



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



**ESTUDO COMPARATIVO DOS PARÂMETROS IONOSFÉRICOS
OBTIDOS POR SONDADORES DIGITAIS NAS ESTAÇÕES DE
SÃO LUÍS (MA) E CACHOEIRA PAULISTA (SP).**

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
PIBIC/INPE – CNPq/MCT
Concedido pelo CNPq em 04/08/2005.

PROCESSO: 105374/2005-2

**Laysa Cristina Araújo Resende - (INPE, Bolsista PIBIC/INPE –
CNPq/MCT)
E-mail: laysa@dae.inpe.br**

Dr. Clezio Marcos De Nardin - (Orientador, DAE/CEA/INPE – MCT)
E-mail: denardin@dae.inpe.br

**São José dos Campos
Julho de 2006**



Dados de Identificação

Bolsista:

Laysa Cristina Araújo Resende

Curso: Licenciatura em Física

ETEP - Faculdades

Orientador:

Dr. Clezio Marcos De Nardin

Divisão de Aeronomia - DAE/CEA/INPE – MCT

Instituto nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

São José dos Campos - SP

Colaboradores:

Daniela Cristina Santana– DAE/CEA/INPE - MCT

Maria Goreti S. Aquino – DAE/CEA/INPE - MCT

Pedro Daniel S. C. de Almeida – ETEP/DAE/CEA/INPE – MCT

Local de Trabalho/Execução do Projeto:

O projeto foi desenvolvido na Divisão de Aeronomia (DAE) da Área de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), sob a orientação do Dr. Clezio Marcos De Nardin, pesquisador da divisão.



"Uma longa viagem começa com um único passo".
(Lao-Tsé)



*Aos meus pais,
Arlindo Resende e
Lucinete Araújo Resende (in memorian),
e ao meu orientador
Dr. Clezio Marcos De Nardin.*



Agradecimentos

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro.

A Deus, pela vida.

Ao meu orientador Dr. Clezio Marcos De Nardin, por todo o apoio, dedicação e compreensão a fim de realizar um bom trabalho.

A minha família, pelo carinho e presença de todos os dias.

Aos meus amigos de trabalho, Goreti, Daniela, Pedro, Daniel, Paulo Alexandre, Oséias e a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Em especial, ao meu pai Arlindo Resende, e aos meus irmãos, Arlen Araújo Resende e Matheus Alex Araújo Resende, pelo amor, pelo esforço, pela atenção e por, principalmente acreditar que é possível concretizar um sonho.

SUMÁRIO

1.1-O Sol.....	12
1.1.1-A Energia do Sol	13
1.1.2 - Estrutura Solar Interna	13
Núcleo.....	14
A Zona radiativa	14
Zona de Interface	15
Zona de Convecção	15
1.1.3-Estrutura Solar Externa	15
Fotosfera	15
Cromosfera	16
Coroa	18
1.1.4- Ciclo de Atividade Solar	18
As Manchas Solares	18
Ciclo de Manchas Solares	20
1.1.5-Índices de Atividade Solar	21
Cálculo das Machas Solares	21
Fluxo Solar	22
1.1.6 -Acontecimentos na Atmosfera Solar.....	23
Protuberâncias	23
Flares	24
Erupções Solares	24
Ejeções de Massas Coronas.....	25
Vento Solar.....	26
1.1.7-Conceitos sobre o Campo Magnético do Sol.....	26
O Campo Magnético do Sol	26
A interação do Vento Solar com o Campo Magnético da Terra	27
1.18-Atividades Magnéticas	28
Índices de Atividades Magnéticas	28
1.2-A Ionosfera.....	30
1.2.4-A Atmosfera Terrestre.....	30
Composição	31
1.2.2-Temperatura e as Camadas Atmosféricas	31
Troposfera.....	32
Tropopausa	32
Estratosfera.....	32
Estratopausa.....	33
Mesosfera	33
Mesopausa	33
Termosfera.....	33
1.2.3-A Ionosfera Terrestre	33
1.2.4 -As Camadas Ionosféricas	35
Camada D	36
Camada E.....	36
Camada F ₁	37
Camada F ₂	37
1.2.5-Bolhas Ionosféricas	37
Geração das bolhas ionosféricas.....	38



1.2.6-Diferenças Latitudinais da Ionosfera.....	39
2- INSTRUMENTAÇÃO.....	41
2.1-Digissonda.....	42
2.2-Dados Coletados.....	43
2.3-Programa de Análise	43
3-Atividades de Processamento e Redução de Dados	45
3.1-Classificação dos Dias Selecionados.....	45
3.1.2-Seleção dos Dados Reduzidos pela Bolsista	47
3.1.3-Resultados do Processamento dos Dados Reduzidos.....	48
3.1.4-Atividades de Formação Completar.....	70
4-Análise dos Dados Reduzidos	71
4.1.1-Resultados das Análises dos Dados de São Luís	72
4.1.2-Resultados das Análises dos Dados de Cachoeira Paulista.....	75
4.2 -Discussão dos Resultados	78
4.2.1- Análise da Variação Temporal da Frequência Crítica (foF2)	78
4.2.2 - Análise da Variação Temporal da Altura do Pico da Camada F (hmF2)	79
4.2.3 - Análise da Variação Temporal da Altura Virtual da Base da Camada F (h'F).....	80
5-CONCLUSÕES.....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1-: Esquema representando as camadas internas do Sol: Núcleo, Zona Radiativa e Convectiva.	14
Figura 1.2-Imagem da Fotosfera solar obtida pelo satélite SOHO (The Solar and Heliospheric Observatory), na linha de 584 Å do hélio (He).....	16
Figura 1.3- Figura mostrando a Cromosfera obtida pelo satélite SOHO (The Solar and Heliospheric Observatory).....	17
Figura 1.4- Espectro Solar durante um eclipse	17
Figura 1.6- Imagem obtida pelo satélite SOHO em 28 de setembro de 2001	19
Figura 1.7 Imagem representando a concentração das manchas solares onde se vê também regiões de umbra e penumbra	20
Figura 1.8- Ciclo das manchas solares	20
Figura 1.9-Progressão do número de Manchas Solares de 1994 até 2006	22
Figura 1.10-Fluxo de Rádio 10.7 cm de 1994 até 2006	23
Figura 1.11-Imagem obtida pelo satélite Transition Region and Coronal Explorer (TRACE), da NASA.....	24
Figura 1.12- Imagem em Raios-X do Sol obtida pelo satélite Skylab,em 19 de dezembro de 2006.....	24
Figura 1.13-Ilustração das Dimensões de uma CME em comparação com o tamanho da Terra.....	25
Figura 1.14 -Fotos Ventos Solares	26
Figura 1.15 - Ilustração mostrando a Cavidade Magnetosférica Terrestre.....	27
Figura 1.17- Localização das camadas Ionosfera.de acordo com a altura.	30
Figura 1.18- Fotografia do Espaço mostrando a Atmosfera terrestre em falso azul.....	31
Figura 1.20- Figura mostrando a divisão da atmosfera terrestre.....	32
Figura 1.21- Figura representando o perfil da Ionosfera e as suas camadas de acordo com a altura.	35
Figura 1.22- Camadas Ionosféricas de acordo com a altura e representando os íons predominantes.....	36
Figura 1.23-Imagem de Airglow, mostrando a presença de uma bolha ionosférica.	38
Figura 1.24 - Exemplo de spread-F visto nos ionograma obtido para a região de São Luís (MA) em 14 de setembro de 2003, às 23 h.	38
Figura 1.25-Ilustração do movimento das bolhas ionosféricas sobre a região brasileira.	39
Figura 2.1- Exemplo de emissão de sinal com posterior	41
Figura 2.2- Imagem de uma antena transmissora de Cachoeira Paulista – SP.	42
Figura 2.3- Foto da antena transmissora da digissonda.	42
Figura 2.4- Imagem de uma antena receptora em Cachoeira Paulista – SP	42
Figura 2.5- Foto da antena receptora digissonda de São Luís –MA.	42
Figura 2.6 -Ilustração gráfica mostrando o perfil da ionosfera no dia 14 de agosto de 2003 em Cachoeira Paulista- SP às 12:45 UT.....	43
Figura 2.7- Ilustração do programa SAO Explorer onde são visualizadas as diversas telas para manipulação e visualização dos ionogramas e parâmetros ionosféricos.44	
Figura 3.1 –Imagem mostrando os solstícios e equinócios para a divisão dos dias trabalhados na redução de dados.	45
Figura 3.2 - Série de ionogramas obtidos no dia 17 de fevereiro de 2003 no sítio de São Luís – MA.....	49

Figura 3.4 - Série de ionogramas obtidos no dia 25 de fevereiro de 2003 no sítio de São Luís – MA.....	51
Figura 3.5- Série de ionogramas obtidos no dia 17 de março de 2003 no sítio de São Luís – MA.....	52
Figura 3.6 - Série de ionogramas obtidos no dia 24 de março de 2003 no sítio de São Luís – MA.....	53
Figura 3.8 - Série de ionogramas obtidos no dia 26 de março de 2003 no sítio de São Luís – MA.....	55
Figura 3.9 - Série de ionogramas obtidos no dia 14 de março de 2003 no sítio de São Luís – MA.....	56
Figura 3.13 -Série de ionogramas obtidos no dia 17 de fevereiro de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista -SP	60
Figura 3.14-Série de ionogramas obtidos no dia 24 de fevereiro de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista-SP.	61
Figura 3.15-Série de ionogramas obtidos no dia 25 de fevereiro de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista-SP.	62
Figura 3.17- Série de ionogramas obtidos no dia 24 de março de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista-SP.	64
Figura 3.18- Série de ionogramas obtidos no dia 25 de março de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista-SP	65
Figura 4.1- Variação da frequência crítica média em relação ao tempo para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digissonda no sítio de São Luís- MA.	72
Figura 4.2- Variação da altura média do pico da camada F em relação ao tempo para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digissonda no sítio de São Luís- MA.	73
Figura 4.3- - Variação da altura virtual média em relação ao tempo para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digissonda no sítio de São Luís- MA.	74
Figura 4.4- Variação da frequência crítica média em relação ao tempo obtido para o período para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digissonda no sítio de Cachoeira Paulista - SP.....	75
Figura 4.5 - Variação da altura média do pico da camada F em relação ao tempo para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digissonda no sítio de Cachoeira Paulista - SP.....	76
Figura 4.6- Variação da altura virtual média em relação ao tempo para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digissonda no sítio de Cachoeira Paulista - SP.....	77

INTRODUÇÃO

Neste trabalho serão apresentadas as atividades desenvolvidas no período de fevereiro a junho de 2006. Neste período foram desenvolvidas atividades de estudo teóricos relacionado com o tema do projeto e de estudo do instrumento de rádio sondagem utilizado para a pesquisa. Este trabalho tem a finalidade de estudar comparativamente a rádio-observações feitas a partir das estações de São Luís-MA (2°31' S, 44°16' O) e Cachoeira Paulista-SP (22° 39' S, 45° 00' O). Foram analisados dados do sondador digital, equipamentos capazes de obter a densidade eletrônica. Com o processamento dos dados do sondador digital são geradas imagens gráficas, os ionogramas. A partir dos ionogramas podem-se realizar um estudo das variações de altura da reflexão das ondas de rádio em função da frequência. Nesse contexto, efetuou-se um estudo estatístico, submetido à apresentação do Sicinpe 2006 – Seminário de Iniciação Científica do INPE.

No capítulo 1 deste relatório serão apresentados trabalhos de revisão teórica, a fim de desenvolver os conceitos iniciais da ionosfera. No capítulo 2 vamos apresentar a instrumentação utilizada para o desenvolvimento do trabalho. No capítulo 3 apresentaremos as referentes pesquisas a formação ao longo do período a que se refere este relatório. No capítulo 4 serão mostradas as atividades relacionadas com a redução de dados. No capítulo 5 apresentaremos alguns estudos realizados a partir dos dados analisados através de sondagem vertical. E por fim, a conclusão deste relatório.

CAPÍTULO 1

Neste capítulo serão mostrados os trabalhos de revisão teórica sobre o Sol e a Ionosfera Terrestre. O objetivo destes estudos é contextualizar a pesquisa realizada pela bolsista e apresentá-la aos conceitos com os quais ela deve se depara nos estudos da ionosfera.

1.1-O Sol

O sol constitui-se de uma massa gasosa brilhante, em uma espécie de equilíbrio dinâmico entre a sua própria gravidade e as forças geradas por reações nucleares que ocorrem no interior do núcleo. Ele tem 98% da massa total do sistema solar e se encontra no centro geométrico e gravitacional do Sistema Solar. Ele emite radiação que pode atingir uma potência de até $3,9 \times 10^{26}$ W. Possui na sua composição química hidrogênio e hélio, além de outros expostos a na tabela 1.1, a qual também apresenta alguns dados relativos ao sol.

Tabela 1.1 Dados relativos ao Sol.

Estatísticas do Sol	
Massa (kg)	$1,989 \times 10^{30}$
Massa (em relação à massa da Terra)	332.830
Raio equatorial (km)	695.000
Raio equatorial (em relação ao raio da Terra)	108,97
Densidade média (gm/cm^3)	1,410
Período de rotação (dias)	25-36*
Velocidade de escape (km/sec)	618,02
Luminosidade (ergs/seg)	$3,827 \times 10^{33}$
Magnitude (Vo)	-26,8
Temperatura média à superfície (K)	6.000
Idade (bilhões de anos)	4,5
Principal composição química	
Hidrogênio	92,1000%
Hélio	7,8000%
Oxigênio	0,0610%
Carbono	0,0300%
Nitrogênio	0,0084%
Néon	0,0076%
Ferro	0,0037%
Silício	0,0031%
Magnésio	0,0024%
Enxofre	0,0015%
Todos os restantes	0,0015%

*O período de rotação do Sol à superfície varia de aproximadamente 25 dias no equador a 36 dias nos pólos. Na profundidade, abaixo da zona de convecção, parece ter uma rotação com um período de 27 dias.

O sol se comporta como um corpo negro emitindo energia a uma temperatura aproximadamente 5.800 K. Toda essa energia se origina de ações nucleares que ocorrem

no seu centro interior e demora 107 anos para ser transportada pela zona radiativa e através da zona convectiva até atingir a superfície.

Ele pode ser dividido em interior solar e atmosfera solar. O interior é composto de núcleo, zona radiativa, zona convectiva. A parte mais externa do Sol, referida de atmosfera solar é composta de três camadas: a fotosfera, a cromosfera e a coroa.

1.1.1-A Energia do Sol

Atualmente sabe-se que o Sol está em equilíbrio térmico (temperatura média aproximadamente constante), mas ele emite muita energia na forma de calor e de luz. Para manter esse equilíbrio é necessária uma fonte interna de energia. Essa fonte está no núcleo, que será discutido em seguida neste trabalho.

É importante saber que a emissão de energia do Sol não é uniforme, ou seja, há variações no fluxo de energia emitida, que podem chegar, em casos excepcionais, a 5% do fluxo médio de energia. Atribuindo-se o nome de “Sol calmo” quando ele se mantém no mínimo de emissão de energia e “Sol ativo” quando está no máximo de emissão.

Conhecida a distância do Sol (Richer, 1673), foi possível determinar a sua luminosidade, baseado na potência que ele produz. As medidas mostram que cada metro quadrado na Terra recebe do sol uma potência (energia/segundo) de 1400 W. Por essa potência recebida na Terra, determina-se a luminosidade do Sol em $4,0 \times 10^{26}$ cm J/s.

Já se sabe que o Sol é constituído principalmente por hidrogênio e hélio (descrito na tabela 1.1). E no espectro solar encontram-se características desses dois elementos. Com efeito, o Sol emite energia porque transforma núcleos de hidrogênio em núcleos de hélio, processo abordado mais adiante. O Sol emite uma energia em comprimentos de onda de $2,95 \times 10^1$ a $1,0 \times 10^4$ Å. É interessante notar que essa energia representa apenas $1,0 \times 10^{-3}\%$ da energia capaz de ionizar a atmosfera neutra terrestre, formando a ionosfera.

1.1.2 - Estrutura Solar Interna

No interior solar encontram-se gases quase que completamente ionizados (principalmente de hidrogênio e de hélio), pois estão submetidas às temperaturas, pressões, densidades muito elevadas. Estas quantidades diminuem a medida em que nos afastamos do núcleo do Sol. Assim, na região mais central as condições físicas propiciam as reações termo-nucleares de transformação de hidrogênio em hélio, liberando grandes quantidades de energia na forma de fótons e movimentos térmicos.

Em seu interior, é composto de um núcleo central rodeado por uma camada contendo zona radiativa, ambos circundando por uma região convectiva. Na figura 1.1 apresentamos uma ilustração das diferentes estruturas internas do Sol. Observa-se que o núcleo do Sol encontra-se em equilíbrio radiativo por uma camada onde ocorre convecção.

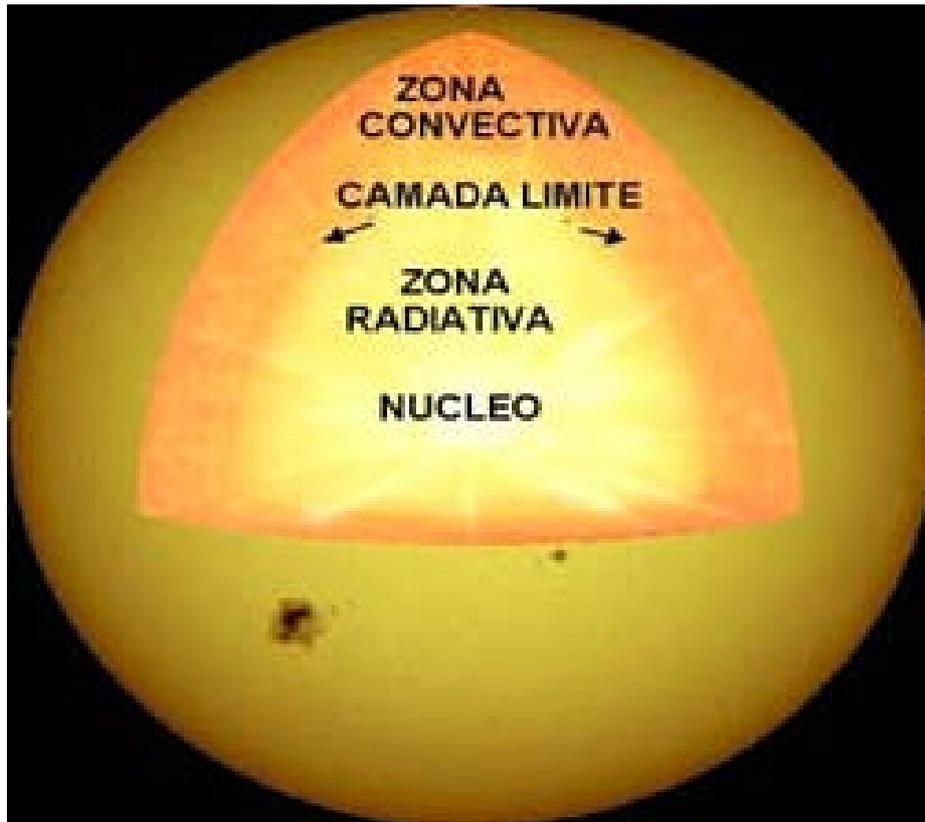


Figura1. 1:- Esquema representando as camadas internas do Sol: Núcleo, Zona Radiativa e Convectiva.

Fonte: [http:// science.msfc.nasa.gov/ssl,2006](http://science.msfc.nasa.gov/ssl,2006)

Núcleo

O núcleo solar ocupa aproximadamente 25% do raio do Sol. As condições físicas neste local são extremas: a temperatura chega a $1,56 \times 10^7$ de graus centígrados e a pressão a $2,5 \times 10^3$ de atmosferas. Sob essas condições os gases estão comprimidos em densidades 150 vezes maiores que a da água.

Sob esta enorme pressão e nesta alta temperatura é no núcleo solar que ocorrem as reações nucleares. Estas reações são reações de fusão nuclear e transformam o hidrogênio em hélio. E, nessa transformação é liberada uma enorme quantidade de energia.

Enfim, devido à alta pressão no centro, o gás apresenta propriedades que podem ser melhores descritas no estado de fluido ao invés de gasoso. Da energia produzida pela fusão dos elementos no núcleo, parte é usada para manter condições de temperatura e de pressão interna e parte é emitida na forma de radiação que escapa pela superfície iluminando e aquecendo os astros do espaço interplanetário.

A Zona radiativa

A zona de radiação é a camada do Sol onde a energia gerada no núcleo e transportada para as camadas superiores em forma de radiação. O meio atua no sentido de atenuar a energia. A zona radioativa situa-se entre o núcleo e a camada de interface e recebe esse nome devido à forma de transporte de energia através dessa região, a radiação. Essa

camada localiza-se entre 25% e 70% do raio solar a partir do centro. A densidade dessa camada varia de, aproximadamente, 20 g/cm na sua parte mais próxima do núcleo e decai até um mínimo de 0,2 g/cm em direção ao topo. Para estes mesmos pontos, a temperatura cai de $7,0 \times 10^6$ °C até $2,0 \times 10^3$ °C.

Zona de Interface

A camada de interface encontra-se entre a zona radioativa e a zona de convecção. Na região onde estas duas camadas deveriam se encontrar detecta-se uma radiação muito fraca e a inexistência de movimentos de fluídos (encontrados na camada de convecção). Nesta camada encontram-se duas alterações, uma na composição química do Sol e a outra na velocidade dos fluídos em torno desta camada, a qual pode alongar as linhas de força do campo magnético.

Zona de Convecção

A zona de convecção é a camada do Sol onde a energia se propaga através de movimentos convectivos. A parte que está em contato com a “Zona de Irradiação” é aquecida e, com isso, sua densidade diminui e tende a subir para a superfície. Em contrapartida, o plasma solar mais frio que está na superfície desce para entrar em contato com a “Zona de Irradiação”, de maneira similar ao processo que ocorre com a água fervente num recipiente em aquecimento no seu fundo.

1.1.3-Estrutura Solar Externa

Fotosfera

A fotosfera vista na figura 1.2 é uma camada visível do Sol. É uma estreita camada de cerca de 300 km de espessura, o que equivale à cerca do meio milésimo de raio solar. É da fotosfera que vem a maior parte da luz visível. Entretanto, o gás desta camada não é totalmente transparente, e devido a sua opacidade o interior solar não pode ser visto. Ela tem aparência de um líquido em ebulição, cheia de bolhas, ou grânulos. Este fenômeno é chamado de granulação fotosférica. Os grânulos têm em torno de $5,0 \times 10^3$ km em diâmetro e duram cerca de 10 min cada. Eles marcam os tôpos das colunas convectivas de gás quente, que se forma na zona convectiva, logo abaixo da fotosfera. A temperatura decresce variando de $1,0 \times 10^4$ a $5,0 \times 10^3$ K. As regiões escuras entre os grânulos são regiões onde o gás mais frio e o gás mais denso apresentam movimento descendente. Além da granulação, nesta camada podem ser observadas manchas escuras conhecidas como manchas solares, vistas com mais detalhes nas seções a seguir. Para o momento, basta mencionas que quantidade de manchas cresce e decresce obedecendo a um ciclo de cerca de 11 anos, que também será discutido mais detalhadamente a seguir.

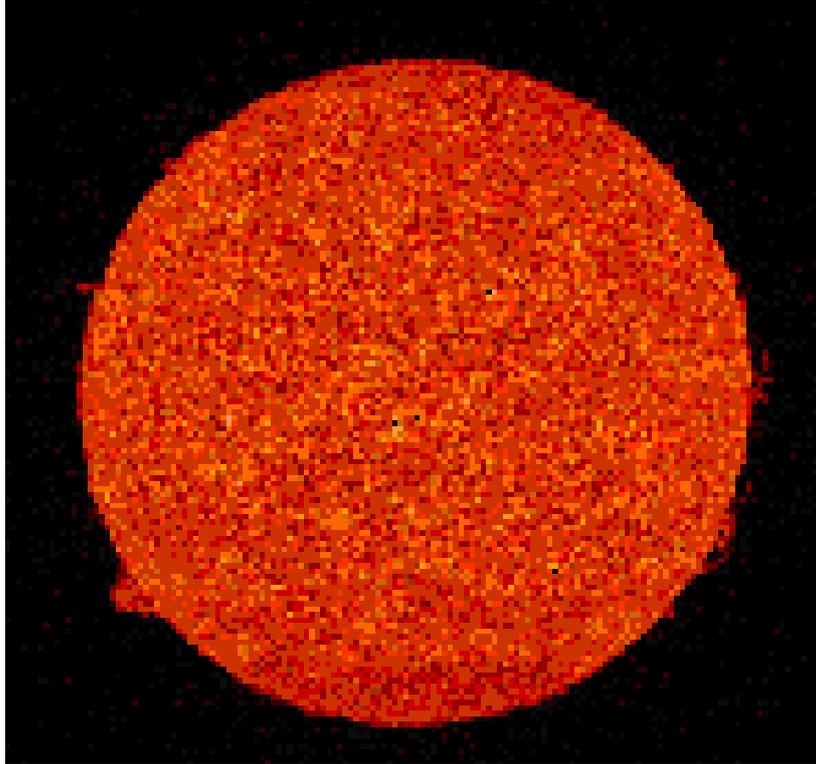


Figura 1.2-Imagem da Fotosfera solar obtida pelo satélite SOHO (The Solar and Heliospheric Observatory), na linha de 584 Å do hélio (He).

Fonte: Kepler de Souza Filho e Maria Fátima de Oliveira(2006).

Cromosfera

A Cromosfera, vista na foto da figura 1.3, estende-se até cerca de 10.000 km acima da fotosfera esta camada. Ela possui uma temperatura aproximadamente de $4,3 \times 10^3$ a mais de $4,0 \times 10^3$ K. A densidade na cromosfera é muito menor que na fotosfera e sua espessura é de aproximadamente $1,0 \times 10^4$ km. A densidade varia quatro ordens de grandeza ao longo da camada. Na base da Cromosfera a densidade é da ordem de $1,0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ enquanto na parte mais externa a densidade é da ordem de 10^9 cm^{-3} . A temperatura aumenta da base para o topo, sendo em média $1,5 \times 10^4$ K. Acredita-se que esse aquecimento se origine na turbulência do envelope convectivo. Devido à turbulência as ondas seriam excitadas e amplificadas em choques ao se propagarem para regiões menos densas. O aquecimento seria devido à dissipação desses choques na cromosfera.

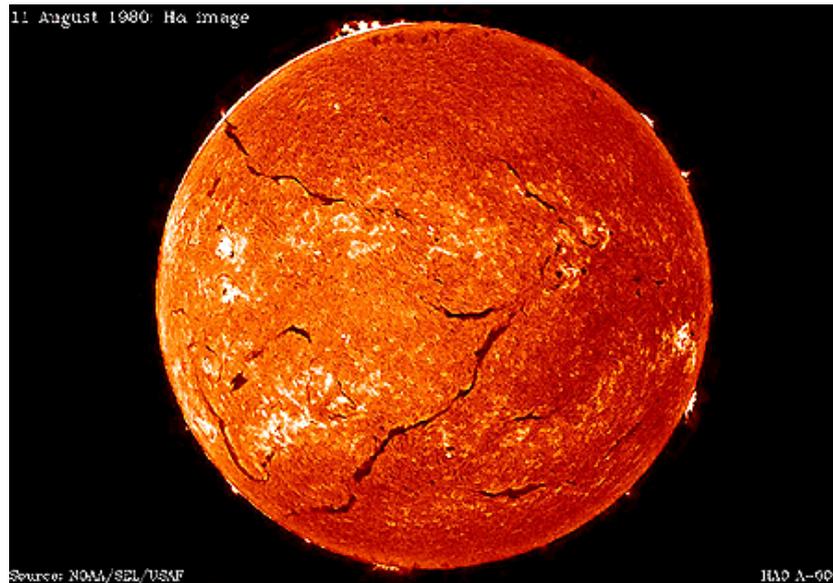


Figura 1.3– Figura mostrando a Cromosfera obtida pelo satélite SOHO (The Solar and Heliospheric Observatory)

Fonte: Nasa (2006)

A cromosfera pode ser observada usando-se diferentes técnicas. Uma delas baseia-se na observação do Sol com um filtro especial na luz vermelha conhecido H-alpha. Neste tipo de observação é possível observar que no limbo do Sol podem ocorrer jatos tênues de gás brilhante com tamanhos de 500 a 1500 km, elevando-se até 10000 km acima da cromosfera. Esses fenômenos de ejeção de gases recebem o nome de espículas. Além disso, podem-se distinguir outras estruturas cromosféricas, como proeminências, filamentos e fáculas, vistos mais adiante. Outra forma observação do Sol faz uso da utilização de espectroscópio, o qual permite de se obter o espectro da cromosfera durante o eclipse. Este espectro apresenta linhas brilhantes, as quais mostram que a cromosfera é constituída de gases quentes que emitem a luz na forma de linhas de emissão. A figura 1.4 exemplifica um a espectro solar obtido durante um eclipse.

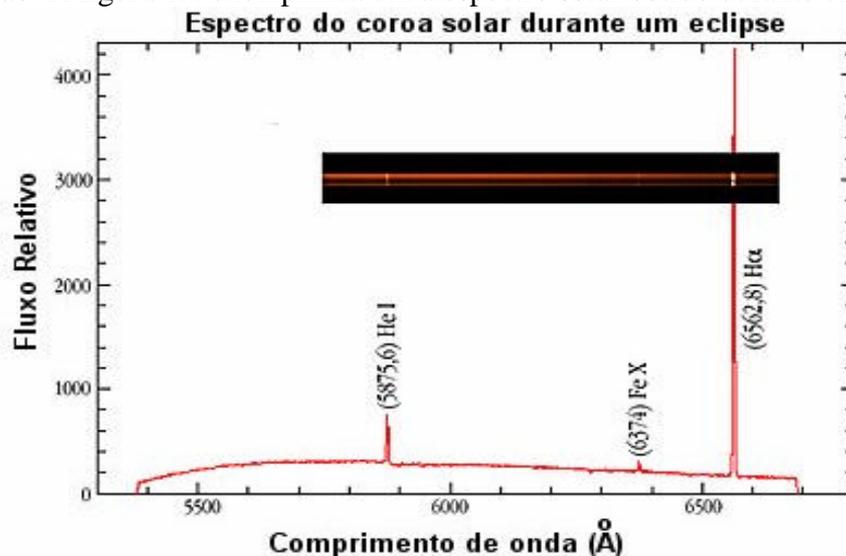


Figura 1.4–Espectro Solar durante um eclipse

Fonte: Souza Filho e Oliveira (2006).

A cromosfera gradualmente se funde na coroa, a camada mais externa e mais rarefeita da atmosfera do Sol.

Coroa

A coroa solar é a parte mais externa atmosfera solar e estende-se por milhões de quilômetros a partir do Sol (figura 1.5). A coroa solar é observada durante os eclipses totais do Sol, pois apesar de ter um brilho equivalente ao da lua cheia, ela fica obscurecida quando a fotosfera é visível. Desta forma, durante um eclipse, como o disco solar é ocultado pela Lua, é possível observá-la e estudá-la.

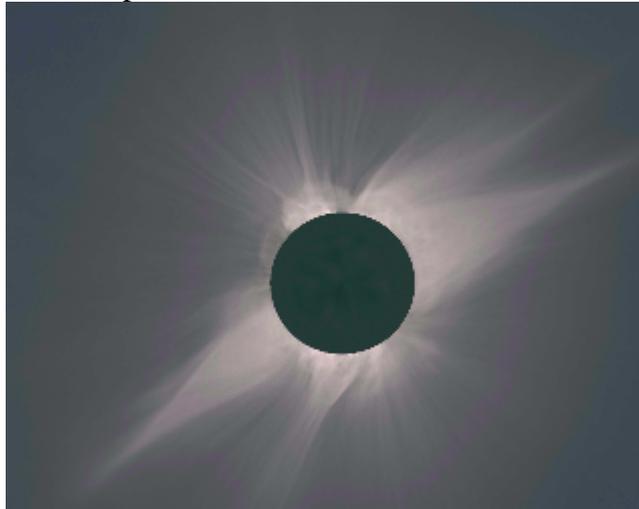


Figura 1.5: Foto mostra o eclipse solar total de 11 de Julho de 1991, visto da Baixa Califórnia.

Fonte: Calvin J. Hamilton.

A densidade desta camada é de 2-3 ordens de grandeza mais baixa do que a cromosfera. Sua temperatura é de $1,0 \times 10^6$ a $2,0 \times 10^6$ K. Por esta temperatura ser alta, a coroa emite grande quantidade de Raios-X. Além disso, a esta temperatura, o gás encontra-se ionizado na forma de plasma (gás ionizado), produzindo os elétrons e íons que podem formar o vento solar.

1.1.4- Ciclo de Atividade Solar

Conforme mencionado anteriormente, a emissão de energia do Sol não é uniforme. Há variações no fluxo que podem chegar a 5% do fluxo médio de energia. Atribuindo-se o nome de Sol calmo quando ele se mantém no mínimo de emissão de energia e Sol ativo quando está no máximo de emissão. Esse mínimo, ou máximo, é observado quando há um número menor ou maior de fenômenos em todas as suas camadas, incluindo a quantidade de manchas. Essas variações influenciam no meio interplanetário, sendo que na Terra observam-se muitos efeitos na atmosfera e no campo magnético. E, atualmente, sabe-se que estas variações apresentam um ciclo de aproximadamente 11 anos o chamado Ciclo Solar.

As Manchas Solares

Manchas Solares são regiões mais frias (cerca de $2,0 \times 10^3$ K) e mais escuras do que a fotosfera solar circunvizinha. Seu tamanho varia de $1,5 \times 10^2$ a $1,0 \times 10^5$ km, segundo o estágio de sua evolução. A sua estrutura pode comportar com uma região central (escura) denominada umbra e um contorno acinzentado denominado penumbra. Elas emitem menos energia do que a fotosfera porque possuem intensos campos magnéticos (cerca de 10^{-1} T enquanto a superfície solar 10^{-4} T) que parcialmente bloqueiam a

energia transmitida para cima pelas células de convecção na região sub-fotosféricas (Eddy, 1976, Schove, 1983, Kivelson e Russel, 1995). A figura 1.6 mostra um exemplo de observação das manchas solares obtidas no ano de 1999 pelo satélite The Solar and Heliospheric Observatory (SOHO).

No passado, a origem das manchas foi erroneamente atribuída a possíveis montanhas, nuvens e satélites do Sol. Nas manchas solares ocorre uma redução da temperatura e pressão das massas gasosas no Sol. Esta redução este intimamente relacionada ao seu campo magnético, cuja intensidade média é de 10^{-4} T (1 Gauss), podendo chegar a temperaturas mais altas(10^2 T) próximo às manchas.

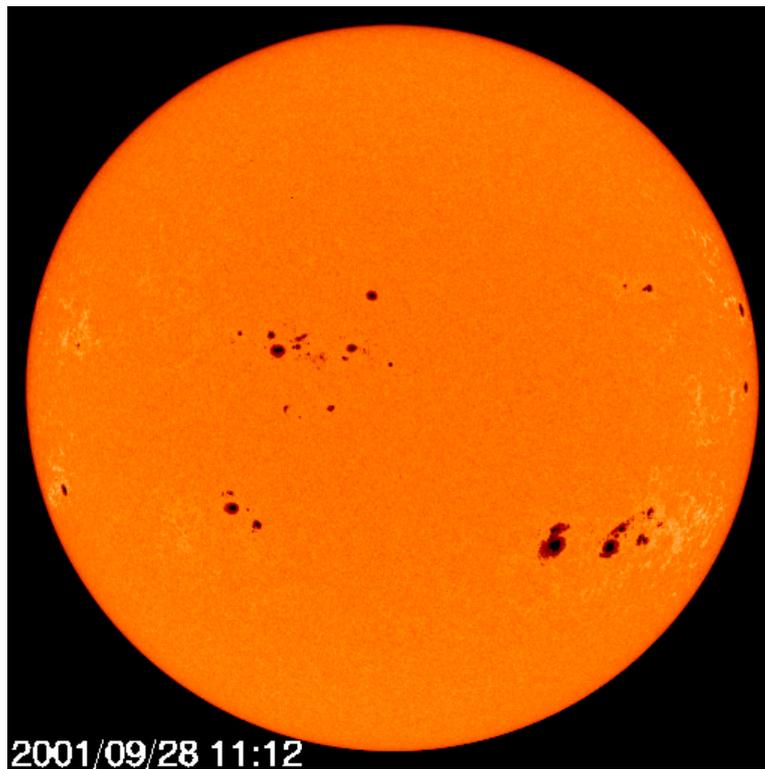


Figura 1.6– Imagem obtida pelo satélite SOHO em 28 de setembro de 2001
Fonte:Nasa(2006)

A evolução da mancha se dá em alguns meses, desde seu surgimento, quando ainda é muito pequena, aumentando de tamanho até se fragmentar e finalmente desaparecer. As manchas normalmente aparecem em grupos, segundo a bipolaridade do campo magnético, ou seja, uma mancha associada à polaridade norte normalmente vem sempre acompanhada por uma outra mancha, associada à polaridade sul do campo magnético. Algumas podem se apresentar mais dispersas ou mais concentradas que as outras (figura 1.7).

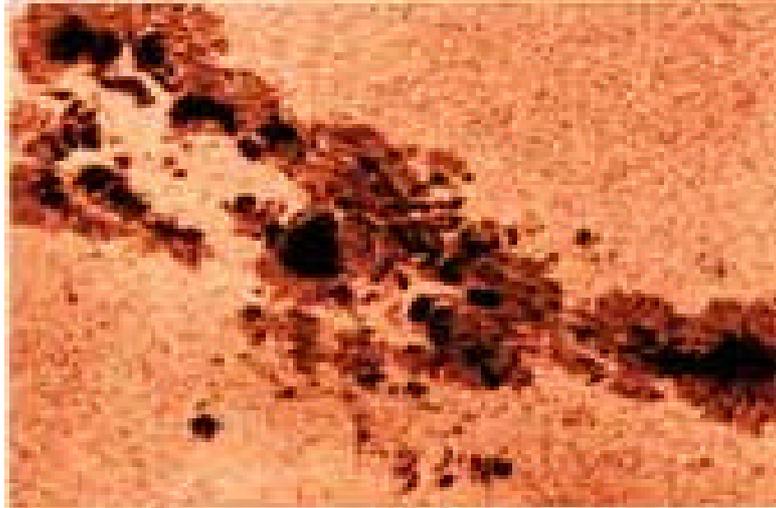


Figura 1.7 Imagem representando a concentração das manchas solares onde se vê também regiões de umbra e penumbra

Fonte: Calvin J. Hamilton (2006)

Ciclo de Manchas Solares

Uma maneira de observarmos o ciclo solar e através do monitoramento do número de manchas, uma vez que o número de manchas solares está relacionado com as atividades solar, que por sua vez apresenta um ciclo de aproximadamente 11 anos. A figura 1.8 mostra o número de manchas solares, onde podemos claramente observar o seu ciclo.

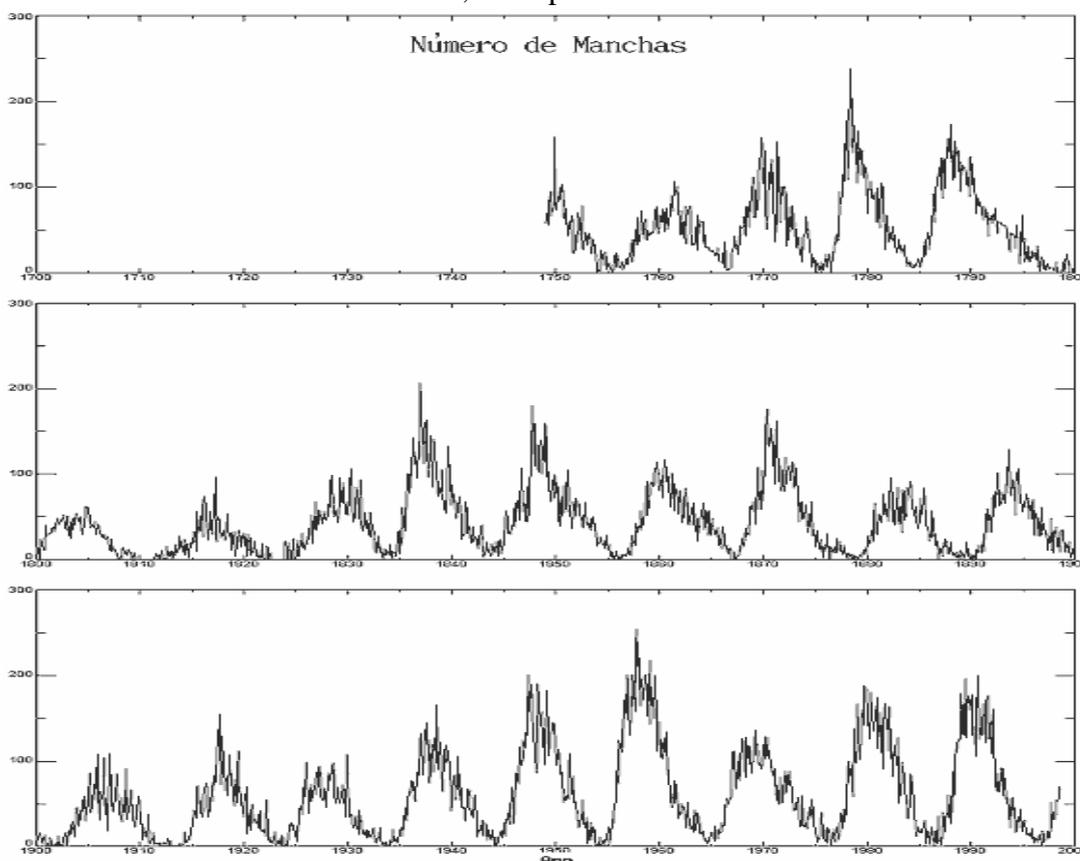


Figura 1.8- Ciclo das manchas solares

Fonte: Kepler de Souza Filho e Maria Fátima de Oliveira (2006).

A teoria mais aceita atualmente para explicar o ciclo solar considera a rotação diferencial (26 dias no equador e 30 dias nos pólos) como fator principal para a formação das manchas solares (Stuiver e Quay, 1980). A rotação do Sol, por ser mais rápida no equador, arrasta lateralmente as linhas de campo magnético. A cada rotação, as linhas magnéticas aproximam-se mais uma das outra culminando numa repulsão de campo magnético. Assim ocorre expulsão de gases que seguem em direção as linhas do campo magnético formando laços magnéticos. As regiões de saída e entrada dos laços formados possuem polaridades opostas e nelas aparecem manchas solares. Sua baixa temperatura se deve menor quantidade de material retido na região das manchas, devido às manchas possuírem linhas de campo magnético “abertas”. Como as linhas de campo magnético tendem a se torcerem primeiro no equador solar, isto explica porque as manchas não são usualmente encontradas em latitudes superiores a 40°. Henrich Schabe em 1843 constatou que o número de manchas na fotosfera sofre variações regulares. Analisando estes dados ele chegou à conclusão que o Sol tem o ciclo de 11 anos.

O Ciclo completo de atividade solar dura o dobro desse intervalo. Num processo que regenera continuamente os campos magnéticos - chamado dínamo - inicia-se nos pólos magnéticos do Sol. Enquanto o campo dos pólos originais desaparece, retornamos aos campos originais de polaridade, assim completando um ciclo magnético de 22 anos.

Convencionou-se chamar de primeiro ciclo o período compreendido entre Março de 1755 e maio de 1766.

Uma observação importante quanto a relação entre o ciclo de atividade magnética solar de 11 anos e as suas conseqüências na terra é que a ionosfera terrestre é sensivelmente afetada pela atividade solar. Além disso, as tempestades magnéticas, tratadas nas seções a seguir, provocam conseqüências nas distribuições de ventos neutros e campos elétricos da atmosfera superior.

1.1.5-Índices de Atividade Solar

Cálculo das Manchas Solares

Schwabe descobriu o ciclo de 11 anos em 1843 e Wolf nos anos de 1850 fez um gigantesco esforço para compilar e reconstruir a atividade solar (Hoyt e Schatten, 1997). Ele teve sucesso em construir uma série de médias anuais desde 1700 (Eddy, 1976), o número de manchas solares de Wolf, também conhecido como número de Zurich ou Internacional, é definido como:

$$R_z = k (10 g + f) \quad (1)$$

Na equação 1, R_z é o número de manchas solares de Wolf, k é uma constante de normalização para um observador particular, g é o número de grupos de manchas solares e f é o número de manchas solares individuais visíveis sobre o disco solar. A série de R_z foi determinada por Wolf utilizando apenas um observador primário e as observações que faltavam foram substituídas por observadores secundários. O fator de correção k é usado para compensar diferenças sistemáticas em observações causadas por variações nos tamanhos de telescópio, condições atmosféricas e erros de observadores. A série temporal de R_z não apresenta barras de erro e muitas das antigas observações

não foram usadas ou encontradas por Wolf em sua pesquisa. Os períodos sem dados foram preenchidos por Wolf com valores interpolados (Hoyt e Schatten, 1998). Para o período 1700-1748 somente médias anuais estão disponíveis. Entre 1749-1817 médias mensais estão disponíveis, sendo que valores diários (porém com muitos intervalos sem dados, incluindo meses inteiros) estão disponíveis somente a partir de 1818. A figura 1.9 apresenta um gráfico das manchas solares em relação ao tempo (anos), iniciando em janeiro de 2004.

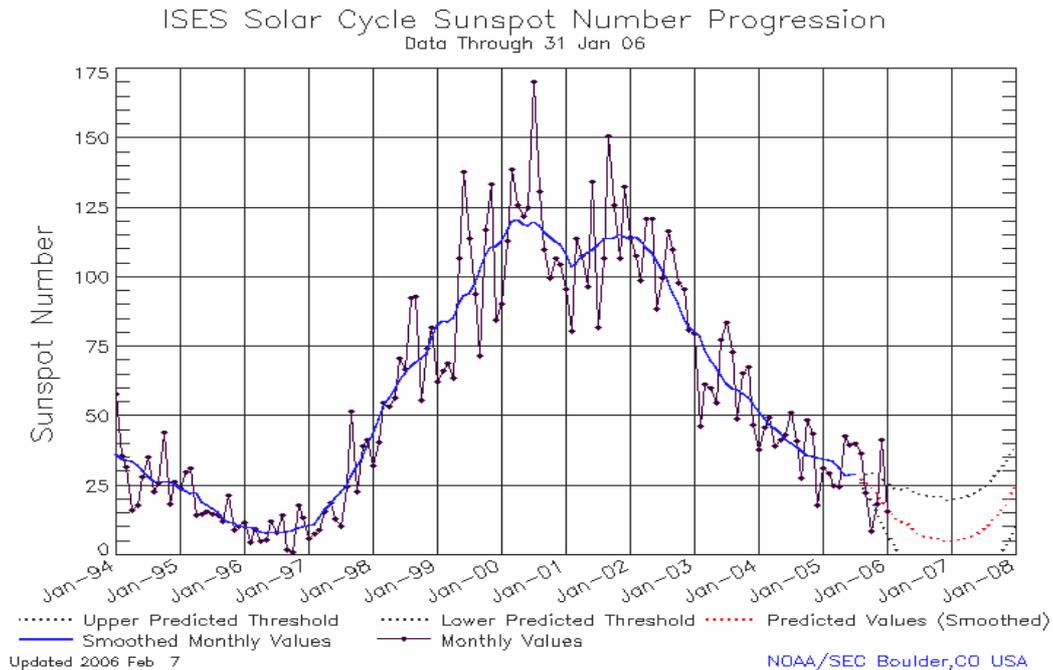


Figura 1.9-Progressão do número de Manchas Solares de 1994 até 2006

Fonte: NOAA/ Sec Boulder, Co USA

Fluxo Solar

O Fluxo Solar é uma medida da intensidade das emissões solares de radiação na frequência de 2,8 GHz feita usando um radio telescópio localizado em Ottawa, Canadá. Conhecido também como fluxo 10.7 cm (em referência ao comprimento de onda de 10,714 cm do sinal de radio em 2,8 GHz). Esta emissão de rádio solar tem sido apresentada como proporcional à atividade das manchas solares. Adicionalmente, o nível das emissões ultravioletas e Raios-X do Sol são primariamente responsáveis por causar a ionização na camada superior da atmosfera terrestre.

O fluxo solar é reportado em unidades de fluxo solar (s. f. u., onde 1 s.f.u. é igual a 10^{-22} W/m^2) e é registrado diariamente em Ottawa as 17:00 UTC para ser direcionado ao USNOAA (United States National Oceanic and Atmospheric Administration's Space Environment Services Center). A figura 1.10 mostra a variação do fluxo no decorrer dos anos de 1994 a 2006. O intervalo das leituras do fluxo solar se inicia a partir do mínimo teórico de, aproximadamente, 67 até o número observado realmente, o qual foi maior que 300. Números baixos de fluxos solares dominam durante as porções inferiores do ciclo solar de manchas de 11 anos, aumentando conforme o ciclo progride. O fluxo solar médio é um indicador de razoável confiabilidade do comportamento do ciclo em longo prazo.

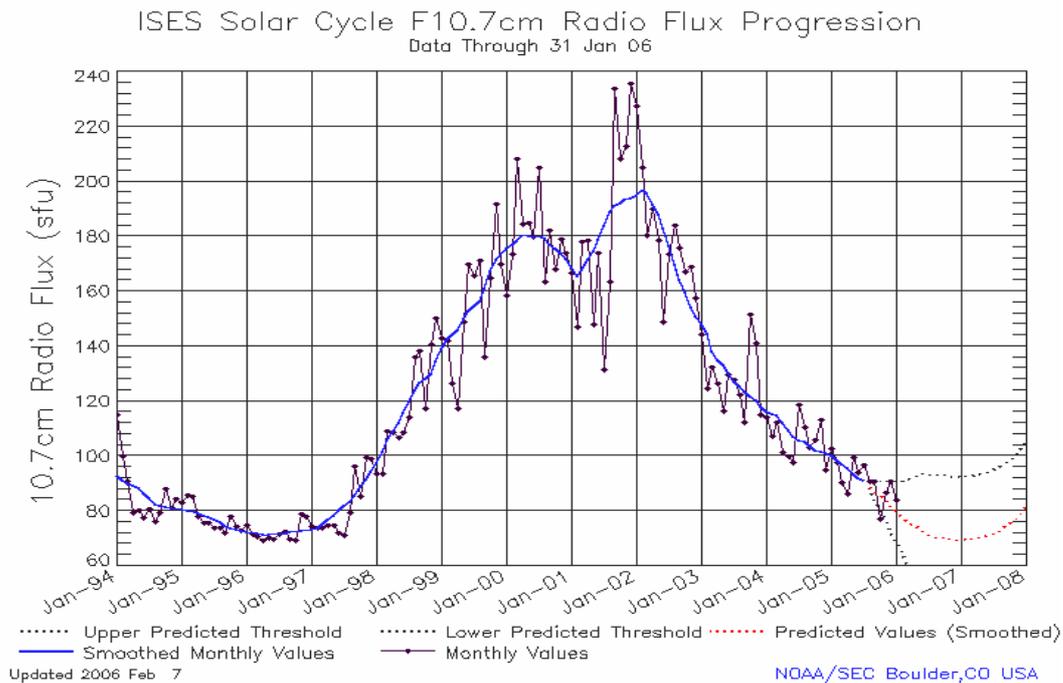


Figura 1.10-Fluxo de Rádio 10.7 cm de 1994 até 2006

Fonte: NOAA/ Sec Boulder, Co USA

1.1.6 -Acontecimentos na Atmosfera Solar

Nesta seção serão apresentados alguns dos diversos fenômenos observados na atmosfera solar.

Protuberâncias

Um dos fenômenos observáveis na superfície do Sol são as protuberâncias, imensos jatos de gás direcionados pelas linhas de força do campo magnético que podem atingir até $3,0 \times 10^6$ km de altura, e que apresentam forma geométrica variada (arco, laço, feixe, etc). Existem dois tipos básicos de protuberâncias: as quiescentes e as eruptivas. As primeiras são mais numerosas, mais lentas e menos luminosas. Podem durar vários meses e em geral atingem uma altura de $8,0 \times 10^3$ km, mas podem chegar até a $3,0 \times 10^6$ km. Já as protuberâncias eruptivas são claras, duram alguns minutos e apresentam uma ejeção de matéria com velocidade superior a cem quilômetros por segundo. Atingem, em geral, a altura de $4,0 \times 10^4$ km. A figura 1.11 apresenta um exemplo de protuberâncias eruptivas.



Figura 1.11-Imagem obtida pelo satélite Transition Region and Coronal Explorer (TRACE), da NASA, mostrando uma erupção cujo plasma nos arcos se move balisticamente e é aquecido a partir da base dos mesmos.

Fonte: Nasa Official (2006)

Flares

Um “flare” solar é uma “explosão”, uma enorme liberação de energia, que ocorre na superfície do Sol quando a energia que está armazenada nas linhas retorcidas de seu campo magnético é subitamente liberada (figura 1.12). Quase sempre estas linhas retorcidas ficam as manchas solares.

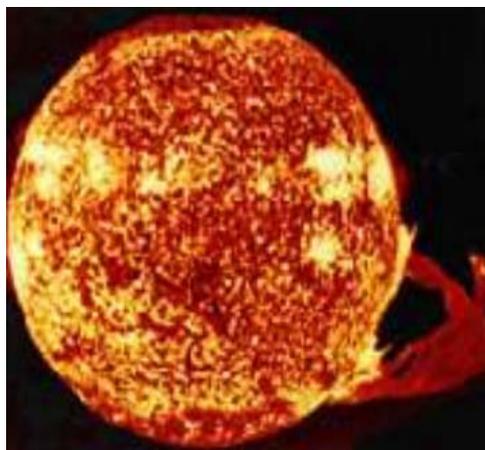


Figura 1.12– Imagem em Raios-X do Sol obtida pelo satélite Skylab, em 19 de dezembro de 2006.

Fonte: Laboratório Espacial Skylab Nasa(2006).

Os “flares” produzem uma enorme emissão de radiação que se espalha ao longo de todo o espectro eletromagnético, desde a região dos Raios-X e até os Raios Gama. Como consequência dos flares temos as chamadas ejeções de massa, enormes bolhas de gases ionizados com até 10 bilhões de toneladas que são lançadas no espaço interplanetário à velocidade que superam valores altos de quilômetros por hora.

Erupções Solares

Uma liberação de energia numa região de mancha solar caracteriza a erupção solar. Apesar da grande quantidade de energia envolvida, a maior parte das erupções é

praticamente invisível, pois ocorre na atmosfera transparente, e apenas a fotosfera pode ser vista na luz visível.

As erupções solares são registradas na linha do hidrogênio (linha vermelha) do espectro. Essas erupções liberam inicialmente feixes de elétrons e núcleos atômicos de alta velocidade, seguidos de uma emissão secundária de quantidades de radiação ultravioleta, gama e Raios-X. Esse fenômeno aumenta a intensidade do vento solar, que se desloca no espaço a velocidades entre 350 a 700 km/s.

Ejeções de Massas Coronas

São grandes quantidades de matérias (10^2 a 10^{13} kg), entremeadas de linhas de campo magnético, que são expulsas do Sol durante um período de várias horas, formando uma enorme erupção que se expande para o espaço exterior a uma velocidade muito alta (figura 1.13). Ainda não se sabe a causa destes fenômenos. Sabe-se que estão associados a proeminências eruptivas ou acompanhando os flares. Porém podem ocorrer na ausência de ambos.

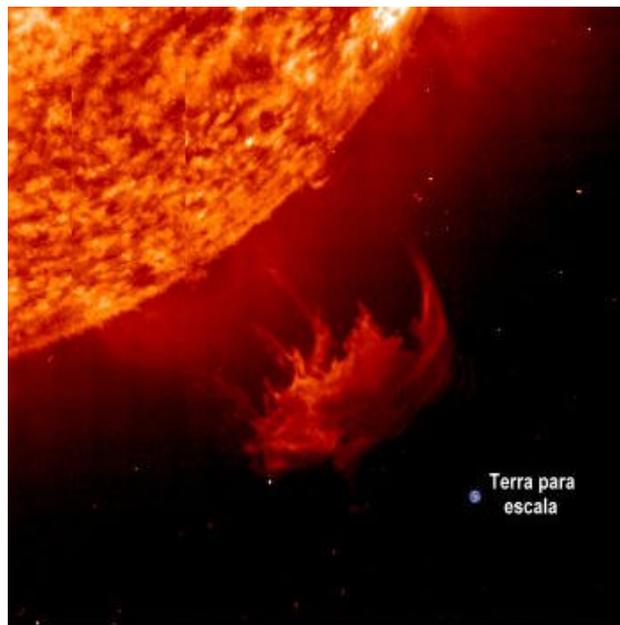


Figura 1.13-Ilustração das Dimensões de uma CME em comparação com o tamanho da Terra

Fonte: Kepler de Souza Oliveira Filho e Maria de Fátima Oliveira Saraiva (2006)

As ejeções coronais de massa que viajam milhares de km/h e levam de um a quatro dias para alcançar a Terra. Quando atingem a Terra, têm milhões de quilômetros de extensão afetam sensivelmente ionosfera terrestre, provocando conseqüências nas distribuições de ventos neutros e campos elétricos da atmosfera superior. E com isso, satélites podem ser danificado e as alterações na densidade ionosférica, podem provocas um atraso no sinal transmitido pelos sistemas Loran, Omega e Global Positioning System (GPS) causando um erro no posicionamento de navios e aviões de vários quilômetros. Além disso, as tempestades provocam uma entrada de partículas em altas latitudes, que podem provocar danos às redes de energia elétrica através de indução de corrente elétrica, levando à queima de transformadores. Elas também podem aumentar a incidência de radiação ionizastes nas pessoas, principalmente em vôos de alta altitude, como vôos

supersônicos e astronáuticos. O lado positivo das tempestades solares são às magníficas auroras , as quais elas dão origem.

Vento Solar

O Sol emite um fluxo contínuo de partículas ionizadas que se propagam pelo espaço em todas as direções. Denominado vento solar, esse fluxo possui intensidades variáveis, associadas à atividade solares. Os ventos solares são responsáveis por diversos fenômenos, como a orientação da cauda dos cometas em sentido contrário ao Sol, distorção do cinturão magnético da Terra, com conseqüente alteração do campo magnético do planeta. Plumagens de gás quente fluindo (figura 1.14) para fora da atmosfera do sol são evidências da presença do “vento solar” formado de partículas carregadas.

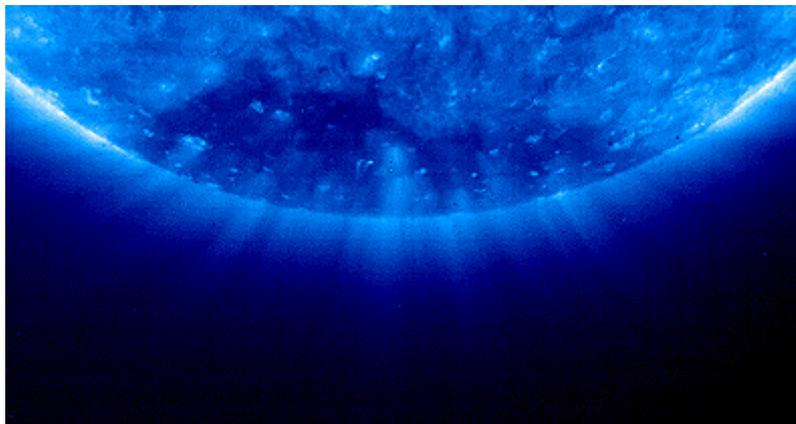


Figura 1.14 -Fotos Ventos Solares
Fonte:SOHO/ NASA(2006)

1.1.7-Conceitos sobre o Campo Magnético do Sol

O Campo Magnético do Sol

Já sabemos que as causas da atividade solar são o campo magnético de grande escala do Sol e a sua rotação diferencial (do Sol). O campo magnético solar não provém de um dipolo no interior do Sol (como o da Terra); porém parece resultar da contribuição dos vários campos produzidos nas camadas superficiais do Sol. A interação complexa do campo magnético solar com a sua rotação diferencial produz perturbações localizadas no Sol, permitindo a liberação de energia magnética na forma de energia cinética. Isso produz, entre outros fenômenos, explosões solares e proeminências eruptivas e, às vezes, por conseqüência, ejeções de matéria coronal, todas estas já discutidas anteriormente. Isso se sobrepõe à radiação eletromagnética normalmente emitida pelo Sol.

O campo magnético do Sol pode se destacar do Sol penetrando no meio interplanetário. Por efeito de propriedades magnéticas, esse campo propaga-se congelado no vento solar. Devido à rotação do Sol, isso dá origem a uma configuração espiral. Assim, as linhas de campo magnético solar em um hemisfério afastam-se e no outro se aproximam, até sofrerem ao longo do tempo uma inversão, o que caracteriza entre outros efeitos o Ciclo de atividade solar, também já visto.

A interação do Vento Solar com o Campo Magnético da Terra

Como a Terra possui um campo magnético, o vento solar incidente interage com essa atmosfera ionizada e magnetizada, estabelecendo uma região espacial dinâmica que envolve a Terra, denominada Magnetosfera, em cuja cavidade os processos físicos são dominados pelo campo geomagnético.

O campo geomagnético e a atmosfera terrestre previnem as partículas do vento solar de atingir o planeta diretamente. Essas partículas formam uma cavidade parecida com uma “casca” com a Terra no seu interior (figura 1.15). A cavidade, a Magnetosfera da Terra, é realmente distorcida de forma semelhante à de um cometa com a cabeça do cometa sempre apontada diretamente ao vento solar, e a cauda diretamente para fora. Na ausência de atividade solar significativa, o vento solar é uniforme com uma velocidade de aproximadamente 400 km por segundo. Sob estas condições, a magnetosfera da Terra se mantém com uma forma e orientação regularmente constante. Quando os distúrbios ocorrem no Sol, algumas nuvens de partículas solares podem ser explodidas as velocidades tremendas. Conforme estas nuvens de partículas solares de alta velocidade se encontra com a magnetosfera terrestre, esta se torna perturbada, alterando a intensidade e direção do campo magnético terrestre. Isto é análogo a uma biruta de vento no alto de um prédio em uma rajada de vento; altas velocidades repentinas podem atingi-la e causar que se gire. Ainda, mudanças na densidade e na velocidade do vento solar podem causar outras anomalias referidas como sendo “impulsos súbitos”.

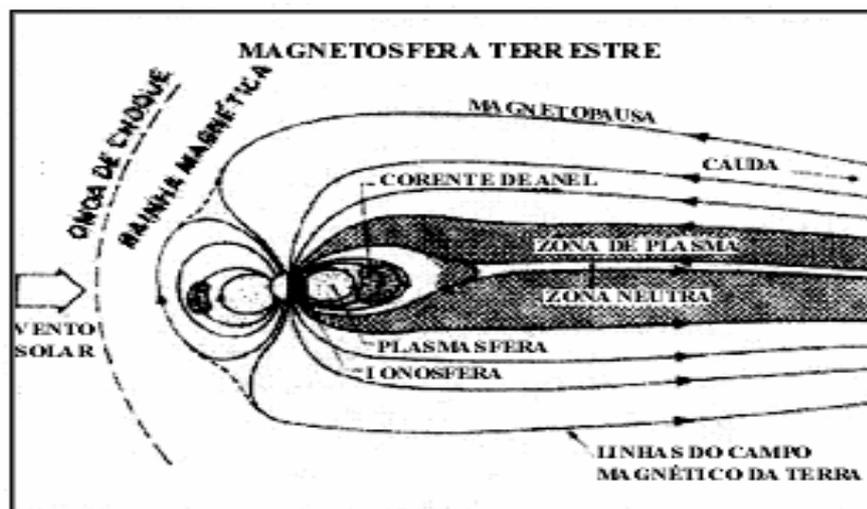


Figura 1.15 - Ilustração mostrando a Cavidade Magnetosférica Terrestre

Fonte: Revista Brasileira de Física (2006)

De acordo com a figura, no lado diurno há um achatamento da magnetosfera e no noturno, um prolongamento, constituindo uma cauda magnetosférica. Essa cauda pode armazenar energia com a sua liberação posterior gradual ou abrupta. O vértice polar permite acesso direto do plasma solar à região da atmosfera superior da porção diurna da região auroral. Nas regiões de mais baixas latitudes as partículas incidentes também contribuem para o estabelecimento de correntes elétricas, contribuindo para o aumento de energia depositada e aumentando população das altas camadas (distância superior a 3 raios terrestres).

1.18-Atividades Magnéticas

Índices de Atividades Magnéticas

Para a monitoração das variações que ocorrem no campo magnético terrestre são utilizados índices geomagnéticos que acompanham a evolução do campo magnético. Os índices geomagnéticos fornecem informações sobre o nível de atividade geomagnéticas e são de grande importância nos estudos das relações Sol-Terra não somente nas áreas de geomagnetismo e física magnetosférica mas também em climatologia, telecomunicações. Os índices mais utilizados na literatura são o Kp e a sua forma linear Ap; Dst e AE. O primeiro deles estima a entrada global de energia na magnetosfera e por esse motivo é chamado de índice planetário e os dois últimos monitoram efeitos isolados: a corrente de anel e o eletrojato auroral.

Índice Kp

Este índice reflete globalmente o grau de perturbação do campo geomagnético nas últimas 3 horas. Seus valores variam de 0 até 9. Números baixos significam condições de ionosfera quieta. Ele é obtido através de medidas periódicas em observatórios magnetométricos internacionais. Os valores de Kp representam uma média dos valores obtidos no espaço de tempo de 3 horas começando a 0 UT. Desta maneira, cada dia possui 8 valores de Kp e a soma destes 8 valores constitui o que se denomina ΣKp . Na verdade, o índice ΣKp representa mais as perturbações do campo geomagnético do hemisfério norte devido ao maior número de observatórios existentes neste hemisfério.

Índice Ap

É uma medida do nível geral da atividade geomagnético sobre o globo para um dado dia (UT). É derivado das medidas feitas da variação do campo geomagnético devido às correntes que fluem na ionosfera da terra e, a pouca extensão, na magnetosfera da terra em um número de estações de magnetômetros ao longo do globo.

Índice AE

Este índice é obtido a partir de uma cadeia de magnetômetros dispostos ao longo da zona dos eletrojetos aurais. Desde 1975 estas variações são registradas com resolução de minutos para obtermos o índice AE. Este é obtido através da superposição em mesma escala de amplitude e tempo dos vários magnetogramas obtidos nos diferentes observatórios. O nível da medida de magnetômetro nos períodos calmo deve ser determinado para cada um deles e subtraído dos valores medidos, deixando assim, somente o valor da perturbação. Na superposição a amplitude da envoltória superior define o valor de AU e a amplitude da envoltória inferior define o valor de AL.

Índice Dst

Entre todos os índices, o índice Dst é provavelmente aquele que com melhor precisão monitora e registra o fenômeno para o qual foi designado. Esse parâmetro representa principalmente a intensidade da corrente anelar, nos períodos perturbados. Na derivação desse índice são eliminadas as variações transitórias regulares e irregulares, obtendo-se

assim um registro puro do fenômeno. Durante forte atividade magnética, a assinatura da corrente anelar pode ser vista em registros do campo magnético na superfície terrestre como uma depressão, abaixo do nível de tempo quieto, da intensidade da componente horizontal do campo. No início da tempestade o índice Dst apresenta um pico de intensidade que é conhecido por fase inicial ou início súbito. Após esse pico desenvolve-se a fase principal de tempestade que é caracterizada pela queda brusca no valor da intensidade do índice. Após alcançar o mínimo, o índice começa a subir de valor, fase conhecida por fase de recuperação, até atingir aproximadamente o valor quiescentes, que ocorre quando não há tempestade.

O índice Dst é derivado usando dados de quatro observatórios magnético em Honolulu, San Juan, Hermanus e Kakioka. Estes observatórios foram escolhidos baseados nas qualidades de observação e por estarem localizados em regiões suficientemente afastadas dos eletrojato auroral e equatorial, para minimizar seus efeitos, além disso, eles são distribuídos em intervalos de longitude aproximadamente iguais.

1.2-A Ionosfera

A ionosfera é um constituinte minoritário da atmosfera terrestre. Ela é formada, em essência, por gases ionizados sob altas temperaturas, ou seja, um plasma. Está localizada a partir de 60 km e se estendendo até 1500 km de altura, aproximadamente. A figura 1.17 representa a localização da ionosfera. Nela retrata as camadas ionosféricas, vista a seguir.

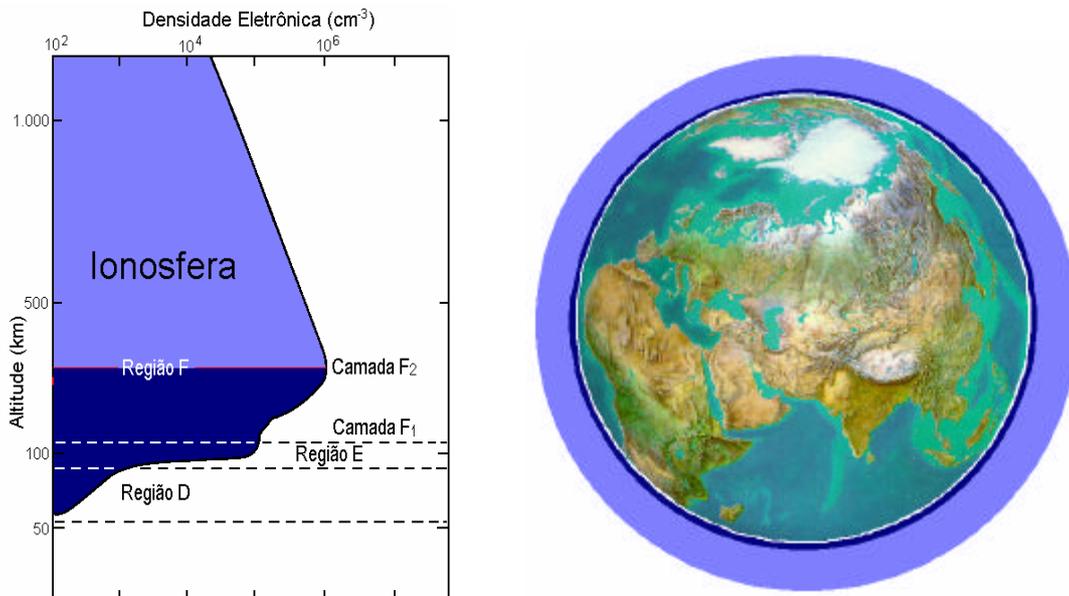


Figura 1.17- Localização das camadas Ionosfera.de acordo com a altura.

Fonte: Denardini (1999,p.23)

1.2.4-A Atmosfera Terrestre

A Atmosfera terrestre é a camada gasosa que envolve a terra. Ela é composta por diferentes tipos de gases. Na parte inferior, onde o equilíbrio dinâmico domina (abaixo de 100 km) ela constituída basicamente de 78% de nitrogênio (N₂), 21% de oxigênio (O₂), e 1% outros gases minoritários. Na parte superior, cada constituinte distribui com sua própria escala de altura. Com isso, os diferentes constituintes tendem a apresentar máximos de concentração em alturas diferentes, com os constituintes mais leves localizados nas porções superiores. Por exemplo, o tópo da atmosfera é constituído quase que em sua totalidade por hidrogênio. A figura 1.18 mostra a atmosfera terrestre, que corresponde à parte em azul.



Figura 1.18– Fotografia do Espaço mostrando a Atmosfera terrestre em falso azul.
Fonte: Simon Coggins (2006)

Composição

Medidas da composição da atmosfera abaixo de 25 km (*Barry e Chorley, 1976*) revelam que quando “seca” ela é formada por:

- Nitrogênio (N₂) 78,08 %;
- Oxigênio (O₂) 20,94 %;
- Argônio (Ar) 0,93 %;
- Dióxido de carbono (CO₂) 0,035 %;
- Hélio (He) 0,0018 %;
- Ozônio (O₃) 0,00006 %;
- Hidrogênio (H) 0,00005 %;
- Criptônio (Kr) indícios;
- Metano (Me) indícios;
- Xenônio (Xe) indícios; e
- Radônio (Rn) indícios.

1.2.2-Temperatura e as Camadas Atmosféricas

A temperatura da atmosfera da Terra varia entre camadas em altitudes diferentes (figura 1.20). O gradiente de temperatura também varia com a altura, sendo que sua variação é uma das bases da classificação das diferentes camadas da atmosfera.

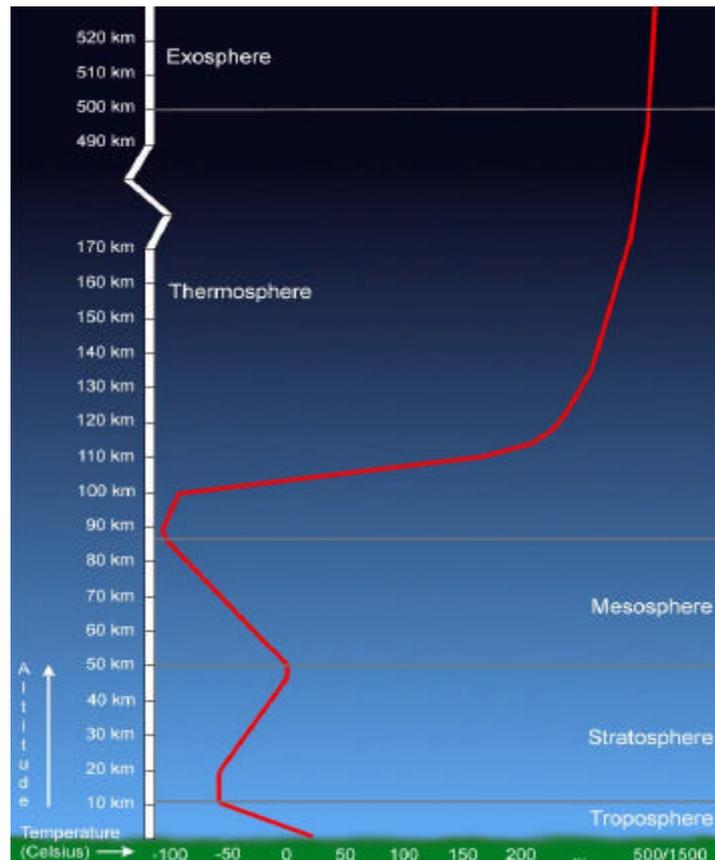


Figura 1.20– Figura mostrando a divisão da atmosfera terrestre.

Fonte: Oscar Wilde.(2006)

Troposfera

A Troposfera é a camada atmosférica que se estende da superfície da Terra até a base da estratosfera (0 - 14/17 km). A temperatura diminui com a altitude. Esta camada responde por 80% do peso atmosférico. Sua espessura média é de aproximadamente 12 km, atingindo até 17 km nos equador e reduzindo-se para em torno de 14 km nos pólos.

Tropopausa

A Tropopausa é o nome dado ao ponto intermediário entre a troposfera e a estratosfera, situada a uma altura média em torno de 17 km no equador. À distância da Tropopausa em relação ao solo varia conforme as condições climáticas da troposfera, da temperatura do ar, a latitude entre outros fatores. Se existe na troposfera uma agitação climática com muitas correntes de convecção, a tropopausa tende a subir. Isto se deve por causa do aumento do volume do ar na troposfera.

Estratosfera

Esta camada se caracteriza pelos movimentos de ar em sentido horizontal. Ela fica situada entre 14 - 17 e 50 km de altitude, aproximadamente. Ela está compreendida entre a troposfera e a mesosfera. Nesta camada, a temperatura aumenta à medida que aumenta a altura até a região limítrofe, denominada estratopausa. Ela apresenta ainda uma pequena concentração de vapor d'água.

Estratopausa

É próximo a estratopausa que a maior parte do ozônio da atmosfera situa-se. Isto é em torno de 50 km acima da superfície, na parte superior da estratosfera.

Mesosfera

A partir da estratopausa, inicia-se a mesosfera, onde a temperatura diminui com a altitude. Esta é a camada atmosférica onde há uma substancial queda de temperatura chegando a um mínimo de -90°C em seu topo. Ela está situada entre a estratopausa e a mesopausa em sua parte superior, entre 50 a 85 km de altitude. É na mesosfera que ocorre o fenômeno da aeroluminescência das emissões da hidroxila.

Mesopausa

A mesopausa é a região da atmosfera que determina o limite entre uma atmosfera com massa molecular constante de outra onde predomina a difusão molecular. Ela marca o ponto entre a Mesosfera e a Termosfera.

Termosfera

Esta é a camada localizada na parte superior da atmosfera terrestre, acima da mesopausa. Sua temperatura aumenta com a altitude rápida e monotonicamente até onde a densidade das moléculas é tão pequena e se movem em trajetórias aleatórias tal que raramente se chocam.

1.2.3-A Ionosfera Terrestre

A atmosfera terrestre, como já foi visto, pode ser dividida em função da temperatura, ionização, campo magnético e propagação das ondas eletromagnéticas. Com relação à propagação das ondas eletromagnéticas, a atmosfera terrestre é dividida em atmosfera neutra e atmosfera ionizada, ou ionosfera. A ionosfera é formada pela ação das fontes ionizantes solares e cósmicas sobre os elementos da atmosfera neutra.

Os gases H, He, O₂; O; N₂; N, entre outros, na alta atmosfera estratificam-se de acordo com sua própria densidade. A principal fonte de ionização permanece nas faixas espectrais EUV e Raios-X que são absorvidos pelos átomos e moléculas existentes na atmosfera. Os fótons provenientes com energia superior a 12 eV (Kirchhoff, 1991) são capazes de retirar elétrons das órbitas dos átomos neutros e, ao mesmo tempo, são responsáveis pelo aquecimento da termosfera. É um processo chamando fotoionização que consiste na transferência radiativa de fótons ao longo do gás neutro. Outro processo, denominado processo corpuscular, as partículas ionizadas com elevada energia cinética também causam a ionização através das partículas neutras. O número de íons produzidos é proporcional ao número de partículas ionizáveis.

A densidade eletrônica varia em função da densidade dos constituintes e da razão da fotoionização. Ela aumenta bastante durante o dia e decai à noite. O perfil da densidade eletrônica decai com a altura, pois a concentração de gases da atmosfera decai

exponencialmente com a altura. Já a densidade de radiação aumenta, devido à redução da sua absorção pela atmosfera. A certa altura a radiação será totalmente absorvida. Assim, a produção de elétrons-íons deve passar por um máximo em alguma altura da atmosfera. Esses máximos de produção formam as três camadas ionosféricas.

Uma vez formada a ionosfera, os íons e elétrons tendem a se recombinar e reagir com outras espécies de gases e produzir outros íons. Assim, há um equilíbrio dinâmico na qual a concentração líquida de elétrons livres (densidade eletrônica) depende da velocidade relativa de produção e perda (Denardini, 1999). Entre os processos de perda na região superior da ionosfera destaca-se a recombinação eletrônica. Ela consiste na recombinação dos elétrons com os íons positivos formando os átomos neutros. Na região inferior da ionosfera, um processo de perda iônica é a junção eletrônica que consiste nos átomos neutros que se unem aos elétrons formando íons negativos. Essa junção explica a concentração de íons negativos na base da ionosfera. Porém todos esses processos de perda não são capazes de eliminar totalmente os elétrons do plasma ionosférico.

Portanto, a ionosfera pode ser representada, matematicamente, em termos da sua equação da continuidade. Na equação 2 q é a taxa de produção, L é a taxa de perda e $\nabla \times (Nv)$ é a produção/perda de elétrons pelo transporte, sendo v a velocidade.

$$\frac{\partial q}{\partial t} = q - L - \nabla \times (Nv) \quad (2)$$

Nas seções a seguir, apresentamos resumidamente, alguns dos termos envolvidos nesta equação.

Produção

O termo de produção da equação 3 representa a taxa de produção de íons (q). Este termo de produção depende da altura (h) e do ângulo zenital do Sol c . Considera-se ainda radiação monocromática de fluxo I de fótons, e que a atmosfera possui apenas um componente gasoso de concentração n e que esta concentração varia com a altura h sem incluir, a princípio a curvatura da Terra. Sendo a seção transversal de absorção do gás (t), e a eficiência de ionização (h), a taxa de produção q pode ser expressa da forma:

$$q = h \cdot t \cdot n(h) \cdot I(h) \quad (3)$$

Perdas

A perda de íons pode ocorrer por diversos processos, entre os quais citamos:

- a) Recombinação iônica (taxa de reação α_i);
- b) Recombinação eletrônica (α_e);
- c) Troca iônica (γ); e
- d) Junção eletrônica.

1.2.4 -As Camadas Ionosféricas

Uma vez conhecidos os processos de formação da ionosfera e as condições em que ela está inserida na atmosfera neutra, vamos tratar, nesta seção, da morfologia da ionosfera. De acordo com a variação da altura a ionosfera divide-se em regiões distintas ou camadas. Cada camada tem propriedades características. A figura 1.21 apresenta o perfil da ionosfera, subdividindo em suas camadas de acordo com a altura. Do solo para cima a ionosfera se divide em camadas de ionização. Estas variam conforme a hora do dia, estações do ano e condições solares.

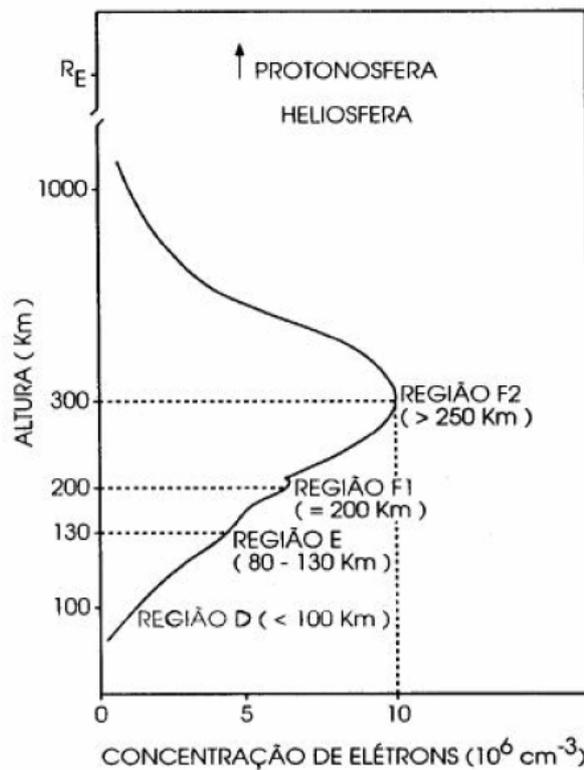


Figura 1.21– Figura representando o perfil da Ionosfera e as suas camadas de acordo com a altura.

Fonte: Jean Walles (2006)

Nas seções a seguir serão definidas as camadas ionosféricas. A região D nas alturas inferiores, apresentando menor grau de ionização. A região E, acima da região D, se caracterizando pela máxima condutividade elétrica. E a região F nas alturas superiores, geralmente subdividindo durante o dia em F₁ e F₂. Na Figura 1.22 estão representadas as divisões de acordo com a altura e também os íons positivos predominantes das camadas.

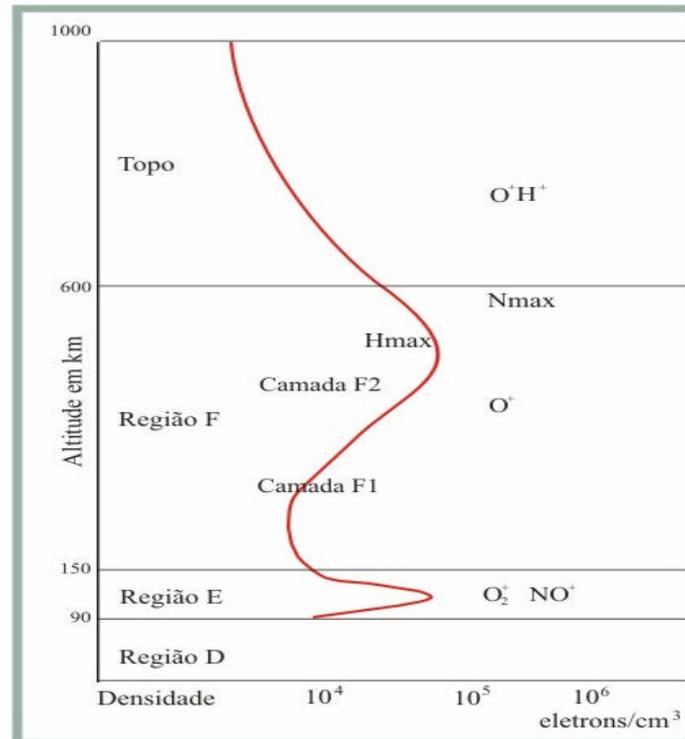


Figura 1.22- Camadas Ionosféricas de acordo com a altura e representando os íons predominantes.
 Fonte: Robert R. Brown (2006)

Camada D

Esta é a mais baixa de todas as camadas situando-se entre os 50 e os 80 km. Ela é a que aparentemente apresenta mais absorção à energia rádio-elétrica. É também a menos estudada de todas as camadas ionosféricas e a que menos grau de ionização apresenta. Acredita-se que esta camada é a responsável pela absorção das ondas de rádio em HF e MF durante as horas diurnas. As reações químicas mais importantes incluem os componentes O, O₃, NO, NO₂, CO₂ e H₂O. Em proporções menores têm-se também metais alcalinos, como Na, K e Li. Estes são pequenos em comparação aos gases O₂ e N₂. A distribuição vertical desses componentes é influenciada por vários fenômenos, o que torna a região D menos regular do que a ionosfera superior.

As radiações mais importantes nesta camada são em torno de 80 km de Raios-X, que ionizam o oxigênio e nitrogênio em torno de 80 km. A radiação solar na faixa do Lyman- α ioniza o óxido nítrico NO. A ionização adicional nas alturas inferiores causada pelos raios cósmicos.

Camada E

Esta camada situa-se entre 80 e 120 km e sua ionização é mais notável durante as horas diurnas, tendo sua densidade iônica bastante reduzida durante a noite. É uma região com alta condutividade elétrica sendo importante do ponto de vista da presença de correntes elétricas ionosféricas e da interação destas correntes com correntes do campo magnético. Por exemplo, na região do equador magnético terrestre, a forte corrente horizontal chamada de eletrojato equatorial dá origem à diversas irregularidades de plasma que podem ser vistas em medidas de equipamentos de sondagem como camadas "E-esporádica" do tipo q. Outros tipos de camadas E-esporádicas também são observados devido a outros processos, como os cisalhamento sobre os íons metálicos.

Os principais íons primários ionizados nesta camada são de N_2 , O_2 , e O . Encontram-se também grande número de NO . As radiações EUV são absorvidas pelo oxigênio molecular para formar O_2 . A região E é importante pela presença de correntes elétricas que nela fluem e sua interação com o campo magnético.

Camada F₁

Esta camada situa-se entre 120 e 200 km e quase sempre só é possível de ser percebida durante as horas diurnas. Ela é caracterizada por um pequeno pico secundário ou uma pequena inflexão na curva de densidade de elétrons. A espécie molecular predominante na altura da camada F₁ é o N_2 e o íon majoritário é o O^+ .

Camada F₂

Esta é a mais alta das camadas ionosférica, ela está localizada acima de 200 km. É caracterizada pelo aumento da densidade eletrônica, pois a taxa de perda cai mais rapidamente do que a taxa de produção. Os íons positivos predominantes são O^+ , N_2^+ e H^+ . É nesta camada que ocorre um dos fenômenos de bastante interesse para a comunidade científica, as bolhas ionosféricas. Este fenômeno será discutido nas seções que se seguem.

1.2.5-Bolhas Ionosféricas

As bolhas ionosféricas (figura 1.23) são regiões do espaço terrestre onde as densidades do plasma ionosférico são reduzidas com relação ao meio onde ela está inserida. As bolhas ionosféricas desenvolvem-se no Equador Magnético estendendo-se ao longo das linhas de força do campo geomagnético podendo alcançar até 1000 km. Isto ocorre devido a maior mobilidade dos elétrons sobre as linhas, proporcionando uma extensão rápida nesta direção. Com relação a sua sazonalidade, as ocorrências das bolhas ionosféricas são mais observadas nos meses de primavera e verão.

O fenômeno das bolhas ionosféricas foi detectado experimentalmente pela primeira vez sobre o território brasileiro por volta dos anos 1976-1977, pelo grupo de estudos ionosféricos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, por meio de observações de aeroluminescência (também conhecida por airglow, na língua inglesa), emitida pelo oxigênio atômico da ionosfera. Dentro das bolhas o plasma é muito rarefeito. A rarefação pode alcançar até 99% conforme já tem sido observado (Santana, 2001). Entretanto, as partículas eletricamente neutras da atmosfera terrestre, tais como o oxigênio atômico, não sofrem variação de concentração, o que significa que as bolhas são caracterizadas pelas reduções de concentração de plasma e não de atmosfera neutra.

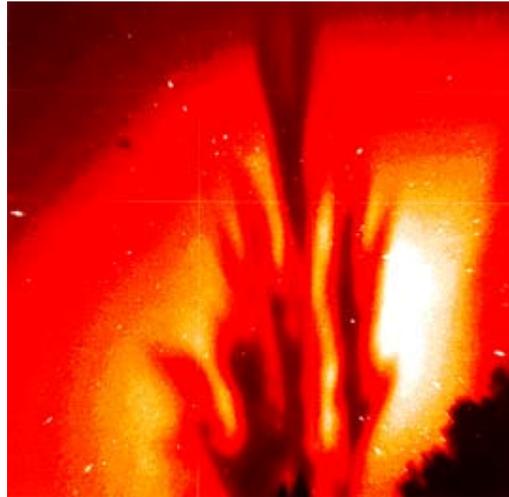


Figura 1.23-Imagem de Airglow, mostrando a presença de uma bolha ionosférica.
 Fonte: Jean Walles (2006)

Em sondadores digitais a presença das bolhas ionosféricas é vista como espalhamentos nos traços da camada F, sendo denominado de spread-F. A figura 1.24 mostra um exemplo de spread-F visto nos ionograma obtido para a região de São Luís.

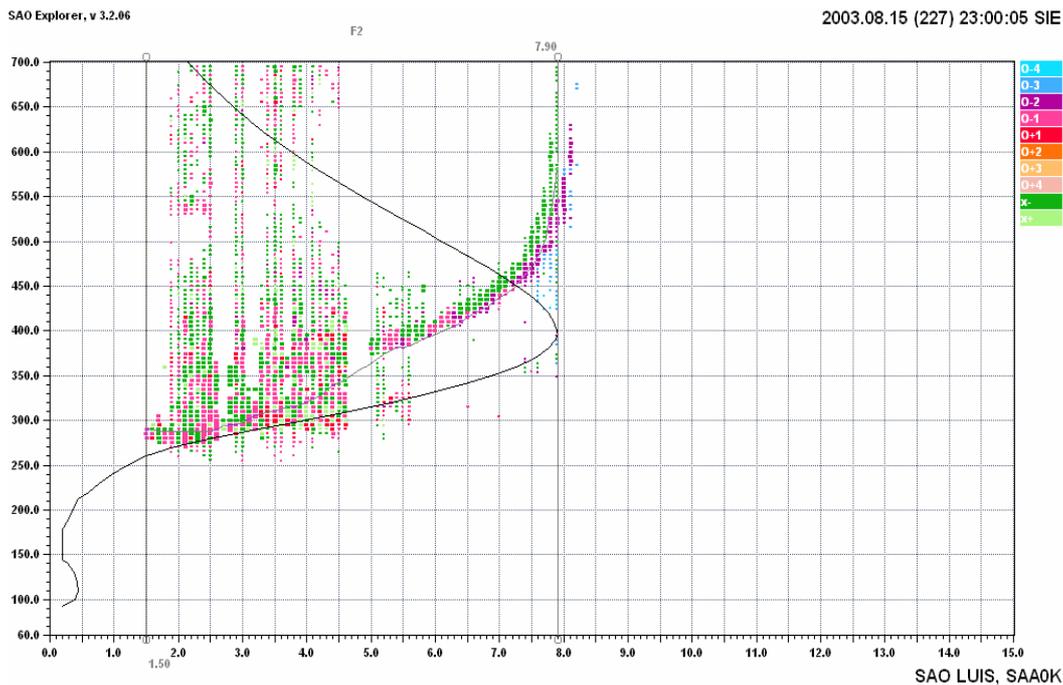


Figura 1.24 - Exemplo de spread-F visto nos ionograma obtido para a região de São Luís (MA) em 14 de setembro de 2003, às 23 h..

Geração das bolhas ionosféricas

A Teoria de Rayleigh-Taylor explica como pequena instabilidade na base da região F ionosférica pode gera essas bolhas. Em essência é necessário que o equilíbrio instável, onde a porção menos densa abaixo do máximo de densidade sustenta uma região mais densa acima, seja rompido pelo advento de uma pequena instabilidade. Esta, sob condições especiais, intensifica-se podendo desenvolver bolhas ionosférica (Santana,

2001). A figura 1.25 exemplifica o desenvolvimento de uma bolha ionosférica sobre a região brasileira.

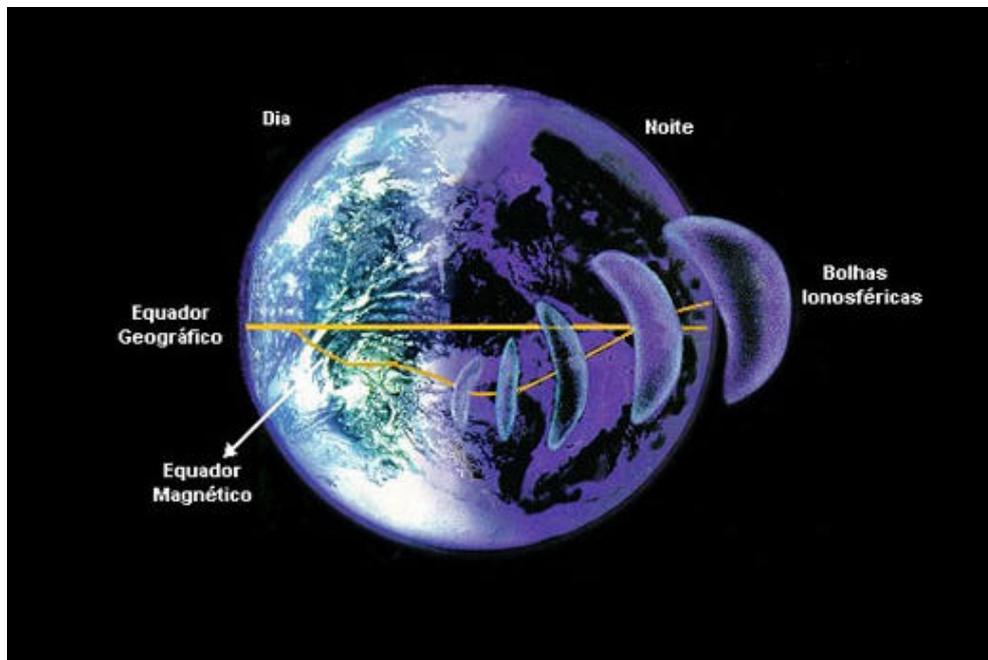


Figura 1.25-Ilustração do movimento das bolhas ionosféricas sobre a região brasileira.

FONTE : Carlos Rodrigues (2006)

1.2.6-Diferenças Latitudinais da Ionosfera

Com respeito as diferenças latitudinais, a ionosfera pode ser dividida em três regiões para as finalidades de caracterizar seu comportamento: equatorial, temperada e polar. A ionosfera temperada é a "melhor comportada". É também melhor estudada, porque a maioria das sociedades tecnológicas do mundo estão situadas nesta área (ao menos no hemisfério norte).

Comparado à zona temperada, o sol é situado diretamente acima da zona equatorial, e assim nós devemos esperar encontrar densidades ionosférica mais elevadas do que na zona temperada. Nós podemos também esperar encontrar uma variação menor da ionosfera com as estações uma vez que esta região recebe radiação solar durante todas as estações. No outro extremo, nós esperaríamos a ionosfera polar sendo menos densa (por causa do alto ângulo de zênite solar) e mostrando grande variação entre o verão e o inverno. Embora estas expectativas sejam essencialmente verdadeiras, não explicam muitas características interessantes destas regiões. E a região F nem sempre obedece estas suposições razoáveis.

As ionosferas polar e equatorial estão sujeitas a uma escala mais ampla de comportamentos específicos. Uma das causas principais do deste comportamento é o campo magnético da terra. Nas regiões polares, as linhas do campo magnético são quase perpendiculares à superfície da terra, enquanto na região equatorial, as linhas do campo magnético são praticamente horizontais à superfície da terra em torno do equador magnético. A característica mais interessante da ionosfera tropical é a região normalmente chamada de anomalia equatorial. Este é o lugar onde uma concentração elevada de elétrons é observada em cada lado do equador magnético em latitudes

magnéticas em tona de 10 a 20 graus. Estas cristas de ionização são densidade eletrônica ionosféricas mais elevadas que as demais existem no equador geomagnético, para uma mesma altura. O fenômeno responsável pela criação desta cristas é o mesmo que faz com que o pico da região F seja observado em alturas mais baixas do que está no equador geomagnético. Historicamente, este nome surgiu porque o pico da ionização é encontrado nesta região quando era esperado que fosse em torno do equador. Hoje se sabe que este é um comportamento rotineiro e este aumento de densidade não é uma anomalia, mesmo assim o nome ainda hoje é usado.

2- INSTRUMENTAÇÃO

A propagação das ondas eletromagnéticas transionosférica depende do estado da ionosfera e fornece, portanto, um método apropriado para estudá-la. Para que a emissão de um rádio-sinal de determinado comprimento de onda venha a ser refletido na ionosfera, é necessário que a densidade eletrônica da região onde ele está sendo refletido tenha um valor proporcional à raiz quadrada da frequência do sinal emitido. Baseado nesta relação, é possível de se obter a densidade eletrônica na altura do ponto de reflexão. Esta a altura, por sua vez, é obtida medindo-se o intervalo de tempo entre a emissão e o retorno do eco. Se esta experiência for repetida diversas vezes, utilizando-se vários comprimentos de onda será possível deduzir a variação de densidade eletrônica com a altitude, o que vai fornecer o perfil ionosférico. Quando mais curtas são as ondas, maior será a densidade eletrônica necessária para provocar a sua reflexão. A densidade eletrônica máxima fixa o máximo comprimento de onda mais curto que pode ser refletido, ou seja, o comprimento de onda limite. As ondas de comprimentos de ondas inferiores o comprimento limite atravessam a ionosfera.

Um exemplo da emissão vertical e posterior reflexão na densidade eletrônica ionosférica correspondente é mostrado na figura 2.1. Nesta figura, temos vários exemplos de reflexão. No caso do caminho 1 (um), o sinal é refletido pelas menores densidades encontradas nas alturas inferiores da ionosfera, indicando que o sinal é de baixa frequência. No caso 2 (dois), o sinal é refletido nas regiões de maiores densidades, próximo ao pico de densidade eletrônica. Isto indica que este sinal tem uma frequência maior que o primeiro, mas que sua frequência ainda não é suficientemente alta para permitir que ele atravessasse totalmente a ionosfera. No caso 3 (três), o sinal não é refletido. Isto indica que a frequência deste sinal é maior que a maior frequência capaz de ser refletida pela ionosfera, denominada frequência crítica.

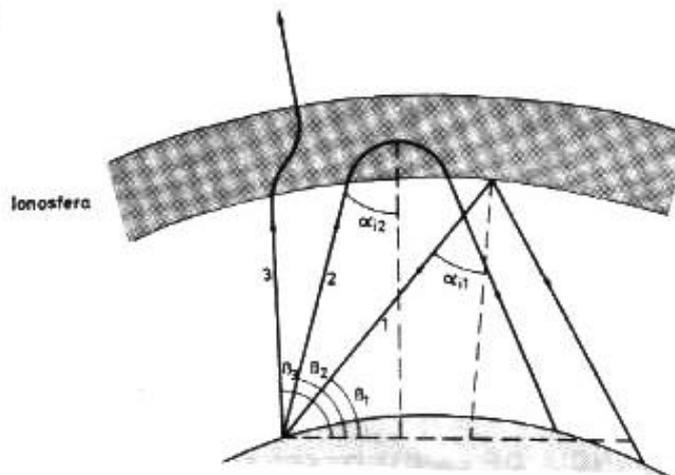


Figura 2.1– Exemplo de emissão de sinal com posterior
Fonte: Jean Walles (2006)

Existem diversos equipamentos para o estudo ionosférico. Dentre eles, existe uma classe de equipamentos que são baseados nestas propriedades conhecidas da propagação de ondas de rádio na ionosfera. Estes são chamados de sondadores digitais. Neste

capítulo serão apresentados o conceito sobre sondadores digitais, a digissonda. Sobre esse equipamento será feita uma breve explicação a respeito do seu funcionamento, dos dados coletados e do programa de análise de dados.

2.1-Digissonda

Sondadores Digitais são radares de alta frequência que consiste de um transmissor, que envia para a ionosfera pulsos muito curtos de energia na faixa de rádio-frequência, e de um sistema receptor com antenas transmissoras e circuitos de detecção dos sinais recebidos, que registra a intensidade do pulso refletido nas camadas ionosféricas e o tempo decorrido entre a transmissão e a recepção. Ele emite pulsos de energia eletromagnética em frequências variáveis entre 0,5 a 30 MHz com potência de pico da ordem de 10 kW e potência média em torno de 500 W. Nas figuras abaixo são apresentadas fotografias das antenas de transmissão (figura 2.1 e figura 2.2) e recepção (figura 2.3 e 2.4) componentes dos sistemas de transmissão e de recepção.



Figura 2.2– Imagem de uma antena transmissora de Cachoeira Paulista – SP.
Fonte: Cortesia Pedro Daniel



Figura 2.3– Foto da antena transmissora da digissonda.
Fonte: INPE (2006)



Figura 2.4– Imagem de uma antena receptora em Cachoeira Paulista – SP
Fonte: Cortesia Pedro Daniel (2006)



Figura 2.5- Foto da antena receptora digissonda de São Luís –MA.
Fonte: INPE (2006)

2.2-Dados Coletados

Os dados coletados pela digissonda são, essencialmente, ecos do sinal refletidos pelas camadas ionosféricas. A seqüência destes ecos recebidos, organizador adequadamente, produz o um registrado gráfico denominado ionogramas (Figura 2.5).

Um ionograma é gráfico onde são escalonadas as alturas das camadas de reflexão versus a frequência do sinal que foi refletido em cada uma destas camadas. Nesta figura está representado o perfil da ionosfera em Cachoeira Paulista, no dia 14 de agosto de 2003 às 12h 45 min. Na altura inferior, aproximadamente 110 km, o gráfico mostra a região E. Nas aturas superiores, entre 200 km à 600km, está a região F, subdivida em F₁ e F₂. Este tipo de gráfico também permite distinguir certas anomalias. As bolhas de plasma, por exemplo, são caracterizadas por espalhamentos nos traços da região F (*Spread F*), conforme já foi apresentado na figura 1.21.

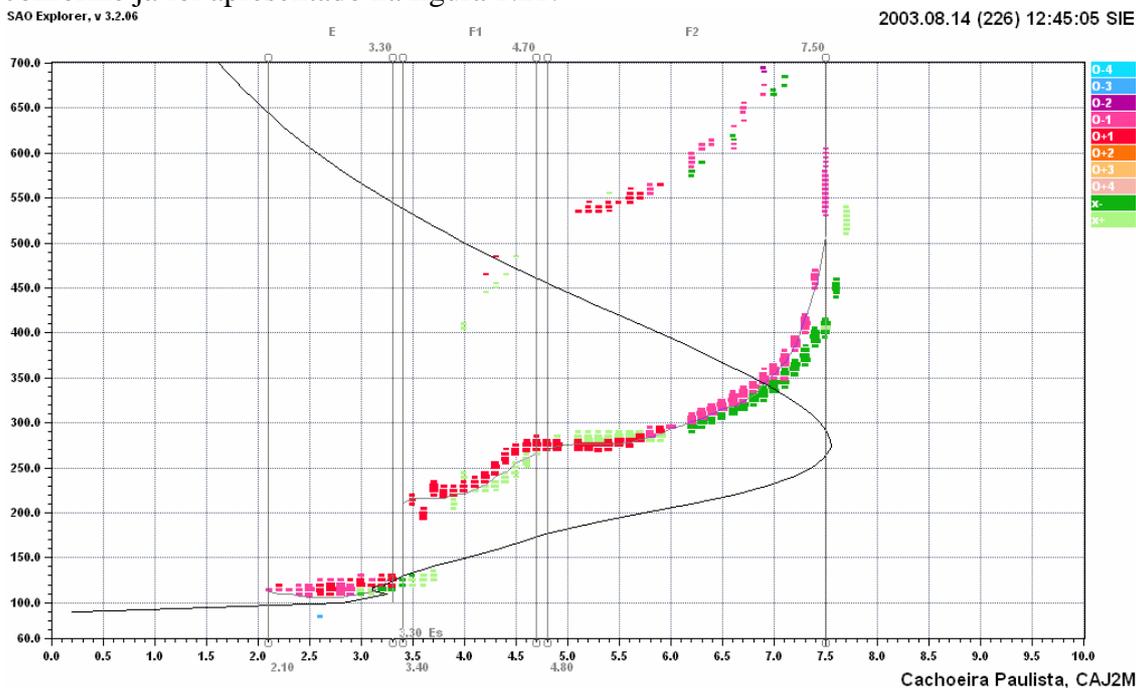


Figura 2.6 -Ilustração gráfica mostrando o perfil da ionosfera no dia 14 de agostos de 2003 em Cachoeira Paulista- SP às 12:45 UT.

As alturas mostradas neste ionograma são alturas, ditas virtuais. A altura virtual (h_v) é obtida medindo-se o tempo de viagem do sinal, considerando de uma onda propagando-se com a velocidade para velocidade da luz no vácuo, dado pela equação 4.

$$h_v(f) = \frac{\tau(f)c}{2} \quad (4)$$

2.3-Programa de Análise

O programa de análise utilizado é o *SAO-Explorer* (SAO-X) mostrado na figura 2.7. Este programa é o responsável pela interpretação dos sinais recebidos pelos sistemas receptores e sua posterior organização em forma de ionogramas, doravante denominados dados brutos. Os dados brutos que o grupo de pesquisas em ionosfera da nossa divisão possui estão arquivados em dois formatos básicos. Os dados mais antigos

estão encriptados no formato denominado TAP. Este formato contém, além dos dados básicos, a informação da interpretação automática feita pelo programa *Artist*. Modernamente, os dados brutos são encriptados no formato denominado GRM. Neste formato, a interpretação automática é gravada em um arquivo em separado dos dados brutos. Alguns dos parâmetros ionosféricos fornecidos pelo programa *Artist* a partir do ionograma, os quais são usados para neste projeto estão listados a seguir:

- foF1 frequência crítica da onda ordinária da camada F1;
- foF2 frequência crítica da camada F2. É a frequência máxima de reflexão da onda eletromagnética na ionosfera;
- h'F altura virtual mínima da camada F: este parâmetro representa a altura da base da camada F da ionosfera, sem levar em conta o atraso de propagação da luz no meio magneto iônico, e é obtido através de leitura direta nos ionogramas;
- h'F2 altura virtual mínima do traço ordinário da camada estável mais alta na região F;
- hmF2 altura do pico da camada F.

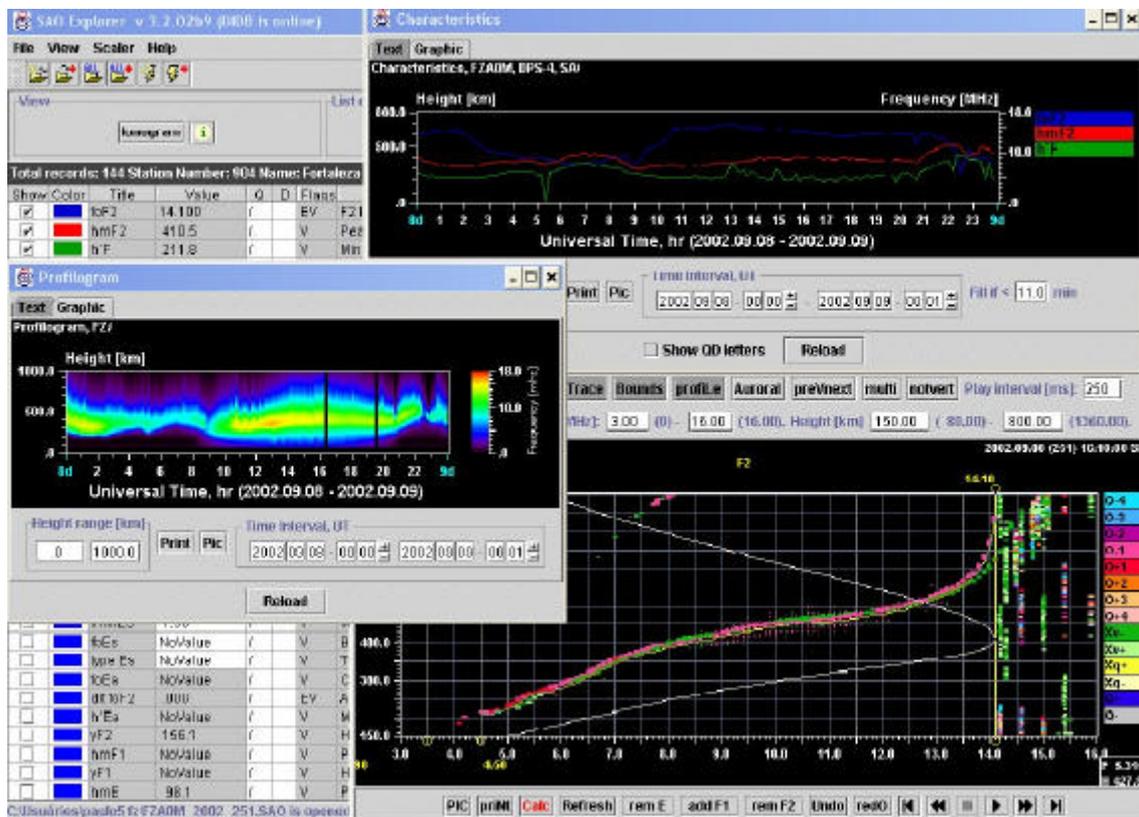


Figura 2.7- Ilustração do programa SAO Explorer onde são visualizadas as diversas telas para manipulação e visualização dos ionogramas e parâmetros ionosféricos.

3-Atividades de Processamento e Redução de Dados

Neste capítulo vamos apresentar as atividades de coleta e redução de dados selecionados para o estudo proposto neste projeto. Serão expostas a metodologia de classificação dos dados, os processamentos dos dados brutos de duas estações de digissondas, e as atividades complementares de formação da bolsista.

3.1-Classificação dos Dias Selecionados

Para o presente trabalho os dias selecionados para o período de estudo foram classificados de acordo com atividade magnética e também de acordo as estações do ano. Com relação à atividade magnética os dias selecionados foram separados entre dias de atividade magnética calma e dias de atividade magnética perturbada. Para esta classificação foi escolhido o índice K_p . Quando o índice K_p atingiu o nível maior que 3^+ durante qualquer hora do dia em questão, este dia foi classificado como perturbado. Em caso contrário, o dia foi classificado como calmo. A descrição do índice K_p e de outros índices de atividade magnética foi discutida em seção apropriada do capítulo 1 deste relatório.

Já com relação as estações do ano, os dados foram agrupados em sub-conjuntos contendo dados referentes aos períodos em torno dos solstícios e dos equinócios. Por exemplo, os dias que antecedem e sucedem o solstício de verão foram todos agrupados num sub-conjunto denominado “solstício de verão” para efeito de análise sazonal. O mesmo ocorreu com todos os demais sub-grupos.

Para esclarecimento, entende-se por equinócios a época do ano em que o ponto subsolar se localiza afastado do equador, ou seja, a projeção do Sol na Terra se dá atinge os trópicos de Câncer ou Capricórnio. Solstício refere-se ao momento em que o ponto subsolar atinge exatamente o equador terrestre, o que corresponde ao instante em que os dois hemisférios estão igualmente iluminados. A figura 3.1 mostra as posições da Terra em sua órbita em torno do Sol, onde podemos visualizar os dias onde ocorrem os solstícios e equinócios.

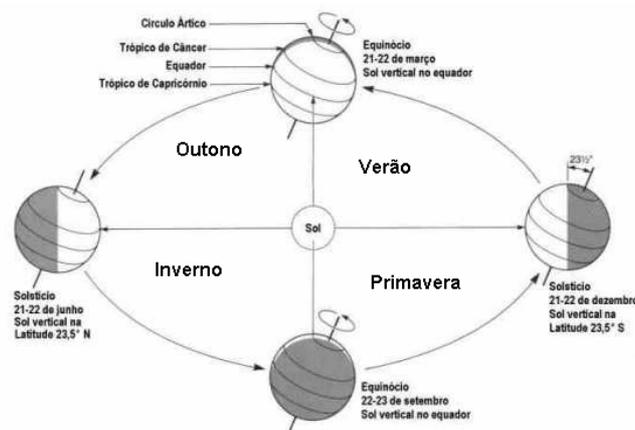


Figura 3.1 –Imagem mostrando os solstícios e equinócios para a divisão dos dias trabalhados na redução de dados.

Fonte: Prof. Alice Marlene Grimm

Com base nestes critérios de classificação de acordo com atividade magnética e de acordo as estações os dias selecionados para análise são apresentados na tabelas 3.1 e 3.2. A tabela 3.1 apresenta os dias selecionados para análise, classificados de acordo com atividade magnética e de acordo as estações, para o sítio de São Luís, no Maranhão.

Tabela 3.1 Dias selecionados para análise, classificados de acordo com atividade magnética e de acordo as estações, para São Luís – MA (2°31' S, 44°16' O)

Condição	Estação	Meses	Dias
Calma	Solstício de Verão	Novembro Dezembro	19 16,17,18,19,23,26
	Solstício de Inverno	Maio Agosto Outubro	20 04,05 23
	Equinócio de Primavera	Agosto Setembro	14,15,27 15
	Equinócio de Outono	Fevereiro Março	17,24,25 24,25,26
Perturbada	Solstício de Verão	Novembro Janeiro	10,11,12,13,14,17,18,20,21 20,21,22,23,24,27,28,29,30,31
	Solstício de Inverno	Maio Junho Agosto	26,27
	Equinócio de Primavera	Outubro	16,17,20,21,22,24
	Equinócio de Outono	Fevereiro Março	18,19,20,21,26,27,28 17,27,28,31

A tabela 3.2 apresenta os dias selecionados para análise, classificados de acordo com atividade magnética e de acordo as estações, para o sítio de Cachoeira Paulista, SP.

Tabela 3.2 Dias selecionados para análise, classificados de acordo com atividade magnética e de acordo as estações, para Cachoeira Paulista – SP (22° 39' S, 45° 00' O)

Condição	Estação	Meses	Dias
Calma	Solstício de Verão	Novembro Dezembro	17,18
	Solstício de Inverno	Maio Agosto Outubro	04,05
	Equinócio de Primavera	Agosto Setembro	14,15,27 15
	Equinócio de Outono	Fevereiro Março	17,24,25 24,25,26
Perturbada	Solstício de Verão	Novembro Janeiro	10,11
	Solstício de Inverno	Maio Junho Agosto	26,27
	Equinócio de Primavera	Outubro	16,17
	Equinócio de Outono	Fevereiro Março	20,21 17

3.1.2-Seleção dos Dados Reduzidos pela Bolsista

Com base na seleção apresentada acima, foi iniciado um estudo comparativo os dados de digissonda coletados nas estações de São Luís - MA (2° 31' S, 44° 16' O) e Cachoeira Paulista – SP (22° 39' S, 45° 00' O), do ano de 2003. A bolsista reduziu efetivamente vários dias dos equinócios das duas estações para este estudo comparativo, os quais são sumarizados nas tabelas 3.3 e 3.4. A tabela 3.3 apresenta os dias efetivamente reduzidos pela bolsista, classificados de acordo com atividade magnética e de acordo as estações, para o sítio de São Luís, no Maranhão.

Tabela 3.3 Dias efetivamente reduzidos pela bolsista, classificados de acordo com atividade magnética e de acordo as estações, para São Luís – MA (2°31' S, 44°16' O)

Condição	Estação	Meses	Dias
Calmo	Equinócio de Primavera	Agosto Setembro	14,15,27 15
	Equinócio de Outono	Fevereiro Março	17,24,25 24,25,26
Perturbado	Equinócio de Outono	Março	17

A tabela 3.4 apresenta os dias efetivamente reduzidos pela bolsista, classificados de acordo com atividade magnética e de acordo as estações, para o sítio de Cachoeira Paulista, em São Paulo.

Tabela 3.4 Dias efetivamente reduzidos pela bolsista, classificados de acordo com atividade magnética e de acordo as estações, para Cachoeira Paulista – SP (22° 39' S, 45° 00' O)

Condição	Estação	Meses	Dias
Calmo	Equinócio de Primavera	Agosto Setembro	14,15,27 15
	Equinócio de Outono	Fevereiro Março	17,24,25 24,25,26
Perturbado	Equinócio de Outono	Março	17

3.1.3-Resultados do Processamento dos Dados Reduzidos

A partir da seleção destes dias apresentados nas tabelas 3.1 e 3.2, os dias efetivamente reduzidos (tabela 3.3. e 3.4) foram processados pela bolsista. Utilizando-se o software SAO-X, apresentado no capítulo 2, a bolsista redefiniu os parâmetros ionosféricos, tais como, o foF_1 , foF_2 , $h'F_1$, $h'F_2$, hmF_2 (também apresentado no capítulo 2) para obter o perfil ionosférico. Para cada dia de análise esta atividade envolveu o processamento de ionogramas em intervalos de 15 min.

Como resultado desta atividade de processamento dos dados foram obtidas imagens gráficas, os ionogramas, sobrepostos pelos perfis ionosféricos. A seguir, apresentamos uma seqüência de figuras (3.2 a 3.22) contendo diversos ionogramas para os dias efetivamente reduzidos pela bolsista do ano de 2003.

Survey, SAO Explorer, v 3.2.06

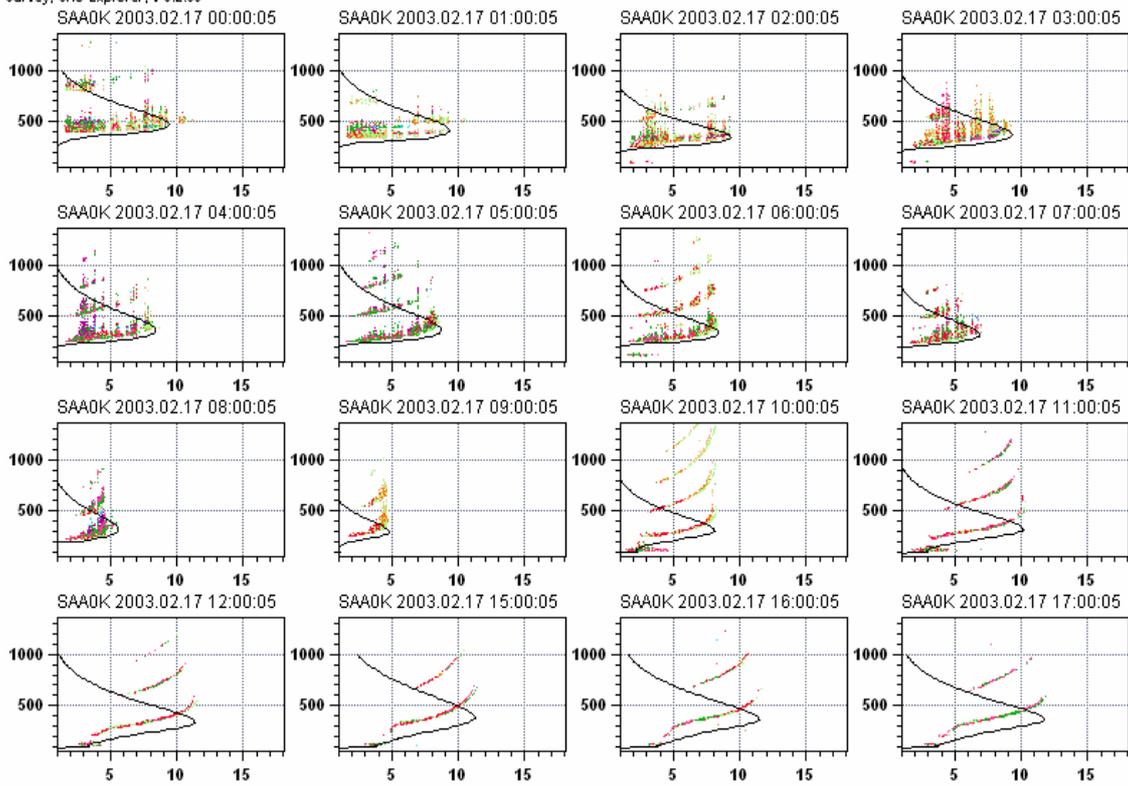


Figura 3.2 - Série de ionogramas obtidos no dia 17 de fevereiro de 2003 no sítio de São Luís - MA.

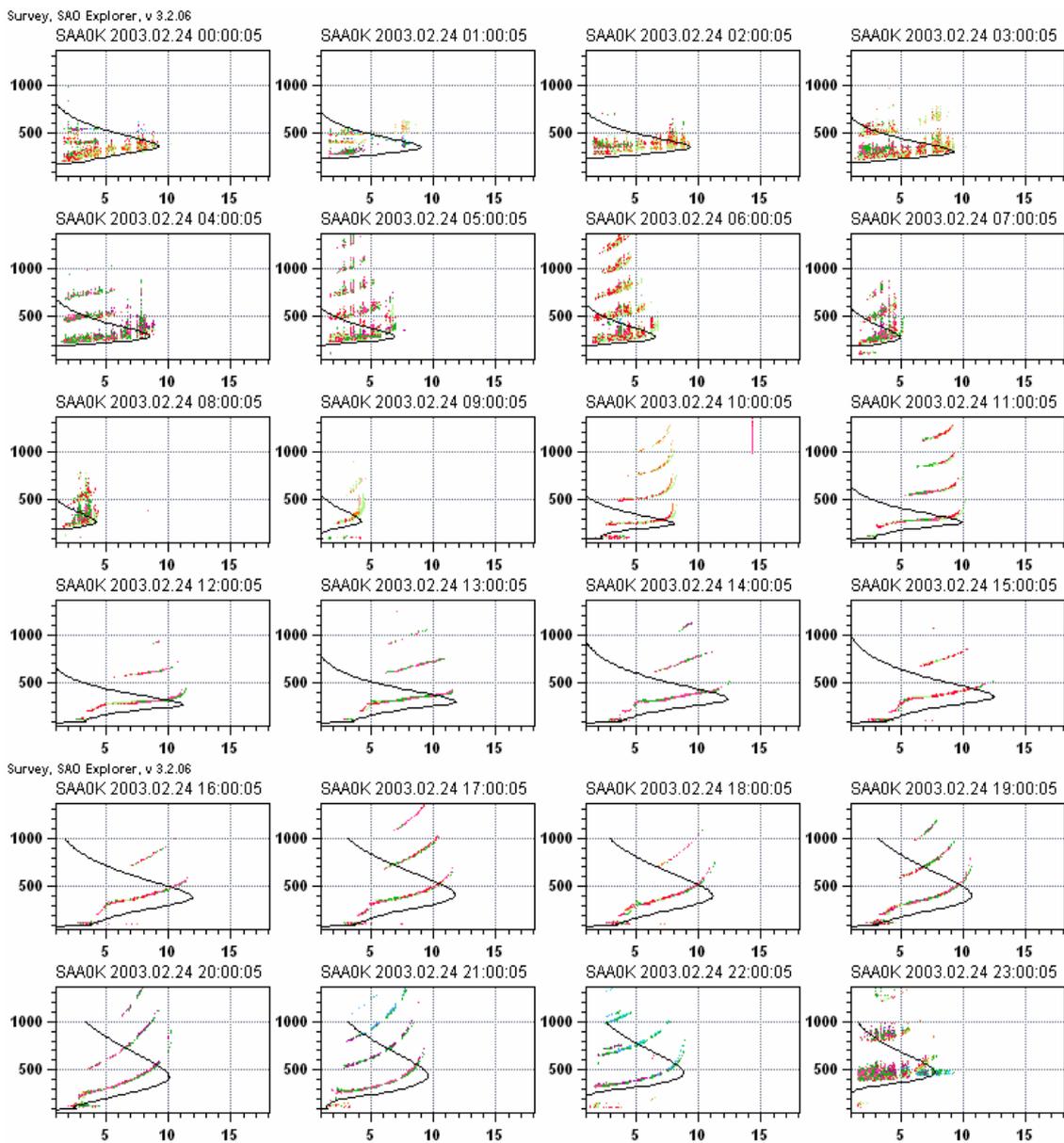


Figura 3.3 - Série de ionogramas obtidos no dia 24 de fevereiro de 2003 no sítio de São Luís – MA

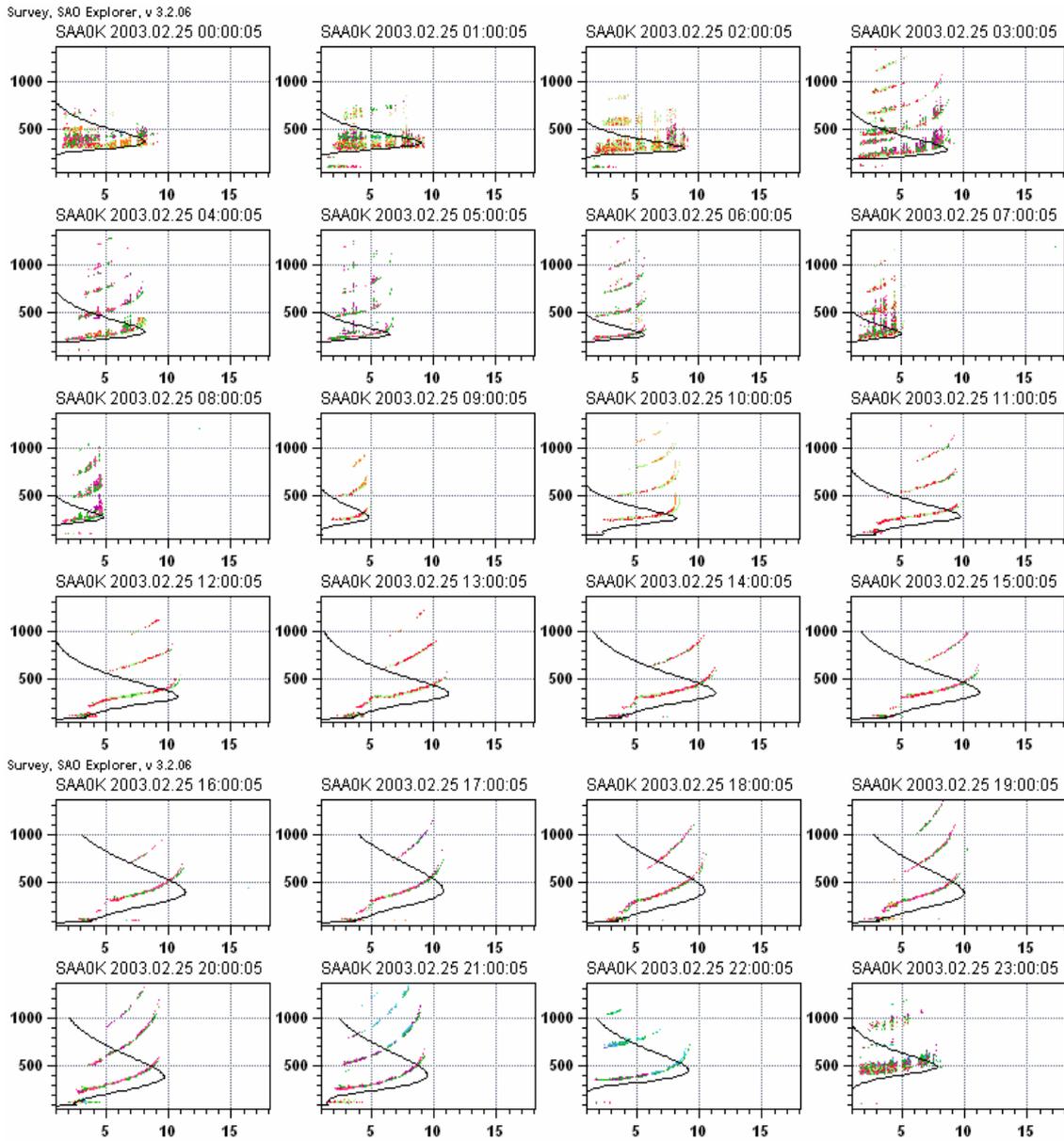


Figura 3.4 - Série de ionogramas obtidos no dia 25 de fevereiro de 2003 no sítio de São Luís – MA.

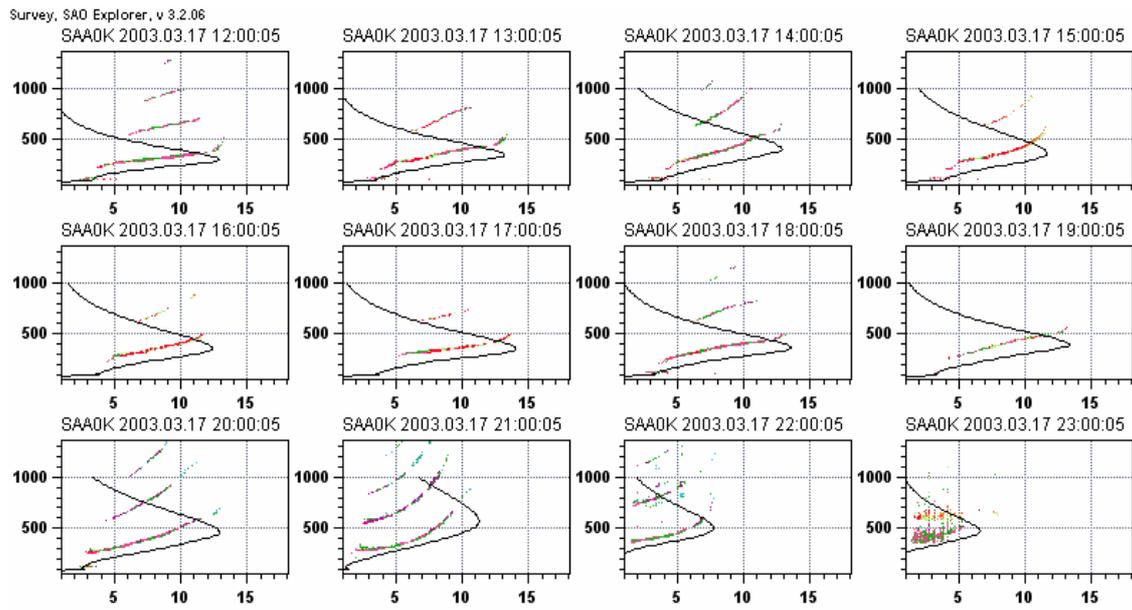


Figura 3.5- Série de ionogramas obtidos no dia 17 de março de 2003 no sítio de São Luís – MA.

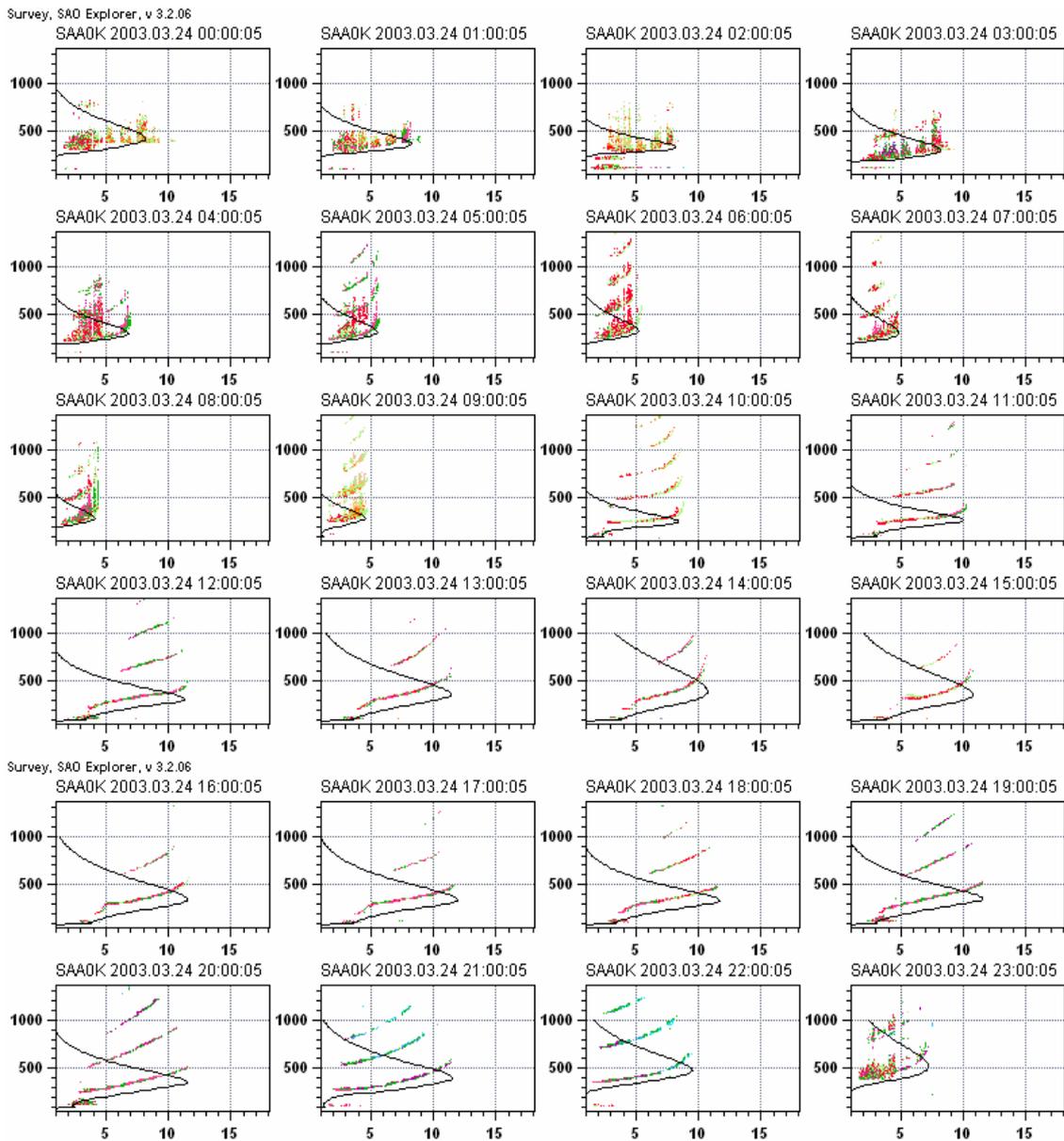


Figura 3.6 - Série de ionogramas obtidos no dia 24 de março de 2003 no sítio de São Luís – MA.

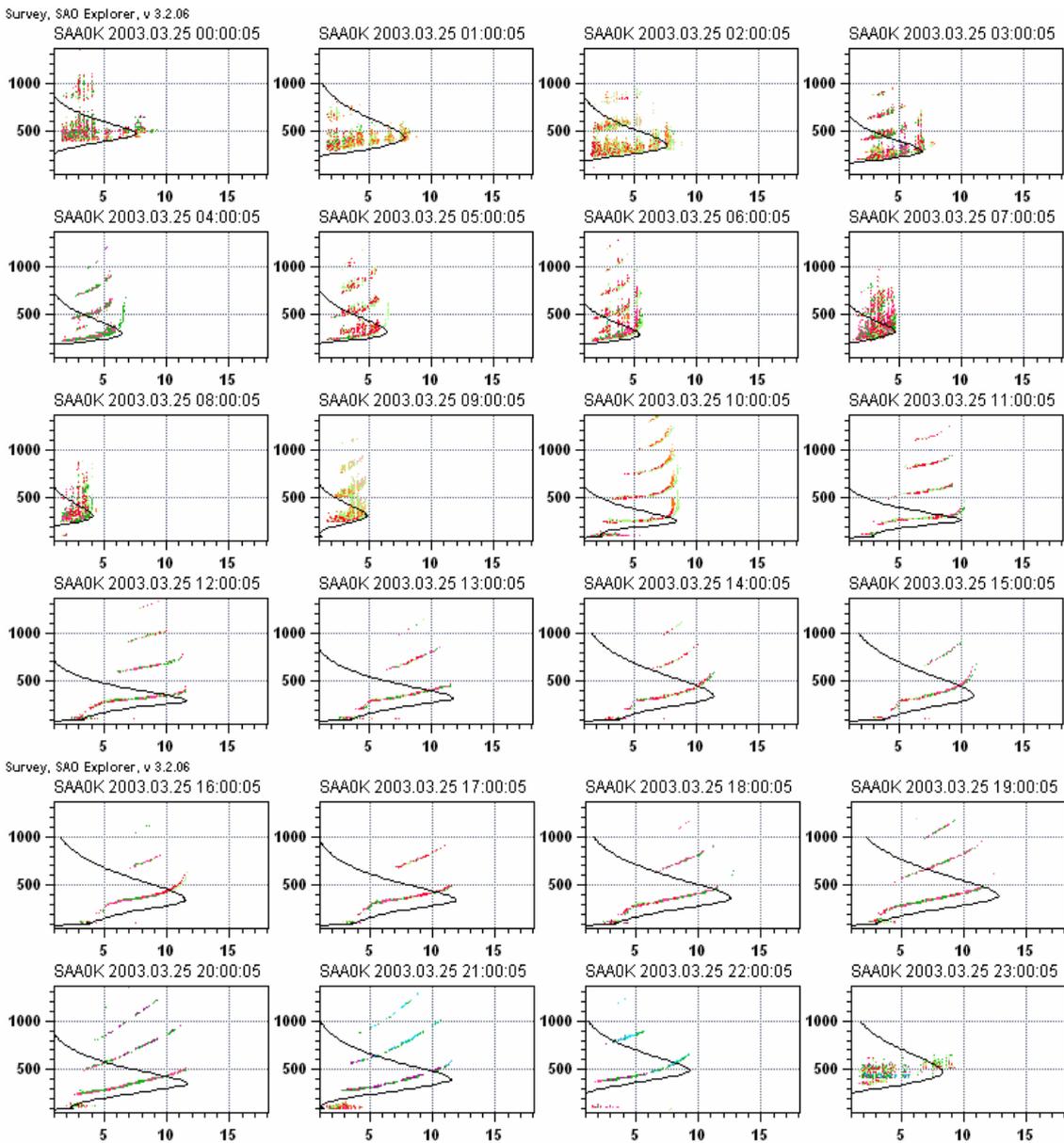


Figura 3.7 - Série de ionogramas obtidos no dia 25 de março de 2003 no sítio de São Luís – MA.

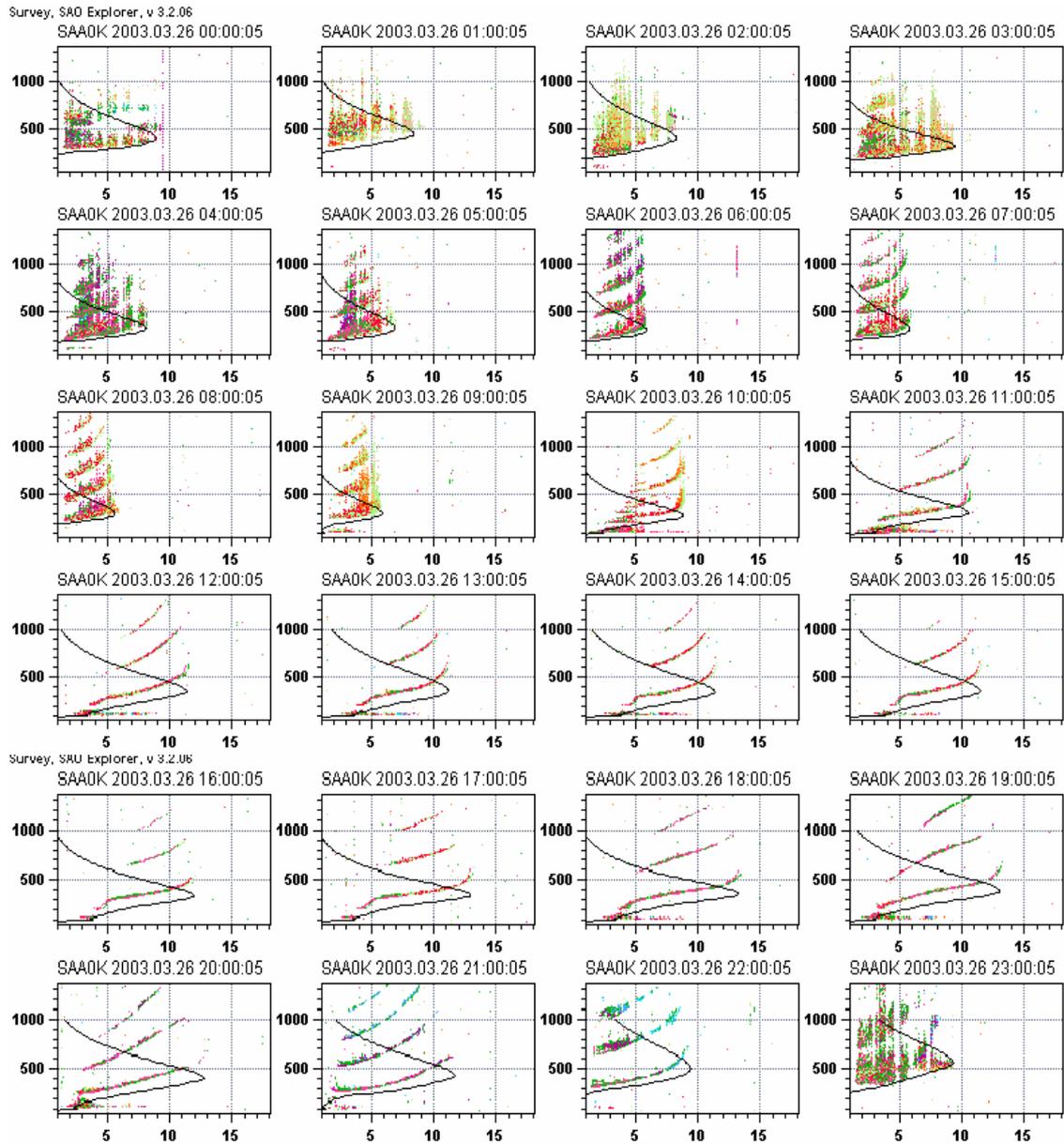


Figura 3.8 - Série de ionogramas obtidos no dia 26 de março de 2003 no sítio de São Luís – MA.

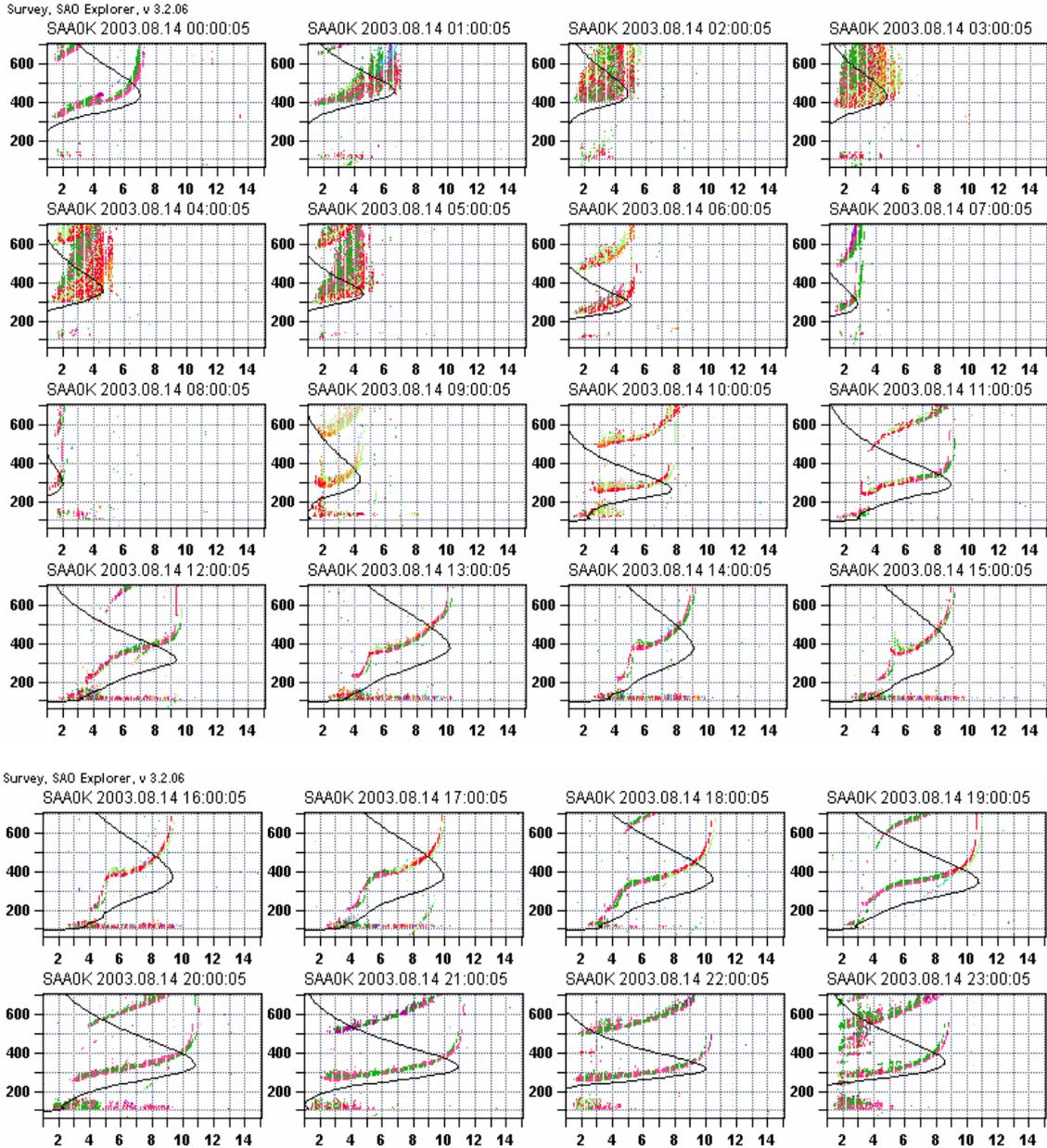


Figura 3.9 - Série de ionogramas obtidos no dia 14 de março de 2003 no sítio de São Luís - MA.

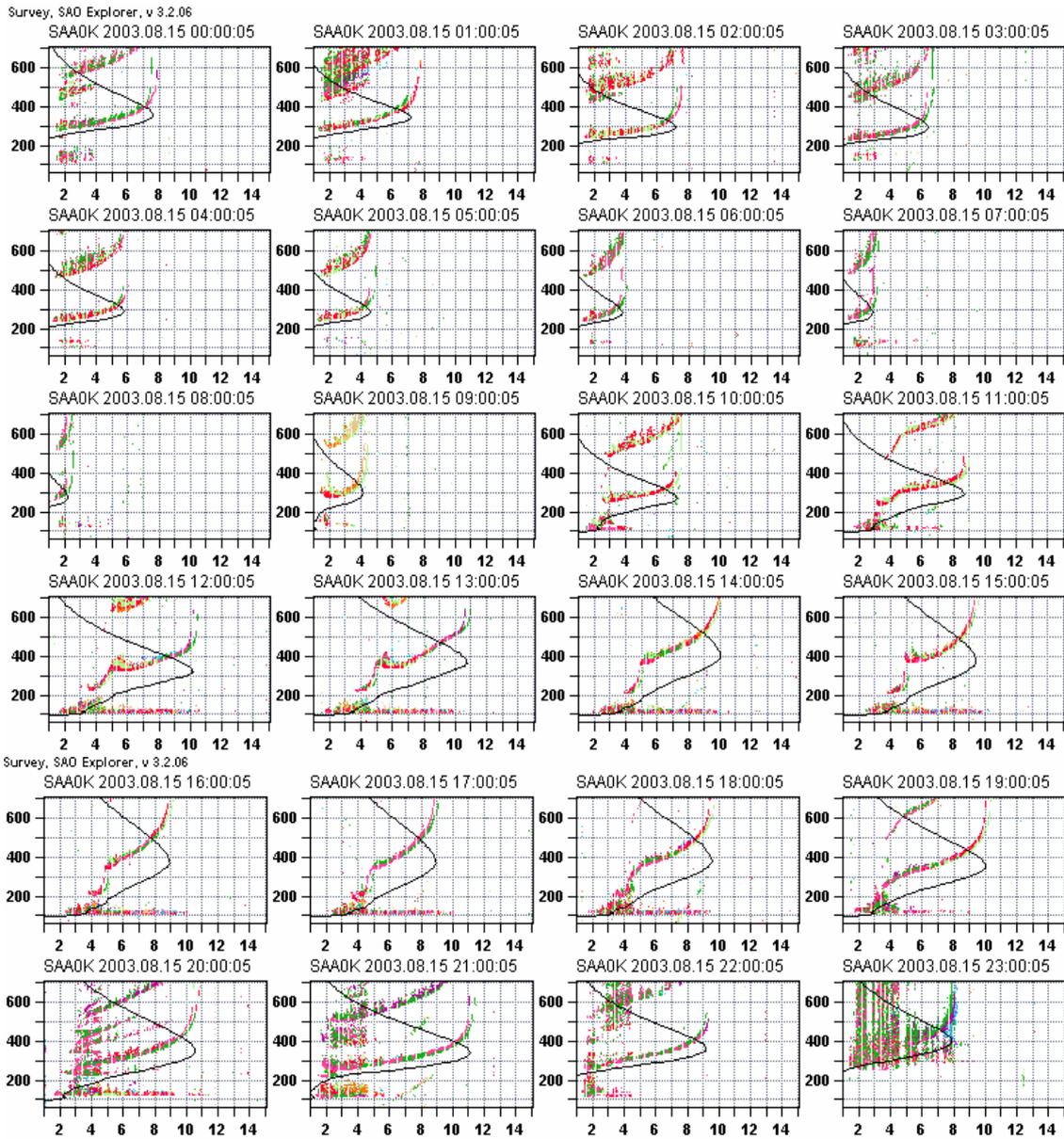


Figura 3.10 - Série de ionogramas obtidos no dia 15 de agosto de 2003 no sítio de São Luís – MA.

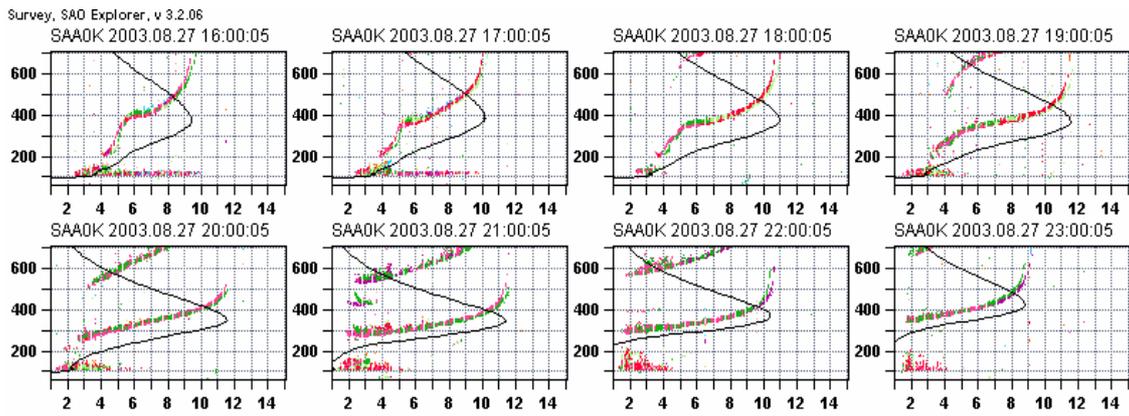


Figura 3.11- Série de ionogramas obtidos no dia 27 de agosto de 2003 no sítio de São Luís – MA.

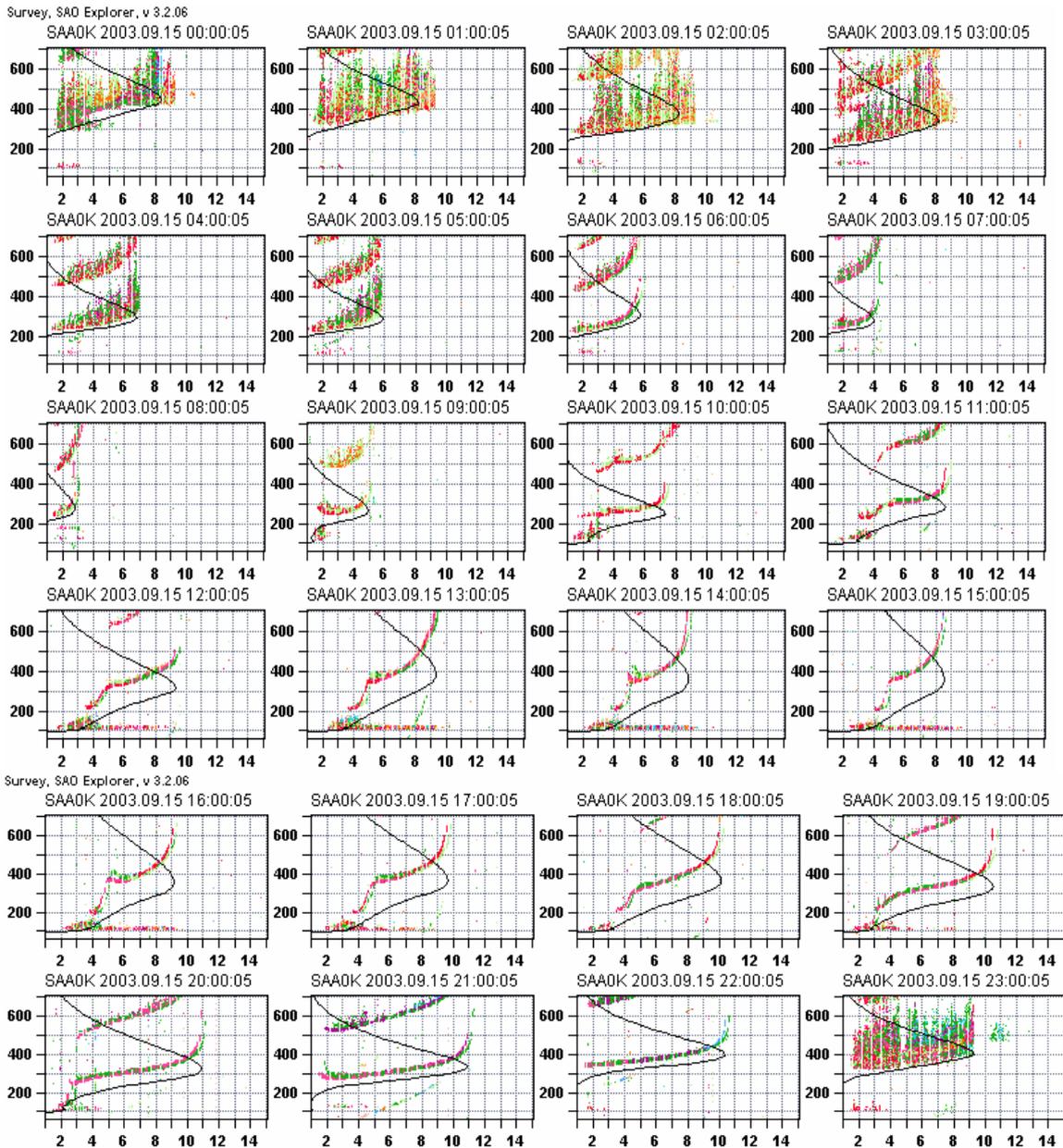


Figura 3.12 - Série de ionogramas obtidos no dia 15 de setembro de 2003 no sítio de São Luís – MA.

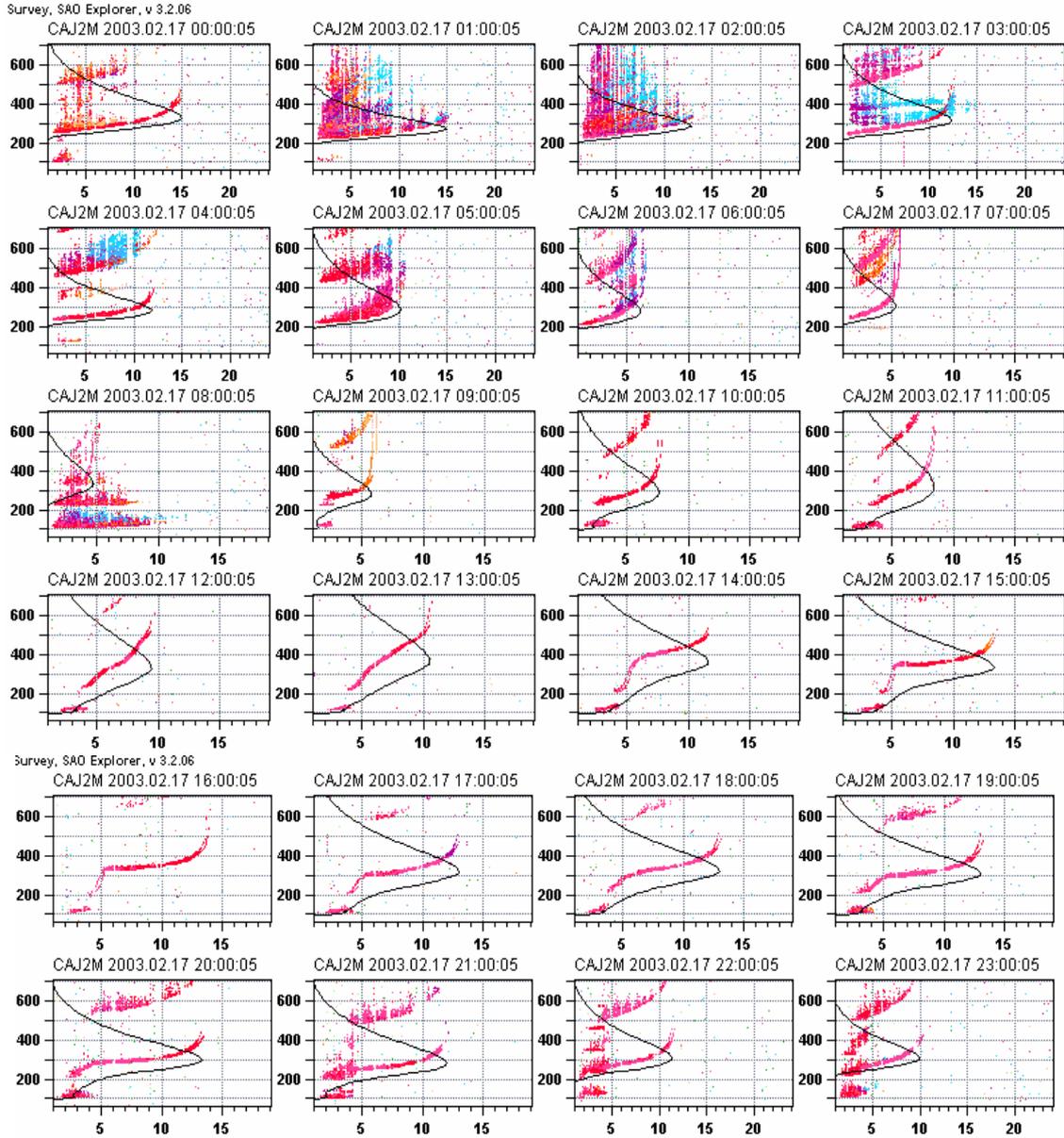


Figura 3.13 -Série de ionogramas obtidos no dia 17 de fevereiro de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista - SP

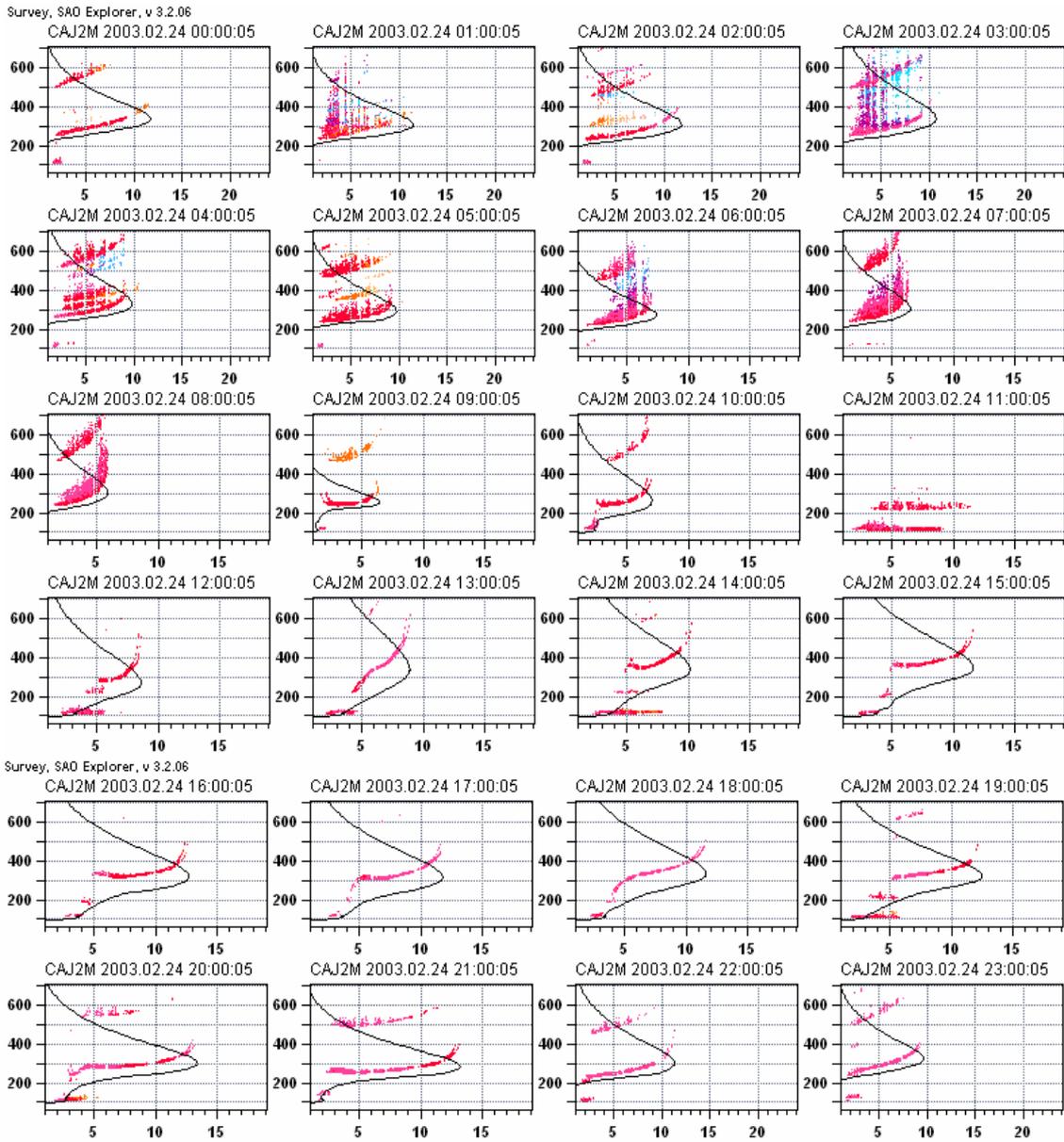


Figura 3.14-Série de ionogramas obtidos no dia 24 de fevereiro de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista-SP.

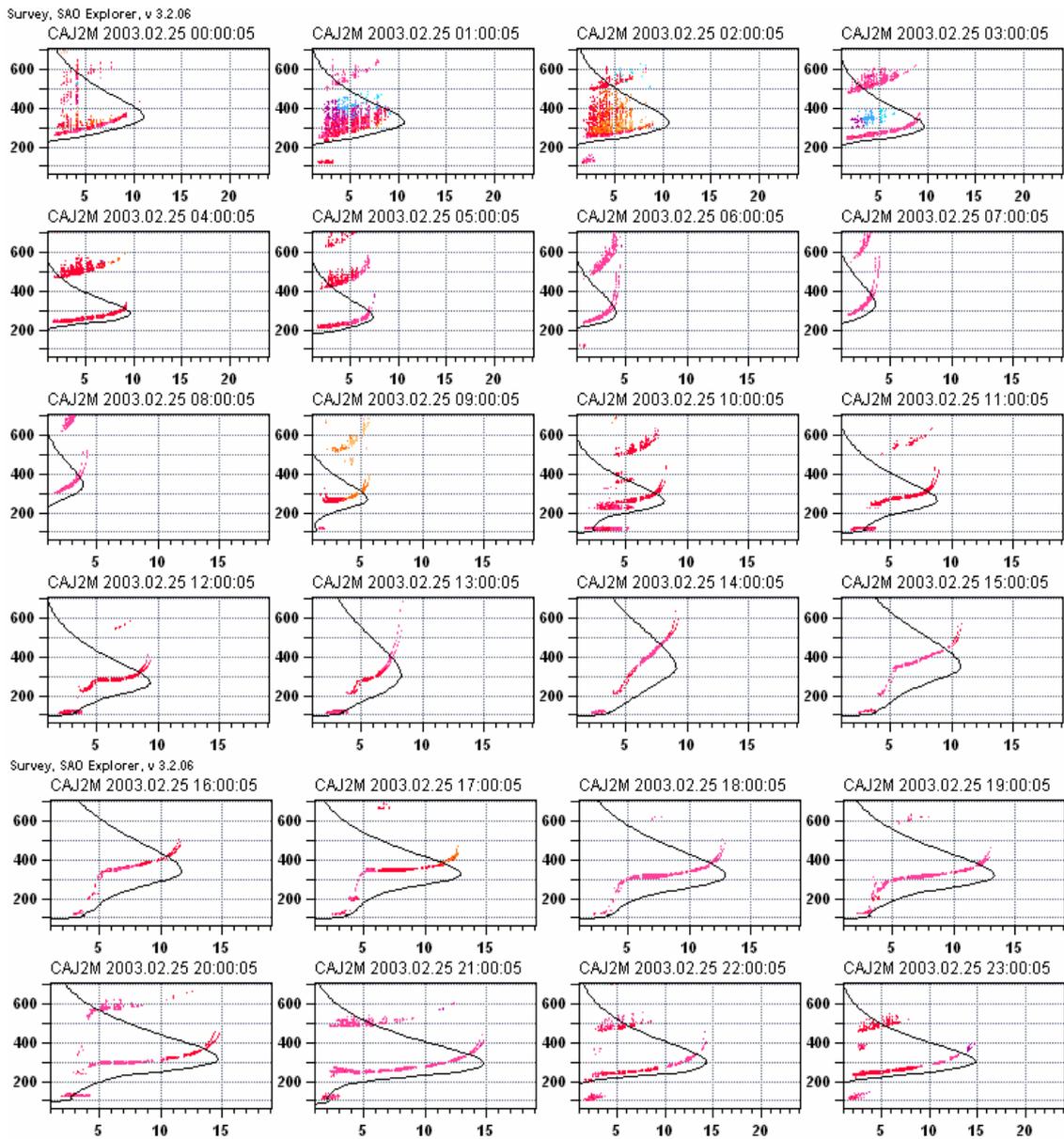


Figura 3.15-Série de ionogramas obtidos no dia 25 de fevereiro de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista-SP.

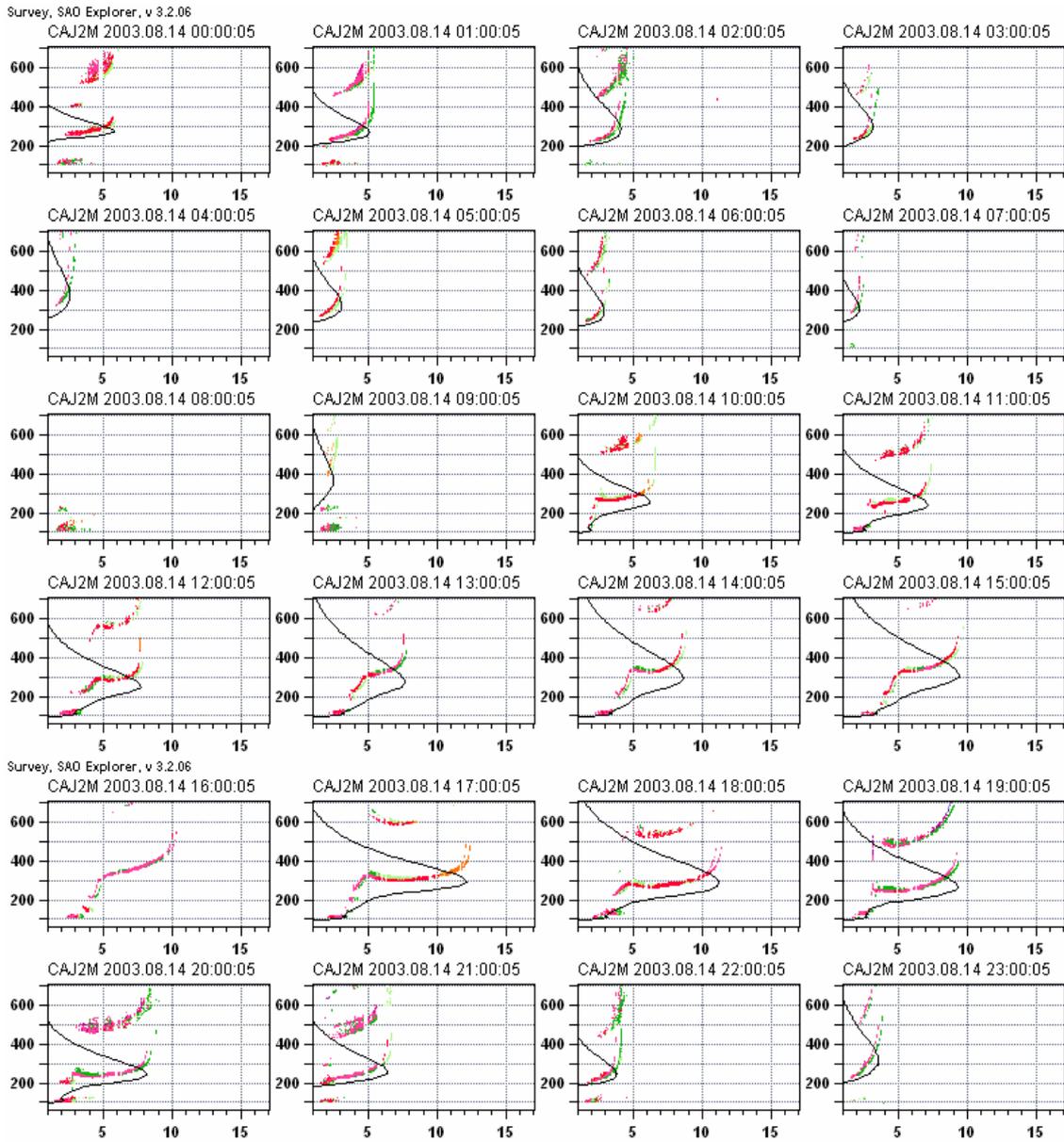


Figura 3.16- Série de ionogramas obtidos no dia 14 de março de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista-SP.

Survey, SAO Explorer, v 3.2.06

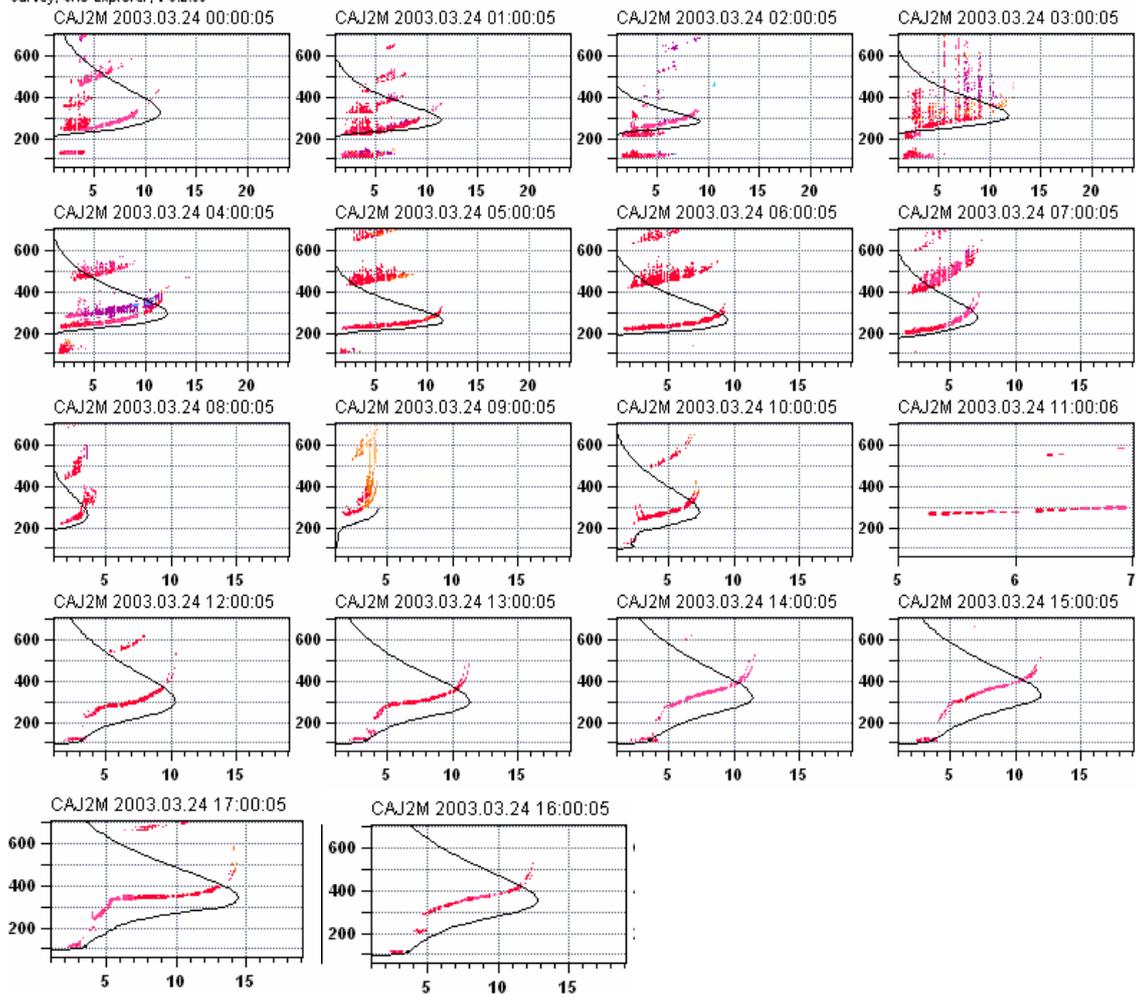


Figura 3.17- Série de ionogramas obtidos no dia 24 de março de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista-SP.

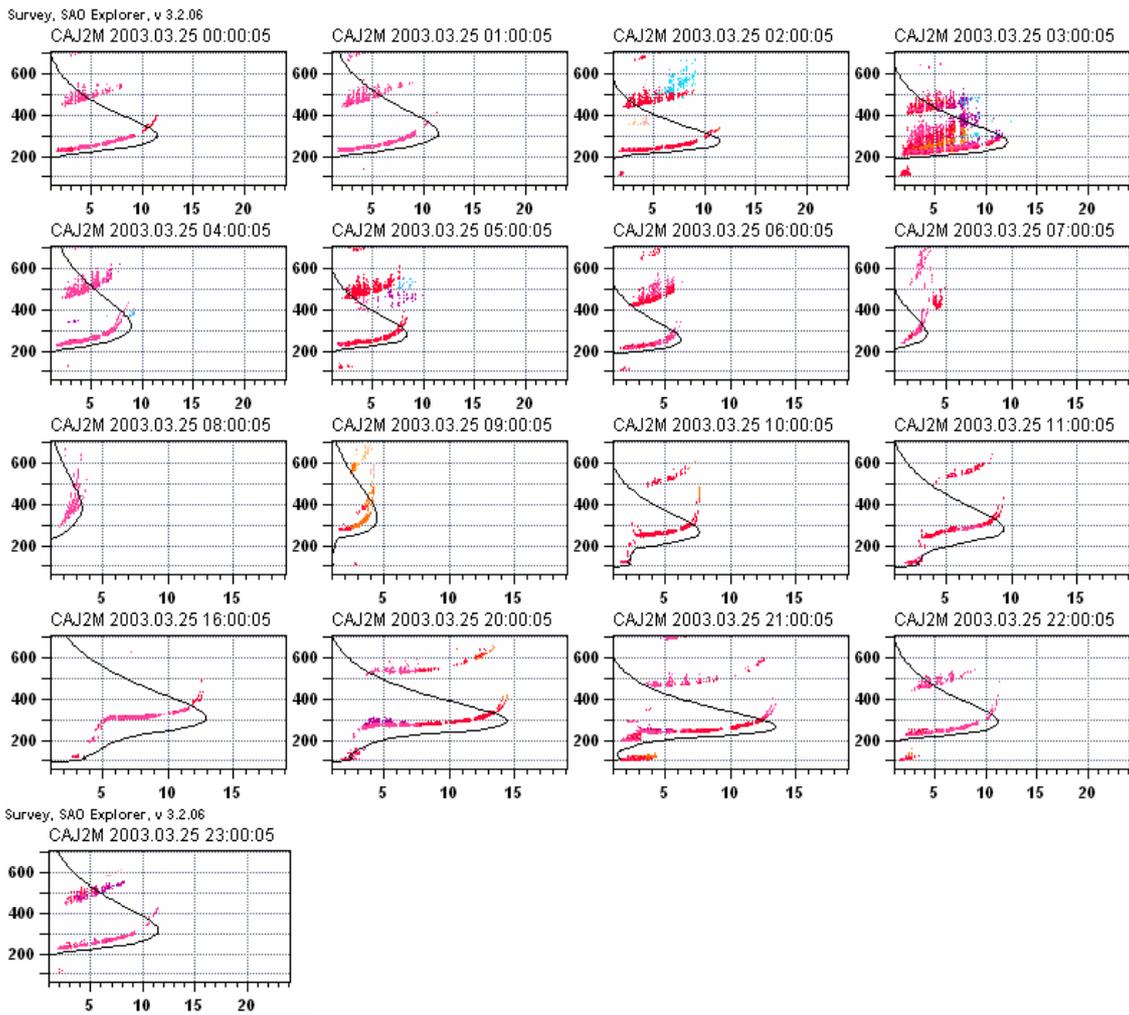


Figura 3.18- Série de ionogramas obtidos no dia 25 de março de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista-SP.

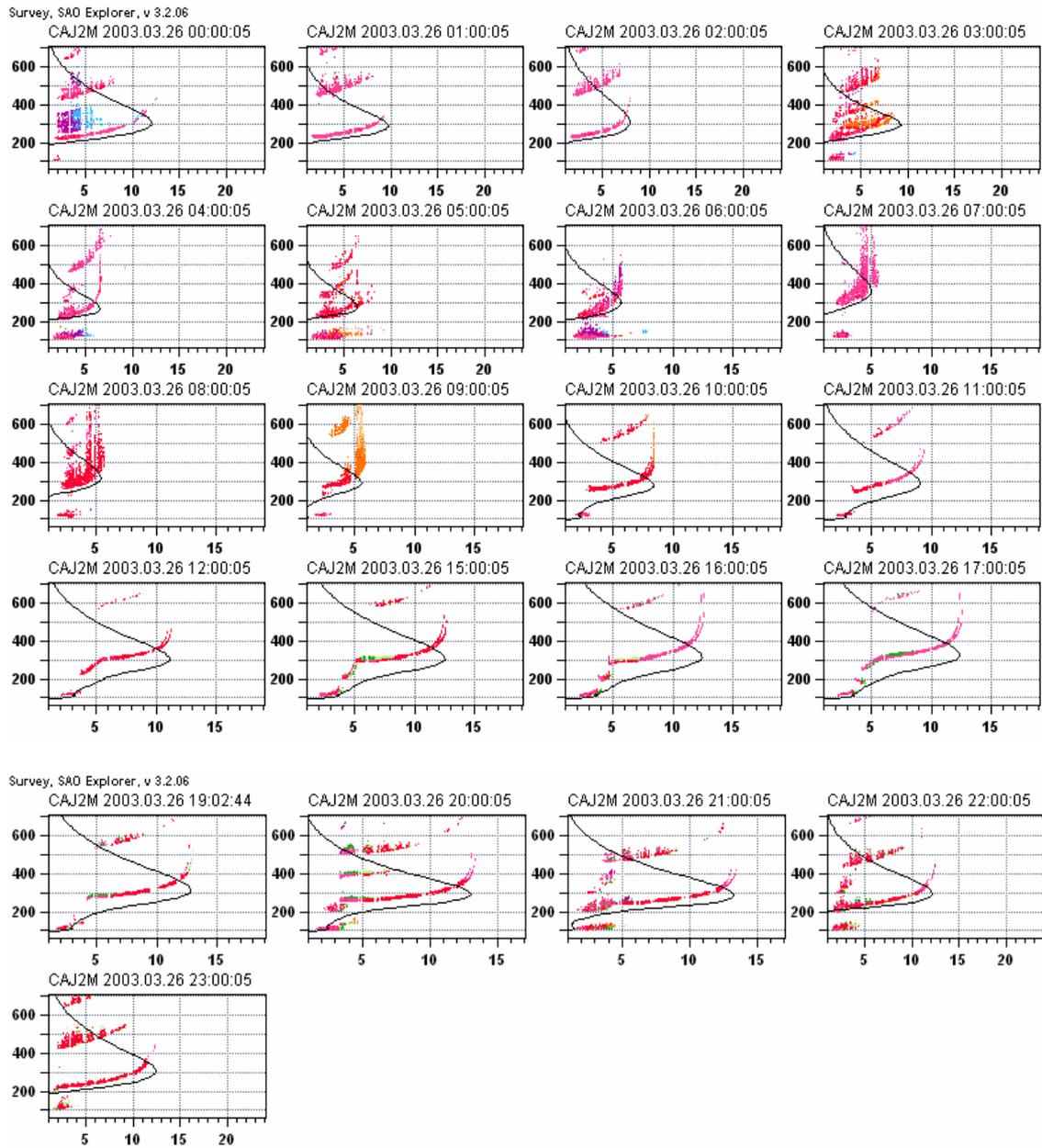


Figura 3.19- Série de ionogramas obtidos no dia 26 de março de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista-SP.

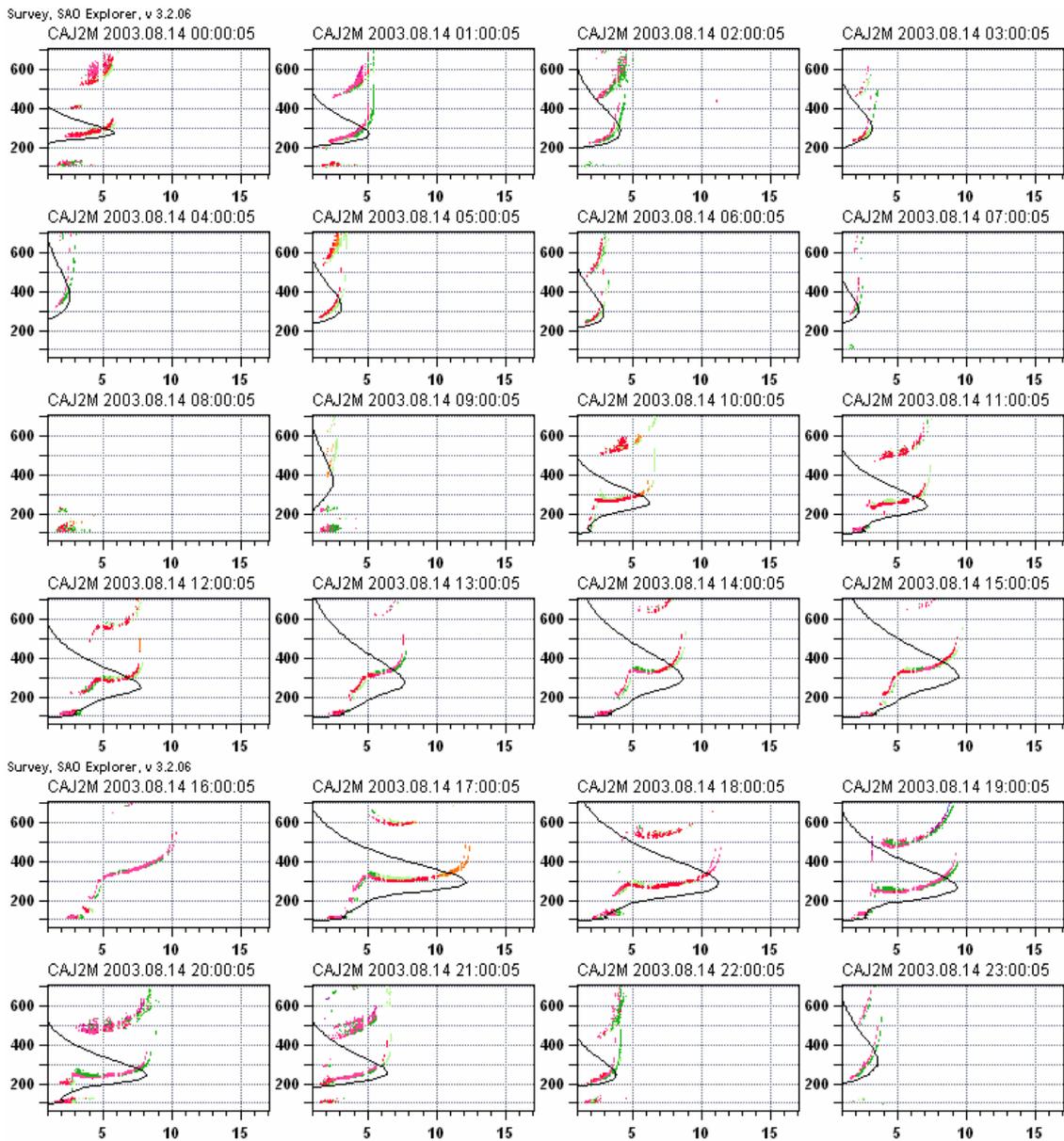


Figura 3.20- Série de ionogramas obtidos no dia 14 de agosto de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista-SP.

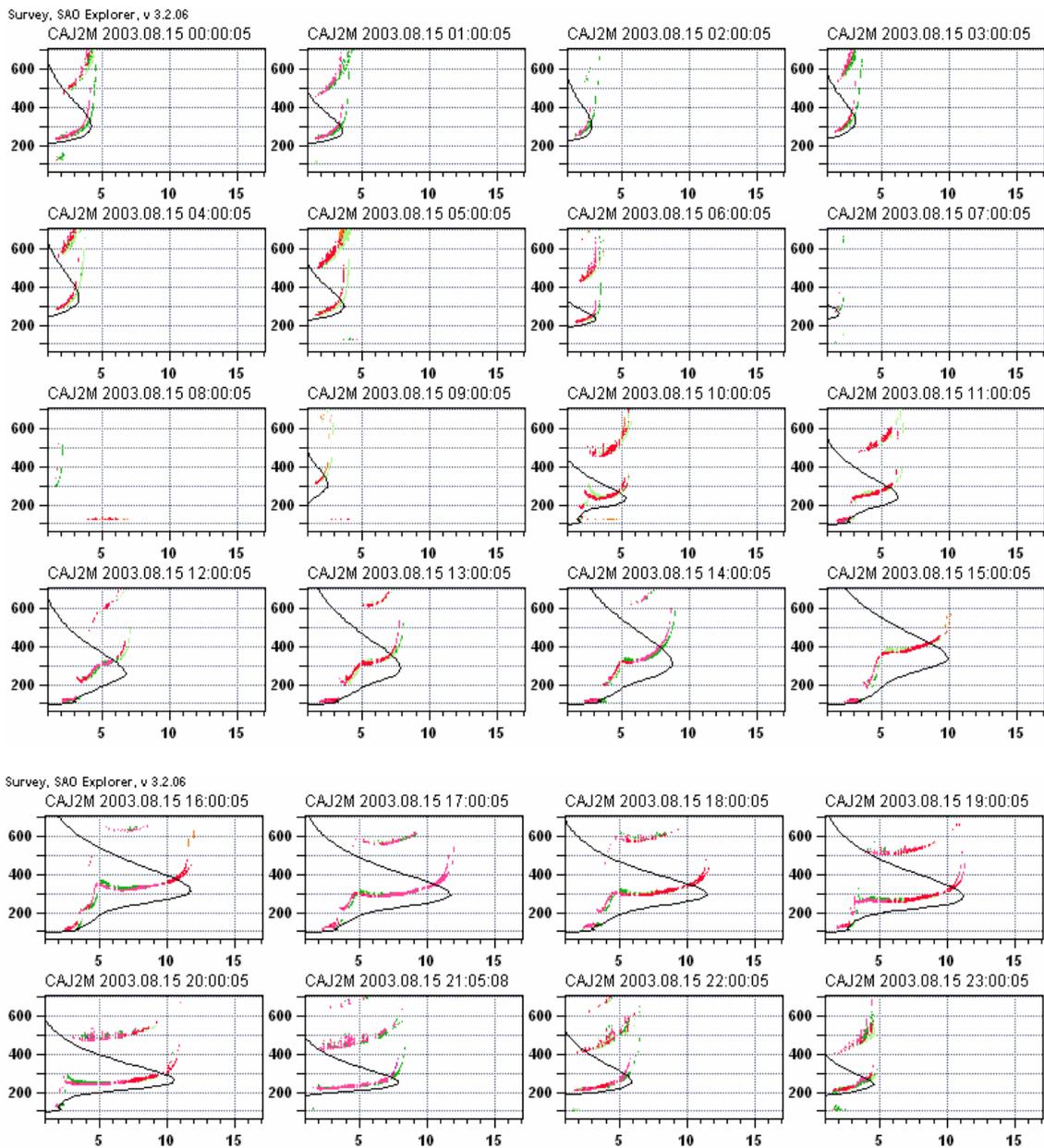


Figura 3.21- Série de ionogramas obtidos no dia 15 de agosto de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista-SP.

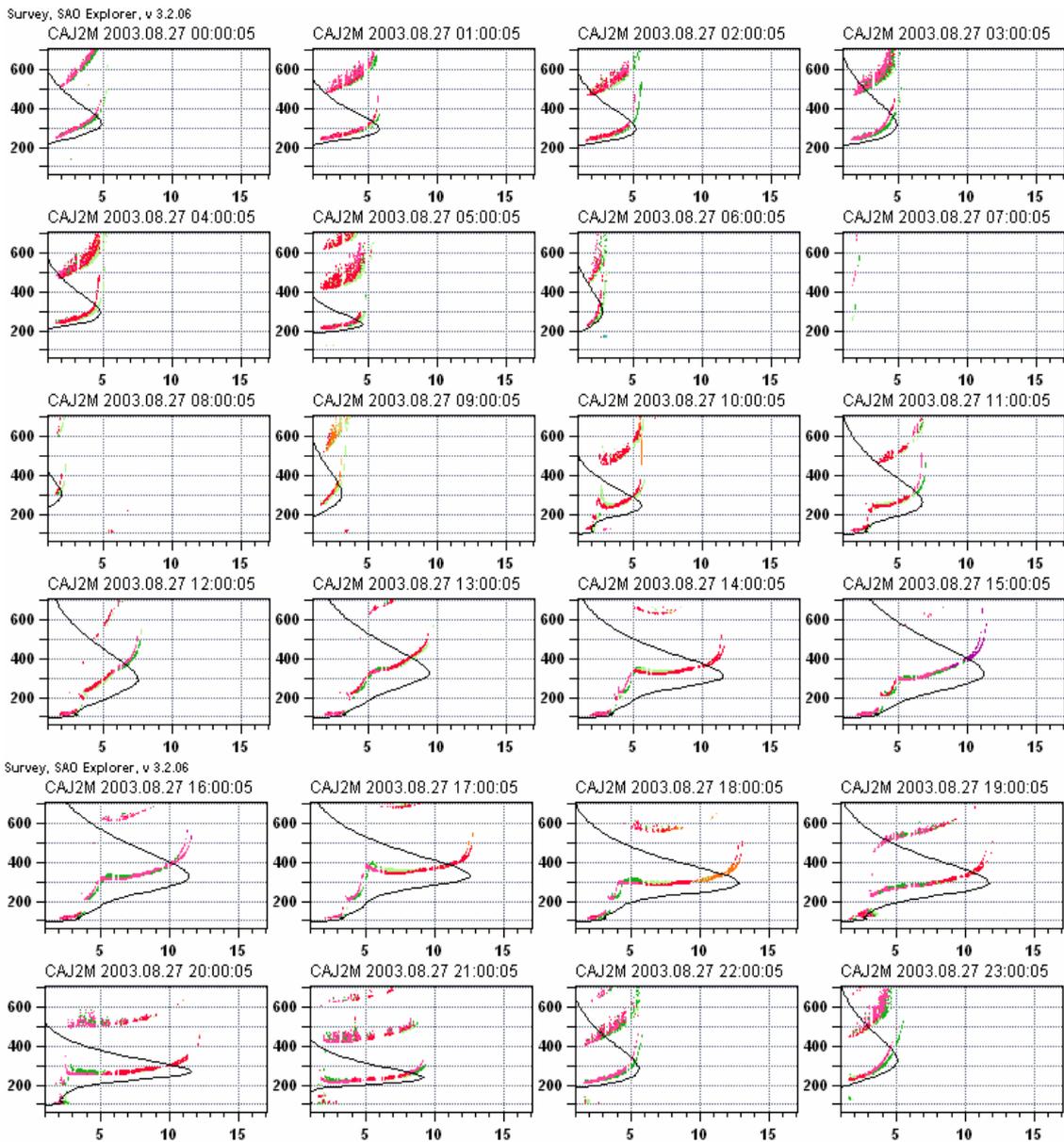


Figura 3.22- Série de ionogramas obtidos no dia 27 de agosto de 2003 no sítio de Cachoeira Paulista-SP.

3.1.4-Atividades de Formação Completar

Aqui serão apresentadas as atividades complementares referentes ao assunto deste trabalho. Essas atividades têm como objetivo o desenvolvimento pessoal e profissional da bolsista e foram desenvolvidas no período a que se refere este relatório:

1 –Título: Sistema de GPS para o desenvolvimento das cintilações

Local: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Ministrante: Dr. Mangalathayil Ali Abdu

Período: 24 de abril de 2006

Carga horária: 2 horas

2- Título: Ionosfera

Local: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

Ministrante: Dra. Inês Staciari Batista

Período 05 de maio de 2006

Carga horária: 1 hora.

4-Análise dos Dados Reduzidos

Neste capítulo apresentaremos o estudo realizado com os dados reduzidos pela bolsista, onde também foram incluídos dados reduzidos pelos colaboradores do projeto. Nesta fase do projeto, este estudo compreendeu uma análise sazonal e baseada na atividade magnética da variação dos parâmetros ionosféricos da região F de São Luís - MA ($2^{\circ}31' S$, $44^{\circ}16' O$) em comparação com os mesmos parâmetros da região de Cachoeira Paulista – SP ($22^{\circ} 39' S$, $45^{\circ} 00' O$). Estes parâmetros ionosféricos e a classificação dos dias de acordo com a estação do ano e a atividade magnética foram discutidos nos capítulos anteriores.

4.1.1-Resultados das Análises dos Dados de São Luís

Nos gráficos da figura 4.1 apresentamos os gráficos comparativos da frequência crítica média (foF2) nas condições de calmos e perturbados para a região de São Luís-MA. Foram originados gráficos de das estações de solstício de verão, solstício de inverno e dos equinócios.

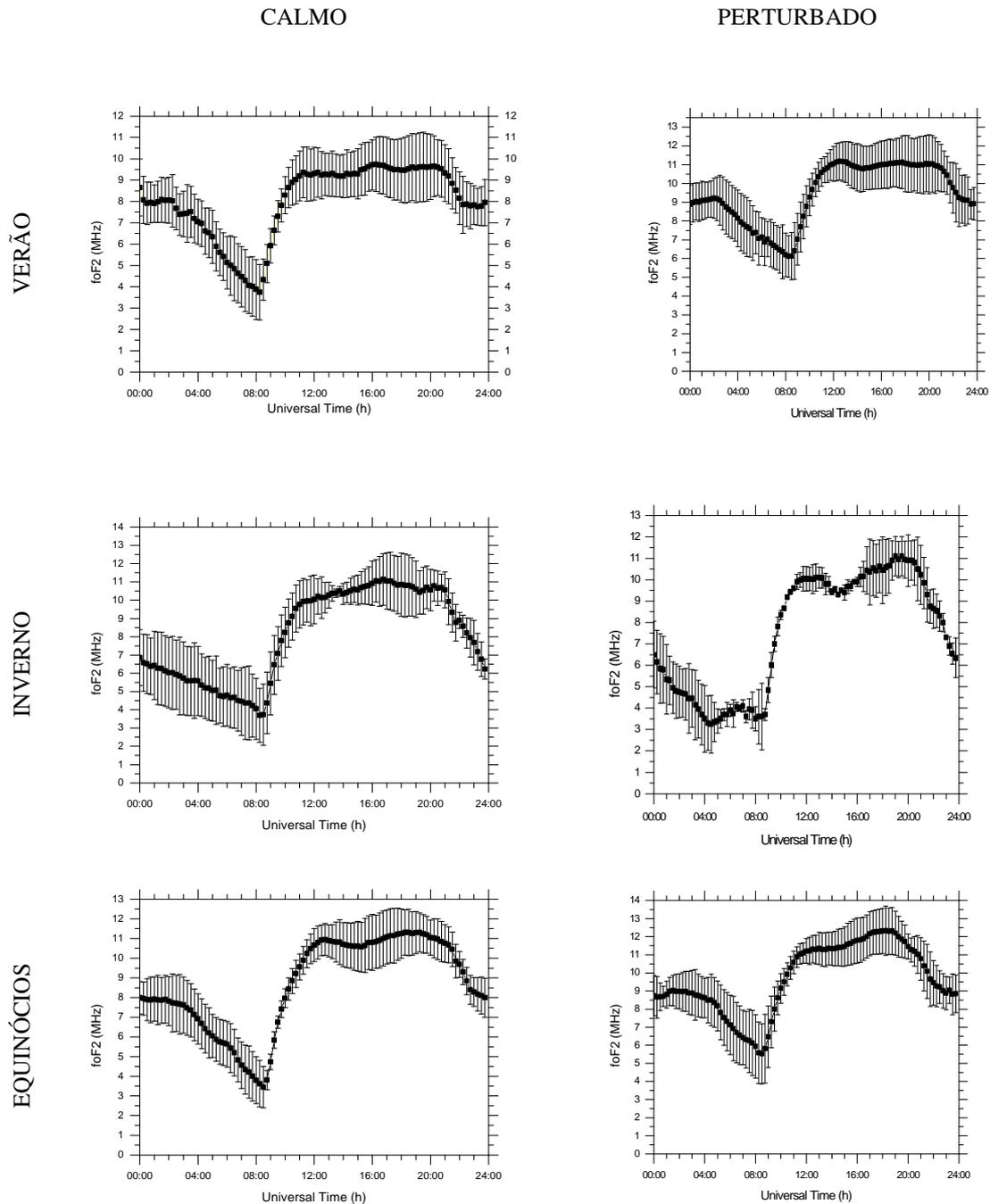


Figura 4.1- Variação da frequência crítica média em relação ao tempo para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digissonda no sítio de São Luís- MA.

Nos gráficos da figura 4.2 apresentamos os gráficos comparativos da altura média (hmF2) do pico da camada F nas mesmas condições anteriormente, calmo e perturbado, para a região de São Luís –MA..Foram também, originados gráficos de das estações de solstício de Verão, solstício de Inverno e dos equinócios.

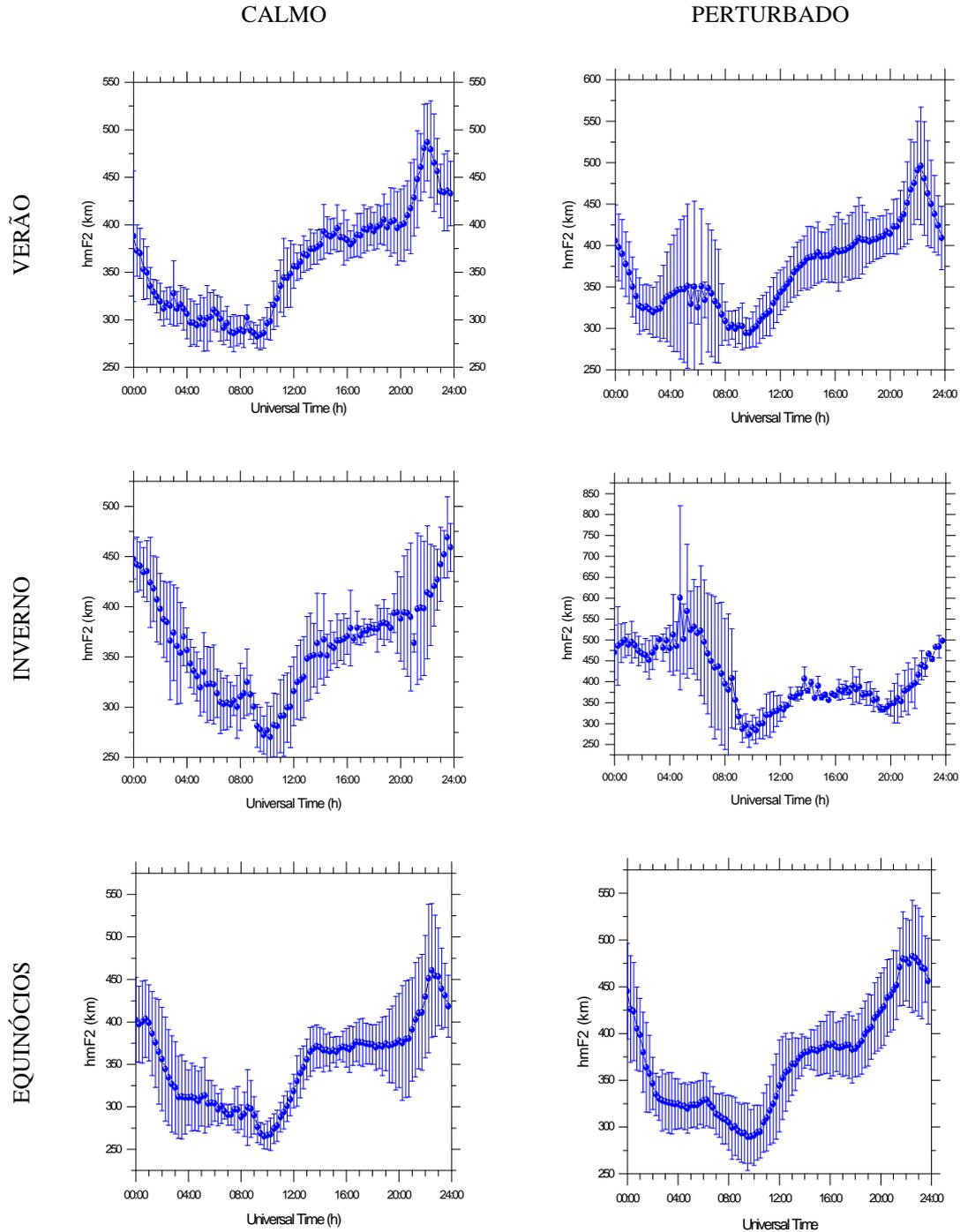


Figura 4.2- Variação da altura média do pico da camada F em relação ao tempo para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digissonda no sítio de São Luís- MA.

Nos gráficos da figura 4.3 apresentamos os gráficos da altura virtual média ($h'F$) da região São Luís-MA nas condições de calmos e perturbados, nas estações de solstício de verão, solstício de inverno e dos equinócios.

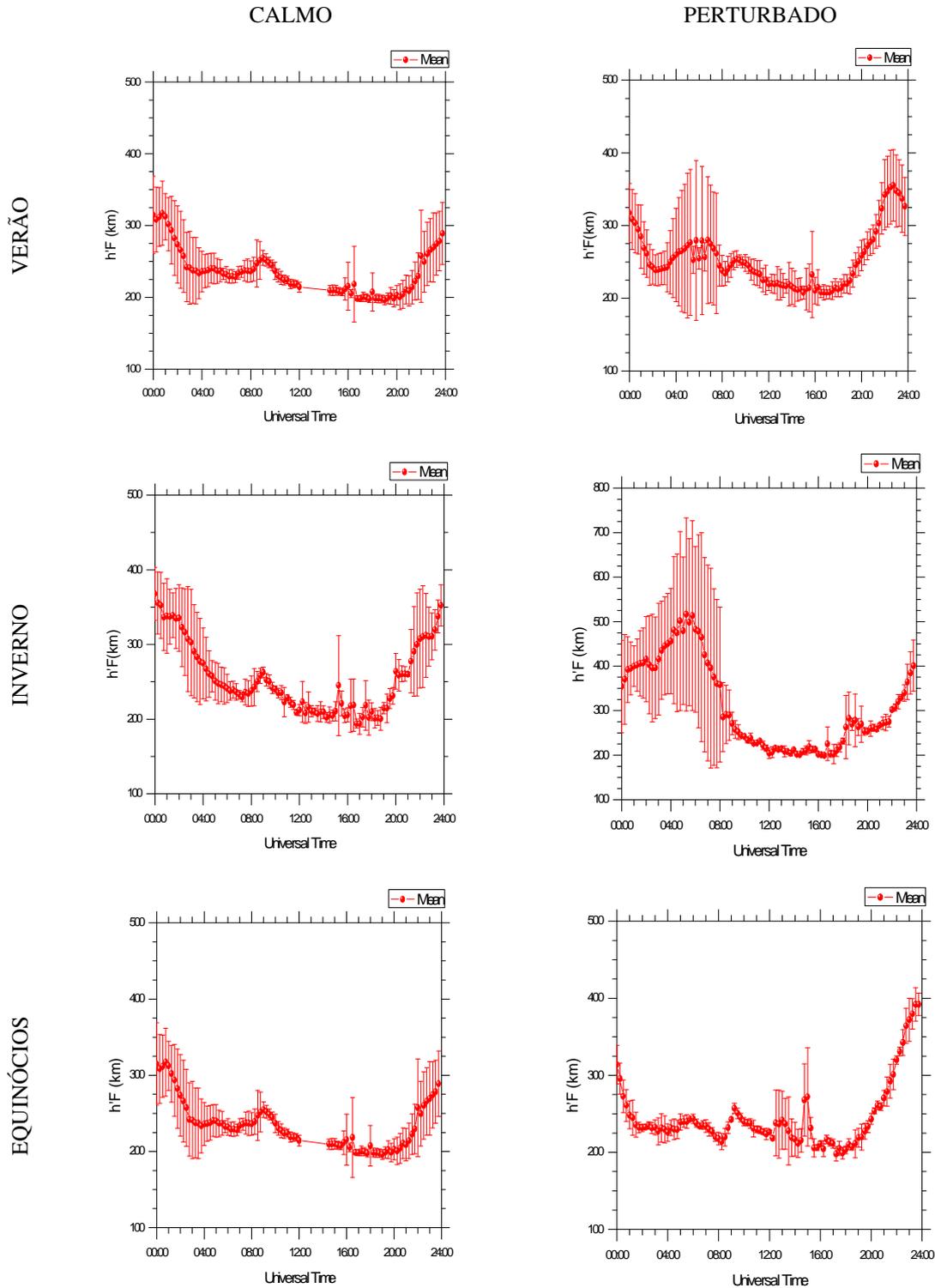


Figura 4.3- - Variação da altura virtual média em relação ao tempo para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digisonda no sítio de São Luís-MA.

41.2-.Resultados das Análises dos Dados de Cachoeira Paulista

Nos gráficos da figura 4.4 apresentamos os gráficos comparativos da frequência crítica média(foF2) nas condições de calmos e perturbados para a região de Cachoeira Paulista-SP. Foram originados gráficos de das estações de solstício de verão, solstício de inverno e dos equinócios.

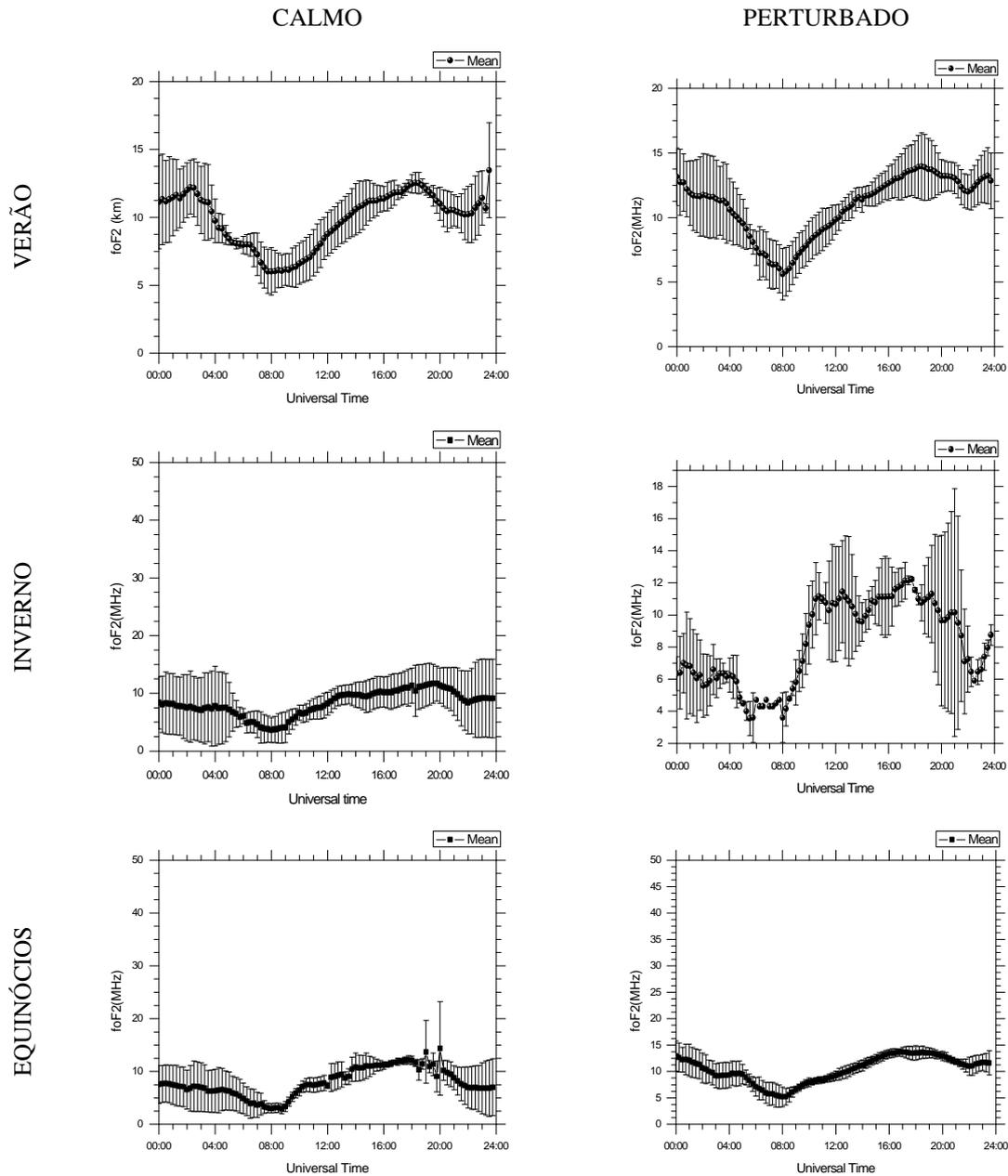


Figura 4.4- Variação da frequência crítica média em relação ao tempo obtido para o período para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digissonda no sítio de Cachoeira Paulista - SP.

Nos gráficos da figura 4.5 apresentamos os gráficos comparativos da altura média (hmF2) do pico da camada F nas mesmas condições anteriormente, calmo e perturbado, para a região de Cachoeira Paulista-SP. Como os gráficos anteriormente, foram originados gráficos das estações de solstício de verão, solstício de inverno e dos equinócios.

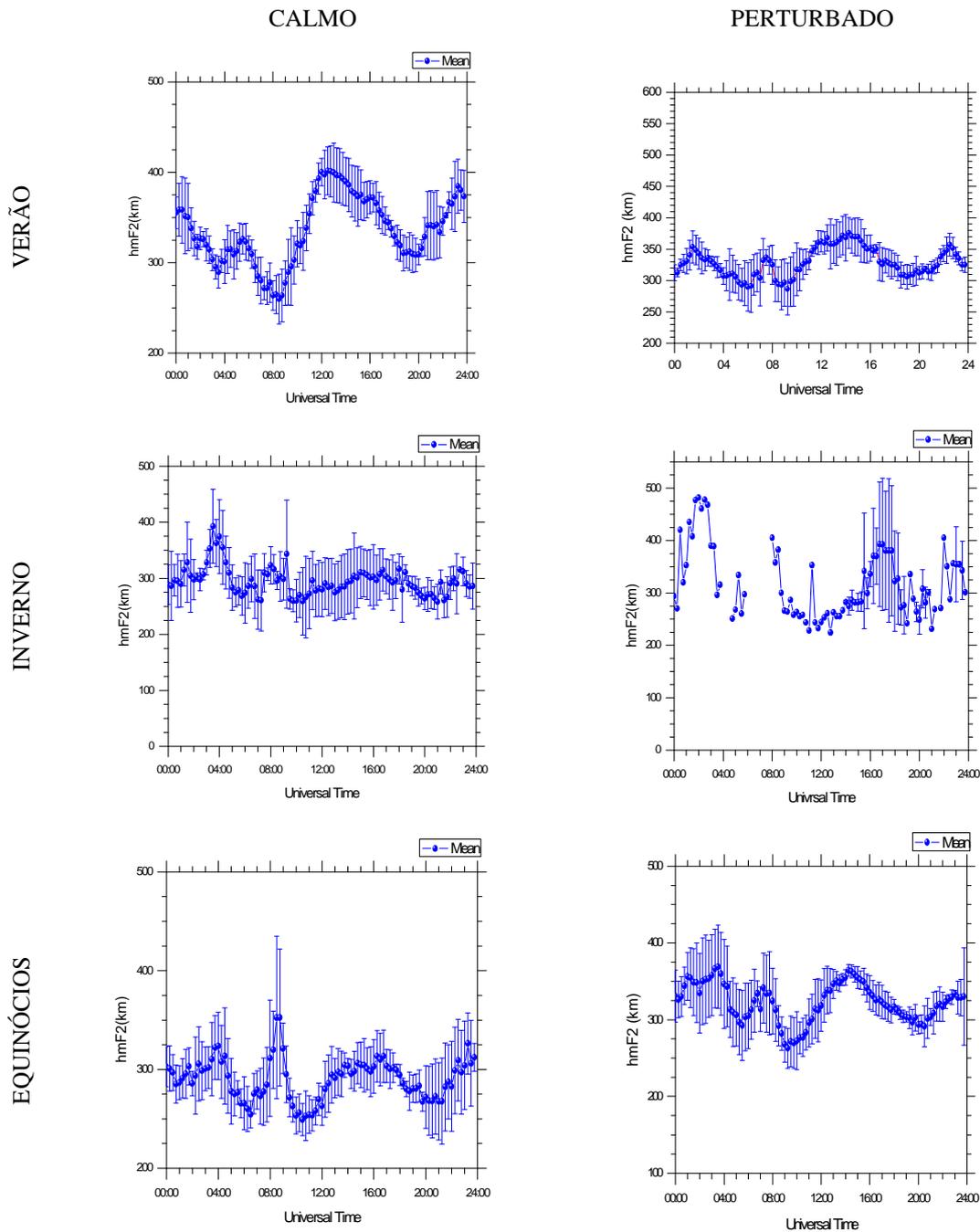


Figura 4.5 - Variação da altura média do pico da camada F em relação ao tempo para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digissonda no sítio de Cachoeira Paulista - SP.

Nos gráficos da figura 4 apresentamos os gráficos da altura virtual média ($h'F$) da região de Cachoeira Paulista –SP nas condições de calmos e perturbados, nas estações de solstício de verão, solstício de inverno e dos equinócios.

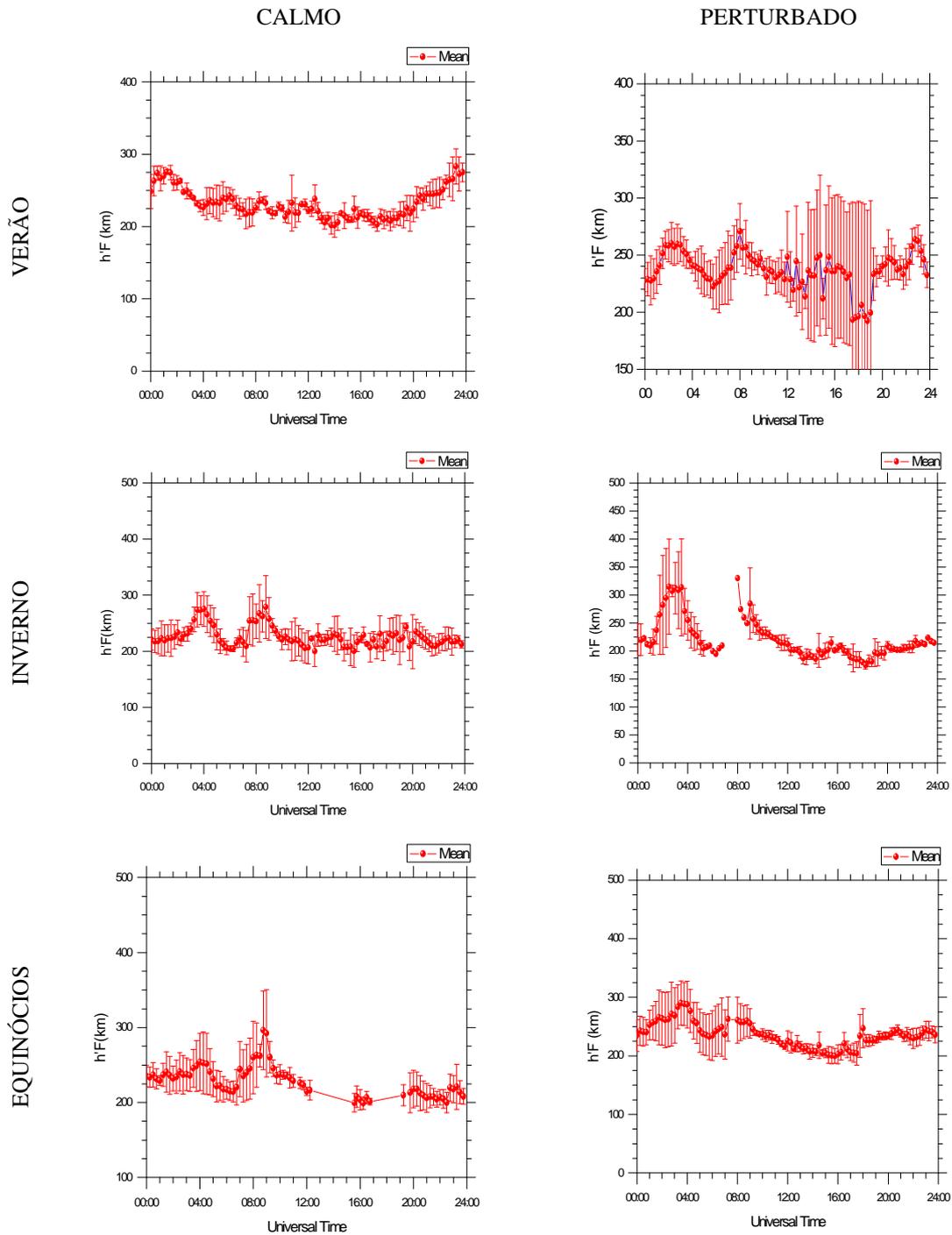


Figura 4.6- Variação da altura virtual média em relação ao tempo para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digisonda no sítio de Cachoeira Paulista - SP.

4.2 - Discussão dos Resultados

4.2.1- Análise da Variação Temporal da Frequência Crítica (foF2)

Os gráficos da variação temporal da frequência crítica (foF2) são, de fato, uma representação indireta da variação da densidade eletrônica ao longo do dia, conforme demonstrado através da equação (5). Esta equação mostra a relação entre a densidade eletrônica à frequência do plasma. Esta frequência do plasma é a frequência a qual reflete os rádios-sinais emitidos pela digissonda e que são registrados em forma de ionogramas.

$$n_e = \frac{m_e \cdot \epsilon_0}{e^2} \cdot (2\pi f)^2 \Rightarrow n_e = 1,24 \times 10^4 f^2 \quad (5)$$

Nesta equação, m_e é a massa do elétron e vale aproximadamente $9,31 \times 10^{-31}$ kg, ϵ_0 é o índice de permissividade no vácuo e tem o valor aproximado de $8,85 \times 10^{-12}$ F.m⁻¹, e o e é carga elementar do elétron cujo valor aproximado é de $1,6 \times 10^{-19}$ C.

De uma forma geral, todas as variações temporais da densidade eletrônica (frequência crítica, foF2) apresentam um comportamento característico semelhante. Observa-se um aumento da densidade eletrônica nos horários diurnos que se inicia, aproximadamente, às 5h LT (8h UT) em todos os gráficos. Tal fato ocorre pelo nascer do Sol, a maior fonte de ionização. Em um processo relativamente rápido a frequência crítica (equivalente à densidade eletrônica) aumenta, por exemplo, de 4 MHz para 11 MHz no período em torno dos equinócios para atividade magnética calma no sítio de São Luís. A partir das 9h LT (12h UT) a variação da densidade eletrônica tende a se estabilizar. Isto pode ser percebido claramente no gráfico do exemplo anterior.

O incremento expressivo na densidade eletrônica a partir das 5h LT (8h UT) até sua estabilização em torno das 9h LT (12h UT) é creditado a um crescimento a taxa de produção (q), a qual se sobressai com relação a taxa de perda (L), conforme apresentado na equação (2). Após às 9h LT (12h UT) e a taxa de produção (q) tendem a se estabilizar em relação a taxa de perda (L) o que resulta num comportamento quase constante da densidade eletrônica observados nos gráficos. A partir das 19h LT (21h UT) e durante todos os horários noturnos a taxa de perda (L) parece dominar o processo, sendo superior à taxa de produção (q). Isto é um reflexo da redução da ionização causada pela eliminação da maior fonte de ionização, o Sol.

Comparando-se os períodos calmos e perturbados para as duas estações não observamos variação significativa de máximos de densidade eletrônica. Contudo, isso não deve ser considerado como uma conclusão definitiva. Para ratificarmos esse comportamento é necessária a construção de uma longa e representativa série histórica dos parâmetros observados.

Os máximos valores de densidade eletrônica observada no período perturbado são superiores aos máximos valores de densidade eletrônica observada no período calmo em Cachoeira Paulista - SP. Isso pode ser devido a uma deposição de energia adicional que

ocorrem durante estes períodos perturbados. Esse mesmo comportamento é válido para São Luís - MA de forma menos expressiva. Porém, os máximos valores de densidade eletrônica observada no período perturbado e máximos valores de densidade eletrônica observada no período calmo de São Luís quase não sofrem variações em relação ao nível de perturbação magnética.

Comparando-se as variações temporais da frequência crítica observadas em Cachoeira Paulista com as mesmas variações observadas em São Luís verificamos que Cachoeira Paulista apresenta máximos de densidade eletrônica (frequência crítica) pouco ou levemente maiores. Por exemplo, observando os gráficos referentes aos equinócios, a frequência crítica da camada F2 observada em Cachoeira Paulista esta em torno de 12 MHz às 9h LT (12h UT), o que equivale a uma densidade eletrônica de $1,78 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$. Enquanto isso, para o mesmo horário a frequência crítica da camada F2 observada em São Luís é, aproximadamente, 11 MHz, o que equivale a uma densidade eletrônica de $1,5 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$. Comportamentos semelhantes podem ser observados nos demais gráficos.

Com relação a sazonalidade, não verificamos diferenças significativas para a variação diária da densidade eletrônica observada nos sítios de São Luís e Cachoeira Paulista. Todas as diferenças observáveis parecem estar dentro dos limites estatísticos limitados pelas barras de erro nos gráficos apresentados.

4.2.2 - Análise da Variação Temporal da Altura do Pico da Camada F (hmF2)

Em termos gerais, verificamos um comportamento característico da variação da altura média do pico da camada F nos dados de digissonda instalada em São Luís. Este comportamento típico é caracterizado por uma deriva descendente na madrugada, uma deriva ascendente acentuada no período da manhã e uma tendência à estabilidade na parte da tarde. Em Cachoeira Paulista, a variação da altura média do pico da camada F apresentou comportamento semelhante ao observado em São Luís durante o período calmo em torno do solstício de verão. Mas há diferenças específicas neste comportamento nos horários do pôr do Sol.

Uma característica interessante que observamos nos gráficos com a variação da altura média do pico da camada F observados com a digissonda de São Luís é uma ascensão clara da camada que se inicia a partir das 10 h (UT) até em torno das 15 h (UT). Este comportamento parece ser um reflexo dos processos eletrodinâmicos que dominam a região equatorial. Nesta região há a formação dos campos elétricos leste-oeste, devido à polarização dos terminadores. Estes campos horizontais com o sentido leste na região do equador geomagnético, onde o campo magnético terrestre é praticamente horizontal, causa uma deriva ascendente nos horários diurnos. Deriva esta que também é responsável pelo efeito fonte.

Uma diferença importante entre com a variação da altura média do pico da camada F observada em São Luís e Cachoeira Paulista aparece nos horários em torno do pôr do Sol, aproximadamente, às 20 h (UT). Neste horário, a variação da altura média do pico da camada F observada nos dados coletados de digissonda em São Luís mostra a presença o incremento significativo na altura da camada. Esta característica não é observada nos gráficos com a variação da altura média do pico da camada F obtida com a digissonda de Cachoeira Paulista. Isto indica que nossas suspeitas de que ele aumento

observado em São Luís é devido aos processos eletrodinâmico podem ser corretas, uma vez que é sabida, que a eletrodinâmica opera eficientemente em regiões equatoriais.

Além disso, este o incremento significativo na altura da camada também apresenta uma variação sazonal. Observe, por exemplo, no gráfico da variação da altura média do pico da camada F para os dias em torno do solstício de inverno. Nesta época, este fenômeno tende a ser retardado, ocorrendo após as 21 h (UT).

Uma explicação para esta ascensão na altura media do pico da camada F é pensada em termos da influência direta do efeito que ocorre na pré-reversão na deriva do plasma reportado por vários autores (veja, por exemplo, Kelly,1989). Apesar da variação média de altura do pico da camada F não ser o melhor parâmetro para demonstrar esta característica, este efeito parece estar presente em nossa análise dos dados observados.

Com relação à atividade magnética, verificamos que a altura media do pico da camada F (h_mF_2) apresenta maior altitude nos períodos considerados magneticamente perturbados em comparação à altitude verificada nos períodos calmos. Com relação às subidas expressivas também observamos um efeito da atividade magnética. Nos períodos magneticamente perturbados o pico da camada F parece atingir altitudes maiores.

4.2.3 - Análise da Variação Temporal da Altura Virtual da Base da Camada F ($h'F$)

A altura virtual base da camada F é um parâmetro obtido diretamente do ionograma, sem inversão do perfil de densidade eletrônica. Ou seja, é um parâmetro obtido do traço ordinário presente nos ionogramas.

A observação da variação temporal deste traço nos gráficos médios obtidos para as sondagens realizadas em Cachoeira Paulista não revela um padrão típico de variação diurna para o período observado. Em termos gerais, todos os gráficos de variação temporal altura virtual da base da camada F podem ser caracterizados por uma altura quase constante. Pouca, ou quase nenhum padrão de variação pode ser estabelecido, com exceção de pequenas variações, como por exemplo, em torno das 4 h (UT) e 9 h (UT) durante o período de inverso.

Quanto às observações da variação temporal altura virtual da base da camada F medidas pela digissonda instalada em São Luís, há um comportamento característico típico de regiões equatoriais. No que parece ser a tônica deste comportamento, a altura virtual da base da camada F tende a reduzir nos horários noturnos, a partir das 21 h LT (24 h UT), com pequena variação sazonal neste horário. No período vespertino a altura virtual não apresenta variações significativas.

Contudo, no início da noite a altura virtual da base da camada F apresenta a assinatura da influência da eletrodinâmica característica da região equatorial. A partir das 19-20 h (UT) ocorre um aumento significativo na altura da base da camada. Este aumento é observado em todos os períodos, independente no nível de atividade magnética.

Este aumento é devido ao já discutido aumento da deriva vertical do plasma ionosférico que ocorre nesta hora do dia, conhecido como pico de pré-reversão. Nas nossas análises este pico ocorreu às 23 h (UT) no período em torno do solstício de verão, às 24 h (UT)



no período em torno do solstício de inverso e às 01 h (UT) no período em torno dos equinócios.

5-CONCLUSÕES

O estudo dos fenômenos que ocorrem na ionosfera é de grande importância para o seu controle. Para este trabalho, os esforços foram concentrados no campo do estudo da ionosfera.

A rotina desenvolvida foi à realização de trabalhos referentes ao assunto proposto, e ao processamento de dados. O método utilizado para o processamento de dados foi a redução dos dados da Digissonda e o estudo de literatura específica. Assim, possibilitou-se o entendimento e o comportamento da ionosfera em um nível de iniciação científica. Uma vez que, através da análise dos dados, pode-se verificar os parâmetros ionosféricos e as anomalias que ocorrem de acordo com a hora do dia.

Finalmente, as atividades teóricas e técnicas cumpriram o cronograma do projeto sendo: estudo da bibliografia referente ao trabalho a ser desenvolvido, treinamento, familiarização e desenvolvimento de aplicativos de software de processamento de dados da Digissonda, tais como processamento e análise de dados. Além disso, houve um aprendizado em adquirir um comportamento científico. Portanto, apesar do curto período de projeto de Iniciação Científica, as atividades foram realizadas com êxito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brum, C.G.M. **A importância do dia quieto na absorção ionosférica da camada D da ionosfera e sua aplicação para os dados de riômetros da estação antártica comandante Ferraz**, São José dos Campos, 192p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.
- Brum, C.G.M. **Estudo da Variação Latitudinal da Baixa Ionosfera do hemisfério Sul no Setor Americano** São José dos Campos, 77p. Proposta de Tese - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.
- Costa, J.R.V. **Astronomia no Zênite [on line]**. Disponível em: <<http://www.zenite.nu/index.php?Id2=02&Id1=02>> Acesso: Maio de 2006.
- Curtis J. et al; **Auroras**, Auroral Activity [on line] Disponível em: <http://www.exploratorium.edu/auroras/jc1.html>// Maio 2006
- Denardini, C.M. **Desenvolvimento de um sistema de correção de fase para radar ionosférico de São Luís Maranhão**. São José dos Campos, 137p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.
- Denardini, C. M. –*Saia de Bailarina. Clezio's Home Page*. [on-line] Disponível em: <<http://www.dae.inpe.br/~clezio/>> Acesso: Junho de 2006.
- Ferraz Netto, L. **Feira de Ciências**. Disponível em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala24/24_A18.asp> Acesso:Abril de 2005.
- Hamilton, C. J.; Dias, F.; Centieiroby P. **Vistas do Sistema Solar**. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/ast/solar/portug/sun.htm>> Acesso: Maio de 2006.
- Hutchinson, D. *Shooting the aurora borealis*, Astronomy Picture of the Day [on line] Disponível //www.ptialaska.net/~hutch/aurora.html// Maio 2006
- Kirchhoff, V.W.J.H. *Introdução à Geofísica Espacial*. A Terra e o Sistema Solar -O Sol Cap 1 —, pág.15 a 30, 1994.
- Milone,A.C. ,Wuensche,C.A.,Neto V.T. *Curso de Introduçãoà Astrofísica e Astronomia* Cap 5 - , pág. 5 a 30, 2002
- NASA, *National Aeronautics and Space Administration* [on-line] Disponível em: <<http://spdf.gsfc.nasa.gov/>> Acesso: Junho de 2006.
- Neves, L. F. F. **Wikipedia (O ciclo solar)**. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/ciclo_solar> Acesso: Junho de 2006.
- Santana, D.C.S.**Estudos da Evolução Temporal/Espacial das Derivas das depleções do plasma Ionosférico por imagens Digitais da Aeroluminescência OI 630 Nm noturna**. São José dos Campos, 131p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.
- Saraiva,M.F.O. *O Sol – a nossa estrela*. Astronomia e Astrofísica Cap. 16, p. 11 a 22, 1987
- Usp, Departamento de Astronomia, *Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas*, [on-line] Disponível em: <<http://www.astro.iag.usp.br/>> Acesso: Outubro de 2005.
- Yamashita, C. S. **Efeitos das tempestades magnéticas intensas na Ionosfera de baixa latitude**. São José dos Campos. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.
- Wales, J. *Espectro da coroa solar durante Eclipse*. **Wikimedia Home Page**. [on-line] Disponível <<http://pt.wikipedia.org/>> Maio. 2006.