosféricos propagantes, ou *TIDs*.

Garcia et al. (2000) apresentou o primeiro estudo estatístico de observações de *MSTIDS* através do imageamento da emissão OI 630.0 na estação de Arecibo, em períodos geomagneticamente calmos. A direção de propagação das bandas para sudoeste, velocidades de propagação em torno entre 50 e 170 m/s e comprimentos de onda variando entre 50 e 500 km foram verificadas. Os dois anos de observação em período de baixa atividade solar levaram-nos a relacionar a ocorrência das bandas termosféricas com a baixa taxa de crescimento da instabilidade de Perkins.

Shiokawa et al. (2003) apresentaram um estudo estatístico da ocorrência dos *MSTIDs* no setor longitudinal japonês entre 1998 e 2000 e verificaram que as frentes de onda observadas com um máximo de ocorrência antes da meia-noite, se propagam de nordeste para sudoeste. Num estudo posterior, Shiokawa et al. (2005) verificaram entre outras características a natureza conjugada do fenômeno nos dois hemisférios (Japão e Austrália), um indicativo da natureza eletrificada do fenômeno, já reportada por Saito et al. (1995). Ogawa et al. (2006) também observaram a ocorrência de ondas termosféricas com imagens da emissão OI 630,0 nm e verificaram a maior taxa de ocorrência entre os meses de maio e junho, velocidades de fase de 300 m/s e comprimentos de onda de até 700 km.

Martinis et al. (2006) apresentaram um caso de observação de bandas termosféricas de média escala com um imageador *all-sky* localizado em uma estação de baixa

latitude no hemisfério sul: El Leoncito, Argentina (31,8S, 69,3W, lat. mag. 18S). Características como o alinhamento com direção nordeste-sudoeste e deslocamento para noroeste foram verificadas.

Em publicação mais recente, Pimenta et al. (2008) apresentaram um estudo sobre bandas termosféricas observadas com o imageamento óptico da emissão OI 630.0 nm sobre o setor longitudinal brasileiro. Os casos relatados mostraram que no hemisfério sul estas bandas podem ser observadas ao sul e na região da crista da Anomalia de Appleton e sua direção de propagação é para noroeste com velocidades típicas de 200 m/s. A Figura 2.14 ilustra um evento observado na noite de 07-08 de setembro de 1997 às 23:00 hora local, com um imageador *all-sky* localizado em Cachoeira Paulista (22.7°S, 45°W, dip latitude 18°S, declinação magnética 20°W).

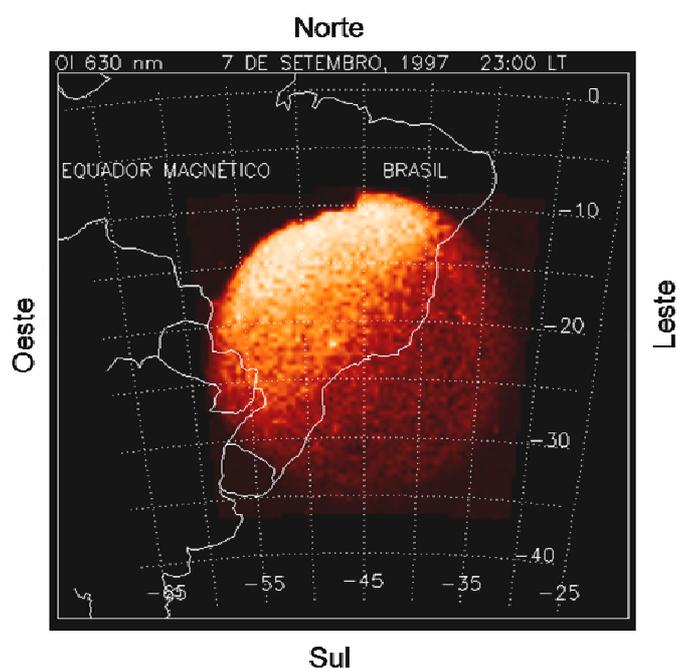


Figura 2.14: Imagem da emissão OI 630,0 nm obtida com um imageador *all-sky* na noite de 07-08 de setembro de 1997 em Cachoeira Paulista (22.7°S, 45°W, dip latitude 18°S, declinação magnética 20°W). A região escura (depleção na intensidade da OI 630.0 nm) tomando quase 50% da imagem assinala a presença de uma banda termosférica.
Fonte: Pimenta et al (2008).

A banda termosférica de média escala apresenta um alinhamento na direção nordeste-sudoeste ocupando toda a extensão do campo de visada do imageador. Para uma cobertura de 180° (horizonte a horizonte) da lente *all-sky*, e considerando a altura de máxima emissão OI 630,0 nm, em torno de 250 km, isto corresponde a uma área de cobertura aproximada de 2000 km^2 , o que indica que banda pode atingir distâncias longitudinais superiores a este valor.

Para verificarmos a direção de propagação apresentamos uma seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas na noite de 30-31 de agosto de 1987, em Cachoeira Paulista ($22,7^\circ \text{ S}$; $45,0^\circ \text{ W}$; dip latitude: 18° S), na qual se observa que a passagem das bandas ocorre entre 00:00 LT e 01:40 LT e que a direção de propagação é de sudeste para noroeste – Figura 2.15. O alinhamento (nordeste-sudeste), a inclinação das estruturas com relação ao meridiano magnético e a direção de propagação observados são características marcantes que as diferem das irregularidades de plasma de grande escala da região equatorial (bolhas de plasma). Conforme descrito em seções anteriores, as bolhas de plasma são estruturas de grande escala quase alinhadas às linhas do campo geomagnético que se propagam predominantemente para leste, podendo se deslocar para oeste em condições extremas durante tempestades magnéticas.

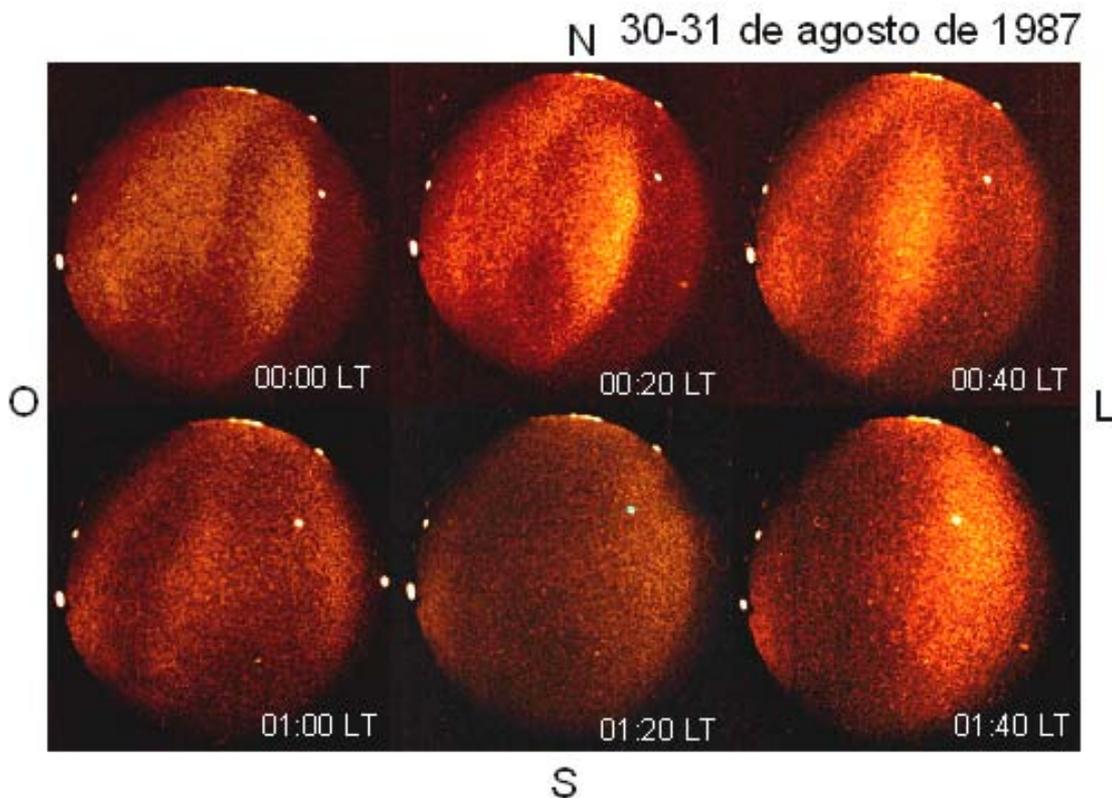


Figura 2.15: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador *all-sky* na noite de 30-31 de agosto de 1987, em Cachoeira Paulista ($22,7^{\circ}$ S; $45,0^{\circ}$ W; dip latitude: 18° S). A passagem das bandas termosféricas ocorre a partir das 00:00 LT até as 01:40 LT. Fonte: Pimenta et al. (2008).

Observa-se que a passagem das bandas entre 00:00 LT e 01:40 LT na noite de 30-31 de agosto de 1987 está associada ao espalhamento observado no sinal de rádio de uma ionossonda situada na mesma localidade, conforme mostra a Figura 2.16. Na Figura 2.16 são mostrados os ionogramas obtidos com uma ionossonda em Cachoeira Paulista nos seguintes horários: A) 01:15 LT, B) 01:30 LT e C) 01:45 LT, onde se observa claramente a ocorrência do *spread-F* nos horários de passagem das bandas pelo zênite da imagem.

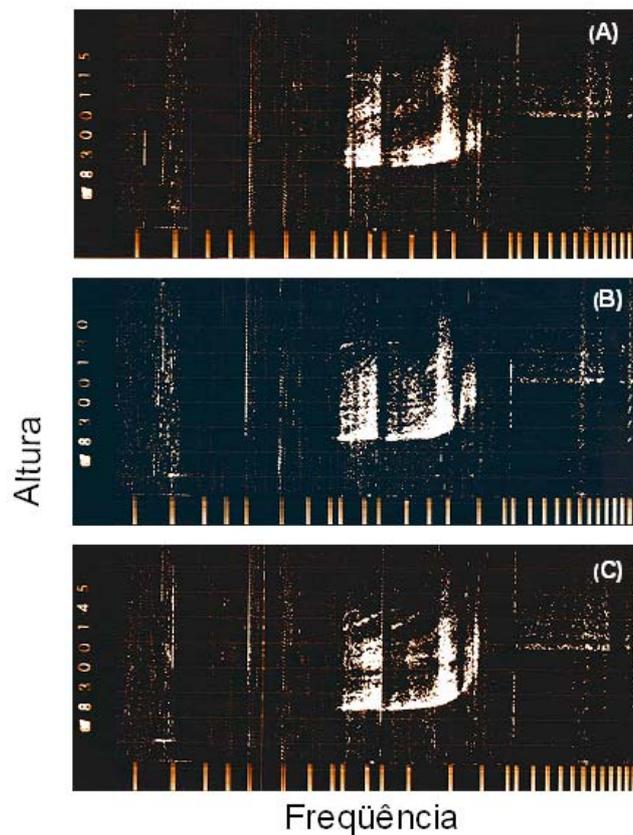


Figura 2.16: Ionogramas obtidos na noite de 30-31 de agosto de 1987 em Cachoeira Paulista exibindo espalhamento do sinal de rádio (*Spread-F*) durante a passagem de bandas termosféricas de média escala mostradas na Figura 2.15 nos seguintes horários A) 01:15 LT, B) 01:30 LT e C) 01:45 LT.

O *spread-F* mostrado na Figura 2.16 associado à passagem *TIDs* é uma questão regularmente reportada por diversos autores para eventos detectados em médias latitudes (BOWMAN, 1981, 1990, 1992, 1993, 2001; ABDU et al., 1982, SHIOKAWA et al., 2003). Bowman (1993) compara os espalhamentos verificados nos traços dos ionogramas obtidos em regiões equatoriais e em médias latitudes e verifica que são de natureza semelhante, estando associados à reflexão dos pulsos da ionossonda por superfícies isoiônicas que apresentem alguma inclinação com a horizontal (*Range Spread-F*) ou a gradientes horizontais na densidade máxima do plasma ionosférico (*Frequency spread-F*). No entanto, numa bolha de plasma da região equatorial, o espalhamento parece ser mais severo devido à grande variedade de escalas dimensionais e de densidade das irregularidades no interior da mesma. A grande variedade de escalas dimensionais no seu interior pode provocar diferentes

níveis de *Spread-F*, sendo que a observação óptica das bolhas de plasma está sempre relacionada à ocorrência de *Range Spread-F* com posterior *Frequency Spread-F*.

Um estudo estatístico de bandas termosféricas de média escala/*MSTIDs* realizado por Shiokawa et al. (2003) mostrou que apenas 10-15 % das observações ópticas de *MSTIDs* estavam associadas ao *Spread-F* observado em ionogramas.

Se ambos os fenômenos podem ou efetivamente provocam espalhamento do tipo *Spread-F*, então seu estudo é de fundamental importância nas previsões de clima espacial, bem como na questão tecnológica envolvendo sistemas de navegação e posicionamento, severamente afetados pela ocorrência de irregularidades ionosféricas.

2.6.4 - Instabilidade de Perkins

Os fenômenos descritos anteriormente como bandas termosféricas de média escala e genericamente denominados *MSTIDs* estão relacionados a instabilidades do plasma de médias latitudes, e foram previstos teoricamente por Perkins em 1973. Um dos resultados mais marcantes da teoria de Perkins e comprovadas experimentalmente é a inclinação entre o eixo longitudinal das estruturas e o meridiano magnético, em torno de 20° . Além disto, alguns destes autores relacionaram a maior taxa de ocorrência das bandas termosféricas em períodos de baixa atividade solar à relativamente maior taxa de crescimento da instabilidade de Perkins neste período, associado a menor densidade eletrônica na camada F (até uma ordem de magnitude entre máxima e mínima atividade solar). A direção de propagação das bandas observadas e sua inclinação com o meridiano magnético são fortes indicativos de que são originárias de regiões de médias latitudes do hemisfério sul.

Assim, uma descrição dos princípios fundamentais desenvolvidos por Perkins para explicar as instabilidades de plasma das regiões de médias latitudes é feita a seguir.

O modelo eletrodinâmico proposto por Perkins (1973) para explicar as irregularidades do plasma da região de médias latitudes baseou-se no princípio de que a ionosfera será conduzida a uma condição de equilíbrio contra a ação da gravidade na presença de campo elétrico para leste ou um vento neutro para o equador. No caso em que os campos elétricos tenham componentes para oeste ou os ventos neutros soprem para o pólo não há equilíbrio, pois as forças eletromagnéticas, ventos neutros, gravidade e a difusão do plasma impulsionam o plasma para baixo, onde fica sujeito a processos de recombinação tendendo a desaparecer. Os princípios fundamentais da teoria de Perkins podem ser resumidos da seguinte forma (HAMZA, 1999):

- 1) O campo magnético \mathbf{B} é uniforme e faz um ângulo D com a direção horizontal;
- 2) A gravidade empurra o plasma para baixo ao longo das linhas de campo geomagnético e cria correntes na direção $\mathbf{g} \times \mathbf{B}$ (para leste);
- 3) A atmosfera neutra consiste de espécies horizontalmente estratificadas e distribuídas em altitude de acordo com a altura de escala H ;
- 4) Campos elétricos e ventos neutros aumentam as correntes Pedersen, as quais, através de forças $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$, podem sustentar a ionosfera;
- 5) A recombinação e o arraste iônico são desprezíveis;
- 6) O plasma está numa altura tal que $\Omega = q_e B / Mc \gg v_{in}$ e as únicas correntes significantes são as correntes Pedersen;
- 7) A contribuição da região E à condutividade ionosférica é desprezível;
- 8) Íons e elétrons são isotérmicos;

O sistema de coordenadas adotado por Perkins é mostrado na Figura 2.17:

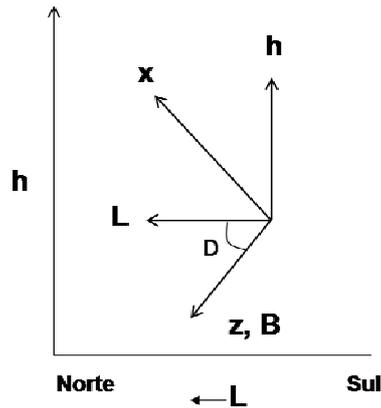


Figura 2.17: Sistema de coordenadas adotado por Perkins (1973). A direção leste está para dentro do papel (x). Os vetores unitários L e h estão na direção horizontal e vertical respectivamente. Os vetores unitários z e x são paralelos e perpendiculares ao campo magnético B, com os quais fazem um ângulo D.

Perkins propôs situações tais que o equilíbrio era do tipo instável. Duas situações poderiam levar a esta configuração: a) $E_{leste} + U_{sul} B > 0$, b) o vetor de onda faz um ângulo com a direção leste entre 0 e θ , onde θ é dado por:

$$\theta = \arctg \left[\frac{U_{leste} B - E_{sul}}{E_{leste} + U_{sul} B \text{sen} D} \right] \quad (2.24)$$

Tais cenários expressam uma ionosfera caracterizada por bandas de baixa densidade ascendentes e de alta densidade descendentes, com uma taxa de crescimento dada por:

$$\gamma = \frac{E_0}{BH} \cos(D) \text{sen}^2(\theta/2) \quad (2.25)$$

onde: $E_o^2 = [E_{leste} + U_{sul} B \text{sen}(D)]^2 + (U_{leste} B - E_{sul})^2$ é o campo elétrico efetivo, E_{sul} é o campo elétrico para sul, U_{sul} e U_{leste} são as componentes sul e leste do vento respectivamente, H é a altura de escala e $\theta/2$ é o ângulo onde o vetor de onda é mais instável.

Resumidamente, Perkins propôs que a ionosfera de médias latitudes é sustentada por forças $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ devida a campos elétricos ou ventos neutros, que impulsionam a ionosfera a uma altitude de equilíbrio tal expressa pela equação de balanço:

$$\left[\frac{Ee}{B} + U_s \sin(D) \right] \cos(D) = \left(\frac{g}{\langle \nu \rangle} \right) \text{sen}^2(D) \quad (2.26)$$

onde D é a declinação magnética, g é a aceleração da gravidade, $\langle \nu \rangle$ é a frequência de colisão íons-neutras ponderada pela densidade, dada por:

$$\langle \nu_{in} \rangle = \frac{\int n(s) \nu_{in} ds}{\int n(s) ds} \quad (2.27)$$

onde a integral é calculada paralelamente ao campo magnético.

O movimento real da ionosfera na busca do equilíbrio é descrito, então, pelas equações (KELLEY et al.. 2003):

$$V_z = U_s \cos(D) \sin(D) + \frac{Ee}{B} \cos(D) - \left(\frac{g}{\langle \nu \rangle} \right) \text{sen}^2(D) \quad (2.28)$$

$$h(t) = h_o + \int_o^t V_z dt \quad (2.29)$$

Kelley et al. (2003) apresentaram algumas soluções para a Equação 2.28 em três casos distintos: par $U_s = E_s = 0$ m/s, $U_s = 30$ m/s e $U_s = 30 + 20 \cos(\omega t)$ m/s, o que é mostrado na Figura 2.18.

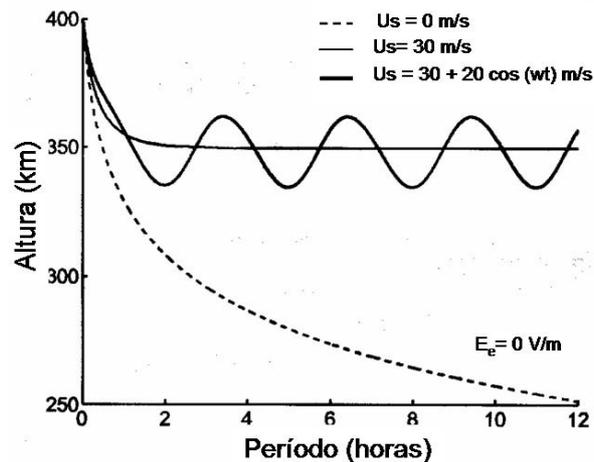


Figura 2.18: Simulações efetuadas por Kelley et al. 2003, considerando-se três comportamentos de U_s .
Fonte: Kelley et al. (2003).

No primeiro caso em $U_s = 0 = E_s$, a ionosfera decai com gravidade, a uma taxa de decaimento determinada por $\langle v_{in} \rangle$. Nos demais, os movimentos verticais da ionosfera são modulados pelo comportamento do vento. Situações mais complexas e realísticas também foram simuladas por Kelley de modo a compará-las com dados do radar de Arecibo (KELLEY et al., 2003).

Grande quantidade de trabalhos mostra que a formulação de Perkins apresenta razoável concordância com dados observacionais de irregularidades de médias latitudes obtidos com radar de Arecibo (KELLEY E FUKAO, 1991). Os dados de radar evidenciaram a tendência do plasma ser empurrado para baixo por forças gravitacionais enquanto a ação de campos elétricos para leste e ventos neutros soprando para o equador empurram-no para cima. O resultado consiste num movimento horizontal da ionosfera com velocidades relativas para cima e para baixo. Para determinados valores de U e de E a ionosfera se ajusta em altitude até que a frequência de colisão entre íons e partículas neutras seja tal que a componente vertical do fluxo de plasma induzido pela gravidade seja balanceado pelo campo elétrico para leste ou pelo vento neutro para equador. Apesar destas concordâncias, a teoria desenvolvida por Perkins apresenta pelo menos duas discrepâncias: a baixíssima taxa de crescimento da instabilidade (10^{-4} s^{-1}) e a direção de propagação das estruturas de plasma criadas.

A baixa taxa de crescimento prevista teoricamente conduziu alguns autores a relacionarem a instabilidade com um mecanismo inicial associado a ondas de gravidade (FUKAO et al., 1991, KELLEY E FUKAO, 1991). O sentido da propagação das estruturas não é previsto corretamente. O modelo prevê, por exemplo, que as estruturas se movimentam para nordeste no hemisfério norte e para sudeste no hemisfério sul, o que contraria as observações experimentais: sudoeste para o hemisfério norte e noroeste para o hemisfério sul (KELLEY et al., 2000, GARCIA et al. 2000; MARTINIS E MENDILLO, 2006; PIMENTA et al., 2008). Kelley e Makela (2003) propuseram então a existência de campos elétricos de polarização que favorecem a correta propagação das estruturas.

CAPÍTULO 3

FOTOQUÍMICA DAS EMISSÕES AEROLUMINESCENTES DA REGIÃO TERMOFÉRICA

3.1 - FENÔMENOS RADIATIVOS NA ATMOSFERA SUPERIOR

A atmosfera terrestre é cenário de inúmeros fenômenos radiativos, como por exemplo: o espalhamento Rayleigh e Mie, o espalhamento Thomson, as nuvens noctilucetas e a aurora (típicas de regiões polares) e a luminescência atmosférica (em inglês, *airglow*), e outros.

A aurora e a luminescência atmosférica estão entre os fenômenos mais estudados e, embora sejam fenômenos da natureza similar, apresentam causas e características distintas. A aurora é um fenômeno radiativo observado em altas latitudes, na chamada zona auroral, que é uma região circular de raio igual a 22° centrada nos pólos geomagnéticos. A aurora é distribuída em bandas horizontais na direção magnética leste-oeste, apresentando alguma estrutura vertical como estrias ou raios, cuja extensão vertical pode atingir 50 km. Segundo Vallance Jones (1974) suas formas mais intensas são vistas nas cores verde e vermelha, sendo possível observar também formas violetas e azuis. O principal mecanismo de origem é o impacto de partículas de alta energia (5 a 10 keV) oriundas da magnetosfera com os constituintes atmosféricos, o que provoca a excitação das espécies atômicas e moleculares a níveis mais altos de energia e posterior decaimento com emissão de fótons em diversos comprimentos de onda. A radiação pode ser observada a olho nu e apresenta características marcantes como estrutura e movimento. Além da radiação óptica, a aurora pode produzir efeitos de absorção e reflexão de ondas de rádio de alta frequência (UHF e VHF).

A luminescência atmosférica está relacionada às emissões de radiação óptica em ampla faixa do espectro eletromagnético (ultravioleta, visível e infravermelho) e, ao contrário da aurora, trata-se de um fenômeno de natureza global. Chapman sugeriu, em 1931, que as principais causas da luminescência são as reações fotoquímicas entre constituintes neutros e ionizados da atmosfera, principalmente a produção de

átomos excitados pelas reações de recombinação dissociativa. Segundo Chamberlain (1961) a luminescência é uma radiação amorfa emitida constantemente pela atmosfera. Seu brilho é constante e de baixa intensidade, de modo que não pode ser observada a olho nu. Além disto, trata-se de um fenômeno presente durante o dia (luminescência diurna), ao entardecer (crepuscular) e durante a noite (luminescência noturna). A unidade de medida padrão do brilho luminescente é o Rayleigh (R), onde 1R equivale à emissão de 10^6 fótons/s.cm².coluna.

O estudo dos fenômenos radiativos como a aurora e a luminescência terrestres tem grande importância no estudo das interações Sol-Terra. As diversas técnicas de observação desenvolvidas ao longo de décadas, e que serão mencionadas em capítulo posterior, permitem entre outros fatores: a identificação de espécies atômicas e moleculares presentes em cada faixa de altitude, através de sua análise espectral; a determinação da temperatura atmosférica pela medida da largura Doppler das linhas ou bandas de emissão; o estudo da dinâmica do plasma ionosférico, como seu deslocamento vertical e zonal, entre outros.

As irregularidades de grande escala do plasma ionosférico - bolhas de plasma são um dos fenômenos mais estudados e importantes para a compreensão da dinâmica atmosférica e seu estudo é feito a partir da detecção óptica (imageadores ou fotômetros) das emissões do oxigênio atômico oriundas da termosfera. As regiões escuras detectadas nas imagens representam reduções na intensidade das emissões do oxigênio, sendo por isto consideradas a assinatura óptica da presença das bolhas na faixa de altitudes onde ocorrem as emissões, entre 250 e 350 km (SAHAI et al., 1996; SOBRAL et al., 1980, 1985 E 2002; WEBER, 1978, FAGUNDES et al., 1995; PIMENTA et al., 2001).

3.2 – COMPOSIÇÃO DA ATMOSFERA SUPERIOR

Uma breve consideração sobre a composição química da atmosfera superior se faz necessário para explicar os processos envolvidos nas emissões. A composição química da atmosfera superior pode ser descrita em termos de seu perfil de altitude da seguinte forma: na baixa atmosfera (altitudes inferiores de 200 km) predominam o N₂ e o O₂, e espécies em menor quantidade como o óxido nítrico, dióxido de carbono

e vapor de água. Nesta região os processos de mistura são bastante eficientes de modo que o gás atmosférico é predominantemente poliatômico. Na atmosfera superior (acima de 200 km) predominam as espécies atômicas devido à ação da radiação ultravioleta do sol que dissocia as espécies moleculares. Os processos dissociativos na região são tão eficientes que o gás atmosférico é mencionado como monoatômico. Além disto, nesta região os processos colisionais são tão inexpressivos que a mistura de constituintes é insignificante comparada a forças difusivas. Assim prevalece a separação difusiva, onde a distribuição dos constituintes do gás neutro é regida pelas suas massas atômicas, temperaturas e pela aceleração da gravidade. O principal constituinte do gás neutro atmosférico entre 180 e 800 km de altitude é o oxigênio atômico, formado pela ação dissociativa da radiação ultravioleta do sol ($\lambda = 1350-1750 \text{ \AA}$ – continuum Runge-Schumman) sobre as moléculas de O_2 , sendo que entre 200 e 500 km ele atinge sua maior concentração ($> 10^8 \text{ átomos/cm}^3$), conforme mostra figura 3.1.

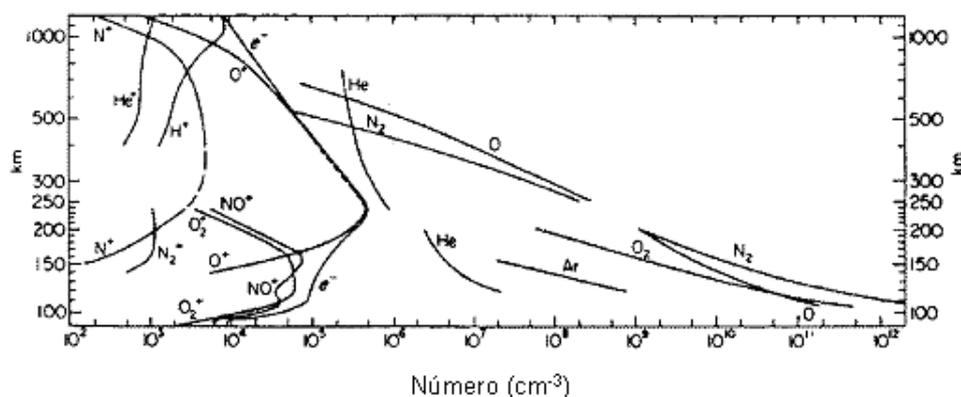


Figura 3.1: Composição atmosférica média em condições de mínimo solar, ao longo de um dia calmo, em latitudes médias. Em altitudes superiores a 250 km o principal constituinte é o oxigênio atômico.

Fonte: Kelley (1989).

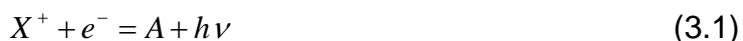
A alta concentração de oxigênio atômico se reflete na composição do plasma ionosférico, isto é, perto do pico de densidade, em torno de 250 km os constituintes iônicos principais são quase que totalmente os íons O^+ (KELLEY, 1989). Abaixo do pico os íons NO^+ e O_2^+ predominam e acima do mesmo predominam os íons de hidrogênio.

3.3 – PRODUÇÃO DOS ESTADOS EXCITADOS

As emissões radiativas na região F noturna têm origem em três processos principais: recombinação dissociativa, recombinação radiativa e recombinação íon-íon tendo cada um destes processos a sua própria velocidade ou taxa de reação. Os valores destas taxas são determinantes na produção de certos estados excitados que darão origem ou não às emissões luminescentes.

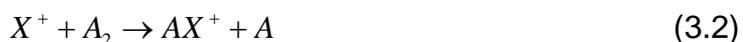
Os processos de recombinação consistem na reação entre elétrons e íons para produzir átomos neutros. Este é o principal mecanismo de perda de elétrons na alta ionosfera. Os processos de recombinação são classificados em: recombinação radiativa, recombinação dissociativa e recombinação íon-íon.

A **recombinação radiativa** envolve a captura de elétrons por íons atômicos, X^+ , com a conversão do íon em átomo neutro excitado e a subsequente emissão de fótons com a energia $h\nu$, conforme a reação:



onde X^+ é íon positivo, e^- é o elétron, A é o átomo neutro formado e $h\nu$ é o excesso de energia irradiado.

A **recombinação dissociativa** é um processo muito mais eficiente que a radiativa e consiste em duas etapas: na primeira, íons positivos (formados pela fotoionização¹) interagem com moléculas neutras, substituindo um dos átomos na molécula:



Em seguida, elétrons combinam com uma molécula positivamente carregada, AX^+ , formando dois átomos neutros:



¹ A fotoionização é processo pelo qual um fóton de energia $h\nu$ colide com um átomo neutro, retirando-lhe um elétron e transformando-o num íon positivo, segundo a reação: $A = A^+ + e^-$. É um processo típico do período diurno, quando o sol está acima da linha do horizonte.

É importante ressaltar que a taxa de perda de elétrons através da recombinação dissociativa depende fortemente da distribuição das moléculas neutras na altitude de ocorrência das reações e a quantidade global de elétrons será o resultado do balanço global entre a fotoionização e processos de recombinação.

Finalmente, a **recombinação íon-íon** envolve a neutralização de íons positivos e negativos através da seguinte reação:



sendo que o excesso de energia pode ser dissipado em energia cinética ou na excitação de um ou mais produtos.

3.4 – TRANSIÇÕES RADIATIVAS

As emissões radiativas de átomos e moléculas presentes na atmosfera terrestre que constituem a chamada luminescência atmosférica consistem na transição entre níveis de energia ou despopulação dos níveis excitados, com a conseqüente emissão de fótons cuja energia é $h\nu$, onde h é a constante de Planck e ν é a freqüência da emissão. As emissões se caracterizam por linhas espectrais (no caso de átomos) ou bandas (no caso das moléculas) com freqüências relacionadas à diferença de energia entre os dois níveis quânticos, $\Delta E = h\nu$, onde h é a constante de Planck e ν é a freqüência. A determinação da estrutura atômica se baseia nas teorias de Bohr para o átomo de hidrogênio e na moderna teoria quântica de Schrödinger-Heisenberg. Trata-se de um modelo vetorial misto de um átomo, e na descrição dos momentos angulares dos elétrons e como se processam o acoplamento entre diferentes elétrons. O tratamento completo da teoria quântica da estrutura atômica pode ser revista na literatura (CONDON & SHORTLEY, 1951, HERZBERG, G., 1944), e apenas alguns parâmetros de interesse teórico são comentados nesta seção.

A cada transição está associada uma probabilidade de transição (parâmetro proposto em Einstein em 1917) que é um parâmetro intrínseco de cada átomo e que representa a probabilidade de um átomo no estado \underline{a} decair espontaneamente para o estado \underline{b} . O inverso da probabilidade de transição é chamado de tempo de vida da

transição. A ocorrência ou não de uma transição também depende de certas regras de seleção, que determinam se as transições serão permitidas ou proibidas, como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Regras de seleção para transições atômicas

	Regras de seleção		
	Transições Permitidas	Transições Proibidas	
	Dipolo elétrico	Dipolo Magnético	Quadrupolo Elétrico
1	$\Delta J = 0, \pm 1$ ($0 \leftrightarrow 0$)	$\Delta J = 0, \pm 1$	$\Delta J = 0, \pm 1, \pm 2$ ($0 \leftrightarrow 0, \frac{1}{2} \leftrightarrow \frac{1}{2}, 0 \leftrightarrow 1$)
2	$\Delta M = 0, \pm 1$ ($0 \leftrightarrow 0$)	$\Delta M = 0, \pm 1$	$\Delta M = 0, \pm 1, \pm 2$
3	Mudança na Paridade	Não muda paridade	Não muda paridade
4	$\Delta S = 0$	$\Delta S = \pm 1$	$\Delta S = 0$
5	$\Delta L = 0, \pm 1$ ($0 \leftrightarrow 0$)	$\Delta L = 0, \pm 1$	$\Delta L = 0, \pm 1, \pm 2$ ($0 \leftrightarrow 0, 0 \leftrightarrow 1$)
	OI 130,4 nm	OI 630,0 nm	OI 557,7 nm
Exemplos	$(^3S_1 \rightarrow ^3P_{2,1,0})$ $\Delta J = -1, 0, +1$ $\Delta S = 0$ $\Delta L = +1$	$(^1D_2 \rightarrow ^3P_{2,1})$ $\Delta J = 0, -1$ $\Delta S = 1$ $\Delta L = -1$	$(^1S_0 \rightarrow ^1D_2)$ $\Delta J = 2$ $\Delta S = 0$ $\Delta L = 2$

J, M, S e L são números quânticos que caracterizam o estado eletrônico.

Fonte: Thomatsu e Ogawa (1990)

A transição mais simples e mais rápida é devida à interação de dipolo elétrico, seguida pela de dipolo magnético e quadrupolo elétrico. As de dipolo elétrico têm tempos de vida da ordem de micro-segundos, enquanto as demais podem durar pouco mais que alguns segundos (WHITTEN & POPPOF, 1971). Os estados que emitem radiação via transições proibidas são denominados estados *metaestáveis*. Por apresentarem tempos de vida muito maiores que os demais, podem sofrer desativação (em inglês, *quenching*) através de reações químicas. A importância das espécies metaestáveis na atmosfera é devida ao seu papel de canalização e de redistribuição de energia.

Segundo Torr e Torr (1982), o longo tempo de vida destas espécies introduz muitos efeitos não locais na química termosférica, pois elas podem ser transportadas para longe de seu local de origem antes de liberarem sua energia eletrônica através de radiação ou de processos de desativação. Baseados em todos estes fatores conclui-se que a atmosfera terrestre onde o número de colisões é muito menor em plasmas de laboratórios é o cenário ideal para o estudo das transições de estados metaestáveis.

3.5 - EMISSÕES DO OXIGÊNIO ATÔMICO

O oxigênio atômico pode emitir radiação numa ampla faixa espectral entre o ultravioleta e o infravermelho. As emissões mais estudadas são as linhas verde e vermelha, respectivamente, OI 557,7 nm, OI 630,0 nm, produzidas por processos de recombinação dissociativa, e a OI 777,4nm (recombinação radiativa e íon-íon). Há ainda as emissões ultravioletas OI 130,4 nm e OI 135,6 nm (recombinação radiativa), observadas somente com instrumentos a bordo de satélites, e as OI 436,8 nm e OI 844,6nm (recombinação radiativa), pouco estudadas em regiões de baixas latitudes devido a sua baixa intensidade.

Este trabalho se baseia principalmente no estudo das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4nm, típicas da região F noturna, ou região F₂, de modo que toda a atenção será voltada para o entendimento de seus mecanismos de ocorrência.

A Figura 3.2 mostra o diagrama de níveis de energia do oxigênio atômico e as diversas transições dos termos singletos, tripletos e quintetos. Pelas regras de seleção a excitação de níveis singletos e quintetos a partir de um nível tripleto requer a mudança do spin do elétron, enquanto a excitação de níveis tripletos a partir do estado fundamental não requer esta mudança.

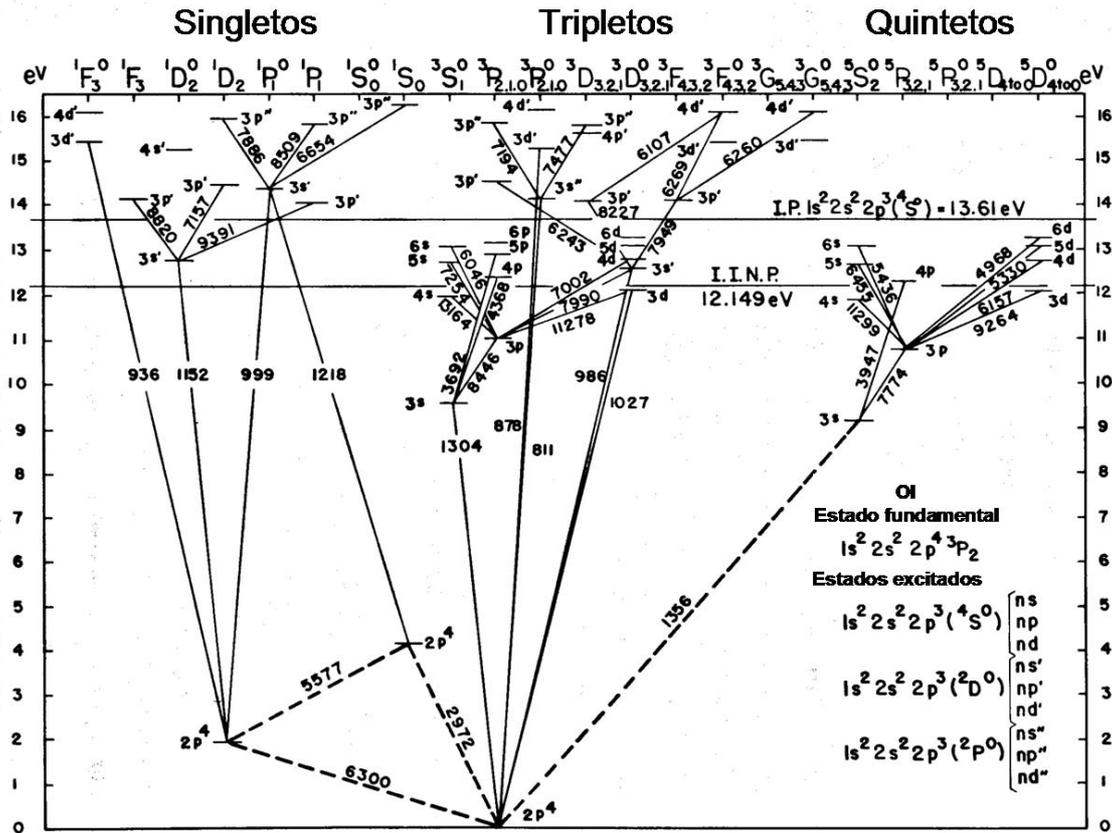


Figura 3.2: Diagrama de Níveis de Energia do Oxigênio Atômico. O nível fundamental do oxigênio atômico é o 3P .
 Fonte: Tinsley (1972).

3.5.1 – A Emissão OI 630,0 nm

A emissão OI 630,0 nm ocorre entre 240-300 km de altitude (borda inferior da região F) e é o resultado de uma transição proibida entre os níveis 1D e 3P (estado fundamental) do oxigênio atômico.

O mecanismo responsável pela produção de átomos excitados no estado 1D é o da recombinação dissociativa de íons O_2^+ e NO^+ com elétrons. A Figura 3.3 ilustra os níveis de transição da emissão e algumas das suas transições. Embora haja três transições do nível 1D para o nível fundamental resultando nas emissões (639,2 nm, 636,4 e 630,0 nm), apenas a 630.0 nm tem intensidade observável, devido a sua maior probabilidade de transição. São mostradas também uma das emissões no ultravioleta (297.2 nm) e uma no visível (557,7 nm).

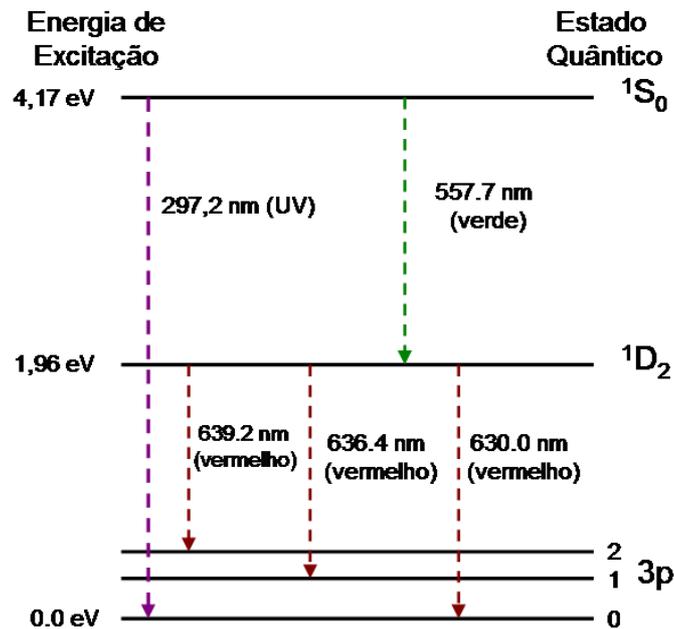
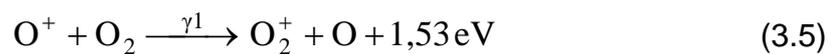


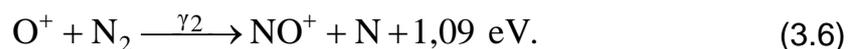
Figura 3.3: Diagrama parcial dos níveis de energia para o oxigênio atômico (região de baixas energias). Observam-se entre outras, as transições que entre o estado excitado 1D_2 e o estado fundamental 3P , que dão origem às emissões das linhas vermelhas 630,0 nm e 636,4 nm.

Na região F noturna o íon molecular, O_2^+ , é produzido através do mecanismo de transferência de carga:



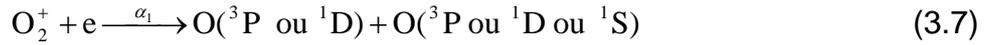
onde $\gamma_1 = 2,0 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ é o coeficiente da reação quando $T=1000 \text{ K}$ (Bates, 1988; Bittencourt, 1971).

O íon molecular NO^+ é produzido através da reação:



onde $\gamma_2 (1000\text{K}) = 1,2 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Bates, 1988).

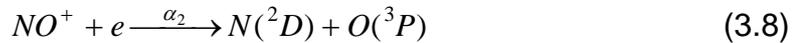
A recombinação dissociativa do O_2^+ com elétrons poder gerar os seguinte produtos:



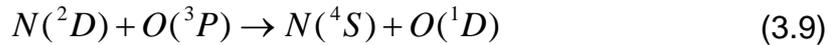
sendo que $\alpha_1 = 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Tinsley e Bittencourt, 1975).

Guberman (1988) verificou que a produção do estado $O(^1D)$ é maior quanto mais baixos os níveis vibracionais (v) do íon O_2^+ , ao contrário da produção do $O(^1S)$ que aumenta diretamente com v .

O outro mecanismo de produção do $O(^1D)$ é a recombinação dissociativa do NO^+ com elétrons a qual ocorre da seguinte forma:



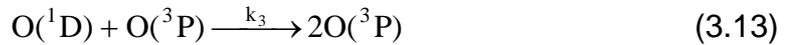
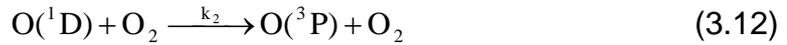
onde $\alpha_2 = 2,0 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Tinsley, 1975) seguida pela reação de desativação colisional do $N(^2D)$:



O átomo de oxigênio excitado no estado 1D , pode sofrer três transições: 3P_0 , 3P_1 e 3P_2 espontaneamente, emitindo as linhas 639,2 nm, 636,4 nm 630, 0 nm, sendo que as probabilidades de transição, A_D , para cada nível são: $1.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, $2.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ e $6.9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Note-se que a linha 639,2 nm tem pouca probabilidade de ser emitida em comparação com as outras e que, em geral, 630,0 nm é três vezes mais observada que a 636,4 nm.



Por outro lado, o tempo de vida do oxigênio excitado no nível 1D é de ~ 110 segundos, durante o qual pode haver um processo de desativação (“*quenching*”) através de colisões, sem a emissão de fótons. A causa desta desativação do $O(^1D)$ é a presença de outros constituintes atmosféricos como as moléculas neutras de O_2 e N_2 . Com base neste fato foram propostas as seguintes reações de desativação (Abreu, 1986):



onde k_1 , k_2 e k_3 representam os coeficientes das reações e tem os valores: $2,3 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $3,2 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $8 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (TAKAHASHI et al., 1990; ABREU, 1986). Embora a ordem de magnitude dos coeficientes das reações de desativação por N_2 e O_2 seja a mesma, o O_2 não é considerado nos estudos da emissão da OI 630,0 nm, por causa da baixa concentração do mesmo em relação ao N_2 nas altitudes envolvidas. Assim, o principal desativador do estado $\text{O}({}^1\text{D})$ é o N_2 .

A expressão da taxa de emissão volumétrica integrada, na direção vertical da emissão OI 630,0 nm, em Rayleighs, é dada por:

$$J_{630,0} = 10^{-6} \cdot 0,76 \int \frac{1}{(1 + d_D/A_D)} k_D \frac{\gamma_1 n(\text{O}_2) n(e)}{\left(1 + \frac{\gamma_1 n(\text{O}_2)}{\alpha_1 n(e)} + \frac{\gamma_2 n(\text{N}_2)}{\alpha_2 n(e)}\right)} dz \quad (3.14)$$

onde:

α_1 é o coeficiente da reação de recombinação dissociativa do íon O_2^+ ;

α_2 é o coeficiente da reação de recombinação dissociativa do íon NO^+ ;

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^+ ;

$n(\text{O}_2)$ é a densidade numérica do oxigênio molecular;

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

$n(\text{N}_2)$ é a densidade numérica do nitrogênio molecular;

$1/(1 + d_D/A_D)$ = fator de Stern-Volmer é a fração entre átomos que emitem e os que são desativados;

k_d é o número efetivo de átomos $\text{O}({}^1\text{D})$ produzidos por recombinação dissociativa.

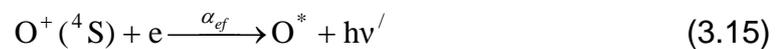
A intensidade da emissão OI 630.0 nm é fortemente dependente dos movimentos verticais (deriva vertical $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$) da camada F durante a noite. Quando a camada F sobe, a concentração de O_2^+ diminui, produzindo menos oxigênios excitados no

estado 1D . Conseqüentemente há menos emissão e a diminuição da intensidade da emissão. Nas altitudes mais baixas a concentração de O_2^+ é maior (Figura 3.1), de modo que há maior produção de oxigênios excitados e conseqüentemente maiores intensidades da emissão. A emissão OI 630,0 nm também pode apresentar grandes variações temporais quando há ocorrência de subtempestades magnetosféricas (SAHAI et al., 1974).

3.5.2 – A Emissão OI 777,4 nm

O tripleto OI (777,5 nm, 777,4 nm e 777,2 nm) é o resultado de uma transição permitida entre os níveis 5P e 5S do oxigênio atômico e suas primeiras observações foram feitas por Weill em 1967 (WEILL E JOSEPH, 1970). A altura onde ocorre o pico de emissão é em torno 350 km, que é a região de pico de densidade da camada F. O mecanismo responsável pela produção deste estado excitado é a recombinação radiativa com uma pequena contribuição da recombinação íon-íon.

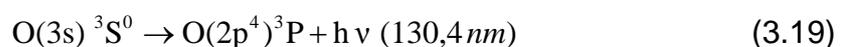
Na recombinação radiativa, o oxigênio atômico ionizado se recombina radiativamente para formar um átomo de oxigênio excitado:

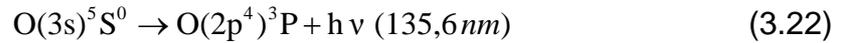
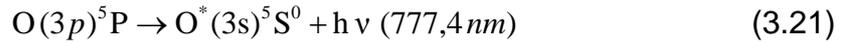


A energia de ionização da recombinação do íon do oxigênio atômico é dividida entre o átomo de oxigênio atômico excitado e o fóton emitido. A partir daí ocorre um decaimento em cascata para o estado fundamental $O(^3P)$:



onde: $\sum h\nu$ é o somatório dos fótons emitidos na cascata. Algumas das possíveis transições originárias deste mecanismo de excitação são:





A taxa de emissão volumétrica integrada, J_λ , para uma linha de comprimento de onda λ gerada a partir do mecanismo de recombinação radiativa é dada por:

$$J_\lambda = \int \alpha_\lambda n(O^+) n(e) dz \quad (3.23)$$

Com a condição de que a ionosfera é eletricamente neutra, tem-se:

$$n(e) = n(O^+) + n(O_2^+) + n(NO^+) + \dots \quad (3.24)$$

e, ainda, que na região F:

$$n(O^+) \gg n(O_2^+) + n(NO^+) + \dots \quad (3.25)$$

de onde se obtém $n(O^+) = n(e)$.

Portanto, a intensidade da emissão no mecanismo de recombinação radiativa depende da integral de $n(e)^2$ na região de altitudes onde ocorre a emissão:

$$J_\lambda = \int \alpha_\lambda n(e)^2 dz \quad (3.26)$$

A intensidade de emissão volumétrica integrada da linha OI 777,4 nm, produzida pelo mecanismo de recombinação radiativa, em Rayleighs, é:

$$J_{777,4} = 10^{-6} \int \alpha_{777,4} n(e)^2 dz \quad (3.27)$$

onde $\alpha_{777,4 \text{ nm}} = 5 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ (Tinsley, 1973).

A recombinação íon-íon é o caminho alternativo à produção de estados excitados que dão origem à emissão OI 777,4 nm. Trata-se de um processo onde os íons negativos são formados através da reação:



sendo $h\nu$ a emissão contínua de fótons ($\lambda < 846,3 \text{ nm}$) e k_1 é o coeficiente da reação. Os íons produzidos pela reação (3.28) são neutralizados pela reação



conhecida como reação de neutralização. k_2 é o coeficiente da reação e kE é a energia cinética no centro de massa do sistema. Neste caso a reação leva o íon positivo a estados excitados que decaem direta ou indiretamente aos estados $^3S^0$ e $^5S^0$.

Dependendo da temperatura da região F, a reação (3.29) produz átomos do oxigênio excitado nos estados 3P ou 5P que, em um processo de cascata rápida, decai para o estado 3S ou 5S , emitindo a linha OI 844,6 nm ou OI 777,4 nm. O processo de recombinação íon-íon é maior próximo ao pico da anomalia de Appleton devido à alta densidade eletrônica nessa região.

Além disto, à medida que a camada F desce para regiões de maior concentração de oxigênio molecular a taxa de formação de íons positivos aumenta e a intensidade da emissão será maior. Já foi reportado que este aumento da densidade também se deve ao fato de que os processos de recombinação dissociativa aumentam proporcionalmente ao aumento da concentração de oxigênio molecular.

Deve-se ainda incluir às reações 3.28 e 3.29 uma reação de dissociação dada por:



pois grande parte dos íons negativos criados pela associação radiativa pode ser removida por dissociação antes que eles reajam com íons positivos O^+ no processo de neutralização. Assim, a reação 3.30 reduz a taxa de aumento da intensidade de emissão que seria esperado quando a camada F se desloca para menores altitudes.

No processo de recombinação íon-íon, a taxa de emissão volumétrica para uma dada linha λ , é dada por

$$J_\lambda = \int \gamma_\lambda dz \quad (3.31)$$

A intensidade da emissão OI 777,4 nm na região F, em Rayleigh, é:

$$J_{777,4} = 10^{-6} \beta_{777,4} \int \frac{k_1 k_2 n(O) n(e)^2}{k_2 n(e) + k_3 n(O)} dz \quad (3.32)$$

onde:

$k_1 = 1,3 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ é o coeficiente da reação de recombinação radiativa da reação 3.15;

$k_2 = 1,5 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ é a taxa de reação constante para a reação de neutralização íon-íon da reação 3.28;

$k_3 = 1,4 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ é a taxa de reação para a reação de dissociação dada pela reação 3.30;

$\beta_{777,4} = 0,42$.

A intensidade da emissão OI 777,4 nm apresenta fraca dependência com a altura da camada e fortemente da concentração eletrônica, apresentando intensidades mais significativas em períodos de alta atividade solar, quando as densidades eletrônicas são mais elevadas. Um resumo dos processos de produção e desativação das emissões é mostrado na Tabela 3.2.

3.2.6 – Breve Panorama de Estudos Envolvendo as Emissões OI 630.0 nm e OI 777.4 nm

Diversos estudos podem ser realizados com o imageamento óptico das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm desde características morfológicas de irregularidades de plasma como bifurcações, extensão zonal e longitudinal, instabilidades secundárias até características dinâmicas como as derivas zonais e verticais. Embora menos reportada que a emissão OI 630.0 nm, a OI 777.4 nm pode fornecer importantes informações sobre processos na região do pico de densidade eletrônica da camada.

Tinsley e Bittencourt (1973) mostraram que o mecanismo de excitação de diversas transições permitidas, entre elas a OI 777,4 nm é o da recombinação radiativa com pequena contribuição da recombinação íon-íon. Os cálculos das taxas de recombinação para diversas emissões permitidas do oxigênio atômico concordaram razoavelmente com as intensidades observadas. Em outro trabalho publicado em 1975 eles verificaram que a relação $(J_{7774})^{1/2}/J_{6300}$ é função da altura da camada F_2 , $h_m F_2$, com alguma dependência da temperatura exosférica e uma dependência menor da densidade eletrônica máxima da F_2 , de modo que quanto maior a relação

$(J_{7774})^{1/2}/J_{6300}$ maior a $h_m F_2$. Sahai et al. (1981a) realizaram observações simultâneas das emissões OI 630,0 nm e da OI 777,4 nm e encontraram boa correlação entre os parâmetros ionosféricos n_m e $h_m F_2$ obtidos tanto com medidas ópticas quanto com ionossondas. Esta correlação torna-se tanto melhor quando as intensidades da OI 777,4 nm são altas.

Medidas simultâneas das emissões OI 777,4 nm e do ramo Q da banda OH (9,4) em 777,3 nm realizadas por Sahai et al. (1981b) permitiram a determinação da contaminação da primeira pela segunda. A emissão 777,4 nm também foi utilizada para estimar a densidade eletrônica máxima dentro e fora das bolhas de plasma com medidas da emissão OI 777,4 nm (MOORE E WEBER, 1981). Os autores verificaram que em determinadas noites a densidade eletrônica dentro e fora da bolha poderia variar em até três vezes. Bittencourt et al. (1983) observaram simultaneamente as emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm durante períodos de ocorrência de *spread-F* e períodos sem *spread-F*. Destas medidas pôde-se determinar a variações latitudinais e temporais de n_m e $h_m F_2$. Em publicações mais recentes foram relatadas observações ópticas simultâneas das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm onde se verificou a presença de estruturas bem mais definidas nas imagens da OI 777,4 nm, não reveladas nas imagens da OI 630,0 nm (ABALDE et al., 2001). Makela et al. (2003) implementaram a determinação da condutividade Pedersen integrada a partir de imagens da OI 630,0 nm.

Tabela 3.2: Produção e Desativação dos Estados Excitados que dão origem a emissões do oxigênio atômico na atmosfera terrestre.

OI 630,0 nm	
Produção do Estado O(¹ D)	Desativação
<u>Recombinação dissociativa</u> de moléculas de O ₂ ⁺ e elétrons	Colisões ente os oxigênios no estado O(¹ D) e N ₂ , O ₂ e O(³ P)
$O_2^+ + e \xrightarrow{\alpha_1} O(^3P \text{ ou } ^1D) + O(^3P \text{ ou } ^1D \text{ ou } ^1S)$	$O(^1D) + N_2 \xrightarrow{k_1} O(^3P) + N_2$ $O(^1D) + O_2 \xrightarrow{k_2} O(^3P) + O_2$
<u>Recombinação dissociativa</u> de moléculas de NO ⁺ e elétrons $NO^+ + e \xrightarrow{\alpha_2} N(^2D) + O(^3P)$	$O(^1D) + O(^3P) \xrightarrow{k_3} 2O(^3P)$ Tempo de vida: 110 s ~ 2 minutos
OI 777,4 nm	
<u>Recombinação radiativa</u>	<u>Recombinação íon-íon</u>
$O^+(^4S) + e \xrightarrow{\alpha_{ef}} O^* + hv'$	$O + e \xrightarrow{k_1} O^- + hv$ $O^- + O^+ \xrightarrow{k_2} O^*(^3P \text{ ou } ^5P) + O + kE$
Decaimento em cascata para o estado fundamental O(³ P): $O^* \rightarrow O(^3P) + \sum hv$ $O(3p)^5P \rightarrow O^*(3s)^5S^0 + hv(777,4nm)$	Dependendo da temperatura da região F, a reação de neutralização produz oxigênio excitado nos estados ³ P ou ⁵ P que, em um processo de cascata, decai para o estado ³ S ou ⁵ S, emitindo em OI 844,6 nm ou OI 777,4 nm.
Tempo de vida: micro-segundos	Desativação
Emissão espontânea (o nível é populado e depopulado imediatamente).	Íons negativos podem ser desativados por O, não reagindo com os positivos e não produzindo oxigênios excitados
Sem desativação	$O^- + O \rightarrow O_2 + e$

CAPÍTULO 4

INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

4.1 – HISTÓRICO

As irregularidades ionosféricas em regiões de baixas latitudes têm sido estudadas há várias décadas com a aplicação de diversos instrumentos e técnicas. Os instrumentos utilizados podem estar situados tanto em solo como a bordo de foguetes e satélites. Os mecanismos de funcionamento também são diversos e podem estar baseados na transmissão e recepção de sinais de rádio que se propagam na ionosfera ou através desta, no imageamento óptico de emissões radiativas oriundas da região ionosférica, entre outros.

Do primeiro grupo, podem ser citados: as ionossondas, cujo funcionamento se baseia na transmissão e recepção de pulsos de radiofrequência na direção (vertical ou oblíqua) da ionosfera numa frequência próxima à frequência natural de oscilação do plasma. Os radares de espalhamento coerente e incoerente, que operam em frequências maiores ou iguais a 40 MHz e têm por princípio de funcionamento o espalhamento de sinais de rádio na ionosfera; os riômetros (do inglês, *Riometer* = *Relative Ionospheric Opacity meter*) que são receptores sensíveis de sinais de rádio oriundo do espaço intergaláctico, que medem a intensidade do sinal examinando a absorção do sinal pela ionosfera; os sistemas de navegação e posicionamento *GPS* que se baseiam na transmissão de sinais de rádio por satélites para receptores em solo¹.

Dentre os instrumentos ópticos há os fotômetros, que se baseiam na medida da taxa integrada de emissão de um volume atmosférico, compreendido pelo ângulo sólido definido pelo campo de visada do instrumento, para uma dada linha ou banda espectral; o interferômetros (*Fabry-Perot*, *Michelson*) que permitem a análise espectral das linhas: como o comprimento de onda, largura da banda da emissão.

¹ Para maiores detalhes sobre o funcionamento dos instrumentos acima relacionados, consultar referências. Hunsucker, R. D., 1991; Shepherd, G. G., 2002, Giraud e Petit, 1978.

Finalmente, um dos instrumentos mais modernos que utilizados na pesquisa aeronômica são os fotômetros imageadores *all-sky* equipados com dispositivos *CCDs* (*Coupled Charge Device*), que fornecem imagens bidimensionais das emissões luminescentes noturnas, permitindo o mapeamento das irregularidades de plasma ionosférico de grande escala, ou bolhas de plasma, e cujo princípio de operação é descrito a seguir.

4.2 – IMAGEAMENTO ÓPTICO

As primeiras observações das emissões luminescentes da atmosfera terrestre começaram a partir das observações a olho nu das intensas luzes aurorais nas regiões polares. No final do século XIX, a linha verde (OI 557,7 nm) presente nas emissões aurorais foi reconhecida como uma emissão característica do céu noturno (BATES, 1994, ORIGINAL DE CAMPBELL, 1895). Yntema (1909, ORIGINAL DE BATES, 1994) confirmou, a partir de estudos fotométricos, a luminescência da atmosfera superior. O intenso brilho auroral podia ser registrado por técnicas fotográficas convencionais, mas em latitudes mais baixas as emissões aeroluminescentes são menos intensas, mais difusas e, portanto, mais difíceis de serem detectadas. Assim, só a partir da década de 70 as emissões de regiões de baixas latitudes começaram a ser estudadas com o emprego de filmes fotográficos de maior sensibilidade (PETERSON, E KIEFFABEL, 1973A). Posteriormente, empregaram-se câmeras televisivas de baixa luminosidade, eficientes somente na detecção de emissões aurorais e bandas do OH na região mesosférica (MAKELA et al., 2006, ORIGINAL DE MENDE E EATHER, 1976). No início da década de 80 novos instrumentos e técnicas foram desenvolvidos, os quais permitiram as primeiras imagens bidimensionais das emissões termosféricas associadas às irregularidades do plasma ionosférico (WEBER, 1978; MENDILLO et al., 1981; MENDILLO E BAUNGARDNER, 1982). Um grande avanço foi alcançado com o desenvolvimento de sistemas de imageamento *all-sky* que incorporavam dispositivos *CCDs* (abreviatura do inglês, *Coupled Charge Device*), cujo funcionamento, baseado no registro de fótons, apresentavam uma série de vantagens sobre os sistemas de imageamento convencionais como por exemplo: alta resolução temporal (relativo a curtos tempos de integração), alta sensibilidade (detecção de emissões mais fracas),

alta eficiência quântica, baixo nível de ruído, alta linearidade etc. Incorporados a sistemas de imageamento *all-sky*, estes dispositivos favoreceram o estudo de importantes emissões termosféricas. A descrição deste equipamento e uma rápida introdução aos parâmetros relacionados ao dispositivo CCD são feitas na próxima seção.

4.2.1 – Sistema de Imageamento *All-Sky* Equipado com Dispositivo CCD

Um sistema de imageamento *all-sky* equipado com dispositivo CCD, consiste, conforme mostra a Figura 4.1, dos seguintes elementos:

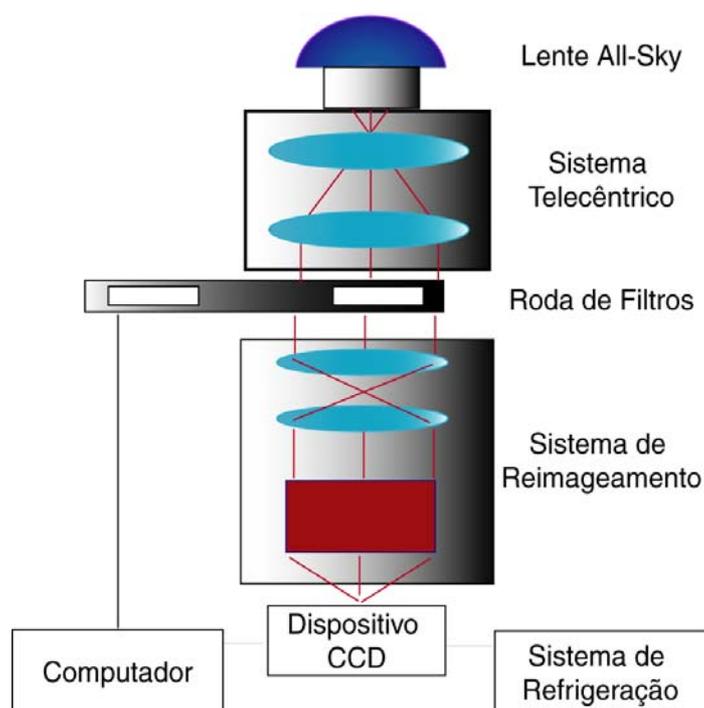


Figura 4.1: Sistema de imageamento *all-sky* equipado com dispositivo CCD.

Lente olho-de-peixe ou lente all-sky, que captura uma imagem do céu local de horizonte a horizonte, num ângulo de abertura de até 180° ; *sistema telecêntrico de lentes*, que focalizam a imagem captada sobre o filtro de interferência selecionado, *conjunto de filtros de interferência* dispostos numa roda de filtros controlada por um motor, *sistema de reimageamento* e intensificador de imagem composto de lentes que convergem a imagem no dispositivo CCD, *sistema de refrigeração* que minimiza o ruído térmico, *computador com softwares* que controlam todo o

funcionamento do sistema, e é claro, o próprio dispositivo CCD, cujo princípio de funcionamento será brevemente descrito a seguir.

4.2.1.1 - Dispositivo CCD

O dispositivo *CCD* consiste num detector de fótons de alta sensibilidade, composto de grande número de células fotossensíveis, denominadas convencionalmente de pixels (abreviatura extraída do inglês, *picture element*) que são utilizadas na reconstrução de imagens. O processo baseia-se no efeito na conversão de fótons em elétrons, sendo o número de elétrons proporcional à intensidade da luz em cada célula. A quantidade de elétrons registrada pela CCD em cada célula reproduz a imagem captada pelo sistema óptico. Quanto maior o número de pixels, maior a CCD e melhor a qualidade da imagem. Em geral o detector apresenta um arranjo bidimensional de 1024 x 1024 *pixels*. Alguns parâmetros são convencionalmente utilizados na descrição de um CCD (Janesick, 1987):

Alta resolução. A qual é determinada pelo número de elementos de imagem, ou *pixels*: quanto maior o número de *pixels* maior a resolução, o que permite a detecção de estruturas finas;

Alta sensibilidade: permite a detecção de emissões de baixa intensidade;

Ampla resposta espectral: relaciona-se a detecção da radiação em grande intervalo espectral;

Baixo nível de ruído: qualquer sinal espúrio tem intensidade muito mais baixa que o sinal que se deseja medir;

Acurácia fotométrica: o brilho detectado pode ser facilmente medido com alta precisão em unidades absolutas e, finalmente,

Alta linearidade: o sinal medido é uniforme, ou seja, a intensidade da imagem é diretamente proporcional ao brilho do objeto observado.

4.2.1.2 – Filtros de Interferência

Os filtros de interferência são elementos ópticos de grande importância no estudo da luminescência termosférica devido à baixa intensidade das emissões (< 100

Rayleighs²) sendo sua função selecionar a linha ou banda de interesse no estudo. Na descrição de um filtro de interferência utilizam-se os seguintes termos: *banda espectral*, em nm, que se refere à emissão a ser selecionada; a *largura de banda*, em nm, que se refere à resolução espectral, de poucos nanômetros, e o *percentual de transmissão ou transmitância*, que é a relação entre a quantidade de fótons que incidem sobre o mesmo e o número que o atravessam (o que depende do material de que é feito o mesmo). A figura 4.2 ilustra estas características.

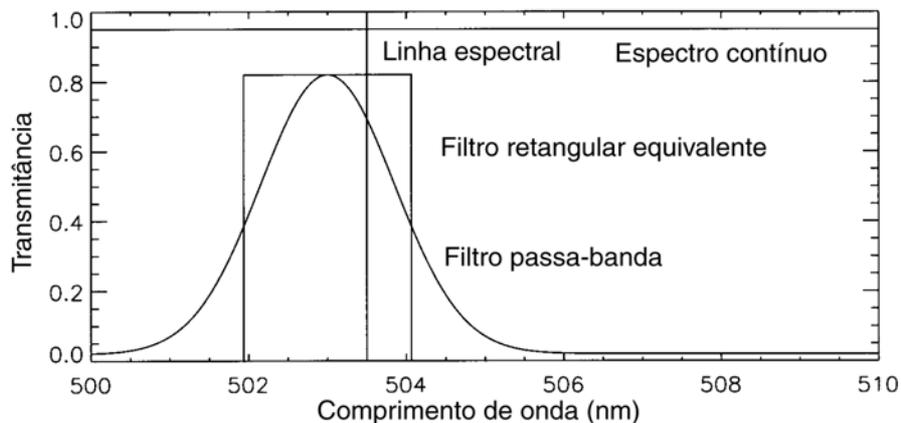


Figura 4.2: Representação de um espectro contínuo, uma linha espectral, um filtro passa-banda e um filtro retangular equivalente.
Fonte: Shepherd (2002).

4.2.2 – Condições de Observação

A observação das emissões ópticas termosféricas com instrumentos em solo é feita durante o período noturno e necessita de boas condições meteorológicas como céu limpo, sem nuvens, e sob condições de baixa luminosidade de fundo, como a luz refletida pela lua ou as luzes da cidade. A primeira restringe o período de observação a poucos dias no mês (~15 dias), durante a lua nova. No caso das luzes da cidade, é difícil de se eliminar sua contaminação, de modo que se procura sempre locais em altitudes mais altas e com baixa contaminação luminosa. A umidade também pode prejudicar a aquisição das imagens, de modo que é preciso utilizar sistemas desumidificadores da lente *all-sky*.

² 1 Rayleigh= 10⁶ fótons/segundo/coluna/cm³

4.2.3 – Raio de cobertura da lente all-sky ao redor do zênite (em inglês, *RDZ= Range Zenith Degree*)

A raio de cobertura de uma lente all-sky é obtida através de uma análise geométrica simples, considerando-se a altura da camada emissora e a abertura da lente olho-de-peixe ou *all-sky*. A geometria equivalente é mostrada na Figura 4.3:

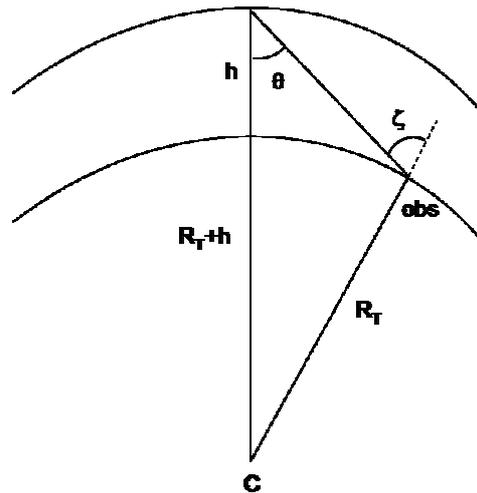


Figura 4.3: Geometria da camada emissora usada na determinação da área de cobertura.

Fonte: Baseado em Chamberlain (1961).

A equivalência entre ângulo de cobertura e área em quilômetros é obtida através de uma regra de três simples:

$$2\pi r = x = 360^\circ \quad 1^\circ = \frac{2\pi \cdot 6370}{360^\circ} = 111,17 \text{ km}$$

Pela lei dos senos :

$$\frac{R_T + h}{\text{sen}(\theta)} = \frac{R_T}{\text{sen}\zeta}$$

onde:

R_T = raio da Terra (km) ~ 6370 km

h = altura de ocorrência da emissão (km)

O raio do campo de visão da lente *all-sky* extraída da geometria da Figura 4.3 é expressa por:

$$a^{1/2} = (R_T + h)^2 - R_T^2 \quad (\text{km})$$

A Tabela 4.1 mostra alguns exemplos de área de cobertura calculada para dois ângulos de abertura e para três emissões do oxigênio atômico:

Tabela 4.1: Raio do campo de visão da lente *all-sky* para diferentes emissão e aberturas da lente.

Abertura (RDZ)	Emissão	Altura de ocorrência (km)	$a = (R_T + h)^2 - R_T^2$ (km)
90°	OI 777,4 nm	350	2217
	OI 630,0 nm	250	1800
	OI 557,7 nm	100	1133
75°	OI 777,4 nm	350	932
	OI 630,0 nm	300	926
	OI 557,7 nm	100	351

4.2.4 – Sistemas de Imageamento *All-Sky* Utilizados neste Trabalho

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados quatro sistemas de imageamento *all-sky*: dois imageadores pertencentes ao grupo de Física e Astronomia da UNIVAP (Universidade do Vale do Paraíba) e instalados em São José dos Campos, SP, e Brazópolis, MG, respectivamente. O terceiro imageador pertence ao grupo de Luminescência Atmosférica (LUME) do INPE (Instituto Nacional de pesquisas Espaciais) e está instalado em Cachoeira Paulista, SP. O quarto imageador fez parte de um projeto conjunto entre o INPE e a Universidade de Boston, e operou entre março de 1987 e setembro de 2000 em Cachoeira Paulista.

Os imageadores 1, 2 e 3 são equipamentos similares compostos por um sistema telecêntrico de lentes *all-sky* (180°) Mamiya 24 mm, que fornece imagens de 512 x 512 pixels. Os filtros de interferência, de 3 polegadas de diâmetro são dispostos numa roda de filtros e podem selecionar várias emissões, entre elas a OI 630,0 nm,

a OI 777,4 nm, a OI 557,7 nm, a banda OH. Para a emissão utilizada neste trabalho (OI 630,0 nm) a largura de banda do filtro é de 2,0 nm. O sistema CCD (*CH 350 Photometrics detectors*) é constituído de uma matriz retro-iluminada de 1024 x 1024 *pixels*, cuja área é de 6.45 cm², apresentando alta resolução, alta eficiência quântica (80% na região visível do espectro eletromagnético), baixa corrente escura (0.5 elétrons/*pixels/s*), baixo ruído de leitura e alta linearidade (0,05%). Esta configuração favorece alta relação sinal ruído (20:1) das imagens. O tempo de exposição da emissões OI 630,0 nm e OI 777.4 nm é de 60 segundos.

Nas Figuras 4.4 são mostradas fotos de dois instrumentos em localidades onde estão instalados os sistemas de imageamento *all-sky*: a) *São José dos Campos* e b) *Brazópolis (Laboratório Nacional de Astrofísica)*.



Figura 4.4: a) Instalações do imageador 1 e 2 em a) *São José dos Campos* (UNIVAP) e b) *Brazópolis* (LNA). c) Imageador *all-sky* e seus elementos principais; d) Equipamento em operação no LNA: Imageador, fonte refrigeradora, computador, unidade eletrônica.

O imageador 4 instalado em Cachoeira Paulista entre os anos de 1987 e 1999, em colaboração com Universidade de Boston, é representado na figura 4.5 e trata-se de uma versão antiga de imageador *all-sky*. O princípio de operação é praticamente o mesmo que os anteriores, com algumas diferenças. Uma lente de campo garante que toda a luz vinda da lente “all-sky” incida na lente colimadora. Este sistema óptico 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. Além disto, um intensificador de imagem amplificar a intensidade da emissão visto que na região próxima ao equador magnético o conteúdo eletrônico é mais baixo. 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. O pré processamento dos dados coletados pelo imageador consiste em digitalizar as fotografias coletadas em filme e redimensioná-las num tamanho apropriado de 512 x 512 pixels.

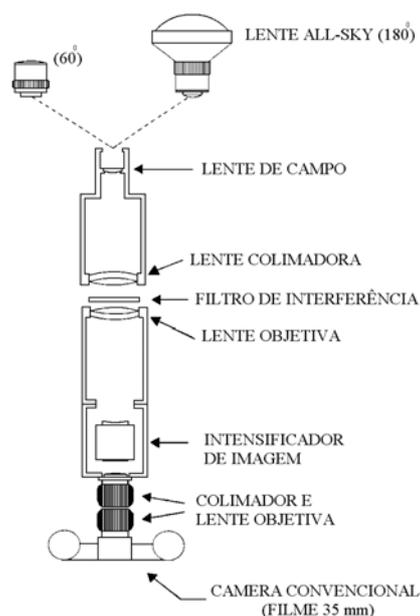


Figura 4.5: Versão antiga de um imageador *all-sky*, equipado com câmera fotográfica.

Fonte: Mendillo (1982).

A localização dos instrumentos é mostrada na Figura 4.6, onde se vê um mapa em perspectiva da América do Sul (à esquerda) e da região sudeste (à direita).

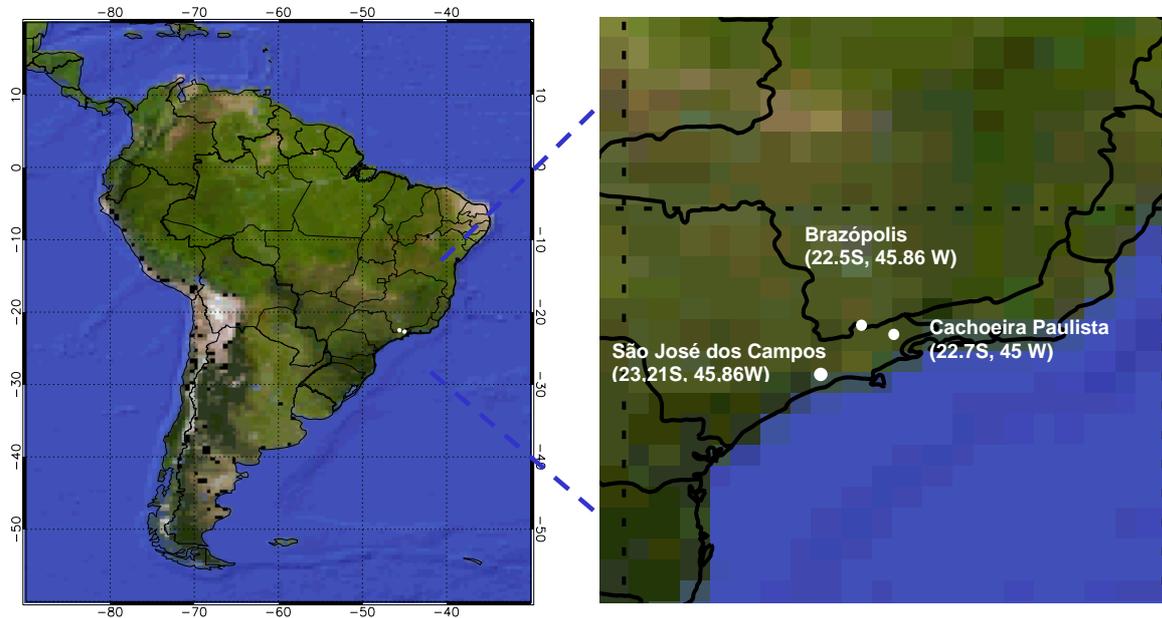


Figura 4.6: Localização geográfica dos sítios de observação: São José dos Campos (campus UNIVAP) e Brazópolis (Laboratório Nacional de Astrofísica – LNA).

A Tabela 4.2 relaciona os imageadores utilizados no trabalho, suas localizações e respectivos períodos de operação.

Tabela 4.2: Indexação e localização dos imageadores *all-sky* utilizados neste trabalho

Instrumento	Localização	Período de Operação
Imageador 1 (UNIVAP)	São José dos Campos 23,2 S, 45,9 W	Outubro 2000 a até o presente
Imageador 2 (UNIVAP - LNA)	Brazópolis, MG 22.53 S, 45.6 W	Setembro 2002 até o presente
Imageador 3 (INPE)	Cachoeira Paulista, SP 22,7S, 45,0 W	Outubro de 1999 a Até o presente
Imageador 4 (INPE/Univ. Boston)	Cachoeira Paulista, SP 22,7S, 45,0 W	Março de 1987 a Setembro de 2000

4.3 – PROCESSAMENTO DE IMAGENS

4.3.1 – Armazenamento de Dados

O sistema de imageamento *all-sky*, descrito na seção 4.2, fornece imagens monocromáticas do céu podendo abranger uma região de até 180 graus de abertura (horizonte a horizonte), o que implica em uma área de cobertura de aproximadamente 1800 km². Estas imagens são armazenadas na forma de arquivos digitais e nada mais são que uma matriz bidimensional de *pixels*, de diferentes intensidades. Alguns exemplos destas imagens, referidas como imagens originais ou cruas, são mostradas na Figura 4.3.

As Figuras 4.7a e 4.7.b são referentes às emissões luminescentes do oxigênio atômico OI 630,0 nm oriunda da base da camada ionosférica F, em torno de 280 km de altitude, e OI 777,4 nm, que ocorre na região do pico de densidade eletrônica da camada (~350 km). As regiões escuras são mencionadas na literatura como a assinatura óptica das irregularidades de plasma de grande escala, ou bolhas de plasma, e nada mais são que bandas de depleção da intensidade da luminescência noturna quase alinhadas às linhas de campo geomagnético (direção norte-sul), associadas a regiões de baixa densidade de plasma ionosférico. Ambas as imagens foram adquiridas com instrumentos situados em São José dos Campos (campus da Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP).

Na Figura 4.7c é mostrada a imagem da emissão OI 557,7 nm obtida com um imageador instalado no Laboratório Nacional de Astrofísica – LNA, em Brazópolis (MG), onde se observa a presença de bolhas de plasma. A observação de bolhas de plasma nas imagens da emissão OI 557,7 nm é possível, pois esta emissão apresenta duas componentes, uma mesosférica, em torno de 97 km, e uma componente ionosférica, em torno de 250 km, o que coincide com a emissão OI 630,0 nm.

A Figura 4.7d mostra a imagem obtida com o filtro para o fundo luminoso (*background*), centrado em 578,0 nm, onde se pode ver o fundo estelar da região englobada pelo campo de visada do instrumento.

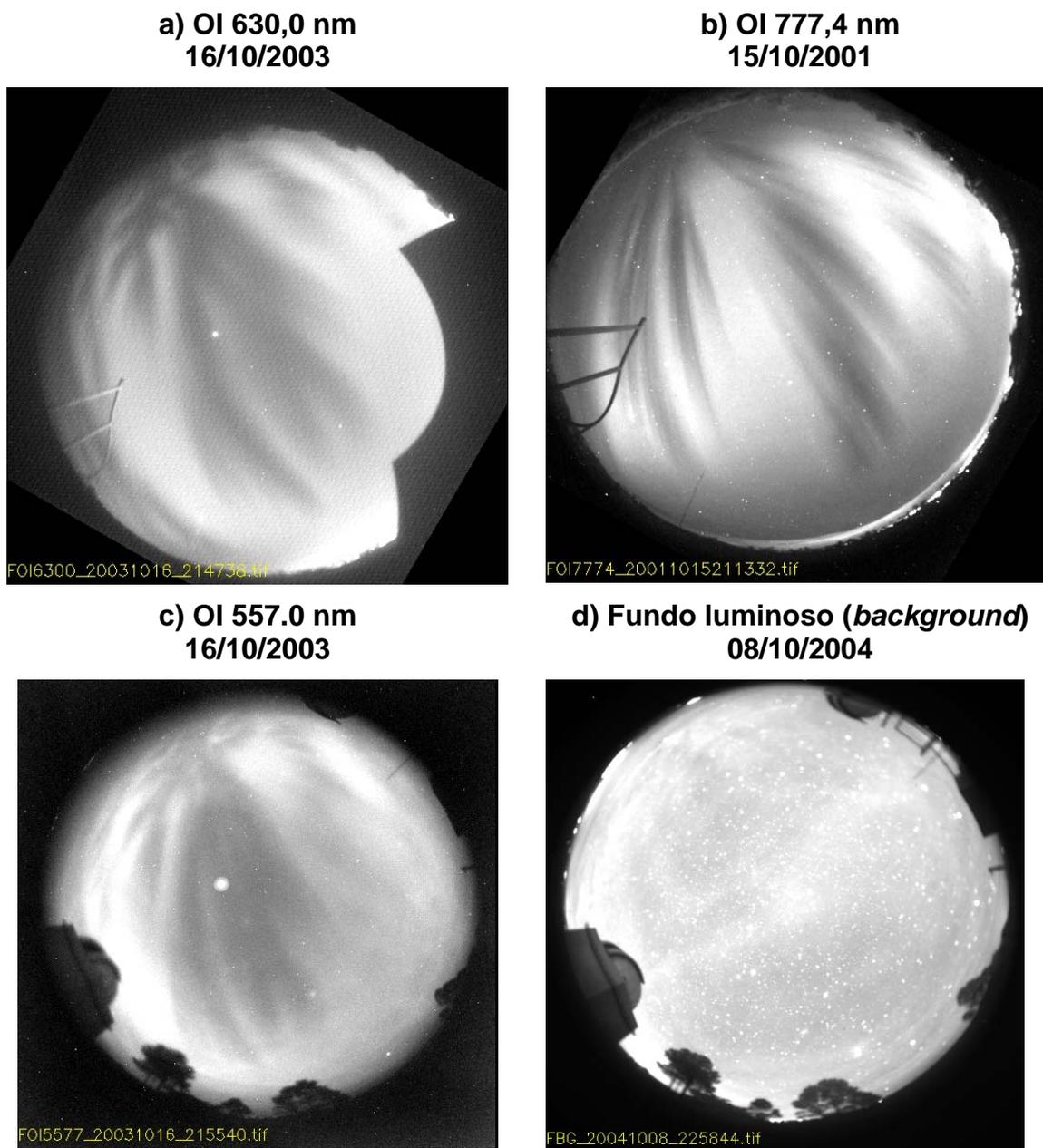


Figura 4.7: Imagens originais ou cruas registradas pela câmera CCD, das emissões OI 630,0nm, OI 777,4 nm, OI 557,7 nm, e fundo luminoso (centro ~578 nm), obtidas nas localidades: São José dos Campos (a,b), Brazópolis (c, d), respectivamente.

4.3.2 - Redução de Dados

As imagens obtidas pelo imageador *all-sky* não estão prontas para qualquer análise de caráter espectral ou para a extração de parâmetros físicos, visto que a geometria da lente *all-sky* introduz efeitos de compressão e curvatura nas imagens em regiões

de baixo ângulo de elevação. Isto ocorre porque a lente *all-sky* projeta uma imagem na CCD tal que cada *pixel* registra um mesmo ângulo de céu (Garcia et al., 1997), sendo que os tamanhos dos pixels projetados variam drasticamente com o ângulo de elevação. Além disto, uma das necessidades do estudo que envolva imagens é a correta orientação geográfica, de modo que se procura a projeção das imagens em coordenadas geográficas (latitude, longitude) ou equivalentemente em km.

O primeiro passo é o entendimento da geometria das observações da luminescência atmosférica (Figura 4.4), e dos efeitos causados pela geometria da lente *all-sky* nas imagens armazenadas.

Diversos autores trabalharam pioneiramente na questão da transformação de coordenadas: Hapgood e Taylor (1982), Garcia et al. (1997) e Maekawa et al. (1998 original de Medeiros, 2001). Posteriormente outros cientistas desenvolveram seus próprios programas computacionais para o processamento das imagens, envolvendo a visualização, calibração e projeção das imagens *all-sky*, de modo a obter parâmetros de interesses diversos: altura de ocorrência da emissão, velocidade de deriva zonal das irregularidades, densidade eletrônica da camada, etc.

4.3.3 - Geometria das Observações da Luminescência Atmosférica

A geometria de observação da camada luminescente situada a uma altura média h_m da superfície da Terra é ilustrada na Figura 4.8:

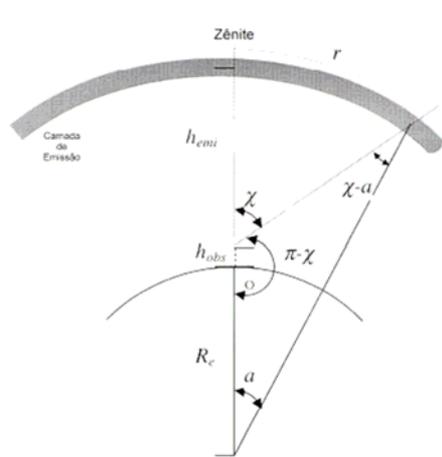


Figura 4.8: Geometria de observação da camada luminescente.

Fonte: Medeiros (2001)

O ângulo zenital é dado por:

$$\chi = \arctan \left[\frac{(R_T + h_{emi}) \operatorname{sen}(a(i, j))}{(R_T + h_{emi}) \operatorname{cos}(a(i, j)) - (R_e + h_{obs})} \right] \quad (4.1)$$

sendo:

$$a(i, j) = \frac{\alpha r(i, j)}{R_T + h_{emi}}$$

$$r(i, j) = \sqrt{(x_0 - i)^2 + (j - y_0)^2}$$

onde:

R_T = raio da Terra ~ 6378 km;

$h_{obs.}$ = altitude da observação;

i, j = índice dos pixels;

α = fator de projeção da imagem;

(x_0, y_0) = centro da imagem

O ângulo azimutal é expresso por:

$$a_z(i, j) = \operatorname{arctg} \left[\frac{x_0 - i}{j - y_0} \right] \quad (4.2)$$

onde i e j representam pontos em coordenadas geográficas.

As imagens originais armazenadas registradas pela câmera CCD são matrizes de dados representados pelas coordenadas i e j . O processamento de dados envolve a padronização do sistema de coordenadas com a transformação linear das coordenadas da imagem original em um sistema de coordenadas geográficas. O método de transformação, desenvolvido originalmente por Hapgood e Taylor (1982), relaciona as coordenadas da imagem $x(i,j)$ e $y(i,j)$ ao sistema de coordenadas angulares da atmosfera, envolvendo os ângulos azimutal e zenital (az, χ) do objeto observado. O desenvolvimento matemático da transformação linear das coordenadas da imagem em coordenadas geográficas é mostrado em detalhes por Medeiros (1997), sendo que nesta seção serão mencionados apenas resumidamente. A transformação é expressa por:

$$\begin{bmatrix} X(i, j) - x_c \\ Y(i, j) - y_c \end{bmatrix} = G(\chi) \begin{bmatrix} \text{sen}(az(i, j) - \delta) \\ \text{cos}(az(i, j) - \delta) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

onde:

x_c, y_c são coordenadas do zênite real;

δ é o valor corrigido do azimute

$G(\chi)$ função que relaciona o ângulo de elevação e a distância ao centro da lente.

A função da lente $G(\chi)$ é determinada a partir de um ajuste polinomial, num procedimento denominado calibração da lente. A calibração envolve a obtenção de um mapa do fundo estelar do céu local, onde as coordenadas de estrelas conhecidas (azimute e elevação) são usadas como pontos de referência no céu. Com o método determinam-se os coeficientes do polinômio representativo da função da lente, dado pela expressão 4.4 a partir do cálculo da distância zenital entre o centro da imagem e cada estrela selecionada.

$$G(\chi) = \sum_l a_l \chi^l \quad (4.4)$$

O mapa do fundo estelar em questão pode ser obtido com programas como o *Skymap*, sendo então identificado na imagem a ser estudada. A figura 4.9, adaptada de Medeiros (1997), ilustra o método de transformação.

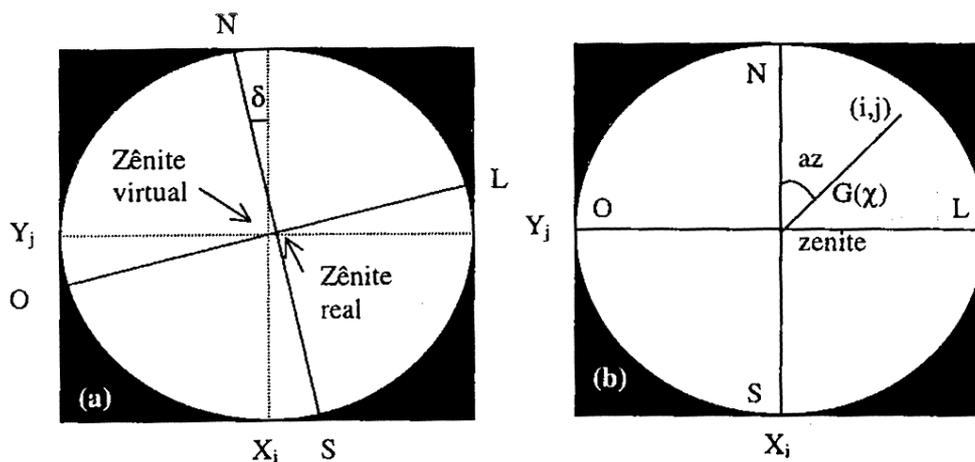


Figura 4.9: Representação da transformação de coordenadas: a) Imagem original registrada pela câmera CCD; b) Imagem corrigida pela calibração da lente baseado no fundo estelar.

Fonte: Medeiros (2001).

Verifica-se na Figura 4.9 um deslocamento entre o zênite real e o virtual, bem como uma rotação azimutal da imagem, no qual o norte geográfico não corresponde ao norte registrado pela CCD. Devido a estes dois fatores, é necessária a correção antes da determinação da função da lente. A Figura 4.5b ilustra a imagem corrigida, em que a função da lente relaciona a distância entre o centro da imagem e qualquer ponto da CCD.

4.3.4 - Calibração da Lente Olho-De-Peixe e Projeção das Imagens em Mapas de Coordenadas Geográficas

O processo de calibração da lente do imageador a partir das imagens obtidas se divide, conforme mencionado em seção anterior em três etapas: 1) Cálculo do centro real da imagem; 2) Cálculo da rotação do eixo das imagens para fazer uma correspondência com as coordenadas geográficas deixando o Norte geográfico na parte superior da imagem; 3) Geração dos parâmetros (coeficientes de um polinômio de quinta ordem) para a linearização das imagens obtidas pelos imageadores.

4.3.4.1 - Mapa do Fundo Estelar

O primeiro passo é a obtenção do mapa do fundo estelar do céu local, gerado pelo programa *Sky Map*, o qual fornece as posições (azimute e ângulo de elevação) das estrelas. O programa gera um mapa do céu noturno e horário da imagem selecionada, conforme mostra Figura 4.10. A partir deste ponto rotinas computacionais apropriadas calculam o centro, a rotação e os parâmetros de calibração da lente conforme descrito a seguir:

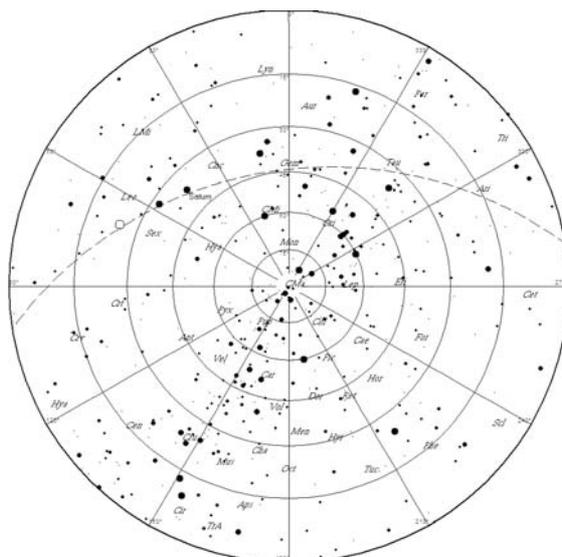


Figura 4.10: Fundo estelar obtido com o programa SkyMap, representativo da noite de 03 de março de 2007, às 20:21:00 (hora local) em São José dos Campos, durante a ocorrência de um eclipse lunar.

4.3.4.2 - Cálculo do Centro da Imagem

Depois de selecionadas as estrelas próximas ao centro e colocadas suas coordenadas linear e não-linear no respectivo arquivo do programa este automaticamente começa a mudar os valores em passos de 0,5 *pixel* em X e depois em 0,5 *pixel* em Y calculando o desvio final associado a cada valor das estrelas entre sua posição na imagem original (valores x e y) e sua posição na imagem linear (azimute e elevação). Uma rotina adequada calcula o valor do desvio padrão σ . O menor valor de σ corresponde ao valor do novo centro.

4.3.4.3 - Cálculo do Ângulo de Rotação

Para calcular o ângulo de rotação da imagem é necessário primeiramente carregar o arquivo com os dados das estrelas do centro e depois selecionar e adicionar os parâmetros de algumas outras estrelas posicionadas longe do centro da imagem (coordenadas $x = 256$ e $y = 256$ na imagem original). O cálculo do valor do ângulo de rotação é obtido a partir da soma das diferenças entre os ângulos de cada estrela em suas coordenadas originais (valores x e y obtidos diretamente da imagem em

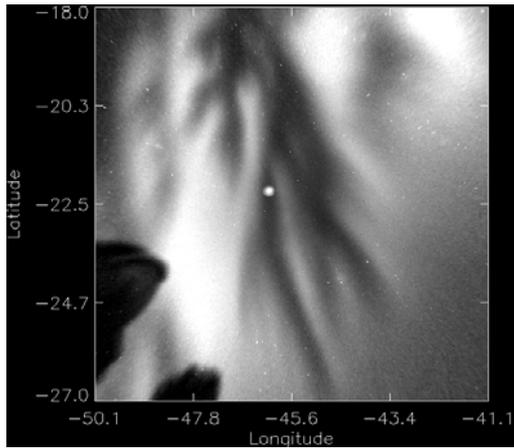
estudo) e suas coordenadas geográficas linearizadas (azimute e elevação com que alimentamos o respectivo arquivo); o valor da soma dividido pelo número de estrelas consideradas fornece o valor do ângulo de rotação da imagem.

4.3.4.4 - Calibração da Lente Olho-de-Peixe

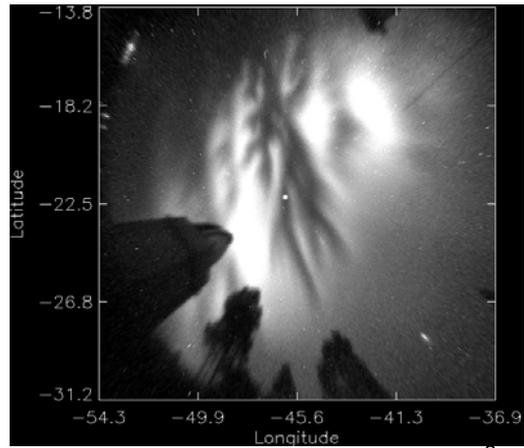
Para calcular os parâmetros de calibração da imagem utilizam-se os mesmos dados das estrelas utilizados cálculo do centro real e do valor do ângulo de rotação somados aos dados de mais algumas estrelas. Depois deste passo o arquivo de dados estará completo para realizar o cálculo do polinômio de quinta ordem que ajusta o valor não linear da lente *all-sky* do imageador e “recupera” uma imagem linear. O polinômio de quinta ordem será utilizado na linearização das imagens junto com as coordenadas do centro real e as coordenadas da rotação da imagem.

4.3.4.5 - Projeção das Imagens

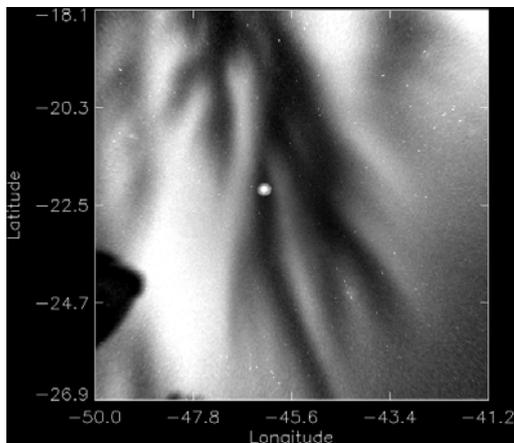
Os dados obtidos com o processo de calibração: zênite real, azimute e função da lente *all-sky* são utilizados na geração de mapas de projeção em coordenadas geográficas (coordenadas x e y dadas em km ou latitude e longitude) através de rotina adequada. Depois de carregar os dados de calibração executa-se a montagem da grade de coordenadas geográficas. Tais mapas de projeção podem ser gerados para qualquer área de interesse. A Figura 4.11 mostra duas imagens linearizadas para as respectivas áreas de 512 e 1024 km², considerando-se diferentes alturas para o pico da emissão OI 630,0 nm: 250, 300 e 400 km.



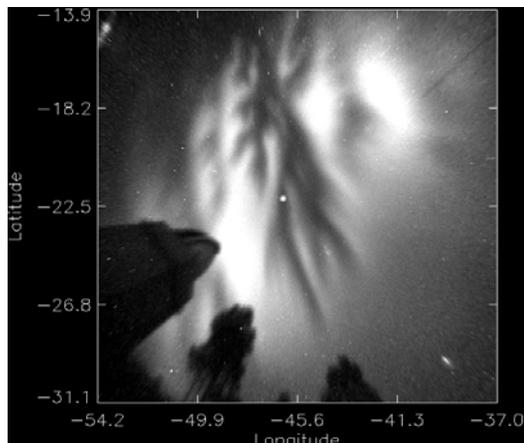
250 km, área (1024 x 1024) km²



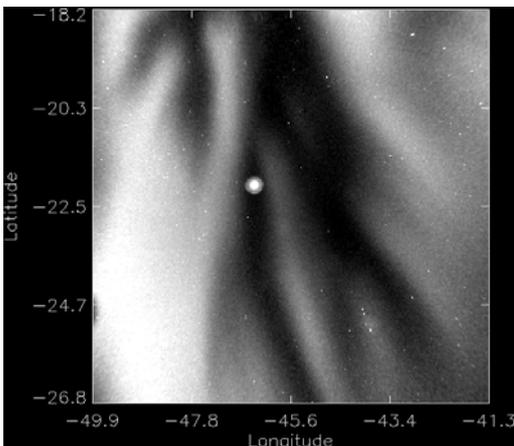
250 km, área (2000 x 2000) km²



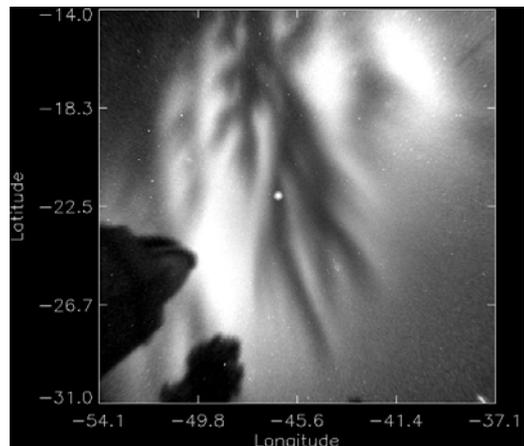
300 km, área (1024x 1024) km²



300 km, área (2000 x 2000) km²



400 km Área (1024 x 1024) km²



400 km Área (2000 x 2000) km²

Figura 4.11: Imagens linearizadas da emissão OI 630,0 nm da noite de 16/10/2003, às 22:00:00 LT para duas áreas de projeção (1024 x 1024) km² (coluna à esquerda) e (2000 x 2000) km² (coluna à direita), supondo-se diferentes alturas para o pico de emissão da OI 630,0 nm (250, 300 e 400 km de altitude, respectivamente).

4.4 - SONDAGEM DA CAMADA IONOSFÉRICA ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE RADIOFREQUÊNCIA

A observação da camada ionosférica com a técnica de radiofrequência tem por princípio básico o envio de pulsos de alta frequência, ou HF (do inglês, *high frequency*) na direção da ionosfera, com incidência vertical ou oblíqua, e a recepção dos pulsos refletivos pela mesma por um receptor. O instrumento utilizado neste tipo de sondagem é a ionossonda e foi primeiramente utilizada por Tuve e Breit em 1925. A ionossonda opera em uma faixa de frequências próximas à frequência natural de oscilação do plasma (frequência crítica), podendo variar de 1 a 20 MHz (para o estudo das camadas E e F). As primeiras ionossondas, denominadas ionossondas padrão ou convencionais, operavam com base na medida do tempo de atraso entre o pulso de HF enviado e o refletido pela ionosfera, de onde se podia extrair somente informação sobre a altura virtual da camada ionosférica. Após a Segunda Grande Guerra os equipamentos começaram a se sofisticar, utilizando-se de técnicas digitais, o que permitiu um significativo aumento dos parâmetros extraídos das sondagens, como por exemplo: altura virtual, polarização da onda, amplitude e fase da onda refletida, deslocamento Doppler da frequência do pulso enviado, e outros.

Nesta seção serão apresentadas de modo sucinto algumas considerações sobre a propagação e reflexão de ondas de rádio num meio magnetizado, sobre o ionograma, que é a representação gráfica dos parâmetros extraídos das sondagens, e a descrição de alguns parâmetros de interesse para este trabalho. Maiores detalhes sobre o funcionamento e processamento podem ser encontrados em diversas referências (HUNSUCKER, 1991, MUELLA, 2004).

4.4.1 - Densidade Eletrônica e Frequência de Plasma

A propagação das ondas de rádio na ionosfera, numa aproximação de primeira ordem pode ser compreendida como sendo a propagação de uma onda plana num meio não-magnetizado, isotrópico, uniforme e com neutralidade de carga (movimento térmico das partículas desprezível)³. A onda se propaga com uma velocidade de grupo dada por $v_g = cn$, onde c = velocidade da luz no vácuo = $2,99 \times 10^8$ m/s.

³ Plasma frio

10^8 m/s e n é o índice de refração do meio. Na ionosfera a densidade eletrônica aumenta com a altura e à medida que um pulso de radiofrequência penetra o meio sua velocidade decresce até se anular totalmente. A velocidade de grupo da onda é dada por:

$$v_g = c\mu = c\sqrt{1 - \left(\frac{Ne^2}{\pi m_e f^2}\right)} \quad (4.5)$$

onde:

μ = parte real do índice de refração n

N = densidade eletrônica

e = carga eletrônica = $1,6 \times 10^{-19}$ C

m = massa eletrônica = $9,1 \times 10^{-31}$ kg

f = frequência da onda, em Hz

Um pulso cuja incidência é vertical será refletido quando v_g for igual a zero, ou:

$$1 - \left(\frac{Ne^2}{\pi m_e f^2}\right) = 0 \quad (4.6)$$

de onde se obtém:

$$N = \frac{m_e \pi f^2}{e^2} = \begin{cases} 1,24 \times 10^4 f^2 \text{ elétrons / cm}^3 \\ 1,24 \times 10^{10} f^2 \text{ elétrons / m}^3 \end{cases} \quad (4.7)$$

Deste modo N é a densidade eletrônica necessária para que se obtenha a reflexão para uma incidência vertical numa frequência f em MHz.

A frequência do plasma pode ser escrita da seguinte forma:

$$f_p = \sqrt{\frac{N_e^2}{\pi m}} = 9\sqrt{N_e (\text{cm}^{-3})} (\text{KHz}) = 9 \times 10^{-6} \sqrt{N_e (\text{cm}^{-3})} (\text{KHz}) \quad (4.8)$$

A freqüência de plasma, também chamada freqüência crítica de plasma é definida como a freqüência máxima abaixo da qual haverá reflexão total de uma onda de rádio com incidência vertical.

4.4.2 – Propagação de Ondas em um Plasma Magnetizado

O estudo completo da propagação de ondas de rádio na ionosfera terrestre deve considerar efeitos de segunda ordem, como a existência do campo magnético da Terra e os efeitos de colisões entre as partículas, o que é explicada pela teoria magneto-iônica, representada pelas equações de Appleton. Algumas quantidades físicas de interesse na teoria magneto-iônica são a freqüência de colisão entre as partículas, ν , e a freqüência natural de giro de um elétron ou íon na presença de um campo magnético, ou girofreqüência, expresso por:

$$f_H = \frac{|e|\hbar}{2\pi m_e} B_0 \quad (4.9)$$

de onde se extrai a girofreqüência angular:

$$\omega_H = \frac{|e|\hbar}{m} B_0 \quad (4.10)$$

Deve-se incluir ainda:

ω = freqüência de sondagem

ω_N = freqüência de plasma

$$\omega_L = \frac{|e|\hbar B_0}{m_e} \cos \theta = \text{girofreqüência angular longitudinal}$$

$$\omega_T = \frac{|e|\hbar B_0}{m_e} \sin \theta = \text{girofreqüência angular transversal} \quad (2.17).$$

A relação de dispersão para a região F da ionosfera é dada por:

$$n^2 = 1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y_T^2 \pm \sqrt{Y_T^4 + 4Y_L^2(1-X)^2}} \quad (4.11)$$

onde:

$$X = \omega_N^2 / \omega^2; \quad (4.12a)$$

$$Y = \omega_H / \omega; \quad (4.12b)$$

$$Y_L = \omega_L / \omega; \quad (4.12c)$$

$$Y_T = \omega_T / \omega \quad (4.12d)$$

$$Z = v / \omega \quad (4.12e)$$

Na presença do campo magnético a ionosfera se comporta como um meio duplamente refrator dividindo a onda plano-polarizada incidente em duas outras circularmente polarizadas denominadas ondas *ordinária* e *extraordinária*, respectivamente. A onda ordinária se comporta como a onda que se propaga num meio não magnetizado, de modo que $X=1$. Uma onda com incidência vertical é refletida num nível onde $\mu^2 = 0$. Uma onda extraordinária será refletida nos seguintes casos:

$$X = 1 - Y \text{ se } Y < 1 \text{ (} f > f_H \text{)} \quad (4.13a)$$

$$X = 1 + Y \text{ se } Y > 1 \text{ (} f < f_H \text{)} \quad (4.13b)$$

Se a onda normal estiver no plano do campo magnético ($\theta = 0$), então $Y_L = Y$ e $Y_T = 0$. No caso em que $\theta \neq 0$, e que $Y_T = 0$, pode-se obter uma boa Aproximação para n , o que é conhecido como aproximação quase-longitudinal. Esta é válida para a propagação de ondas de alta frequência na ionosfera, desde que X não seja próximo a 1 e θ não seja próximo a zero. Desta forma o índice de refração será dado por:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 \pm Y_L} \quad (4.14)$$

A onda se propaga com dois modos de propagação circularmente polarizados, sendo que a onda plano-polarizada que viaja pela ionosfera é a soma dos modos ordinário e extraordinário.

Outras considerações como os efeitos do meio magnetizado na polarização das ondas não serão incluídos aqui.

4.4.3 - O Ionograma

Os ionogramas são as representações gráficas dos dados obtidos com a sondagem por pulsos de radiofrequência incidentes na ionosfera. Para o caso de incidência vertical o gráfico é expresso em termos da distância percorrida em função da frequência de envio do pulso. O registro de dados do ionograma é feito dividindo-se o intervalo de tempo entre o envio e a recepção do pulso pela velocidade da luz no vácuo, c , de onde se obtém a distância percorrida pelo pulso, ou a chamada altura virtual da camada, $h'F$. Variando-se tanto a frequência de transmissão como a de recepção num intervalo de frequências entre 1 e 20 MHz, obtém-se gráficos da frequência versus altura virtual da camada. A figura 4.12 ilustra a forma gráfica de um ionograma:

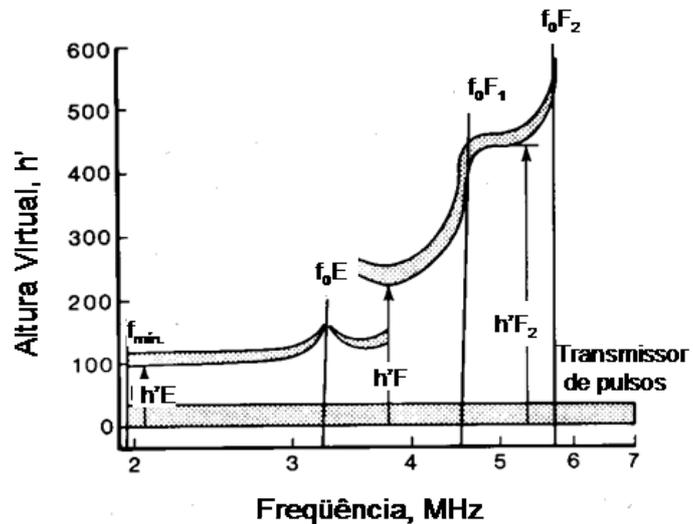


Figura 4.12: Representação gráfica de um Ionograma.
Fonte: Hunsucker (1991).

4.4.4 - Altura Virtual da Camada Ionosférica

A determinação da altura da camada ionosférica inclui a definição de um parâmetro denominado altura virtual. Considerando a incidência vertical de um pulso de radiofrequência na ionosfera, que viaja a velocidade da luz, $v = c$, pode-se calcular o tempo necessário para este pulso ser refletido pela camada:

$$t = \frac{2}{c} \int_0^h \frac{dz}{\mu} \quad (4.15)$$

A altura virtual é dada por:

$$h'(f) = \frac{1}{2} ct = \int_0^h \frac{dz}{\sqrt{1 - \frac{f_n^2}{f^2}}} \quad (4.16)$$

Como o pulso de radiofrequência viaja mais rapidamente no espaço livre que na camada ionizada, a altura virtual é sempre maior que a altura real, e estas duas quantidades estão relacionadas pela equação integral:

$$h'(f) = \int_0^{Z_{\max}} \frac{dz}{\mu(f, z)} \quad (4.17)$$

onde: z é altura real, Z_{\max} é a altura máxima atingida pela frequência f , e n é o índice de refração em Z_{\max} para a frequência f . Reescrevendo a (4.17):

$$h'(f) = \int_0^{Z_{\max}} \frac{dz}{\left(1 - \frac{f_n^2}{f^2}\right)^{1/2}} \quad (4.18)$$

A altura real de reflexão de um pulso de radiofrequência é obtida pela inversão da equação integral de Abel, desprezando-se os efeitos do campo geomagnético:

$$h(f_v) = \frac{2}{\pi} \int_0^{f_v} \frac{h'(f)}{(f_v^2 - f^2)^{1/2}} df \quad (4.19)$$

4.4.5 – Ionossondas utilizadas neste trabalho

Este trabalho envolveu a utilização de dados obtidos com duas ionossondas: uma ionossonda digital CADI (*Canadian Advanced Digital Ionosonde*), pertencente a UNIVAP e instalada em São José dos Campos, e uma Digissonda 256 - DGS 256 – pertencente ao INPE e instalada em Cachoeira Paulista. Ambos os instrumentos operaram com incidência vertical.

O processamento dos dados da CADI pode ser feito de duas formas: utilizando-se o programa do sistema CADI ou atualmente através de um programa munido de

interface gráfica e mais recursos computacionais desenvolvido pelo grupo de Física e Astronomia da UNIVAP, denominado UDIDA (UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis). Uma descrição detalhada do programa pode ser encontrada em Muella (2004).

Tabela 4.3: Características da ionossonda CADI.

Potência máxima do pulso transmitido	600 W
Faixa de frequência de transmissão de radiofrequência	1 – 20 MHz logarítmica
Intervalo de altitudes sujeitos a sondagem	90 – 1020 km
Taxa de repetição do pulso	20 pps
Resolução de altitude	6 km
Largura de pulso	40 μ s
Número de receptores	1
Codificação de pulso	Código Barker
Antenas	Duplo delta

O processamento dos dados obtidos com a DGS 256 é baseado no algoritmo de inversão ARTIST (Pimenta et al. 2008, original de Gamache et al., 1992), que permite a obtenção do perfil de altura real da camada, hmF2.

Os parâmetros ionosféricos utilizados nas análises deste trabalho foram: h'F (altura virtual da camada F), hmF2 (altura real da camada F), hpF2 (altura de pico da camada F), foF2 (frequência crítica da camada F) – veja Tabela 4.4. Além disto, foram analisadas algumas seqüências de ionogramas obtidas com a DGS 256.

Tabela 4.4: Alguns parâmetros ionosféricos extraídos de dados obtidos com ionossondas.

h'F	Altura virtual mínima do traço ordinário em toda região F
f₀F₂	Frequência crítica da onda ordinária da camada mais alta da região F
h_pF₂	Altura virtual do traço ordinário na frequência 0,832 de f₀F₂
hmF₂	Altura real mínima do traço ordinário da camada F

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE ESTRUTURAS SECUNDÁRIAS OBSERVADAS EM BOLHAS DE PLASMA

As irregularidades do plasma equatorial apresentam-se sob ampla faixa de escalas espaciais, que podem variar de poucos metros a centenas de quilômetros. Além disto, as depleções na densidade do plasma também podem variar significativamente, em até 3 ordens de magnitude.

Diversos estudos envolvendo diferentes técnicas de monitoramento e sondagem já reportaram a existência de estruturas secundárias nas bolhas de plasma, tais como bifurcações e estrias (MENDILLO E TYLER, 1983; TINSLEY et al., 1997; TAKAHASHI et al., 2001, ABALDE et al. 2001; PIMENTA et al., 2003, MAKELA et al., 2006). As bifurcações são estruturas ramificadas que surgem nas paredes da bolha principal, tanto a leste como a oeste. Tais estruturas foram previstas teoricamente por Zalesak et al. (1982) e observadas experimentalmente através de imagens da emissão OI 630,0 nm (MENDILLO E TYLER, 1982; PIMENTA et al., 2003; SHIOKAWA et al., 2004), dados de satélite (AGGSON et al., 1996, LAAKSO et al. 1997; SU et al., 2001).

O imageamento óptico das emissões termosféricas como as OI 630,0 nm, OI 777,4 nm e OI 557,7 nm pode revelar diferentes aspectos de estruturação nas irregularidades de plasma. Rohrbaugh et al. (1989) reportaram as primeiras observações simultâneas das referidas emissões e as similaridades das macro estruturas nelas presentes. Além disto, com o imageamento simultâneo torna-se possível determinar parâmetros como a altura da camada ionosférica (SAHAI et al., 1983), a deriva zonal do plasma na base da camada e na região do pico de densidade, etc. (PIMENTA, 2003, ABALDE et al. 2004). A presença de estruturas finas nas bolhas de plasma foi reportada por Tinsley et al. (1997). Verificou-se que quando há uma boa relação sinal-ruído as imagens da OI 777,4 nm mostram maiores detalhes nas imagens que a emissão OI 630,0 nm. Além disto, Tinsley et

al. (1997) verificaram estruturas cuja escala espacial variava entre 10 e 100 km. Takahashi et al. (2001) verificaram que através de imagens da emissão OI 557,7 nm era possível observar a estrutura fina de bolhas de plasma, com maior nível de resolução quando comparada às imagens da emissão OI 630,0 nm. Esta característica foi atribuída às diferenças nos tempos de vida das emissões, uma vez que a emissão OI 557,7 nm tem um tempo de vida de 0,8 s e a emissão OI 630,0 nm tem duração de 120 s. Por outro lado, Abalde et al. (2001) verificaram a presença de estruturas finas assemelhadas a estrias nas imagens da emissão OI 777,4 nm e não observáveis nas imagens da emissão OI 630,0nm. Novamente, tais diferenças foram atribuídas aos tempos de vida das emissões: a emissão OI 777,4 nm é uma emissão originária de processos de recombinação radiativa (com pequena contribuição de recombinação íon-íon), e ocorre praticamente instantaneamente (tempo de vida de microssegundos) e não é sujeita, portanto, a processos de desativação por colisões como a emissão OI 630,0 nm. Esta característica é geralmente aceita como explicação para a observação de estruturas finas nas imagens.

Diversos estudos têm investigado os possíveis mecanismos de formação das estruturas secundárias nas bolhas de plasma, mas ainda hoje, tais mecanismos permanecem não completamente esclarecidos. A observação óptica de estruturas como estrias nas imagens da emissão OI 777,4 nm e não observáveis na emissão OI 630,0 nm é favorecida pelas diferenças nos tempos de vida das referidas emissões, como proposto por outros autores (TINSLEY et al., 1997; TAKASHASHI et al., 2001, ABALDE et al., 2001). Por outro lado entendemos que a presença de tais estruturas inspira a investigação de possíveis mecanismos eletrodinâmicos que possam estar relacionados à sua formação. Neste sentido, propomos a investigação de estruturas finas observadas nas imagens da emissão OI 777,4 nm, coletadas com um imageador *all-sky* localizado numa estação de baixa latitude no hemisfério sul: São José dos Campos (23,2S, 45,6W). Os eventos estudados ocorreram durante uma estação típica de *Spread-F* (outubro de 2000 e outubro de 2001) num período de atividade solar alta, em noites geomagneticamente calmas. São apresentados também dados ionosféricos

complementares obtidos com ionossondas digitais situadas na região equatorial (São Luís, MA – 2,6° S, 44,4° W, latitude dip: 1,24S) e em baixa latitude (São José dos Campos, SP - campus da UNIVAP).

5.1 – SPREAD-F EQUATORIAL E BOLHAS DE PLASMA

As condições iniciais do *Spread-F* equatorial são baseadas na análise de parâmetros ionosféricos típicos como: a altura da base da camada, $h'F$, a altura do pico de densidade da camada, hmF_2 , e a velocidade de subida da camada ao anoitecer, ou pico pré-reversão. A variação noturna destes parâmetros foi obtida com dados de uma ionossonda digital localizada em São Luís (2,3 °S, 44,0 °S, dip latitude 1,24 ° S) e uma ionossonda digital CADI instalada em São José dos Campos (23,2°S, 45,9°W, dip latitude 17,6 °S).

A Figura 5.1 apresenta o comportamento noturno da base da camada F, expressa pelos valores de $h'F$ (altura virtual da base da camada F) e hmF_2 (altura real da base da camada F) na estação equatorial de São Luís (painel superior) e o intervalo de ocorrência do Spread-F (barra horizontal cinza). Na noite de 23-24 de outubro de 2000 a base da camada ionosférica na região equatorial elevou-se a altitudes próximas a 550 km sendo que Spread-F foi observado entre as 18:30 e 01:45 LT. Na noite de 31 de outubro-01 de novembro a base da camada ionosférica na região equatorial elevou-se a altitudes próximas a 550 km, ao anoitecer, sendo que o Spread-F foi observado entre 18:30 e 05:45 LT. Finalmente, na noite de 15-16 de outubro de 2001 a base da camada elevou-se a altitudes superiores a 700 km, sendo que o spread-F foi observado entre 18:45 e 05:45 LT.

Embora as bolhas observadas em São José dos campos não sejam necessariamente formadas na região de São Luís, o comportamento da camada ionosférica naquela estação pode ser considerado o comportamento geral aproximado da camada F na região equatorial (ABDU et al., 1983).

No painel inferior da Figura 5.1 é mostrado o comportamento noturno da base ($h'F$) e do pico da camada F (hpF_2) bem como o horário inicial e final de detecção do *Spread-F* ou da bolha de plasma em São José dos Campos (barras horizontais cinzas). Na noite de 23-24 de outubro de 2000 as irregularidades foram detectadas em São José dos Campos por volta das 19:45 LT e se estenderam até aproximadamente 00:44 LT. Na noite de 31 de outubro - 01 de novembro de 2000, o *spread-F* foi detectado em SJC a partir das 20:00 LT estendendo até aproximadamente 23:00 LT. Na noite de 15/16 de outubro o *Spread-F* em SJC teve início às 21:00 LT estendendo por algumas horas após a meia-noite.

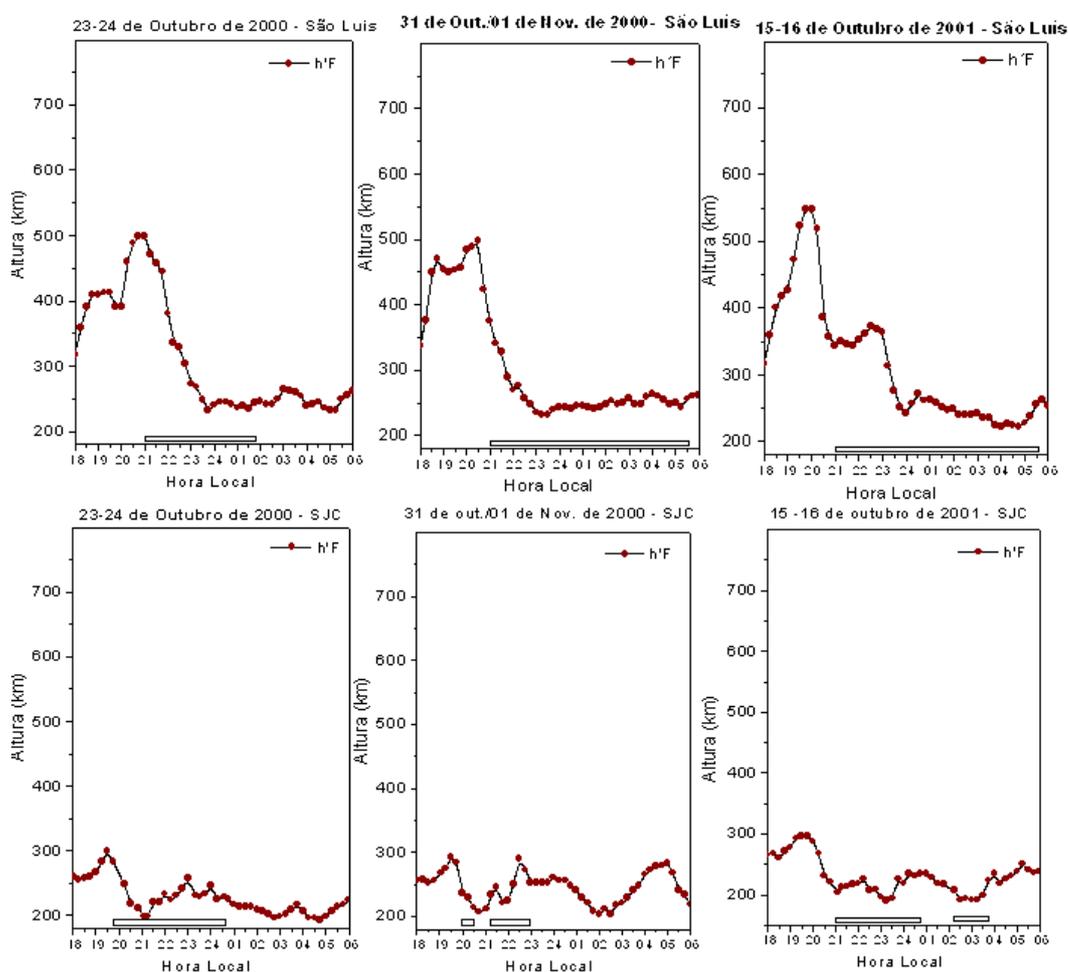


Figura 5.1: Variação noturna da altura virtual da camada F, $h'F$ em: a) Parte superior: estação equatorial de São Luís ($2,3^{\circ}S$, $44,0^{\circ}S$, dip latitude $1,24^{\circ}S$) e b) Parte inferior: obtido na estação de baixa latitude de São José dos Campos ($23,2^{\circ}S$, $45,9^{\circ}W$, dip latitude $17,62^{\circ}S$). Barras horizontais: intervalo de ocorrência do *Spread-F*.

A Tabela 5.1 apresenta um resumo dos horários de ocorrência dos eventos bem como alguns índices geomagnéticos das noites estudadas.

Tabela 5.1: Horários de observação do *Spread-F*

Data	F10.7*	Kp	Spread-F/ Bolhas em SJC	
			Ionossonda	Imageador
23-24 de out. de 2000	166,5	4- 2+ 2- 2+	19:45	18:50
			24:30	01:30
31 out. / 01 nov.de 2000	169,5	2+ 2- 2+3- 2 4 3- 3+ 3+ 2+ 2 0	20:00	21:15
			23:00	04:50
15-16 de out. de 2001	192,9	2- 2 1 2- 3 2 2 2-	21:00	18:50 –
			03:45	01:18

*Fonte F10.7: ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_RADIO/FLUX/2001.obs

Neste trabalho o estudo das estruturas finas detectadas nas imagens da emissão OI 777,4 nm é dividido nas seguintes etapas:

- 1) Processamento das imagens, descrito no capítulo 4, com a projeção e linearização das mesmas em alturas aproximadas correspondentes a cada emissão: 250 km para a OI 630,0 nm e 350 km para a OI 777,4 nm;
- 2) Varredura longitudinal da intensidade das emissões através de rotinas computacionais adequadas (desenvolvidas na linguagem IDL);
- 3) Classificação qualitativa das estruturas principais e secundárias presentes na imagem (bolha, bifurcação, estria) e quantitativa (largura zonal das mesmas);
- 4) Determinação do nível de depleção da densidade do plasma através de parâmetros extraídos tanto das imagens (intensidade relativa no zênite) como de dados ionosféricos (valores de foF2, em MHz).
- 5) Determinação da velocidade de deriva vertical da bolha;
- 6) Análise dos possíveis mecanismos de formação de estruturas secundárias;
- 7) Análise de uma possível configuração de campo elétrico vertical que explique a morfologia das estruturas.

5.2 – LARGURA ZONAL DAS ESTRUTURAS OBSERVADAS NAS IMAGENS DA EMISSÃO OI 777,4 nm

A largura zonal das estruturas presentes nas bolhas é determinada a partir de imagens linearizadas da emissão OI 777,4 nm. A Figura 5.2 exemplifica o método utilizado. À direita é mostrada uma imagem linearizada (considerando-se uma altura de pico de emissão OI 777,4 nm em 350 km de altitude), obtida na noite de 15/16 e outubro de 2001, para uma área de projeção de 1024 x 1024 km². A partir de rotinas computacionais, na linguagem IDL, foram feitas varreduras da intensidade relativa da imagem em cortes latitudinais selecionados. Após este procedimento, comparam-se as estruturas presentes nas imagens e nos gráficos de varreduras, identificando-se e classificando as mesmas. Na figura 5.2, pode-se verificar a presença de uma grande banda de depleção, localizada entre 47,0° e 44,8° Oeste, na latitude 23° Sul, nomeada B1. Uma segunda estrutura pode ser observada entre 48° e 47° Oeste, na latitude 23° Sul, tratando-se de uma bifurcação da bolha principal, sendo denominada WBif1. Uma terceira estrutura, situada entre 44,8° e 43,7° a leste pode ser observada. As setas vermelhas indicam as regiões latitudinais selecionadas. No lado direito da figura são mostrados: a) um gráfico correspondente à varredura da intensidade da imagem, onde são incluídas as siglas correspondentes a cada estrutura observada: WBif1 para a bifurcação a oeste, B1 para a bolha principal, G1, G2, Gn para as estruturas finas encontradas no interior da bolha principal, b) um recorte da imagem total, englobando aproximadamente 2 graus em torno da latitude selecionada. Para determinar a largura zonal, seleciona-se a borda de cada estrutura escura na imagem e na curva de intensidade simultaneamente. A largura zonal é extraída da diferença entre as coordenadas geográficas de cada borda posteriormente convertidas em quilômetros.

Para identificação das estruturas principais são apresentadas as seqüências temporais de imagens das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm obtidas com dois imageadores *all-sky* similares (descritos no capítulo 4) situados em São José dos Campos, nas noites de 23 de outubro de 2000, 31 de outubro de 2000 e 15 de

outubro de 2001, respectivamente. O primeiro passo é identificar as estruturas principais presentes nas imagens obtidas simultaneamente das duas emissões. Em seguida são apresentados pares de imagens e seus respectivos gráficos onde são mostradas as varreduras de intensidade da emissão em três cortes latitudinais.

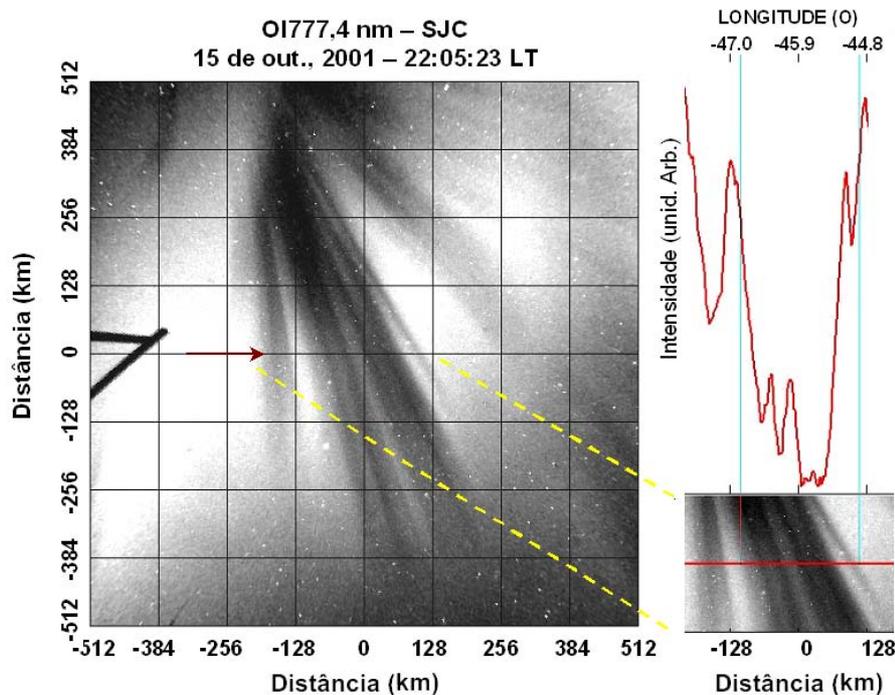


Figura 5.2: Imagem linearizada da emissão OI 777,4 nm na noite 15/16 de outubro de 2001 (à esquerda), onde são mostrados os cortes latitudinais selecionados para análise (setas vermelhas). À direita são mostrados respectivamente: Acima: gráfico de intensidade da imagem (varredura ao longo da latitude 23°S), onde as estruturas observadas são nomeadas BF1, B1, G1, G2, G_n. Abaixo: recorte da imagem com largura de aproximadamente 2 graus em torno da latitude selecionada (neste exemplo, 23°S).

Em seguida são apresentados pares de imagens em horários consecutivos separados em aproximadamente 10 minutos e os gráficos de varredura da intensidade da emissão em três cortes latitudinais. Foi adotado o seguinte procedimento: as linhas vermelhas nas imagens servem como guia para as regiões selecionadas. O horário está indicado no canto inferior direito da imagem. Nos gráficos são incluídos os cortes latitudinais selecionados (canto direito inferior), o horário (canto direito superior) e as siglas das estruturas identificadas

na varredura de intensidade. A Tabela 5.2 resume as siglas adotadas e seus significados:

Tabela 5.2: Nomenclatura adotada na análise das estruturas presentes nas imagens da emissão OI 777,4 nm.

Sigla	Estrutura	Obs.
$B_{1,2,3,\dots,n}$	Enésima Bolha	A numeração é feita da direita para a esquerda, ou, de leste para oeste
$EBif_{1,2,3,\dots,n}$	Bifurcação a leste	
$WBif_{1,2,3,\dots,n}$	Bifurcação a oeste	
g_n	Estrutura fina denominada estria	

5.2.1 - Noite de 23-24 de Outubro de 2000

5.2.1.1 – Estruturas Observadas

A Figura 5.3 apresenta uma seqüência de imagens linearizadas da emissão OI 777,4 nm obtidas entre as 19:26 e 19:51 LT na noite de 23-24 de outubro de 2000. Nesta seqüência podemos observar a fase inicial de uma depleção de plasma, caracterizada pela região escura da imagem no canto superior esquerdo da imagem. Às 19:36 LT, ou seja, dez minutos após o início, a depleção se ramifica em quatro depleções distintas. Entre as 19:46 e 19:51 já se pode observar a presença de estrias nas quatro estruturas iniciais e uma inclinação da região superior das bolhas para oeste. Esta seqüência não é acompanhada de uma seqüência de imagens da emissão OI 630,0 nm, pois estas últimas não foram adquiridas no intervalo devido a problemas operacionais.

Nas seqüências seguintes de imagens, mostradas na Figura 5.4 são apresentadas imagens linearizadas das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm obtidas simultaneamente entre as 20:00 e 20:30 LT. As alturas de linearização empregadas foram 280 km para a emissão OI 630,0 nm e 330 km para a OI 777,4 nm. Nas imagens da emissão OI 630,0 nm, nota-se a presença de uma máscara

na borda leste do imageador, utilizada para minimizar a intensa luminosidade das luzes da cidade, provavelmente refletida por nuvens.

Comparando-se as duas seqüências de imagens mostradas na Figura 5.4, podemos identificar as mesmas depleções de plasma com as duas emissões, porém, conforme já mencionado anteriormente, as imagens da emissão OI 777,4 nm mostram maiores detalhes das estruturas presentes nas bolhas de plasma, como as estrias.

As estrias parecem se estender por vários quilômetros na direção norte-sul, quase alinhadas as linhas do campo geomagnético, mas à medida que avançam, tendem a sofrer interação com as estrias vizinhas, sobrepondo-se umas as outras e formando estruturas mais largas. Além disto, uma estrutura mais larga num determinado instante de tempo pode apresentar-se poucos minutos com várias subdividida em estruturas menores.

23/24 DE OUTUBRO DE 2000

Imagens 630.0 nm não disponíveis
entre 19:26 e 19:51 LT

140

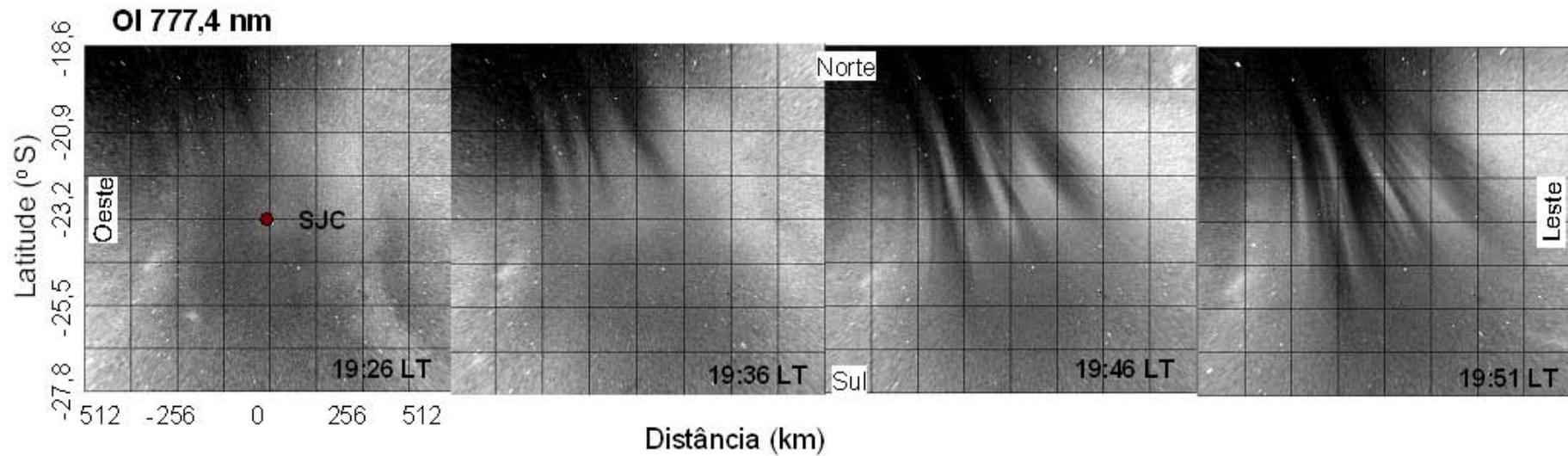


Figura 5.3: Seqüência temporal de imagens linearizadas da emissão OI 777,4 nm obtidas em São José dos Campos na noite 23/24 de outubro de 2000.

23/24 DE OUTUBRO DE 2000

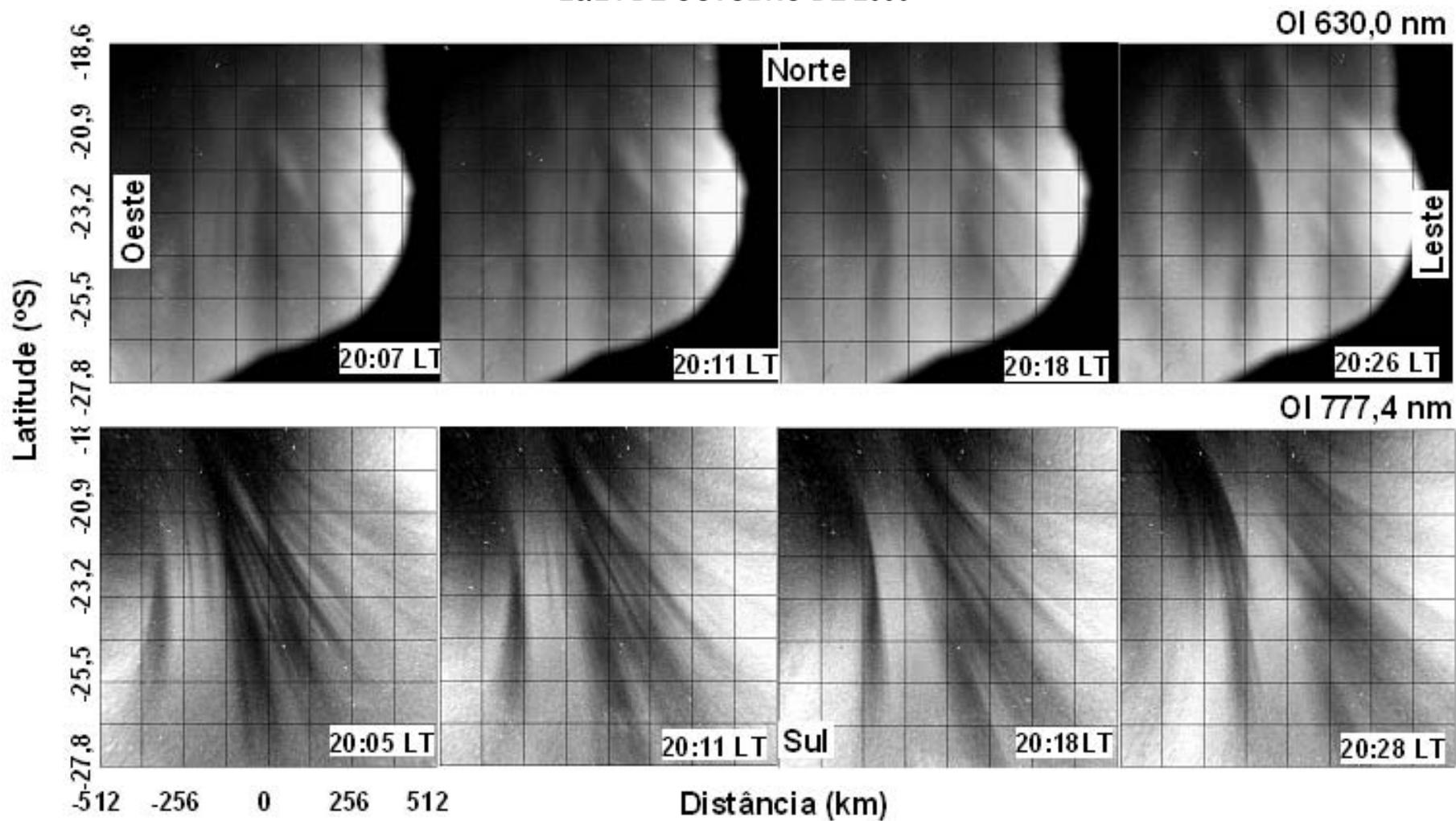


Figura 5.4: Seqüência temporal de imagens linearizadas das emissões OI 630,0 nm (280 km) e OI 777,4 nm (330 km) obtidas em São José dos Campos na noite 23/24 de outubro de 2000.

5.2.1.2 – Largura Zonal das Estruturas observadas na noite de 23-24/out./2000

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 mostram as imagens e os seus respectivos gráficos de varredura da intensidade entre os horários 19:41 e 20:30 LT da noite 23-24 de outubro de 2000.

Às 19:41 LT verifica-se a presença de quatro estruturas largas e escuras, denominadas B1, B2, B3 e B4 cujas larguras zonais variam de 70 a 150 km. A extensão latitudinal máxima atingida é aproximadamente 23,2 S. Estruturas finas não são detectadas. Na imagem seguinte obtida às 19:51 LT já se pode observar a presença de várias estruturas finas entre as paredes leste e oeste das bolhas principais vistas anteriormente e também se pode ver que a B4 atingiu latitudes mais baixas, em aproximadamente 25,4 S, embora nesta latitude esta já esteja um pouco difusa. As larguras zonais das estrias variam de 20 a 50 km, o que pode ser verificado na Tabela 5.2.

Na Figura 5.6 são mostradas imagens obtidas nos horários 19:55 e 20:05 LT onde se pode observar um grande avanço latitudinal das bolhas, atingindo latitudes próximas a 27,6S, na borda inferior da imagem. Pode-se observar que as estruturas principais se alargam à medida que avançam a latitudes mais baixas, mas que as estruturas finas preservam, em geral, sua largura zonal por grande extensão latitudinal. Além disto efeitos como subdivisão e sobreposição de estruturas finas podem ser observados. Por exemplo, às 19:55 LT observa-se que as bolhas B1 e B2 se misturam, uma vez que já não se pode verificar claramente suas paredes leste e oeste, e várias estrias são verificadas, embora sua intensidade seja fraca. As bolhas B3 e B4 também se aproximam e misturam, e várias estrias são percebidas. Duas estruturas finas oeste podem ser detectadas abaixo de 21,0S e embora se assemelhem a estrias foram definidas como bifurcações a oeste, por estarem mais afastadas da bolha principal e poderem ser identificadas nas imagens da OI 630,0 nm como bifurcações. Às 20:05 LT também se observa o surgimento de uma quinta estrutura, a oeste, entre 49,1 e 48,0 S, denominada B5. Finalmente, a Figura 5.7 mostra os dois últimos horários analisados da noite. A extensão latitudinal da bolha parece ultrapassar a borda da imagem, em 27,6S. Observa-se que as bolhas inicialmente detectadas já se comportam como uma única e larga estrutura e apesar

da presença de algumas estrias, observadas principalmente na região central da imagem, as estruturas já se tornam mais difusas.

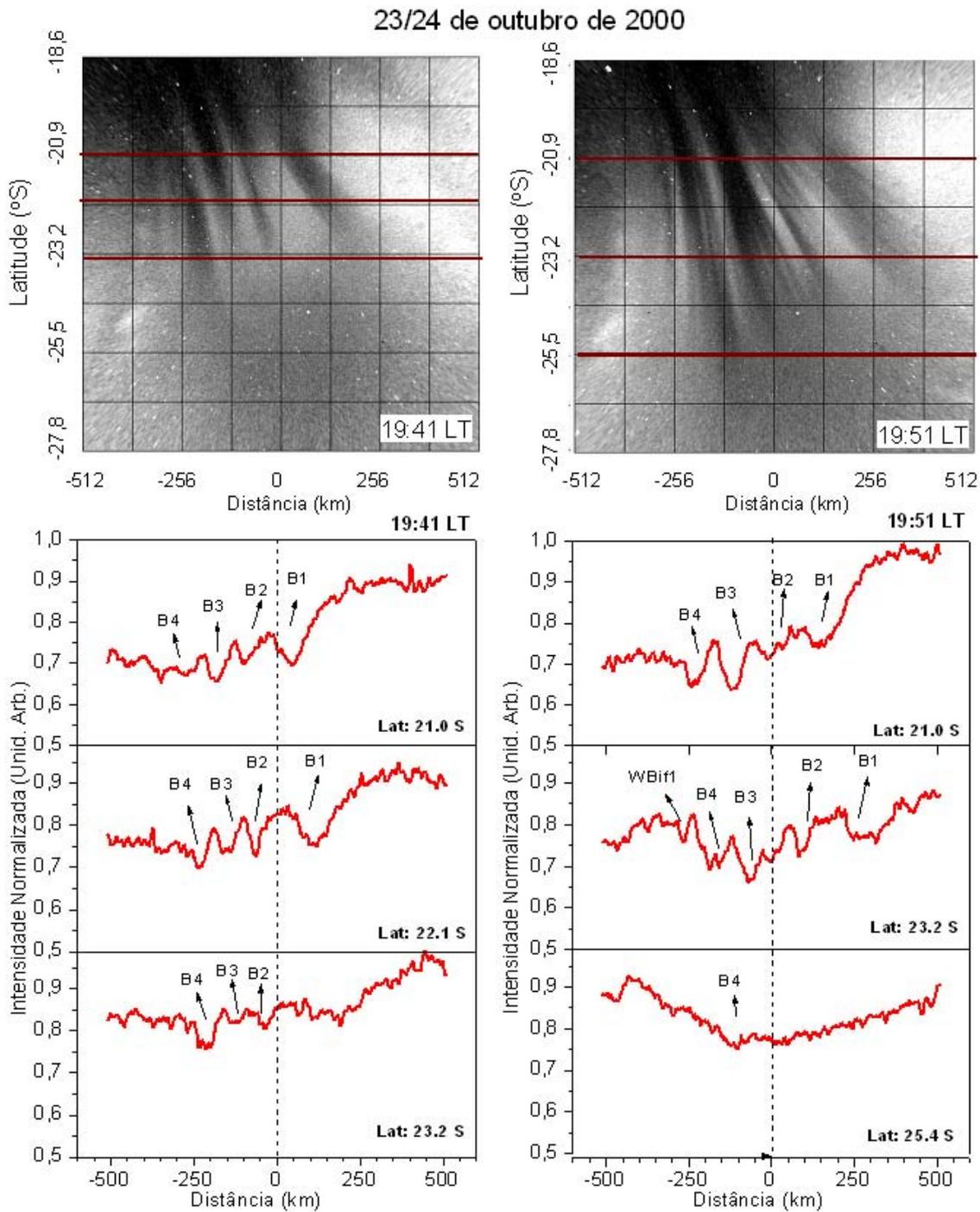


Figura 5.5: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas supondo-se a altura igual a 350 km, nos horários 19:41 LT (no topo à esquerda) e 19:51 LT (no topo à direita) e gráficos das varreduras longitudinais de intensidades (abaixo das respectivas imagens) ao longo de três cortes latitudinais. Noite de 23 de outubro de 2000, São José dos Campos.

23/24 de outubro de 2000

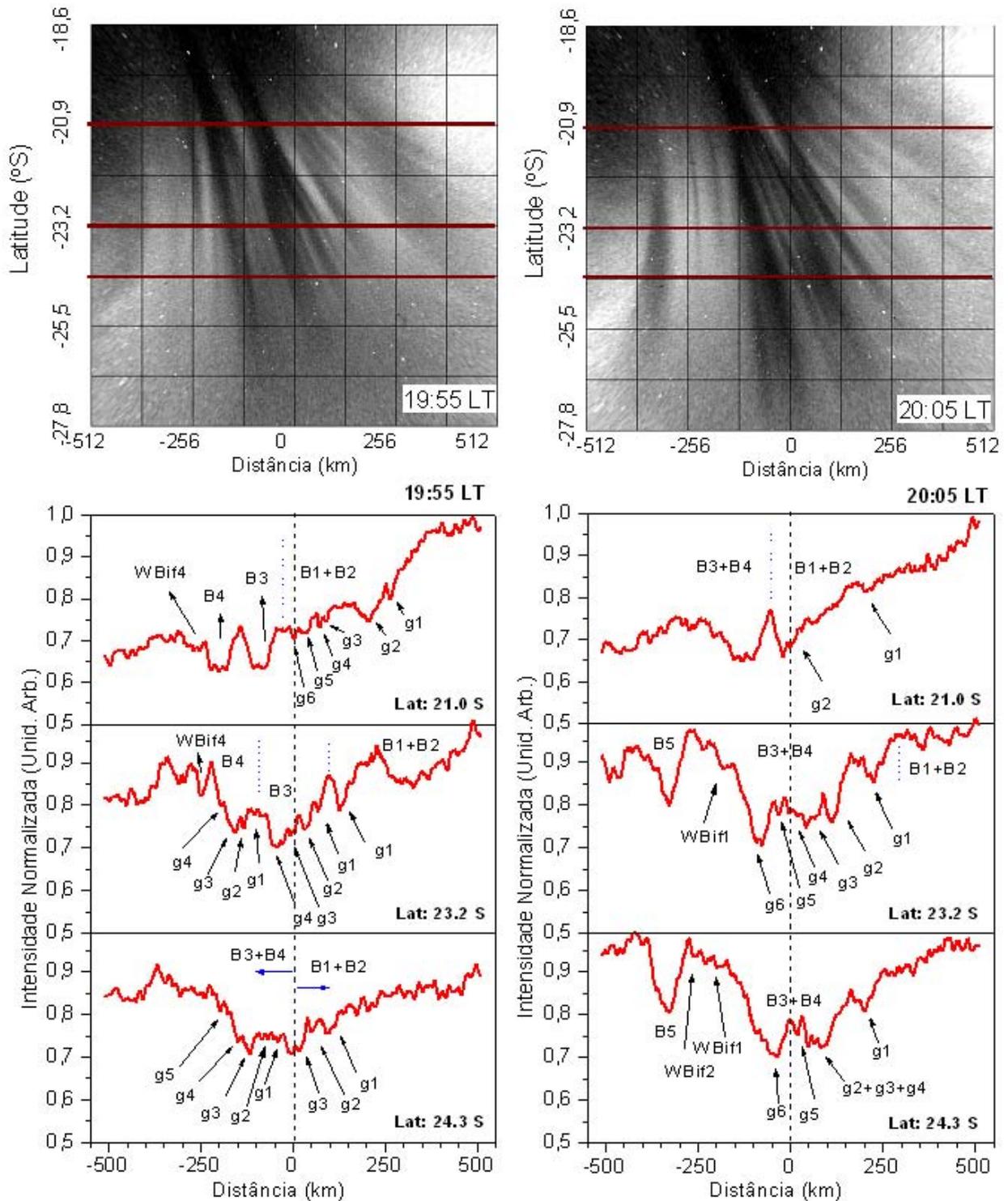


Figura 5.6: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas supondo-se a altura igual a 330 km, nos horários 19:55 LT (no topo à esquerda) e 20:05 LT (no topo à direita) e gráficos das intensidades (abaixo das respectivas imagens) ao longo de três cortes latitudinais. Noite de 23 de outubro de 2000, São José dos Campos.

23/24 de outubro de 2000

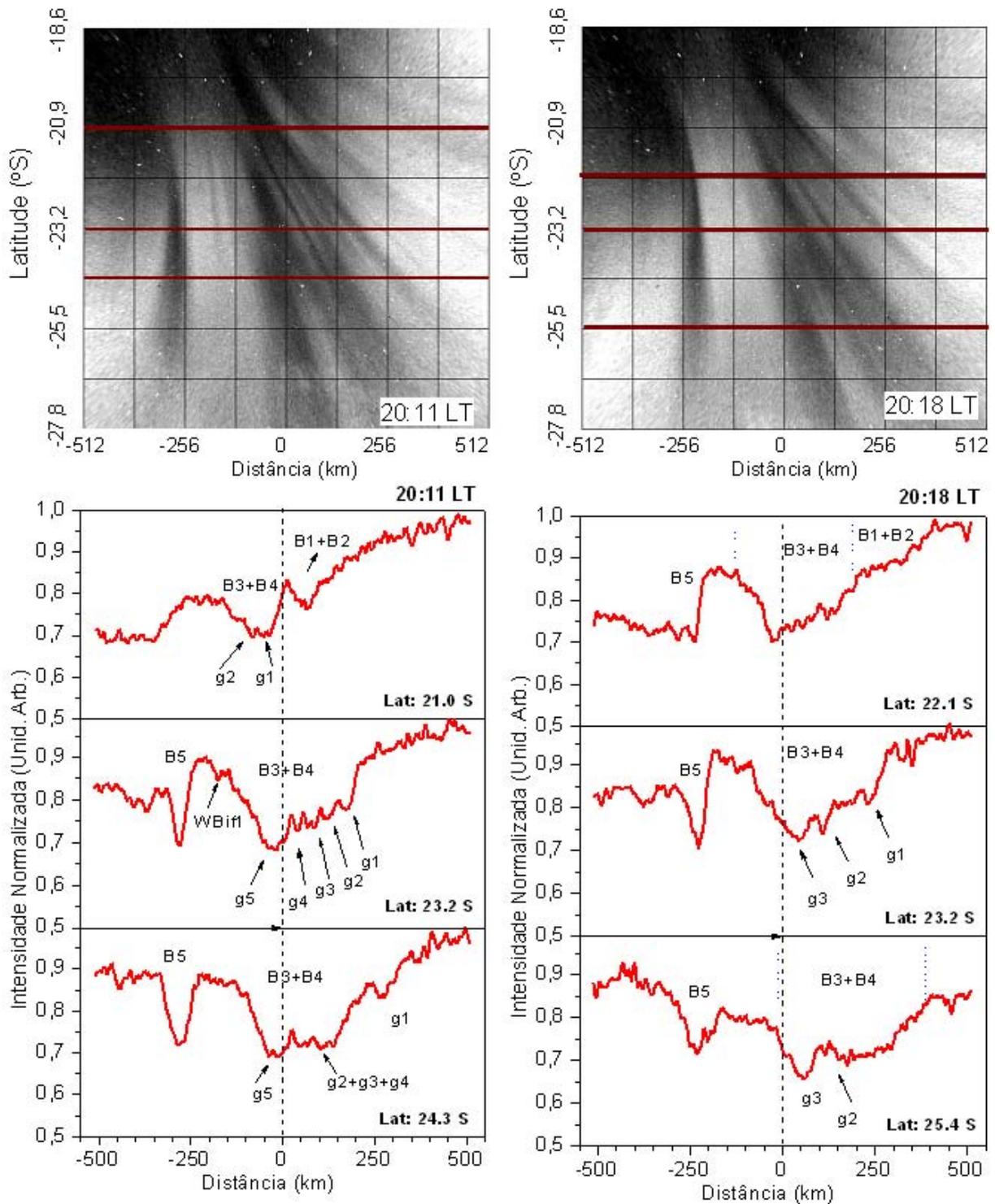


Figura 5.7: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas supondo-se a altura igual a 330 km, nos horários 20:11 LT (no topo à esquerda) e 20:18 LT (no topo à direita) e gráficos das intensidades (abaixo das respectivas imagens) ao longo de três cortes latitudinais. Noite de 23 de outubro de 2000, São José dos Campos.

Tabela 5.3: Descrição quantitativa das estruturas observadas nas varreduras de intensidade da emissão OI 777,4 nm na noite de 23/24 de outubro de 2000.

23/24 de outubro de 2000 OI 777,4 nm					
Hora Local	Latitude (Sul)	Largura zonal das estruturas (km)			
19:41:17	21.0	$B_1 = 102$	$B_2 = 70$	$B_3 = 74$	$B_4 > 150$
	22.0	$B_1 = 120$	$B_2 = 62$	$B_3 = 76$	$B_4 = 92$
	23.2	$B_1 = -$	$B_2 = 64$	$B_3 = 68$	$B_4 = 74$
19:51:52	21.0	$B_1 > 170$ (difusa)	$B_2 = 100$ $g_1 = 24, g_2 = 50$	$B_3 = 92$	$B_4 = 122$ $WBif_1 = 36$
	22.0	$B_1 = 232$	$B_2 = 94$ $g_1 = 28, g_2 = 26,$ $g_3 = 26$	$B_3 = 92$ $g_1 = 30$	$B_4 = 88$ $WBif_1 = 28$ $g_1 = 28, g_2 = 44$
	23.2	$B_1 = 158$	$B_2 = 58$	$B_3 = 150$ $g_1 = 22, g_2 = 30,$ $g_3 = 68$	$B_4 = 110$ $g_1 = 22, g_2 = 28$
19:55:50	21.0	$B_1 = 80$ $g_1 = 32, g_2 = 80$ $WBif_1 = 30$	$B_2 = 72$	$B_3 > 262$ $g_1 = 20, g_2 = 22,$ $g_3 = 30, g_4 = 38,$ $g_5 = 38, g_6 = 38$	$B_4 = \text{difusa}$
	22.0	$B_1 = 144$ $g_1 = 24, g_2 = 48,$ $g_3 = 46$	$B_2 = 102$	$B_3 = 112$ $g_1 = 36, g_2 = 30,$ $g_3 = 24$	$B_4 = \text{difusa}$
	23.2	$B_1 = 180$	$B_2 = 142$	$B_3 = 60$	$B_4 = \text{difusa}$
20:05:06	21.0	$B_1 = \text{dissipou}$	$B_2 = \text{dissipou}$	$B_3 = 138$	$B_4 = 112$
	22.0	$B_1 + B_2 = \text{NP}$		$B_3 + B_4 = 216$	
	23.2	$WBif_1 = 40$	$WBif_2 = 24$	$B_3 + B_4 = 310$ $g_1 = 38, g_2 = 26, g_3 = 26, g_4 = 22,$ $g_5 = 26, g_6 = 64$	
20:11:42	21.0	$B_1 = \text{dissipou}$	$B_2 = \text{dissipou}$	$B_3 + B_4 = 220$	
	22.0			$B_3 + B_4 = 200$ (dissipando)	
	23.2			$B_3 + B_4 = 350$ $g_1 = 50, g_2 = 38, g_3 = 36, g_4 = 28,$ $g_5 = 80$ $WBif_1 = 30$	
20:18:19	21.0			$B_3 + B_4 = 182$	
	22.0			$B_3 + B_4 = 268$ $g_1 = 52, g_2 = 34$	
	23.2			$B_3 + B_4 = 352$ $g_1 = 52, g_2 = 34$	

Na noite de 23-24 de outubro de 2000, verificamos significante ocorrência de estruturas finas nas bolhas de plasma presentes nas imagens da OI 777,4 nm. A análise quantitativa baseou-se na evolução temporal, entre as 19:40 e 20:28 LT (~ 50 minutos) e latitudinal das estruturas de plasma. Pode-se observar que surgiram quatro estruturas de escala espacial variando entre 70 e 150 km, que evoluem latitudinalmente com o decorrer do tempo. À medida que avançam latitudinalmente, pode-se observar a ocorrência de estruturas finas estriadas no interior das bolhas de

plasma. Embora em alguns casos as estruturas possam preservar sua extensão zonal à medida que evoluem temporal e latitudinalmente elas podem se misturar ou mesmo se subdividir formando novas estruturas. A largura zonal das estruturas finas observadas nesta noite oscilou entre 20 e 80 km.

5.2.1.3 – Evolução vertical da bolha de plasma no equador

Uma característica peculiar do conjunto de imagens coletado na noite de 23-24 de outubro de 2000 a observação da fase inicial da evolução da bolha de plasma às 19:26 LT e a sua evolução temporal até às 20:03 LT, mostrada na Figura 5.8.

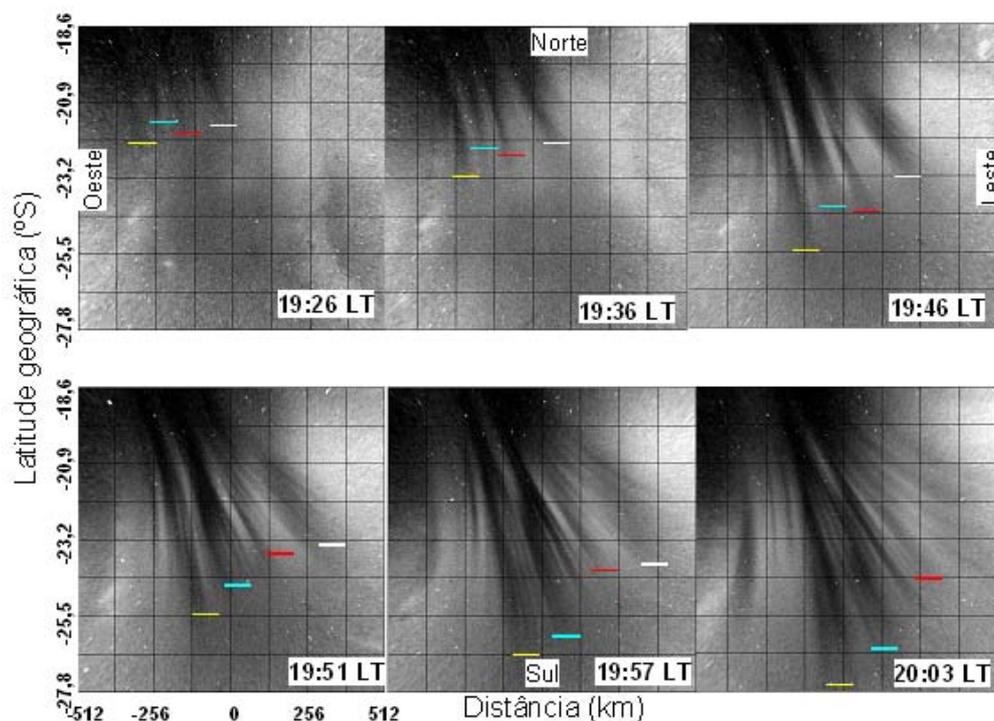


Figura 5.8: Evolução temporal das bolhas de plasma observadas na noite de 23-24 de outubro de 2000 em São José dos Campos, com o imageamento da emissão OI 777,4 nm.

A partir desta seqüência de imagens podemos extrair as latitudes geográficas das extremidades sul das bolhas (linhas horizontais coloridas) em cada imagem e determinar o seu deslocamento e velocidade de propagação através do método de mapeamento à altura Apex. A altura Apex é a altura cruzada por uma linha de campo no equador magnético numa determinada latitude, e o mapeamento à altura Apex consiste em determinar a altura vertical alcançada por uma bolha na região equatorial. O procedimento realizado com uma rotina IDL é descrito a seguir:

1) Seleciona-se a estrutura que se deseja analisar na imagem linearizada, e armazena-se as coordenadas geográficas da extremidade da estruturas (o que corresponde à sua altura máxima no equador). As coordenadas geográficas são convertidas em coordenadas geomagnéticas através do modelo IGRF encontrado no sítio da internet (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/gggm/index.html>). De posse das coordenadas magnéticas, determina-se a altura apex através da expressão:

$$h_{Apex} = \frac{R_T + h_{emissão}}{\text{sen}^2(\theta)} - R_T \quad (5.1)$$

onde: h_{Apex} é a altura atingida pela bolha no equador, R_T é o raio da Terra, h é a altura da emissão observada na imagem, θ é a colatitude magnética. Para maiores detalhes sobre os cálculos, consultar Tinsley et al. (1982).

2) A partir de seqüências temporais das imagens, pode-se extrair o deslocamento vertical em km, e através do intervalo de tempo em cada imagem, determinar-se a velocidade de subida vertical da bolha.

Na Tabela 5.4 são mostrados os parâmetros utilizados na determinação da altura Apex, da velocidade vertical da bolha e as velocidades médias de cada estrutura separadamente observadas nas imagens obtidas na noite de 23-24 de outubro de 2000. Determina-se também a velocidade média global das estruturas. O desvio padrão estimado para a velocidade de subida é em torno de 15%, e é devido a erro sistemático na determinação da latitude da extremidade da bolha.

As velocidades de deriva vertical da bolha encontrados nesta análise estão compatíveis com reportados em outros trabalhos (SHIOKAWA et al., 2004; FAGUNDES et al., 1998).

Tabela 5.4: Variação temporal da latitude da extremidade sul da bolha, altura apex no equador e velocidades médias de deriva vertical de cada bolha.

Hora Local (LT)	B1 Branco			B2 Verm.		
	Latitude		Apex (km)	Latitude		Apex (km)
	Geog.	Geom.		Geog.	Geom.	
19:26	21,6	12,4	721	21,8	12,6	675
19:36	22,3	13,0	707	22,2		707
19:46	23,2	14,0	754	24,3	15,0	845
19:51	23,8	14,6	815	24,3	15,0	845
19:57	23,8	14,6	815	24,3	15,0	845
20:03	-	-	-	-	-	-
Veloc. Média (m/s)	200			150		
Hora Local (LT)	B3 Azul			B4 Amar.		
	Latitude		Apex	Latitude		Apex
	Geog.	Geom.		Geog.	Geom.	
19:26	21,4	12,2	652	22,1	12,9	688
19:36	22,1	12,9	688	23,2	14,0	756
19:46	23,9	14,7	815	25,4	16,2	925
19:51	24,8	15,6	870	25,8	16,6	942
19:57	25,8	16,6	942	26,4	17,2	994
20:03	26,4	17,2	994	27,6	18,4	1086
Veloc. Média (m/s)	185			176		

5.2.2 - Noite de 31 de Outubro - 01 de Novembro de 2000

Na noite de 31 de outubro-01 de novembro de 2000 as observações ópticas das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm foram realizadas a partir das 21:15 LT, mas a presença de nebulosidade durante quase toda a noite só permitiu a análise de imagens entre as 22:00 e 22:40 LT. Neste intervalo foi possível observar a passagem de uma bolha de plasma com características semelhantes nas duas emissões, mostradas nas Figuras 5.9 e 5.10. As alturas de linearização empregadas foram 260 km para a emissão OI 630.0 nm e 330 km para a OI 777,4 nm. Note-se

que se utilizou uma máscara num dos imageadores para diminuir a influência das luzes da cidade (máscara no canto lateral direito leste na seqüência de imagens da OI 630,0 nm). Comparando-se as estruturas observadas com as duas emissões, nas duas seqüências de imagens verificamos que o padrão de estruturação é diferente das observadas nas imagens da noite de 23-24 de outubro de 2000, analisadas anteriormente. Nas bolhas presentes nas imagens da emissão OI 777,4 nm não se observa estruturas tão finas quanto no caso estudado anteriormente, mas de estruturas mais largas nas laterais leste e oeste da bolha principal, que podem ser identificadas com facilidade nas imagens das duas emissões. Assim, entendemos que estas estruturas devem ser classificadas como bifurcações e não como estrias. De modo a determinar as larguras zonais e o comportamento das estruturas, realizamos a varredura da intensidade em cortes selecionados como descrito anteriormente, os quais são mostrados nas Figuras 5.11 e 5.12.

As estruturas observadas foram denominadas bifurcações a leste (EBif1 e EBif2) e bifurcações a oeste (WBif1 e WBif2). As depleções atingem latitudes mais baixas que 25,5 S e não sofrem grandes alterações em suas larguras zonais. No entanto, pode-se verificar que entre 22:11 LT e 22:18 LT, a EBif2 se subdivide no que parece ser uma nova bifurcação entre as latitudes 22,1 e 23,2 S.

É preciso salientar que a bolha analisada entra no campo de visão do imageador completamente formada, de modo que não é possível inferir características como sua velocidade de deriva vertical. Apesar disto, no intervalo de observação é possível verificar modificações nas estruturas, como por exemplo, sua divisão em duas novas estruturas ou bifurcações. A morfologia das estruturas observadas na noite de 31 de outubro - 01 de novembro de 2000 parece apresentar um padrão distinto do padrão observado na noite de 23-24 de outubro de 2000, sendo que as estruturas observadas com a emissão OI 777,4 nm não apresentaram significativa presença de estruturas finas; embora se possa verificar maior padrão de nitidez com a referida emissão, as estruturas observadas com esta, são facilmente identificáveis nas imagens da emissão OI 630,0 nm. Este comportamento é indicativo da variabilidade dos fatores que influenciam na formação de estruturas finas e bifurcações.

31 DE OUTUBRO/ 01 DE NOVEMBRO DE 2000

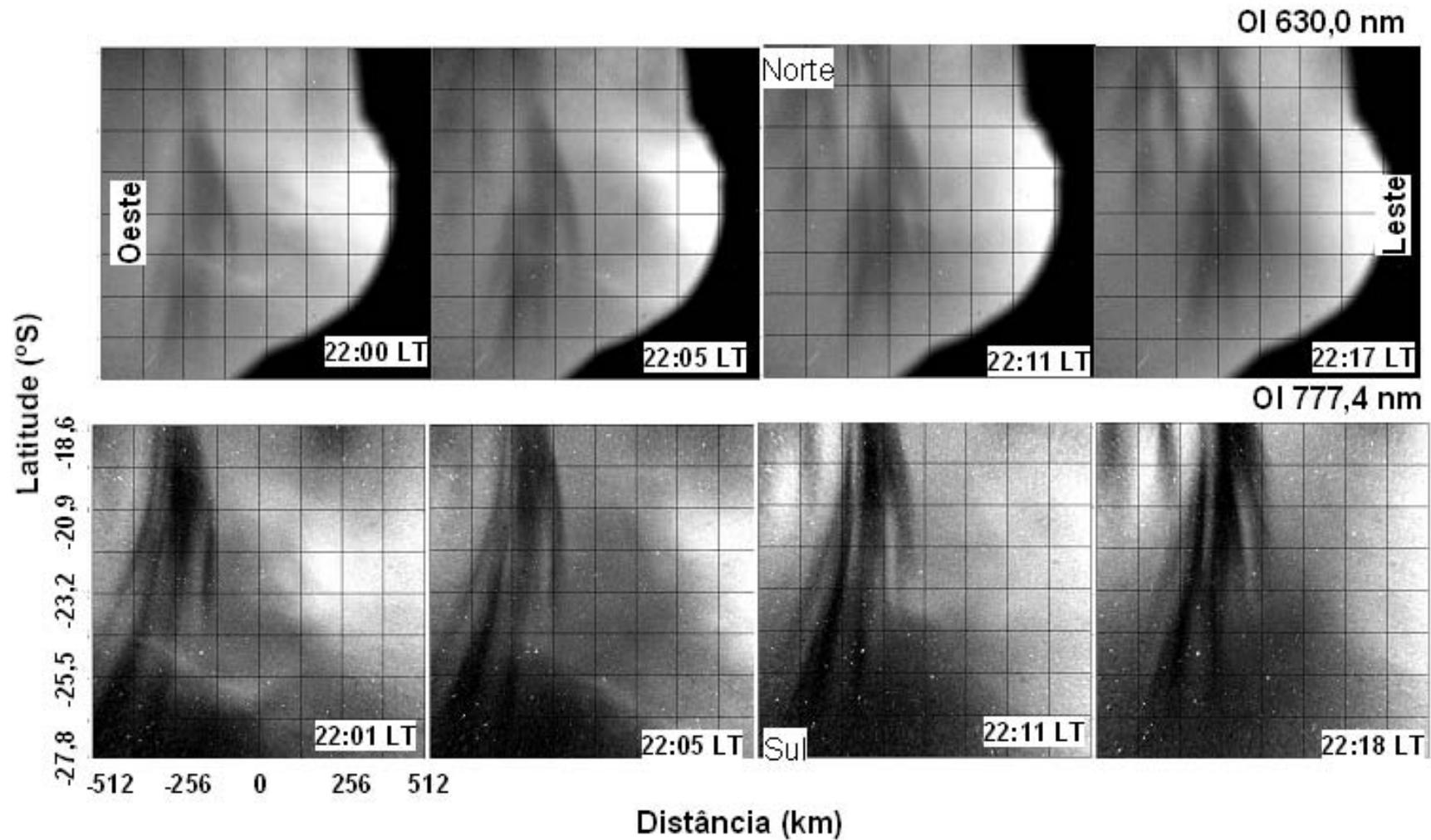
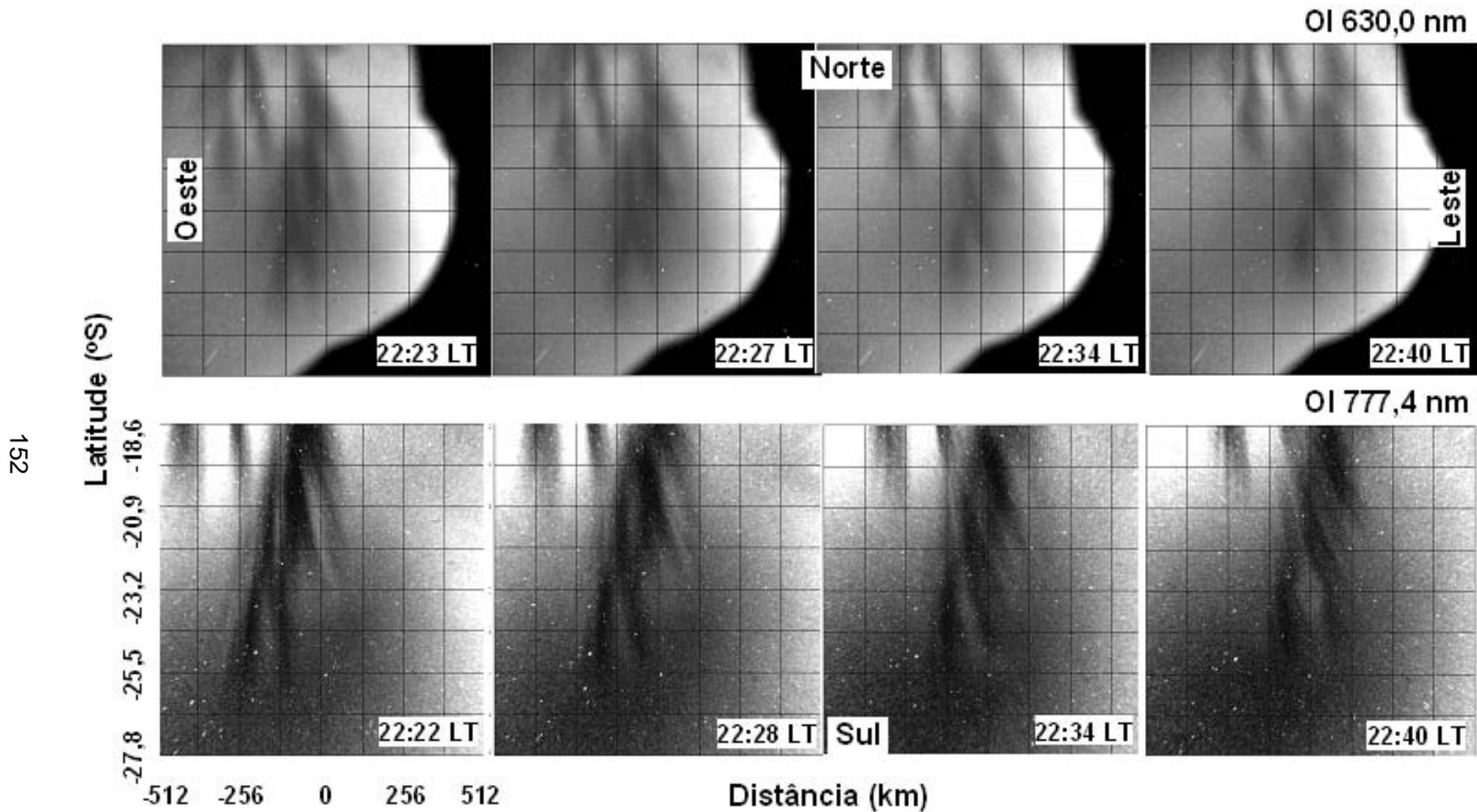


Figura 5.9: Seqüência temporal de imagens linearizadas das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm obtidas em São José dos Campos na noite 31 de outubro de 2000.

31 DE OUTUBRO/01 DE NOVEMBRO DE 2000



152

Figura 5.10: Seqüência temporal de imagens linearizadas das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm obtidas em São José dos Campos na noite 31 de outubro de 2000.

31 de outubro/ 01 de novembro de 2000

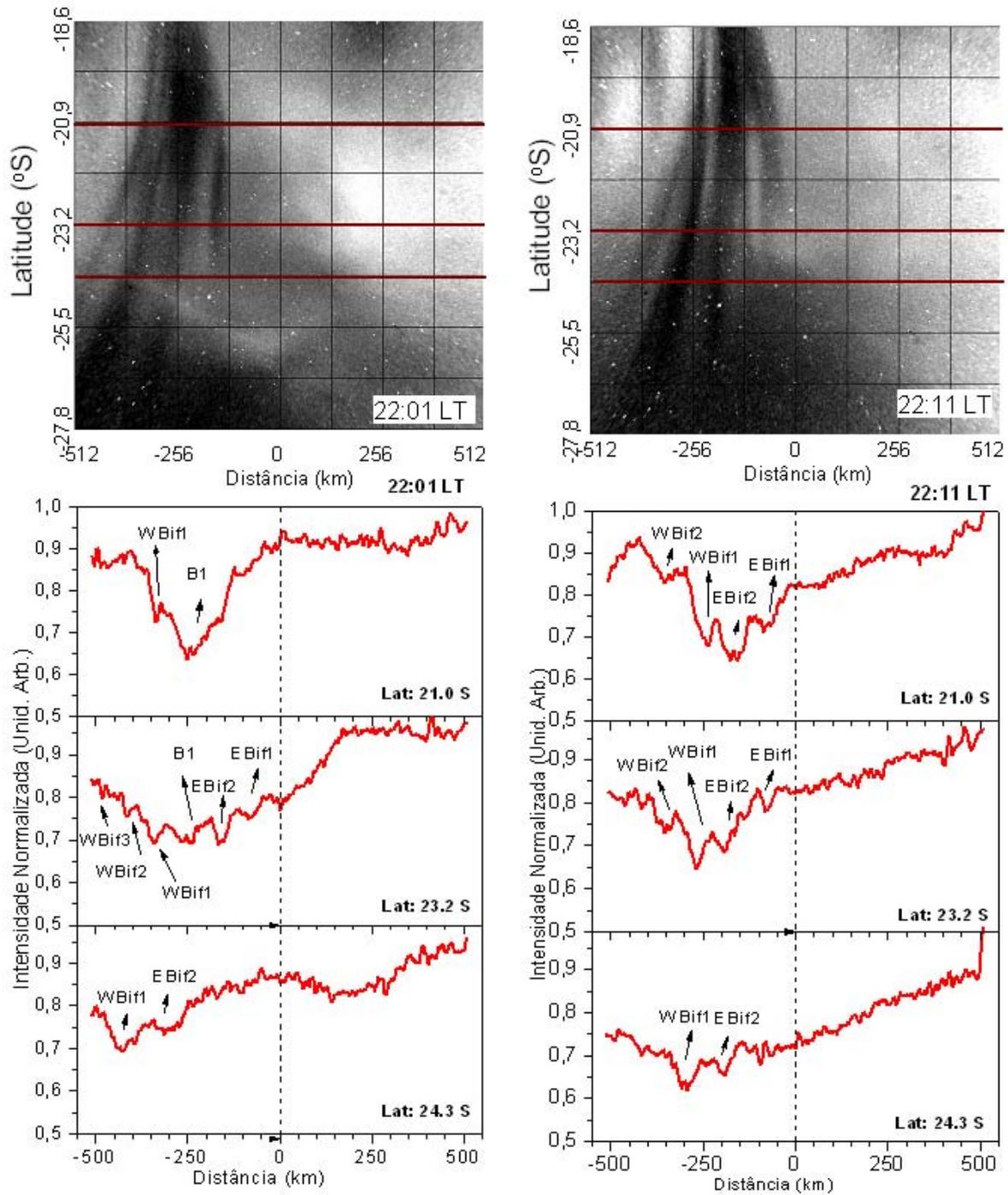


Figura 5.11: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas supondo-se a altura igual a 350 km, nos horários 19:55 LT (no topo à esquerda) e 20:05 LT (no topo à direita) e gráficos das intensidades (abaixo das respectivas imagens) ao longo de três cortes latitudinais. Noite de 31 de outubro/01 de novembro de 2000, São José dos Campos.

31 de outubro/ 01 de novembro de 2000

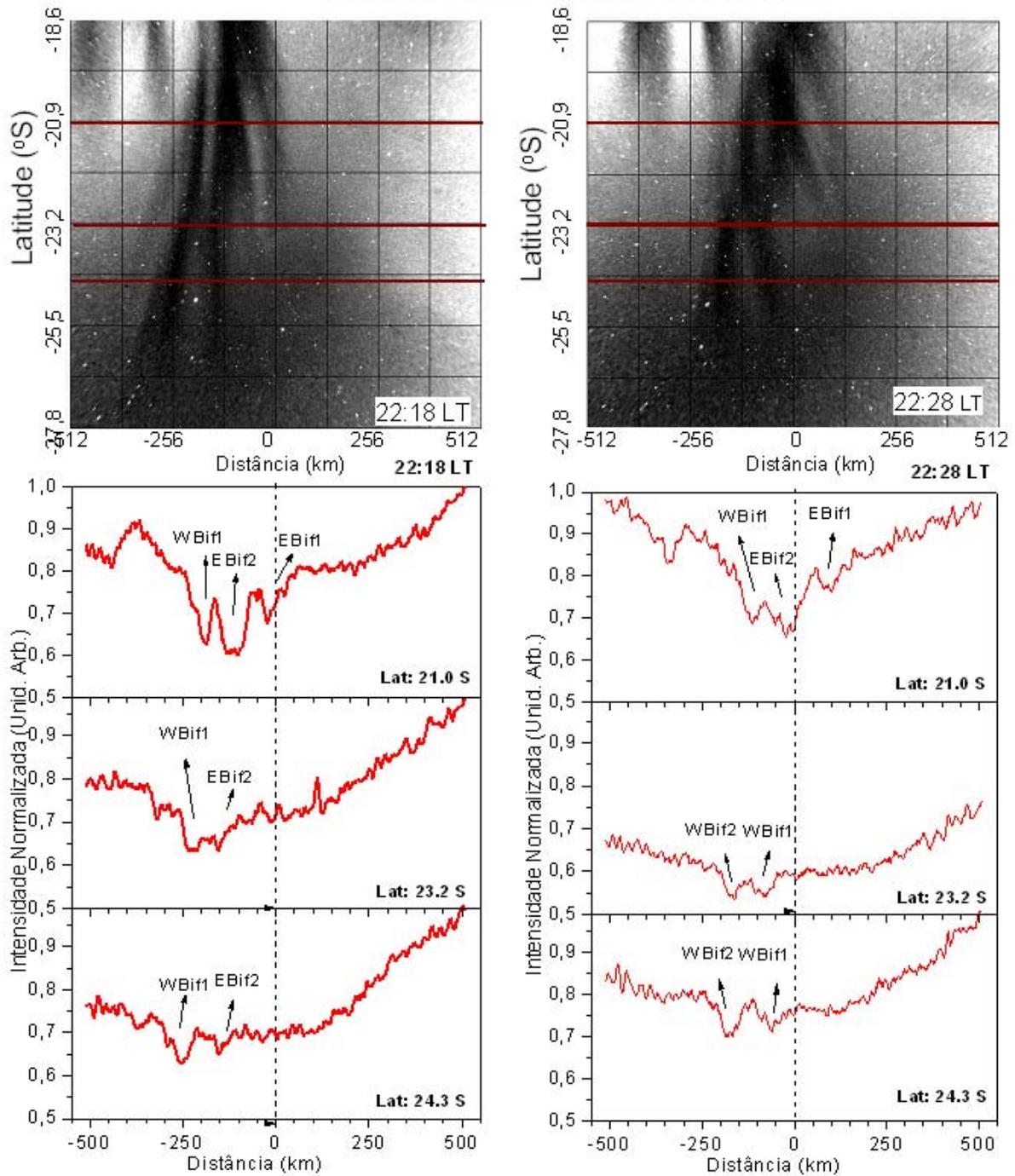


Figura 5.12: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas supondo-se a altura igual a 350 km, nos horários 19:55 LT (no topo à esquerda) e 20:05 LT (no topo à direita) e gráficos das intensidades (abaixo das respectivas imagens) ao longo de três cortes latitudinais. Noite de 31 de outubro/01 de novembro de 2000, São José dos Campos.

Tabela 5.5: Larguras zonais das estruturas observadas nas imagens da emissão OI 777.4 nm na noite de 31 de outubro/01 de novembro de 2000.

31 de outubro - 01 de novembro de 2000 OI 777,4 nm				
Hora Local	Latitude (Sul)	Largura zonal das estruturas (km)		
22:01	21.0	EBif1= 30	B1 =98	WBif1= 28
	23.2	EBif1= 30 EBif2= 40	B1= 50	WBif1= 52 WBif2= 40
	24.3	EBif1= 78		WBif1= 102
22:11	21.0	EBif1= 72 EBif2= 96		WBif1= 48 WBif2= 52
	23.2	EBif1= 50 EBif2= 110		WBif1= 64 WBif2= 62
	24.3	EBif2= 68		WBif1= 84
22:18	21.0	EBif1= 82 EBif2= 105		WBif2= 68
	23.2	EBif2= 64		WBif1= 68
	24.3	EBif2= 76		WBif1= 98
22:28	21.0	EBif1= 60 EBif2= 104		WBif1= 64
	23.2			WBif1= 80 WBif2= 78
	24.3			WBif1= 102 WBif2= 114

5.2.3 - Noite de 15-16 de Outubro de 2001

Na noite de 15-16 de outubro as observações ópticas foram realizadas com dois imageadores all-sky entre as 18:50 e as 01:20 LT. As condições iniciais de observação eram boas, mas a passagem de nuvens só possibilitou a aquisição de imagens a partir das 20:50 LT.

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam as seqüências das imagens das emissões OI 630,0 nm entre as 21:12 e 22:24 LT e da emissão OI 777,4 nm entre as 21:13 e 22:25 LT. Nestas imagens pode-se identificar a presença das mesmas depleções nas duas emissões, embora nas imagens da emissão OI 777,4 nm, seja possível observá-las em maiores detalhes.

15-16 de outubro de 2001

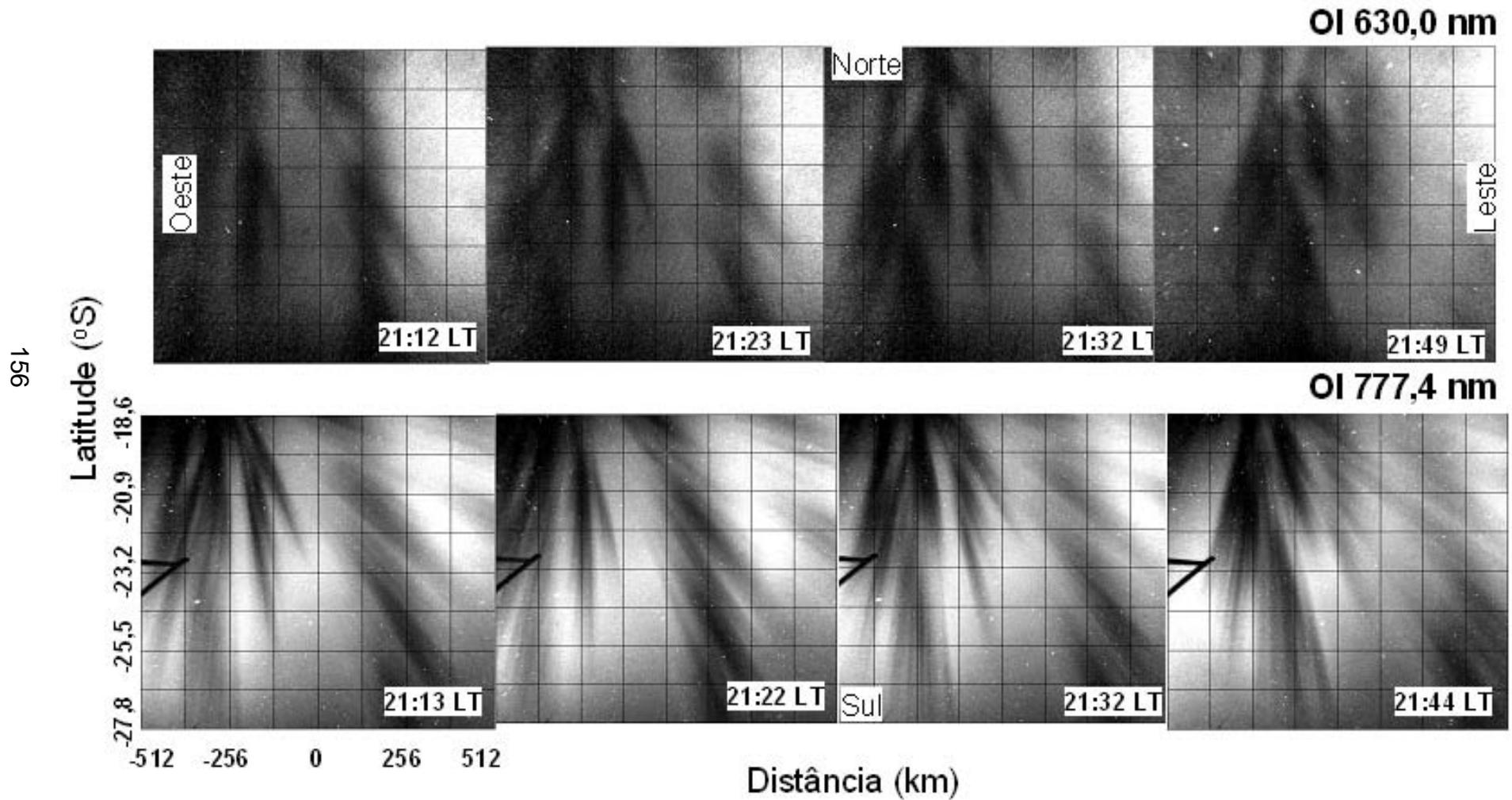


Figura 5.13: Seqüência temporal de imagens linearizadas das emissões OI 630,0 nm (painel superior) e OI 777,4 nm (painel inferior) obtidas em São José dos Campos na noite 15-16 de outubro de 2001.

15/16 DE OUTUBRO DE 2001

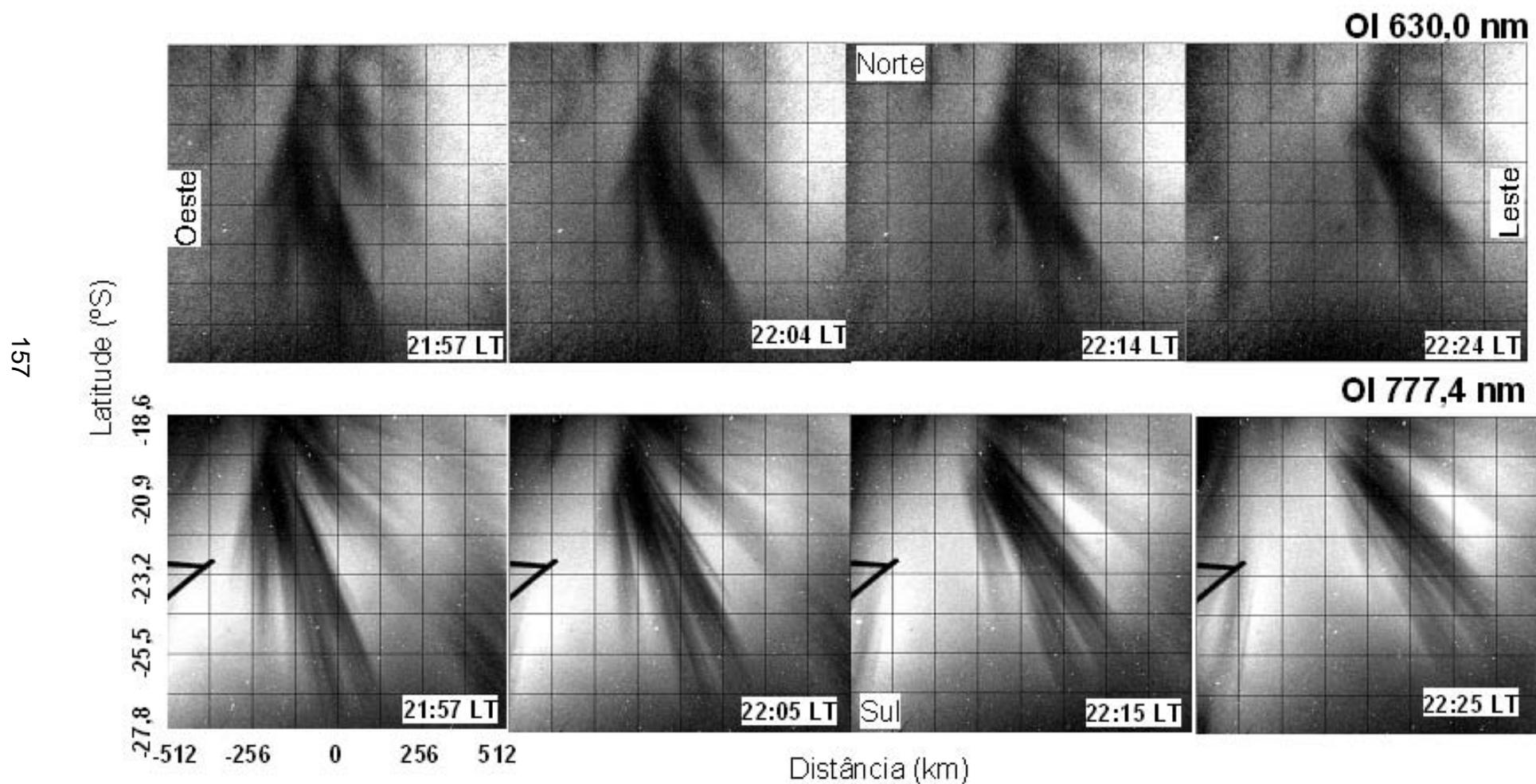


Figura 5.14: Seqüência temporal de imagens linearizadas das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm obtidas em São José dos Campos na noite de 15/16 de outubro de 2001.

Na Figura 5.15 são apresentadas imagens obtidas nos seguintes horários: 21:13 LT e 21:23 LT. Às 21:13 LT, estruturas de variada extensão latitudinal e zonal são observadas. A primeira estrutura, B1, situada entre as longitudes 47,0 S e 44,8 S e identificada no gráfico de intensidade e no corte 21,0 S, apresenta características interessantes, como grande extensão latitudinal (ultrapassa a borda da imagem em 27,6S) e zonal e parece estar se dissipando embora ainda apresente gradientes de intensidade na direção norte-sul. Há também a presença marcante da anomalia de Appleton, representada pelas áreas claras. A segunda estrutura de grande escala é identificada como B2 e tem sua borda leste situada em aproximadamente 48,0 S. Ao lado leste a estrutura anexa a B2 assemelha-se a uma bifurcação, de modo que foi classificada com Ebif1 e Ebif2. A extensão zonal de B2 ainda não é completamente visualizada na imagem, mas já é possível notar a ocorrência de estruturas mais finas, de pequena extensão zonal e grande extensão latitudinal, e que são identificadas nos gráficos como g1, g2 e g3. Vale notar que no corte 23,2 S, na borda oeste da imagem há uma estrutura denominada artefato e que não tem relação com a emissão. As 21:23 LT observa-se que: a B1 está mais difusa e os diferentes cortes revelam depleções de variada largura zonal, parecendo haver uma separação na direção norte-sul. A EBif2 revela a presença de estrias de larguras zonais aproximadas de 55 km. Outras estrias são presentes na B2 (parte oeste da bolha) e suas larguras estão apresentadas na Tabela 5.6.

A Figura 5.16 mostra a análise de duas imagens obtidas em 21:32 LT e 21:44 LT. Observa-se a grande extensão latitudinal alcançada pela bolha B2 (~ 27,6 S) e a presença de diversas estruturas finas. A bolha B1 praticamente se difundiu e estruturas esparsas são mostradas nos gráficos de intensidade. Nas imagens apresentadas na Figura 5.17 (21:57 e 22:05 LT) a bolha B2 ocupa o centro da imagem, atingiu latitudes aproximadas de 27,6 S e revela-se a presença de várias estrias finas entre suas paredes leste e oeste, que mantêm praticamente constante sua largura zonal em vasta extensão latitudinal. As bifurcações a leste (Ebif1 e Ebif2) e a oeste (WBif1) estão bem evidentes. Além disto, pode-se verificar às 22:05 LT a mistura das estrias g2 e g3 bem como o surgimento de g4 e g5 na latitude 23,2S. Finalmente, a Figura 5.18 mostra o início da dissipação da Ebif1 e WBif1. Estruturas finas ainda são detectáveis, mas com baixo nível de contraste entre áreas claras e escuras.

15/16 de outubro de 2001

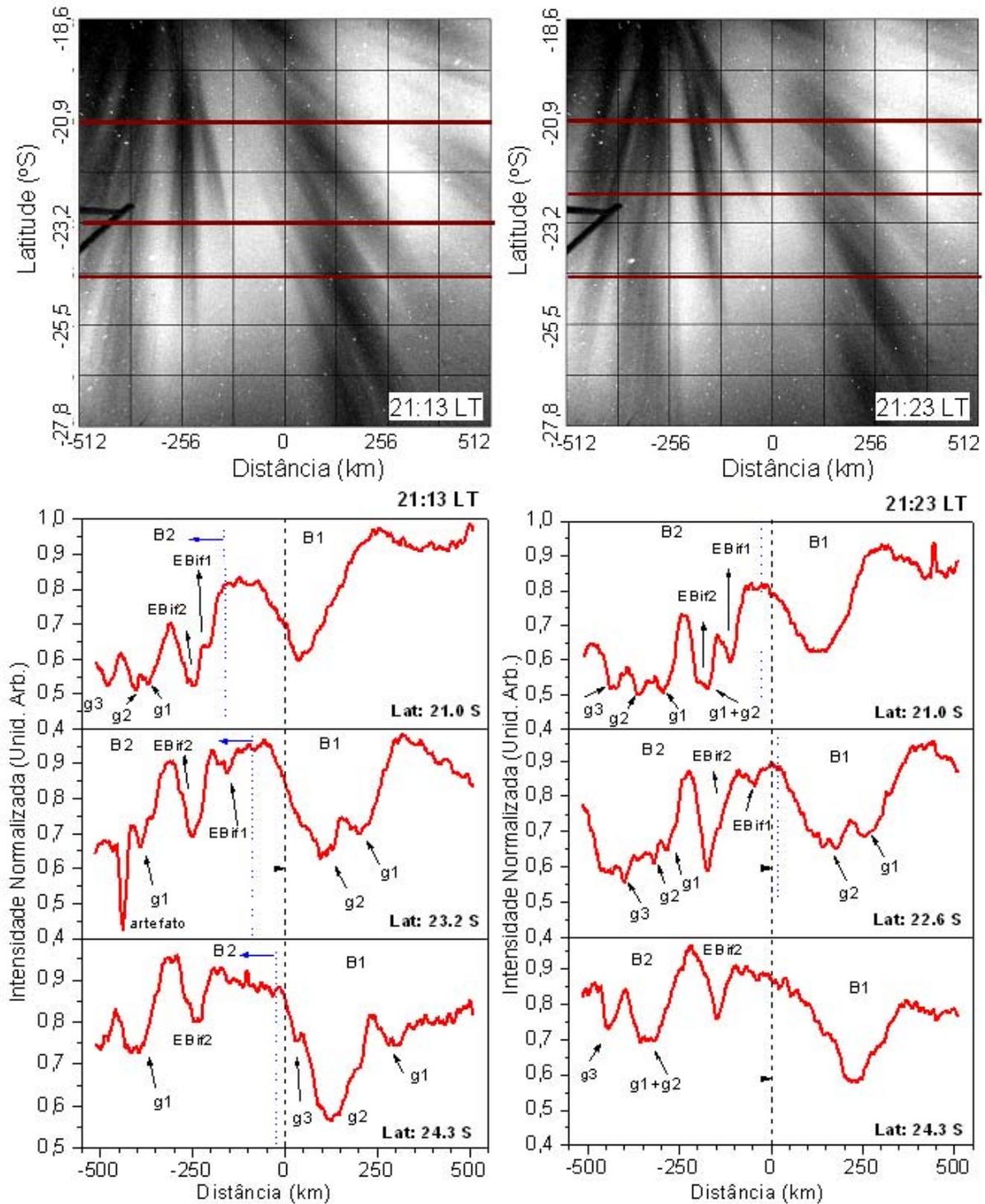


Figura 5.15: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas supondo-se a altura igual a 350 km, nos horários 21:13 LT (no topo à esquerda) e 21:23 LT (no topo à direita) e gráficos das intensidades (abaixo das respectivas imagens) ao longo de três cortes latitudinais. Noite de 15/16 de outubro de 2001, São José dos Campos.

15/16 de outubro de 2001

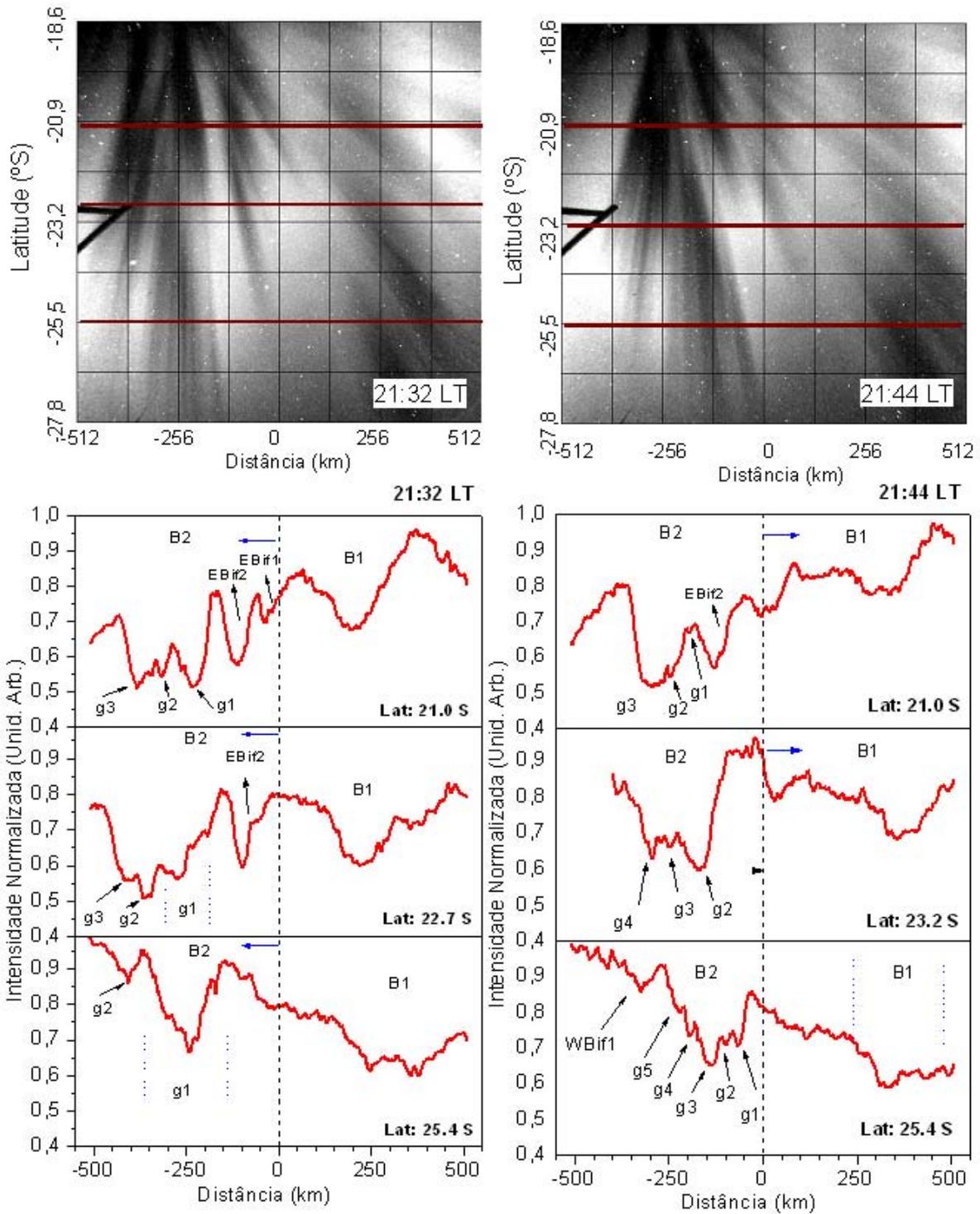


Figura 5.16: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas supondo-se a altura igual a 330 km, nos horários 21:13 LT (no topo à esquerda) e 21:23 LT (no topo à direita) e gráficos das intensidades (abaixo das respectivas imagens) ao longo de três cortes latitudinais. Noite de 15/16 de outubro de 2001, São José dos Campos.

15/16 de outubro de 2001

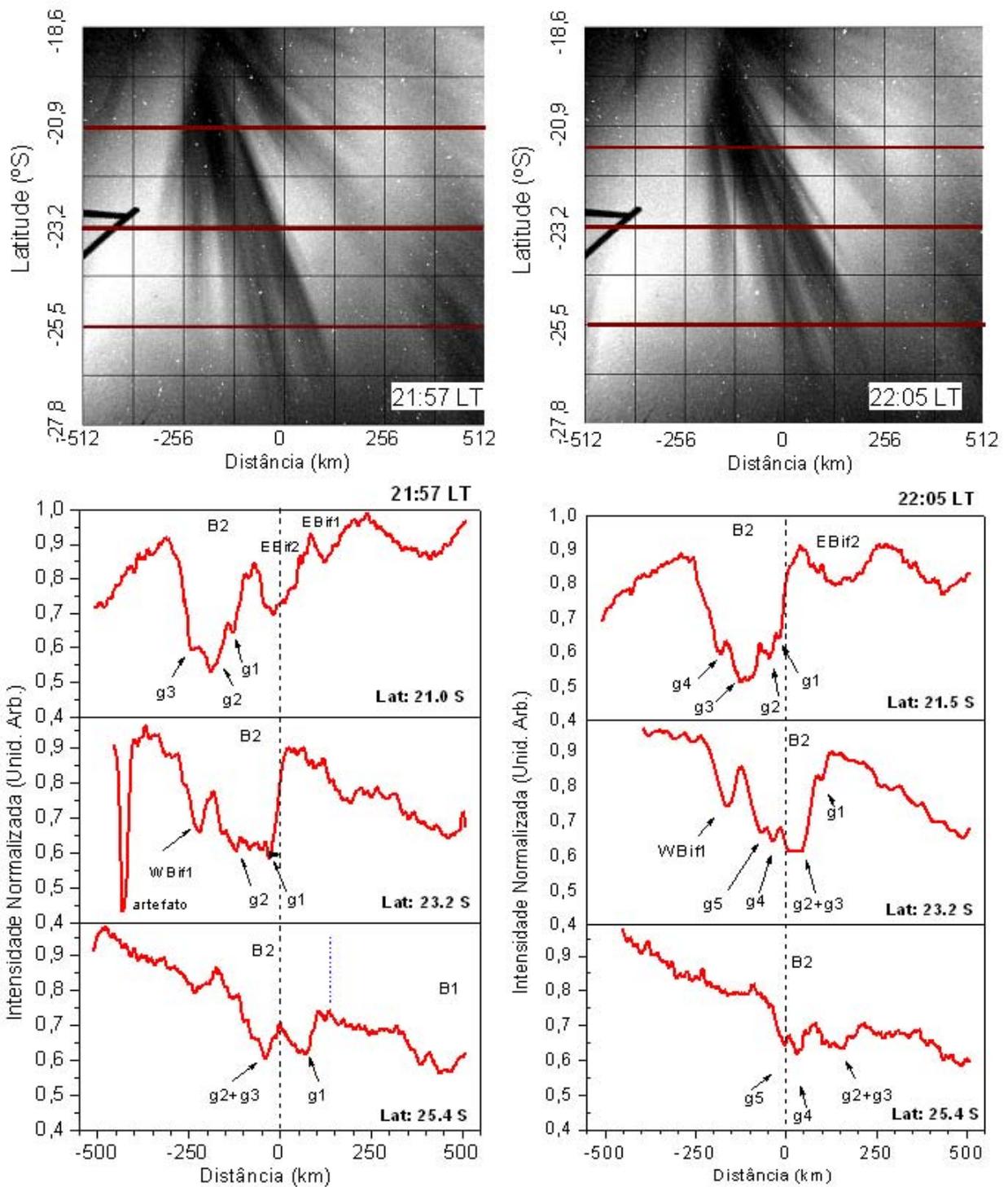


Figura 5.17: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas supondo-se a altura igual a 330 km, nos horários 21:13 LT (no topo à esquerda) e 21:23 LT (no topo à direita) e gráficos das intensidades (abaixo das respectivas imagens) ao longo de três cortes latitudinais. Noite de 15/16 de outubro de 2001, São José dos Campos.

15/16 de outubro de 2001

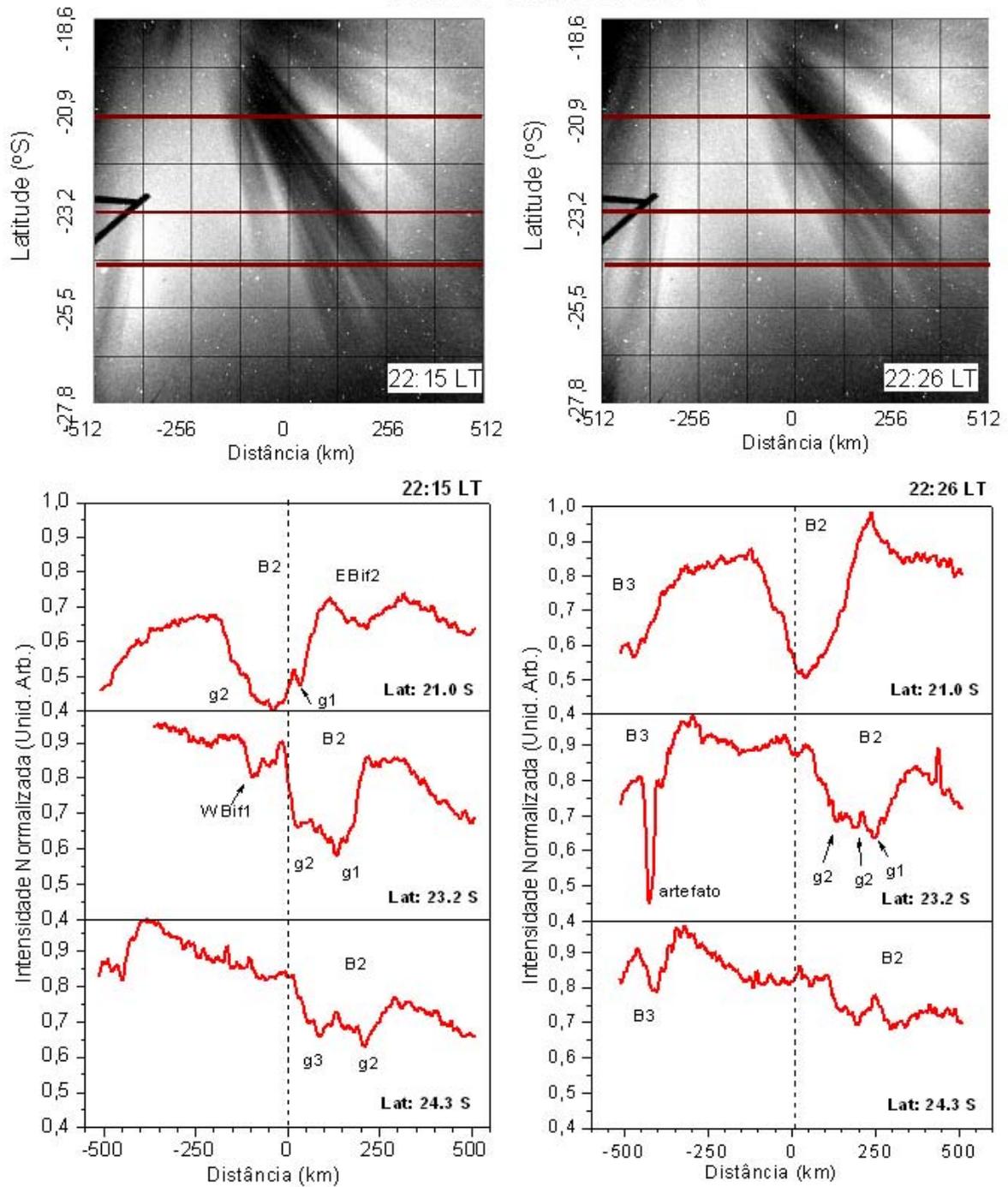


Figura 5.18: Imagens da emissão OI 777,4 nm linearizadas supondo-se a altura igual a 330 km, nos horários 21:13 LT (no topo à esquerda) e 21:23 LT (no topo à direita) e gráficos das intensidades (abaixo das respectivas imagens) ao longo de três cortes latitudinais. Noite de 15/16 de outubro de 2001, São José dos Campos.

Tabela 5.6: Estruturas observadas nas varreduras de intensidade da emissão OI 777,4 nm na noite de 15/16 de outubro de 2001.

15/16 de outubro de 2001 - OI 777.4 nm			
Hora Local (LT)	Latitude (Sul)	Largura zonal das estruturas (km)	
21:13	21.0	B1 > 250	B2 > 200 EBif1= 32, EBif2= 68; g1=50, g2= 50
	23.2	B1 > 350 g1= 130, g2= 130	B2 > 280 EBif1= 60, EBif2= 80, g1 = 47
	24.3	B1 > 350 g1= 150 , g2= 150	B2 > 200 EBif= 78 , g1 = 116
21:23	21.0	B1= 250	B2= EBif1= 54, EBif2= 58, g1+g2 (EBif2)= 58 g1= 76 , g2= 54 , g3= 54
	22.6	B1 > 320 g1= 140 , g2= 140	B2 > 250 EBif1= 56 , EBif2= 90 g1= 40 , g2= 30 , g3= 38, g4= 74
	24.3	B1 > 300	B2 > 250 EBif2= 74 g1+g2= 150 , g3= 68
21:32	21.0	B1 > 240	B2= 220 EBif1= 78 , EBif2= 82 g1= 84 , g2= 42 , g3= 78
	22.7	B1 > 240	B2= 300 EBif2= 96 (g1= 46, g2=50) g1= 76 , g2= 46 , g3= 56
	25.4	B1= 300	B2= 200 g1= 18 , g2= 18, g3= 17 , g4= 22, g5= 24
21:44	21.0	B1 > 350	B2= 200 EBif2= 88 g1= 12 , g2= 17 , g3= 168
	23.2	B1 > 400	B2= 300 g1= 68 g2= 88 , g3= 40 , g4= 42
	25.4	B1 > 400	B2= 210 g1= 38 g2= 28, g3= 42 , g4= 26 , g5= 28 WBif1= 82
21:57	21.0	B1= fora	B2= 212 EBif1= 126, EBif2= 130 g1= 18 , g2= 28 , g3= 90
	23.2	B1= fora	B2= 220 g1= 18 , g2= 21 WBif1= 120
	25.4	B1= fora	B2= 250 g1= 20 , g2+g3= 30
22:05	21.5	B1= fora	B2= 250 EBif= 200 g1= 18 g2= 26, g3= 89 WBif1= 32
	23.2		B2= g1= 18 g2+g3= 84 , g4= 30 g5= 32 WBif1= 56
	25.4		B2= 218 EBif3 (g2+g3)= 96 , EBif4(g4+ g5)= 94
22:15	21.0		B2= 350 g1= 28, Ebif2= 128
	23.2		B2= 220 g1= 56 g2= 40, WBif1= 82
	24.3		B2= 276 g2= 138 g3= 114
22:26	21.0		B2= 250 B3= começando a entrar a oeste
	23.2		B2= 250 B3= começando a entrar a oeste
	24.3		B2 > 250 Ebif3= 154, EBif4= 126 B3= começando a entrar a oeste

5.2.4 – Discussão sobre a Extensão Zonal e Latitudinal das Estruturas Observadas

Na seção 5.2.3 foram determinadas as extensões zonais das estruturas principais e secundárias das bolhas estudadas. Verificou-se que a extensão zonal média das estruturas variou entre 12 a 150 km apresentando grande extensão latitudinal, sendo quase alinhadas às linhas do campo geomagnético. A extensão zonal destas estruturas de algumas dezenas de quilômetros apresenta valores considerados típicos, segundo Rorhbaug et al., 1989, Tinsley et al., 1997 e Fejer, 2007 (comunicação privativa). Os resultados estão sumarizados nas Tabelas 5.3, 5.4 e 5.6. Nesta seção é mostrado um estudo estatístico dessas extensões para as bolhas, bifurcações e estrias nas noites em que houve um número de ocorrências igual ou maior do que 7 em cada corte latitudinal analisado. As larguras zonais observadas foram classificadas de 10 em 10 km, de forma que cada barra nos gráficos representa o número de estruturas com largura entre ± 5 km em torno do valor central indicado. Apesar do número reduzido de bolhas e bifurcações algumas características podem ser observadas.

Bolhas

A Figura 5.19a mostra o número de ocorrências de bolhas em função da largura zonal das mesmas para a noite de 23-24 de outubro de 2000 – considerando todas as observações realizadas às 19:41, 19:52, 19:56, 20:05, 20:12 e 20:18 – e para a noite de 15-16 de outubro de 2001 – com os dados das 21:13, 21:23, 21:32, 21:44, 21:57, 22:05, 22:15 e 22:26. O valor médio de ocorrência para cada latitude selecionada é indicado em cada gráfico pela linha pontilhada.

As extensões observadas variam entre 40 km e 350 km para a noite de 23-24 de outubro de 2000 e entre 200 km e 380 km para a noite de 15-16 de outubro de 2001. Isso evidencia a principal diferença entre essas duas noites, já que a primeira apresenta larguras médias em torno de 52% menores do que as da segunda noite, considerando-se as latitudes comuns (21° S e 23° S). Os valores médios das larguras aumentam com a latitude para a noite de 23-24 de outubro de 2000, no

entanto, isso ocorre principalmente devido ao surgimento de alguns casos com grandes larguras zonais e não por um aumento generalizado de largura de todas as bolhas observadas com a latitude. A mesma tendência não pode ser observada para a noite de 15-16 de outubro de 2001 que oscila com valores médios latitudinais em torno de 270 km. Nessa noite parece que ocorre uma tendência de aumento da distribuição das larguras com a latitude no intervalo observado. No entanto, é importante ressaltar que a quantidade de casos é um fator limitante para qualquer análise mais detalhada em ambas as noites.

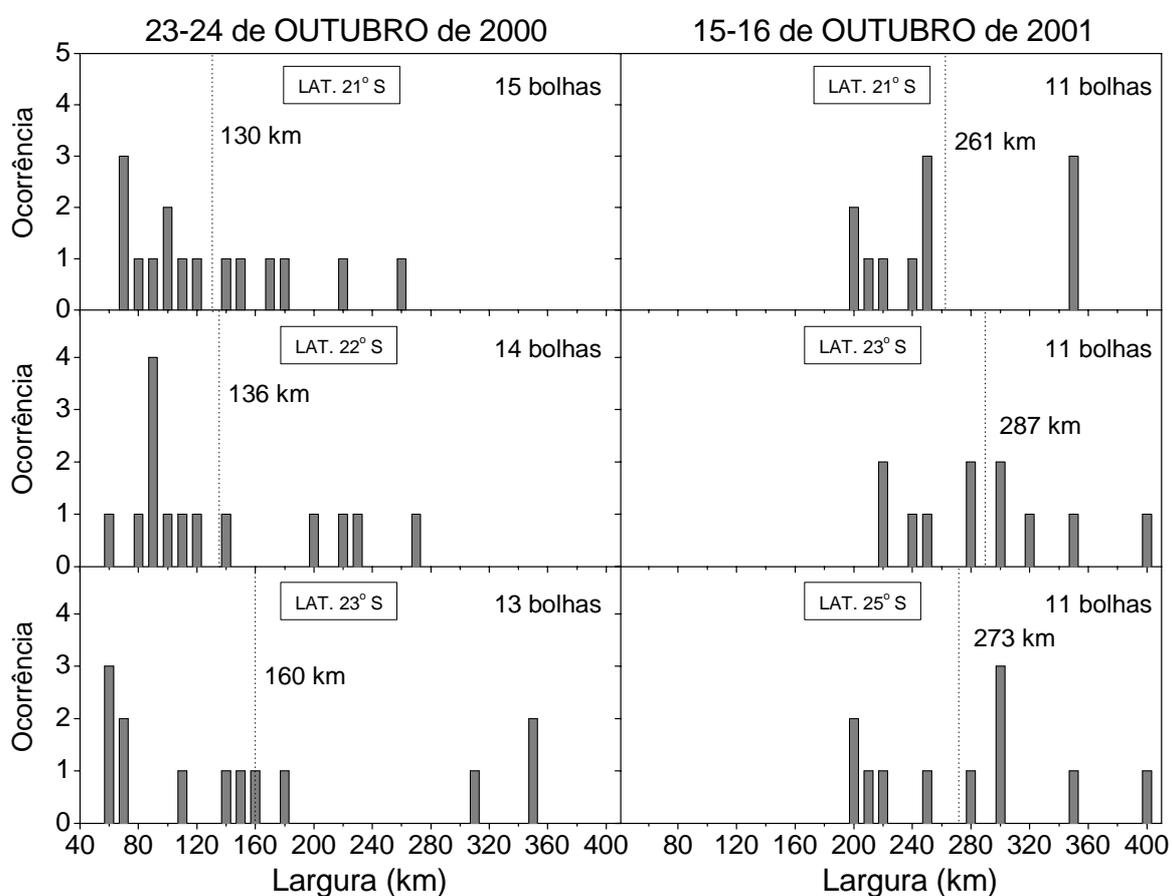


Figura 5.19a: Número de ocorrências de bolhas em função da sua largura para as noites de 23-24 de outubro de 2000 (das 19:41 às 20:18) e 15-16 de outubro de 2001 (das 21:13 às 22:26). Foram considerados todos os casos de bolhas (o número total é mostrado na figura) registrados nas tabelas 5.3 e 5.6, separados pelas latitudes observadas. Cada barra representa o número de bolhas com largura entre ± 5 km em torno do valor central indicado. O valor médio da largura é indicado por uma linha pontilhada.

A Figura 5.19b mostra a soma de todas as larguras observadas nas três latitudes mostradas na Figura 5.18a para a noite de 23-24 de outubro de 2000, totalizando 42 medições. Essa análise serve como uma amostragem geral das larguras típicas encontradas nessas depleções mesmo que se considere mais de uma vez a mesma bolha em trechos diferentes. Além da largura média geral (140 km) também é indicada a mediana (112 km). O fato da mediana estar 20% abaixo da média mostra a alta concentração de casos de larguras zonais menores (i.e. 50% de casos apresentam larguras abaixo de 112 km).

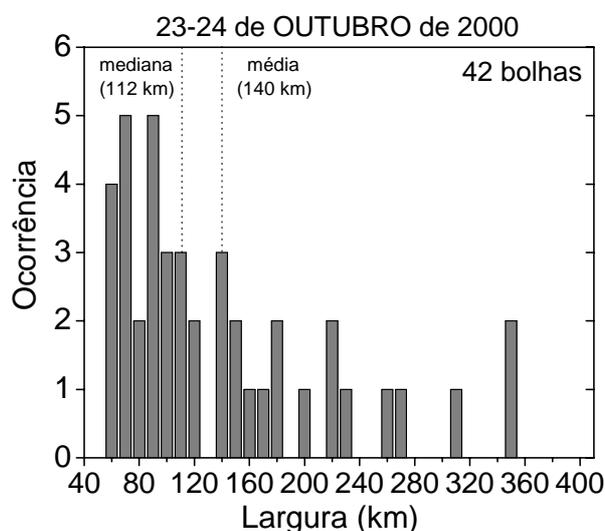


Figura 5.19b: Número de ocorrências de bolhas em função da sua largura para a noite de 23-24 de outubro de 2000 (das 19:41 às 20:18) considerando-se a soma das observações nas três latitudes selecionadas. Cada barra representa o número de bolhas com largura entre ± 5 km em torno do valor central indicado. O valor médio da largura e a mediana são indicados por linhas pontilhadas.

A soma de todos os casos de bolhas das três latitudes na noite de 15-16 de outubro de 2001 (separados por latitude na Figura 5.19a) pode ser observada na Figura 5.19c. Os 33 casos apresentam um valor médio para a largura que é próxima do dobro do observado na outra noite. A posição da mediana (255 km) neste caso também indica que a metade das bolhas que está com largura menor está mais muito mais concentrada em determinados valores do que as da outra metade.

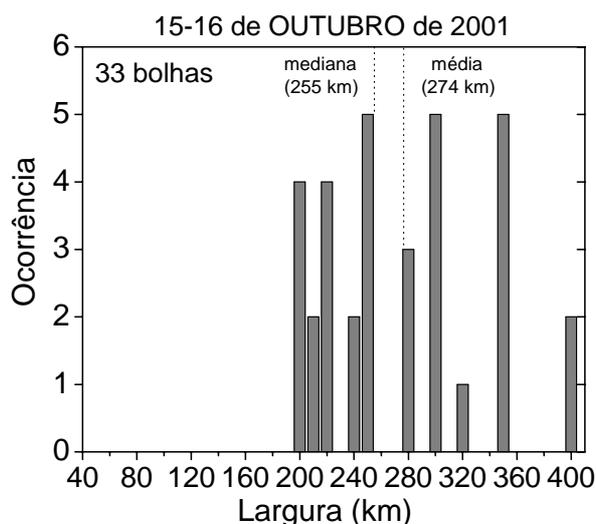


Figura 5.19c: Número de ocorrências de bolhas em função da sua largura para a noite de 15-16 de outubro de 2001 (das 21:13 às 22:26) considerando-se a soma das observações nas três latitudes selecionadas. Cada barra representa o número de bolhas com largura entre ± 5 km em torno do valor central indicado. O valor médio da largura e a mediana são indicados por linhas pontilhadas.

Bifurcações

A análise da ocorrência das bifurcações em função das suas respectivas larguras para as noites de 31 de outubro - 01 de novembro de 2000 e 15-16 de outubro de 2001 pode ser vista na Figura 5.20a. Os horários das observações da primeira noite foram: 22:01, 22:11, 22:18 e 22:28 LT e os da segunda noite foram os mesmos utilizados no estudo das bolhas entre as 21:13 e as 22:26 LT. As larguras das bifurcações estão distribuídas em uma faixa de valores menores na noite do dia 31 de outubro - 01 de novembro de 2000. Observando o comportamento das larguras em cada latitude pode-se verificar que o valor médio menor ocorre em 23° S e o maior acima de 24° S para ambas as noites. Apesar de não se observar nenhuma tendência de deslocamento dos valores das larguras zonais com o aumento da latitude, parece que as larguras das bifurcações tendem a ser mais concentradas em determinadas extensões para latitudes mais baixas, o que não se observou com os dados das bolhas.

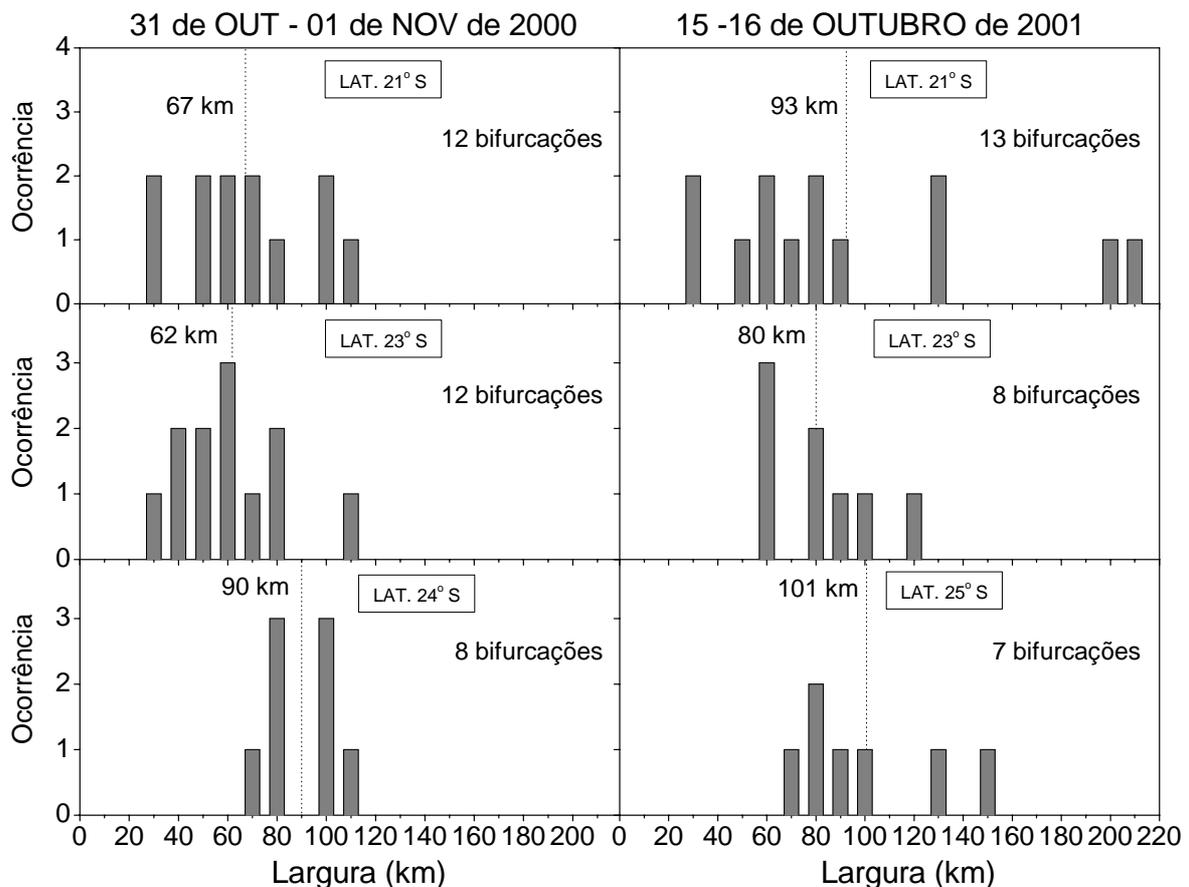


Figura 5.20a: Número de ocorrências de bifurcações em função da sua largura para as noites de 31 de outubro - 01 de novembro de 2000 (das 22:01 às 22:18) e 15-16 de outubro de 2001 (das 21:13 às 22:26). Foram considerados todos os casos de bolhas (o número total é mostrado na figura) registrados nas tabelas 5.5 e 5.6, separados pelas latitudes observadas. Cada barra representa o número de bolhas com largura entre ± 5 km em torno do valor central indicado. O valor médio da largura é indicado por uma linha pontilhada.

As Figuras 5.20b e 5.20c mostram a soma de todas as larguras observadas na totalidade das bifurcações presentes nas três latitudes mostradas separadamente na Figura 5.20a para as noites de 31 de outubro - 01 de novembro de 2000 e 15-16 de outubro de 2001, respectivamente. Em ambos os casos o valor médio e a mediana foram muito próximos. Para a primeira noite os valores foram praticamente os mesmos: 70 km para a mediana e 71 km para a média. Na segunda noite analisada os resultados foram maiores com uma mediana igual a 82 km e uma média total em 92 km. É importante notar a maior concentração dos resultados para a noite de 31

de outubro - 01 de novembro de 2000, onde todas as bifurcações tiveram larguras entre 30 km e 110 km. Já para a noite de 15-16 de outubro de 2001 a distribuição de larguras ficou entre 30 km e 210 km.

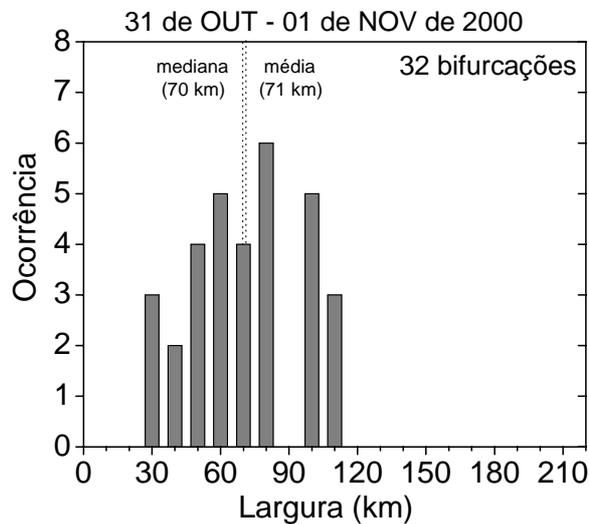


Figura 5.20b: Número de ocorrências de bifurcações em função da sua largura para a noite de 31 de outubro - 01 de novembro de 2000 (das 22:01 às 22:18) considerando-se a soma das observações nas três latitudes selecionadas. Cada barra representa o número de bolhas com largura entre ± 5 km em torno do valor central indicado. O valor médio da largura e a mediana são indicados por linhas pontilhadas.

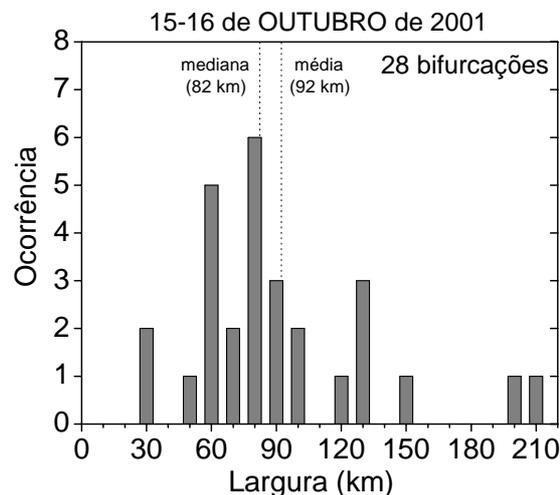


Figura 5.20c: Número de ocorrências de bifurcações em função da sua largura para a noite de 15-16 de outubro de 2001 (das 21:13 às 22:26) considerando-se a soma das observações nas três latitudes selecionadas. Cada barra representa o número de bolhas com largura entre ± 5 km em torno do valor central indicado. O valor médio da largura e a mediana são indicados por linhas pontilhadas.

Estrias

As estrias são analisadas na Figura 5.21a que mostra o número de ocorrências em função da largura zonal das mesmas para as noites de 23-24 de outubro de 2000 e 15-16 de outubro de 2001, considerando a totalidade de observação nos mesmos horários utilizados para o estudo das bolhas. Ao contrário do observado para as bolhas na Figura 5.19a, são os valores médios da noite de 23-24 de outubro de 2000 que não apresentam nenhuma tendência clara com a latitude, enquanto que na noite de 15-16 de outubro de 2001 existe um deslocamento do valor médio para larguras mais altas com o aumento da latitude. Além disso, a noite de 15-16 de outubro de 2001 mostra um aumento da faixa de larguras observadas com a latitude o que não é observado na outra noite.

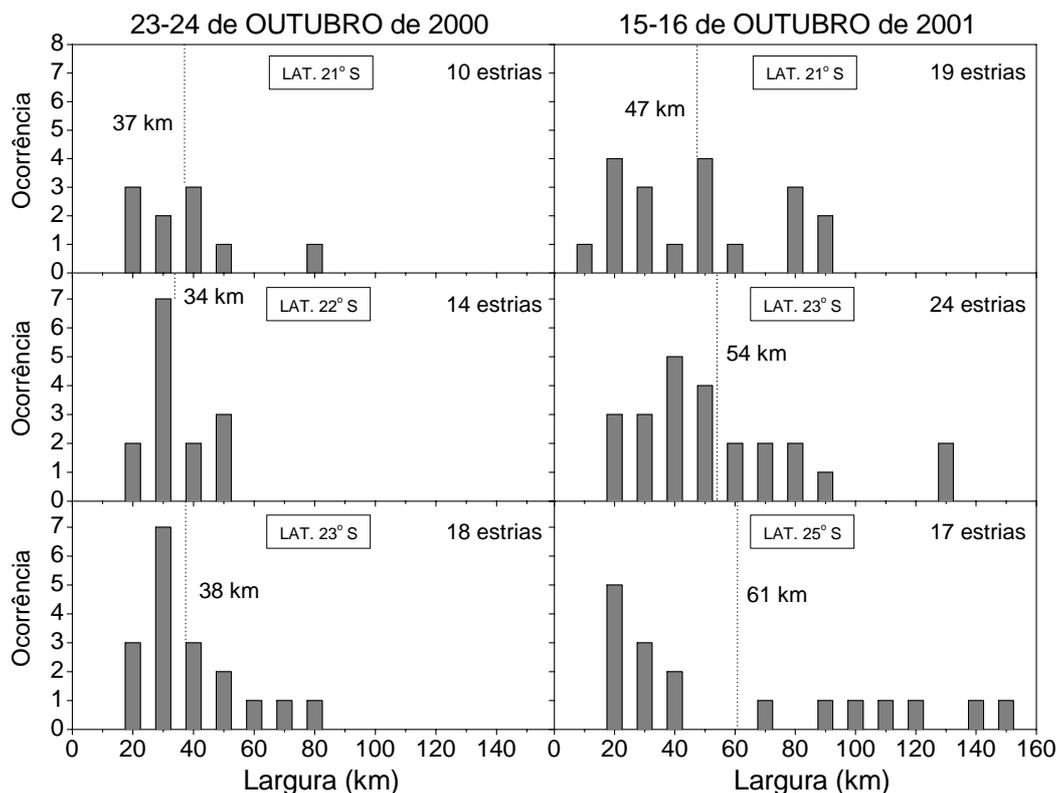


Figura 5.21a: Número de ocorrências de estrias em função da sua largura para as noites de 23-24 de outubro de 2000 (das 19:41 às 20:18) e 15-16 de outubro de 2001 (das 21:13 às 22:26). Foram considerados todos os casos de bolhas (o número total é mostrado na figura) registrados nas tabelas 5.3 e 5.6, separados pelas latitudes observadas. Cada barra representa o número de bolhas com largura entre ± 5 km em torno do valor central indicado. O valor médio da largura é indicado por uma linha pontilhada.

Comparando-se as Figuras 5.19a e 5.21a percebe-se que é justamente a tendência de aparecerem larguras maiores (e uma conseqüente faixa maior de distribuição de extensões latitudinais) que produz um aumento do valor médio com a latitude, seja nas bolhas ou nas estrias. No entanto, esse efeito ocorre de maneira oposta para as bolhas (23-24 de outubro de 2000) e para as estrias (15-16 de outubro de 2001).

A soma de todos os casos de estrias observados nas três latitudes (mostradas separadamente na Figura 5.21a) pode ser vista para a noite 23-24 de outubro de 2000 na Figura 5.21b e para a noite 15-16 de outubro de 2001 na Figura 5.21c. Para as duas noites a mediana está um pouco abaixo do valor médio, sendo os valores iguais a 33 km e 37 km para a noite de 23-24 de outubro de 2000 e 45 km e 55 km para a noite 15-16 de outubro de 2001, respectivamente. Portanto a noite de 15-16 de outubro de 2001 apresenta larguras de estrias com valores 50% maiores em média que as da noite de 23-24 de outubro. Ela também apresenta uma faixa de larguras entre 10 km e 150 km, enquanto na noite de 23-24 de outubro de 2000 a distribuição das larguras é mais estreita, estando entre 20 km e 80 km.

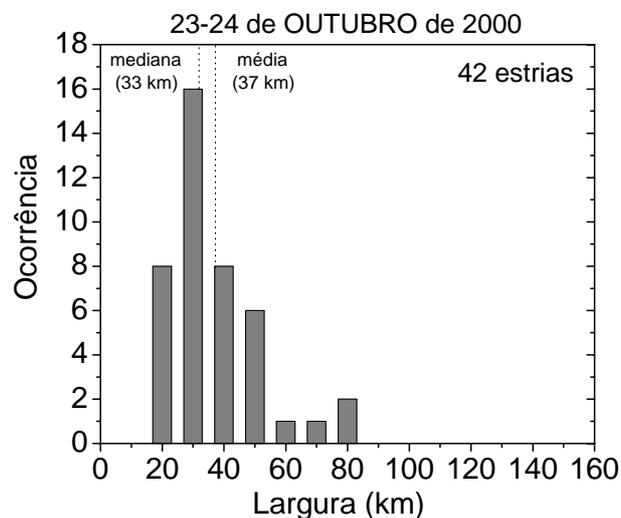


Figura 5.21b: Número de ocorrências de estrias em função da sua largura para a noite de 23-24 de outubro de 2000 (das 19:41 às 20:18) considerando-se a soma das observações nas três latitudes selecionadas. Cada barra representa o número de bolhas com largura entre ± 5 km em torno do valor central indicado. O valor médio da largura e a mediana são indicados por linhas pontilhadas.

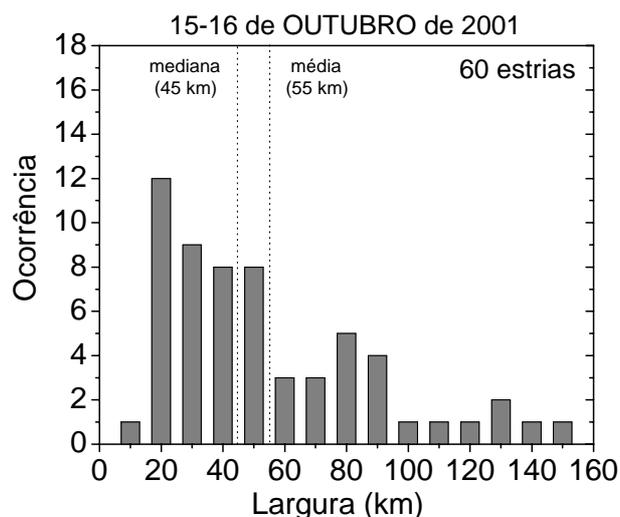


Figura 5.21c: Número de ocorrências de estrias em função da sua largura para a noite de 15-16 de outubro de 2001 (das 21:13 às 22:26) considerando-se a soma das observações nas três latitudes selecionadas. Cada barra representa o número de bolhas com largura entre ± 5 km em torno do valor central indicado. O valor médio da largura e a mediana são indicados por linhas pontilhadas.

Sumarizando os resultados obtidos com a estatística da largura zonal das estruturas:

1. Há uma tendência de alargamento das bolhas com a latitude tanto na noite de 23-24 de outubro como na noite de 15-16 de outubro de 2001; no entanto, no primeiro caso há maior distribuição de larguras menores (média= 140 km). No segundo caso, há maior distribuição de larguras maiores (média de 274 km).
2. O estudo das bifurcações mostrou uma tendência de larguras médias menores em latitudes mais baixas e larguras maiores em latitudes mais altas. Os valores médios para a noite de 31 de outubro – 01 de novembro de 2000 foram de 71 km e para a noite de 15-16 de outubro de 2001, a média é de 92 km.
3. A análise estatística das estrias mostrou que na noite de 23-24 de outubro de 2000 as larguras não apresentam nenhuma tendência com a latitude e os valores apresentam maior distribuição para larguras menores. Na noite de 15-16 de outubro de 2001, a largura das estrias mostrou uma tendência de serem mais largas com a

latitude, assim como no caso das bolhas, com valores médios de 55 km, distribuídos uniformemente entre 10 e 150.

A grande extensão latitudinal alcançada indica que as bolhas atingiram alturas superiores a 1200 km no equador, mapeando-se pelas linhas de campo geomagnético a regiões de baixas latitudes (MENDILLO E BAUNGARDNER, 1982, MENDILLO et al., 2005). Este fato é compatível com a alta condutividade paralela das linhas de campo geomagnético e com o mapeamento do campo elétrico vertical ao longo das linhas de campo, o qual acreditamos ser o responsável pela morfologia apresentada.

5.3 - DENSIDADE ELETRÔNICA NAS REGIOES INTERNA E EXTERNA DA BOLHA DE PLASMA - NÍVEL DE DEPLEÇÃO

O imageamento óptico das emissões do oxigênio atômico OI 630,0 nm e 777,4 nm pode ser aplicado na determinação de parâmetros ionosféricos como densidade eletrônica máxima altura da camada F (Sahai et al.1981, Tinsley et al., 1982, 1997). O processo baseia-se na determinação da curva de calibração que relaciona a raiz quadrada da intensidade da emissão OI 777,4 nm e a densidade eletrônica determinada a partir dos valores da frequência máxima da camada F₂, f_oF₂, obtidos em horários simultâneos. A intensidade da emissão OI 777,4 nm é proporcional ao quadrado da densidade eletrônica, conforme descrito no capítulo 3, e é resultante principalmente de processos de recombinação radiativa, com alguma contribuição da recombinação íon-íon. A taxa de emissão da OI 777,4 nm integrada na coluna, considerando-se a contribuição das duas recombinações é:

$$J_{777.4} = n_m^2(e) \int \alpha_{777.4} s^2(z) dz + n_m^2(e) \int \frac{\beta_{777.4} \cdot k_1 \cdot k_2 n(O) s^2(z)}{k_2 n_m(e) s(z) + k_3 n(O)} dz \quad (5.2)$$

onde:

$\alpha_{777.4}$ é a taxa parcial da reação de recombinação radiativa = $5,8 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-3}$;

$\beta_{777,4}$ é fração da recombinação íon-íon total = 0.42;

$n_m(e)$ é a densidade eletrônica no pico da camada F;

$s(z)$ é função de forma da camada F (função de Chapman), sendo $n(e) = n_m(e)s(z)$;

$n(O)$ é a densidade do oxigênio atômico;

k_1 , k_2 e k_3 são os coeficientes da reação de recombinação íon-íon, onde : $k_1 = 1,3 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $k_2 = 1,0 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $k_3 = 1,4 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

z = altura da camada

A densidade eletrônica máxima da camada F pode ser expressa por:

$$n_e (e^- \cdot \text{cm}^{-3}) = 1,24 \times 10^4 (foF_2)^2 \quad (5.3)$$

onde n_e é a densidade eletrônica por cm^3 e foF_2 é frequência de reflexão máxima da camada obtida a partir de dados dos ionogramas. Graficando os valores obtidos em horários simultâneos, espera-se obter uma expressão que correlacione os parâmetros.

Neste trabalho tem-se por objetivo aplicar o método acima descrito e obter valores relativos de densidade eletrônica no interior e no exterior da bolha, sobretudo tentar isolar a densidade eletrônica nas regiões finas e escuras no interior das bolhas denominadas em seção anterior como estrias.

Segundo Sahai et al. (1981) o método apresenta bons resultados, ou boa correlação nas noites em que não há ocorrência de *Spread-F*, quando se pode determinar com maior acurácia os valores de foF_2 (ionogramas) e conseqüentemente os de $n_m(e)$. No entanto, este método ainda pode ser validado em noites de ocorrência de *Spread-F* selecionando-se os valores de foF_2 em horários antecedentes e posteriores ao *Spread-F*.

A curva de calibração é obtida a partir de dados de imageamento e radiossondagem obtidos em horários simultâneos. As matrizes imagens da OI 777,4 nm ($J_{777,4 \text{ nm}}$) são convertidas a matrizes $(J_{777,4 \text{ nm}})^{1/2}$, das quais são extraídos valores de $(J_{777,4 \text{ nm}})^{1/2}$

na região zenital da imagem (uma pequena área de 10 x 10 pixels). A partir de ionogramas obtidos nos mesmos horários são extraídos valores de foF2 (frequência crítica da camada) os quais são convertidos em valores de densidade eletrônica a partir da expressão 5.1. Graficando estes dados e aplicando um ajuste dos mínimos quadrados obtém-se a curva de calibração que expressa a relação entre os parâmetros.

Através de rotinas computacionais adequadas (neste trabalho foram utilizadas rotinas desenvolvidas na linguagem IDL) a curva de calibração obtida é transferida para imagem $(I_{777,4nm})^{1/2}$ da emissão OI 777,4 nm resultando numa imagem/matriz densidade. A etapa seguinte consiste em se fazer varreduras longitudinais na imagem densidade em cortes latitudinais selecionados de modo a se analisar a variação latitudinal e temporal da densidade eletrônica. O método acima descrito foi aplicado à análise de dados de duas noites onde se detecta claramente a presença de estrias nas bolhas de plasma imageadas em São José dos Campos e apresentadas na seção 5.1: 23 de outubro de 2000 e 15 de outubro de 2001.

5.3.1 - Calibração da Densidade Eletrônica com Dados de Imageador *All-Sky* e de Ionossonda CADI Localizados em São José Dos Campos

A Figura 5.22 apresenta as retas de calibração da densidade de plasma obtidas para as noites de 23-24 de abril de 2001 e 15-16 de outubro de 2001. Cada ponto da reta representa o valor da raiz quadrada da intensidade da emissão tomada no centro de cada imagem. Os valores de foF2 utilizados foram extraídos de ionogramas registradas no mesmo horário das imagens. Aplicando o método dos mínimos quadrados é possível obter as funções que relacionam os dois parâmetros. Optamos por realizar a calibração na noite de 23-24 de abril, por tratar-se de uma noite calma sem ocorrência de *Spread-F* e com o objetivo de comparar a função calibração com a obtida em 15 de outubro de 2001. Nota-se que os coeficientes angulares apresentaram variação de aproximadamente 1%, sendo os coeficientes de correlação $R_1 = R_2 = 0,97$.

É necessário comentar o limitado número de pontos utilizados na calibração. Isto se deve ao limitado número de imagens nas duas noites analisadas, devido a condições de observação (presença de nuvens) e principalmente a problemas operacionais. Ainda assim é possível verificar uma função entre os parâmetros bastante semelhante, tanto para a noite sem bolhas como a noite com bolhas.

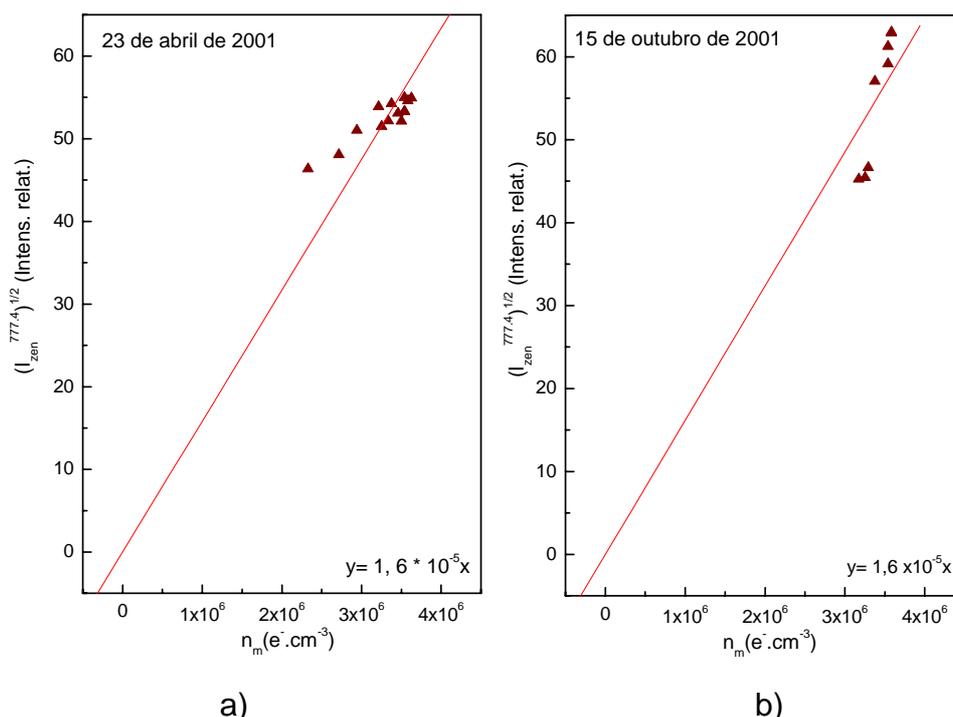


Figura 5.22: Calibração da densidade eletrônica usando valores relativos da raiz da intensidade da emissão OI 777,4 nm (no zênite da imagem) e valores de f_0F_2 obtidos de ionogramas obtidos simultaneamente em São José dos Campos, nas noites: a) 23 de abril de 2001 e b) 15 de outubro de 2001.

A função correlação encontrada é a mesma para as duas calibrações, o que corrobora o método empregado. O próximo passo é transferir a função correlação para a matriz imagem da emissão OI 777,4 nm.

As imagens da emissão OI 777,4 nm apresentadas em seção anterior são matrizes de valores de intensidade relativa capturadas pelo detector CCD. A função calibração mostrada na Figura 5.5 expressa a relação existente entre a raiz

intensidade relativa da emissão OI 777,4 nm e a densidade eletrônica no pico da camada F, $n_m(e)$ da seguinte forma:

$$(I_{777.4nm}^{zen})^{1/2} = 1,6 \times 10^5 n_m(e) \quad (5.3)$$

Deste modo para obtermos uma imagem que expresse a variação de densidade eletrônica, utiliza-se a expressão 5.3 transformando a matriz 'raiz da intensidade' em matriz 'densidade'.

5.3.2 – Variação Latitudinal da Densidade Eletrônica

A Figura 5.23a apresenta a imagem-densidade da noite de 15-16 de outubro de 2001, às 22:05 LT. Esta imagem é obtida pela transformação da imagem intensidade através da função calibração mostrada na Figura 5.22. As Figuras 5.24a e 5.25a mostram as imagens-densidade obtidas da mesma forma para as noites de 23-24 de outubro de 2000, às 19:58 LT, e 31 de outubro - 01 de novembro de 2000, às 22:28 LT, respectivamente. A partir de latitudes selecionadas (cortes em vermelho nas figuras) foi possível fazer as varreduras longitudinais da densidade eletrônica obtidas a partir de imagens da emissão OI 777,4 nm para todas as três noites, conforme mostrado nas Figuras 5.23b, 5.24b e 5.25b. Para facilitar a sua visualização, as figuras da imagem-densidade e da varredura longitudinal para cada noite foram colocadas juntas a partir da próxima página. Os níveis de depleção das bolhas estudadas podem ser determinados a partir da relação entre a densidade de plasma encontrada na vizinhança imediata da bolha (parede leste e oeste) e no seu interior (mínima densidade).

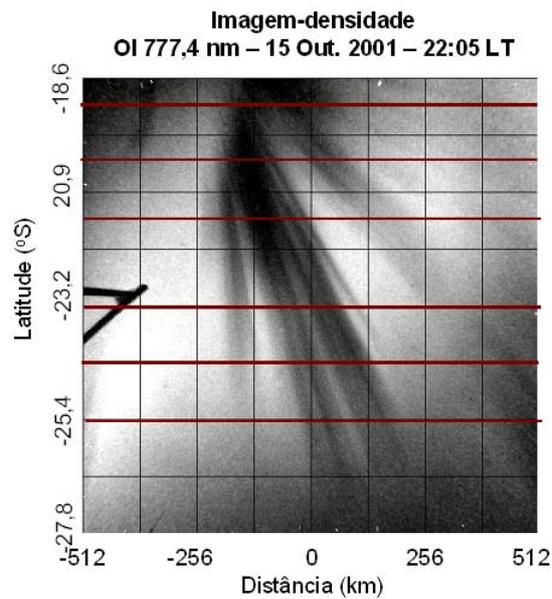


Figura 5.23a: Imagem-densidade obtida aplicando-se a função calibração mostrada na Figura 5.22 e os cortes latitudinais selecionados (linhas horizontais vermelhas) para análise da variação da densidade eletrônica da noite de 15-16 de outubro de 2001, às 22:05 LT.

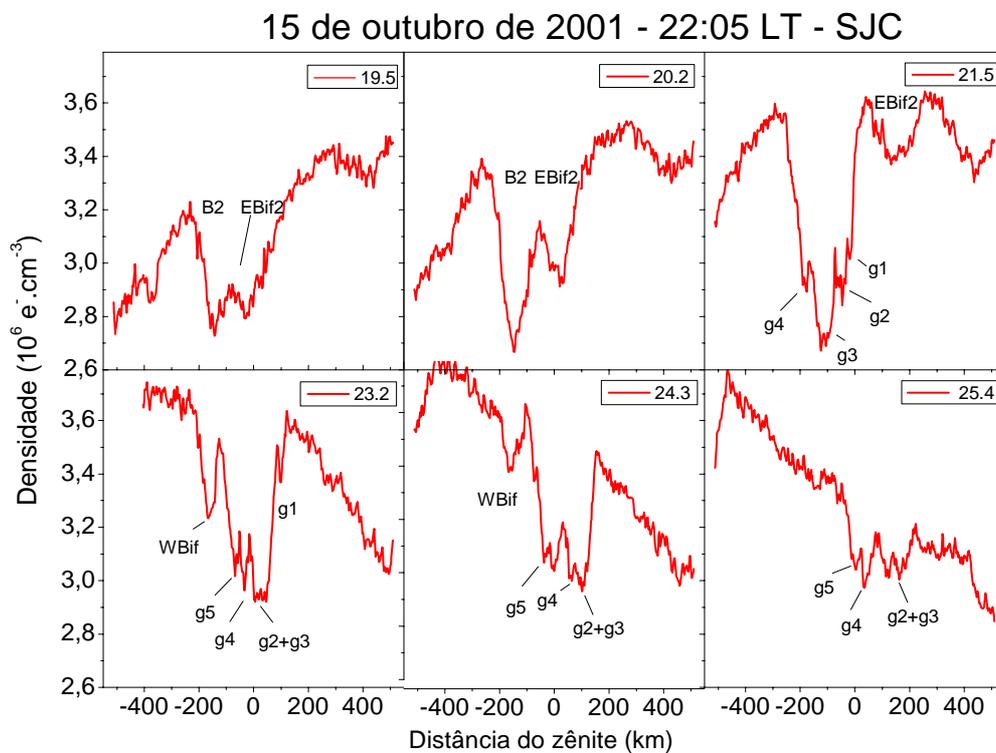


Figura 5.23b: Varreduras longitudinais da densidade eletrônica em vários cortes latitudinais obtidas a partir de imagens da emissão OI 777,4 nm.

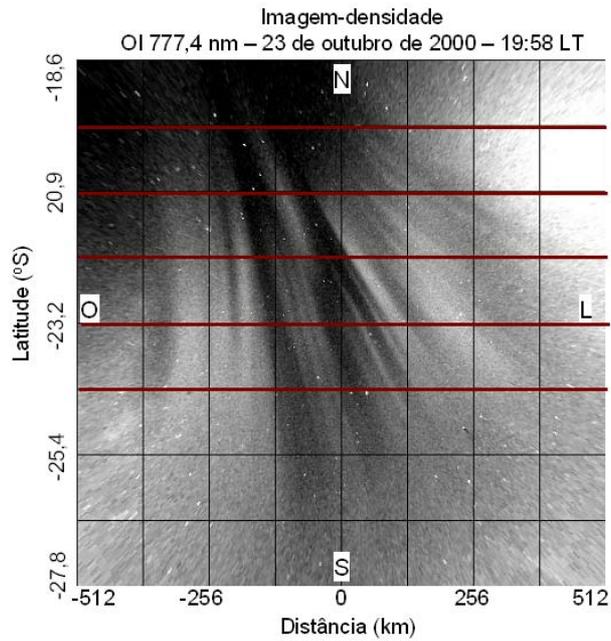


Figura 5.24a: Imagem-densidade obtida aplicando-se a função calibração mostrada na Figura 5.22 e os cortes latitudinais selecionados (linhas horizontais vermelhas) para análise da variação da densidade eletrônica da noite de 23-24 de outubro de 2000, às 19:58 LT.

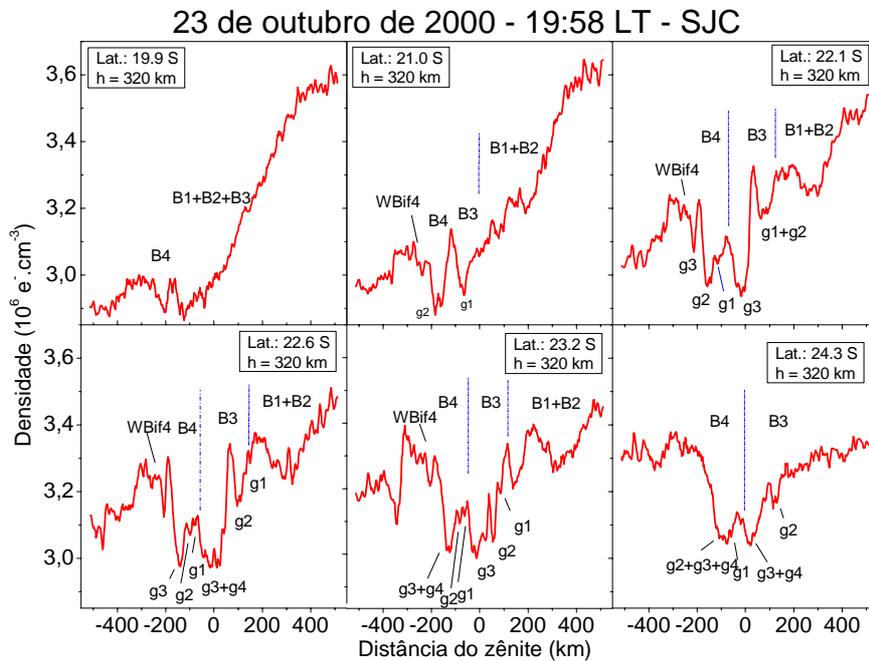


Figura 5.24b: Varreduras longitudinais da densidade eletrônica em vários cortes latitudinais obtidas a partir de imagens da emissão OI 777,4 nm, na noite de 23-24 de outubro de 2000 às 19:58 LT.

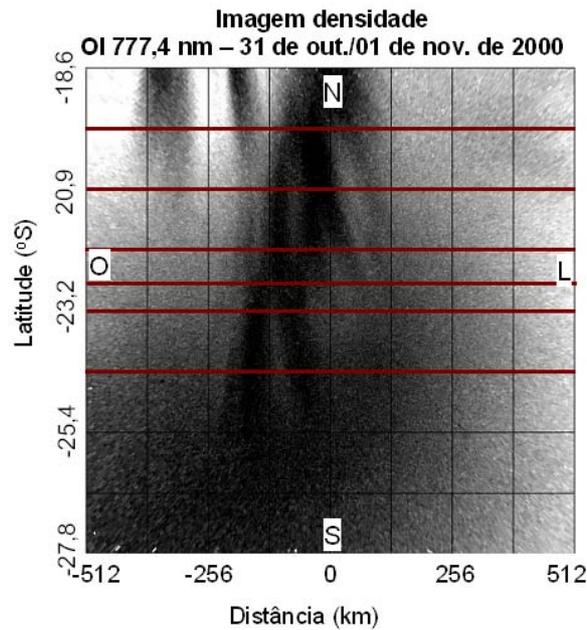


Figura 5.25a: Imagem-densidade obtida aplicando-se a função calibração mostrada na Figura 5.22 e os cortes latitudinais selecionados (linhas horizontais vermelhas) para análise da variação da densidade eletrônica da noite de 31 de outubro - 01 de novembro de 2000, às 22:28 LT.

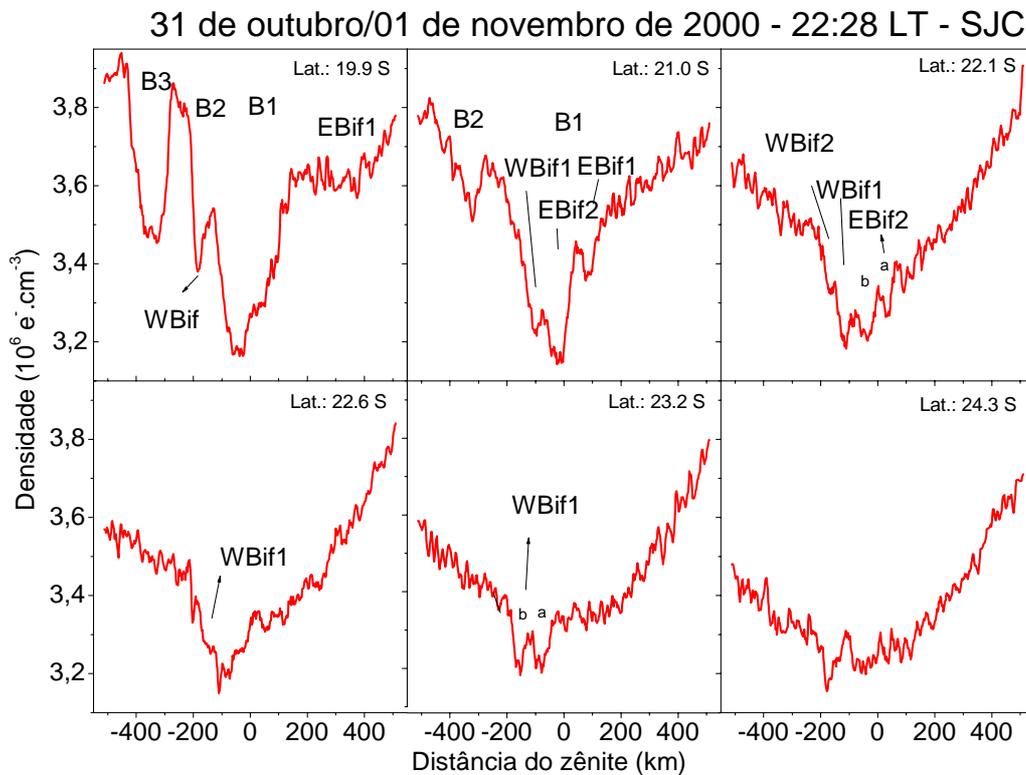


Figura 5.25b: Varreduras longitudinais da densidade eletrônica em vários cortes latitudinais obtidas a partir de imagens da emissão OI 777,4 nm, na noite de 31 de outubro – 01 de novembro 2000 às 22:28 LT.

Na Tabela 5.6 resumizamos os resultados encontrados para as três noites de dados.

Tabela 5.7: Níveis de depleção encontrados para diferentes cortes latitudinais para as três noites estudadas.

Latitude (°S)	Nível de depleção (%)					
	23-24 out. de 2000		31 out/01 nov. de 2000		15-16 de out. de 2001	
	Bolhas	Estrias	Bolhas	Estrias	Bolhas	Estrias
19,9	24	3	20	-	27	3
21,0	24	3	22	-	34	3
22,1	18	2	18	-	33	3
22,6	15	2	19	-	25	2
23,2	15	1	15	-	29	2
24,3	11	1	15	-	15	1

Foram inferidos os níveis de depleção da densidade eletrônica no interior e no exterior das bolhas estudadas com a emissão OI 777,4 nm, resultando em níveis de depleção entre 15 e 34% nos horários em que as bolhas estudadas eram detectadas no zênite da imagem, e entre 1 e 3% para as estrias. Os valores significativamente baixos determinados para as estrias necessitam maior investigação por outras técnicas uma vez que parecem estar dentro da faixa de imprecisão dos cálculos.

O nível de depleção da densidade eletrônica é um parâmetro que pode estar correlacionado à altura máxima atingida pela bolha no equador. Ossakow e Chatuverdi (1979) realizaram simulações das características morfológicas de bolhas no equador e verificaram que o nível de depleção da densidade eletrônica entre o interior e o exterior da bolha pode ser relacionado à velocidade de subida da bolha, à altura do pico de densidade da camada F₂ como também à forma assumida pela bolha (cilíndrica, oval, elíptica). Hanson and Bamgboye (1984) mostraram que há uma forte correlação entre a velocidade de subida da bolha e o seu nível de depleção com relação ao plasma ambiente, de modo que quanto maior o nível de depleção maior a velocidade de deriva vertical e conseqüentemente maior a altura alcançada pela depleção.

Anderson e Haerendel (1979) verificaram que bolhas com elevado nível de depleção apresentavam pouca estruturação, ou seja, reduzida tendência à bifurcação. Pimenta, 2003, também verificou que o nível de depleção das bolhas estava relacionado à ocorrência de estruturas secundárias na bolha, como bifurcações. Seu estudo concluiu que quanto maior o nível de depleção da bolha (densidade da bolha muito menor que a ambiente) menor a probabilidade de ocorrência de bifurcações.

Neste trabalho encontramos níveis de depleção variando entre 15 e 34%. Deve-se considerar os erros e desvios padrões envolvidos na determinação das densidades eletrônicas (determinação de foF2 dos ionogramas, contagem de fótons do imageador é uma medida relativa e não absoluta, contaminação por luzes da cidade e da emissão da banda OH no caso da emissão OI 777,4 nm da emissão), estimamos que os níveis de depleção encontrados apresentam uma margem de erro em torno de 20%, o que desloca os limites para 12 e 40%.

O limite superior ainda é considerado um nível de depleção baixo, de modo que se considerarmos o alto grau de estruturação verificado nas bolhas estudadas, estes níveis parecem razoáveis. Por outro lado, as bolhas atingiram latitudes próximas a 27°S, o que indica que elas subiram a altitudes superiores a 1200 km no equador. Em publicação recente Mendillo et al. (2005) analisaram a altitude máxima atingida pela bolha no equador no contexto da teoria da flutuação proposto por Ossakow e Chatuverdi (1978). Esta teoria prediz que uma bolha criada na base da camada F subirá a uma determinada altura na qual sua densidade seja próxima do plasma à densidade ambiente, o que ocorre em altitudes aproximadas de 1000 km.

Quanto aos níveis de depleção encontrados pode-se ainda compará-los aos níveis determinados com outras técnicas. Dados de satélite, foguetes, com medições in-locu, por exemplo, mostram depleções que podem variar de 1 até 3 ordens de magnitude. A razão para tais diferenças pode estar relacionada ao largo espectro de irregularidades de plasma observado. Irregularidades do plasma ionosférico podem variar de alguns poucos centímetros ou metros (plumas, por ex.) a centenas de quilômetros, como é o caso das bolhas de plasma. Embora as irregularidades de

grande escala como bolhas não produzam cintilações nos sinais de GPS, elas podem conter irregularidades de menor escala que podem produzir efeitos de cintilação no sinal de GPS (TSUNODA et al., 1982). O grau de cintilação do sinal é dependente das dimensões da irregularidade, do ângulo de incidência e da frequência do sinal de GPS, segundo a expressão: $L = \sqrt{2\lambda d}$ (considerando-se que o satélite esteja no zênite), onde: L = dimensão da irregularidade, λ é comprimento de onda do sinal GPS e d é a altura da camada F ionosférica onde se encontram as irregularidades.

Neste trabalho os níveis encontrados estão compatíveis aos determinados por outros autores, através de técnicas ópticas (Tabela 5.8). Deve-se observar que os parâmetros utilizados na determinação da densidade eletrônica são inferidos a partir de dados de instrumentos em solo. A contagem de fótons pelo imageador, por exemplo, além de não ser uma medida calibrada em Rayleighs (10^6 fótons.cm².coluna⁻¹), é integrada ao longo de uma coluna vertical, considerando-se a taxa máxima de emissão numa determinada altura: para a emissão OI 777,4 nm, esta altura foi considerada 330 km.

Weber (1980) interpreta os diferentes níveis de depleção como o resultado das técnicas de observação empregadas, conforme pode ser observado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Níveis de depleção de bolhas de plasma determinados com diferentes técnica de observação.

Autor e Ano	Técnica	Período do ano	Região	Depleção
McClure et al., 1977	Satélite (AE-C). Medidas de densidade iônica	Julho, 1974	Equatorial	3 ordens de magnitude
Klobuchar et al. (1978)	Medidas de TEC			(10-20)%
Yeh et al. (1979)	Rotação Faraday		Natal, Brasil (Região equatorial)	(10-20)%
Tsunoda and Towle, 1979	Medidas de TEC			45 %
Aggson et al., 1995 Laakso et al., 1994	Satélite San Marco Densidade iônica	Outubro, 1988	Região Equatorial	1 ordem de magnitude
Weber et al. (1980)	Fotômetro imageador a bordo de avião. Emissão OI 630,0 nm	Março, 1977	Equatorial (setor Peruviano) e Anomalia de Appleton (Sul)	66 %
Mendillo e Baungardner (1982)	Fotômetro imageador em solo - Emissão OI 630,0 nm	Janeiro a Fevereiro de 1981		(40 – 50)%
Moore e Weber, 1981	Fotômetro imageador a bordo de avião. Emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm Densidade iônica – satélite AE-E	Dezembro, 1979	Ascension Island (8 a 18° S)	1 ordem de magnitude para a OI 777,4 nm (satélite)
Otsuka (comunicação pessoal)	Fotômetro imageador em solo Emissão OI 777,4 nm	Maió, 2003	Kototabang, Indonesia	50-70 %
Shiokawa et al., 2004	Fotômetro imageador Emissão OI 630,0 nm	Abril, 2002	Sata (lat. magn. 24N) Darwin (lat. magn. 22S)	40 %
Este trabalho	Fotômetro imageador all-sky em solo Emissão OI 777,4 nm	Outubro de 2000 e 2001	São José dos Campos, Brazil	15 a 34 %

5.4 – DISCUSSÃO SOBRE PROCESSOS DE FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DE ESTRUTURAS SECUNDÁRIAS NAS BOLHAS DE PLASMA

Nas seções anteriores analisamos a presença de estruturas secundárias nas bolhas de plasma ionosférico observadas com imageamento óptico nas baixas latitudes do setor brasileiro. Três casos foram estudados, dois dos quais apresentaram a ocorrência de estruturas finas como estrias nas imagens da emissão OI 777,4 nm, não observadas nas imagens da emissão OI 630,0 nm. Num dos casos estudados verificamos que as estruturas observadas com a emissão OI 777,4 nm não apresentaram o mesmo padrão de estruturas finas assemelhando-se mais as macro estruturas observadas nas imagens da emissão OI 630,0 nm.

Nesta seção discutimos os prováveis mecanismos envolvidos na formação e evolução de estruturas secundárias nas bolhas de plasma analisadas neste trabalho.

Na Figura 5.26 é reproduzida a seqüência de imagens da emissão OI 777,4 nm obtida na noite de 23-24 de outubro de 2000, onde se observa a fase inicial de evolução das bolhas de plasma e sua evolução durante o intervalo de tempo de aproximadamente uma hora.

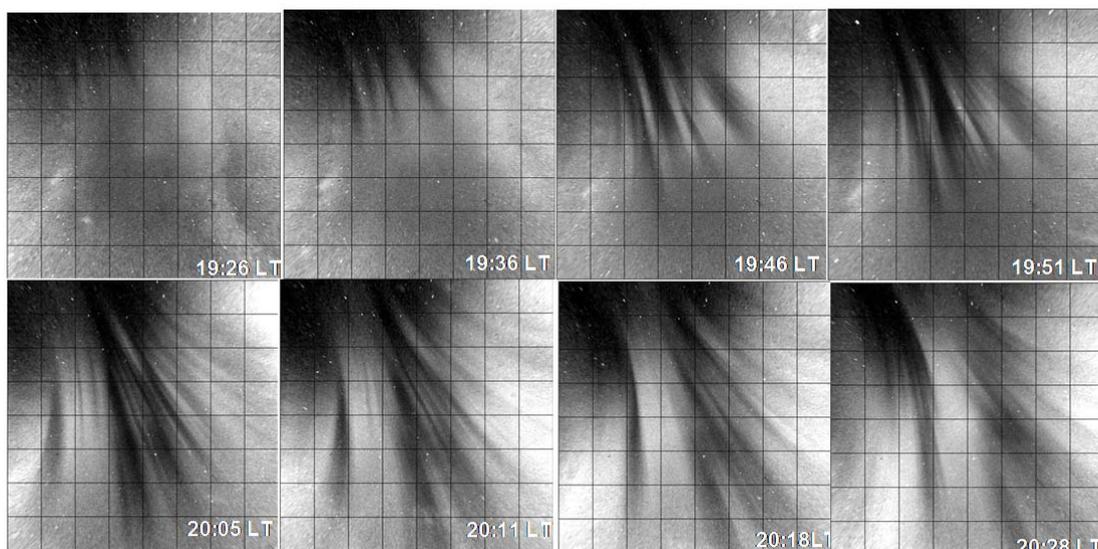


Figura 5.26: Seqüência das imagens da emissão OI 777,4 nm obtidas na noite de 23-24 de outubro de 2000.

Na imagem das 19:26 LT observa-se o aparecimento de uma região escura no canto superior esquerdo que se subdivide em várias estruturas nas imagens seguintes. Nota-se facilmente a inclinação da extremidade inferior ('pé da bolha') para leste. A extremidade inferior corresponde a altitudes mais elevadas alcançadas no equador, e conforme inferido em seção anterior, correspondem a altitudes próximas a 1000 km no equador, ou seja, o topo da região F.

De modo a visualizarmos ainda que, aproximadamente, a evolução da bolha no plano equatorial, esboçamos figuras baseadas nas imagens da emissão OI 777,4 nm projetando-as no plano equatorial.

A Figura 5.27 ilustra um esboço bidimensional da bolha de plasma projetada no plano vertical no equador associado às seqüências de imagens mostradas anteriormente na Figura 5.26 na noite de 23-24 de outubro de 2000 entre as 19:26 LT e 20:28 LT.

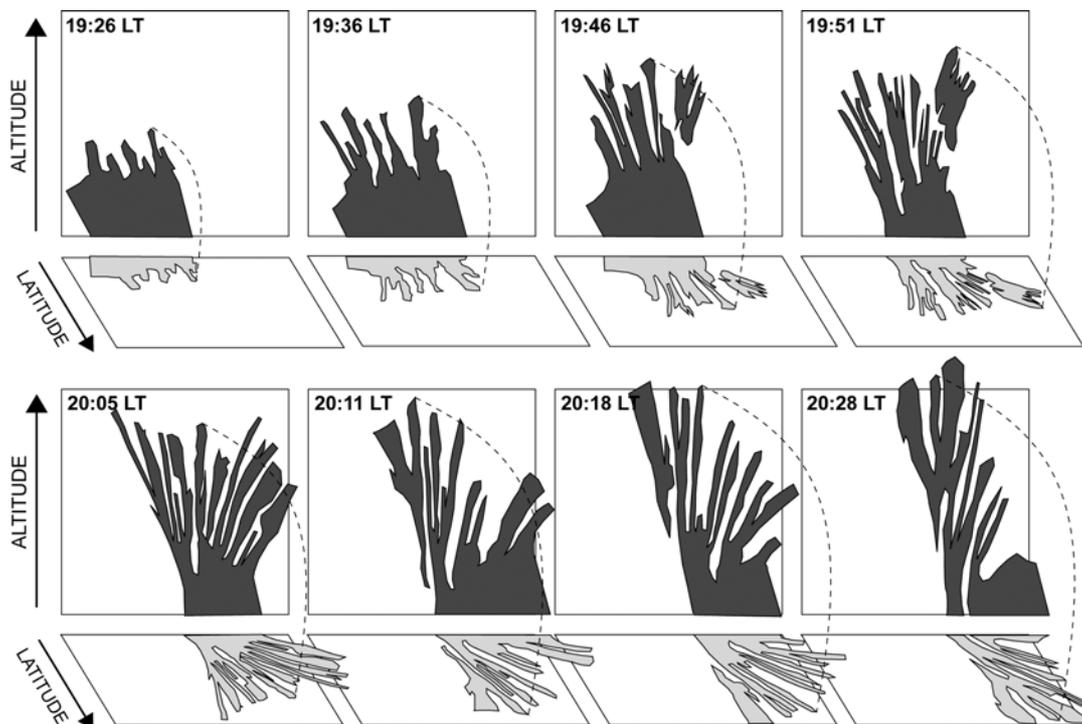


Figura 5.27: Esboço gráfico bidimensional representativo das bolhas de plasma observadas na noite de 23-24 de outubro de 2000, projetadas aproximadamente no plano vertical equatorial.

Na seqüência mostrada na Figura 5.27 podemos ver a inclinação da extremidade da bolha para oeste no equador, o que concorda razoavelmente com previsões teóricas e observações experimentais (ZALESAK et al. 1992; TSUNODA et al. 1982, 1983). Podemos observar que à medida que a as bolhas evoluem verticalmente, aumenta o grau de estruturação, com o surgimento de estruturas secundárias que igualmente se inclinam para oeste. No entanto, com o decorrer do tempo, a forte interação dinâmica promove mudanças na morfologia das mesmas, conforme mencionado em seções anteriores.

Na noite de 31 de outubro - 01 de novembro de 2000 foi selecionada uma bolha que entrou no campo de visão do instrumento por volta das 21:44 LT, na presença de nuvens, o que só permitiu a análise qualitativa e quantitativa num intervalo de tempo de 40 minutos, entre as 22:00 e as 22:40 LT (Figura 5.28). Porém neste breve período foi observado um comportamento interessante. As quatro estruturas simples inicialmente observadas, cujas dimensões são comparáveis as das estruturas finas denominadas estrias, permanecem como estruturas distintas até as 22:11 LT. As 22:18 LT tem início um processo de sobreposição das estruturas sendo que às 22:22 LT observa-se o que parecem ser estruturas bifurcadas em formato de Y invertido. Este comportamento indica que estruturas simples distintas evoluem dinamicamente formando estruturas compostas mais complexas.

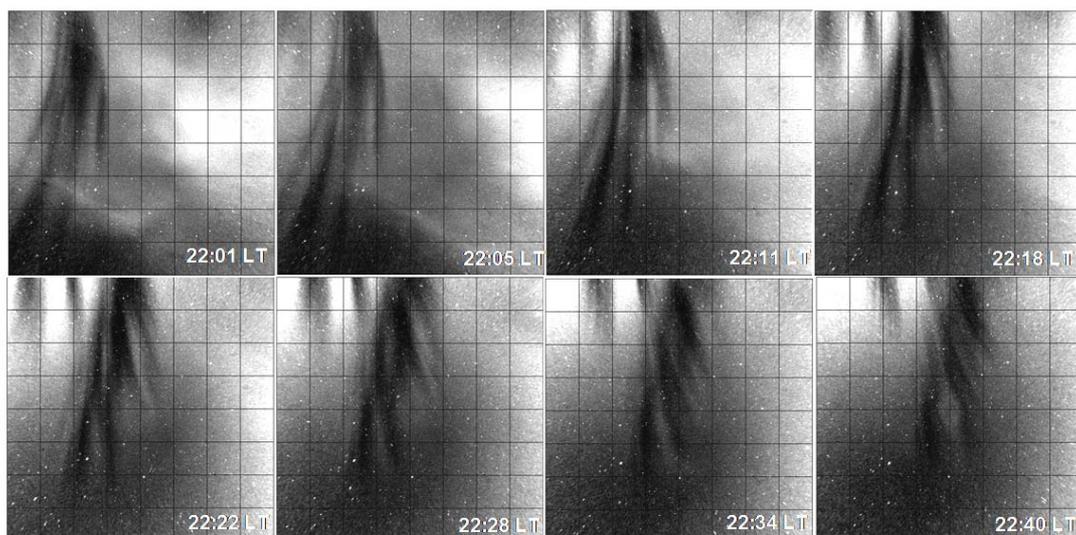


Figura 5.28: Seqüência das imagens da emissão OI 777,4 nm obtidas na noite de 31 de outubro/01 de novembro de outubro de 2000.

A Figura 5.29 mostra o esboço da projeção das imagens da Figura 5.28 no plano equatorial, onde se observa uma forte inclinação da extremidade da bolha para oeste. Shiokawa et al. (2003), estudando bolhas com as imagens da emissão OI 630,0 nm, comentam que a inclinação da bolha para oeste parece depender da idade da mesma, ou seja, quanto maior o intervalo de tempo entre o surgimento da bolha e a sua observação no campo de visada do imageador, maior será sua inclinação.

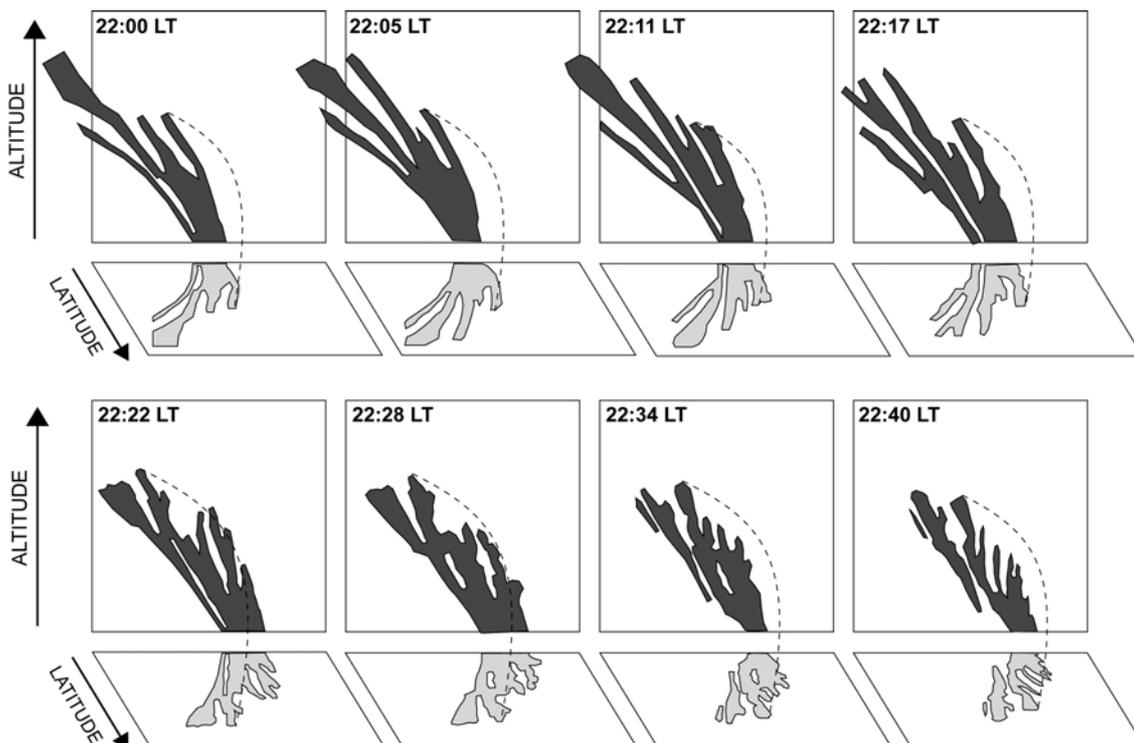


Figura 5.29: Diagrama representativo das bolhas de plasma observadas na noite de 31 de outubro/01 de novembro de 2000, projetadas no plano vertical equatorial.

Para a noite de 15-16 de outubro de 2001 selecionamos uma seqüência de bolhas que entraram no campo de visão do instrumento já completamente formadas por volta das 21:13 LT evoluindo nesta região até aproximadamente 22:25 LT, como ilustra a Figura 5.30. Desde o início da observação esta bolha apresentou alto grau de estruturação, com a presença de bifurcações e estrias. Conforme foi descrito na seção 5.1, as estrias podem se confundir numa determinada latitude/hora para depois se separar ou se mesclar, o que indica interação dinâmica complexa.

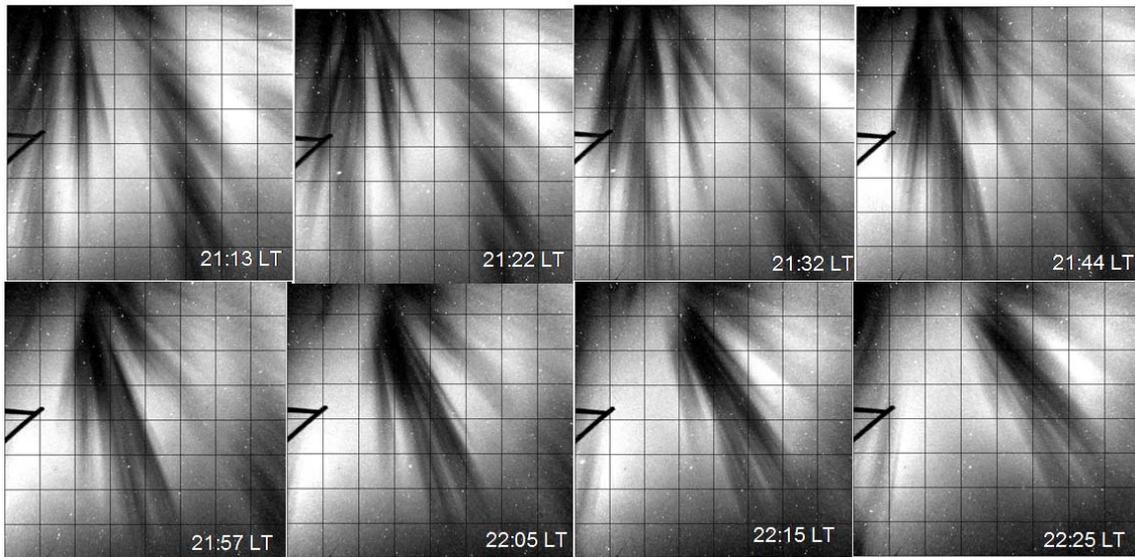


Figura 5.30: Seqüência das imagens da emissão OI 777,4 nm obtidas na noite de 15-16 de outubro de 2001.

Um esboço da projeção destas estruturas de plasma no plano equatorial é mostrado na Figura 5.31, onde se evidencia o elevado grau de estruturação, a inclinação acentuada para oeste das extremidades da bolha na fase inicial de observação e a progressão desta inclinação para leste no decorrer de uma hora.

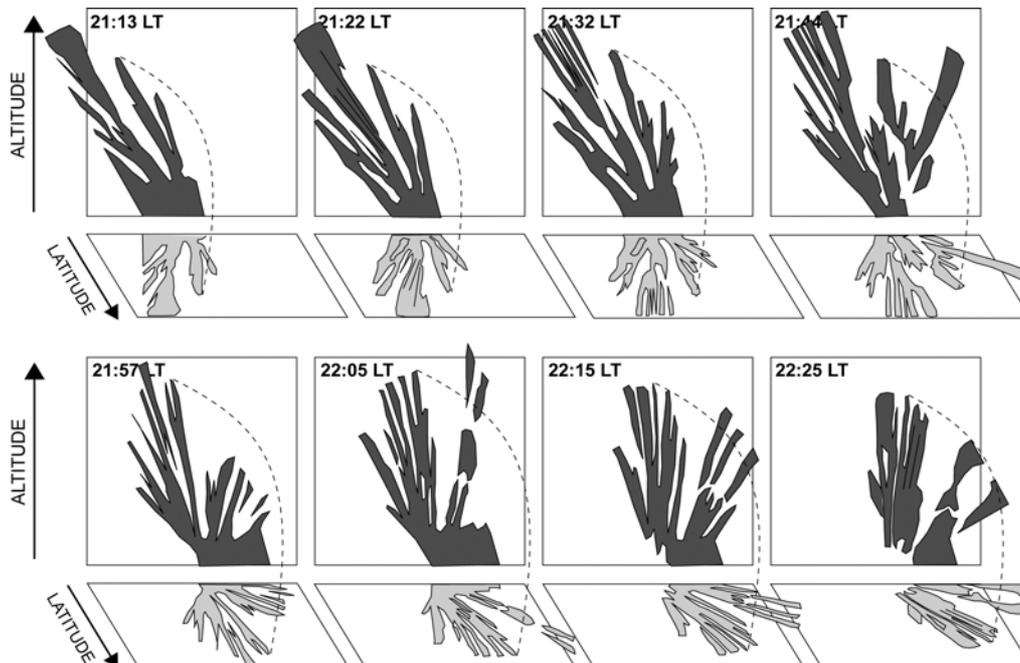


Figura 5.31: Diagrama representativo das bolhas de plasma observadas na noite de 15-16 de outubro de 2001, projetadas no plano vertical equatorial.

5.4.1 – Influência da Condutividade Pedersen na Formação das Estruturas Secundárias

A observação de estruturas secundárias nas bolhas de plasma é objeto de diversos estudos teóricos e experimentais e é geralmente analisada e discutida sob o ponto de vista da evolução das instabilidades do plasma da região F equatorial (ANDERSON E HAERENDEL, 1979; ZALESK et al., 1982, OSSAKOW E CHATUVERDI, 1978, OSSAKOW et al., 1979, TSUNODA, 1982). Tais estudos apontam que a evolução das instabilidades de plasma equatoriais (instabilidade de Rayleigh-Taylor) depende de vários fatores concernentes às condições ionosféricas locais: a altura do pico de densidade da camada, a densidade eletrônica, a contribuição da condutividade Pedersen das regiões E e F integradas ao longo das linhas de campo, contribuição dos ventos neutros, etc.

Zalesak et al. (1982) realizaram um estudo baseado em simulações computacionais onde estudaram o efeito de ventos neutros e da condutividade Pedersen das vizinhanças do plano equatorial. O modelo computacional desenvolvido por Zalesak previu características do *spread-F* observadas experimentalmente como a morfologia das estruturas de plasma observadas com radar: inclinação para oeste e a forma em “C” apresentada pelas plumas. Além disto, foi prevista a formação de estruturas secundárias como bifurcações nas bolhas de plasma. Uma das principais conclusões foi sobre o papel dominante da condutividade Pedersen integrada na linha de campo sobre a evolução da instabilidade e da influência da condutividade da camada E conectada a região F pelas linhas de campo altamente condutoras.

À medida que evoluem verticalmente as depleções do plasma se bifurcam formando duas regiões conectadas entre si que por sua vez podem se bifurcar em novas regiões em geral simetricamente em torno do eixo vertical. Nas simulações de Zalesak et al. (1982), por exemplo, as bifurcações surgiram numa configuração tal em que a bolha evolui lentamente ao topo da camada F, com baixo nível de depleção (razão entre densidade dentro e fora da bolha) no início da sua evolução.

Do ponto de vista experimental Mendillo e Tyler (1983) observaram estruturas escuras bifurcadas nas imagens da emissão OI 630,0 nm, e estimaram, embora

inconclusivamente uma altura de formação de 700 km no equador. Uma das explicações para a formação é a inclinação para oeste sofrida pela depleção com o passar do tempo, o que torna a parede leste instável e passível de formar nova depleção. Tsunoda et al. (1983) argumenta que a parede oeste da depleção é a mais instável à formação de estruturas secundárias, de acordo com suas observações com radares, fato este atribuído à interação da parede oeste com o vento neutro direcionado para leste.

Huang e Kelley (1996) afirmaram que no caso de bolhas com grandes dimensões zonais a tendência à bifurcação é muito maior. Embora tal afirmativa pareça bastante razoável, Pimenta et al. (2003) verificou que a tendência à formação de bifurcações parece estar mais fortemente relacionada ao nível de depleção das bolhas. Esta tendência parece concordar com tendência verificada por MacDonald et al. (1981) ao estudar a estruturação observada em nuvens de plasma injetadas artificialmente na ionosfera. Verificou-se que estruturas secundárias surgem devido a diferenças nas condutividades Pedersen integrada na linha de campo nas regiões interna e externa da nuvem de plasma. Foi verificado que quanto maior a razão de condutividades dentro e fora da nuvem de plasma menor a probabilidade de ocorrerem estruturas secundárias, como bifurcações e estrias. O mesmo raciocínio pode, com o devido cuidado, ser considerado para a formação de estruturas finas como estrias nas bolhas de plasma, uma vez que uma bolha pode ser considerada o contraponto de nuvem de plasma (ZALESK et al., 1982). Uma nuvem de plasma é uma região de alta densidade se propagando através de uma região de baixa densidade e a bolha é uma região de baixa densidade se propagando por uma região de alta densidade. Deste modo a variabilidade da condutividade Pedersen (que é proporcional a densidade do plasma) no interior e no exterior da estrutura de plasma (nuvem/bolha) pode ser crucial no processo de formação de estruturas secundárias como estrias.

5.4.2 – Influência dos Campos Elétricos na Formação de Estruturas secundárias

Os campos elétricos são um dos mais importantes parâmetros da física da ionosfera, e o padrão de variabilidade da ionosfera é intimamente ligado à variabilidade dos mesmos (variação com a altura, com a hora, com o ciclo solar, com a atividade geomagnética, etc). Os campos elétricos zonais, originários do dínamo da região E e F, são responsáveis pela deriva vertical do plasma ionosférico para cima durante o dia (campo zonal para leste) e para baixo durante a noite (campo zonal para oeste), apresentando um pico pré-reverso ao anoitecer.

Os campos elétricos verticais da região F surgem de diferentes fontes (HAERENDEL et al., 1992, RICHMOND, 1973, ABDU et al., 2003). Uma delas é o dínamo de ventos termosféricos zonais (para leste) no período noturno. Os ventos termosféricos produzem correntes verticais para cima que não fluem livremente (em circuito fechado) devido à baixa condutividade noturna da região E. De modo a manter a divergência nula de corrente, surgem campos de polarização vertical cuja magnitude é dependente das *condutividades Pedersen* integrada ao longo das linhas de campo. Segundo Abdu et al. (2003), se Σ_S é a condutividade Pedersen integrada ao longo de um segmento da linha de campo na região F (considerada como região fonte) e Σ_L é integrada ao longo da mesma linha para segmentos se estendendo a região E (região de carga) o campo elétrico de polarização E_z pode ser escrito simplificado como:

$$E_z = U_y x B_o \left[\frac{\Sigma_S}{\Sigma_L + \Sigma_S} \right] \quad (5.4)$$

onde U_y é o vento termosférico zonal e B_o é a intensidade do campo magnético (positivo para oeste e para o norte). Durante o dia, com a presença da região E, $\Sigma_L \gg \Sigma_S$, $E_z \rightarrow 0$. Ao anoitecer, Σ_L decai mais rapidamente que Σ_S , promovendo o desenvolvimento de campos verticais que aumentam através do terminador. A condição $\nabla_x E = 0$ por sua vez favorece o aumento do campo elétrico zonal, responsável pelo pico pré-reversão.

Na região equatorial o campo vertical apresenta grande variabilidade com a altitude durante o período noturno, apontando para cima na região abaixo do pico de densidade da região F e para baixo acima da região do pico. Deste modo, o campo vertical promove o fluxo de plasma para oeste abaixo do pico da região F e predominantemente para leste no topo da camada.

Na década de 90 Aggson et al. (1995, 1996) e Laakso et al. (1997) verificaram o padrão de campos elétricos medidos em bolhas de plasma equatoriais com dados do satélite de San Marco. O satélite de San Marco foi lançado em 1988 numa órbita circular de baixa altitude (600 km) com uma inclinação geográfica de 2.9° . Medidas das componentes zonais e verticais dos campos elétricos foram esclarecedoras no estudo morfológico e dinâmico das bolhas de plasma equatoriais. Seus resultados mostraram que as componentes zonais para leste do campo elétrico promoviam um fluxo vertical de plasma para cima. Por outro lado, as componentes verticais do campo elétrico (apontando para o centro da Terra) promovem um fluxo de plasma para leste. Um dos resultados mais significativos dos dados do satélite de San Marco foi a observação de estruturas secundárias como bifurcações e o padrão de campos elétricos a elas associados. Verificou-se que ao passar sobre bifurcações, os campos elétricos verticais medidos apresentavam uma assinatura bipolar, isto é, apresentavam componentes verticais alternadamente para cima e para baixo, promovendo fluxo de plasma para oeste e para leste respectivamente.

Baseando-nos neste conhecimento experimental preliminar sobre os campos elétricos verticais e na observação de diferentes padrões de estruturação das bolhas de plasma observadas com imageamento óptico das emissões OI 630,0 nm e 777,4 nm, propomos nesta seção possíveis configurações de campos elétricos responsáveis pela morfologia das estruturas observadas.

A Figura 5.32 apresenta diagramas esquemáticos para diferentes configurações de bolhas de plasma como: depleções simples inclinadas, bifurcadas ou estriadas. Na parte superior são mostradas variações hipotéticas do campo elétrico vertical representativas das regiões estruturadas demarcadas com a linha horizontal tracejada. O campo elétrico zonal - não representado na figura - aponta para leste

em todos os casos apresentados, o que promove o fluxo de plasma sempre para cima.

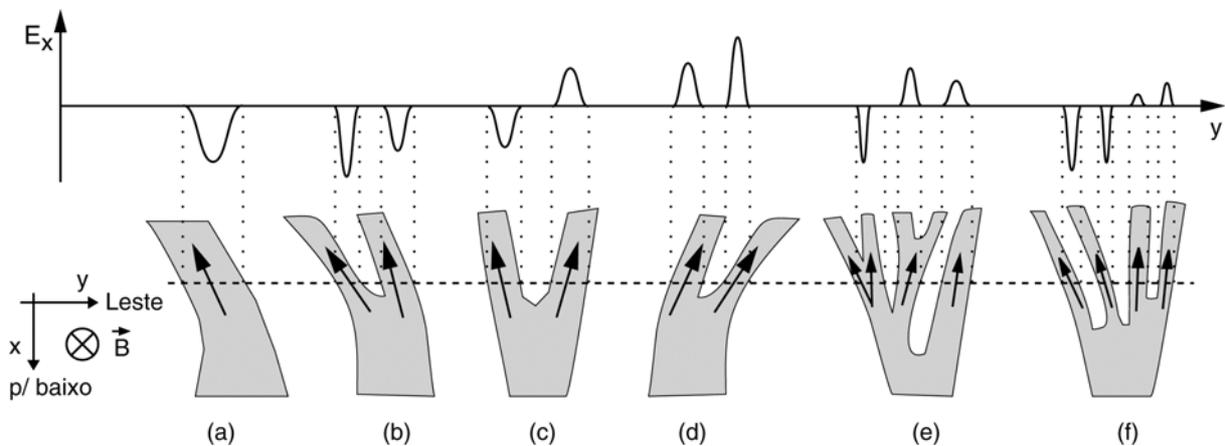


Figura 5.32: Diagramas esquemáticos de várias configurações de bolhas de plasma no plano equatorial: a) Depleção simples inclinada para oeste; b) Depleção bifurcada inclinada para oeste; c) depleção bifurcada sem inclinação; d) bolha bifurcada inclinada para leste; e) bolha multiplamente bifurcada; d) bolha apresentando estruturas como estrias. No canto inferior esquerdo, a configuração espacial dos campos elétricos: campo vertical positivo para baixo (centro da Terra) e campo zonal positivo para leste. Direção do campo magnético para dentro do papel. As setas indicam a direção do fluxo de plasma.

Os casos representados na figura podem ser identificados nas imagens das três noites estudadas, como foi descrito anteriormente: bolhas bifurcadas, inclinadas ou apresentando estruturas finas. Assim, uma descrição de cada caso pode ajudar no entendimento dos processos dinâmicos que ocorrem nas bolhas de plasma observadas opticamente neste trabalho.

- O caso (a) representa o fluxo de plasma para cima e para a direção oeste, indicando que o campo elétrico vertical é para cima, como mostrado no painel superior – lembrando que o campo é negativo quando aponta para cima;
- Na bolha bifurcada e inclinada para oeste em (b) o campo vertical apresenta uma característica bipolar, apontando ora para cima (fluxo de plasma para oeste) ora para baixo (fluxo para leste);
- O caso (c) representa a ação de campos elétricos verticais alternados para cima e para baixo, o que promove o fluxo do plasma para oeste e para leste. A divergência

no fluxo de plasma parece um mecanismo bastante provável de formação de estruturas secundárias como bifurcações ou mesmo estrias;

- No caso (d) o fluxo nas bifurcações aponta para leste, o que indica um campo vertical para baixo.
- Na bolha (e), há duas bifurcações que se subdividem em novas bifurcações, com braços inclinados em diferentes direções. O campo elétrico na região assinalada com a linha tracejada é de natureza bipolar, ou seja, alternadamente para baixo e para cima.
- Finalmente, no caso (f) que podemos considerar como um caso de múltiplas estruturas finas, o campo elétrico vertical também apresenta natureza bipolar, alternadamente para cima e para baixo, promovendo o fluxo de plasma para oeste e para leste respectivamente.

Constatamos assim que a natureza bipolar do campo elétrico vertical pode explicar várias características das bolhas de plasma observadas opticamente, as quais resumizamos a seguir:

- 1) As bifurcações observadas nas bolhas de plasma podem ser explicadas em termos da natureza bipolar do campo elétrico, que apontando para cima e para baixo alternadamente dentro de uma depleção promoverá um fluxo divergente de plasma promovendo a ramificação da bolha.
- 2) A existência de estruturas finas na bolhas de plasma é um forte indicativo de uma estruturação fina de campo elétrico vertical, alternadamente para cima e para baixo que estabelece a morfologia das mesmas, com regiões de alta e baixa densidade. Regiões de alta e baixa densidade de plasma por sua vez se manifestam nas imagens como regiões alternadamente claras e escuras.
- 3) As inclinações das bolhas para leste ou oeste refletem a ação de campos elétricos verticais alternadamente para baixo e para cima, cujas magnitudes são maiores que as dos campos elétricos zonais.

4) Observando que durante a evolução latitudinal, ocorrem processos de sobreposição das estrias, ou mesmo subdivisão das estruturas, indica a variação do campo elétrico vertical que promove ora a convergência ora a divergência do fluxo de plasma.

Processos de formação de estruturas secundárias como bifurcações e estrias parecem envolver mecanismos físicos altamente não lineares, conforme sugerido por Aggson et al. (1996). A evolução das depleções de plasma a altitudes mais elevadas o equador está sujeita a processos dinâmicos diversos que promovem diferentes níveis de estruturação. Diferentes padrões de campos elétricos podem promover a evolução de um conjunto de estruturas finas para uma estrutura maior ou uma bifurcação pode evoluir progressivamente para uma conjunto de estruturas de menor escala.

Assim, concluímos que as observações ópticas das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm podem ser extremamente úteis na identificação de padrões de campos elétricos no interior e nas vizinhanças das bolhas de plasma, mas observações simultâneas com outras técnicas de sondagem podem ser essenciais na comprovação dos mecanismos acima descritos.

CAPÍTULO 6

DISTÚRBIOS IONOSFÉRICOS PROPAGANTES DE MÉDIA ESCALA

Os distúrbios ionosféricos propagantes de média escala, ou, *medium scale traveling ionospheric disturbances - MSTIDs* - são temas de extensivos estudos nas médias latitudes tanto no setor americano como no japonês/australiano (MENDILLO et al., 1997; GARCIA et al., 2000; OTSUKA et al., 2004; SHIOKAWA et al., 2005; SAITO et al., 1995, 1998; KELLEY E MAKELA, 2000; SAHAI et al., 2001). Estes estudos são conduzidos através de técnicas de radiossondagem (radares, ionossondas, GPS), imageamento óptico, etc. Observações de *MSTIDS* no hemisfério sul já foram reportadas para o setor longitudinal australiano em observações conjugadas nos dois hemisférios (BOWMAN, 1990; SHIOKAWA et al., 2005; OGAWA et al., 2004), e raras observações de *MSTIDs* foram reportadas no setor sul-americano. A observação óptica de *MSTIDs* na América do Sul foi reportada por Martinis et al. (2006) com imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com um imageador do tipo *all-sky* na estação de El Leoncito, Argentina. No setor brasileiro Pimenta et al. (2008) reportaram apenas recentemente as primeiras observações de *MSTIDs* na região de baixas latitudes através de imageamento óptico da emissão OI 630,0 nm. A assinatura óptica dos *MSTIDs* no setor sul-americano são bandas escuras alongadas na direção nordeste-sudoeste, que se propagam para noroeste. Devido a esta característica foram denominadas bandas termosféricas de média escala. A direção de propagação e a orientação destas estruturas sugerem fortemente que elas são originárias de regiões ionosféricas de médias latitudes, e se propagam para regiões de baixas latitudes, o que será discutido em seção posterior.

Este capítulo apresenta um estudo inédito sobre bandas termosféricas de média escala observadas nas baixas latitudes do hemisfério sul no setor brasileiro, baseados num conjunto expressivo de dados ópticos adquiridos entre os anos 1995 e 2000, além do ano de 1990 (sete anos de dados), com uma imageador *all-sky* instalado no campus do INPE em Cachoeira Paulista.

Na seção 6.1 são apresentados oito exemplos de bandas termosféricas de média escala observadas opticamente com um imageador *all-sky*. O estudo dos quatro últimos casos (seções 6.1.5 a 6.1.8) é complementado com uma análise de dados ionosféricos, obtidos por uma ionossonda digital DGS 256, também localizada em Cachoeira Paulista, nos horários de ocorrência das bandas termosféricas. Através destes dados foi possível extrair: a altura virtual da base da camada F, $h'F$; a frequência crítica do plasma, $foF2$; as variações na altura real da camada em curvas de iso-frequências, além de seqüências de ionogramas as referidas noites.

Na seção 6.3 é apresentado um estudo estatístico inédito no setor sul-americano sobre as bandas termosféricas, onde se verifica sua dependência com a atividade solar, variação anual, direção e velocidade de propagação, considerando-se 28 casos observados. Além disto, por se tratarem de eventos ocorridos em períodos geomagneticamente calmos, descartando assim a possibilidade de terem sido geradas através de perturbações em regiões aurorais, propomos uma possível fonte para as bandas termosféricas de média escala.

6.1 – OBSERVAÇÕES ÓPTICAS DAS BANDAS TERMOSFÉRICAS DE MÉDIA ESCALA ATRAVÉS DO IMAGEAMENTO DA EMISSÃO OI 630,0 nm

O imageamento óptico da emissão OI 630,0 nm é uma ferramenta bastante útil e amplamente utilizada para mapear fenômenos ionosféricos presentes na base da camada ionosférica. A emissão OI 630,0 nm apresenta um máximo na taxa de emissão na camada F em torno de 250 km (uma escala de altura abaixo do pico de densidade da camada F) e depende da densidade eletrônica e principalmente dos movimentos verticais da camada. Se a camada se encontra em altitudes mais baixas, a taxa de recombinação dissociativa dos íons O_2^+ é maior o que aumenta a taxa de emissão OI 630,0 nm. Ao se movimentar para cima a recombinação diminui reduzindo a taxa de emissão. Deste modo, regiões claras indicam que a camada está em altitudes mais baixas e regiões escuras que a camada está mais alta.

As imagens da emissão OI 630.0 nm foram obtidas com imageador *all-sky* instalado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em Cachoeira Paulista (22,7S, 45.0 W), e foram adquiridas em intervalos regulares de 20 ou 30 minutos durante o período noturno, durante a lua nova. Assim, em algumas noites há um grande conjunto de imagens, que inviabiliza a apresentação desde o início até o fim da aquisição.

Deste modo, adotamos o seguinte critério para apresentação: foi montada uma seqüência de imagens que mostra a ocorrência das bandas termosféricas e uma ou duas imagens anteriores ou posteriores ao início e ao fim da sua passagem pelo campo de visado do instrumento. O horário local (LT) de aquisição é mostrado em cada imagem. Os índices de atividade solar, F10.7 e atividade geomagnética Kp de cada noite de observação são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Índices de atividade solar e geomagnética

Noite	F10. 7 (W.m ² Hz) (Média mensal)	Kp (06:00 - 06:00) LT
27-28/Mai/95	77,1	2-, 1+, 2, 2+, 0+, 2-, 2, 2-
30-31/Ago/95	75,7	1-, 1, 1-, 1, 1-, 1-, 1-, 0+
11-12/Jun/96	71,8	1-, 2-, 1, 1, 1+, 1+, 1, 1+
31 Maio/01 jun/97	76,3	1+, 2, 3-, 3-, 3-, 1+, 1, 1+
07-08/Set/97	97,2	1-, 2, 2, 1-, 0+, 0+, 0, 0+
18-19/Jul/98	117,7	1+, 2-, 2-, 1+, 3-, 1, 1+, 2
28-29/Jul/98	117,7	1-, 2, 1+, 2, 3-, 2, 3-, 2
16-17/Jul/99	171,0	1, 1+, 1+, 1-, 1, 1-, 0+, 1-

6.1.1 – Noite de 27-28 de Maio de 1995

A Figura 6.1 apresenta a primeira seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas na noite de 27-28 de maio de 1995 (BAS), em Cachoeira Paulista (22,7S, 45.0 W, dip latitude: 18S). Nesta noite as observações tiveram início às 18:40 LT

(hora local) e se estenderam até às 05:40 LT, com boas condições de observação (céu limpo).

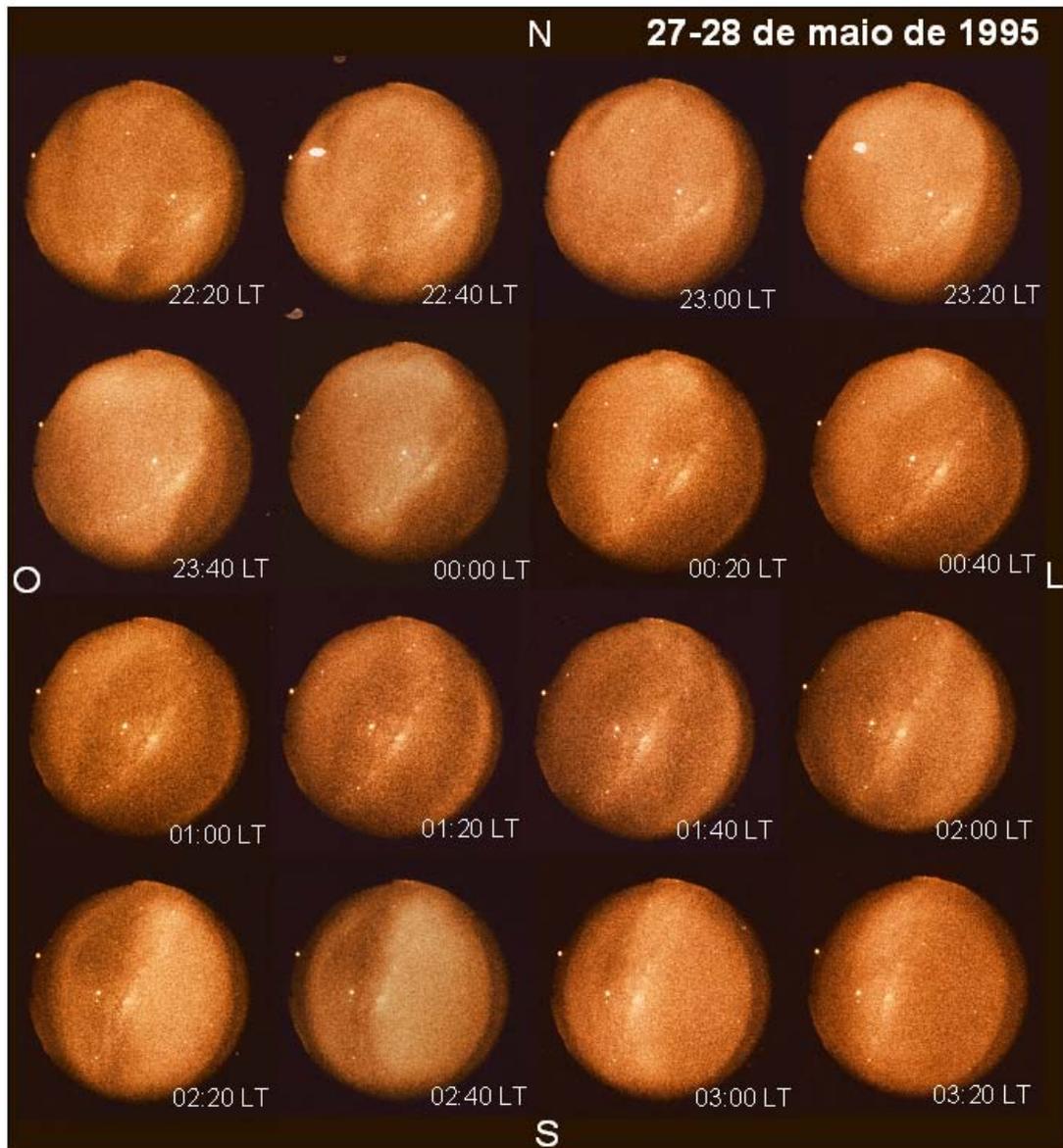


Figura 6.1: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador *all-sky* na noite de 27-28 de maio de 1995, em Cachoeira Paulista ($22,7^{\circ}$ S, $45,0^{\circ}$ W, dip latitude: 18° S). A passagem das bandas termosféricas pode ser observada a partir das 22:20 LT até as 03:20 LT. Para esta noite os índices de atividade solar e atividade geomagnética são, respectivamente: F10.7 = 77,1 (média mensal), Kp: 2-, 1+, 2, 2+, 0+, 2-, 2, 2- (06:00 - 06:00 LT).

Por volta das 22:00 LT observa-se, na região sul da imagem a presença de uma pequena estrutura escura alongada na direção nordeste-sudoeste que se propaga no campo de visão do imageador até às 22:40 LT. A estrutura escura representa uma região de baixa intensidade da emissão OI 630,0 nm. Também se pode observar uma região de baixa intensidade da emissão estendida em toda borda leste da imagem que se propaga para noroeste no decorrer no tempo. A imagem obtida às 00:40 parece revelar a existência de duas bandas escuras entremeadas por regiões claras representativas de alta intensidade da emissão. Entre as 01:20 LT e as 03:40 observa-se também a presença de uma banda escura estacionária na borda leste da imagem. O tempo total de observação das bandas termosféricas é de aproximadamente 5 horas e 30 minutos.

6.1.2 – Noite de 30-31 de Agosto de 1995

Um outro exemplo de ocorrência de bandas termosféricas é mostrado na Figura 6.2 a qual apresenta uma seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtida na noite de 30-31 de agosto de 1995 (BAS), em Cachoeira Paulista (22,7S; 45,0 W). Nesta noite a observação óptica teve início às 19:00 LT e terminou às 05:00 LT. Às 23:00 LT é possível observar o um aumento na intensidade da emissão representando pela área mais clara na imagem e o aparecimento de uma banda escura na borda leste da imagem a qual se propaga para noroeste atingindo o zênite da imagem às 00:20 LT e atingindo a borda oeste da imagem por volta das 02:00 LT. Novamente se observa a orientação das bandas escuras na direção nordeste-sudoeste e sua propagação para noroeste. Pimenta et al. (2008) estimaram a velocidade de propagação destas bandas em torno de 250 m/s.

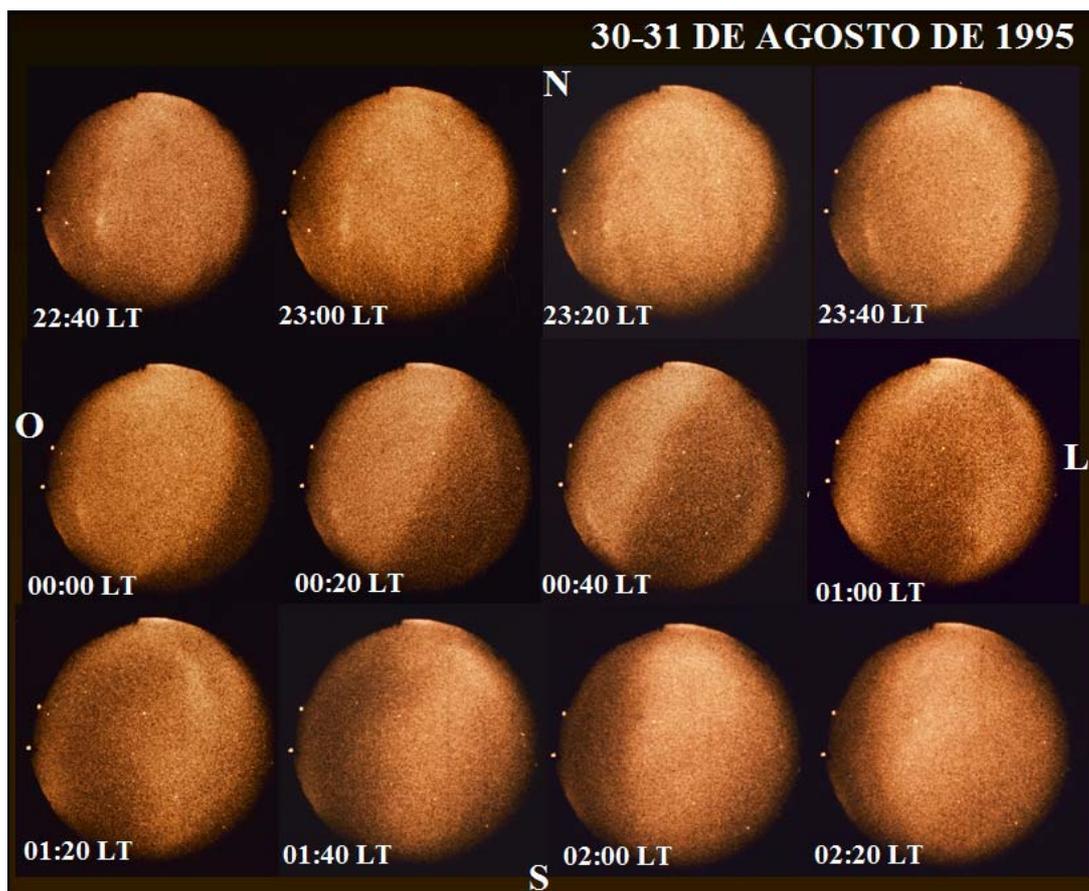


Figura 6.2: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador *all-sky* na noite de 30-31 de agosto de 1995, em Cachoeira Paulista ($22,7^{\circ}\text{S}$, $45,0^{\circ}\text{W}$, dip latitude: 18°S) (Pimenta et al., 2008) . A passagem das bandas termosféricas pode ser observada a partir das 23:20 LT até as 02:20 LT. Para esta noite os índices de atividade solar e atividade geomagnética são, respectivamente: F10.7 = 75,7 (média mensal), Kp: 1-, 1, 1-, 1, 1-, 1-, 1-, 0+ (06:00 - 06:00 LT).

6.1.3 – Noite de 31 de Maio/01 de Junho de 1997

A Figura 6.3 apresenta uma seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm na noite de 31 de maio/01 de junho de 1997, em Cachoeira Paulista ($22,7^{\circ}\text{S}$; $45,0^{\circ}\text{W}$). Nesta noite as observações tiveram início às 18:00 LT e se encerraram às 04:00 LT, sendo que nas primeiras horas da noite (18:00 às 23:00 LT) houve alguma nebulosidade (imagens não mostradas aqui).

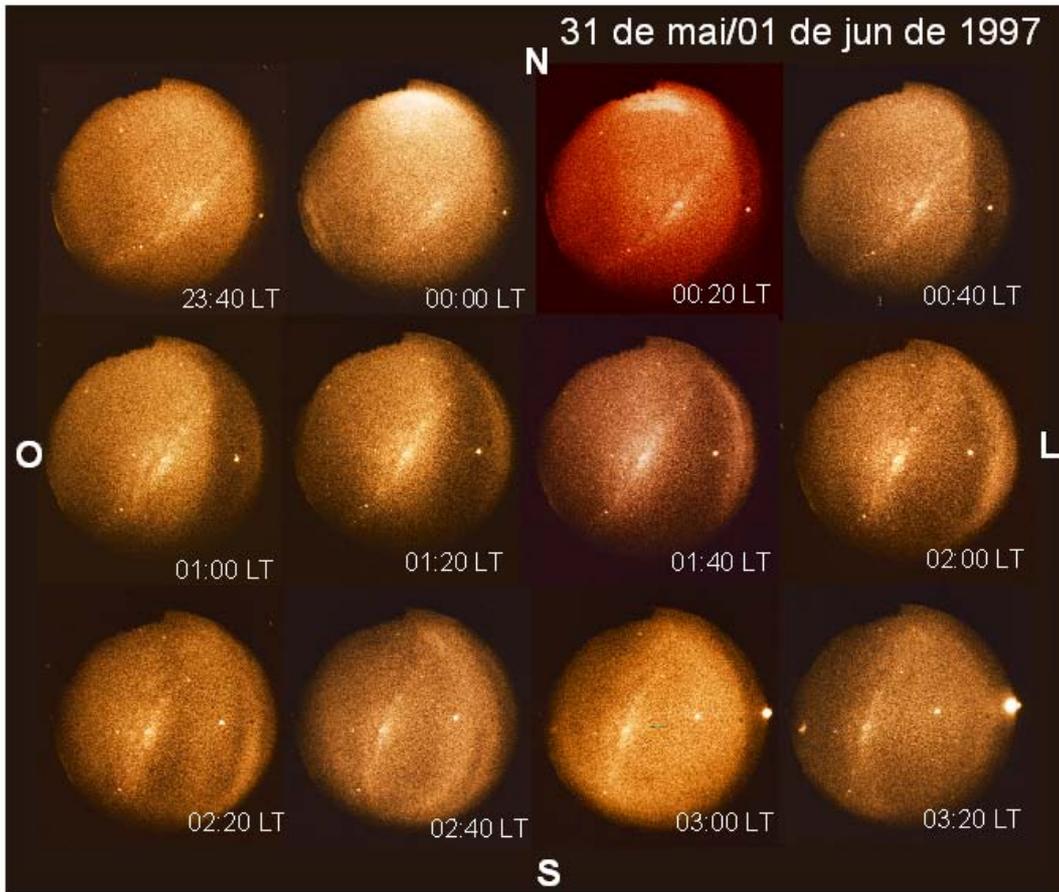


Figura 6.3: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador *all-sky* na noite de 31 de maio/01 de junho de 1997, em Cachoeira Paulista (22,7°S, 45,0°W, dip latitude: 18°S). A passagem da banda termosférica pode ser observada a partir das 23:40 LT até as 03:20 LT. Os índices de atividade solar e atividade geomagnética são, respectivamente: F10.7 = 76,3 (média mensal), Kp: 1+, 2, 3-, 3-, 3-, 1+, 1, 1+ (06:00 - 06:00 LT).

Às 23:40 pode-se observar a presença de uma região escura na borda leste da imagem, a qual se propaga para noroeste atingindo o zênite da imagem por volta as 02:00 LT. Às 02:20 LT revela-se a presença de duas bandas escuras entremeadas por uma região clara (aumento da intensidade da emissão). Estas bandas parecem se dissipar na imagem seguinte obtida às 02:40 LT. Note-se a mesma orientação (nordeste-sudoeste) e mesma direção de propagação das estruturas verificadas nas seqüências anteriores. Às 03:00 LT verifica-se a entrada da lua no campo de visão do instrumento (borda leste da imagem).

6.1.4 – Noite de 07-08 de Setembro de 1997

A Figura 6.4 apresenta uma seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm na noite de 07-08 de setembro de 1997, em Cachoeira Paulista (22,7S, 45.0 W, dip latitude: 18S). Nesta noite as observações começaram por volta das 20:20 LT devido à fase da lua, a qual permaneceu no campo de visão de instrumento até as 21:40 LT (luminosidade na borda oeste da imagem). Às 21:20 já se podem observar a ocorrência de uma região escura inclinada na borda leste da imagem e sua propagação para noroeste. À medida que se propaga pra noroeste é possível observar que banda escura é seguida de uma região clara (intensidade aumentada da emissão). Às 23:20 LT parece haver uma divisão da banda inicial em duas, as quais podem ser observadas até ~ 00:00 LT.

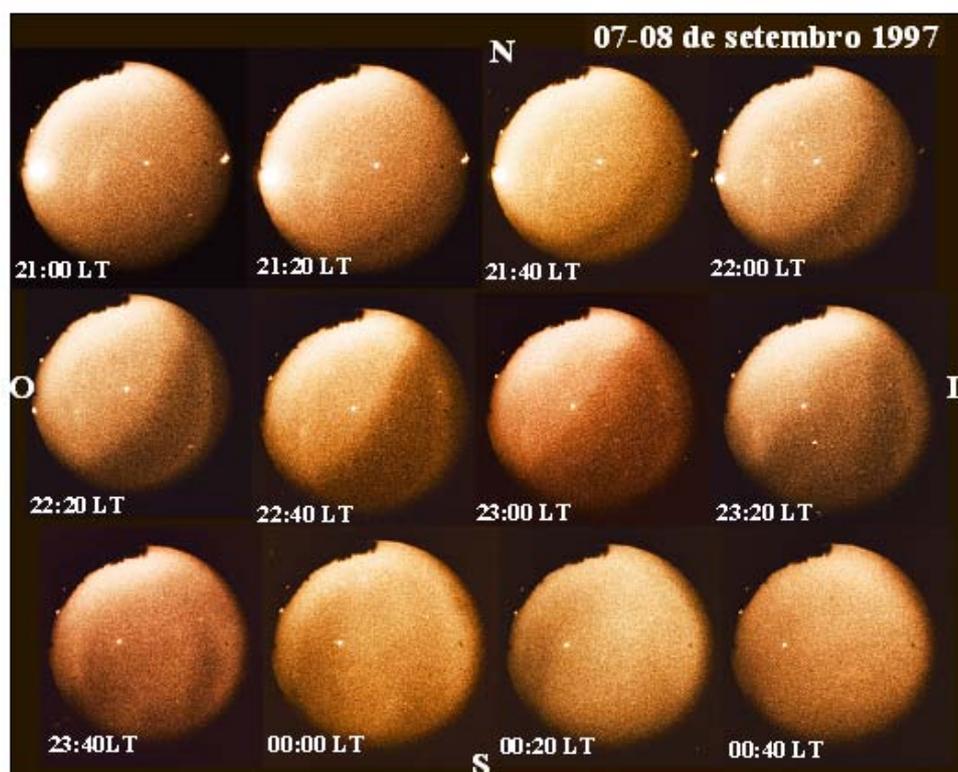


Figura 6.4: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador *all-sky* na noite de 07-08 de setembro de 1997, em Cachoeira Paulista (22,7°S, 45,0°W, dip latitude: 18°S). A passagem das bandas termosféricas ocorre a partir das 21:00 LT até as 00:20 LT. Os índices de atividade solar e atividade geomagnética são, respectivamente: F10.7 = 97,2 (média mensal), Kp: 1-, 2, 2, 1-, 0+, 0+, 0, 0+ (06:00 - 06:00 LT).

A seguir são apresentadas quatro seqüências de imagens da emissão OI 630,0 nm para as quais foi possível analisar dados ionosféricos obtidos com uma ionossonda digital instalada em Cachoeira Paulista.

6.1.5 – Noite de 11-12 de Junho de 1996

Na noite de 11-12 de junho de 1996, foram realizadas observações ópticas da emissão termosférica OI 630,0 nm entre as 18:40 LT e as 04:20, com boas condições de observação: céu limpo e sem nuvens. A Figura 6.5 apresenta uma seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm, onde se pode observar a propagação de bandas termosféricas (estruturas escuras entrando pela borda leste da imagem) a partir das 22:00 LT.

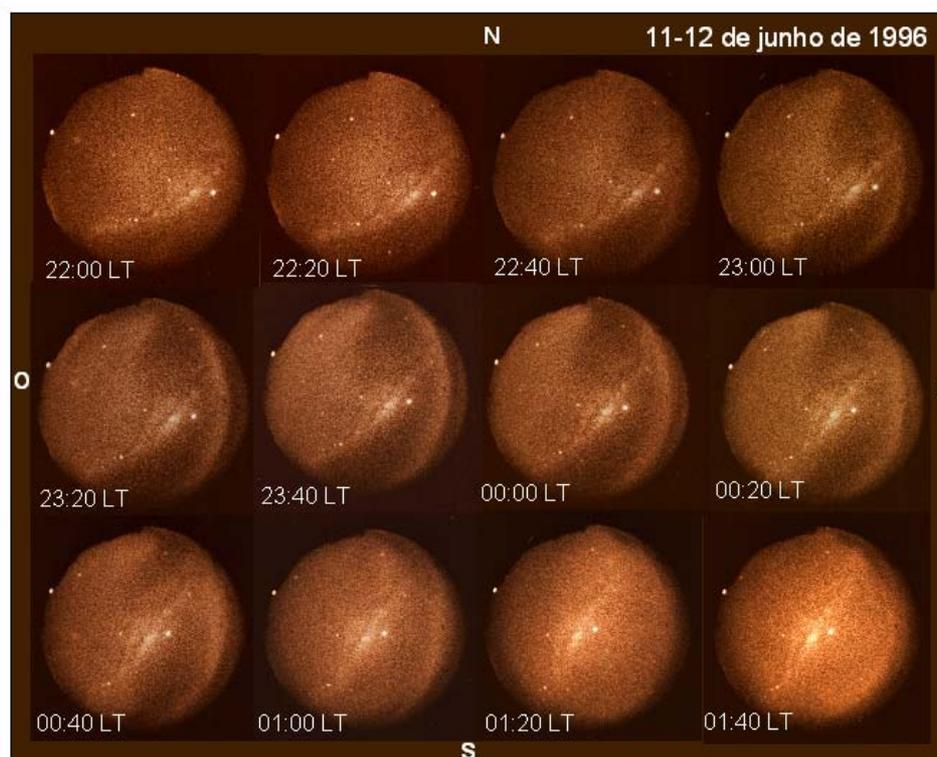


Figura 6.5: Seqüência de imagens da emissão OI 630,0 nm obtidas com imageador *all-sky* na noite de 11-12 de junho de 1996, em Cachoeira Paulista (22,7°S, 45,0°W, dip latitude: 18°S). A passagem da banda termosférica pode ser observada a partir das 22:00 LT até as 01:00 LT. Para esta noite os índices de atividade solar e atividade geomagnética são, respectivamente: F10.7 = 71,8 (média mensal), Kp: 1-, 2-, 1, 1, 1+, 1+, 1, 1+ (06:00 - 06:00 LT).

Na imagem das 23:00 LT é possível observar que a banda escura é precedida e seguida de uma região clara, que significa uma região de maior taxa de emissão da OI 630,0 nm. Esta alternância de regiões claras e escuras indica o movimento da camada entre regiões de maior e menor taxa de recombinação, respectivamente, e conseqüentemente maior ou menor taxa de emissão OI 630,0 nm. A banda escura é alongada na direção nordeste-sudoeste e se propaga para noroeste atingindo o zênite por volta das 24:00 LT. Na imagem obtida às 01:20 LT já não se pode observar sua presença tão claramente. Nesta noite esta foi a única banda detectada. De modo a investigar o comportamento da camada ionosférica durante o evento acima descrito, apresentamos na Figura 6.6 a variação da altura virtual da camada, $h'F$, e da frequência crítica de plasma, $foF2$. Na Figura 6.6 também está representado o horário de ocorrência de espalhamento por uma faixa preta horizontal. O intervalo mostrado varia entre 20:00 LT e 02:00 LT.

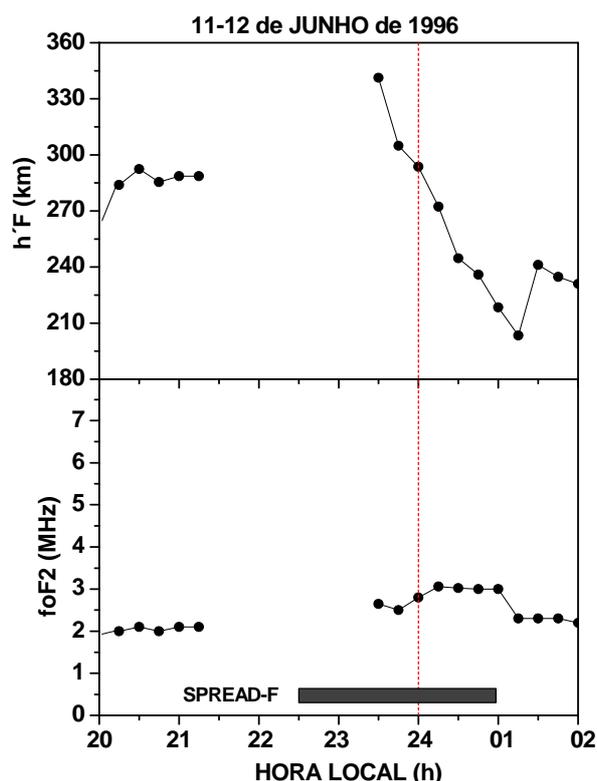


Figura 6.6: Variação noturna da altura virtual da base da camada F, $h'F$, e da frequência crítica de plasma, $foF2$, na noite de 11-12 de junho de 1996 das 20:00 LT às 02:00 LT. Passagem das bandas termosféricas: 22:00 às 01:00 LT.

No início do período mostrado a altura virtual da base da camada F estava em um patamar em torno de 290 km e a frequência crítica próximo a 2,0 MHz. Entre as 21:15 LT e as 23:30 LT não foi possível extrair os parâmetros ionosféricos, principalmente devido à baixa densidade eletrônica da camada neste horário. Este período de ausência de dados abrange os primeiros 90 minutos de observação da banda termosférica que ocorre entre 22:00 LT e 01:00 LT - Figura 6.5. A partir das 23:30 LT foi possível novamente extrair h'F e foF2 dos ionogramas. Pela Figura 6.6 percebe-se que, neste horário, a altura virtual da camada encontra-se em 340 km enquanto que foF2 está em torno de 2,7 MHz. A partir das 23:30 LT observa-se que h'F decresce para atingir 200 km a 01:15 LT enquanto foF2 se eleva até 3,1 MHz após a meia noite, mantendo esse patamar para só retornar a 2,3 MHz uma hora mais tarde.

Apesar de não mostrar o horário exato onde a camada atingiu o valor máximo de h'F e o valor mínimo de foF2, as curvas da Figura 6.6 indicam que isso ocorreu entre 21:30 LT e 23:30 LT, ou seja, durante a ocorrência da banda termosférica ou, no máximo, 30 minutos antes da sua visualização nas imagens da Figura 6.5. No caso da altura virtual da camada isso fica evidente pelo próprio comportamento da curva que mostra a camada em 290 km antes do período sem dados, para posteriormente mostrar uma redução da altura de um patamar 50 km acima. Já pela curva da frequência crítica não é tão evidente que foF2 tenha passado por um mínimo no período de interrupção. Porém, analisando os ionogramas, observa-se que o principal motivo para a falta de dados no período é justamente os baixos valores para a densidade eletrônica da camada que faz com que os ionogramas não possam ser visualizados completamente na faixa de observação (a partir de 1,5 MHz). Nesse período, portanto, foF2 atingiu valores abaixo dos 2,2 MHz observados às 21:15 LT. Neste caso, percebe-se que a passagem da banda ocorre concomitantemente com a subida da camada e a diminuição da densidade eletrônica, também ocasionando espalhamento nos ionogramas. Pode-se perceber que em menos de 30 minutos, a partir da 01:00 LT (fim do spread-F), há também uma redução na densidade eletrônica (indicada pela queda de foF2) associada a uma pequena elevação da camada a uma altura de aproximadamente 240 km.

Porém, esta variação não provoca Spread-F e também não existe observação óptica de nenhuma banda associada a este comportamento da camada.

Na Figura 6.7 é apresentada uma seqüência de ionogramas obtidos na noite de 11-12 de junho de 1996, entre as 22:00 LT e 01:15 LT, no qual se pode observar as variações na frequência crítica de plasma, foF2, e na altura virtual da base da camada, h'F. Por volta das 22:45 LT é possível observar a ocorrência de spread-F que parece ser do tipo misto (*range + frequency*) que se estende até a 01:00 LT (duração aproximada de mais de 2 horas). Por causa da dificuldade de classificação devido à baixa densidade eletrônica da camada F neste período, o Spread-F observado até as 23:45 LT pode ser do tipo misto (*range e frequency*) ou do tipo frequência, como o observado nos ionogramas das 24:00 LT à 01:00.

11-12 de JUNHO de 1996

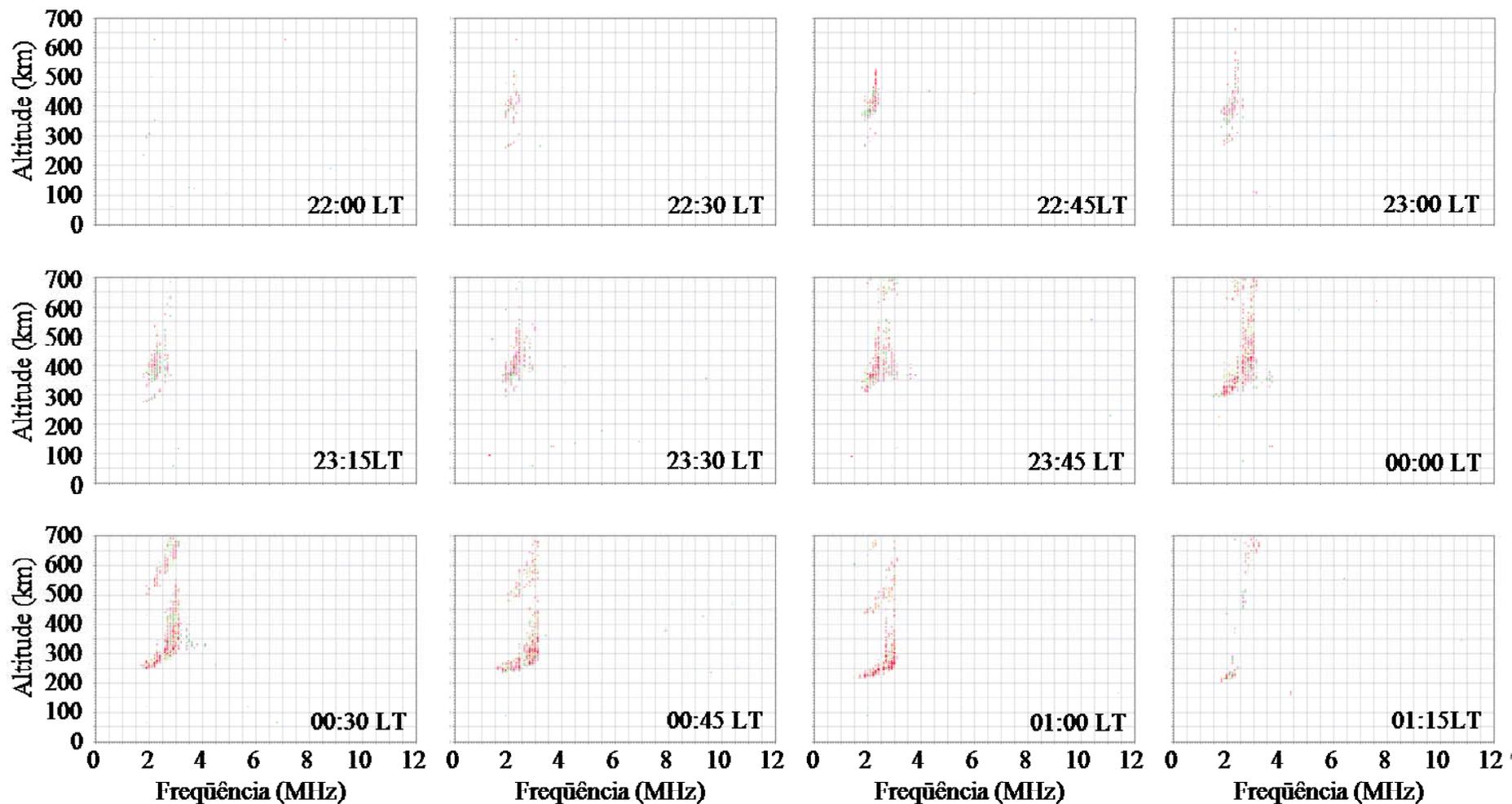


Figura 6.7: Seqüência de ionogramas obtida na noite de 11-12 de junho de 1996, em Cachoeira Paulista, entre 22:00 LT e 01:15 LT

6.1.6 – Noite de 18-19 de Julho de 1998

Na Figura 6.8 é apresentada uma seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas na noite de 18-19 de julho de 1998, em Cachoeira Paulista (22,7° S, 45,0° W), no intervalo entre 22:00 LT e 03:40 LT.



Figura 6.8: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador *all-sky* na noite de 18-19 de julho de 1998, em Cachoeira Paulista (22,7°S, 45,0°W). Os índices de atividade solar e atividade geomagnética são, respectivamente: F10.7 = 117,7 (média mensal), Kp: 1+, 2-, 2-, 1+, 3-, 1, 1+, 2 (06:00 - 06:00 LT).

Nesta noite as observações ópticas ocorreram entre as 19:00 LT e as 04:00 LT. Às 22:00 há uma intensa área clara ao norte da imagem, que se expande significativamente entre as 22:40 e 23:00 LT, ocupando quase toda a área da imagem. Na borda sudeste também há uma região mais escura não claramente definida como banda termosférica. Na imagem seguinte às 23:40 a imagem volta a ficar escura sendo que às 00:00 LT surge novamente uma área clara ao norte da imagem que parece se expandir até o zênite da mesma. Apesar da evolução desta área clara, a partir das 23:40 pode-se identificar uma banda termosférica no sudeste da imagem que avança para o centro da mesma e parece atingir o zênite de 20 a 40 minutos depois. Por fim, a banda se dissipa por volta da 00:40 LT. Às 02:00 LT há a presença de outra região escura na borda sul que, na imagem posterior às 02:20 LT, se revela uma nova banda termosférica, seguida de uma região mais clara e outra banda escura na borda leste. Esta banda escura na borda leste avança no sentido noroeste e, nas imagens subseqüentes (as 03:00 e as 03:20 LT), apresenta-se como uma estrutura de periodicidade bem definida (revela-se como três estruturas escuras entremeadas por regiões claras), que parecem ter desaparecido completamente às 03:40 LT.

As variações na intensidade da imagem revelam movimentos verticais da base da camada F, o que pode ser confirmado pelo gráfico da variação de $h'F$ exposto na Figura 6.9. O gráfico 6.9 mostra a variação de $h'F$ e $foF2$ entre as 22:00 LT e as 04:00 LT para a noite de 18-19 de julho de 1998.

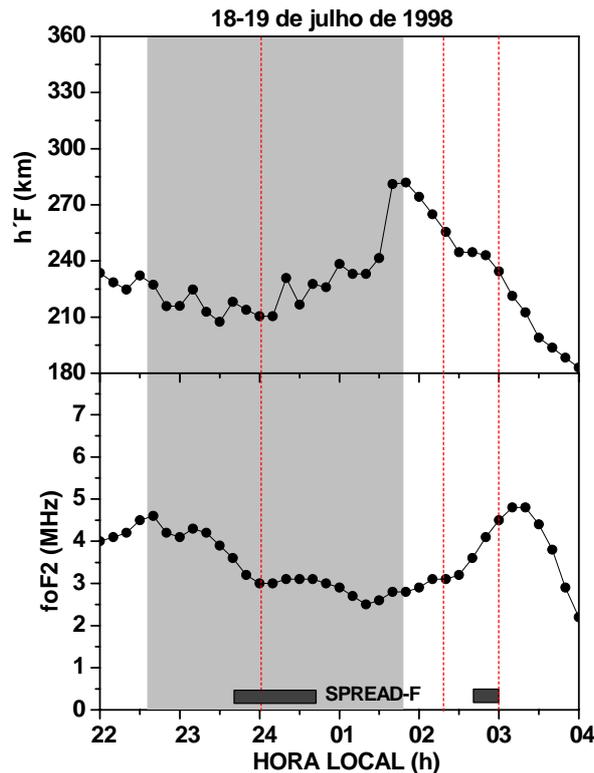


Figura 6.9: Variação noturna da altura da base da camada F, $h'F$, e da frequência crítica de plasma, $foF2$, na noite de 18-19 de julho de 1998. As linhas pontilhadas indicam a observação óptica de bandas termosféricas de média escala sobre o zênite. O retângulo cinza demarca o período inicial de decréscimo da densidade eletrônica simultaneamente ao início da subida da camada F até esta atingir o valor máximo. Passagem da banda: 23:40-03:20 LT.

Pode-se observar na Figura 6.9 que $h'F$ diminui gradativamente atingindo um valor mínimo aproximado de 210 km por volta das 23:30 LT. A partir das 23:30 LT $h'F$ começa a aumentar sendo que depois da 01:20 LT cresce abruptamente atingindo um valor máximo de 280 km a 01:40 LT. Após atingir este pico, a camada passa a reduzir a sua altitude consideravelmente, como mostra a queda de $h'F$ por duas horas. Por outro lado, $foF2$ sofre variações, diminuindo gradativamente até atingir um valor mínimo de 2,5 MHz a 01:15 LT, para depois subir e atingir um pico às 03:15 LT, antes de voltar a cair. Em uma comparação entre as variações das intensidades das imagens da Figura 6.8 e dos parâmetros ionosféricos da Figura 6.9 observa-se que os dois períodos de mais alta intensidade nas imagens (22:00 LT a 23:00 LT e 3:00 LT a 03:40 LT) correspondem a horários em que a altura da camada estava baixa e a densidade eletrônica estava próxima dos valores mais altos atingidos no

período ($f_oF2 > 4$ MHz). O pico de densidade eletrônica ocorrido por volta das 03:20 LT simultâneo à descida da camada F são exemplos de efeitos responsáveis por provocar o aumento da emissão OI 630,0 nm, posto que essa emissão depende tanto da densidade eletrônica como dos movimentos verticais da camada F.

Sobrepostas a esta variação global observam-se oscilações de menor amplitude em h'F com períodos aproximados de 30 minutos distinguíveis principalmente até a 01:30 LT. O comportamento global de foF2 descrito acima também é acompanhado por algumas oscilações que evidenciam dois picos (22:30 LT e 23:15 LT) e posteriormente dois mínimos (24:00 LT e 01:15 LT).

As linhas pontilhadas na Figura 6.9 indicam o horário da observação óptica de bandas termosféricas sobre o zênite da imagem (Cachoeira Paulista). A área destacada em cinza na Figura 6.9 evidencia a relação entre a diminuição da densidade de plasma, expressa inicialmente pela queda de foF2 a partir de 22:35 LT, e a elevação súbita da base da camada F, que atinge o seu valor máximo a 01:45 LT. Esse valor máximo é alcançado por h'F cerca de 25 minutos depois de foF2 atingir o seu valor mínimo a 01:20 LT.

As 03:00 LT e 03:20 LT podemos observar a presença de uma estrutura de onda com periodicidade bem definida na imagem e que parecem ter sido pronunciadas pelo aumento de foF2. No entanto, vinte minutos depois (03:40 LT) parece que a diminuição da densidade eletrônica conjuntamente com a brusca descida da camada impediu completamente a sua observação. A intensa luminosidade observada nas imagens entre 02:40 LT e 03:40 LT pode estar relacionada com a ocorrência de uma onda luminosa - *Brighthness wave* - (Pimenta et al., 2008). Este tipo de evento está associado a um aumento da temperatura ionosférica e à inversão da direção do vento meridional do equador para o pólo. Tal inversão promove a redução da altura da camada F no hemisfério de origem do vento para regiões de maior produção da luminescência noturna (COLÉRICO et al., 1996, 2002).

A ocorrência de *spread-F* do tipo frequência também é assinalada na Figura 6.9 através de duas barras horizontais: uma entre 23:40 LT e 00:40 LT e outra no intervalo entre 02:40 LT e 03:00 LT. No primeiro caso podemos observar que o *spread-F* se inicia 20 minutos antes da banda termosférica atingir o zênite (linha tracejada às 24:00 LT). Por outro lado o *spread-F* observado entre as 02:40 e 03:00 parece estar associado à presença das três bandas termosféricas observadas sobre o zênite da imagem, embora estas bandas tenham sido obscurecidas pela intensa luminosidade depois das 03:20 LT.

A diminuição de foF2 associada à elevação da camada F durante a passagem de bandas termosféricas (área destacada em cinza) é similar ao reportado por Bowman (1990, 1991) em seus trabalhos sobre *Spread-F* relacionado a bandas termosféricas em médias latitudes. O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 6.10 (gráfico de isofrequências) acompanhando-se as variações da curva referente a 2 MHz. As grandes variações que podem ser observadas para as duas frequências maiores trata-se apenas de um efeito aparente devido à baixa densidade da camada no período e não representam um movimento real da camada.

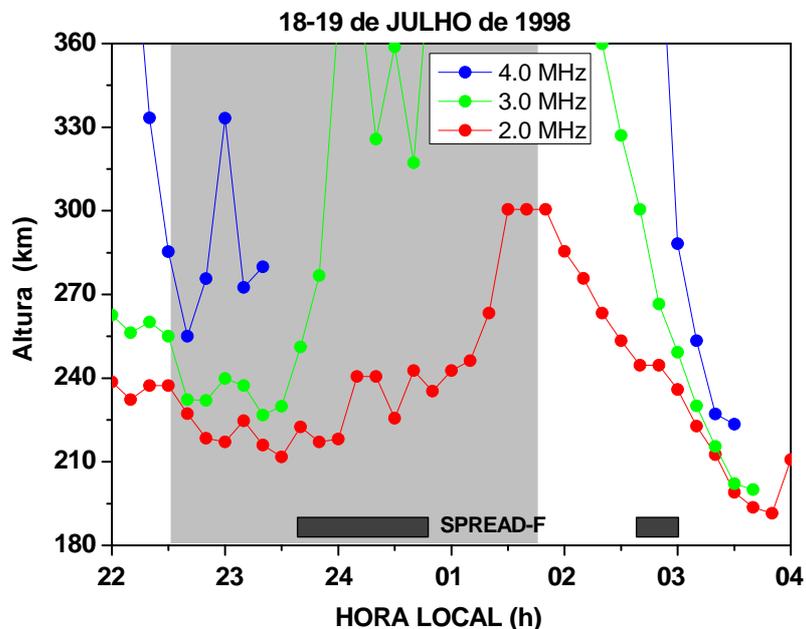


Figura 6.10: Variação da altura real da camada F para as frequências 2, 3 e 4 MHz.

Na Figura 6.11 é apresentada a seqüência de ionogramas da noite de 18-19 de julho de 1998, adquiridos entre 22:00 LT e 01:00 LT. Neste período, observa-se um deslocamento dos ionogramas para baixas freqüências relacionado com a redução da densidade eletrônica na camada F. Também se pode observar o início de um spread-F em freqüência que começa as 23:40 LT e se estende até aproximadamente 24:40 LT.

Na Figura 6.12 é mostrada outra seqüência de ionogramas registrada entre 01:20 e 04:00 LT para a mesma noite. Oscilações na altura virtual da base da camada e na freqüência crítica de plasma são observadas, bem como a ocorrência de spread-F entre 02:40 LT e 03:00 LT. Às 02:40 LT o ionograma apresenta um fraco traço extra paralelo ao principal mencionado algumas vezes como sendo um traço característico da passagem de bandas termosféricas em médias latitudes (BOWMAN,1990, 1991).

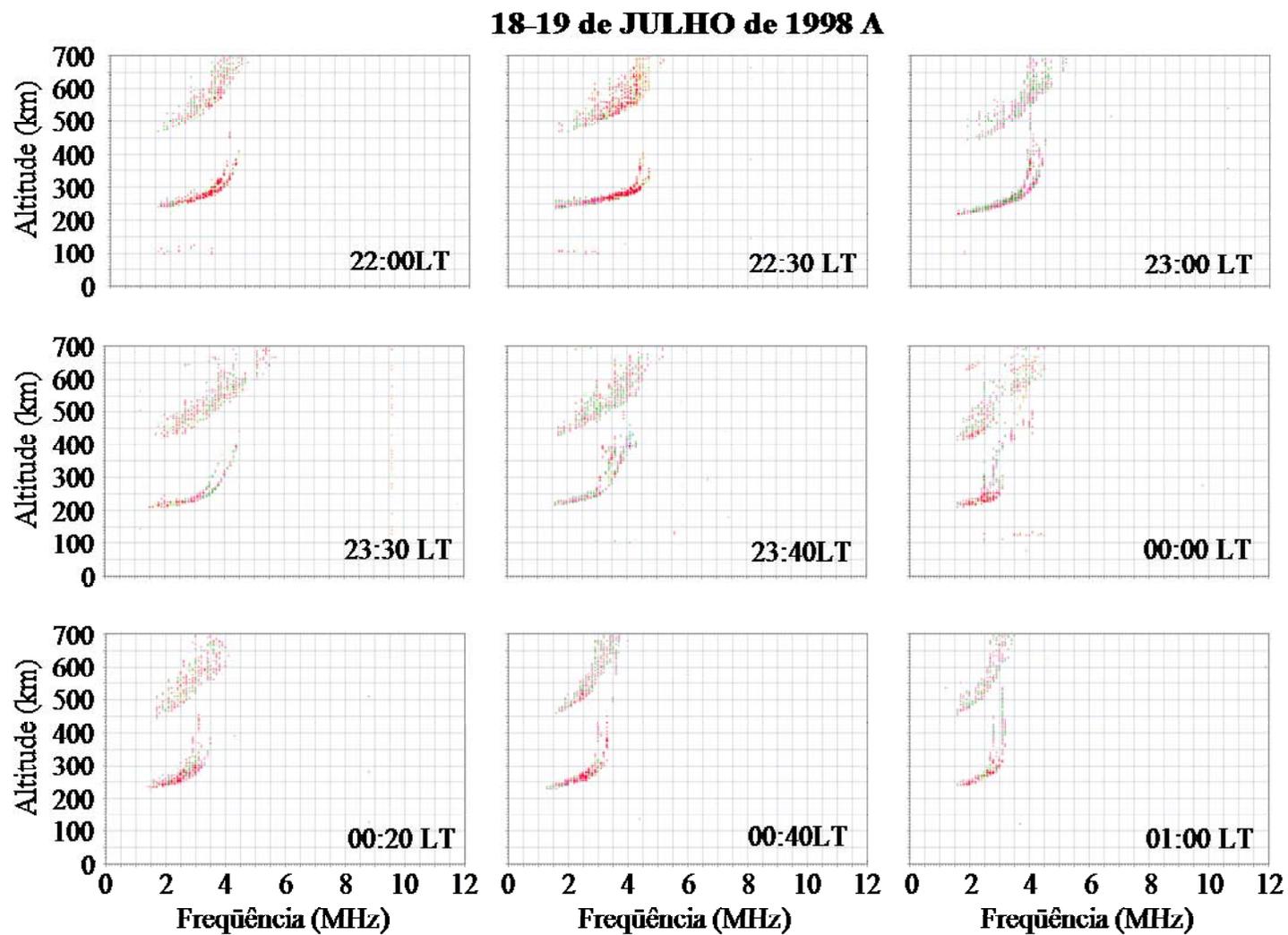


Figura 6.11: Seqüência de ionogramas obtida na noite de 18-19 de julho de 1998, em Cachoeira Paulista, entre 22:00 LT e 01:00 LT.

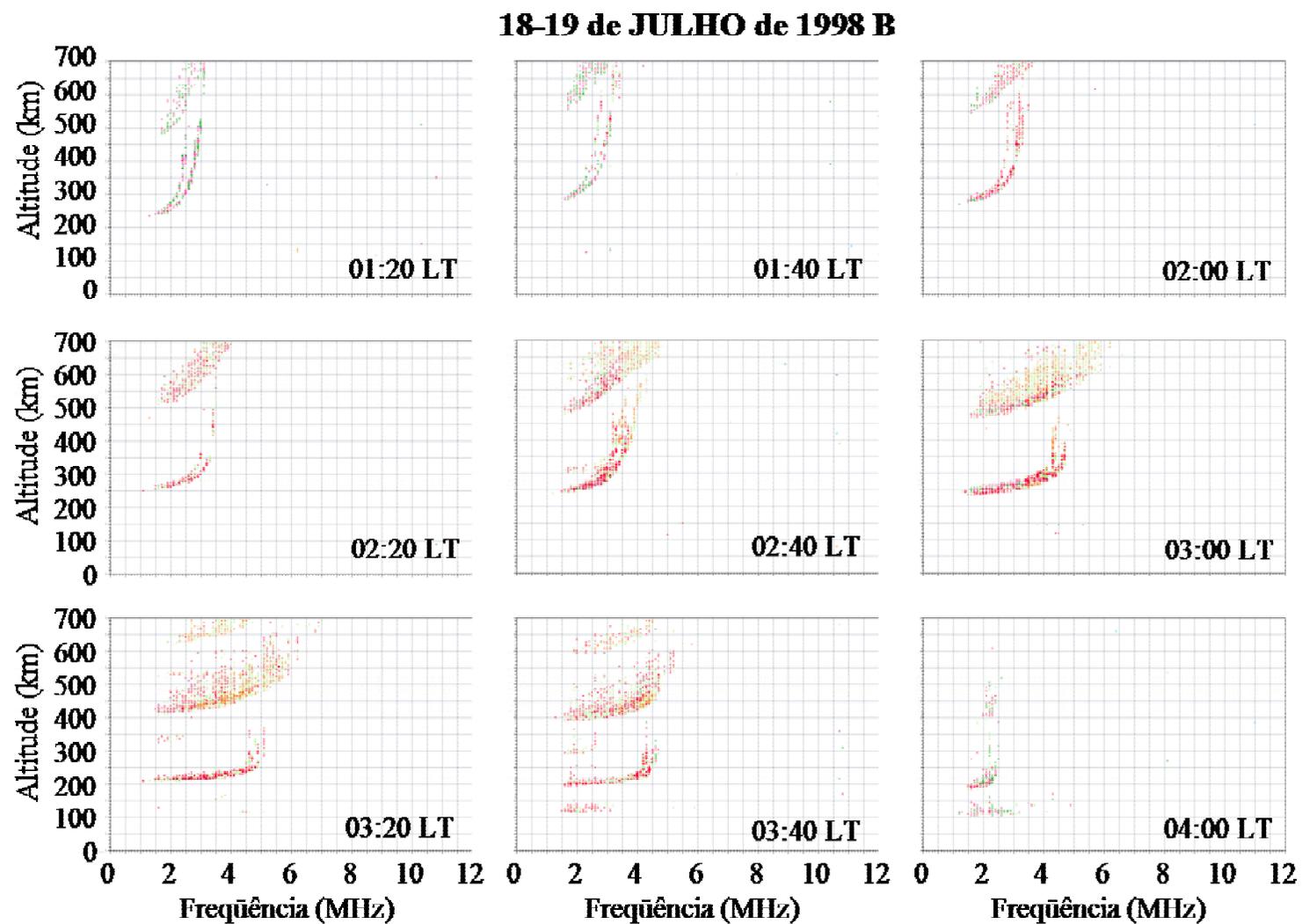


Figura 6.12: Seqüência de ionogramas obtida na noite de 18-19 de julho de 1998, em Cachoeira Paulista, entre 01:20 e 03:40 LT.

6.1.7 – Noite de 28-29 de Julho de 1998

A Figura 6.13 apresenta uma seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas na noite de 28-29 de julho de 1998, em Cachoeira Paulista (22,7S, 45,0° W), onde se observa a passagem das bandas termosféricas pelo campo de visada do imageador entre as 01:40 e 04:00 LT (~ 2,5 h). Pimenta et al. (2008) reportaram uma análise de dados de radiossondagem (ionossonda) em que se observa um aumento abrupto na densidade do plasma (aumento da frequência crítica de plasma, foF2) concomitantemente ao decréscimo da altura da base h'F a 220 km e do pico da camada F, hpF2, em 300 km. A grande área clara observada entre as 02:00 LT e 02:40 LT foi associada a uma possível ocorrência de uma onda luminosa (*brightness wave*) associada ao aumento da temperatura termosférica e à inversão do vento meridional do equador para o pólo e reportada por Colérico et al. (1996).

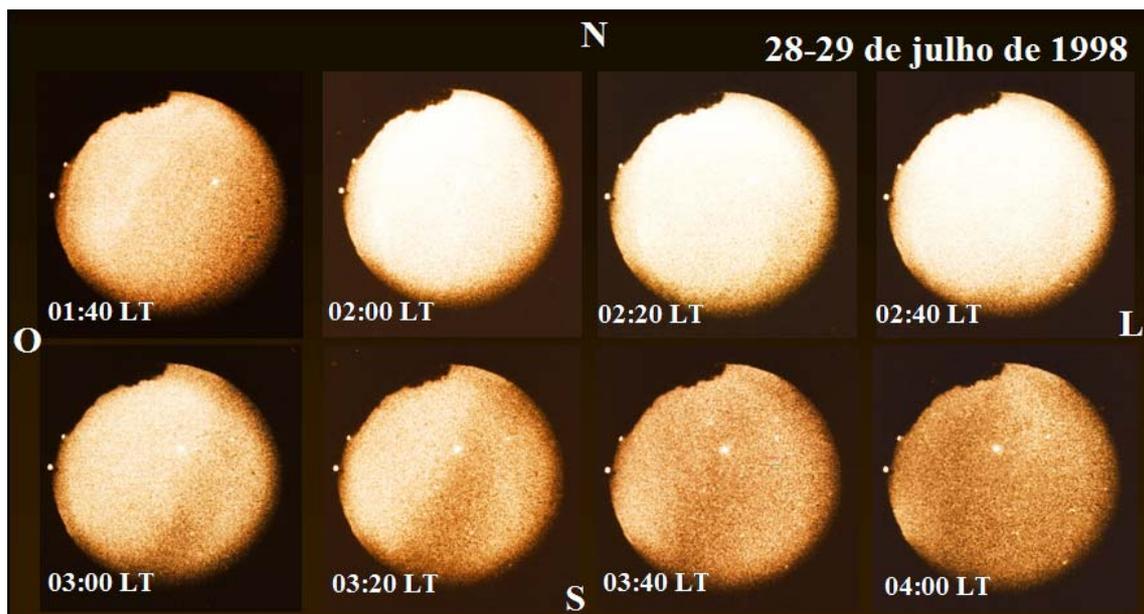


Figura 6.13: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador *all-sky* na noite de 28-29 de julho de 1998, em Cachoeira Paulista (22,7°S, 45,0°W). Os índices de atividade solar e atividade geomagnética são, respectivamente: F10.7 = 117,7 (média mensal), Kp: 1-, 2, 1+, 2, 3-, 2, 3-, 2 (06:00 - 06:00 LT).

As variações de intensidade mostradas na seqüência de imagens da emissão OI 630,0 nm na noite de 28-29 de julho de 1998 podem ser analisadas através de dados ionosféricos, como a variação da altura virtual da base da camada, $h'F$, mostrada na Figura 6.14.

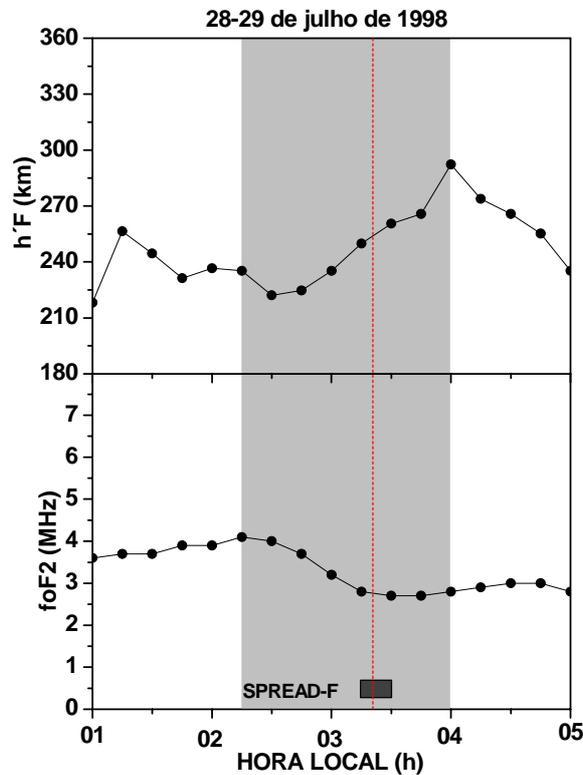


Figura 6.14: Variação noturna da altura da base da camada F, $h'F$, e da frequência crítica de plasma, foF2, na noite de 28-29 de julho de 1998. A linha tracejada indica a observação óptica de bandas termosféricas de média escala sobre o zênite. O retângulo cinza demarca o período inicial de decréscimo da densidade eletrônica simultaneamente ao início da subida da camada F, até a camada atingir a altura máxima, quando a densidade eletrônica começa a se elevar.

De modo geral, o parâmetro $h'F$ apresenta variações no decorrer da noite, entre as 01:00 LT e 05:00 LT. Porém, pode-se observar que por volta das 02:30 LT há uma subida da camada, partindo de 220 km até atingir 290 km às 04:00 LT. Por volta das 02:20 LT o parâmetro foF2 está em 4 MHz. A partir daí a frequência crítica do plasma sofre uma diminuição atingindo o valor mínimo de 2,7 MHz às 03:30 LT. É interessante notar que o decréscimo do parâmetro foF2 tem início quando a camada F oscila para baixo antes de começar a subir até atingir 290 km e, após foF2 atingir seu valor mínimo, a camada ainda se eleva por cerca de 30 minutos (área cinza).

Estas variações na camada parecem estar associadas à passagem de bandas termosféricas sobre Cachoeira Paulista, mostrada nas imagens da Figura 6.13 e assinalada na Figura 6.14, pela linha pontilhada correspondendo ao horário da sua passagem pelo zênite.

O período de quarenta minutos após as 02:00 LT em que $h'F$ atingiu o seu valor mínimo ao mesmo tempo em que foF_2 estava no seu valor máximo pode ser observado nas imagens mostradas na Figura 6.13 como regiões de intensa luminosidade e que estão relacionadas à maior intensidades da emissão OI 630,0 nm.

A Figura 6.15 ilustra as variações noturnas da altura da camada F para as seguintes freqüências: 1, 2 e 3 MHz. As duas freqüências menores mostram as mesmas variações características observadas na Figura 6.14 para $h'F$. A partir das 3:00 LT, devido aos baixos valores de densidade eletrônica atingidos, não é possível acompanhar o movimento da camada através da freqüência de 3 MHz.

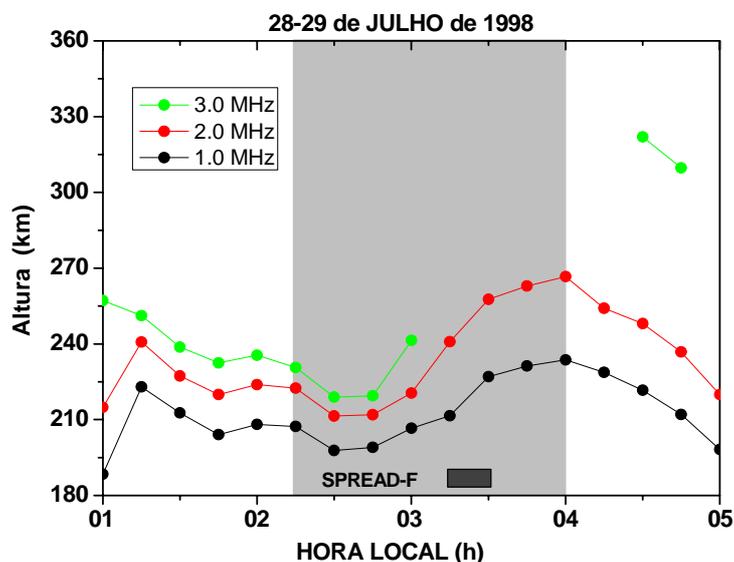


Figura 6.15: Variação da altura real da camada F para as freqüências 1, 2 e 3 MHz.

Os ionogramas obtidos na noite de 28-29 de julho de 1998 em Cachoeira Paulista são mostrados na Figura 6.16, no intervalo entre 01:00 LT e 03:45 LT. Nesta seqüência observam-se as variações na altura virtual e na freqüência crítica do plasma e as 03:15 LT a ocorrência de Spread-F em freqüência na elevação da camada.

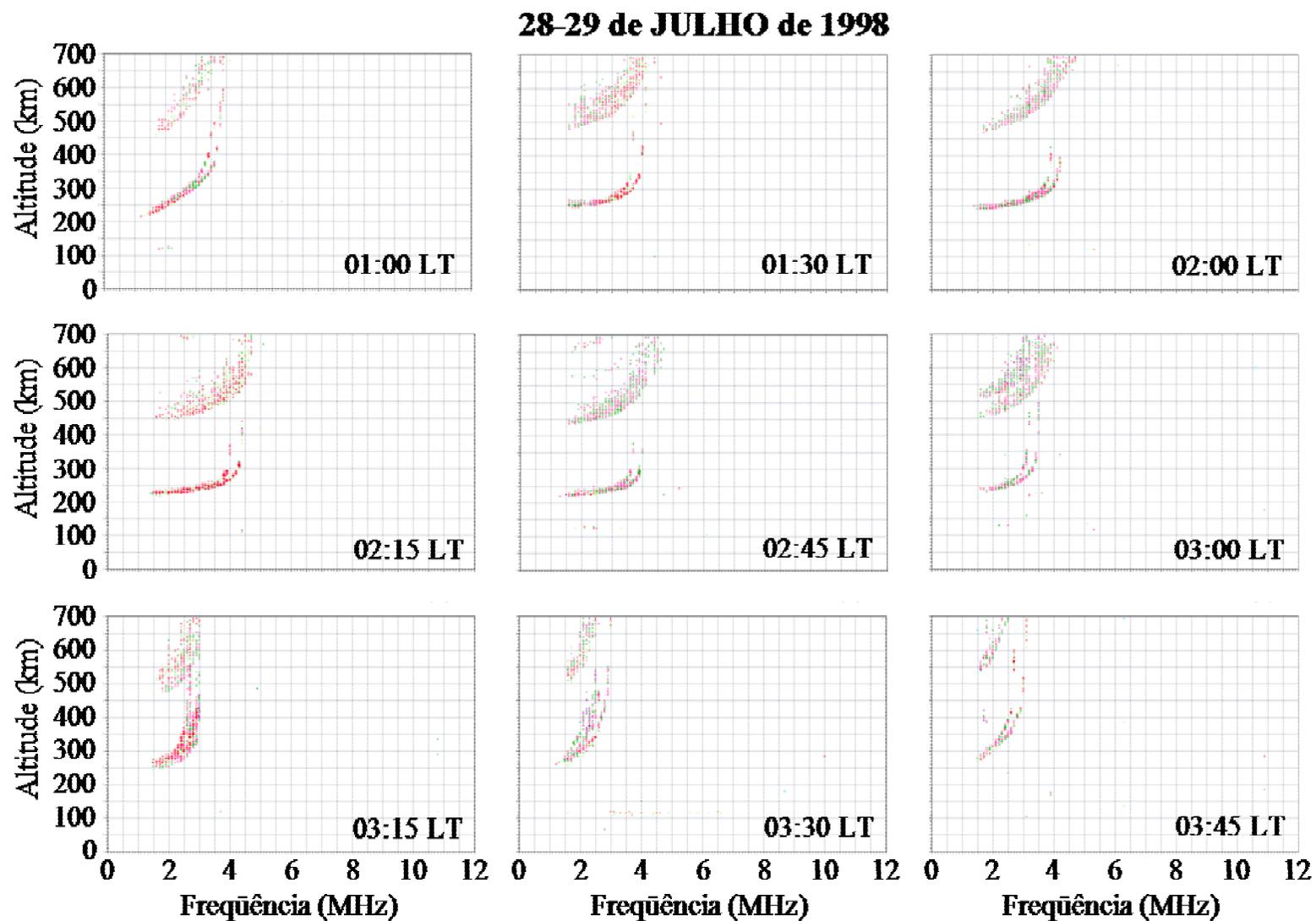


Figura 6.16: Seqüência de ionogramas obtida na noite de 28-29 de julho de 1998, em Cachoeira Paulista.

6.1.8 – Noite de 16-17 de Julho de 1999

O último exemplo a ser apresentado é mostrado na Figura 6.17 numa seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas na noite de 16-17 de julho de 1999 (observações ópticas entre 19:30 LT e 04:30 LT com nebulosidade). Este noite é caracterizada pela ocorrência de uma única banda escura se propagando para noroeste entre as 23:00 LT e as 01:30 LT (2,5 horas de ocorrência). Na parte superior das imagens verifica-se a presença de algumas nuvens.

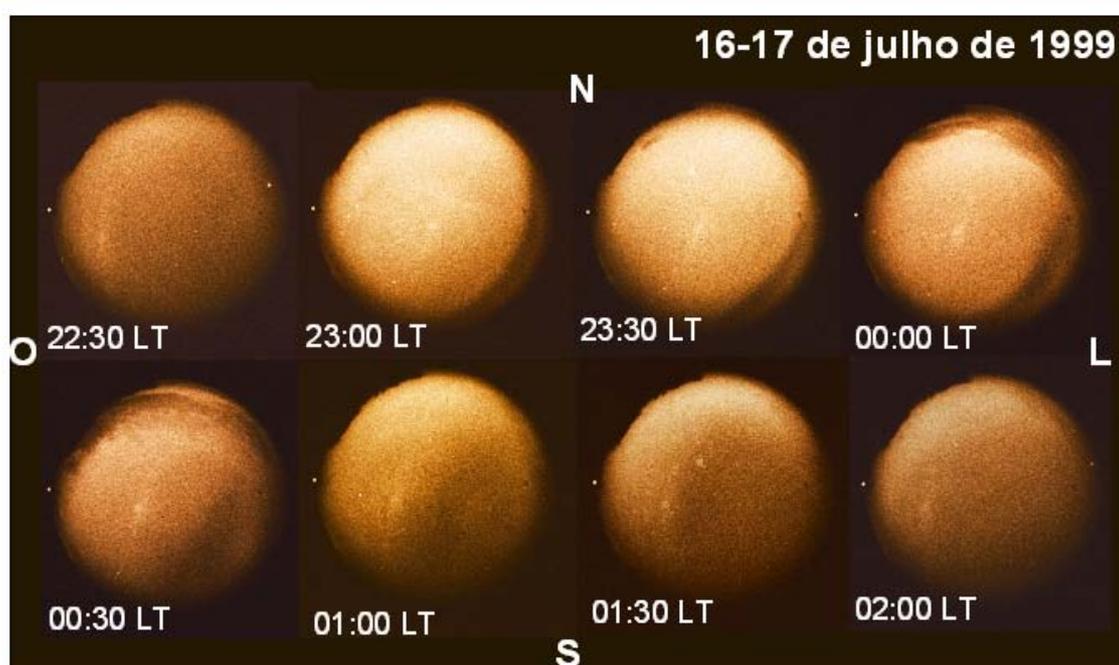


Figura 6.17: Seqüência de imagens da emissão OI 630.0 nm obtidas com imageador *all-sky* na noite de 16-17 de julho de 1999, em Cachoeira Paulista (22,7S, 45.0 W). Os índices de atividade solar e atividade geomagnética são, respectivamente: F10.7 = 153,8 (média mensal), Kp: 1, 1+, 1+, 1-, 1, 1-, 0+, 1- (06:00 - 06:00 LT).

As variações da altura virtual da camada F, h'F e na freqüência foF2 são mostradas na Figura 6.18. Observando-se o comportamento da altura virtual da base da camada pode-se notar que h'F apresenta pequenas oscilações durante o intervalo mostrado com períodos em torno de 40 minutos. Além disto h'F apresenta um valor mínimo próximo a 210 km as 23:10 LT e um valor máximo igual a 240 km a 01:00 LT. O parâmetro foF2 também sofre oscilações, decrescendo continuamente durante todo o intervalo. As 22:30 LT a freqüência crítica de plasma estava em 7 MHz. Logo

após inicia-se o decréscimo de foF2 até atingir 4,6 MHz as 00:40 LT. Durante essa queda de densidade eletrônica a altura virtual da camada é levemente reduzida antes de atingir o seu valor mínimo para, posteriormente, apresentar um pequeno aumento até que atinja o máximo valor do intervalo, em torno de 240 km às 01:00 LT (área destacada em cinza). A barra horizontal mostra o intervalo de ocorrência do Spread-F entre as 00:45 e 01:00 LT. É interessante notar que a ocorrência do Spread-F tem início quando foF2 atingiu seu valor mínimo e desaparece com a observação óptica da banda termosférica no zênite da imagem em Cachoeira Paulista (linha pontilhada logo depois da 01:00 LT).

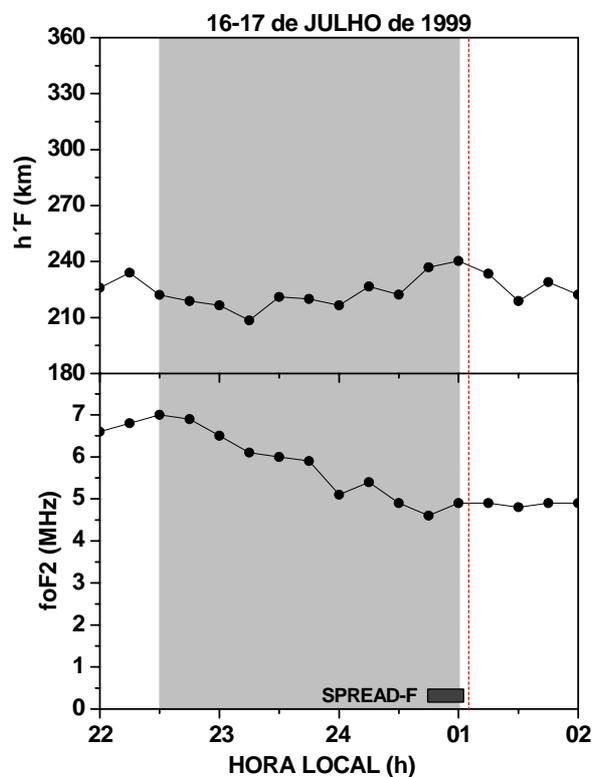


Figura 6.18: Variação da altura virtual da base da camada F, $h'F$, e da frequência crítica de plasma, foF2, na noite de 16-17 de julho de 1999 entre 22:00 LT e 02:00 LT. Passagem da banda termosférica: ~23:00 às 01:30 LT.

A Figura 6.19 ilustra as variações da altura da camada F para as frequências: 1, 2, 3, 4, 5 e 6 MHz, entre 22:00 LT e 02:00 LT, mostrando em mais detalhes as variações percebidas em $h'F$. Dentre os casos estudados com a utilização de dados de ionossonda digital este é o que apresentou os maiores valores para foF2, Figura 6.18. Isso permite que se possa acompanhar a variação da altura em todo o período

analisado utilizando-se iso-freqüências de até 4 MHz. As oscilações observadas em 1, 2, 3 e 4 MHz são idênticas e ocorrem no mesmo instante, indicando que a camada como um todo está realizando esse movimento e não apenas a sua base.

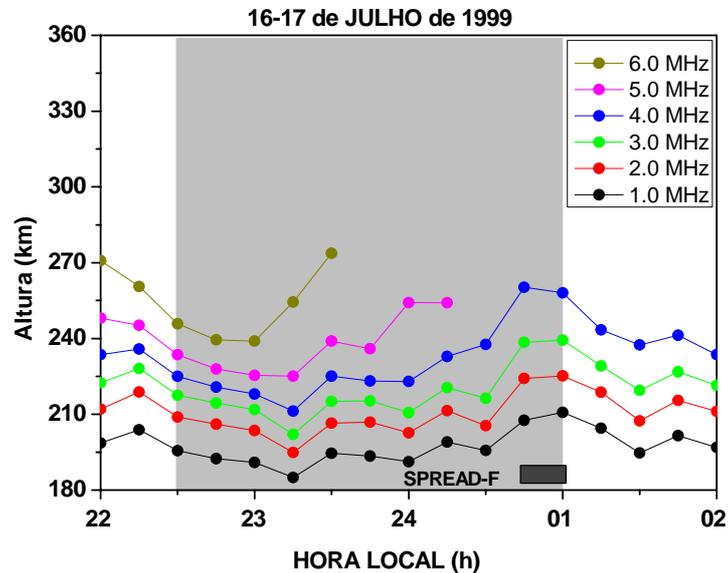


Figura 6.19: Variação da altura real da camada F na noite de 16-17 de julho de 1999 para as freqüências 1 a 6 MHz.

A Figura 6.20 ilustra a seqüência de ionogramas da noite de 16-17 de 1999, registrados entre as 22:00 LT e 01:15 LT, onde se pode observar variações na densidade eletrônica da camada e na sua altura, bem como a ocorrência de Spread-F em freqüência nos ionogramas das 00:45 LT e 01:00 LT. Às 01:00 LT pode-se observar a ocorrência de um provável traço adicional ao traço principal do ionograma. O traço duplo no ionograma já foi associado por Bowman (1990, 1991) à passagem de distúrbios ionosféricos propagantes sobre o zênite da localidade de observação.

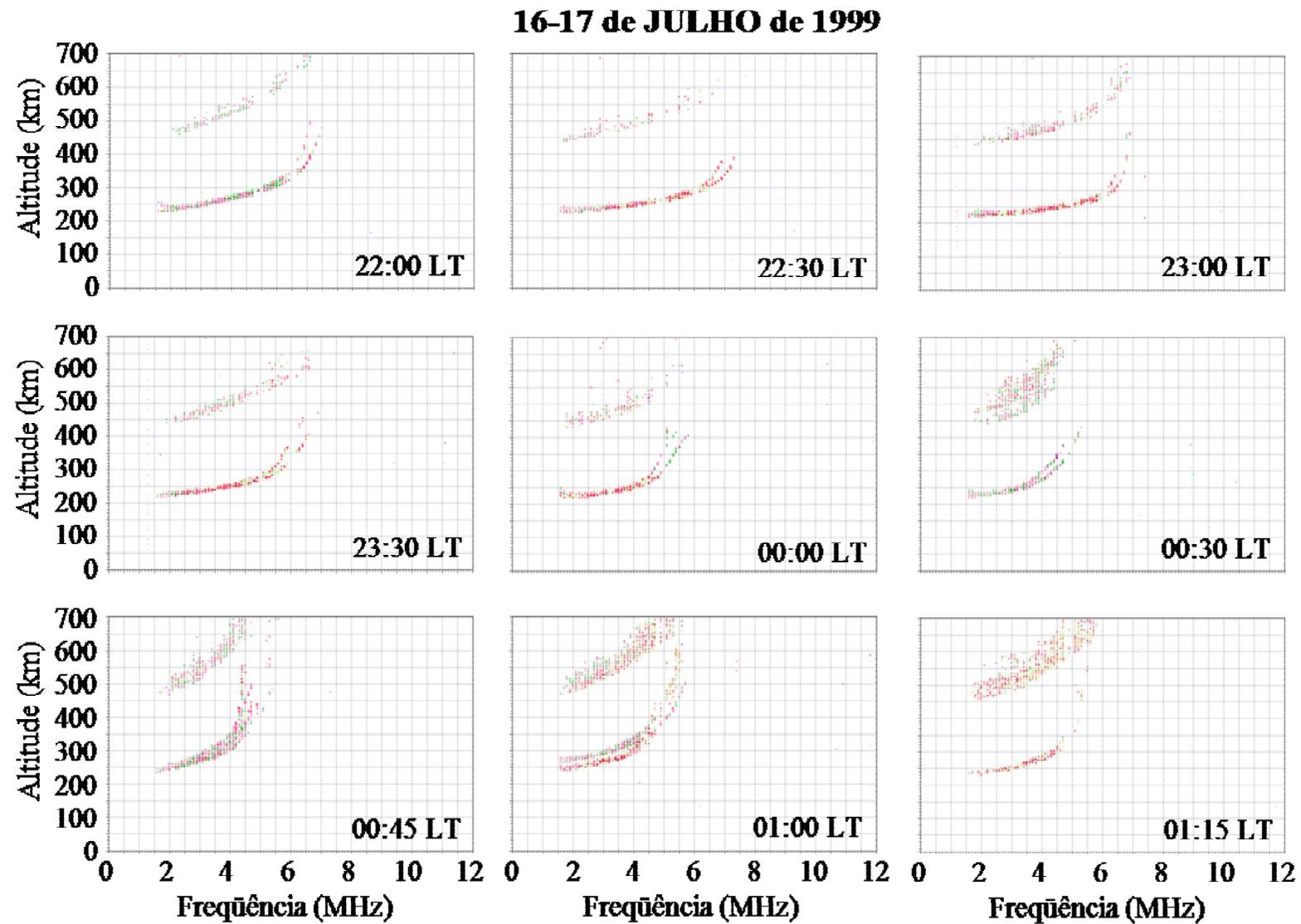


Figura 6.20: Seqüência de ionogramas obtida na noite de 16-17 de julho de 1999, em Cachoeira Paulista.

6.2 - SUMÁRIO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS A PARTIR DE DADOS DE IMAGEAMENTO ÓPTICO E DE RADIOSSONDAGEM

O conjunto de dados ópticos e ionosféricos apresentados revelou a assinatura da passagem dos chamados distúrbios ionosféricos propagantes de média escala (*MSTIDs*) sobre a região de baixas latitudes, cujas características são sumarizadas a seguir:

1. As estruturas observadas se apresentam na forma de bandas escuras avizinhas de regiões claras, que podem ocorrer como bandas únicas ou múltiplas, alinhadas na direção nordeste-sudoeste e se propagando para noroeste. Tais características nos conduziram a denominá-las bandas termosféricas de média escala, numa referência às estruturas observadas em médias latitudes que se propagam para sudoeste no hemisfério norte e para noroeste no hemisfério sul (MENDILLO et al., 1997; GARCIA et al., 2000; SAHAI et al. 2001; SHIOKAWA et al. 2003; BOWMAN, 1991, 1992; OGAWA et al. 2006; MARTINIS et al. 2006; PIMENTA et al., 2008).
2. O horário de ocorrência pode variar, podendo se iniciar antes da meia noite ou após a meia-noite, com tempo de duração média de 3 horas.
3. As bandas termosféricas de média escala são observadas em períodos geomagneticamente calmos, como indicam os índices K_p .
4. A orientação na direção nordeste-sudoeste (com algumas variações do ângulo azimutal), a direção de propagação para noroeste da totalidade das estruturas observadas e as velocidades observadas indicam fortemente que elas são originárias em regiões de médias latitudes, através de processos de instabilidades eletrodinâmicas previstos teoricamente por Perkins e denominadas Instabilidade de Perkins.
5. Durante a ocorrência de bandas termosféricas de média escala observa-se um decréscimo da frequência crítica de plasma, f_oF_2 , associado a uma elevação da camada, mostrada pela variação de $h'F$. Esta elevação é precedida por uma

pequena descida, conforme diversas vezes reportado em observações realizadas em médias latitudes (Bowman, 1990, 1991, 1992). São observadas também pequenas oscilações na base da camada tanto na fase de elevação de $h'F$ quanto na fase de supressão de $foF2$. Os valores de $\Delta h'F$ não ultrapassaram 70 km enquanto os valores de $\Delta foF2$ variaram entre 1,0 e 2,5 MHz. Bowman (1990) verificou que a passagem de *MSTIDs* provoca variações em $h'F$ próximos a 50 km enquanto no caso de *LSTIDs* esta variação é superior a 100 km.

6. Em pelo menos um dos casos relatados (11-12 de junho de 1996) a redução em $foF2$ foi tão drástica que não permitiu a redução dos parâmetros ionosféricos por pelo menos duas horas. Nesta noite também foi observada a maior altura virtual da camada F dentre os casos analisados, ~340 km, embora não se possa garantir que este tenha sido o maior valor atingido no intervalo estudado. O spread-F teve duração aproximada de 2 horas e quinze minutos.

7. As quatro noites analisadas apresentaram a ocorrência de Spread-F do tipo frequência que em geral mostrou-se fraco. Observou-se que horário de início do Spread-F é sempre anterior ao do horário de chegada da banda ao zênite, podendo variar entre 5 e 40 minutos. No entanto, devemos considerar que há imprecisões nestes valores devido aos intervalos utilizados tanto nas observações ópticas (a cada 20 ou 30 minutos) quanto nas ionosféricas (a cada 15 minutos). Caso 1: 11-12 de junho de 1996: Observa-se que o Spread-F parece ser do tipo frequência ou misto, e tem início no intervalo em que houve uma diminuição de $foF2$ bem como a subida da camada. A duração prolongada (mais de 2 horas) pode estar associada à elevada altura da camada em torno de 340 km. Este foi o caso em que a camada estava mais alta e a densidade mais baixa entre os analisados. Caso 2: 18-19 de julho de 1998: Nesta noite há duas ocorrências de Spread-F em horários diferentes. O primeiro, associado à passagem de uma banda termosférica observada sobre o zênite às 00:20 LT é muito fraco e teve início cerca de 20 minutos antes da observação da banda no zênite, se estendendo por mais 50 minutos. O segundo spread-F foi observado entre as 02:40 LT e 03:00 LT, e pode ser associado à passagem de uma banda composta de três estruturas escuras entremeadas de regiões claras de observadas por volta das 03:00LT. Caso 3: 28-29 de julho de 1998: O spread-F

inicia-se poucos minutos antes da observação da banda termosférica no zênite da imagem e teve curta duração (aproximadamente 20 minutos). Caso 4: 16-17 de julho de 1999: O spread-F teve início 00:45 LT, quinze minutos antes da chegada da banda termosférica no zênite da imagem. Esse caso apresentou valores em foF2 sempre acima de 4 MHz, enquanto que h'F não passou de 240 km. Portanto, este é o caso que apresentou as mais altas densidades eletrônicas e a menor variação de h'F. A Tabela 6.2 apresenta um resumo das tendências observadas.

Tabela 6.2 - Resumo de alguns parâmetros extraídos dos dados ionosféricos

Data	Banda no zênite	Spread-F		h'F (km)			foF2 (MHz)		
		Início (LT)	Δt	Mín. (LT)	Máx. (LT)	$\Delta h'F$	Máx. (LT)	Mín. (LT)	$\Delta foF2$
11-12 jun 96	23:00	22:45	2h15'	-	340* (23:30)	-	3,0 (23:00)	2,0 (21:20)	1
18-19 jul 98	24:20 02:20 03:00	23:40 - 02:40	1h10' - 20'	210 (23:30)	280 (01:45)	70	4,5 (22:40)	2,4 (01:20)	2,1
28-29 jul 98	03:20	03:15	20'	220 (02:30)	290 (04:00)	70	4,1 (02:15)	2,6 (03:30)	1,5
16-17 jul 99	01:00	00:45	20'	210 (23:15)	240 (01:00)	30	7,0 (22:30)	4,6 (00:45)	2,4

* Valor máximo observado

8. A relação entre a ocorrência de Spread-F associado à passagem de bandas termosféricas de média escala/MSTIDs tem sido exaustivamente estudada por Bowman (1990, 1991, 1992) para várias regiões latitudinais. Bowman atribui a ocorrência ou não de spread-F à amplitude das ondas de gravidade e dos TIDs a elas associados. Segundo Hines (1960) as ondas que atingem altitudes ionosféricas mais elevadas tem em geral maior amplitude sendo assim mais efetivas na produção de spread-F quando a camada está mais elevada. Bowman (1992) acrescentou que mesmo quando a camada não está tão elevada (250 ou 300 km), a densidade de partículas neutras também exerce influência na amplitude das ondas, de modo que estas também podem provocar spread-F. As diferenças entre o *spread-F* observado em altitudes mais elevadas

e nas baixas altitudes parecem estar relacionadas à inclinação de superfícies isoiônicas associada às ondas. Em altitudes mais elevadas onde as ondas apresentam maior amplitude a superfície isoiônica é mais inclinada o spread-F mais provável é do tipo *range* como mostrado na Figura 6.21a. Neste caso, são mostradas superfícies isoiônicas com amplitude um pouco maior e apresentam um ângulo de inclinação com a horizontal. Também há um gradiente horizontal de densidade eletrônica. O *spread-F* em frequência por sua vez, mostrado na Figura 6.21c, tem maior probabilidade de ocorrer em altitudes mais baixas, onde as menores amplitudes das ondas não provocam inclinações tão severas. Em situações, tais, em que não haja gradiente horizontal de densidade eletrônica máxima, como mostrado nas Figura 6.21 b) e d), não se observa *spread-F* em frequência.

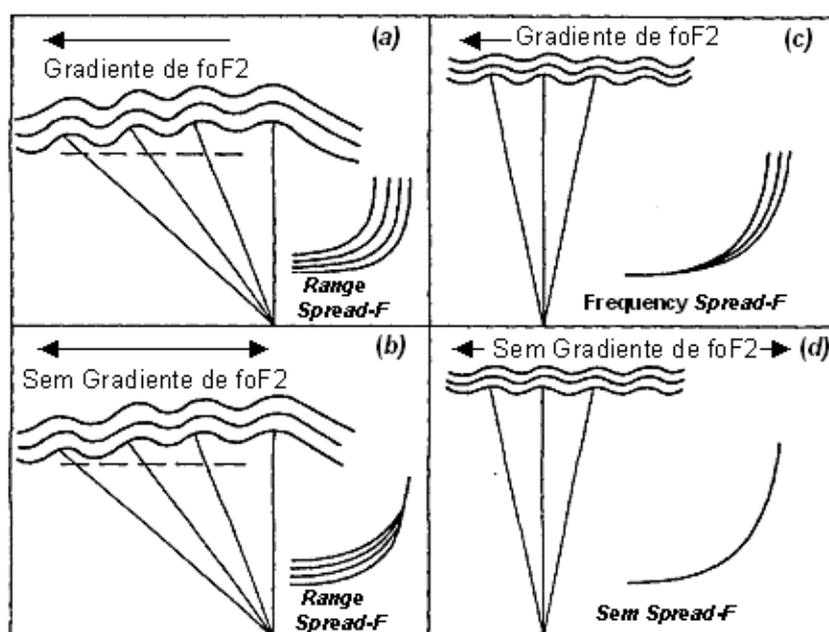


Figura 6.21: Representação esquemática de diferentes aspectos de superfícies ondulatórias isoiônicas que resultam na observação de *Spread-F* em ionogramas.

Fonte: Adaptada de Bowman (1991).

É importante mencionar que as características descritas acima são predominantemente estudadas e bem conhecidas em estações de médias latitudes. Este trabalho apresentou um estudo de alguns casos de ocorrência de *spread-F* associado à passagem das bandas termosféricas de média escala. Embora a observação de *spread-F* em frequência, as altitudes da camada e as baixas

freqüências críticas observadas se assemelhem às observações de Bowman em médias latitudes, entendemos que há a necessidade de um estudo de longo termo sobre as características do *spread-F* associado à passagem de *MSTIDs* em baixas latitudes.

6.3 - ANÁLISE ESTATÍSTICA

Nesta seção é apresentado o estudo estatístico inédito da ocorrência de bandas termosféricas de média escala sobre o hemisfério sul, no setor tropical brasileiro. Para este estudo, analisamos sete anos de dados ópticos obtidos com o imageamento da emissão OI 630,0 nm, com um imageador *all-sky* localizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, em Cachoeira Paulista. O primeiro passo foi classificar os anos de observação segundo o nível de atividade solar, medido pelo parâmetro F10.7. Tomando os valores médios anuais de F10.7, classificamos os períodos em: Baixa Atividade (BAS), Atividade Solar Ascendente (AS_ASC) e Alta Atividade Solar (AAS), como mostra Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Classificação do ano de observação de acordo com a atividade solar expresso pelo índice F10.7.

Ano	F10.7 (W.m ⁻² Hz) Valor médio anual e desvio padrão	Sigla
1990	190 ± 15	AAS
1995	77,2 ± 4,2	BAS
1996	72,0 ± 2,5	BAS
1997	80,9 ± 10,3	AS_ASC
1998	118,0 ± 18,7	AS_ASC
1999	153,9 ± 22,1	AS_ASC
2000	180,0 ± 17,0	AAS

A Figura 6.22 apresenta a relação entre o número de horas totais de observação óptica durante todo o ano e o número de horas de ocorrência dos eventos em períodos de baixa atividade solar (BAS), atividade solar ascendente (AS_ASC) e alta atividade solar (AAS). Observa-se que a relação entre o número de horas de observação e o número de horas de ocorrência de bandas termosféricas é bastante elevada.

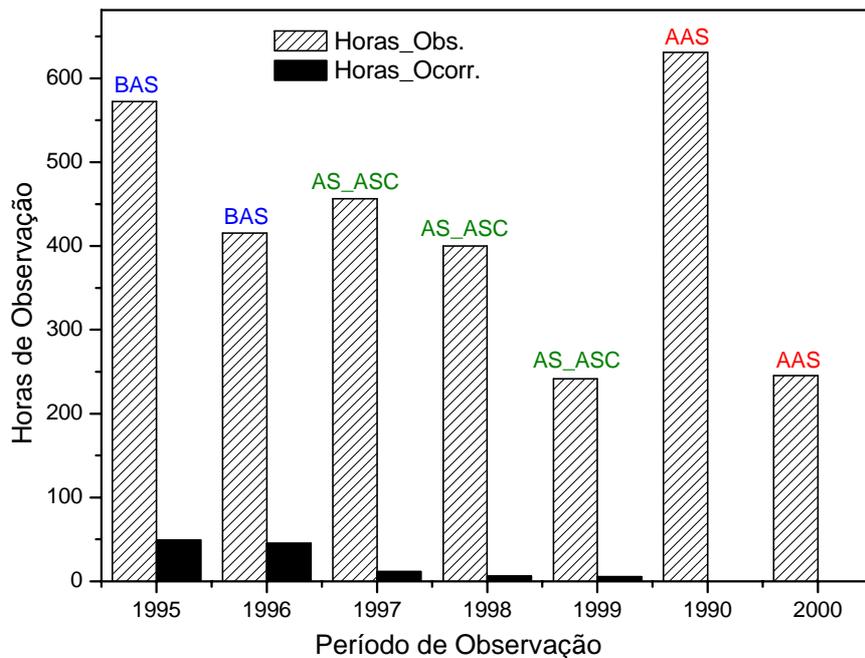


Figura 6.22: Relação anual entre número de horas de observação óptica e número de horas de ocorrência dos eventos de bandas termosféricas em períodos de baixa atividade solar (BAS), Atividade solar ascendente (AS_ASC) e Alta atividade solar (AAS). Note que o período de alta atividade solar se refere a anos de diferentes ciclos (1990 e 2000).

6.3.1 – Variação com a Atividade Solar

A Figura 6.23 apresenta o número de horas de observação e o respectivo percentual de ocorrência das bandas termosféricas. Podemos observar que nos anos de baixa atividade solar (BAS), o percentual de ocorrência atingiu níveis de 11%. No período de atividade solar ascendente (AS_ASC) a taxa percentual de ocorrência oscilou entre 1,5 e 3,0 %. Nesta figura é possível verificar claramente a maior taxa de ocorrência de bandas termosféricas em período de baixa atividade solar (BAS), com um progressivo decréscimo em períodos de atividade solar ascendente (AS_ASC). No período de atividade solar alta (AAS) não foram observadas bandas

termosféricas, a despeito do grande número de horas de observação em 1990 (> 600 horas). No ano de 2000 as observações só foram possíveis durante os seis primeiros meses do ano, o que explica o baixo número de horas de observação em comparação aos outros períodos.

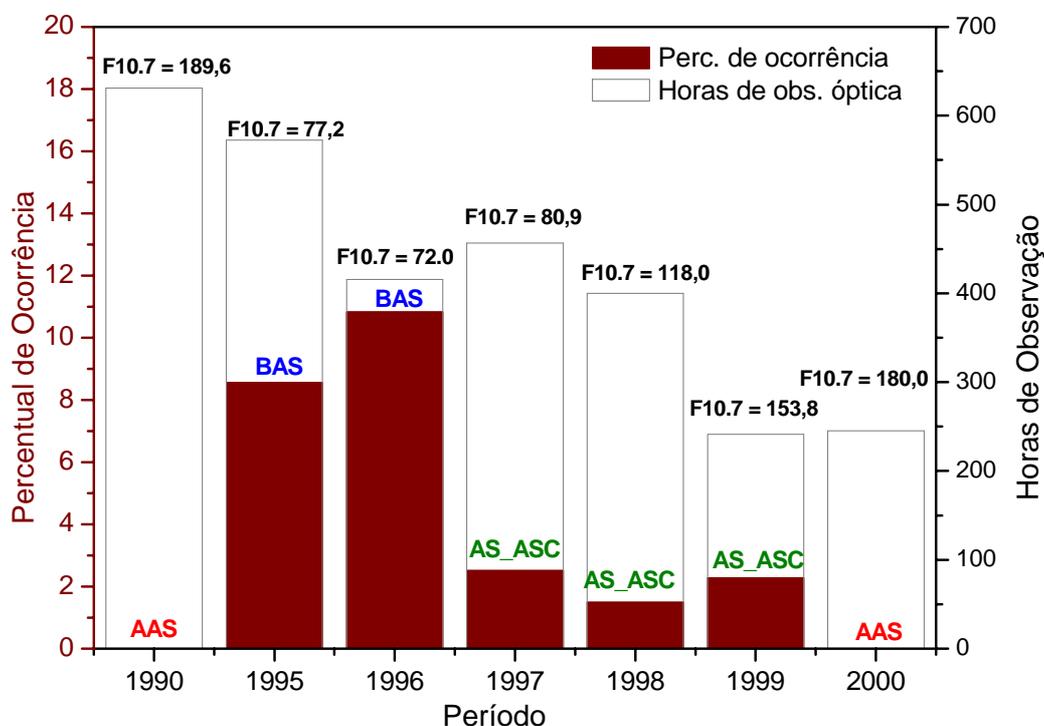


Figura 6.23: Percentual anual de ocorrência de bandas termosféricas com relação ao número de horas de observação óptica. Siglas: Baixa atividade solar (BAS), Atividade solar ascendente (AS_ASC) e Alta atividade solar (AAS). Note que o período de alta atividade solar se refere a anos de diferentes ciclos (1990 e 2000).

Observa-se claramente uma relação inversamente proporcional entre a taxa de ocorrência dos *MSTIDs* e o nível de atividade solar. Foi observado que a taxa de ocorrência dos *MSTIDs* é maior (em torno de 11%) em período de baixa atividade, para valores médios anuais do fluxo solar, F10.7, em torno de 75,0 ($\text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$). Na fase ascendente da atividade solar, representada por valores de F10.7 variando entre 80 e 160 ($\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$), a taxa de ocorrência baixou para 4% e no período de atividade solar alta, não foi observada nenhuma ocorrência.

A relação inversamente proporcional entre a taxa de ocorrência dos *MSTIDs* e a atividade solar também foi observada por Garcia et al. (2000) com dados coletados

durante dois anos em Arecibo (média latitude, hemisfério norte). Embora não definitivo (baseou-se em apenas dois anos de dados), seu estudo revela uma tendência da taxa de ocorrência atingir níveis mais elevados no período de mínima atividade solar. Esta dependência pode ser explicada de duas maneiras: através da análise da taxa de crescimento da instabilidade de Perkins e através da teoria magnetohidrodinâmica.

6.3.1.1 – Taxa de Crescimento da Instabilidade de Perkins

O mecanismo mais aceito para explicar irregularidades do plasma da região F de médias latitudes associados à passagem de bandas termosféricas é o processo de instabilidade eletrodinâmica desenvolvido teoricamente por Perkins (1973). A relação inversa entre a taxa de ocorrência e o nível de atividade solar pode ser explicada em função da taxa de crescimento da Instabilidade de Perkins (descrita no capítulo 2) e expressa por:

$$\gamma = \frac{g}{H\langle\nu\rangle} \left[\frac{\sin^2 D \sin^2 \frac{\theta}{2}}{\cos \theta} \right] \quad (6.1)$$

onde g é a aceleração da gravidade, H é a altura de escala das espécies neutras, $\langle\nu\rangle$ é o valor médio da frequência de colisão entre íons e partículas neutras (ponderado pela densidade), D é o ângulo de declinação magnética, θ é o ângulo definido entre direção do campo elétrico e a direção leste (Perkins, 1973; Kelley e Fukao, 1991).

Kelley e Fukao (1991) calcularam γ em função da altura considerando: $D=\theta=45^\circ$ (situação em que a instabilidade é máxima), escalas de altura $H= 80 \text{ km}$ e 60 km (em 400 km de altura) e valores de densidade neutra obtidos por Johnson (1961, original de Kelley, 1989) para AAS e BAS respectivamente (Tabela 6.4).

Tabela 6.4: Densidade de partículas neutras em período de alta e baixa atividade solar

h (km)	Densidade de partículas neutras g/cm ³		
	Atividade solar máxima, (A)	Atividade solar Mínima, (B)	Razão A/B
200	$4,2 \times 10^{-13}$	$1,48 \times 10^{-13}$	4
240	$1,7 \times 10^{-13}$	$4,3 \times 10^{-14}$	4
300	$5,7 \times 10^{-14}$	$1,04 \times 10^{-14}$	5
400	$1,38 \times 10^{-14}$	$1,58 \times 10^{-15}$	8

Fonte: Kelley (1989) original de Johnson (1961).

A Figura 6.24 mostra a taxa de crescimento da instabilidade de Perkins, γ_P , em função da altura de máxima densidade do plasma da camada F. Observa-se que para uma dada altura do pico da camada F, γ_P é significativamente maior durante o período de atividade solar baixa que na alta. Para $h_{\text{max.}} = 400$ km o tempo é 0,56 horas.

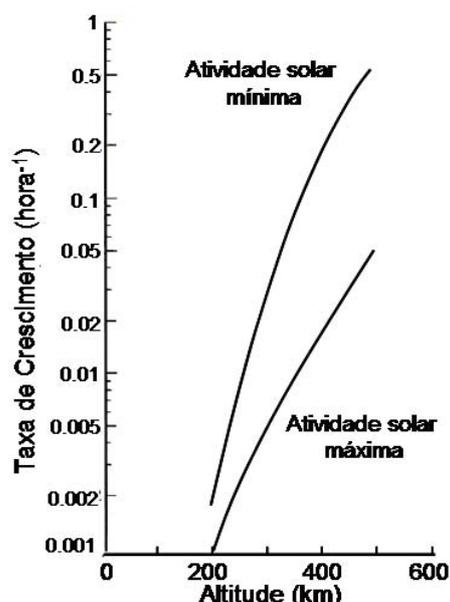


Figura 6.24: Taxa de crescimento da Instabilidade de Perkins em função da altura da máxima densidade da camada F, para condições de atividade solar máxima e atividade solar mínima.

Fonte: Adaptada de Kelley e Fukao (1991).

Note que para uma altura de 400 km a taxa de crescimento é de 0,56 horas⁻¹ (KELLEY e FUKAO, 1991). Valores típicos para a taxa de crescimento foram calculados por Garcia et al. (2000) para a estação de média latitude em Arecibo, da ordem de 8

$\times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ e por Martinis et al. (2006), para uma localidade no hemisfério sul (El Leoncito, Argentina), da ordem de 10^{-3} s^{-1} .

6.3.1.2 - Absorção Magnetohidrodinâmica

A variação da taxa de ocorrência dos MSTIDS com o ciclo solar pode ser analisada também com a teoria magnetohidrodinâmica, que descreve a interação da atmosfera neutra com a ionizada a qual ocorre através de colisões (GERSHMAN E GRIGOR'YEV, 1965, PIMENTA et al., 2008). Gershman e Grigor'yev (1965) foram pioneiros em tratar a questão da absorção magnetohidrodinâmica para distúrbios ionosféricos propagantes como os *TIDS*. Desenvolvendo um sistema de equações que descrevem ondas de gravidade na camada F, eles chegaram a uma expressão que define o índice de absorção, *R*, das estruturas de plasma na ionosfera:

$$R = G \left[1 + \frac{k_x^2}{k_z^2} - \left(\cos \alpha - \frac{k_x \cos \gamma}{k_z} \right)^2 \right] \quad (6.2.1)$$

sendo:

$$G = \frac{N_e M \nu_{im} k_x}{N_m M_m \omega} \quad (6.2.2)$$

$\cos \alpha$, $\cos \gamma$ são as projeções nos planos x e z, respectivamente da direção do campo magnético (x positivo para o norte, y positivo para leste e z vertical positivo para cima);

N_e é a densidade eletrônica,

M é a massa dos íons;

ν_{im} é a frequência de colisão;

ω é a frequência angular da onda;

k_x e k_z são os números de onda horizontal e vertical;

M_m é a massa molecular;

N_m é a concentração molecular.

Ou seja, G é razão entre a frequência de colisão íon-partículas neutras e a frequência de onda vezes o comprimento de onda horizontal dividido por 2π . O parâmetro G também pode ser interpretado como a razão da dissipação Joule por período de onda dividido pela densidade de energia do período da onda ($\lambda/2\pi$). Note que G independe da direção do campo magnético. Além disto, o parâmetro G é proporcional à densidade eletrônica, de modo que o índice de absorção será maior em períodos de atividade solar alta, quando as densidades eletrônicas são maiores.

Voltando à expressão 6.2.1, o termo entre parênteses depende da orientação de propagação com relação a \mathbf{B} e a análise da propagação deve considerar duas componentes: a meridional, R_m , e a zonal, denominada R_z .

Considera-se numa primeira aproximação que a propagação na direção meridional é paralela ao eixo x , de modo que o meridiano magnético coincide com o eixo x . Assim, $\cos\beta = 0$ e :

$$R_m = G \left(\text{sen}\alpha + \frac{k_x \cos\alpha}{k_z} \right)^2 \quad (6.3)$$

Para a direção leste-oeste, $\cos\alpha = 0$ de modo que:

$$R_z = G \left(1 + \frac{k_x^2 \text{sen}^2\alpha}{k_z^2} \right)^2 \quad (6.4)$$

Uma importante consideração é a de que a velocidade de propagação dos *TIDS* é muito menor que a velocidade de propagação do som (GERSHMAN E GRIGOR'YEV, 1965, THITERIDGE, 1973), ou seja:

$$\frac{\omega}{k_x^2 C_o^2} \ll 1, \text{ ou, } k_x \ll k_z \quad (6.5)$$

Assim, na região equatorial, onde os ângulos α_s são pequenos:

$$R_m = G \left(\frac{k_x^2}{k_z^2} \right) \quad (6.6)$$

$$R_z = G \quad (6.7)$$

As 6.6 e 6.7 significam que a absorção do distúrbio é mínima na direção norte-sul, ou que, a dissipação Joule é mínima na direção paralela ao campo magnético.

Em médias e altas latitudes, onde os α_s são grandes temos:

$$R_m = G \text{sen}^2 \alpha \quad (6.8)$$

$$\frac{R_m}{R_z} \sim 1 \quad (6.9)$$

Assim, nestas regiões as direções de propagação são equivalentes de acordo com a teoria magnetohidrodinâmica.

Considerando-se que a distância percorrida pela onda, D, é inversamente proporcional à absorção e que a absorção pode ser expressa por $\exp(-R)$ temos:

$$D = \frac{1}{G} \quad (6.10)$$

Então para uma onda que se propaga com uma velocidade de fase $v = \omega / k_x = 250 \text{ m/s}$, numa altura de 220 km, a distância percorrida será de aproximadamente 3000 km.

Pimenta et al. (2008) calcularam os valores de absorção, G, e as distâncias percorridas, D, pelas ondas termosféricas com base na teoria magnetohidrodinâmica, considerando as velocidades de propagação determinadas experimentalmente, a frequência de colisão para a altura desejada, a densidade da atmosfera neutra inferida pelo modelo MSIS-E-90, conforme mostra a Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Nível de absorção das ondas para diferentes alturas de propagação considerando-se uma velocidade de propagação de 250 m/s.

Altitude (km)	Velocidade de fase (m/s)	G (cm^{-1})	D (km)
220	250	$3,3 \times 10^{-9}$	3000
250	250	$7,0 \times 10^{-9}$	1400
300	250	$1,6 \times 10^{-8}$	630

Conforme mostra a Tabela 6.4, a máxima absorção ocorre na região do pico de densidade da camada F, de modo que os distúrbios ionosféricos estão se propagando numa altura abaixo do pico de densidade da camada F.

Assim, segundo a teoria magnetohidrodinâmica os efeitos da ionização na propagação das ondas na ionosfera noturna são de grande importância na propagação das ondas de gravidade nas alturas ionosféricas sendo mais importantes que a orientação da direção de propagação com relação ao campo magnético B.

6.3.2 – Variação Anual

A Figura 6.25 apresenta a variabilidade anual de ocorrência das bandas termosféricas durante os diferentes níveis de atividade solar mencionados anteriormente. Como descrito anteriormente, não houve observação de ondas termosféricas no período de alta atividade solar (1990 e 2000). No período de atividade solar ascendente (1997, 1998 e 1999) os eventos podem ser observados entre maio a setembro. Uma característica interessante pode ser verificada nos períodos de baixa atividade solar (1995 e 1996): a ocorrência das bandas termosféricas é preponderante nos meses de inverno no hemisfério Sul (junho a setembro), mas também há casos de observação nos meses de fevereiro, abril e maio. A curva cinza (círculos abertos) representa a variação média dos percentuais de ocorrência considerando-se os períodos de atividade solar ascendente e baixa atividade solar (AS_ASC e BAS). Pode-se observar que a maior taxa de ocorrência ocorre nos meses próximos ao solstício de junho.

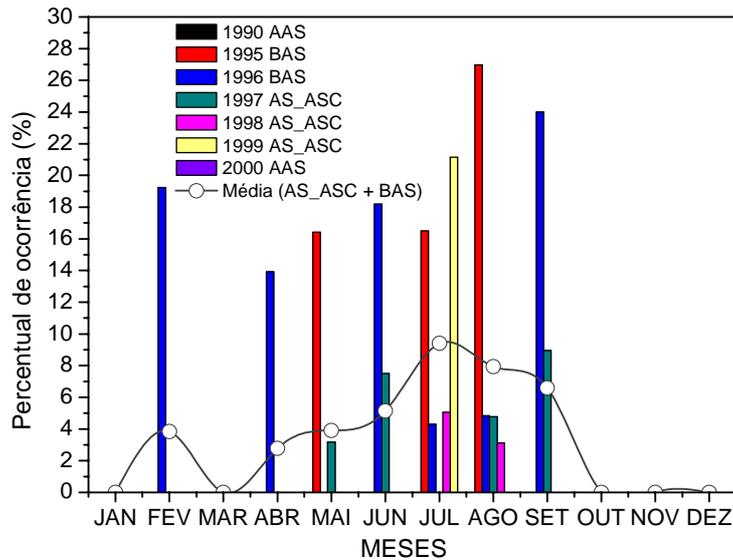


Figura 6.25: Padrão de variabilidade sazonal das bandas termosféricas para três diferentes níveis de atividade solar: Baixa atividade solar (BAS), Atividade solar ascendente (AS_ASC) e Alta atividade solar (AAS).

A Figura 6.26 apresenta as médias de ocorrência mensal das bandas termosféricas determinadas considerando-se os diferentes níveis de atividade solar, de modo a verificar diferenças no padrão sazonal de ocorrência.

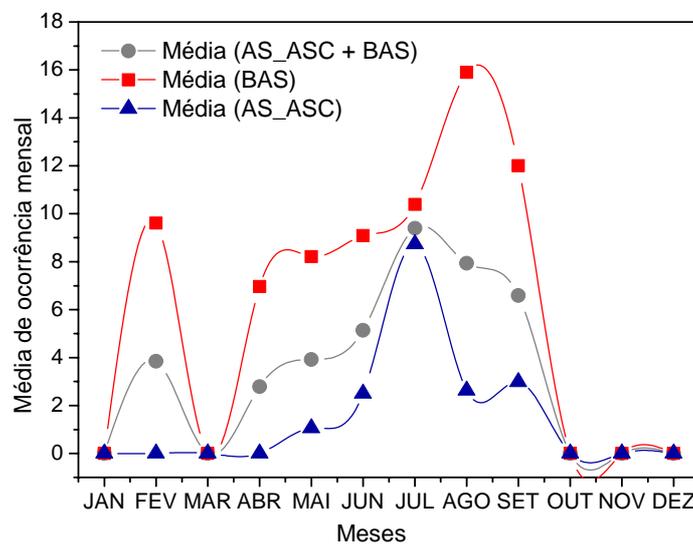


Figura 6.26: Médias de ocorrência horária mensal das bandas termosféricas determinadas para diferentes níveis de atividade solar.

Nota-se que em período de atividade solar ascendente (AS_ASC) o pico de ocorrência é centrado no mês de julho, enquanto no período de baixa atividade solar

(BAS) a taxa máxima de ocorrência é deslocada para agosto, e distribuída ao longo do ano, podendo acontecer de fevereiro a setembro.

O estudo estatístico da variação anual das bandas termosféricas mostrou que a taxa de ocorrência apresenta valores máximos nos meses de inverno no hemisfério sul, próximo ao solstício de junho. Bowman (1990, 1992, 2001) reportou variações anuais do *spread-F* associados a *MSTIDS* em médias e baixas latitudes no setor longitudinal japonês e australiano, onde a taxa máxima de ocorrência é observada na época do solstício de junho. Shiokawa et al. (2003) apresentaram um estudo estatístico de eventos de *MSTIDs* no setor japonês e verificaram também a máxima taxa de ocorrência nos meses de solstício de junho. Por outro lado Garcia et al. (2000) verificaram que a máxima taxa de ocorrência do *spread-F/MSTIDS* na estação de Arecibo (média latitude no hemisfério Norte) era verificada no solstício de junho (verão no hemisfério Norte). A discordância com os dados de Arecibo foram atribuídas a diferenças longitudinais dos ventos neutros. Um estudo baseado em dados obtidos no setor sul-africano apresentou a mesma variação anual do setor australiano (LAMBERT, 1988).

Uma possível explicação para a variação anual do *spread-F* de médias latitudes associado a *MSTIDs* foi dada por Bowman (1964, 1992), que associou a máxima taxa de ocorrência no solstício de junho à densidade consideravelmente menor da atmosfera neutra no período.

Na Figura 6.27 podemos observar que a densidade de partículas neutras nos hemisférios norte e sul é mínima em períodos próximos ao solstício de junho. Bowman propôs a amplitude das ondas de gravidade e das perturbações por elas semeadas, ou *TIDs*, serão maiores em altitudes ionosféricas mais elevadas, onde a densidade neutra é mais baixa. Segundo Hines (1963, original de Bowman, 1992) o aumento na amplitude das ondas de gravidade promoverá mais efetivamente a ocorrência de *MSTIDS/Spread-F* em médias latitudes.

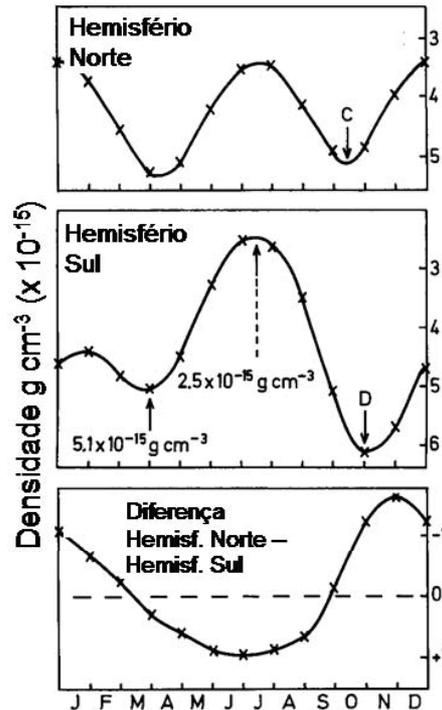


Figura 6.27: Variações anuais da densidade de partículas neutras na atmosfera superior: a) hemisfério norte, b) hemisfério sul c) diferença entre os hemisférios Norte e Sul.

Fonte: adaptada de Bowman (1992) original do modelo de Barlier et al. (1978).

No entanto, é importante considerar que a variabilidade das fontes de ondas de gravidade na região de origem dos *MSTIDs* é um fator importante. Francis (1975) apresentou uma revisão dos processos globais de propagação de ondas de gravidade, no qual são listadas as possíveis fontes dos *MSTIDs*. Dentre estas fontes foram relacionados: a) os fenômenos na atmosfera superior como precipitação de partículas em médias latitudes, movimento supersônico do terminador solar, eletrojato equatorial; b) fenômenos troposféricos: *ondas orográficas*, tempestades, frentes climáticas. Os fenômenos troposféricos têm sido amplamente aceitos como as mais prováveis fontes de ondas de gravidade e apresentam variabilidade sazonal que pode influir na sazonalidade das ondas de gravidade. No entanto, poucos estudos reportam esta questão (MEDEIROS, 2002, WRASSE, 2003).

6.3.3 – Tempo de Vida, Direção e Velocidades de Propagação

A Figura 6.26 apresenta a estatística realizada para velocidades de fase das bandas termosféricas e a direção preferencial de propagação das mesmas. Estes resultados foram obtidos analisando-se um conjunto de imagens linearizadas de 19 eventos observados durante período de baixa atividade solar (BAS) e 09 eventos observados durante a fase ascendente da atividade solar (AS_ASC).

A determinação da direção de propagação e das velocidades de fase das bandas observadas pode ser feita através de dois métodos, descritos por Pimenta et al. (2008). O método utilizado neste trabalho consiste em analisar seqüências de imagens linearizadas, a partir das quais se determina a variação temporal do deslocamento da estrutura tomando-se as coordenadas do zênite da imagem como referência.

Verificou-se que as velocidades médias encontradas variam entre 50 e 250 m/s. Este intervalo de velocidades é comparável a estudos apresentados por outros autores. Taylor et al. (1998) observaram estruturas se propagando lentamente para sudoeste a 95 m/s. Mendillo et al. (1997) observaram ondas em Arecibo se propagando com velocidades de 100 m/s. Kubota et al. (2000) reportaram velocidades variando entre 83 e 137 m/s. Com a seqüência de imagens apresentadas pode-se verificar que, em geral, as ondas termosféricas começam a ser observadas no setor pré-meia-noite local e se propagam por algumas horas após a meia-noite. Considerando-se a totalidade dos eventos observados (dos quais apenas alguns foram mostrados neste trabalho), o tempo de vida médio das ondas (tempo estimado para a passagem pelo campo de visada do instrumento) é de aproximadamente 3 horas.

Através do estudo estatístico de um conjunto de vinte e oito eventos distribuídos ao longo de vários anos de observação (1990, 1995-2000) determinamos a direção de propagação preferencial das ondas termosféricas observadas de setor de baixas latitudes do hemisfério sul. Como se pode observar na Figura 6.28 a direção de propagação observada é para noroeste para a totalidade dos eventos.

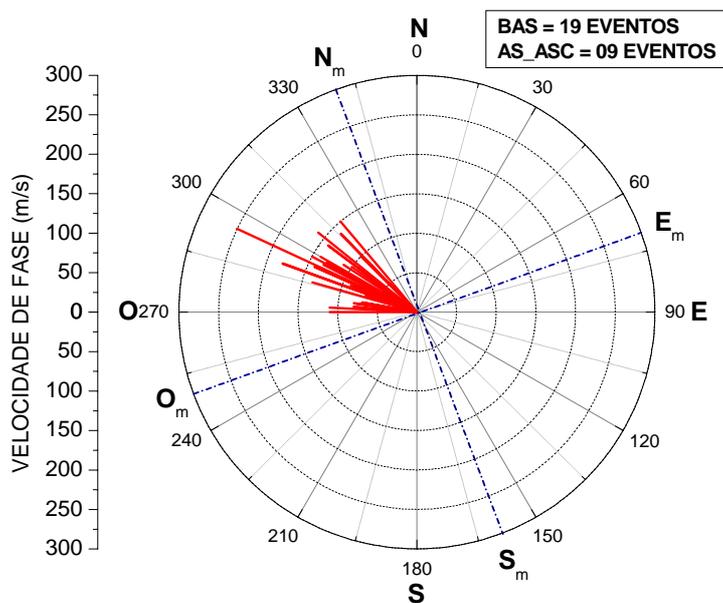


Figura 6.28: Velocidade de fase e direção de propagação das bandas termosféricas determinadas a partir de 28 eventos em período de baixa atividade solar (BAS) e atividade solar ascendente (AS_ASC).

A direção de propagação das bandas termosféricas é uma questão de grande relevância discutida por diversos autores (PERKINS, 1973; GARCIA et al., 2000; KELLEY e MAKELA, 2001, SAITO et al., 2000). Embora a teoria de Perkins preveja corretamente a direção de propagação das estruturas, perpendicular ao seu eixo longitudinal, há uma discrepância nos cálculos que indica o sentido contrário de propagação. Por exemplo, a teoria prevê que no hemisfério norte as estruturas se propagam para nordeste e não para sudoeste conforme mostram a maioria dos dados experimentais. Garcia et al. (2000) e discutiram esta questão, verificando com seqüências temporais de imagens obtidas em Arecibo que a direção de propagação das ondas termosféricas era para sudoeste contrariando a previsão de Perkins.

Kelley e Makela (2001) propuseram a resolução desta discrepância considerando a polarização das estruturas de Perkins na direção do seu eixo longitudinal em zonas de baixa condutividade Pedersen, o que resulta em campos elétricos de polarização direcionados para noroeste o que conseqüentemente promovem o movimento das bandas para sudoeste no hemisfério norte. A Figura 6.29 representa o sistema de coordenadas das estruturas de plasma (alinhadas na direção NW-SE), das direções

dos campos de polarização E_p , da corrente J_0 e do campo magnético, B , propostos por Kelley e Makela (2001). A ação conjunta $E_p \times B$ promove o movimento das estruturas para sudoeste (hemisfério norte).

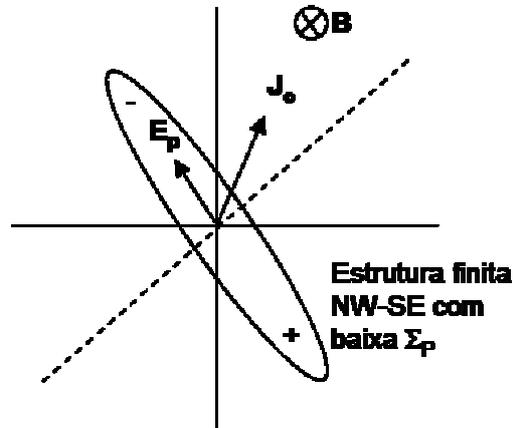


Figura 6.29: Polarização de uma zona de baixa condutividade Pedersen na presença de corrente direcionada por ventos.
Fonte: Adaptada de Kelley e Makela (2001).

6.3.4 – Sumário dos Principais Resultados Obtidos com a Análise Estatística das Bandas Termosféricas de Média Escala

Através da análise de dados obtidos em sete anos de observação óptica da emissão OI 630,0 nm em Cachoeira Paulista, verificamos as seguintes características das bandas termosféricas:

1. A taxa de ocorrência das bandas termosféricas no setor de baixas latitudes calculada com relação ao número de horas de observação atinge o valor máximo de 11% no período de baixa atividade solar e 3% nos níveis de atividade solar ascendente, não sendo observada em período de atividade solar alta. Assim, existe uma relação claramente inversa entre ocorrência de bandas termosféricas de média escala e o alto nível de atividade solar.
2. A ocorrência das bandas termosféricas no setor de baixas latitudes mostra um padrão de variabilidade anual, com um máximo centrado no solstício de junho, ou seja, no inverno do hemisfério sul. No período de atividade solar mínima, a taxa de ocorrência é distribuída entre os meses de fevereiro e setembro.

3. O tempo médio de observação das bandas termosféricas é de 3 horas, sendo que o horário inicial ocorre por volta da meia-noite e se estende por algumas horas na madrugada.
4. As velocidades de propagação das estruturas observadas varia entre 40 e 250 m/s, o que é compatível com as velocidades geralmente reportadas para distúrbios ionosféricos propagantes de média escala (MSTIDs).
5. A direção de propagação de todas as bandas termosféricas de média escala observadas nas baixas latitudes do hemisfério sul é para noroeste, o que concorda com as previsões da teoria modificada da instabilidade de Perkins.

6.4 – DISCUSSÃO SOBRE AS POSSÍVEIS FONTES DAS BANDAS TERMOSFÉRICAS DE MÉDIA ESCALA OBSERVADAS SOBRE CACHOEIRA PAULISTA

Nesta tese apresentamos o estudo de bandas termosféricas/*MSTIDs* que ocorreram em períodos de atividade solar baixa, média e alta. Além disto os eventos ocorreram em noites geomagneticamente calmas (alguns exemplos foram mostrados na Tabela 6.1) excluindo a possibilidade de serem associados a distúrbios de origem auroral. As características analisadas tanto com os dados ópticos quanto com os dados ionosféricos (direção, orientação, velocidade de propagação, elevação da camada e redução da densidade eletrônica) indicaram significativamente que tais estruturas tiveram origem em processos de instabilidades eletrodinâmicas em médias latitudes geradas e/ou amplificadas por ondas de gravidade na mesma região e que posteriormente se propagaram para baixas latitudes. É fato regularmente aceito pela comunidade científica que características observadas dos *MSTIDs* tais como: sazonalidade, variações diurnas, velocidade de fase, comprimentos de onda, periodicidade e amplitude das perturbações confirmaram as previsões de que tais eventos eram manifestações da propagação de ondas de gravidade em altitudes ionosféricas (HINES, 1960; FRANCIS, 1973; BOWMAN, 1990; SHIOKAWA et al., 2003; DING et al., 2003; LASTOVICKA, 2001; 2006), conduzindo a uma idéia geral de que a ionosfera é um traçador de distúrbios atmosféricos.

Diversos estudos classificaram os *TIDs*/ondas de gravidade em termos de suas características e região de origem (HOCKE E SCHELEGEL, 1996; FRANCIS, 1973; HUNSCUCKER, 1975) bem como as condições sob as quais tais fenômenos seriam observados na ionosfera (LASTOVICKA et al., 2006; DING et al., 2003; KAZIMIROVSKY et al., 2003; OGAWA et al., 1987). A questão das fontes geradoras de ondas de gravidade tornou-se tema constante de debates e controvérsias. Dentre as fontes regularmente reportadas encontram-se os processos convectivos, o cisalhamento de ventos, os processos orográficos, etc. (Hocke e Schedgel, 1986; Ding et al. 2003; Vadas e Fritts, 2004; Fritts e Alexander, 2003). A passagem do terminador solar e os eclipses solares, por exemplo, são duas importantes fontes locais na origem de ondas de gravidade relacionadas a mudanças rápidas nos processos de ionização e aquecimento da atmosfera (LASTOVICKA et al., 2006). Terremotos e explosões nucleares também podem induzir a geração de ondas de gravidade (KAZIMIROVSKY et al., 2003; ALTADILL et al., 2001). Wan et al. (1998) analisaram considerável conjunto de dados ionosféricos e verificaram uma estreita relação entre a ocorrência de distúrbios ionosféricos propagantes (*TIDs*) e vórtices troposféricos relacionados a processos orográficos.

Por outro lado, processos meteorológicos na região troposférica são considerados fontes quase permanentes de ondas de gravidade que se propagam verticalmente, apesar da sua intermitência característica. Tais processos englobam grande classe de fenômenos: frentes frias, complexos convectivos de média escala, tornados, ciclones, processos orográficos, vórtices troposféricos relacionados à topografia, etc. A correlação entre o aumento do número de eventos de ondas de gravidade que se propagam a alturas ionosféricas e a ocorrência de frentes frias tem sido reportadas por diversos pesquisadores (BOSKA E SAULI, 2001, SAULI E BOSKA, 2001, WALDOCK E JONES, 1984, 1987). Waldock e Jones (1984, 1987) reportaram estudos correlacionando atividades convectivas na troposfera e ondas de gravidade na ionosfera (*MSTIDs*). Através da técnica de *ray-tracing* eles determinaram as distâncias percorridas pelas ondas desde sua geração na troposfera e sua detecção na ionosfera, num intervalo variável entre 250 e 1500 km. Tais fontes também foram reportadas para ondas de gravidade se propagando em altitudes mesosféricas (TAYLOR et al., 1998; MEDEIROS et al., 2001; WRASSE et al., 2003, 2006). Os complexos mecanismos que relacionam processos convectivos à geração de ondas

de gravidade envolvem forçantes térmicos variantes no tempo associados à liberação de calor latente que interagem com sucessivas camadas atmosféricas. Como tais mecanismos não são o principal objetivo deste trabalho, sugerimos a consulta de outras referências como Fritts e Alexander, 2003 (e referências por eles relacionadas).

É fato conhecido que ondas de gravidade geradas por processos convectivos apresentam um espectro amplo de escalas horizontais e verticais, frequência e direções de propagação além de variados modos de propagação (dependendo de diversas variáveis: temperatura, viscosidade, ventos, etc.) (Fritts e Alexander, 2003). Estas ondas podem se propagar por distâncias bastante grandes sem atenuação até o momento da sua detecção. No entanto, devido à mudança contínua dos parâmetros da onda desde a sua geração até o momento da sua detecção a determinação da sua fonte é trabalho de alguma complexidade (Francis, 1973).

Ding et al. (2006), investigaram as características de propagação de ondas de gravidade geradas por processos convectivos e que se propagam até altitudes ionosféricas e a influência dos ventos na propagação ou atenuação destas ondas.

Considerando ondas de gravidade com velocidades entre 100 e 300 m/s e períodos de 6 a 80 minutos, Ding et al. (2006) analisaram diversos aspectos sob os quais as ondas de gravidade geradas em altitudes troposféricas podem se propagar a altitudes ionosféricas ou serem atenuadas/refletidas antes de atingirem tais altitudes. Ondas com diferentes períodos e velocidades são afetadas de modo diferentes pelos ventos. Três situações foram analisadas:

- 1) Propagação da onda quando o vento é nulo: a maior parte das ondas podem atingir 200 km de altitude, mas para velocidades de fase superiores a 100 m/s, a altura atingida pode atingir até 320 km. A distância percorrida entre a fonte e o ponto de observação depende do período da onda e pode variar de 500 km (períodos de 18 min) e 5000 km (períodos de 80 min.).
- 2) Propagação da onda na direção do vento: neste caso as distâncias percorridas podem aumentar várias centenas de quilômetros (500 km a 5000 km), mas a altitude atingida diminui por volta de 70 km com relação ao caso anterior, ou seja, 250 km;

3) Propagação da onda na direção contrária ao vento: as ondas percorrem distâncias horizontais entre 500 e 4000 km, e podem atingir altitudes tão elevadas quanto 400 km.

A Figura 6.30 ilustra uma das situações simuladas por Ding et al., 2003, utilizando a técnica de *ray-tracing* onde foram consideradas ondas de gravidade geradas num espectro de períodos de 6 a 80 minutos e velocidades de fase entre 100 e 300 m/s, para as 22:00 LT, se propagando na direção contrária aos ventos. O eixo vertical representa as velocidades de fase da onda e o eixo horizontal os períodos. As linhas sólidas e tracejadas mostram os contornos da distância horizontal e vertical percorridas pelas ondas, com seus respectivos valores em km.

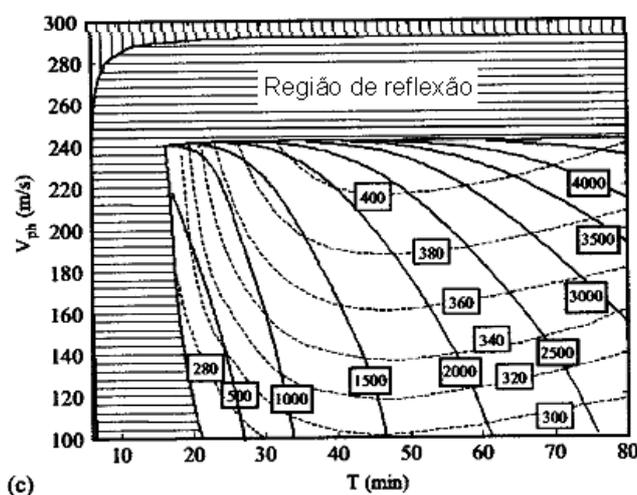


Figura 6.30: Diagrama esquemático das condições de propagação das ondas de gravidade na direção contrária aos ventos, às 22:00 LT. O eixo vertical representa as velocidades de fase da onda e o eixo horizontal os períodos. As linhas sólidas e tracejadas mostram os contornos da distância horizontal e vertical percorridas pelas ondas, com seus respectivos valores em km.

Fonte: Figura adaptada de Ding et al. (2003).

Ainda é possível observar na Figura 6.30 que ondas com períodos superiores a 30 minutos e velocidades próximas a 130 m/s podem se propagar por altitudes tão elevadas quanto 300 km, desde que se propaguem contra a direção do vento.

Portanto, com esta reflexão chegamos a uma hipótese bastante razoável, mas passível de estudos mais aprofundados de que as bandas termosféricas de média escala, observadas nas baixas latitudes do setor brasileiro em períodos

geomagneticamente calmos podem estar de fato associadas a processos de instabilidades eletrodinâmicas em médias latitudes, que por sua vez podem estar relacionadas com a atividade convectiva na troposfera de médias latitudes.

CAPÍTULO 7

ALTURA DA CAMADA EMISSORA OI 630,0 nm DURANTE A OCORRÊNCIA DE BOLHAS DE PLASMA

O imageamento óptico das emissões termosféricas OI 630,0 nm e OI 777,4 nm com imageadores em solo, fornece, conforme discutido anteriormente, importantes informações sobre a morfologia e a dinâmica de irregularidades da camada ionosférica F, tanto as de origem equatorial como as originárias em médias latitudes. Características morfológicas como bifurcações, estrias, etc., ou dinâmicas como velocidade de deriva zonal, direção de propagação, são facilmente reveladas nas imagens das referidas emissões. No entanto, a análise de imagens bidimensionais coletadas em uma única localidade não possibilita a obtenção de informações sobre a estrutura vertical ou altura da emissão.

A altura da camada emissora é um parâmetro de grande interesse, pois pode afetar as medidas de outros parâmetros tanto na região mesosférica como ionosférica. Yamazaki (2001, ORIGINAL DE EJIRI, 2002) verificou com imageamento óptico a variação da emissão OI 557,7 com a altura no setor japonês. Verificou-se que tal variação pode ser crítica nas medidas de temperatura e ventos na região mesosférica. Por outro lado, as velocidades de deriva zonal de bolhas de plasma inferidas através de imagens das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm também podem variar dependendo das alturas de pico da emissão adotadas na linearização das imagens. Pimenta (2003) verificou que variando a altura de linearização de 250 para 300 km as velocidades zonais das bolhas de plasma inferidas pelas imagens da emissão OI 630,0 nm eram acrescidas em 15%. Portanto, determinar a altura da emissão por métodos alternativos parece ser de grande importância.

Vários métodos para se determinar a altura das emissões foram propostos e empregados ao longo de décadas. Em 1921, Van Rhijn propôs um método para se determinar a altura das emissões ionosféricas considerando-se que a camada emissora é opticamente fina e homogênea. O método considera que a intensidade da emissão varia com o ângulo zenital e depende da altura da camada emissora.

A intensidade ou brilho da emissão é uma função da altura, z , e do ângulo zenital, χ , de acordo com a Equação 7.1.

$$B(\chi, z) = \frac{B_0}{\left\{ \left[1 - \frac{R_e}{R_e + z} \right]^2 \sin^2 \chi \right\}^{1/2}} \quad (7.1)$$

onde χ é o ângulo zenital, R_e é o raio da Terra, z é a altitude da emissão e B_0 é o brilho medido no zênite.

Embora relativamente simples o método é bastante limitado na determinação da altitude da emissão principalmente na consideração da homogeneidade da camada. Além disto, o método não inclui os efeitos de absorção pelo ozônio, o albedo da Terra, o espalhamento Mie (poeira) em regiões correspondentes a ângulos zenitais maiores que 70° , no horizonte.

Por outro lado, a altura da camada pode ser determinada através de outras técnicas, diretas ou indiretas. Instrumentos a bordo de foguetes realizadas a partir da década de 50 determinaram as alturas das camadas emissoras do OH, O₂ e Na no intervalo de 80 a 120 km. No entanto, as medidas com foguetes envolvem campanhas de custo elevado e os dados obtidos são altamente localizados espacial e temporalmente. Esta limitação é contornada por sua vez por medidas feitas por instrumentos a bordo de satélites, os quais fornecem dados da taxa volumétrica de emissão em escala global, sobretudo das emissões no ultravioleta, não detectáveis em solo. A natureza global das medições permite, entre outras coisas, verificar as variações da altura das emissões com a longitude, com a latitude, com a hora local, com a estação do ano, etc. Certamente há limitações, como por exemplo, a impossibilidade da detecção das emissões visíveis, difíceis devido ao espalhamento da luz pela baixa atmosfera ou pela superfície da Terra. Outra técnica que vem sendo desenvolvida há algumas décadas é a reconstrução ou inversão tomográfica que permite a determinação da estrutura espacial de fenômenos ionosféricos, mas requer o desenvolvimento de complexas rotinas computacionais além de medidas absolutas acuradas do observável que se deseja analisar.

Finalmente, a determinação da altura a partir de sondagem passiva com instrumentos em solo pode ser feita através de uma técnica relativamente simples que exige apenas a disponibilidade de pelo menos dois instrumentos e o desenvolvimento de rotinas computacionais relativamente simples. Esta técnica é denominada triangulação e consiste na obtenção e comparação de imagens das emissões obtidas em localidades distintas, separadas por algumas dezenas de quilômetros.

A triangulação é uma técnica que foi empregada com sucesso na determinação da altura de nuvens noctilucetas desde o final do século XIX (JESSE, 1887, ORIGINAL DE GADSDEN E TAYLOR, 1994).

A altura da camada emissora do OH foi reportada pelo mesmo método na década de 70, por Peterson e Kieffaber (1973) e posteriormente por Taylor (1986, ORIGINAL DE TAYLOR et al., 1995). O desenvolvimento de imageadores *all-sky* equipados com dispositivos CCD permitiu a realização de campanhas de observação das emissões luminescentes na região mesosférica onde se pode determinar a altura de estruturas como ondas de gravidade (TAYLOR et al., 1984, 1998; KUBOTA et al., 1999; EJIRI et al., 2002).

A determinação da altura de estruturas nas emissões noturnas na região visível do espectro eletromagnético, como a OI 630,0 nm são raras e apenas recentemente a técnica de triangulação foi utilizada para se determinar as alturas de estruturas da emissão OI 630,0 nm durante a ocorrência de distúrbios ionosféricos propagantes (KUBOTA et al., 2000).

Por outro lado, a altura de tais estruturas ainda não foi determinada durante a ocorrência de bolhas de plasma equatoriais. A assinatura óptica das bolhas de plasma são depleções na intensidade da emissão OI 630,0 nm, caracterizadas por regiões escuras quase alinhadas às linhas de campo geomagnético que se propagam regularmente de oeste para leste e se estendem por longas distâncias latitudinais.

As primeiras observações simultâneas da emissão OI 630,0 nm durante a passagem de bolhas de plasma no setor brasileiro foram realizadas em outubro de 2003 com dois imageadores *all-sky* instalados em São José dos Campos (23,2S, 45,6 W) e Brazópolis (22,5 S, 45W). Posteriormente poucos eventos simultâneos e com imagens de boa qualidade foram possíveis, devido a condições adversas tanto no funcionamento dos imageadores como nas condições meteorológicas nas duas localidades em questão.

Deste modo, neste trabalho, apresentamos dois casos de estudo onde aplicamos a técnica da triangulação com imagens *all-sky* pela primeira vez no setor brasileiro para se determinar a altura das estruturas do plasma ionosférico observadas nas imagens da emissão OI 630,0 nm.

7.1 - MÉTODO DA TRIANGULAÇÃO

A triangulação é um dos métodos indiretos utilizados para determinar a altura das emissões e consiste em se fotografar a mesma porção do céu com pelo menos dois instrumentos situados em diferentes localidades, para posterior análise de pares de imagens obtidas simultaneamente. O método é ilustrado esquematicamente na Figura 7.1.

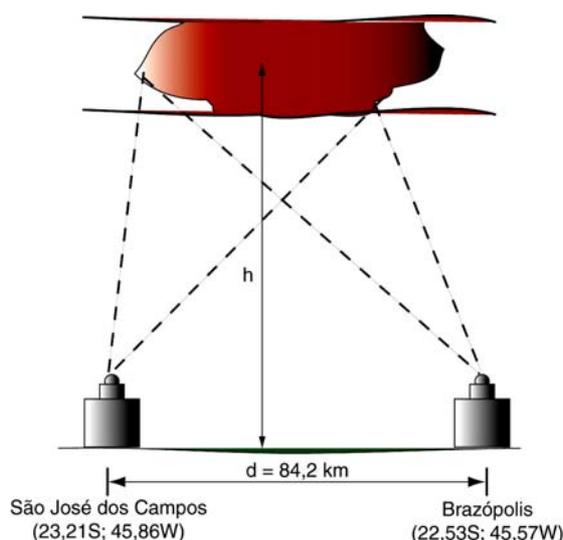


Figura 7.1: Configuração geométrica esquemática da localização dos imageadores e a região comum observada pelos mesmos.

A aplicação do método da triangulação envolve a determinação do coeficiente de correlação cruzada bidimensional, r , entre imagens obtidas simultaneamente em duas diferentes localidades. A função correlação cruzada bidimensional é expressa por:

$$r = \frac{\sum_i [(x(i) - mx) * (y(i - d) - my)]}{\sqrt{\sum_i (x(i) - mx)^2} \sqrt{\sum_i (y(i - d) - my)^2}} \quad (7.2)$$

onde $x(i)$ e $y(i)$ são as duas séries a serem correlacionadas, mx e my são as médias das respectivas séries, d é o desvio padrão das medidas

Neste trabalho a determinação de r foi implementada através de rotinas computacionais desenvolvidas na linguagem IDL (*Iterative Data Language*), seguindo as seguintes etapas:

1. Seleção de imagens obtidas simultaneamente em duas localidades, no mesmo horário, efetuando o processamento das imagens, de modo a obter projeções em mapas de coordenadas geográficas supondo-se diversas alturas para a camada emissora (200 a 500 km, em passos de 10 km, por exemplo) e numa determinada área de interesse (512 x 512 km², 1024 x 1024 km², 2000 x 2000 km², por exemplo), como mostra a Figura 7.2:

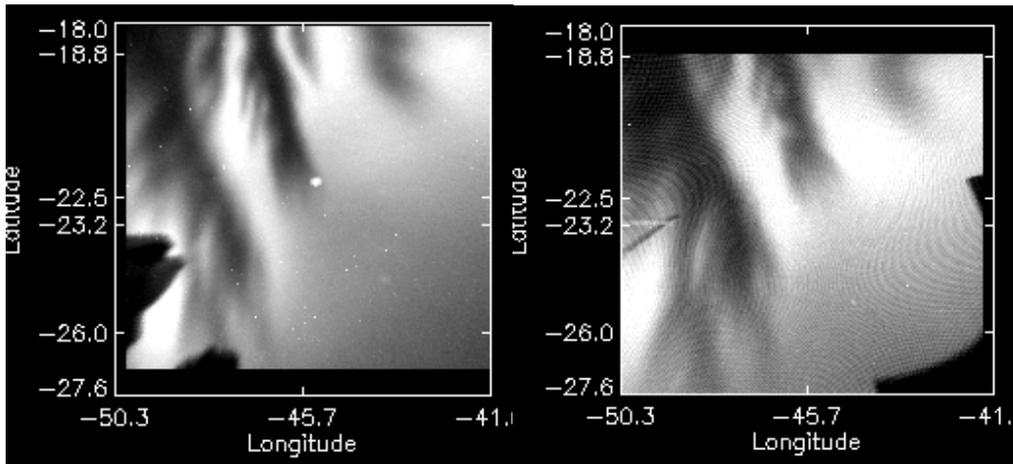


Figura 7.2: Imagens da emissão OI 630,0 nm, obtidas simultaneamente em Brazópolis (LNA) e em São José dos Campos (SJC) na noite de 16-17/out./2003, às 21:00 LT, linearizadas considerando-se uma altura de 250 km e projetadas num mapa de coordenadas geográficas de 1024 x 1024 km².

2. Sobreposição das imagens, de modo a selecionar a região geográfica observada simultaneamente pelos imageadores, como mostra a Figura 7.3. Na Figura 7.3 também se pode observar a presença de objetos de referência das duas localidades, como a cúpula do Observatório Nacional de Astrofísica, LNA. Na imagem obtida em SJC observa-se à esquerda uma escada presente no container do sítio de observação em São José dos Campos (à esquerda) e uma máscara na borda leste da imagem.

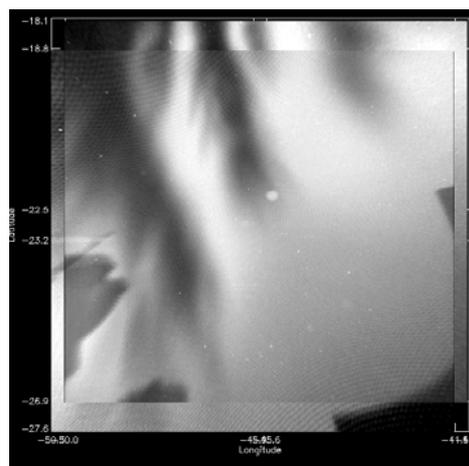


Figura 7.3: Imagens sobrepostas da emissão OI 630,0 nm, obtidas simultaneamente em Brazópolis (LNA) e em São José dos Campos (SJC) na noite de 16-17 de outubro de 2003, às 21:00 hora local.

3. A idéia da sobreposição das imagens é restringir a área a ser analisada na região observada simultaneamente pelos dois imageadores. No entanto, dentro desta região comum novas seleções poderão ser feitas, como indica o quadrado azul da Figura 7.4.

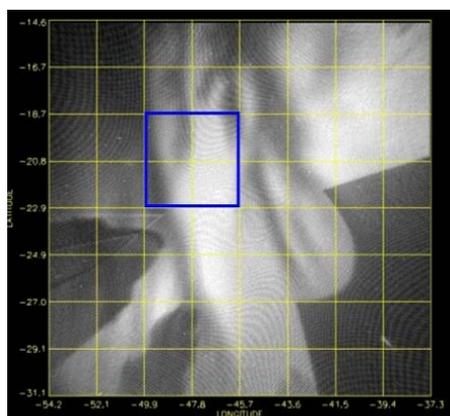


Figura 7.4: Região selecionada para análise por correlação cruzada bidimensional (quadrado azul) das imagens sobrepostas da emissão OI 630,0 nm, obtidas simultaneamente no LNA (22,5 S, 45,0W) e em SJC (23,2S, 45,6 W) na noite de 16-17 de outubro de 2003, às 21:00 LT.

Depois de selecionada a região, inicia-se a comparação da intensidade da emissão para cada par de coordenadas comuns nas duas imagens, através de uma função correlação cruzada.

4. Ao final do processo temos um conjunto de coeficientes de correlação cruzada em função da altura de linearização, conforme mostra a Figura 7.5.

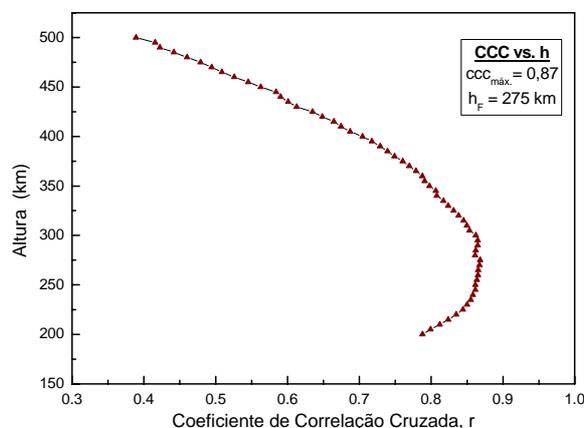


Figura 7.5: Gráfico característico do coeficiente de correlação cruzada em função da altura.

Na próxima seção analisamos duas noites onde foi possível a obtenção de imagens simultâneas da emissão OI 630,0 nm em duas localidades distintas.

7.2 - NOITE DE 16-17 DE OUTUBRO DE 2003

Na noite de 16-17 de outubro de 2003, foram realizadas observações ópticas da emissão OI 630,0 nm em São José dos Campos (SJC) e Brazópolis (LNA) simultaneamente. Em SJC, as observações tiveram início às 19:23 LT e prosseguiram até as 00:53 LT, e no LNA as observações começaram às 19:00 LT e terminaram às 00:59 LT. Por volta das 19:35 LT observa-se a entrada de bolhas de plasma no campo de visão dos imageadores, nas imagens coletadas nas duas localidades. No entanto, a partir das 19:58 LT há uma interrupção, devido a problemas técnicos, da aquisição das imagens em São José dos Campos a qual perdura até as 21:00 LT. Deste modo, apenas as imagens obtidas simultaneamente a partir das 21:00 serão analisadas nesta seção. A Figura 7.6 mostra a seqüência de imagens cruas obtidas simultaneamente nas duas localidades entre as 21:00 LT e as 23:59 LT. A intensa área clara é característica da presença da crista da anomalia de Appleton na região. O ponto luminoso no centro é o planeta Marte na época de máxima aproximação com a Terra. No painel superior, na borda leste das imagens foi utilizada uma máscara de modo a minimizar a luminosidade da cidade. Os índices de atividade geomagnética, Kp, indicam que as condições eram geomagneticamente calmas.

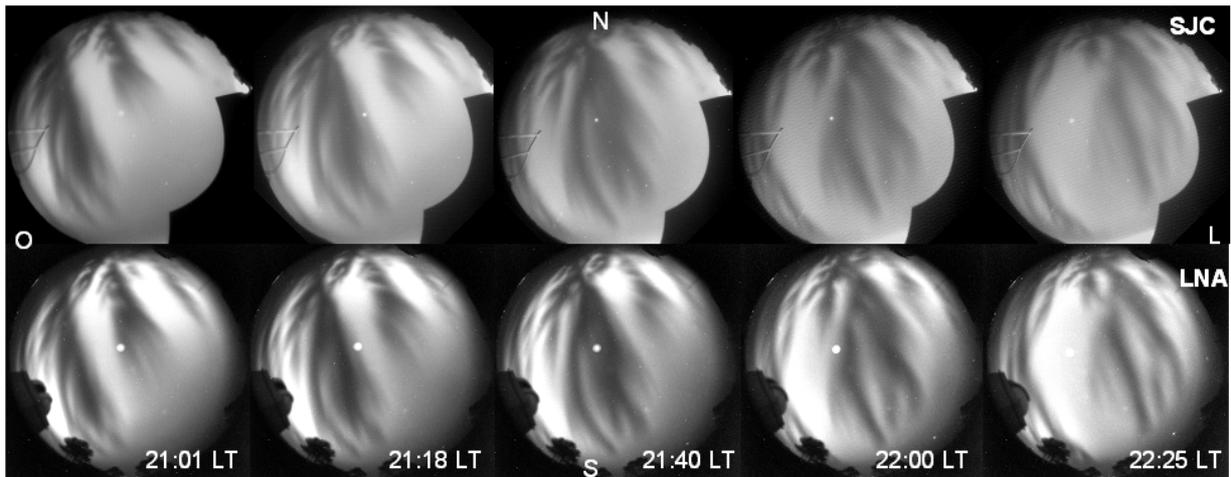


Figura 7.6: Seqüência de imagens cruas da emissão OI 630,0 nm obtidas simultaneamente na noite de 16-17 de outubro de 2003 em SJC (painel superior) e no LNA (painel inferior), entre as 21:00 LT e as 22:25 LT. Índices Kp: 4 4+ 3+ 4+ 5- 5+ 6-4+

Aplicando o procedimento descrito na Seção 7.1, cada imagem foi linearizada considerando-se alturas variando entre 200 e 400 km, em intervalos regulares de 10 km sendo projetadas em mapas de coordenadas geográficas de áreas de 1024 x 1024 km².

Posteriormente as imagens foram sobrepostas de modo a selecionar a área observada simultaneamente. Selecionamos então uma área no centro da imagem sobreposta de 128 x 128 km². Desta área selecionada obtivemos um conjunto dos máximos valores dos coeficientes de correlação cruzada obtidos para cada altura de linearização. Este procedimento foi realizado para seis diferentes horários de observação.

A Figura 7.7 apresenta o comportamento do coeficiente de correlação cruzada em função da altura para seis horários selecionados, para as imagens coletadas em SJC e LNA, na noite de 16-17 de outubro de 2003. O melhor coeficiente de correlação encontrado foi de 0,95 para uma altura de 230 km, às 21:17 LT.

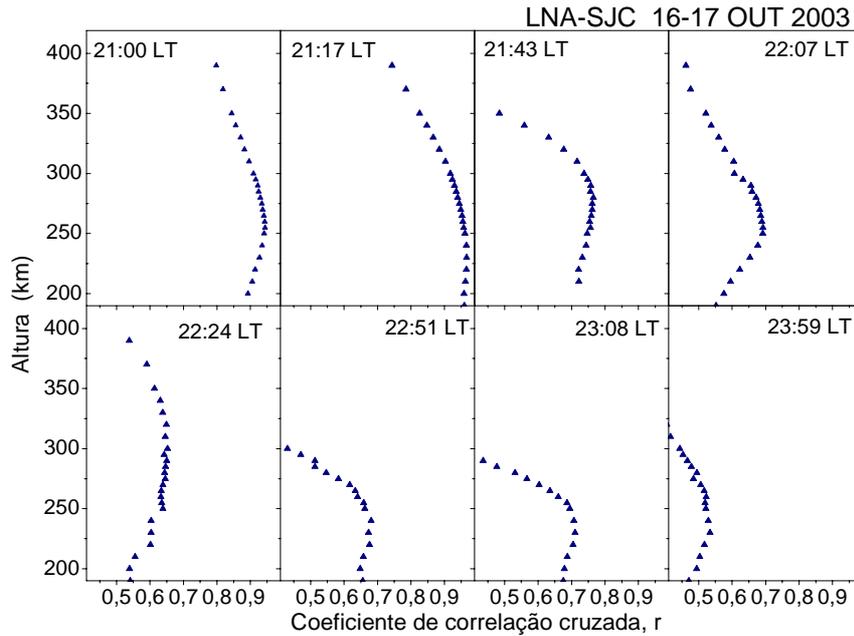


Figura 7.7: Coeficiente de correlação cruzada, em função da altura para diversos horários na noite de 16-17 de outubro de 2003.

Na Figura 7.8 é mostrada a variação noturna da altura da emissão OI 630,0 nm, no intervalo entre 21:00 e 24:00 LT. As barras de erro indicam os desvios padrões dos valores inferidos para a altura da emissão, que variaram entre 6 e 15 km.

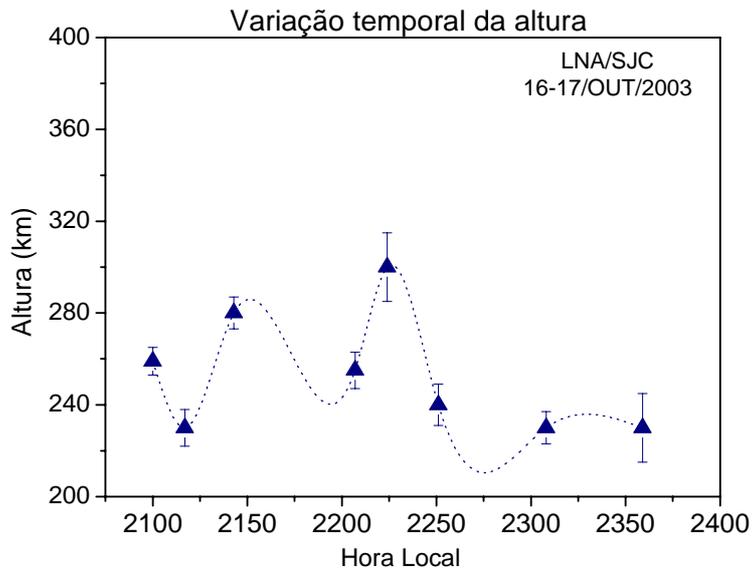


Figura 7.8: Variação noturna da altura da emissão OI 630,0 nm na noite de 16-17 de outubro de 2003.

De modo a verificar se há alguma correlação entre as alturas inferidas pelo método da triangulação e a altura da base da camada F inferida através dos dados de ionogramas, mostramos na Figura 7.9 o comportamento da base da camada F através dos parâmetros $h'F$ e hpF_2 da noite de 16-17 de outubro de 2003.

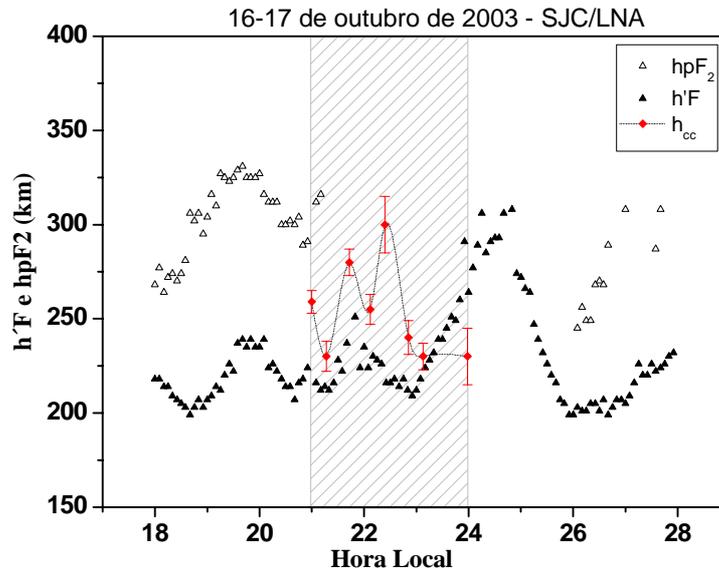


Figura 7.9: Comportamento noturno da altura virtual da base da camada F, $h'F$ e da altura do pico da camada, hpF_2 , na noite de 16-17 de outubro de 2003.

Na Figura 7.9 observa-se que os valores de altura inferidos pela correlação cruzada (em vermelho) variam num patamar superior aos valores de $h'F$ em praticamente todo o intervalo (área hachurada). Este comportamento parece indicar que as alturas inferidas pela correlação cruzada não representam a altura da base da camada F.

7.3 – NOITE DE 12-13 DE AGOSTO DE 2004

A Figura 7.10 mostra uma seqüência de imagens da emissão OI 630,0 nm obtidas simultaneamente na noite de 12-13 de agosto de 2004 nas seguintes localidades: Brazópolis, LNA (22,5S, 45,6W), e Cachoeira Paulista, CP, (22,7 S, 45,0 W). Estimamos que entre a distância entre as duas localidades é de aproximadamente 75 km. Nesta noite, houve boas condições de observação, com a ocorrência de alguma nebulosidade em Cachoeira Paulista. Na borda norte da imagem observa-se uma intensa área clara que pode ser identificada como a crista da anomalia de

Appleton. Foi observada a passagem de uma única bolha de plasma no campo de visão do imageador, entre as 19:56 LT e as 22:18 LT.

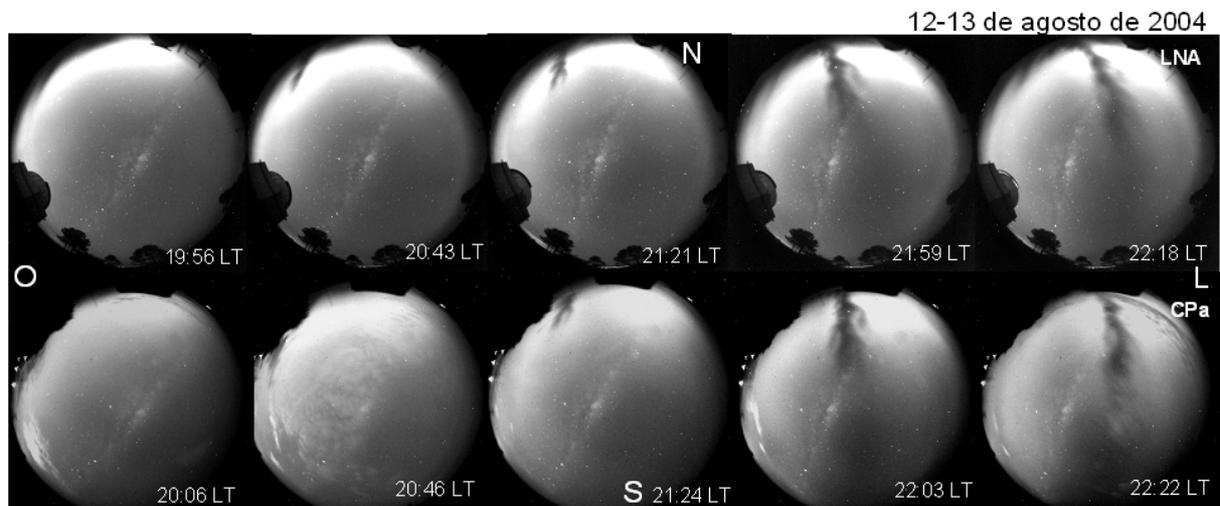


Figura 7.10: Seqüência de imagens cruas da emissão OI 630,0 nm obtidas simultaneamente na noite de 12-13 de outubro de 2004 em SJC (painel superior) e no CP (painel inferior), entre as 19:56 LT e as 22:22 LT. Índices Kp: 2-, 1+, 1+, 2+, 2, 2-, 1, 1-.

Neste caso de estudo, utilizamos apenas um par de imagens no horário das 21:59/22:03 LT, quando a bolha encontrava-se aproximadamente no zênite da imagem. As imagens foram linearizadas para alturas de 200 a 400 km, em intervalos de 5 km. A Figura 7.11 mostra a variação do coeficiente de correlação cruzada em função da altura às 22:00 LT.

O coeficiente máximo alcançado foi de 0,9 para uma altura de 250 ± 20 km. Nesta noite não foi possível estimar a variação noturna da altura, uma vez que apenas uma bolha de plasma passou pelo campo de visada do imageador, com extensões latitudinais e zonais menores que no caso anterior.

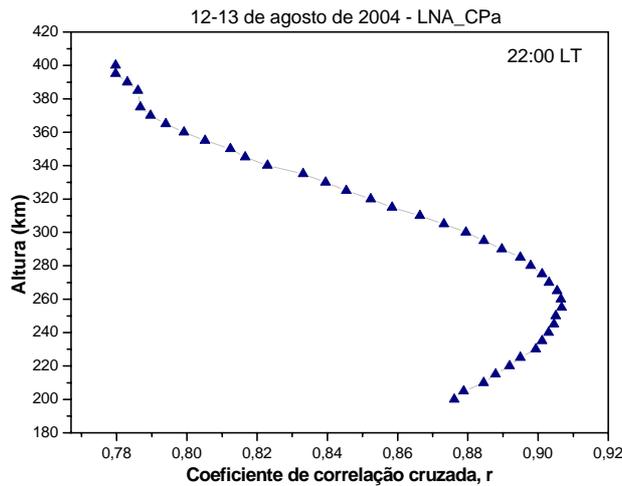


Figura 7.11: Coeficiente de correlação cruzada, em função da altura para um par de imagens obtido às 22:00 LT, na noite de 12-13 de agosto de 2004.

Na Figura 7.12 é mostrado o comportamento noturno dos parâmetros $h'F$ e $hpF2$, extraídos de ionogramas na noite de 12-13 de agosto de 2004. Novamente observa-se que a altura inferida com a correlação cruzada não reflete necessariamente a altura da base da camada F. A barra de erro reflete o desvio padrão nos valores da altura.

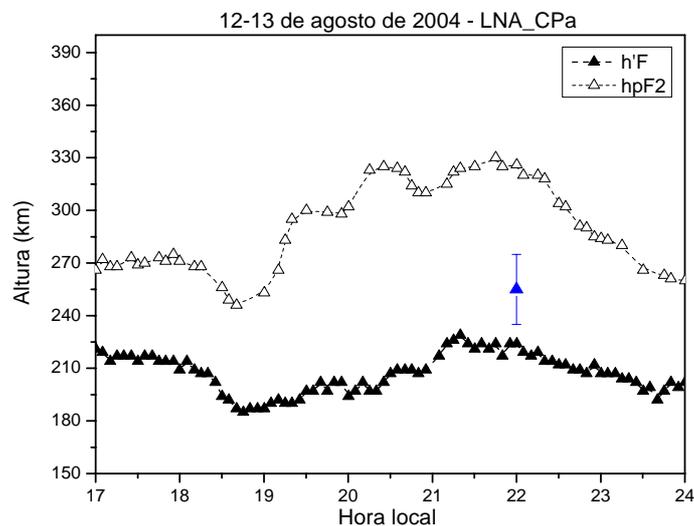


Figura 7.12: Comportamento noturno da altura virtual da base da camada F, $h'F$ e da altura do pico da camada, $hpF2$, na noite de 12-13 de agosto de 2004, extraído de ionogramas obtidos em São José dos Campos.

7.4 – SUMÁRIO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo foram apresentados dois casos de determinação da altura da emissão OI 630,0 nm a partir da técnica de triangulação, com imagens obtidas simultaneamente em duas localidades separadas por dezenas de quilômetros, durante a observação de bolhas de plasma. Os resultados são sumarizados a seguir.

1. Na noite de 16-17 de outubro de 2003, determinamos as alturas da camada emissora do OI 630,0 nm a partir de imagens obtidas simultaneamente em Brazópolis e São José dos Campos, duas estações separadas por aproximadamente 84 km. As alturas foram determinadas durante a passagem de bolhas de plasma no campo de visão dos imageadores, num intervalo aproximado de 3 horas. Um conjunto de oito curvas do coeficiente de correlação cruzada foi obtido para diferentes horários de aquisição. Os melhores coeficientes de correlação foram obtidos às 21:00 LT e 21:17 LT, quando as alturas consideradas para a emissão foram de 260 e 230 km respectivamente. Nos horários subsequentes os coeficientes foram próximos a 0,75, para alturas variáveis entre 220 e 300 km.
2. Foi verificada uma tendência oscilatória nos valores de altura inferidos pela triangulação durante as três horas de observação das bolhas de plasma.
3. Na noite de 12-13 de agosto de 2004 determinamos a altura da emissão OI 630,0 nm através de imagens coletadas simultaneamente em Brazópolis e Cachoeira Paulista, separadas por uma distância aproximada de 80 km. Nesta noite foi observada a passagem de uma bolha de plasma entre as 20:00 e 22:00 LT com extensão latitudinal e zonal moderadas. O coeficiente de correlação foi determinado quando a bolha atingiu latitudes próximas ao zênite da imagem. Neste caso o coeficiente determinado foi de 0,95 para alturas de linearização de 250 ± 20 km.

4. A emissão OI 630,0 nm apresenta máxima taxa de emissão em torno de 250 km de altura, cerca de uma altura de escala abaixo do pico da camada F (TAKAHASHI et al., 1990). Um importante resultado alcançado nos dois casos estudados é que as alturas inferidas com a triangulação não são necessariamente a altura do pico da emissão, mas oscilam entre valores superiores e inferiores ao mesmo. Este comportamento também foi verificado por Kubota et al. (2000), ao analisar imagens simultâneas da emissão OI 630,0 nm durante a passagem de distúrbios ionosféricos propagantes no setor japonês. Foi verificado que as alturas inferidas pela triangulação representam as alturas onde a emissão sofre maior flutuação provocada pela passagem de ondas. Estudos sobre a altura das emissões OH e 557,7 nm (KUBOTA et al., 2000, EJIRI et al., 2002) também mostraram que as alturas inferidas pela triangulação não são necessariamente a altura do pico da emissão, mas a altura onde a flutuação na taxa de emissão imposta por distúrbios como ondas de gravidade atinge maior amplitude. Nos caso das alturas inferidas durante a passagem de bolhas de plasma, tal interpretação é bastante razoável uma vez as bandas escuras representam depleções na intensidade da emissão OI 630,0 nm, associadas a regiões de baixa densidade de plasma. A multiplicidade de escalas espaciais e de densidades presentes nas irregularidades do plasma de grande escala promovem diferentes amplitudes de flutuação na emissão OI 630,0 nm.

5. Nos dois casos analisados, as alturas inferidas apresentaram variações entre 6 e 20 km. Tal variação nos valores de altura inferida pela triangulação pode ser atribuída a algumas fontes de erro. Uma possível fonte é a falta de sincronismo no horário de aquisição das imagens, que pode ser crítico na identificação das mesmas estruturas nas duas imagens. Outra possível fonte é o tempo de aquisição das imagens, o qual interfere na nitidez das estruturas, dificultando a comparação com a função correlação. Finalmente, um fator não menos importante está relacionado às condições atmosféricas do local de observação, como a presença de nuvens, umidade ou fontes espúrias de luminosidade.

A despeito destas limitações, concluímos assim que a técnica de triangulação pode ser bastante útil na determinação da altura de estruturas nas emissões termosféricas, como a OI 630,0 nm, durante a passagem de bolhas de plasma, mas deve ser sujeita a controle sistemático e rigoroso dos parâmetros como tempo de aquisição e sincronismo no tempo de aquisição, etc.

CAPÍTULO 8 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi explorar, através da técnica de imageamento óptico das emissões termosféricas OI 630,0 nm e OI 777,4 nm, duas classes de fenômenos ionosféricos observados nas baixas latitudes do hemisfério sul, no setor longitudinal brasileiro: irregularidades de plasma de grande escala ou bolhas de plasma e distúrbios ionosféricos propagantes de média escala ou *MSTIDs* –ou bandas termosféricas de média escala. Ambos os fenômenos estão relacionados à ocorrência de *spread-F* nas regiões de baixas latitudes e conseqüentemente podem interferir nos sistemas de navegação, posicionamento e nos sistemas de telecomunicações baseados na transmissão de sinais de rádio.

No estudo das irregularidades de grande escala do plasma ionosférico equatorial, analisamos a ocorrência de estruturas finas presentes nas bolhas de plasma observadas com o imageamento da emissão OI 777,4 nm, que ocorre na região do pico de densidade da camada F, em torno de 350 km. Foram analisadas três noites de dados ópticos das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm: 23-24 de outubro de 2000, 31 de outubro – 01 de novembro de 2000, 15-16 de outubro de 2001. Nas noites de 23-24 de outubro de 2000 e 15-16 de outubro de 2001 foi observado elevado grau de estruturação nas imagens da emissão OI 777,4 nm com a ocorrência de diversas estrias, não observadas nas imagens da OI 630,0 nm. Porém, na noite de 31 de outubro – 01 de novembro de 2000, verificou-se que as estruturas observadas nas imagens da emissão OI 777,4 nm eram facilmente identificadas nas imagens da OI 630,0 nm, como bifurcações, e não no mesmo padrão de estrias que nas outras noites estudadas. Deste modo, constatamos que a formação de estruturas mais finas nas bolhas de plasma parece apresentar alguma variabilidade diária;

Os principais resultados desta investigação são sumarizados a seguir:

1. As depleções de plasma (bolhas) quando observadas através da emissão OI 777,4 nm mostram que a bolha possui um envelope principal (com bifurcações ou

não). Porém no interior do envelope pode existir ou não estruturas finas na forma de raias.

2. O estudo estatístico da largura zonal das estruturas mostrou os seguintes resultados:

a) Há uma tendência de alargamento das bolhas com a latitude tanto na noite de 23-24 de outubro como na noite de 15-16 de outubro de 2001; no entanto, no primeiro caso há maior distribuição de larguras menores (média= 140 km). No segundo caso, há maior distribuição de larguras maiores (média de 274 km).

b) O estudo das bifurcações mostrou uma tendência de larguras médias menores em latitudes mais baixas e larguras maiores em latitudes mais altas. Os valores médios para a noite de 31 de outubro – 01 de novembro de 2000 foram de 71 km e para a noite de 15-16 de outubro de 2001, a média é de 92 km.

c) A análise estatística das estrias mostrou que na noite de 23-24 de outubro de 2000 as larguras não apresentam nenhuma tendência com a latitude e os valores apresentam maior distribuição para larguras menores. Na noite de 15-16 de outubro de 2001, a largura das estrias mostrou uma tendência de serem mais largas com a latitude, assim como no caso das bolhas, com valores médios de 55 km, distribuídos uniformemente entre 10 e 150.

3. O nível de depleção na região das bolhas determinado nas paredes externas e no interior da bolha variou entre 11 e 40% o que é condizente com o nível de depleção reportado por outros autores, quando da observação óptica de bolhas de plasma; por outro lado o nível de depleção na região das estrias variou entre 1 e 3%.

4. Observamos que à medida que as estruturas finas evoluem latitudinalmente, elas podem preservar sua largura zonal, porém estão sujeitas a interações dinâmicas entre si, de modo que pode haver sobreposição de estrias vizinhas formando estruturas novas e mais largas, ou mesmo, uma estria pode se dividir em novas estruturas finas.

5. As depleções do plasma apresentam diferentes inclinações para leste ou para oeste, e parece depender do tempo de vida da depleção.

6. A formação de estruturas como bifurcações e estrias pode estar intimamente ligada à variabilidade das condutividades Pedersen integradas ao longo das linhas de campo, no interior e exterior das depleções. A condutividade Pedersen é proporcional entre outras variáveis, a densidade eletrônica dentro e fora da estrutura. A razão entre estas condutividades parece ser um fator decisivo na formação de estruturas como bifurcações e estrias. Neste trabalho encontramos níveis de depleção entre 11 a 40% , o que implica em valores relativamente baixos para a razão das condutividades, o que favorece, segundo McDonald (1971) e Pimenta et al. (2003) a formação de estruturas secundárias.

7. As estruturas finas alternadamente claras e escuras observadas nas imagens da emissão OI 777,4 nm parecem refletir uma estrutura fina nos campos elétricos verticais nas regiões interna e externa da bolha. Campos elétricos verticais promovem fluxo de plasma para leste ou para oeste, dependendo da sua orientação para baixo ou para cima, conforme mostraram estudos realizados por Aggson et al., 1997, Laakso et al. 1995, Su et al. 2001, Lin et al., 2005. Assim, entendemos que o parâmetro físico responsável pela ocorrência de estruturas finas são campos elétricos verticais de natureza bipolar, que se mapeiam da região equatorial para baixas latitudes, via linhas do campo geomagnético.

A segunda parte deste trabalho, descrita no capítulo 6, explorou as características de outra classe de irregularidades ionosféricas observadas em baixas latitudes: os distúrbios ionosféricos propagantes de média escala (*MSTIDs*) ou bandas termosféricas de média escala. Os *MSTIDs* são fenômenos regularmente observados e reportados nas médias latitudes do hemisfério Norte nos setores americano e asiático e do hemisfério sul no setor australiano. No setor sul-americano, sua ocorrência foi raramente reportada (Martinis et al., 2006; Pimenta et al. 2008). Neste trabalho apresentamos um estudo detalhado das características dos *MSTIDs*, sobretudo a partir da análise de dados ópticos, com a complementação de

dados ionosféricos e meteorológicos cujos principais resultados são apresentados a seguir.

1. A assinatura óptica dos *MSTIDs* observados nas baixas latitudes do hemisfério sul é associada à passagem de bandas escuras (únicas ou múltiplas) avizinhas ou não de regiões mais claras, observadas com as imagens da emissão OI 630,0 nm. As bandas escuras são estruturas orientadas na direção nordeste-sudoeste e se propagam para noroeste, com velocidades que podem variar de entre 40 e 250 m/s.

2. O horário de ocorrência é predominantemente no setor da meia-noite, com duração média de observação de 3 horas.

3. Os eventos de bandas termosféricas de média escala foram em sua totalidade observados em noites geomagneticamente calmas.

4. A análise de dados ionosféricos simultâneos à passagem das bandas termosféricas de média escala mostrou um decréscimo da frequência crítica de plasma, f_oF2 , associado a uma elevação da camada F, mostrada pela variação de $h'F$. Foram observadas também pequenas oscilações na base da camada tanto na fase de elevação de $h'F$ quanto na fase de supressão de f_oF2 . Os valores de $\Delta h'F$ não ultrapassaram 70 km enquanto os valores de Δf_oF2 variaram entre 1,0 e 2,5 MHz.

5. Durante a passagem das bandas termosféricas de média escala foi verificada a ocorrência de *Spread-F* nos ionogramas. Nos quatro casos estudados o tipo predominante foi *spread-F* do tipo frequência.

O estudo estatístico das bandas termosféricas de média escala baseado em sete anos de dados ópticos revelou as seguintes características:

6. A taxa de ocorrência com relação ao número de horas de observação é de 11% em períodos de baixa atividade solar e de 3% em atividade solar ascendente

apresentando apresenta um máximo nos meses próximos ao solstício de junho. Em dois anos de dados ópticos coletados em período de alta atividade solar, não foi observada a ocorrência de bandas termosféricas de média escala.

7. A direção de propagação para noroeste foi observada para a totalidade dos eventos, com pequenas variações no ângulo azimutal, mostrando uma forte anisotropia na direção de propagação.

Finalmente, as características semelhantes aos *MSTIDs* observados em médias latitudes, como a orientação, direção de propagação e ocorrência de Spread-F, inspirou um estudo complementar baseado na análise de dados meteorológicos visando explorar a possível relação entre a ocorrência de distúrbios troposféricos em médias latitudes que pudessem gerar ou ampliar instabilidades eletrodinâmicas (instabilidade de Perkins) relacionadas à ocorrência de *MSTIDs*. Embora limitado a apenas dois casos e desprovido de parâmetros numéricos de ondas de gravidade no intervalo entre o distúrbio troposférico em média latitude e a ocorrência de *MSTIDs* em baixas latitudes, a fonte geradora de distúrbios proposta parece ser a mais provável, devido a ocorrência de *MSTIDs* em noites cujas condições geomagnéticas eram exclusivamente calmas.

No capítulo 7 apresentamos um estudo inédito da altura da emissão OI 630,0 nm determinada com a técnica de triangulação, com dois imageadores *all-sky* similares instalados em duas diferentes localidades separadas por algumas dezenas de quilômetros. Através de análise de correlação cruzada de duas imagens obtidas simultaneamente inferimos as alturas da emissão OI 630,0 nm. Nos dois casos estudados, comparamos as alturas inferidas com a triangulação com o comportamento noturno da altura virtual da base da camada, $h'F$, observando valores sempre superiores aos de $h'F$. Este resultado parece indicar que as alturas inferidas não representam a altura da base da camada F. Por outro lado, a emissão OI 630,0 nm apresenta máxima taxa de emissão em torno de 250 km de altura, cerca de uma altura de escala abaixo do pico da camada F com uma largura aproximada de 50 km, (TAKAHASHI et al., 1990). Um importante resultado alcançado

nos dois casos estudados é que as alturas inferidas com a triangulação não são necessariamente a altura do pico da emissão, mas oscilam entre valores superiores e inferiores ao mesmo. Deste modo parece razoável afirmar que as alturas inferidas com a triangulação representam a altura onde a flutuação da emissão é mais pronunciada devido à presença das bolhas de plasma. Verificamos assim que a técnica de triangulação pode ser bastante útil na determinação da altura de estruturas nas emissões termosféricas, como a OI 630,0 nm, durante a passagem de bolhas de plasma, mas deve ser sujeita a controle sistemático e rigoroso dos parâmetros como tempo de aquisição e sincronismo no horário de aquisição das imagens. A determinação mais precisa das alturas das estruturas pode ser útil na análise das velocidades de deriva zonal de plasma.

Concluimos esta tese de doutorado ressaltando a importância da técnica de imageamento óptico das emissões aeroluminescentes da termosfera, sobretudo das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm, que ocorrem na base e no pico da camada ionosférica F, respectivamente. O imageamento simultâneo das duas emissões favorece o estudo de diferentes aspectos das bolhas de plasma, como a fase de formação e a evolução inicial das irregularidades e de estruturas secundárias como bifurcações e estrias, a altura da camada emissora. Estes aspectos podem ser monitorados mais eficientemente durante a fase de atividade solar alta, quando a densidade eletrônica da camada F é maior (maior intensidade da emissão OI 777,4 nm) e quando há uma boa relação sinal-ruído, o que possibilita a observação de maiores detalhes nas imagens.

Outro aspecto a ser ressaltado neste trabalho foi a observação óptica de irregularidades do plasma da região ionosférico F de origem diversa à equatorial - os *MSTIDs* - durante períodos de atividade solar baixa e ascendente, utilizando-se imagens da emissão OI 630,0 nm. O imageamento sistemático e monitorado de uma única emissão durante todas as estações do ano e durante atividade solar baixa permitiu um estudo de longo termo de uma classe de fenômenos praticamente inexplorada no setor sul-americano. Uma das características marcantes da ocorrência dos *MSTIDs* foi a maior taxa de ocorrência em períodos centrados no

solstício de junho (inverno no hemisfério sul), período no qual a ocorrência de irregularidades de plasma de origem equatorial é rara ou dependente de atividade geomagnética.

Uma sugestão para futuros trabalhos é o imageamento óptico simultâneo das emissões OI 630,0 nm e OI 777,4 nm em regiões equatoriais e em baixas latitudes de modo a monitorar o processo inicial e a evolução das bolhas de plasma e estruturas secundárias. Notamos também a necessidade de uma sistemática de imageamento óptico simultâneo das duas emissões acima referidas durante várias noites de modo a confirmar e ampliar o estudo sobre a variabilidade diária de formação de estruturas secundárias.

Sendo os *MSTIDs* uma classe de fenômenos praticamente inexplorada no América do Sul, muitos aspectos podem ser ainda analisados. Dentre eles sugerimos um estudo de longo termo sobre a ocorrência de *Spread-F* associado à passagem de bandas termosféricas, no qual se possa verificar a taxa de ocorrência e os tipos de *Spread-F* mais freqüentemente associados aos *MSTIDs* em baixas latitudes. Outro estudo interessante seria sobre a fonte geradora dos *MSTIDs*, regularmente aceito pela comunidade científica como a manifestação de ondas de gravidade em altitudes ionosféricas. Alguns estudos recentes relacionam a fonte geradora de ondas de gravidade a convecções troposféricas. Com a disponibilidade de extenso banco de dados meteorológicos e a aplicação de técnicas de análise de ondas de gravidade, podemos sugerir uma análise mais detalhada sobre a correlação dos referidos fenômenos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AARONS, J.; MENDILLO, M.; YANTOSCA, R.; KUDEKI, E. GPS phase fluctuations in the equatorial region during the MISETA 1994 campaign. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 101, n. A12, p. 26851-26862, 1996.
- AARONS, J.; MENDILLO, M.; YANTOSCA, R. GPS phase fluctuations in the equatorial region during sunspot minimum. **Radio Science**, v.32, n.4, p.1535-1550, 1997.
- ABALDE, J. R.; FAGUNDES, P. R., BITTENCOURT, J. A.; SAHAI, Y. Observations of equatorial F region plasma bubbles using simultaneous OI 777.4 nm and OI 630.0 nm imaging: New Results. **Journal of Geophysical Research**, v.106, n. A12, p. 30331-30336, 2001.
- ABALDE, J. R.; FAGUNDES, J. A., SAHAI, Y.; PILLAT V. G.; PIMENTA, A. A.; BITTENCOURT, J. A. Height-resolved ionospheric drifts at low latitudes from simultaneous OI 777,4 nm e OI 630,0 nm imaging observations. **Journal of Geophysical Research**, v.109, n. A11308, 2004.
- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; BITTENCOURT, J. A. Some characteristics of spread-F at the magnetic equatorial station Fortaleza. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. A8, p. 6836-6842, 1981.
- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; KANTOR, I. J., SOBRAL, J. H. A. Gravity wave induced ionization layers in the night F-region over Cachoeira Paulista (22-degrees-S, 45-degrees-W). **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 44, n. 9, p. 759-767, 1982.
- ABDU, M. A.; DE MEDEIROS, R. T.; BITTENCOURT, J. A.; BATISTA, I. S. Vertical Ionization drift velocities and range type spread-F in the evening equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 88, n. NA1, p.399-402, 1983.
- ABDU, M. A.; SOBRAL, J. H. A.; NELSON, O. R., BATISTA, I. S. Solar cycle related range type spread-F occurrence characteristics over equatorial and low latitude stations in Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.47 n.8-10, p.901-905, 1985.
- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; WALKER G. O.; SOBRAL, J. H. A.; TRIVEDI, N. B.; DE PAULA, E. R. Equatorial ionospheric electric fields during magnetospheric disturbances: local time/longitude dependences from recent EITS campaigns. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 57, n.10, p.1065-1083, 1995.
- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A. A New aspect of magnetic declination control of equatorial spread-F and F-region dynamo. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. A10, p. 14897-14904, 1992.
- ABREU, V. J.; YEE, J. H.; SOLOMON, S. C.; Dalgarno, A. The quenching rate of O(¹D) by O(³P). **Planet. Space Sci.** v.34, n.11, p. 1143-1145, 1986.
- AGGSON, T. L.; HANSON, W. B.; HERRERO, F. A.; MAYNARD, N. C.; PFAFF, R. F.; SABA, J. L.; TSUNODA, R. T. Equatorial Electric-Field Observations. **Advances in Space Research**, v. 13, n. 1, p. 271-291, 1993.

- ALTADILL, D. e APOSTOLOV, E. M. Vertical propagating signatures of wave-type oscillations (2-and 6.5-days) in the ionosphere obtained from electron-density profiles. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, n. 9, p. 823-834, 2001.
- ANDERSON, D. N. e MENDILLO. M. Ionospheric conditions affecting the evolution of equatorial plasma depletions. **Geophysics Research Letters**, v.10, n. 7, p. 541-544, 1983.
- ANDERSON, D. e HAERENDEL, G. The motion of depleted plasma regions in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, n. A8, p. 4251-4256, 1979.
- BATES, D. R. Recombination in the normal E and F layers of the ionosphere. **Planet. Space Sci.**, v. 36, n.1, p. 55-63, 1988.
- BATISTA, P. P.; ABDU, M. A.; BITTENCOURT, J. A. Equatorial F region vertical plasma drifts: seasonal and longitudinal asymmetries in the American sector. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. A11, p.12055-12064, 1986.
- BIONDI, M. A. e SIPLER, D. P. Studies of equatorial 630 nm airglow enhancements produced by a chemical release in the F-region. **Planet. Space Sci.**, v. 32, n.12, p.1605-1610, 1984.
- BITTENCOURT, J. A.; TEIXEIRA, N. R.; SAHAI, Y.; TAKAHASHI, H. Mapping of ionospheric F-region parameters from atomic oxygen airglow emissions. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 45, n.10, p. 697-705, 1983.
- BOSKA, J. AND SAULI, P. Observations of gravity waves of meteorological origin in the F-region ionosphere. **Physics and Chemistry of the Earth Part C-Solar-Terrestrial and Planetary Science**, v. 26, n. 6, p. 425-428, 2001.
- BOWMAN, G. G. A comparison of nighttime TID characteristics between equatorial-ionospheric-anomaly crest and midlatitude regions, related to spread F occurrence. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v.106, n. A2, p.1761-1769, 2001.
- BOWMAN, G. G. The nature of ionospheric spread-F irregularities in mid-latitude regions. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 43, n. 1, p. 65-&, 1981.
- BOWMAN, G. G. Nighttime midlatitude traveling ionospheric disturbances associated with mild spread-F conditions. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, v. 43 n.11, p. 899-920, 1991.
- BOWMAN, G. G. Upper-atmosphere neutral-particle density variations compared with spread-F occurrence rates at locations around the world. **Annales Geophysicae-Atmospheres Hydrospheres and Space Sciences**, v.10, n. 9, p. 676-682, 1992.
- BOWMAN, G. G. The Influence of the upper-atmosphere neutral particle density on the occurrence of equatorial spread-F. **Annales Geophysicae-Atmospheres Hydrospheres and Space Sciences**, v. 11, n. 7, p. 624-633, 1993.
- CHAMBERLAIN, J. W. **Physics of the aurora and airglow**, Washington: American Geophysical Union, 1971.

COLERICO, M.; MENDILLO, M.; NOTTINGHAM, D.; BAUMGARDNER, J.; MERIWETHER, J.; MIRICK, J.; REINISCH, B. W.; SCALI, J. L.; FESEN, C. G.; BIONDI, M. A. Coordinated measurements of F region dynamics related to the thermospheric midnight temperature maximum. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 101, n. A12, p. 26783-26793, 1996.

COLERICO, M. J. AND MENDILLO, M. The current state of investigations regarding the thermospheric midnight temperature maximum (MTM). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 12-14, p. 1361-1369, 2002.

CONDON, E. U. e SHORTLEY, G. H. **Theory of atomic spectra**. Cambridge: Cambridge University Press, 1967.

DING, F.; WAN, W.; YUAN, H. The influence of background winds and attenuation on the propagation of atmospheric gravity waves. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n.7, p. 857-869, 2003.

EJIRI, M. K.; SHIOKAWA, K.; OGAWA, T.; KUBOTA, M.; NAKAMURA, T.; TSUDA, T. Dual-site imaging observations of small-scale wave structures through OH and OI nightglow emissions. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n.10, p. 101029, 2002.

FAGUNDES, P. R.; SAHAI, Y.; BITTENCOURT, J. A.; TAKAHASHI, H. Plasma drifts inferred from thermospheric neutral winds and temperature gradients observed at low latitudes. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.58, n.11, p.1219-1228, 1996.

FAGUNDES, P. R.; BITTENCOURT, J. A.; SAHAI, Y.; TAKAHASHI, H.; TEIXEIRA, N. R. Plasma drifts inferred from thermospheric neutral parameters during geomagnetic storms at 23° S. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.60, p. 1303-1311, 1998.

FEJER, B. G.; KELLEY, M. C. Ionospheric irregularities. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v.18, n.2, p. 401-454, 1980.

FEJER, B. G.; KUDEKI, E.; FARLEY, D. T. Equatorial F-region zonal plasma drifts. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. A12, p. 12249-12255, 1985.

FEJER, B. G. Low latitude electrodynamic plasma drifts: a review. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 53, n. 8, p. 677-693, 1991.

FRANCIS, S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.37, n.6-7, p. 1011-1054, 1975.

FUKAO, S.; KELLEY, M. C.; SHIRAKAWA, T.; TAKAMI, T., YAMAMOTO, M.; TSUDA, T.; KATO, S. Turbulent upwelling of the midlatitude ionosphere .1. Observational results by the MU radar. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 96, n. A3, p. 3725-3746, 1991.

GADSDEN, M. AND TAYLOR, M. J. Anweisungen-fur-die-photographischen-aufnahmen-der-leuchtenden-nachtwolken - 103 years on - noctilucent clouds. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 56, n. 4, p. 447-459, 1994.

GARCIA, F. J.; KELLEY, M. C.; MAKELA, J. J.; HUANG, C. S. Airglow observations of mesoscale low-velocity traveling ionospheric disturbances at midlatitudes. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 105, n. A8, p. 18407-18415, 2000.

GERSHMAN, B. N.; GRIGOR' YEV, G. I. Theory of moving ionospheric disturbances (magnetohydrodynamic absorption). **Geomagnetism and Aeronomy**, v. 5, p. 2248-2255, 1965.

HAERENDEL, G. **Theory of equatorial spread-F**. Garching: Report Max-Planck Institute. Germany, 1973.

HAERENDEL, G.; ECCLES, J. V.; ÇAKIR, S. Theory for modelling the equatorial evening ionosphere and the origin of the shear in the horizontal plasma flow. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. A2, p. 1209-1223, 1992.

HAMZA, A. M. Perkins instability revisited. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 104, n. A10, p. 22567-22575, 1999.

HANSON, W. B. AND BAMGBOYE, D. K. The Measured motions inside equatorial plasma bubbles. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 89, n. NA10, p. 8997-9008, 1984.

HANSON, W. B.; CRAGIN, B. L.; DENNIS, A. The effect of vertical drift on the equatorial F-region stability. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 48, n. 3, p.205-212, 1986.

HAPGOOD, M. A. AND TAYLOR, M. J. Analysis of airglow image data. **Annales de Geophysique**, v. 38, n. 6, p. 805-813, 1982.

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

HEELIS, R. A.; KENDALL, P. C.; MOFFETT, R. J.; WINDLE, D. W.; RISHBETH H. Electrical coupling of the E- and F-regions and its effect on F-region drifts and winds. **Planet. Space Sci.**, v. 22, p. 743-756, 1974.

HERNANDEZ-PAJARES; M., JUAN; J. M., SANZ, J. Medium-scale traveling ionospheric disturbances affecting GPS measurements: spatial and temporal analysis. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 111, n. A7, 2006.

HERZBERG, G. **Atomic spectra and atomic structure**, New York: Prentice-Hall, 1945.

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

HOCKE, K. AND SCHLEGEL, K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982-1995. **Annales Geophysicae-Atmospheres Hydrospheres and Space Sciences**, v. 14, n. 9, p. 917-940, 1996.

HYSELL, D. L.; KELLEY, M. C.; SWARTZ, W. E., WOODMAN, R. F. Seeding and layering of equatorial spread F by gravity waves. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 95, n. A10, p. 17253-17260, 1990.

HUNSUCKER, R. D. Ionospheric physics - the sources of gravity-waves. **Nature**, v. 328, n. 6127, p. 204-205, 1987.

HUNSUCKER, R. D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere - a review. **Reviews of Geophysics**, v.20, n. A2, p. 293-315, 1982.

JANESICK, J. B. M. Sky on a chip: the fabulous CCD. **Sky & telescope**, v. 74, n. 3, p. 238-242, 1987.

KAZIMIROVSKY, E.; HERRAIZ, M.; DE LA MORENA, B. A. Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it. **Surveys in Geophysics**, v. 24, n.2, p. 139-184, 2003.

KELLEY, M. C.; MCCLURE, J. P. Equatorial spread-F: a review of recent experimental results. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 43, n. 5-6, p. 427-435, 1981.

KELLEY, M. C. **The Earth's Ionosphere** - plasma physics and electrodynamics, San Diego: Academic Press, 1989.

KELLEY, M. C. AND MAKELA, J. J. Resolution of the discrepancy between experiment and theory of midlatitude F-region structures. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 13, p. 2589-2592, 2001.

KELLEY, M. C.; MAKELA, J. J.; DE LA BEAUJARDIERE, O. Convective ionospheric storms: a major space weather problem. **Space Weather-the International Journal of Research and Applications**, v. 4, n. 2, p. 1-5, 2006.

KELLEY, M. C.; MAKELA, J. J.; VLASOV, M. N., SUR, A. Further studies of the Perkins stability during Space Weather Month. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 10, p. 1071-1075, 2003.

KELLEY, M. C. AND FUKAO, S. Turbulent upwelling of the midlatitude ionosphere .2. theoretical framework. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 96, n. A3, p. 3747-3753, 1991.

KUBOTA, M.; SHIOKAWA, K.; EJIRI, M. K.; OTSUKA, Y.; OGAWA, T.; SAKANOI, T.; FUKUNISHI, H.; YAMAMOTO, M.; FUKAO, S.; SAITO, A. Traveling ionospheric disturbances observed in the OI 630-nm nightglow images over Japan by using a multipoint imager network during the FRONT campaign. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 24, p. 4037-4040, 2000.

LAAKSO, H.; AGGSON, T. L.; PFAFF, R. F.; HANSON, W. B. Downdrafting plasma-flow in equatorial bubbles. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 99, n. A6, p. 11507-11515, 1994.

LAAKSO, H.; AGGSON, T. L.; HERRERO, F. A.; PFAFF, R. F.; HANSON, W. B. Vertical neutral wind in the equatorial F-region deduced from electric field and ion density measurements. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 57, n. 6, p. 645-651, 1995.

LAAKSO, H.; MAYNARD, N. C.; PFAFF, R. F.; AGGSON, T. L.; COLEY, W. R.; JANHUNEN, P.; HERRERO, F. A. Electric field diagnostics of the dynamics of equatorial density depletions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 59, n. 13, p. 1625-1631, 1997.

LAMBERT, S. Frequency and duration of disturbances in the mid-latitude F-region of the ionosphere. **Radio Science**, v. 23, n. 4, p. 693-707, 1988.

LASTOVICKA, J. Forcing of the ionosphere by waves from below. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 68, n. 3-5, p. 479-497, 2006.

LASTOVICKA, J. Effects of gravity and planetary waves on the lower ionosphere as obtained from radio wave absorption measurements. **Physics and Chemistry of the Earth Part C-Solar-Terrestrial and Planetary Science**, v. 26, n. 6, p. 381-386, 2001.

MAKELA, J. J.; KELLEY, M. C.; NICOLLS, M. J.; GONZALEZ, S. A.; APONTE, N.; MCCOY, R. P. Ionospheric topography maps using multiple-wavelength all-sky images. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 106, n. A12, p. 29161-29174, 2001.

MAKELA, J. J.; KELLEY, M. C. Field-aligned 777,4 nm composite airglow images of equatorial plasma depletions. **Geophysics Research Letters**, v. 30, n. 8, p. 2521-2524, 2003.

MAKELA, J. J.; KELLEY, M. C.; NICOLLS, M. J. Optical observations of the development of secondary instabilities on the eastern wall of an equatorial plasma bubble. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 111, n. A9, 2006.

MARTINIS, C.; BAUMGARDNER, J.; SMITH, S. M.; COLERICO, M.; MENDILLO, M. Imaging science at El Leoncito, Argentina. **Annales Geophysicae**, v. 24, n.5, p. 1375-1385, 2006.

MARUYAMA, T. Modeling study of equatorial ionospheric height and spread-F occurrence. **Journal of Geophysical Research**, v.101, n. A3, p. 5157-5163, 1996.

MCCLURE, J. P.; HANSON, W. B.; HOFFMAN, J. H. Plasma bubbles and irregularities in equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v.82, n. 19, p. 2650-2656, 1977.

MCNICOL, W. E.; WEBSTER, H. C.; BOWMAN, G. G. A study of spread-F ionospheric echoes at night at Brisbane - I. Range spreading (experimental). **Aust. J. of Physics**, 9, 247-271, 1956.

MCNICOL, W. E.; WEBSTER, H. C. A study of spread-F ionospheric echoes at night at Brisbane - II. Interpretation of range spreading. **Aust. J. of Physics**, v. 9, p. 172-285, 1956.

MCDONALD, B. E.; OSSAKOW, S. L.; ZALESK, S. T.; ZABUSKY, N. J. Scale sizes and lifetimes of F-region plasma cloud striations as determined by the condition of marginal stability. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 86, n. NA7, p. 5775-5784, 1981.

MEDEIROS, A. F. **Observações de ondas de gravidade através do imageamento da aeroluminescência**. 2001-09-06. 187 p. (INPE-10478-TDI/932). Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001.

MENDILLO, M.; BAUMGARDNER, J.;. Airglow characteristics of equatorial plasma depletions. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n. A9, p. 7641-7651, 1982.

MENDILLO, M. AND TYLER, A. Geometry of depleted plasma regions in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 88, n. A7, p. 5778-5782, 1983.

- MENDILLO, M.; HE, X. Q.; RISHBETH, H. How the effects of winds and electric fields in F2-layer storms vary with latitude and longitude: A theoretical study. **Planet. Space Sci.**, v. 40, n. 5, p. 595-606, 1992.
- MENDILLO, M.; BAUMGARDNER, J.; PI, X.; SULTAN, P. J.; TSUNODA, R. Onset conditions for equatorial spread-F. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. A9, p. 13865-13876, 1992.
- MENDILLO, M.; BAUMGARDNER, J.; COLERICO, M., NOTTINGHAM, D.; AARONS, J.; REINISH, B.; SCALI, J.; KELLEY, M. Investigations of thermospheric-ionospheric dynamics with 6300-A images from the Arecibo observatory. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A4, p. 7331-7343, 1997.
- MENDILLO, M. ; SHODHAN, S.; SULTAN, P. J.; DOE, R.; SAHAI, Y.; BAUMGARDNER, J. Observations and modeling of the coupled latitude-altitude patterns of equatorial plasma depletions. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. A09303, 2005.
- MOORE, J. G. AND WEBER, E. J. OI 6300 and 7774A Airglow measurements of equatorial plasma depletions. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 43, n.8, p. 851-858, 1981.
- MUELLA, M. T. A. H. **Ventos termosféricos meridionais inferidos por meio de sondagens ionosféricas**. 2004-08-03. 215 p. (INPE-14201-TDI/1102). Dissertação de Mestrado - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/09.27.15.02>>. Acesso em: 19 maio 2008.
- MUKHERJEE, G. K. Studies of equatorial F-region depletions and dynamics using multiple wavelength nightglow imaging. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n.65, p. 379-390, 2003.
- NICOLLS, M. J.; KELLEY, M. Strong evidence for gravity wave seeding of an ionospheric plasma instability. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. L05108, 2005.
- Ogawa, T.; Nomura, A., Tanaka, T., Igarashi, K. Simultaneous measurements of Antarctic mesospheric gravity waves by meteor radar and Lidar. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, v. 41, n.10, 835-849, 1989.
- OSSAKOW, S. L.; CHATURVEDI, P. K. Morphological studies of rising equatorial spread-F bubbles. **Journal of Geophysical Research**, v. 83, n. A5, p. 2085-2090, 1978.
- OSSAKOW, S. L. Ionospheric irregularities. **Reviews of Geophysics**, v.17, n.4, p. 521-533, 1979.
- OTSUKA, Y.; ONOMA, F.; SHIOKAWA, K.; OGAWA, T.; YAMAMOTO, M.; FUKAO, S. Simultaneous observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances and E region field-aligned irregularities at midlatitude. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 112, n. A6317, 2007.
- OTT, E. Theory of Rayleigh-Taylor bubbles in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v.83, n.A5, p. 2066-2090, 1978.
- PERKINS, F. Spread-F and ionospheric currents. **Journal of Geophysical Research**, v.78, n. 1, p. 218-226, 1973.

PETERSON, A. W. AND KIEFFABEL. M. Photographic parallax heights of infrared airflow structures. **Nature**, v. 244, n. 5411, p. 92-93, 1973a.

PETERSON, A. W. AND KIEFFABEL M. infrared photography of OH airglow structures. **Nature**, v. 242, n. 5396, p. 321-322, 1973b.

PIMENTA, A. A.; FAGUNDES, P. R.; SAHAI, Y.; BITTENCOURT, J. A.; ABALDE, J. R. Equatorial F-region plasma depletion drifts: latitudinal and seasonal variations. **Annales Geophysicae**, v. 21, p. 2315-2322, 2003.

PIMENTA, A. A. **Estudos da deriva zonal e dinâmica das bolhas de plasma na região tropical**. 2002-02-19. 194 p. (INPE-9546-TDI/827). Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002.

PIMENTA, A. A.; KELLEY. M.; SAHAI, Y. BITTENCOURT, J. A.; FAGUNDES, P. R. Thermospheric dark band structures observed in all-sky OI 630 nm emission images over the Brazilian low-latitude sector. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 113, n. A1, 2008.

PIMENTA, A. A.; BITTENCOURT., J. A.; FAGUNDES, P. R.; SAHAI, Y.; BURITI, R. A.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J. Ionospheric plasma bubble zonal drifts over the tropical region: A study using OI 630 nm emission all-sky images. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, p. 1117-1126, 2003.

PIMENTA, A. A.; FAGUNDES, P. R.; BITTENCOURT, J. A.; SAHAI, Y. Relevant aspects of equatorial plasma bubbles under different solar activity conditions. **Adv. Space Res.**, v. 27, n. 6-7, p. 1213-1218, 2001.

RISHBETH, H. e GARRIOT, O. K. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic Press, 1969.

RISHBETH, H. Polarization fields produced by winds in the equatorial F-region. **Planet. Space Sci.**, v. 19, p. 357-369, 1971.

RISHBETH, H. The F-region dynamo. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 43, n. 5/6, p. 387-392, 1981.

RISHBETH, H. Whatever happened to superrotation? **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, p. 1351-1360, 2002.

ROHRBAUGH, R. P.; HANSON, W. B.; TINSLEY, B. A.; CRAGIN, B. L.; MCCLURE, J. P.; BROADFOOT, A. L. Images of transequatorial bubbles based on field-aligned airglow observations from Haleakala in 1984-1986. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 94, n. A6, p. 6763-69, 1989.

SAHAI, Y.; BITTENCOURT, J. A.; TEIXEIRA, N. R.; TAKAHASHI, H. Plasma irregularities in the tropical F-region detected by OI 7774A and 6300A nightglow measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. A5, p. 3496-3500, 1981a.

SAHAI, Y.; BITTENCOURT, J. A.; TEIXEIRA, N. R., TAKAHASHI, H. Simultaneous observations of OI 7774A and OI 6300A emissions and correlative study with ionospheric parameters. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n.A5, p. 3657-3660, 1981b.

SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; BITTENCOURT, J. A. Solar cycle effects on large-scale equatorial F-region plasma depletions. **Adv. Space Res.**, v. 24, n. 11, p. 1477-1480, 1999.

SAHAI, Y.; SHIOKAWA, K.; OTSUKA, Y.; IHARA, C.; OGAWA, T.; IGARASHI, K.; MIYAZAKI, S., SAITO, A. Imaging observations of midlatitude ionospheric disturbances during the geomagnetic storm of February 12, 2000. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. A11), 24481-24492, 2001.

SAHAI, Y.; TAKAHASHI, H.; TEIXEIRA, N. R.; FAGUNDES, P. R.; CLEMESHA, B. R.; BITTENCOURT, J. A. Observations of thermospheric temperatures at 23⁰ S. **Planet. Space Sci.**, v. 40, n.11, p. 1545-1549, 1992.

SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; BITTENCOURT, J. A.; ABDU, M. A. Occurrence of large scale equatorial F-region plasma depletions during geomagnetic disturbances. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 60, p. 1593-1604, 1998.

SAHAI, Y.; FAGUNDES, P. R.; BITTENCOURT, J. A. Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 62, p. 1377-1383, 2000.

SAITO, A.; IYEMORI, T.; BLOMBERG, L. G.; YAMAMOTO, M.; TAKEDA, M. Conjugate observations of the mid-latitude electric field fluctuations with the MU radar and the Freja satellite. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 60, n.1, p. 129-140, 1998.

SAULI, P. AND BOSKA, J. Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, n.9, p. 945-950, 2001.

Schunk, R. W. Nagy., A. F. **Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry**, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

SHIOKAWA, K.; IHARA, C.; OTSUKA, Y.; OGAWA, T. Statistical study of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using midlatitude airglow images. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v.108, n. A1, 2003.

SHIOKAWA, K.; OTSUKA, Y., TSUGAWA, T.; OGAWA, T.; SAITO, A., OHSHIMA, K.; KUBOTA, M.; MARUYAMA, T.; NAKAMURA, T.; YAMAMOTO, M.; WILKINSON, P. Geomagnetic conjugate observation of nighttime medium-scale and large-scale traveling ionospheric disturbances: FRONT3 campaign. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 110, n. A5), 2005.

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 Solar-Terrestrial Physics**, v. 47, n.8-10, p. 895-900, 1985.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J.; DE PAULA, E. R.; ZAMLUTTI, C. J.; AQUINO, M. G.; BORBA, G. L. Ionospheric plasma bubble climatology over Brazil based on 22 years (1977-1998) of 630 nm airglow observations. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, p. 1517-1524, 2002.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S. Airglow studies on the ionosphere dynamics over low latitude in Brazil. **Annales Geophysicae**, v.36, n. 2, p. 199-204, 1980.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; ZAMLUTTI, C. J. Wave disturbances in the low latitude ionosphere and equatorial ionospheric plasma depletions. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. A3, p. 1374-1378, 1981.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; ZAMLUTTI, C. J.; BATISTA, I. S. Association between plasma bubble irregularities and airglow disturbances over Brazilian low latitudes. **Geophysics Research Letters**, v. 7, n. 11, p. 980-982, 1980.

SULTAN, P. J. Linear theory and modeling of the Rayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread-F. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. A12, p. 26875-26891, 1996.

TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J.; SOBRAL, J. H. A.; MEDEIROS, A. F.; GOBBI, D.; SANTANA, D. C. Fine structure of the ionospheric plasma bubbles observed by the 6300 e 5577 airglow images. **Adv. Space Res.**, v. 27, n. 6-7, p. 1189-1194, 2001.

TAYLOR, M. J., SWENSON, G. R., TAYLOR, V. Height measurements of OI(557.7 Nm) gravity-wave structure over the Hawaiian-Islands during Aloha-93. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 20, p. 2881-2884, 1995.

TAYLOR, M. J.; JAHN, J. M.; FUKAO, S.; SAITO, A. Possible evidence of gravity wave coupling into the mid-latitude F region ionosphere during the SEEK campaign. **Geophysical Research Letters**, v. 25, n. 11, p. 1801-1804, 1998.

TINSLEY, B. A. OI and NI allowed transitions in the airglow and aurora. **Annales de Géophysique**, t.28 (f.1), p. 155-168, 1972.

TINSLEY, B. A.; CHRISTENSEN, A. B.; BITTENCOURT, J. A.; GOUVEIA, H.; ANGREJI, P. D.; TAKAHASHI, H. Excitation of oxygen permitted line emissions in the tropical nightglow. **Journal of Geophysical Research**, v. 78, n. 7, p. 1174-1186, 1973.

TINSLEY, B. A.; BITTENCOURT, J. A. Determination of F region height and peak electron density at night using airglow emissions from atomic oxygen. **Journal of Geophysical Research**, v. 80, n. 16, p. 2333-2337, 1975.

TINSLEY, B. A. Field aligned airglow observations of trans-equatorial bubbles in the tropical F-region. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 44, n. 6, p. 547-557, 1982.

TINSLEY, B. A.; ROHRBAUGH, R. P.; HANSON, W. B.; BROADFOOT, A. L. Images of transequatorial F-region bubbles in 630- and 777-nm emissions compared with satellite measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A2, p. 2057-2077, 1997.

TOHMATSU, T. e OGAWA, T. **Compendium of aeronomy**. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1990.

TORR, M. AND TORR, D. G. The role of metastable species in the thermosphere. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 20, n.1, p. 91-144, 1982.

- TSUNODA, R. T., LIVINGSTON, R. C. Equatorial plasma bubbles: vertically elongated wedges from the bottomside F layer. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n. A11, p. 9171-9180, 1982.
- TSUNODA, R. T. On the Generation and growth of equatorial backscatter plumes .2. structuring of the west walls of upwellings. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 88, n. NA6, p. 4869-4874, 1983.
- TSUNODA, R. T. On the spatial relationship of 1-m equatorial spread F-irregularities and plasma bubbles. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 85, n. NA1, p. 185-190, 1980.
- VADAS, S. AND FRITTS, D. C. Thermospheric responses to gravity waves arising from mesoscale convective complexes. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, n.6-9, p. 781-804, 2004.
- WALDOCK, J. A. AND JONES, T. B. The Effects of neutral winds on the propagation of medium-scale atmospheric gravity-waves at mid-latitudes. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 46, n. 3, p. 217-231, 1984.
- WALDOCK, J. A. AND JONES, T. B. Source regions of medium scale traveling ionospheric disturbances observed at midlatitudes. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 49, n. 2, p. 105-114, 1987.
- WAN, W. X.; YUAN, H.; NING, B. Q.; LIANG, J.; DING, F. Traveling ionospheric disturbances associated with the tropospheric vortexes around Qinghai-Tibet Plateau. **Geophysical Research Letters**, v. 25, n. 20, p. 3775-3778, 1998.
- WEBER, E. J.; BUCHAU, J.; EATHER, R. H.; MENDE, S. B. North-South aligned equatorial airglow depletions. **Journal of Geophysical Research**, v. 83, n. A2, p. 712-716, 1978.
- WEBER, E. J.; BUCHAU, J.; MOORE, J. G. Airborne studies of equatorial F-layer ionospheric irregularities. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 85, n.NA9, p. 4631-4641, 1980.
- Weill, G.; Joseph, J. Premières mesures du triplet $3^5S^0 - 3^5P$ de OI, à 7772, 7774 e 7775 Angstrom, emis par le ciel nocturne des régions tropicales. **C. R. Acad. Sc. Paris**, t. 271 (Serie B), p. 1013-1016, 1970.
- WHALEN, J. A. An equatorial bubble: its evolution observed in relation to bottomside spread-F and to the Appleton anomaly. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. A3, p. 5303-5315, 2000.
- WHALEN, J. A. The equatorial anomaly: its quantitative relation to equatorial bubbles, bottomside spread-F, and E x B drift velocity during a month at solar maximum. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. A12, p. 29125-29132, 2001.
- WHALEN, J. A. Dependence of equatorial bubbles and bottomside spread-F on season, magnetic season, and E x B drift velocity during solar maximum. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. A2 (SIA 3-1), p. 3-9, 2002.
- WOODMAN, R. F. Vertical drift velocities and east-west electric fields at the magnetic equator. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n. 31, p. 6249-6259, 1970.

WRASSE, C. M.; NAKAMURA, T.; TAKAHASHI, H.; MEDEIROS, A. F.; TAYLOR, M. J.; GOBBI, D.; DENARDINI, C. M.; FECHINE, J.; BURITI, R. A.; SALATUN, A.; ACHMAD, E.; ADMIRANTO, A. G. Mesospheric gravity waves observed near equatorial and low-middle latitude stations: wave characteristics and reverse ray tracing results. **Annales Geophysicae**, v. 24, n.12, p. 3229-3240, 2006.

WRASSE, C. M.; NAKAMURA, T.; TSUDA, T.; TAKAHASHI, H.; GOBBI, D.; MEDEIROS, A. F.; TAYLOR, M. J. Atmospheric wind effects on the gravity wave propagation observed at 22.7 degrees S - Brazil. **Middle Atmosphere Structure and Dynamics**, v. 32, n. 5, p. 819-824, 2003.

WRASSE, C. M. **Estudos de geração e propagação de ondas de gravidade atmosféricas**. 2004-03-19. 253 p. (INPE-12249-TDI/978). Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/05.24.10.59>>. Acesso em: 19 maio 2008.

YEH, K. C.; RAYMUND, T. D.; SOICHER, H.; LIU, C. H.; BONELLI, E. Ionospheric bubbles observed by the Faraday-Rotation method at Natal, Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 6, n. 6, p. 473-475, 1979.

ZALESK, S. T. AND OSSAKOW, S. L. Non-Linear Equatorial Spread F - the Effect of Neutral Winds and Background Pedersen Conductivity. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 87, n. NA1, p. 151-166, 1982.