



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



**ESTUDOS COMPARATIVOS DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E
ANÁLISES DE DADOS DE PERFIS DE DENSIDADES
ELETRÔNICAS PARA A REGIÃO BRASILEIRA.**

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

PROCESSO: 105374/2005-2

Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida - (INPE, Bolsista PIBIC/INPE –
CNPq/MCT).
E-mail: pedro@dae.inpe.br

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

**São José dos Campos
Junho de 2006**



Dados de Identificação

Bolsista:

Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida
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:

Maria Goreti S. Aquino – DAE/CEA/INPE - MCT
Márcio Tadeu Muella – DAE/CEA/INPE – MCT
Laysa Cristina Araújo Resende – 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.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	8
CAPÍTULO 1	9
1. O Sol.....	9
1.1. Estrutura do Sol	10
1.1.1. Fotosfera	10
1.1.2. Cromosfera	10
1.1.3. Coroa	11
1.1.4. Zona de Irradiação.....	11
1.1.5. Zona de Convecção	11
1.1.6. Manchas Solares	12
1.2. Ciclos Solares	13
1.3. Campo Magnético	14
1.4. Interação Sol – Terra	15
1.4.1. Vento Solar	15
1.4.2. Radiação Solar	15
1.4.3. Índices Geomagnéticos.....	16
1.4.3.1 Índice K_p	16
1.4.3.2. Índice AE.....	16
1.4.3.3. Índice Ap	16
1.4.3.4.Índice Dst.....	17
1.4.3.3. Componente 'Bz	17
1.5. Tempestades Magnéticas.....	17
2.2. IONOSFERA.....	18
2.1 Definição de Ionosfera.....	18
2.2. Camadas da Ionosfera.....	20
2.2.1 Camada D	20
2.2.2 Camada E.....	20
2.2.3 Camada F1	20
2.2.4 Camada F2.....	21
2.3 Histórico das Pesquisas Ionosféricas no Brasil	21
2.4 Fenômenos Ionosféricos e Magnéticos.....	21
2.4.1 O Eletrojato Equatorial.....	21
2.4.2 A Anomalia Equatorial ou Anomalia Appleton	22
2.4.3 Bolhas Ionosféricas	22
2.4.3.1 A Formação das Bolhas.....	23
2.4.4 A Anomalia Geomagnética Brasileira.....	24
2.5 Reflexão Ionosférica.....	24
CAPÍTULO 2	26
INSTRUMENTAÇÃO	26
1. Digissonda	26
2. Dados Coletados	27
3. Programa de Análise.....	27
CAPÍTULO 3	29
ATIVIDADES DE PROCESSAMENTO, REDUÇÃO DE DADOS E ATIVIDADES COMPLEMENTARES	29
1. Classificação dos Dias Selecionados.....	29
2. Resultados do Processamento dos Dados Reduzidos.....	31



2. Simulação Numérica.....	39
2.1 O Modelo <i>International Reference Ionosphere</i> (IRI).....	39
2.2 Exemplos de Simulações Realizadas.....	39
2.3 Exemplo de Perfil de Densidade Eletrônica.....	41
3. Atividades Complementares.....	42
3.1. Participação em Congressos.....	42
3.2. Palestras e Seminários.....	42
3.3. Visita Técnica a Cachoeira Paulista.....	43
CAPÍTULO 4.....	44
Análise dos Dados Reduzidos.....	44
1. Resultados das Análises dos Dados de São Luís.....	45
2. Resultados das Análises das Simulações Numéricas.....	47
3. Discussão dos Resultados.....	49
CONCLUSÕES.....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
Apêndice A.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig 1.1 - Estruturas solares: núcleo, zona de radiação, zona de convecção, fotosfera, cromosfera e coroa solar.	10
Fig 1.2. - Foto do Sol na linha de 584 Å do Hélio (HeI), obtida pelo satélite SOHO (The Solar and Heliospheric Observatory).....	10
Figura 1.3 - Foto do eclipse total de 4 de novembro de 1994, obtida pelos autores em Santa Catarina, Brasil, mostrando a cromosfera.....	11
Figura 1.4 – Mancha Solar (parte escura) observada usando um filtro neutro.....	12
Figura 1.5 – Diagrama da borboleta mostrando os ciclos solares.	13
Figura 1.6 – Comparação do Sol no seu ciclo solar entre as épocas de máximo e mínimo solar.....	13
Figura 1.7 – Imagem ilustrando o campo magnético do Sol formando uma saia de bailarina.	14
Figura 1.8 – Proeminências solares emitindo partículas em direção a Terra.	15
Figura 1.9 Representação do campo magnético terrestre deformado pela interação do campo do Sol (esquerda) e irradiação do campo magnético do Sol (direita).	18
Figura 2.1 - Localização da ionosfera junto com as demais camadas atmosféricas em relação à temperatura.	19
Figura 2.1 – Foto da digissonda de São Luís –MA.	26
Figura 2.2 – (a) Foto da antena transmissora da digissonda. (b) Foto da antena receptora digissonda de São Luís –MA.	27
Figura 2.3 – a. Imagem do ionograma mostrando a Região F sem espalhamento	27
Figura 3.1 – Imagem mostrando os solstícios e equinócios para a divisão dos dias trabalhados na redução de dados.	30
TABELA 2 – 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).	30
TABELA 3 – Dias selecionados para análise, classificados de acordo com atividade magnética e de acordo as estações, para Fortaleza – CE (3,5° S, 38,2° O) 31	
Figura 3.2 – Série de Ionogramas obtidos no dia 27 de março de 2003 no sítio de São Luís – MA, reduzido no SAO-X.....	32
Figura 4.3 – Série de Ionogramas obtidos no dia 30 de março de 2003 no sítio de São Luís – MA, reduzido no SAO-X.....	33
Figura 4.4 – Série de Ionogramas obtidos no dia 26 de maio de 2003 no sítio de São Luís – MA, reduzido no SAO-X.....	34
Figura 4.5 – Série de Ionogramas obtidos no dia 27 de maio de 2003 no sítio de São Luís – MA, reduzido no SAO-X.....	35
Figura 4.6 – Série de Ionogramas obtidos no dia 05 de agosto de 2003 no sítio de São Luís – MA, reduzido no SAO-X.....	36
Figura 4.7 – Série de Ionogramas obtidos no dia 14 de agosto de 2003 no sítio de São Luís – MA, reduzido no SAO-X.....	37
Figura 4.8 – Série de Ionogramas obtidos no dia 15 de agosto de 2003 no sítio de São Luís – MA, reduzido no SAO-X.....	38
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.....	45

- 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. 46
- Figura 4.4- Variação da frequência crítica média em relação ao tempo obtido para o período para período calmo, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de simulações numéricas com o modelo IRI para o sítio de São Luís- MA. 47
- Figura 4.5- Variação da altura média do pico da camada F em relação ao tempo obtido para o período para período calmo, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de simulações numéricas com o modelo IRI para o sítio de São Luís- MA..... 48

INTRODUÇÃO

Neste trabalho serão apresentadas as atividades desenvolvidas no período de agosto de 2005 a junho de 2006. Neste período foram desenvolvidas atividades de estudos teóricos dos temas relacionados com o projeto proposto, para conhecimento e explicação das atividades instrumentais. Este trabalho teve como finalidade um estudo comparativo entre os parâmetros ionosféricos obtidos com a digissonda da estação de São Luís – MA ($2^{\circ}31' S$, $44^{\circ}16' O$) e os parâmetros derivados do modelo empírico IRI (*International Reference Ionosphere*). 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 para a verificação do modelo IRI, submetido à apresentação do SICINPE 2006 - Seminário de Iniciação Científica do INPE.

Neste relatório vamos apresentar no capítulo 1 os trabalhos de revisão teórica, a fim de desenvolver os conceitos iniciais sobre o Sol e sobre a ionosfera. No capítulo 2 vamos apresentar a instrumentação utilizada para o desenvolvimento do trabalho. No capítulo 3 serão mostradas as atividades relacionadas com a coleta e redução de dados relacionados ao projeto e as atividades de formação complementar realizadas ao longo do período a que se refere este relatório. No capítulo 4 apresentaremos alguns estudos realizados a partir dos dados analisados através de sondagem vertical. Finalmente, apresentaremos as conclusões deste trabalho.

CAPÍTULO 1

Neste capítulo serão mostrados os trabalhos de revisão: O Sol e A Ionosfera. O objetivo deste estudo é oferecer uma visão dos sistemas onde o objeto de estudo deste projeto está inserido e melhorar a compreensão teórica do estudo da ionosfera.

1. O Sol

O Sol tem aproximadamente 4,5 bilhões de anos. Quase a metade do hidrogênio do seu núcleo já foi consumida, mas o Sol continuará brilhando por mais cinco bilhões de anos, porém então sua luminosidade será duas vezes maior, até sua reserva de hidrogênio acabar. Então o Sol passará por algumas transformações que poderão resultar na destruição de todos os planetas do seu sistema e provavelmente na criação de uma nebulosa planetária.

O Sol é a estrela mais próxima da Terra. Basicamente, é uma esfera de gás incandescente, em cujo núcleo acontece a geração de energia através de reações term nucleares. O estudo do Sol serve de base para o conhecimento das outras estrelas. Seu brilho aparente é 200 bilhões de vezes maior do que o de Sírius, a estrela mais brilhante do céu noturno. Suas principais características são apresentadas na tabela 1.

TABELA 1 – Principais Características do Sol.
Fonte: Maia (2005).

Grandeza Física	Valor Aproximado
Massa	$M = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Raio	$R = 6,96 \times 10^5 \text{ km}$
Densidade média	$r = 1409 \text{ kg/m}^3$
Densidade central	$r_c = 1,6 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$
Distância	1,02 - 0,98 UA, (1 UA = $1,496 \times 10^8 \text{ km}$)
Luminosidade	$L = 3,9 \times 10^{26} \text{ watts} = 3,9 \times 10^{33} \text{ ergs/s}$
Temperatura efetiva (corpo negro)	$T_{ef} = 5785 \text{ K}$
Temperatura central	$T_c = 1 \times 10^7 \text{ K}$
Composição química principal (Nº)	Hidrogênio = 91,2 % Hélio = 8,7% Oxigênio = 0,078 % Carbono = 0,043 %
Período rotacional no equador	25,67 d
na latitude 75°	33,40 d

1.1. Estrutura do Sol

O modelo representado na figura 1.1 mostra as principais regiões do Sol. A fotosfera, com cerca de 330 km de espessura e temperatura de 5785 K, é a camada visível do Sol. Logo abaixo da fotosfera se localiza a zona convectiva, se estendendo por cerca de 15% do raio solar.

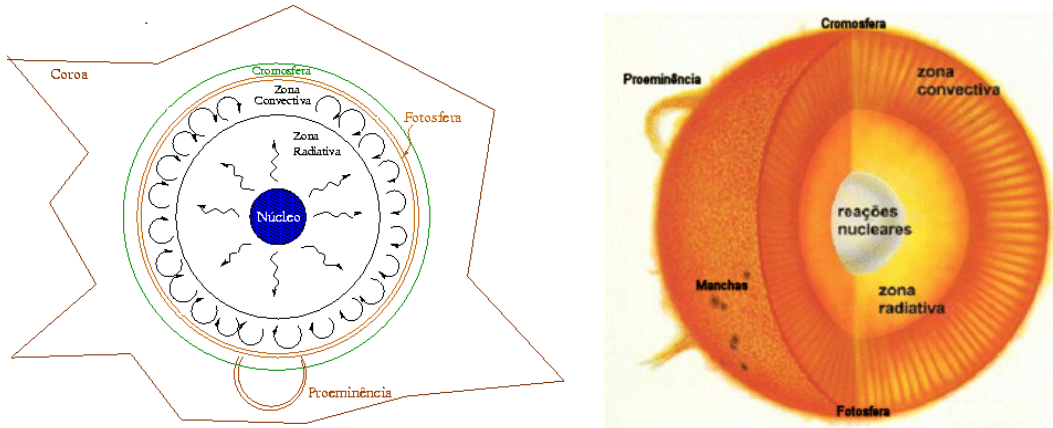


Fig 1.1 - Estruturas solares: núcleo, zona de radiação, zona de convecção, fotosfera, cromosfera e coroa solar.

Fonte: Maia (2005).

1.1.1. Fotosfera

A fotosfera do Sol tem a aparência da superfície de um líquido em ebulição (figura 1.2), cheia de bolhas, ou grânulos. Este fenômeno é chamado de granulação fotosférica. Os grânulos têm em torno de 5000 km de diâmetro e cada um desses grânulos tem um período de aproximadamente 10 minutos (entre sua formação e seu escoamento). Eles marcam os tôpos das colunas convectivas de gás quente, que se forma na zona convectiva, logo abaixo da fotosfera. As regiões escuras entre os grânulos são regiões onde o gás mais frio e mais denso escorrem para dentro fechando a coerentes de convecção.

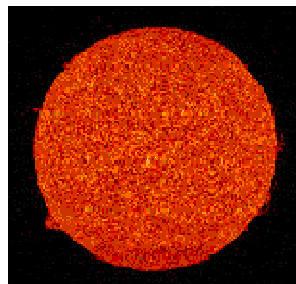


Fig 1.2. - Foto do Sol na linha de 584 Å do Hélio (HeI), obtida pelo satélite SOHO (The Solar and Heliospheric Observatory).

Fonte: NASA (2005).

1.1.2. Cromosfera

A cromosfera do Sol normalmente não é visível, porque sua radiação é muito mais fraca do que a da fotosfera. Ela pode ser observada, no entanto, durante os eclipses solares, quando a Lua esconde o disco da fotosfera (figura 1.3).



Figura 1.3 - Foto do eclipse total de 4 de novembro de 1994, obtida pelos autores em Santa Catarina, Brasil, mostrando a cromosfera.
Fonte: Maia (2005)

1.1.3. Coroa

É a camada mais extensa do Sol (abrange praticamente todo o Sistema Solar). A densidade da matéria nessa camada é cerca de 10 milhões de vezes menor que na fotosfera e diminui conforme se afasta do Sol. Em condições normais também não pode ser vista, pois a sua emissão de luz é um milhão de vezes menor que a luz da fotosfera. Pode ser visualizada em eclipses solares totais e com o coronógrafo. A Coroa pode ser distinguida em três regiões: Coroa interna com espessura 1,3 raios solares a partir da cromosfera; Coroa intermediária que vai de 1,3 a 2,5 raios solares e a Coroa externa de 2,5 a 24 raios solares. Ao longo da translação terrestre, a Terra caminha imersa na coroa solar, e a radiação presente nela (advinda do Sol) bombardeia continuamente nosso planeta.

1.1.4. Zona de Irradiação

Zona de Irradiação é a camada do Sol onde a energia propaga-se da mesma maneira que a onda eletromagnética, ou seja, através da irradiação e por isso meio atua no sentido de atenuar a energia. Então quanto mais denso for o meio, mais a energia será atenuada.

1.1.5. Zona de Convecção

Zona de Convecção é a camada do Sol onde a energia se propaga através de movimentos convectivos. Ou seja, 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 e o que está na superfície desce para entrar em contato com a “Zona de Irradiação”. Esse é o mesmo processo que ocorre com a água fervente num recipiente em aquecimento no seu fundo.

1.1.6. Manchas Solares

As manchas solares (figura 1.4) aparecem periodicamente na superfície solar. Seus tamanhos variam de poucos milhares de quilômetros até centenas de milhares de quilômetros. O número de manchas varia segundo um ciclo de atividade solar discutido a seguir. Seu acompanhamento é feito em geral com telescópios que registram a posição no disco solar, seus tamanhos, movimentos e sua evolução morfológica. Mas com pequenos telescópios as manchas também podem ser observadas, determinando inclusive a rotação do Sol com facilidade.

Manchas solares são regiões mais frias (cerca de 2000 K) e mais escuras em contraste com a fotosfera solar circunvizinha. Elas emitem menos energia do que a fotosfera em geral porque possuem intensos campos magnéticos (cerca de 1000 vezes mais intensos que a superfície solar normal, 0,1 T contra 10^{-4} T) que parcialmente bloqueiam a energia transmitida para cima pelas células de convecção na região sub fotosférica (Eddy, 1976; Schove, 1983; Kivelson and Russell, 1995). As manchas solares são geradas por campos magnéticos toroidais que são trazidos à superfície solar, por efeito de empuxo.

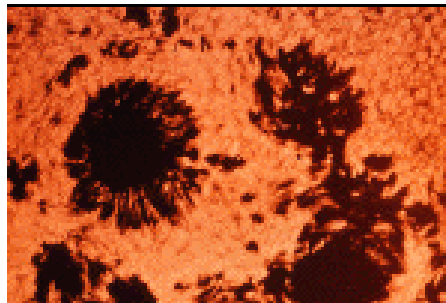


Figura 1.4 – Mancha Solar (parte escura) observada usando um filtro neutro.
Fonte: Maia (2005).

Manchas solares vêm sendo monitoradas desde 1610, logo depois da invenção do telescópio. Elas são os mais antigos sinais da atividade do Sol observados por estudiosos. A variação do número de manchas solares revelou os 11 ciclos de atividade do Sol, assim como outras mudanças de prazo mais longo. As manchas solares estão quase sempre presentes no Sol.

Um outro ponto importante sobre as manchas solares é que elas não surgem aleatoriamente em qualquer ponto da superfície do Sol. Em geral elas aparecem primeiro nas latitudes médias do Sol, acima e abaixo do seu equador. À medida que a atividade solar vai aumentando, estas bandas de manchas solares vão se alargando e, de modo continuado, se movem na direção do equador solar, formando o que é conhecido como diagrama de borboleta (figura 1.5).

1.2. Ciclos Solares

O ciclo solar é definido pelo aumento e diminuição da atividade solar, marcada pela presença de manchas solar. A contínua observação mostrou que existia um ciclo de 11 anos no processo de formação de manchas solares. Este ciclo tem um período aproximado de 11 anos. O ciclo solar possui um máximo e um mínimo. Quando o Sol está passando pelo mínimo deste ciclo, o mínimo solar, o número de manchas em sua superfície pode chegar a zero. Após 5 anos e meio, o Sol atinge o seu ponto máximo de atividade, o máximo solar, e na sua superfície podemos ver até mais de 100 manchas solares.

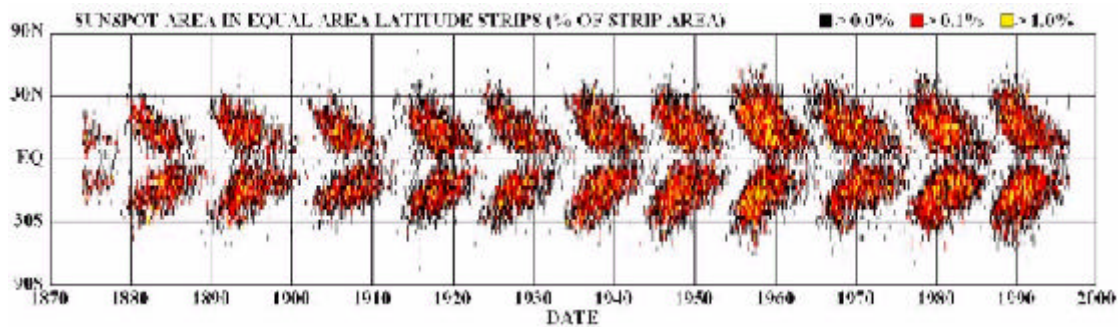


Figura 1.5 – Diagrama da borboleta mostrando os ciclos solares.

Fonte: Windows to the Universe (2005).

Na figura 1.6 apresentamos duas fotografias do Sol tomada no Observatório Solar Nacional localizado no Pico Sacramento, EUA. A Esquerda mostra o Sol em seu ciclo solar mínimo, ou seja, na época de menor atividade solar. A direita mostra o ciclo solar Máximo, quando há o maior número de atividade solar.

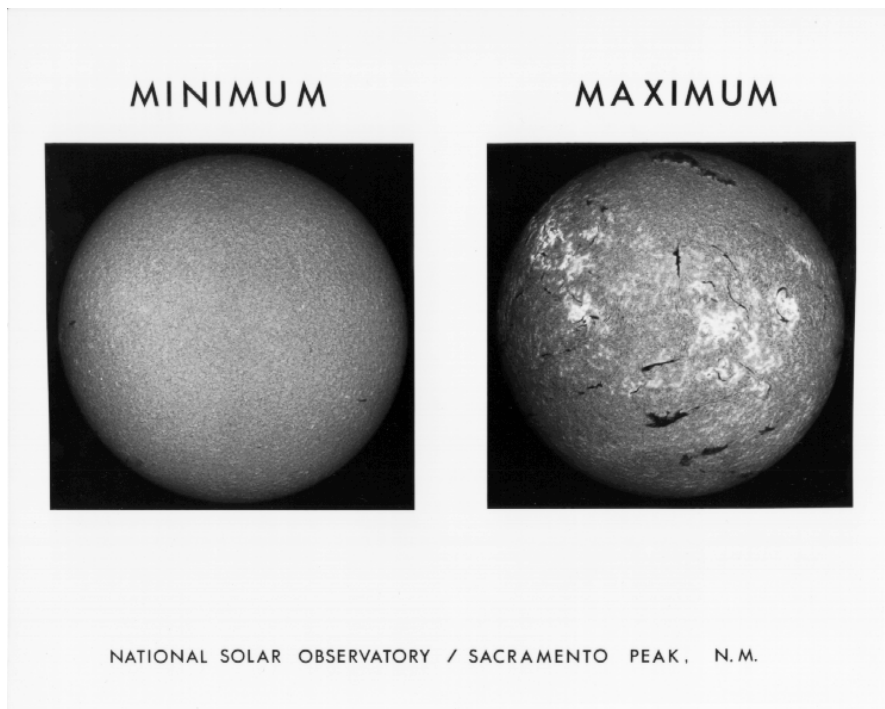


Figura 1.6 – Comparação do Sol no seu ciclo solar entre as épocas de máximo e mínimo solar.

Fonte: Windows to the Universe (2005).

1.3. Campo Magnético

Os astrônomos americanos detectaram os campos magnéticos solares. Utilizando-se de um instrumento, o espectrógrafo de alta dispersão, eles descobriram que algumas linhas de emissões espectrais produzidas nas proximidades das manchas solares eram duplas e até mesmo triplas. Ou seja, no lugar de uma linha espectral com certo comprimento de onda, via-se uma linha à direita e outra à esquerda daquela que era esperada para determinado comprimento de onda. Esse fenômeno de duplicação de linhas é chamado de efeito Zeeman e ocorre quando a fonte emissora de luz está submetida a um campo magnético. Nesse caso a fonte emissora é a mancha solar. Foi possível calcular o campo nessa região que chega a $5 \cdot 10^{-8}$ nT e ainda provar que o campo magnético geral, gerado pelo Sol é da ordem de 1 a $2 \cdot 10^{-13}$ nT. Esse campo magnético está orientados de norte para sul, porém nas regiões onde se encontram os campos magnéticos intensos (10^{-8} nT), estes estão dispostos, na direção leste-oeste. O estado de plasma, que se encontra a matéria Solar, oferece pouca resistência à corrente elétrica, o que faz com que toda a estrela se comporte como uma bobina elétrica.

Descobriu-se posteriormente que as linhas de força do campo magnético estão confinadas no plasma, ou seja, se comportam como se estivessem ligadas as partículas que o compõem e acompanham o fluxo de matéria. Com isso a rotação diferenciada acaba deformando essas linhas como se fossem tiras de borracha. As linhas do campo magnético sofrem um processo de condensação, até cada grupo assumir a forma espiralada. Daí encontram-se espirais através de todos os meridianos e todas na direção leste-oeste no sentido de rotação. Esse campo gerado forma então a chamada saia de bailarina mostrado na figura 1.7. A concentração dessas linhas equivale a maior intensidade dos campos magnéticos em relação a situação inicial, e como a rotação não é uniforme cada espiral pode ser esticada até formar um laço. Em certos momentos os laços se rompem e afloram na superfície. Nesse momento temos a formação das manchas solares.



Figura 1.7 – Imagem ilustrando o campo magnético do Sol formando uma saia de bailarina.
Fonte: Denardini (2005)

1.4. Interação Sol – Terra

Além da conhecida força gravitacional a interação Sol-Terra se dá também através das emissões radioativas e das emissões de partículas lançadas do Sol e trazida pelo vento solar. Estas emissões radioativas e de partículas podem causar um impacto na Terra gerando tempestades magnéticas. Para classificar estas tempestades foram criados diversos índices geomagnéticos. Nesta seção vamos descrever sobre o vento solar, a radiação que o Sol emite radialmente e que afeta a Terra e os principais índices e componentes que classificam a atividade magnética.

1.4.1. Vento Solar

O Vento Solar é uma fonte de emissão de partículas carregadas de baixa densidade, principalmente elétrons e prótons. Ele se propaga pelo Sistema Solar a aproximadamente 450 km/s, porém á altura dos pólos solares essa velocidade chega a quase o dobro, 750 km/s. O vento solar pode alterar a direção da cauda de íons dos cometas e produz efeitos mensuráveis sobre as trajetórias das sondas espaciais se estes estiverem dentro do raio de ação do vento solar.

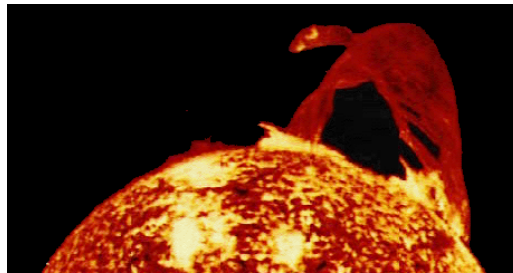


Figura 1.8 – Proeminências solares emitindo partículas em direção a Terra.

Fonte: Windows to the Universe (2005).

1.4.2. Radiação Solar

Em física, radiação é a propagação da energia por meio de partículas ou ondas. A radiação solar pode ser identificada:

- Pelo elemento condutor de energia:

- Radiação eletromagnética – fótons;
- Radiação corpuscular - partículas (prótons, nêutrons, etc.); e
- Radiação gravitacional - grávitons.

- Pela fonte de radiação:

- Radiação solar - causada pelo Sol;
- Radiação de Cerenkov - causada por partículas com a velocidade superior a da luz no meio; e
- Radioatividade - núcleos instáveis.

- Pelos seus efeitos:

- Radiação ionizante - capaz de ionizar moléculas; e
- Radiação não ionizante - incapaz de ionizar moléculas.

Outras definições importante relacionadas com a radiação solar são a constante solar e a irradiação. A constante solar é a quantidade de energia recebida no alto da atmosfera da

terra em uma perpendicular orientada superfície aos raios do Sol (na distância média da terra do sol). A constante solar geralmente aceita de 1368 W/m^2 é uma média anual medida em instrumentos a bordo de satélites. A irradiação é a quantidade incidente de energia eletromagnética da em uma superfície por o tempo da unidade por a área de unidade. No passado esta quantidade foi consultada frequentemente como o "fluxo". Ao medir a irradiação solar (através do satélite), os cientistas estão medindo a quantidade de energia eletromagnética incidente de uma superfície perpendicular à radiação entrante no alto da atmosfera da terra, não a de saída na superfície solar.

1.4.3. Índices Geomagnéticos

Os índices geomagnéticos fornecem informações sobre o nível de atividade geomagnética 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, etc. Os índices mais utilizados na literatura são o K_p e a sua forma linear A_p ; 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, respectivamente.

1.4.3.1 Índice K_p

“O nome K_p origina de "planetarische Kennziffer" (= índice planetário). Este índice é obtido a partir de uma cadeia de magnetômetros dispostos ao longo do globo terrestre. O global K_p o índice é obtido como o valor médio dos níveis do distúrbio nos dois componentes horizontais do campo. É considerado um dia geomagneticamente calmo um dia com baixa atividade geomagnética, o qual pode ser caracterizado pelo índice planetário A_p , p ou K_p . É definido que um intervalo de três horas tem baixa atividade geomagnética, como um dia com índice planetário K_p inferior a 4” (Brum, 1999).

- Dia muito calmo, 0 até 1 K_p ;
- Dia calmo, 1 até 2⁻ K_p ;
- Dia normal, 2⁻ até 3⁺ K_p ,
- Dia perturbado, 3⁺ até 4⁺ K_p ;
- Dia muito perturbado, 4⁺ até 9 K_p .

Estes dias calmos, ou perturbados estão relacionados com a ionosfera e são coletados de oito em oito horas para se obter um bom entendimento do corpo físico da ionosfera.

1.4.3.2. Índice AE

Índice de eletrojato auroral é obtido a partir de medidas das componentes do campo magnético terrestre realizadas conjuntos de magnetômetros dispostos próximos de regiões aurorais. Ele representa a diferença entre envelope superior (AU, *upper*) e envelope inferior (AL, *lower*) de todos os registros da componente horizontal. Sua intensidade é proporcional ao depósito de energia cinética das partículas que se precipitam na região auroral.

1.4.3.3. Índice A_p

É uma medida do nível geral da atividade geomagnético sobre o globo por um dia (UT) dado. É derivado das medidas feitas em um número de estações ao longo do globo da variação do campo geomagnético devido às correntes que fluem na ionosfera da terra e, a pouca extensão, na magnetosfera da terra. Os valores "oficiais" para o Ap são calculados pelo Observatório *Adolf-Schmidt-* de *GeoForschungsZentrum Potsdam fur Geomagnetim*.

1.4.3.4. Índice Dst

O índice *Disturbance Storm Time* (Dst) é um índice geomagnético que monitora o nível de perturbações magnéticas com base em estações ao largo de médias e baixas latitudes. É construído calculando a média do componente horizontal do campo geomagnético obtido por magnetômetros em latitudes equatorial e médias ao longo do equador. Os valores negativos de Dst indicam que uma tempestade magnética está em andamento, Quanto mais negativo o Dst, mais intensa é a tempestade magnética. As deflexões negativas no índice de Dst são causadas pela corrente anelar do tempo da tempestade que flui nos cinturões de radiação de Van Hallen.

1.4.3.3. Componente 'Bz

Este parâmetro não é um índice magnético, este parâmetro é o componente norte-sul do campo magnético interplanetário. Ele está colocado nesta seção pela sua importância na conexão entre o campo magnético interplanetário e o campo magnético terrestre Quando ele é negativo, o eletrojato auroral se expande para latitudes mais baixas e ocorre um forte acoplamento energético do meio interplanetário com a magnetosfera terrestre, devido a reconexão (*reconnection*) dos campos magnéticos interplanetário e magnetosférico. Quando ele excursiona positivamente até tomar valores positivos, tal acoplamento diminui e o eletrojato auroral pode se retrair. Esse parâmetro é fundamental para a interpretação das perturbações ionosféricas e é obtido pelo satélite *International Sun-Earth Explorer* ISEE-3 de órbita *hallo*, isto é, num plano perpendicular à linha Sol-Terra.

1.5. Tempestades Magnéticas

Uma tempestade magnética é causada por explosões solares que emitem uma grande quantidade de partículas e radiação no espaço. Tais explosões estão associadas ao surgimento das manchas escuras na superfície do Sol e ocorrem ciclicamente, discutidas anteriormente. Na Terra, as tempestades magnéticas provocam uma compressão do campo magnético, interferindo em satélites, estações espaciais e comunicações por rádio, e causam tanto a aurora boreal como a aurora austral. Estes efeitos são devidos a conexão do campo magnético do Sol com o campo da Terra. Esta conexão magnética direta não é o estado normal do ambiente do espaço, mas quando as partículas carregadas viajam ao longo das linhas magnéticas, podem ser incorporadas à magnetosfera terrestre, gerar correntes, e fazer com que o campo magnético submeta-se à variação dependente do tempo. A figura 1.9 mostra a representação do campo magnético terrestre deformado pela interação do campo do Sol juntamente com a irradiação do campo magnético do Sol.

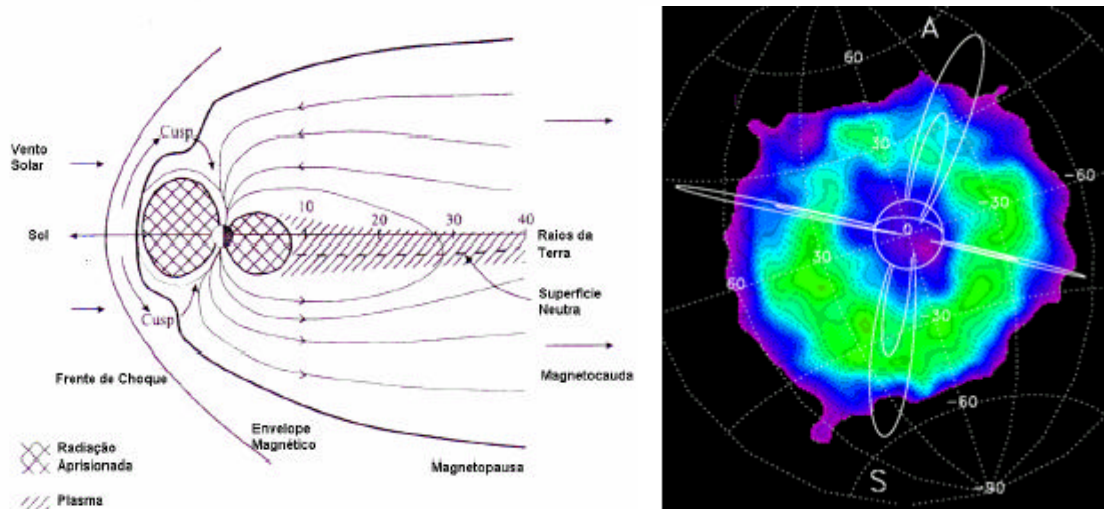


Figura 1.9 Representação do campo magnético terrestre deformado pela interação do campo do Sol (esquerda) e irradiação do campo magnético do Sol (direita).
Fonte: Maia (2005).

2.2. IONOSFERA

Neste trabalho, será mostrado o que é a ionosfera, como ela é formada, porque ela existe e não se deteriora, de que ela é formada, os fenômenos ocorridos, os nomes usados para sua classificação, como se divide a ionosfera, os tipos de instrumentos usados para seu estudo e o motivo pelo qual ela é importante para a tecnologia atual.

2.1 Definição de Ionosfera

A ionosfera é a camada ionizada da atmosfera que se localiza entre 60 e 1500 km de altitude como mostrado na figura 2.1. Ela é composta de elétrons e íons sob altas temperaturas, o plasma ionosférico, conforme mostrado na próxima sub-sessão, fazendo parte da atmosfera terrestre como um de seus constituinte minoritário. E, devido à sua composição, é capaz de refletir ondas de rádio de 0,5 até aproximadamente 30 MHz.

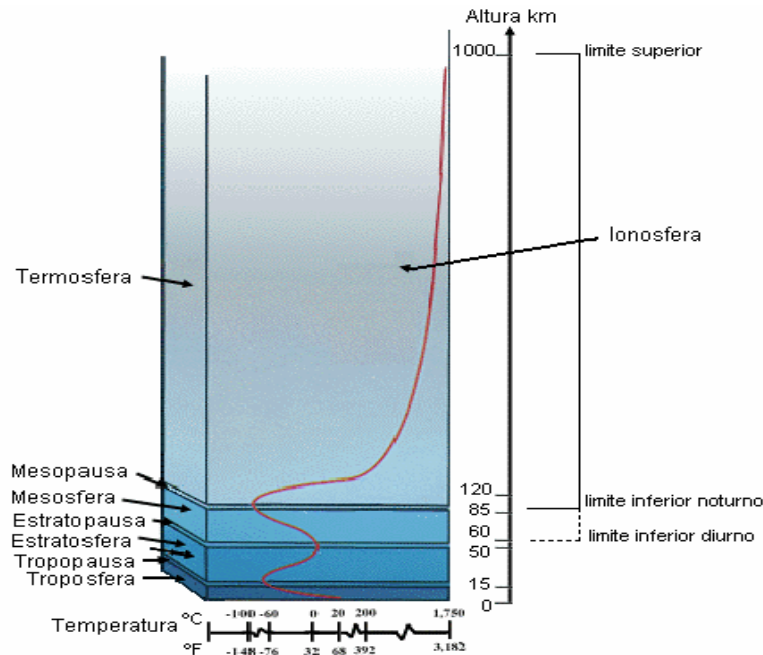


Figura 2.1 - Localização da ionosfera junto com as demais camadas atmosféricas em relação à temperatura.

Fonte: Clink (2006).

O maior agente de ionização da ionosfera é o Sol, cuja radiação na faixa dos Raios-X e na faixa do ultravioleta (especialmente extra-ultravioleta EUV), ioniza os constituintes da atmosfera neutra aumentando a quantidade de elétrons livres na ionosfera. Os meteoritos e raios cósmicos também são responsáveis pela presença secundária de íons na região E, discutida a seguir. Na ionosfera a densidade de elétrons livres é variável de acordo com a hora do dia, estação do ano, e de acordo com variações da composição da atmosfera neutra. Ela também varia de acordo com o ciclo solar de 11 anos.

A composição da atmosfera a partir dos cem quilômetros de altitude, embora tênue, varia. Os gases O_2 ; O ; N_2 ; N na alta atmosfera estratificam-se de acordo com sua própria escala de altura e absorvem radiações, cujo nível de absorção varia conforme sua densidade. A densidade de ionização varia proporcionalmente com a altura formando desta forma camadas de absorção distintas e variáveis, conforme a hora do dia, temperatura e irradiação solar. Nas zonas mais baixas da atmosfera, os elétrons livres e íons tendem a desaparecer. Isto ocorre devido à maior densidade de partículas, portanto, a recombinação prevalecerá sobre a ionização. A densidade dos gases nas zonas mais altas é muito baixa.

Com relação à propagação de ondas eletromagnéticas no plasma ionosférico, ele se comporta analogamente como ondas sônicas dentro de fluidos de diferentes densidades. Ora refletindo, ora refratando, ora sem oferecer resistência alguma. No plasma ionosférico encontramos condutividade iônica (e eletrônica) e permissividade eletromagnética, isto é, em alguns momentos parece se comportar como um condutor, em outros pode se comportar como um condutor sintonizado em determinadas frequências podendo refletir determinados comprimentos de onda praticamente quase sem perdas, absorver outros comprimentos de onda inutilizando totalmente a propagação destas.

2.2. Camadas da Ionosfera

Como já foi mencionado anteriormente, a formação da ionosfera depende da disposição dos elementos da atmosfera neutra e da ação dos agentes ionizantes solares como os Raios-X e a radiação Ultravioleta (UV) e Extremo-Ultravioleta (EUV). Como agentes ionizantes estão relacionadas com a posição da Terra em relação ao Sol, a densidade eletrônica em uma determinada latitude e longitude depende da hora do dia. E como a disposição dos elementos da atmosfera neutra esta relacionada com seu peso molecular e atômico, acima da região de equilíbrio difusivo há uma tendência para que a ionosfera separe-se em camadas.

A nomenclatura adotada para as camadas iônicas da ionosfera são: D; E; F. A camada F ainda se divide em duas: F₁; F₂. É importante lembrar que as camadas de ionização da ionosfera variam conforme a hora do dia, estações do ano e condições solares.

2.2.1 Camada D

Esta é a mais baixa das camadas situando-se entre os 50 e os 80 km e 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. Em proporções bem pequenas 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.

2.2.2 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 N₂, O₂, e O. Encontram-se também grande número de NO. As radiações EUV são absorvidas pelo oxigênio molecular para formar O₂. A região E é importante pela presença de correntes elétricas que nela fluem e sua interação com o campo magnético.

2.2.3 Camada F1

Esta camada situa-se entre 120 e 200 km e somente 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 N₂ e o íon majoritário é o O⁺.

2.2.4 Camada F2

Esta é a mais alta das camadas ionosféricas, 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^+ e H^+ . É nesta camada que ocorre um dos fenômenos de bastante interesse para a comunidade científica, as bolhas ionosféricas, que serão descritas nas próximas seções. A altitude do pico da camada F_2 varia conforme a hora do dia, época do ano, condições magnética calma ou perturbada e ciclo solar. A propagação e reflexão obedecem a estas variáveis.

2.3 Histórico das Pesquisas Ionosféricas no Brasil

No Brasil a pesquisa da ionosfera é principalmente executada pela Divisão de Aeronomia do INPE. Os estudos ionosféricos iniciaram em 1963, através da recepção de sinais de satélites. Em 1973, em Cachoeira Paulista, SP, a pesquisa através de ionossondas teve seu aprimoramento com os dados coletados. Em 1975, em Fortaleza, Ceará foram instalados equipamentos de pesquisa, entre estas antenas transmissoras e ionossondas de grande precisão. Em 1984, o Ministério da Aeronáutica brasileiro autorizou o CTA a efetuar experiências e sondagens com foguetes ionosféricos e equipamentos desenvolvidos pelo INPE. Existem inúmeros métodos para realizar medidas de propriedades ionosféricas através dos efeitos que atingem as ondas propagantes nesta camada. Alguns se baseiam em experimentos de rádio-propagação com aparelhagem no solo, outros envolvem propagação de ondas entre o solo e foguetes ou satélites. Os métodos mais usados serão descritos no decorrer do relatório.

2.4 Fenômenos Ionosféricos e Magnéticos

Diversos tipos de fenômenos ionosféricos e magnéticos são observáveis em varias latitude da ionosfera sobre o território brasileiro. Alguns destes fenômenos são capazes de alterar significativamente as características da ionosfera onde estão inseridos. A seguir serão apresentados alguns exemplos dos fenômenos que podem ser observados na ionosfera sobre o território brasileiro. Também discutiremos o fenômeno da anomalia magnética.

2.4.1 O Eletrojato Equatorial

Consiste numa corrente elétrica que circula ao longo do equador magnético terrestre, a uma altitude de aproximadamente 110 km, numa faixa de aproximadamente 60 km de largura centrado entorno dele. Ela atravessa o Brasil em direção aproximadamente leste-oeste. Esse equador é definido como uma linha imaginária que circula a Terra na região equatorial passando pelos pontos onde a linha de força do campo geomagnético torna-se horizontal. Ele não coincide com o equador geográfico, porém circula o globo terrestre próximo a ele. A importância do eletrojato equatorial é que nele se origina o sistema de forças elétricas que regem a distribuição do plasma ionosférico em baixas latitudes, e assim influi nas características da radiopropagação.

2.4.2 A Anomalia Equatorial ou Anomalia Appleton

Consiste em duas faixas localizadas nas regiões tropicais que circulam paralelamente ao equador magnético cujas densidades de plasma ionosférico é maior que a densidade de plasma no equador magnético. O campo elétrico do dínamo ionosférico, que controla o eletrojato, é o responsável pela formação desta anomalia ionosférica, caracterizada pela ocorrência de dois picos na densidade de plasma, localizados em baixas latitudes. O campo elétrico do eletrojato, na presença do campo magnético horizontal, causa uma deriva ascendente do plasma no equador magnético. Nas regiões superiores, quando a força causadora da deriva deixa de dominar, o plasma tende a se precipitar por gravidade. Como a condutividade é muito maior nas direções das linhas de campos magnético, a precipitação não é perfeitamente vertical, ela tende a seguir a linha de campos. Deste modo, o plasma que foi elevado pelo efeito fonte no equador, se precipita em regiões ao norte e ao sul, afastado do centro da fonte, devido à configuração do campo magnético.

Na figura 2.2 apresentamos um mapa global onde podemos ver distribuição em latitude e longitude do conteúdo eletrônico total. Nesta figura fica evidente que a maior concentração de densidade eletrônica esta localizada entre, aproximadamente, 10-15 graus em torno do equador magnético. Observamos ainda que a anomalia ocorre principalmente durante o dia, sendo praticamente imperceptível nos horários noturnos. Nesta figura, que foi obtida para as 19 h (UT), o ponto subsolar deve estar próximo à costa oeste das Américas.

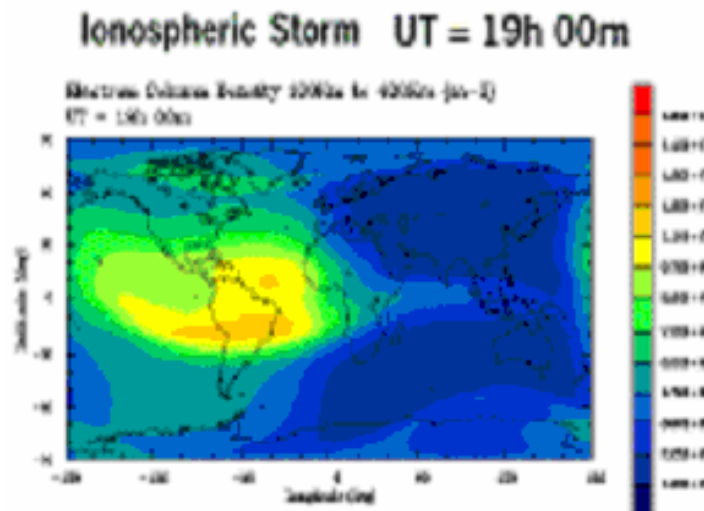


Figura 2.2 – Mapa da região geomagnética afetada pela anomalia geomagnética brasileira.
Fonte: IPS Radio & Space Services (2006).

2.4.3 Bolhas Ionosféricas

As bolhas se formam devido a perturbações que ocorrem na região abaixo da densidade máxima no perfil de densidade eletrônica da região F, na presença de condições favoráveis, tais como: ventos meridionais e derivas verticais que tendem a elevar a camada F. As bolhas apresentam densidade reduzida em relação à densidade ambiente e

são alinhadas às linhas de campo magnético. Para observar estas camadas e os fenômenos mencionados, o INPE possui uma rede de digissondas.

2.4.3.1 A Formação das Bolhas

A Teoria de Rayleigh-Taylor explica como pequena instabilidade na base da região F ionosférica pode gerar 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 ionosféricas (Santana, 2001).

O período de maior observação das bolhas tem início em outubro e segue até março, mas seu pico ocorre nos meses de dezembro e janeiro, sendo praticamente inexistente entre abril e setembro. Os processos conhecidos de formação de bolhas ionosféricas são processos que favorecem a geração de bolhas somente no período noturno, após o pôr-do-sol. A ocorrência de bolhas é na região equatorial porque os mesmos processos que limitam o seu aparecimento no período noturno são eficientes somente nesta região.

Elas formam abaixo do pico de densidade eletrônica da região F, a uma altura de aproximadamente 250 km e migram para o leste ao mesmo tempo em que se elevam, podendo atingir uma altura máxima superior a 1500 km na região do equador.

A figura 2.3 mostra o movimento das bolhas ionosféricas sobre a região brasileira. A metade mais clara do globo terrestre na ilustração representa o dia e a parte mais escura representa a noite. Observe que as bolhas se deslocam para leste, acompanhando o equador magnético terrestre. Elas se formam logo após o pôr do sol e aumentam de tamanho, à medida que se deslocam para leste, tomando dimensões trans-equatoriais. Elas ocorrem apenas no setor noturno. As extremidades das bolhas encontram-se em pontos geomagneticamente conjugados, os quais estão localizados em pontos aproximadamente simétricos em relação ao equador geomagnético.

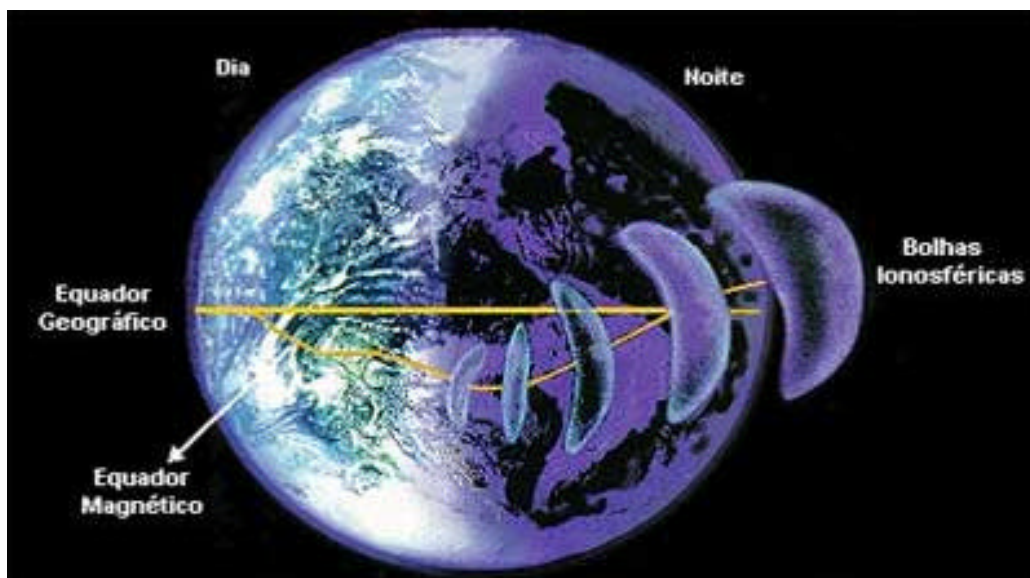


Figura 2.3 – Movimentação das bolhas de plasma.

Fonte: Abdu (2006).

A partir de 1984, a Divisão de Aeronomia do INPE desenvolveu cerca de 11 cargas úteis para foguetes nacionais e estrangeiros para experimentos ionosféricos, em colaboração com o Centro Técnico Aeroespacial (CTA). Em três desses experimentos, os foguetes passaram por dentro das bolhas e mediram seus campos elétricos e sua composição de elétrons. Como a descoberta do fenômeno das bolhas é relativamente recente e requer maiores estudos, as causas que originam esse fenômeno ionosférico ainda não são completamente conhecidas. Mas Abdu (1993) apresenta uma interessante revisão do que já se conhece sobre este fenômeno.

2.4.4 A Anomalia Geomagnética Brasileira

Localiza-se sobre o continente latino americano, onde a intensidade do campo magnético terrestre, ou campo geomagnético, é mais fraca que em qualquer outra parte do globo terrestre. Tal propriedade se deve à excentricidade do eixo do dipolo magnético terrestre. Nessa região podem ocorrer fortes precipitações de partículas (prótons e elétrons) oriundas principalmente do cinturão de radiação de Van Allen.

A região equatorial brasileira possui um máximo no valor da declinação magnética, o qual acarreta que o comportamento sazonal das anomalias e das ocorrências das bolhas apresente, no setor brasileiro, características bem distintas daquelas encontradas em outros setores longitudinais da Terra. (Bertoni et al., 2006)

2.5 Reflexão Ionosférica

A reflexão ionosférica é explorada por sistemas de rádio e telecomunicação como será descrito neste trabalho. As propriedades operacionais das ionossondas (sistemas compostos de transmissores, receptores e antenas direcionais apontadas diretamente para a ionosfera) propiciam um conhecimento do comportamento da região.

O princípio da reflexão ionosférica em ângulos altos é utilizado há muitos anos para pesquisas espaciais. O efeito ocasionado por inúmeras camadas sucessivas de ionização leva à reflexão das ondas de rádio. Este efeito ocorre sobre uma faixa de alturas estreita e em frequências na faixa do HF (Alta Frequência), onde, ou os raios refratam, ou refletem. No caso da refração a distância atingida por estes é apreciável, chegando a milhares de quilômetros. No caso da reflexão, esta não ultrapassa a algumas centenas de quilômetros. A maior frequência possível onde pode ocorrer o fenômeno da reflexão ionosférica é denominada Máxima Frequência Utilizável.

Outro processo que pode ocorrer é o espalhamento fraco e incoerente de energia devido às flutuações térmicas e aleatórias da densidade eletrônica no plasma ionosférico. Este espalhamento tem sua eficiência aumentada pelas irregularidades ionosféricas e pelo aumento da densidade iônica. Estas irregularidades dão origem a sinais de espalhamento direto e sinais de retroespalhamento. No caso da reflexão direta, não há canalização, já no caso do espalhamento, ocorre a refração e a canalização ou dutificação dos sinais. Na maioria das vezes, a canalização de sinais as grandes distâncias ocorre em altura de ionização reduzida. A probabilidade desta é de ocorrer nas camadas E e F, em alguns casos com ecos percorrendo toda a circunferência da Terra.

A reflexão ionosférica pode levar ao fenômeno da cintilação (figura 2.4), isto ocorre devido à atuação dos sinais perante as irregularidades ionosféricas que atua como uma tela de fase variável nos sinais transionosféricos de fontes. Esta tela eletrônica dá origem a efeitos de difração com cintilação de amplitude, ângulo de chegada e fase.

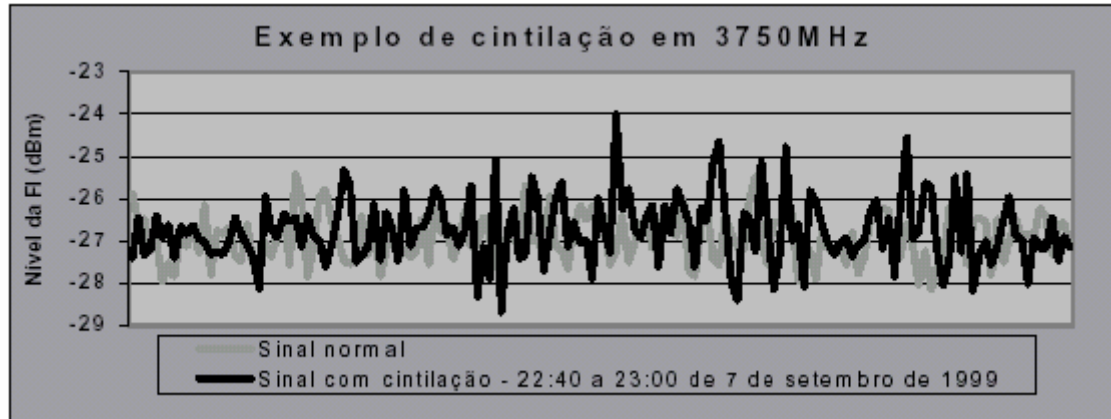


Figura 2.4 – Exemplo de cintilação em sinais de frequência 3,75 GHz, obtido entre as 22 h 40 min e 23 h do dia 7 de setembro de 1999.

Fonte: Saramago (2006)

CAPÍTULO 2

INSTRUMENTAÇÃO

Neste capítulo serão descritos alguns sistemas dos sondadores digitais (digissondas), os quais foram utilizados para a realização deste estudo. Sobre esse equipamento serão descritos alguns detalhes sobre seu funcionamento e uma breve explicação sobre os dados coletados e sobre o programa de análise de dados. Também será mostrado um resumo da visita técnica no INPE de Cachoeira Paulista para o estudo da digissonda instalada nesse observatório.

1. Digissonda

O Radar de Sondagem Ionosférica Digital (figura 2.1) é um tipo de radar que emite pulsos de energia eletromagnética em frequências variáveis entre 0.5 MHz a 30 MHz, com potência de pico da ordem de 10 kW e potência média em torno de 500 W. A operação deste equipamento tem como objetivo principal fornecer dados para a análise do comportamento da densidade de elétrons das camadas E e F da ionosfera.



Figura 2.1 – Foto da digissonda de São Luís –MA.
Fonte Cunha Neto (2006)

O sistema integrado consiste de um receptor, um transmissor, uma chave de antenas, computadores, periféricos, antenas transmissoras (figura 2.2 a) e receptoras (figura 2.2b) que utilizam pulsos de alta frequência transmitidos verticalmente para a camada ionosférica através de uma antena transmissora tipo Delta, com cargas resistivas de 600 Ohms com derivação central, e recebe os sinais refletidos através de quatro antenas receptoras tipo *turnstyle*, onde após a recepção os sinais são gravados e processados, mostrando os parâmetros ionosféricos e perfil da densidade de elétrons através de ionogramas.

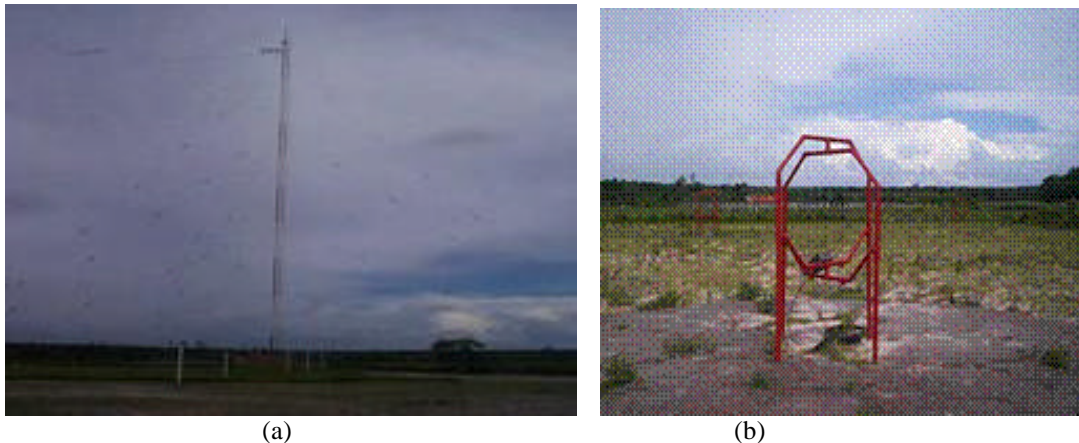


Figura 2.2 – (a) Foto da antena transmissora da digissonda. (b) Foto da antena receptora digissonda de São Luís –MA.
Fonte Cunha Neto (2006)

2. Dados Coletados

Os dados coletados pela digissonda são, essencialmente, ecos do sinal refletidos pelas camadas ionosféricas. A seqüência destes ecos recebidos, organizado adequadamente, produz o um registrado denominado ionogramas (Figura 2.3 a- b), gráficos da variação da altura virtual de reflexão em função da freqüência do sinal emitido. O software usado para a sua interpretação é o *ARTIST*. Anomalias como as bolhas de plasma são caracterizadas por espalhamentos nos traços da região F (*Spread F*). O aparecimento de bolhas de plasma tem influência direta nas comunicações transionosféricas. As bolhas podem causar degradação do sinal que as atravessa, provocando erro de interpretação de sinais recebidos ou até a perda de sinal.

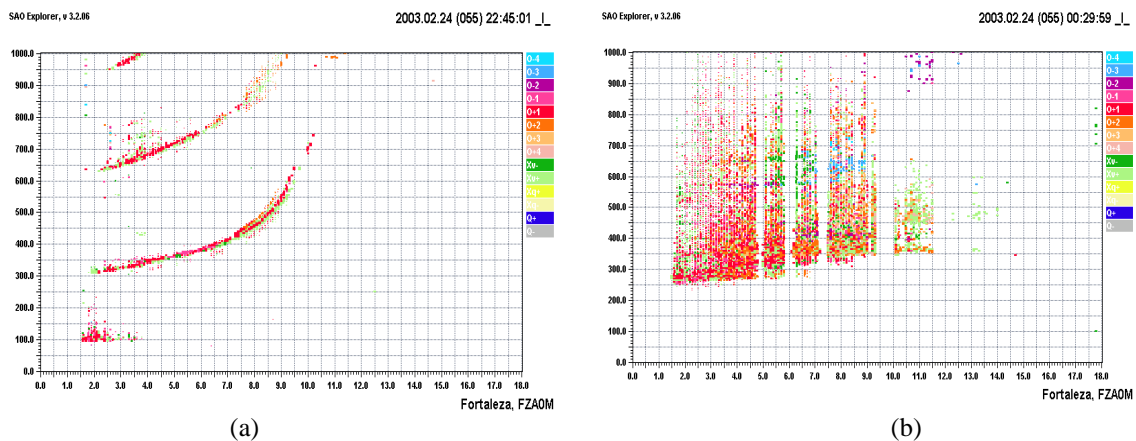


Figura 2.3 – a. Imagem do ionograma mostrando a Região F sem espalhamento.
b. Imagem do ionograma mostrando um espalhamento na Região F.

3. Programa de Análise

O programa de análise utilizado é o *SAO-Explorer* (SAO-X), visto na figura 2.4. 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 freqüência crítica da onda ordinária da camada F1;
- foF2 freqüência crítica da camada F2. É a freqüência 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;
- hpF2 é uma estimativa da altura do pico da camada F2 obtida a partir de uma aproximação parabólica para a forma dessa camada; e
- hmF2 altura do pico da camada F.

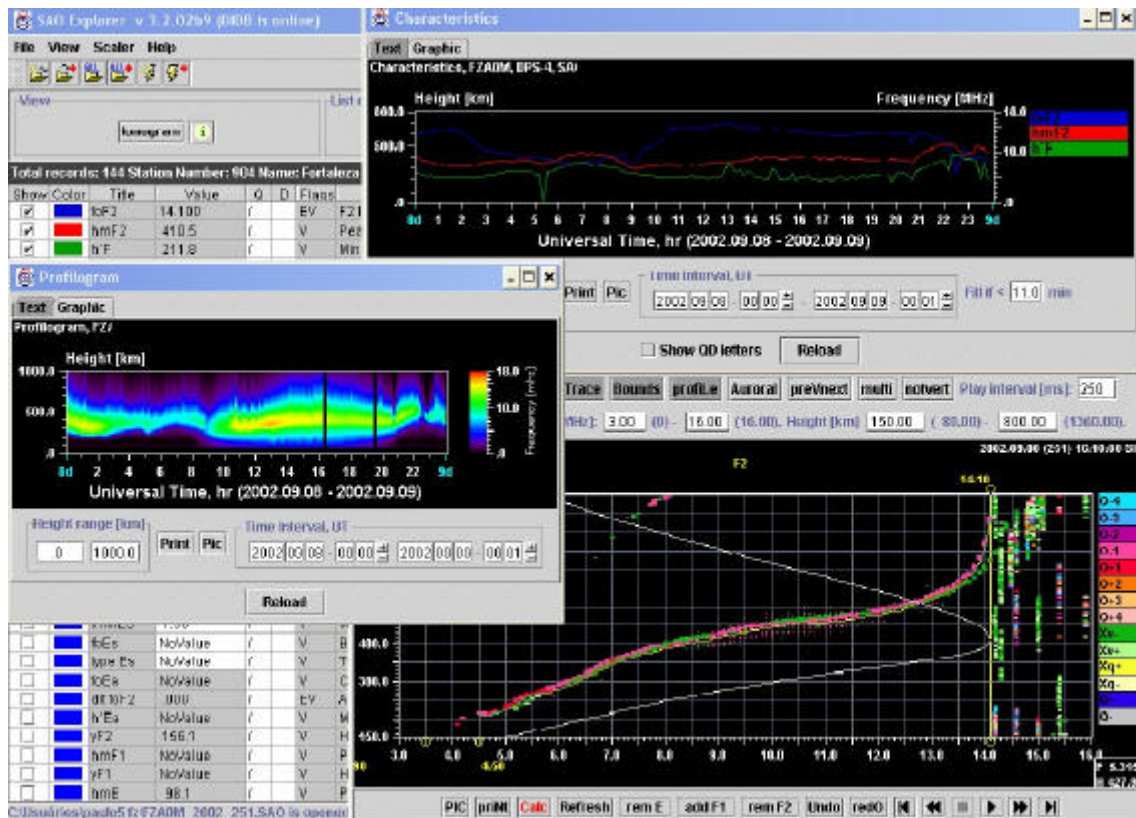


Figura 2.7- Ilustração do programa SAO Explorer onde são visualizadas as diversas telas para manipulação e visualização dos ionogramas e parâmetros ionosféricos.

CAPÍTULO 3

ATIVIDADES DE PROCESSAMENTO, REDUÇÃO DE DADOS E ATIVIDADES COMPLEMENTARES

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 da estação de digissonda escolhida, as simulações realizadas com o modelo IRI e as atividades complementares de formação do bolsista.

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.

Com relação às 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.

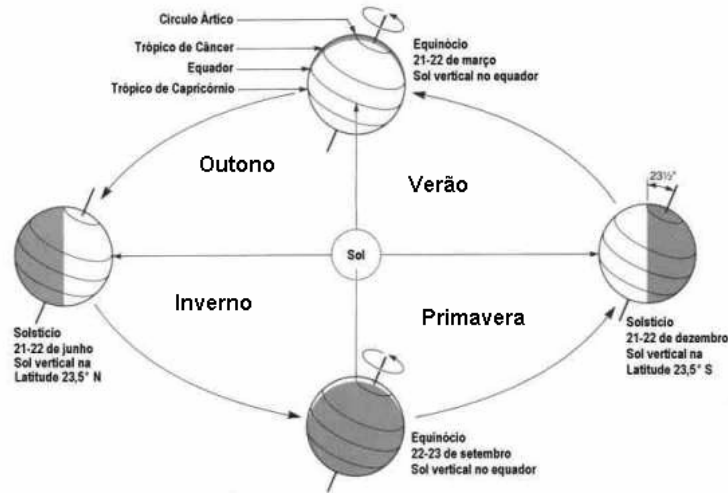


Figura 3.1 – Imagem mostrando os solstícios e equinócios para a divisão dos dias trabalhados na redução de dados.

Fonte: Grimm (2006)

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 2 e 3. A tabela 2 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. Os dias em negrito na tabela foram aqueles cujos dados de digissonda foram reduzidos pelo bolsista.

TABELA 2 – 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 apresenta os dias selecionados para análise, classificados de acordo com atividade magnética e de acordo as estações, para o sítio de Fortaleza, em Ceará. Estes dias foram selecionado e reduzidos pelo bolsista para o desenvolvimento do trabalho

intitulado “Estudo Sazonal da Formação de Bolhas de Plasma”, o qual foi apresentado no 13º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP.

TABELA 3 – Dias selecionados para análise, classificados de acordo com atividade magnética e de acordo as estações, para Fortaleza – CE (3,5° S, 38,2° O)

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

2. Resultados do Processamento dos Dados Reduzidos

A partir da seleção destes dias apresentados na tabela 3, os dias efetivamente reduzidos (marcados em negrito) foram processados pelo bolsista. Utilizando-se o software SAO-X, mencionado no capítulo 2, o bolsista redefiniu os parâmetros ionosféricos, tais como, o foF2 e hmF2, 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 3.8) contendo diversos ionogramas para os dias efetivamente reduzidos pela bolsista do ano de 2003.

Survey, SAO Explorer, v 3.2.06

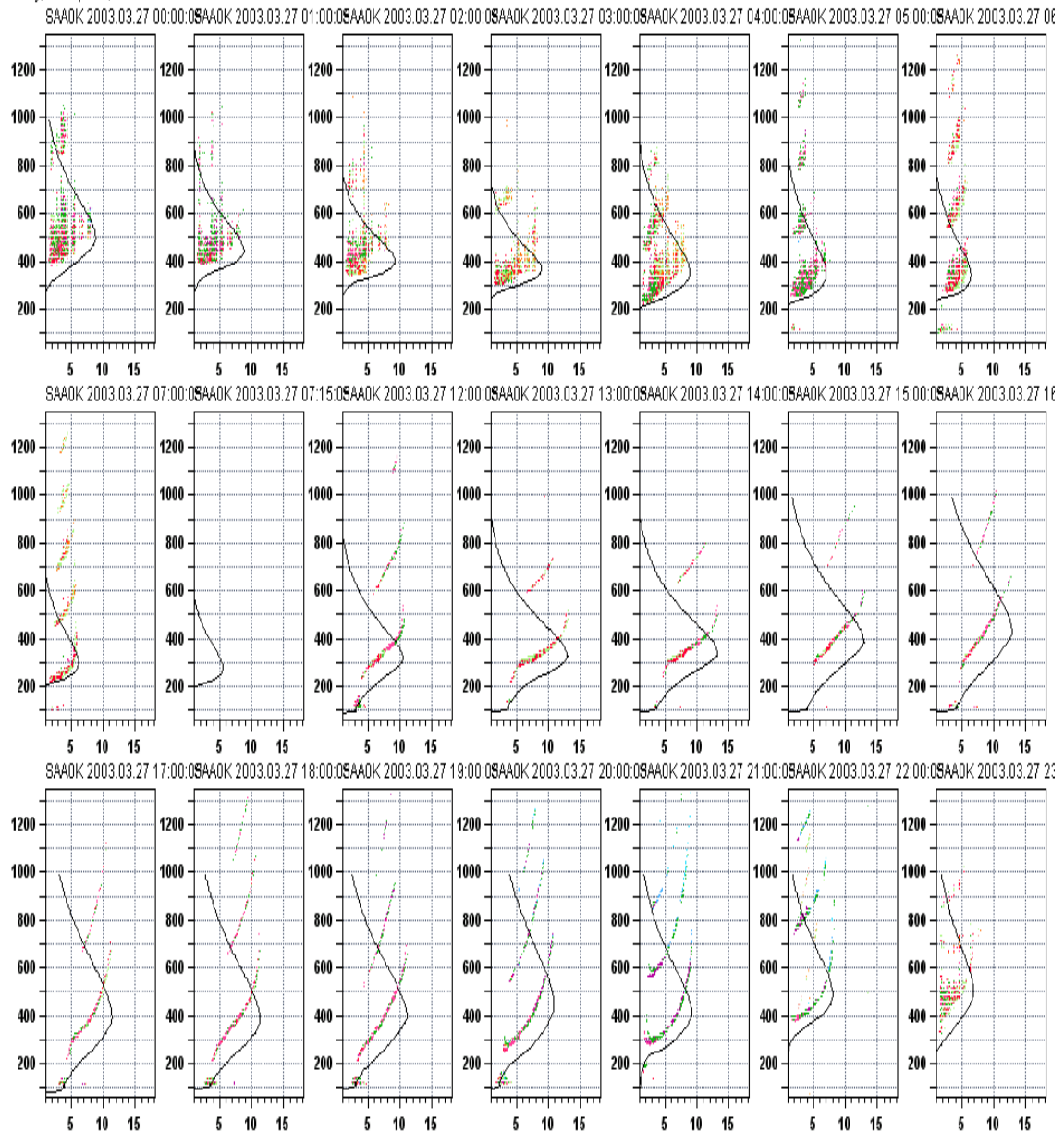


Figura 3.2 – Série de Ionogramas obtidos no dia 27 de março de 2003 no sítio de São Luís – MA, reduzido no SAO-X.

Survey, SAO Explorer, v 3.2.06

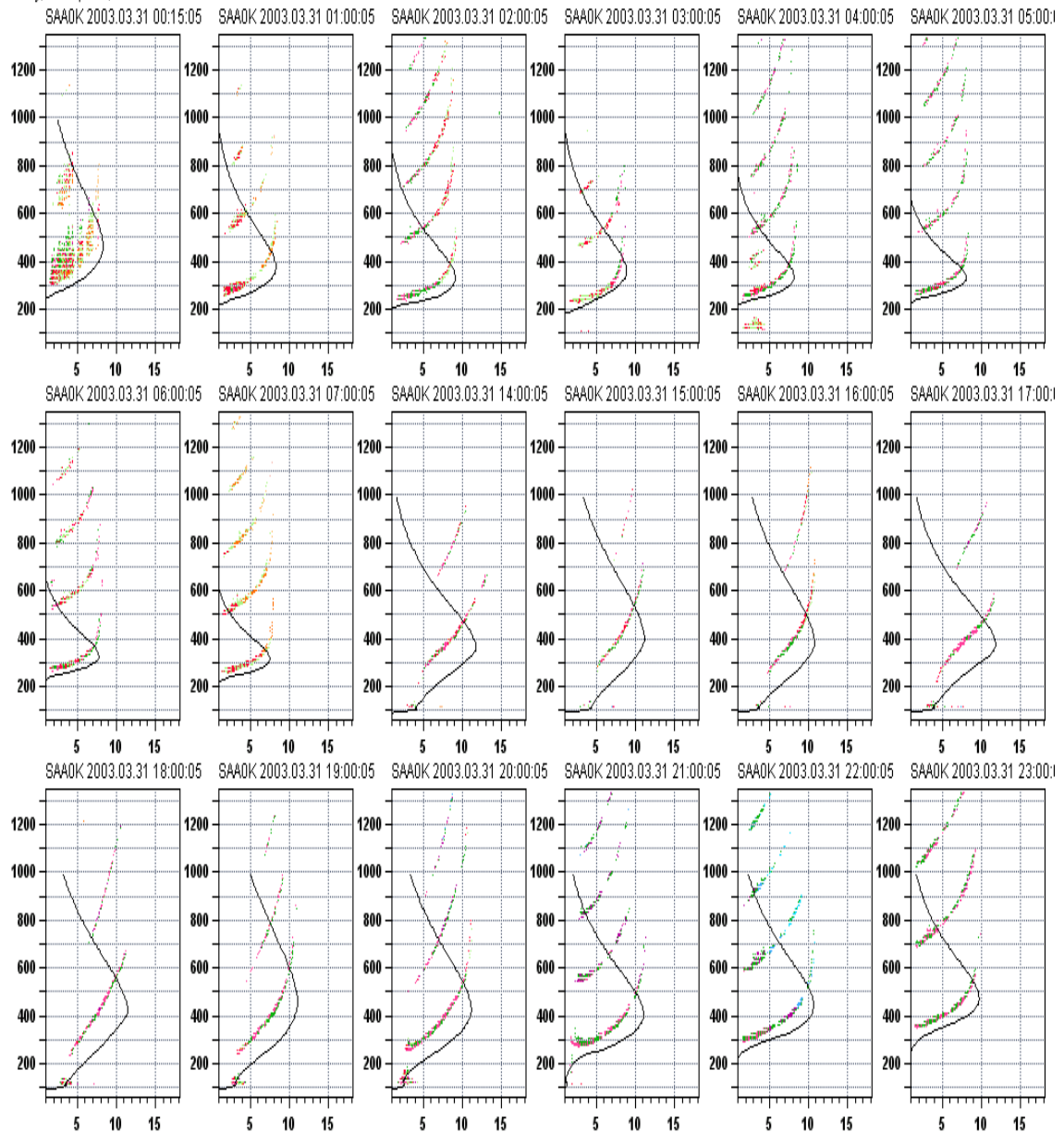


Figura 3.3 – Série de Ionogramas obtidos no dia 30 de março de 2003 no sítio de São Luís – MA, reduzido no SAO-X.

Survey, SAO Explorer, v 3.2.06

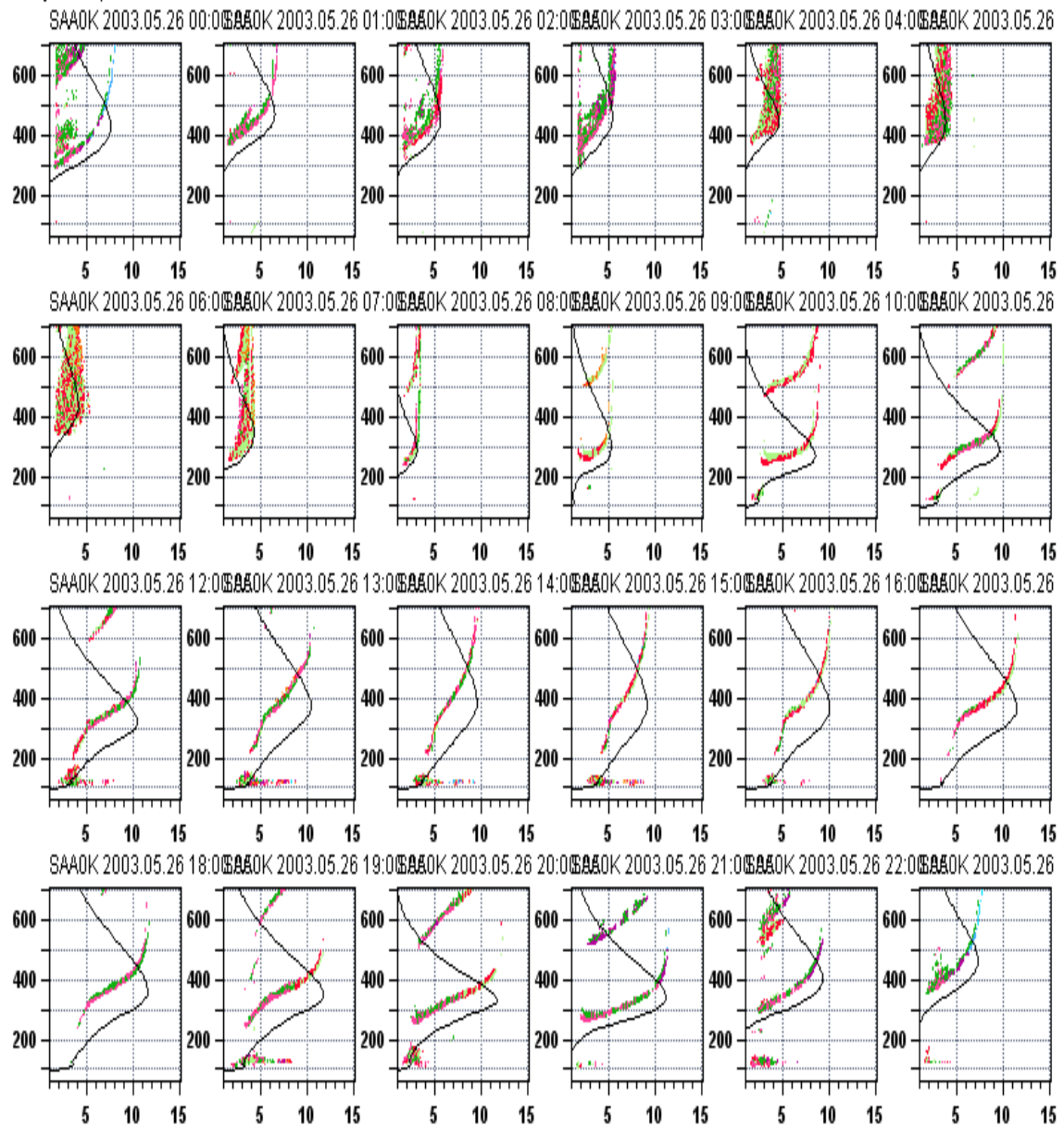


Figura 3.4 – Série de Ionogramas obtidos no dia 26 de maio de 2003 no sítio de São Luís – MA, reduzido no SAO-X.

Survey, SAO Explorer, v 3.2.06

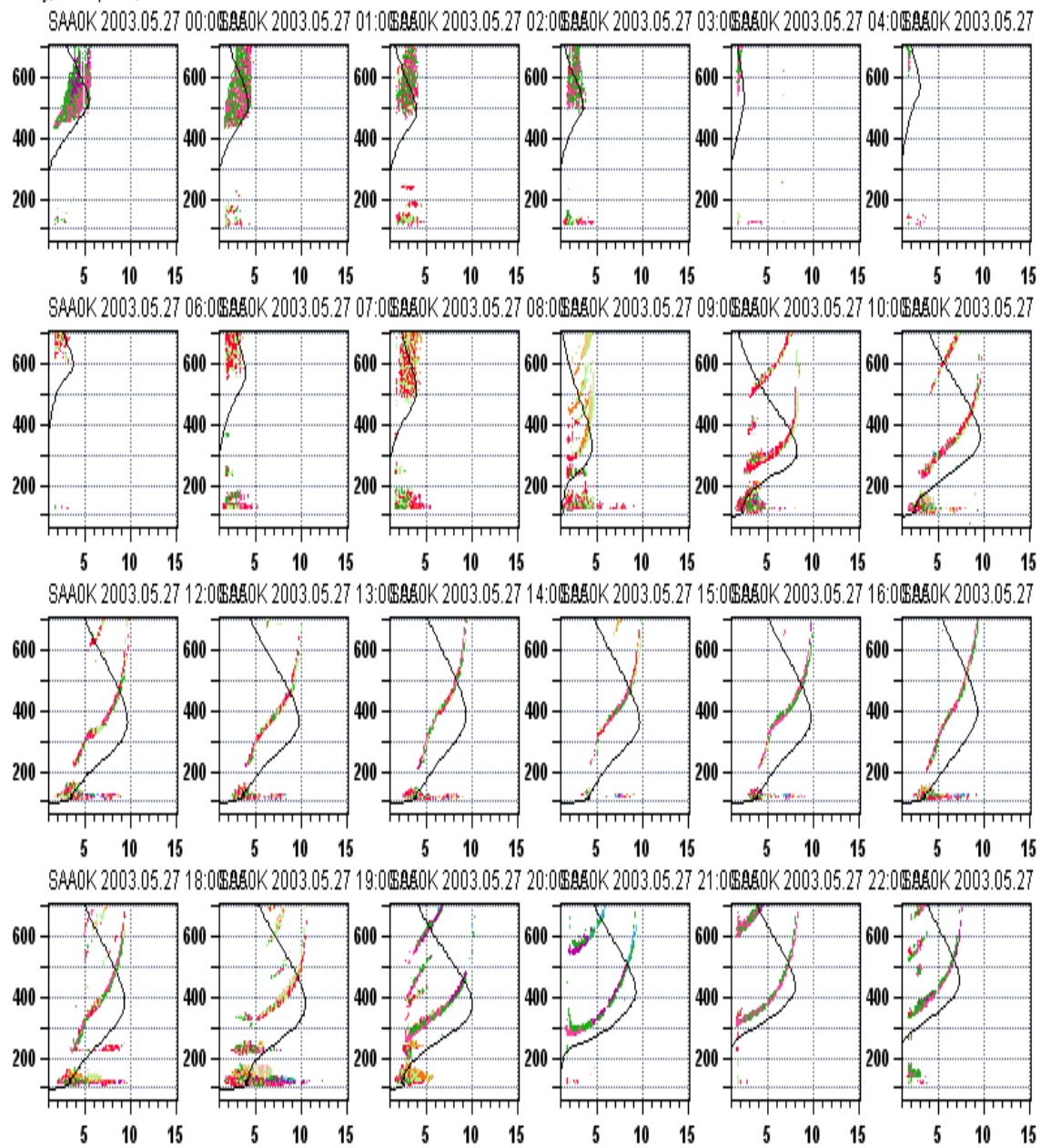


Figura 3.5 – Série de Ionogramas obtidos no dia 27 de maio de 2003 no sítio de São Luís – MA, reduzido no SAO-X.

Survey, SAO Explorer, v 3.2.06

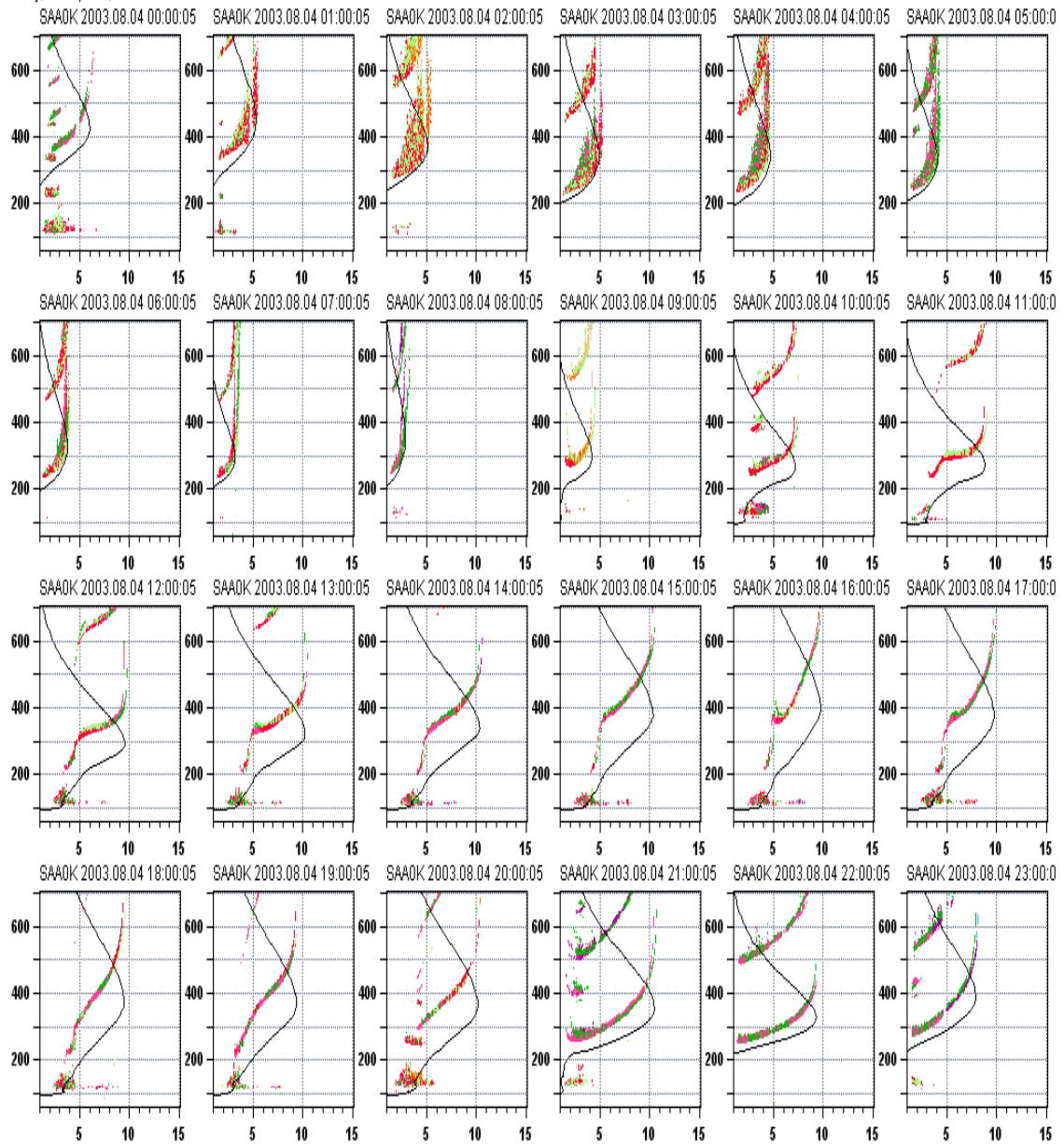


Figura 3.6 – Série de Ionogramas obtidos no dia 05 de agosto de 2003 no sítio de São Luís – MA, reduzido no SAO-X.

Survey, SAO Explorer, v 3.2.06

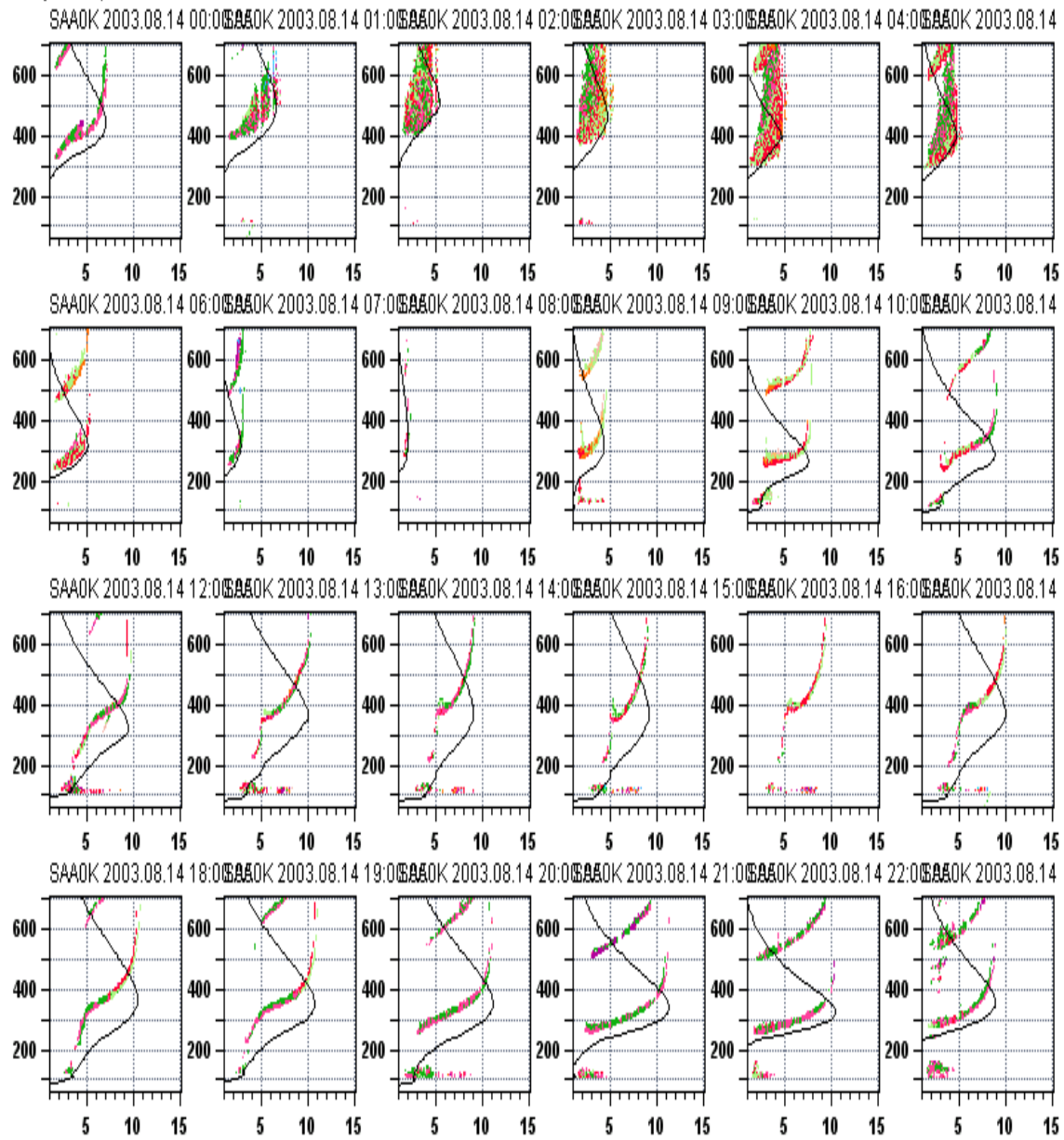


Figura 3.7 – Série de Ionogramas obtidos no dia 14 de agosto de 2003 no sítio de São Luís – MA, reduzido no SAO-X.

Survey, SAO Explorer, v 3.2.06

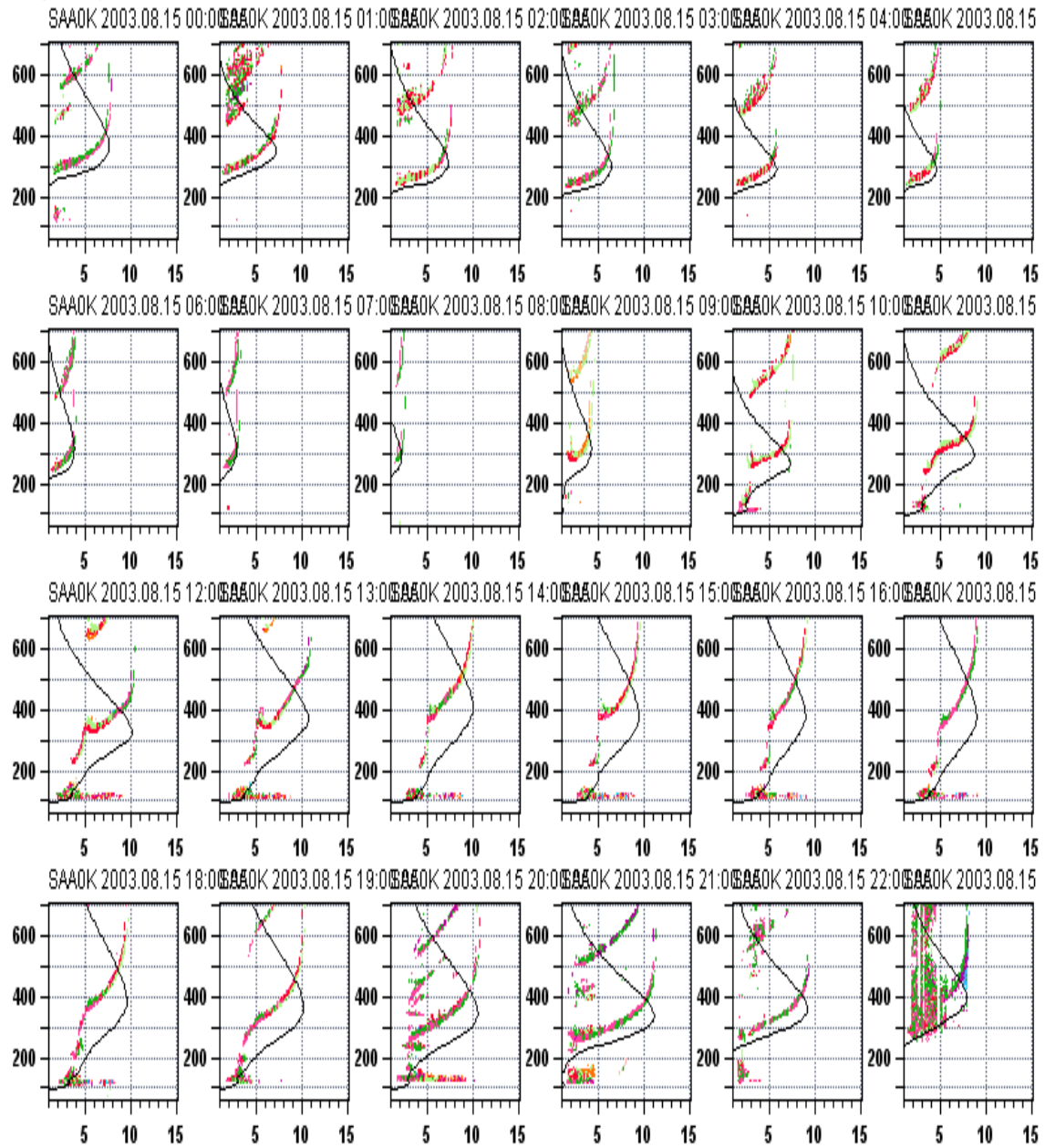


Figura 3.8 – Série de Ionogramas obtidos no dia 15 de agosto de 2003 no sítio de São Luís – MA, reduzido no SAO-X.

2. Simulação Numérica

Nesta seção vamos apresentar, de forma sucinta, o modelo ionosférico que foi utilizado para simular os perfis de densidade eletrônica e os parâmetros ionosféricos que estão sendo comparados com as medidas dos mesmos parâmetros pelo sondador digitais. Também são apresentados alguns exemplos de “saídas” das simulações e de perfis simulados.

2.1 O Modelo *International Reference Ionosphere* (IRI)

O IRI é um projeto internacional patrocinado pelo Comitê de Pesquisa Espacial (COSPAR) e pela União Internacional de Rádio Ciência (URSI). Estas organizações deram forma a um grupo de trabalho para produzir um modelo padrão empírico da Ionosfera, baseado em todas as origens dos dados de disponíveis. Diversas edições melhoradas do modelo estão sendo liberadas. Para determinada posição, hora e data, o IRI descreve a densidade eletrônica, a temperatura eletrônica, a temperatura na atmosfera neutra, e a composição eletrônica na escala da altura de entre 50 km até 2000 km. Fornece médias mensais na ionosfera para condições magnéticas calmas. As origens dos dados de principais são a rede global das ionossondas, os radares incoerentes (*Jicamarca, Arecibo, Malvern, St. Santin*), os sondadores de topo a bordo dos satélites de ISIS e de *Alouette*, e em instrumentos dos diversos satélites e foguetes. O IRI é atualizado anualmente durante workshops especiais (por exemplo, durante o COSPAR). Diversas extensões estão sendo planejadas, como por exemplo, a inclusão de modelos para a deriva iônica, uma melhor descrição das ionosferas auroral e polar e a consideração de efeitos de tempestades magnéticas.

2.2 Exemplos de Simulações Realizadas

O modelo IRI fornece como resultados de sua simulação a densidade ionosférica, variação percentual da composição iônica, as temperaturas eletrônicas, iônicas e da atmosfera neutra, entre outros parâmetros. Na figura 4.9 apresentamos um exemplo de saída do modelo IRI, onde observamos a variação com alturas destas quantidades descritas acima. Esta simulação foi feita para a região de São Luís (2°31' S, 44°16' O), para o dia 1 de janeiro de 2003.

Na primeira coluna desta simulação o modelo oferece a altura em quilômetros. Na segunda coluna temos a densidade eletrônica que é medido em centímetros cúbicos. A terceira coluna refere-se à temperatura. A quarta coluna tem como função mostrar o percentual de cada um dos íons relacionados em sua altitude. A última camada mostra o conteúdo eletrônico total (TEC), que no caso não foi requisitado para o modelo IRI fornecer. E, conforme, estabelecido no projeto inicial foram realizadas simulações para diversos dias nos quais a digissonda operou observando os parâmetros ionosféricos. A tabela 4 abaixo mostra os dias que foram simulados pelo bolsista.

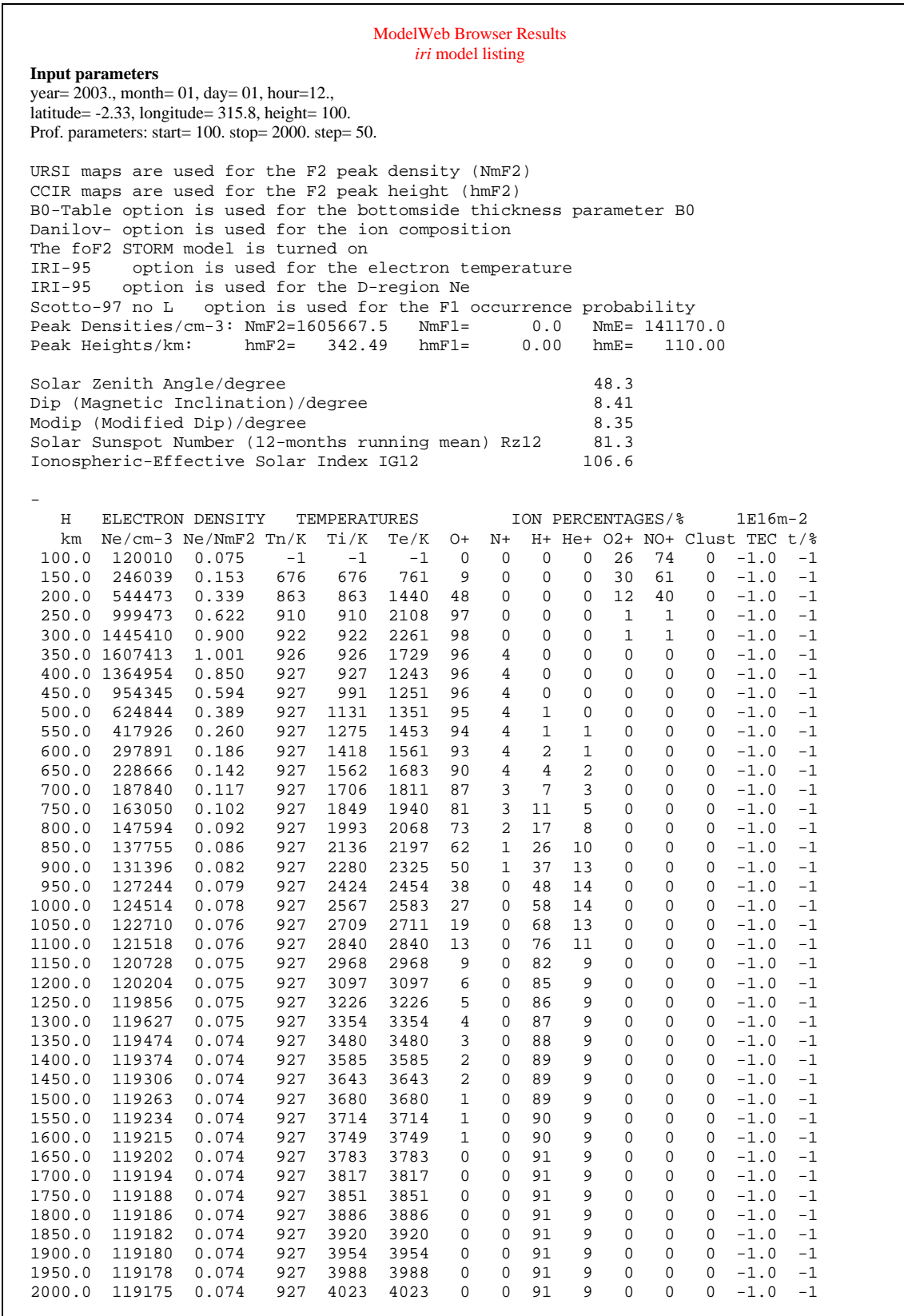


Figura 4.9 – Exemplo de saída de dados do modelo IRI para a região de São Luís para o dia 01 de janeiro de 2003.

Tabela 4 – Dados dias simulados pelo bolsista com o modelo IRI para a localização de São Luís – MA.

Condição	Estação	Meses	Dias
Calma	Solstício de Verão	Dezembro	17
	Solstício de Inverno	Agosto	04
	Equinócio de Primavera	Agosto	15
	Equinócio de Outono	Março	25
Perturbada	Solstício de Verão	Janeiro	20
	Solstício de Inverno	Maio	27
	Equinócio de Primavera	Outubro	21
	Equinócio de Outono	Março	27

2.3 Exemplo de Perfil de Densidade Eletrônica

Nesta seção vamos apresentar alguns exemplos de perfis de densidade eletrônica simulados com o modelo IRI para os dias apresentados na tabela 4, acima. Na figura 4.10 apresentamos um perfil de densidade eletrônica obtido no dia 20 de janeiro de 2003 para o sítio de São Luís – MA. Esta figura esta colocada para estudo comparativo com os perfis apresentados na figura 3.2, que mostra perfis semelhantes, os quais foram obtidos dos dados de digissonda pelo *Artist* para o mesmo dia de análise.

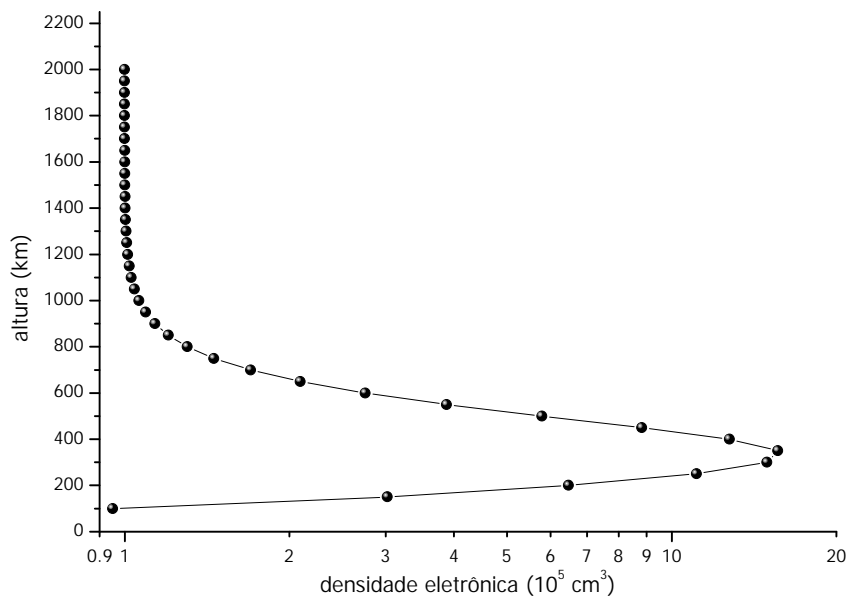


Figura 4.10. – Gráfico do perfil de densidade eletrônica em função da altura, obtido da simulação do modelo numérico IRI, no dia 20 de janeiro de 2003, para localidade de São Luís – MA.

3. Atividades Complementares

Neste capítulo serão apresentadas as atividades de formação complementar referentes ao assunto deste relatório. Essas atividades têm como objetivo o desenvolvimento pessoal e profissional.

3.1. Participação em Congressos.

Durante o período de vigência da bolsa e em concordância com os objetivos propostos no projeto o bolsista participou como apresentador de trabalho científico em seminário específicos de iniciação científica que contribuíram para o desenvolvimento e formação complementar.

Congresso: 13º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP

Título: Estudo Sazonal da Formação de Bolhas de Plasma

Local: Universidade de São Paulo – USP São Carlos

Período: 8 a 11 de novembro de 2005

Segue em anexo no relatório no apêndice A o certificado de participação no Simpósio e o abstract apresentado pelo bolsista.

3.2. Palestras e Seminários

Durante o período de vigência da bolsa o bolsista participou como ouvinte de diversas palestras e seminário que contribuíram para a sua formação complementar nos tópicos relacionados às pesquisas espaciais, dentre as quais estão listadas abaixo.

-Título: Ionosfera

Local: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

Ministrante: Dra. Inês Batista

Período: 05 de maio de 2006

Carga horária: 1 hora.

-Título: Visita Técnica ao INPE de Cachoeira Paulista

Local: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Período: 15 de Dezembro de 2005.

Carga horária: 8 horas

-Título: Mini-Curso sobre Sistemas de Correntes na Magnetosfera e Região Auroral, Índices Geomagnéticos, Tempestades, Sub-Tempestades e HILDCAAs.

Local: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Ministrante: Dr. Luís Fernando Guarnieri

Período: 26 de outubro de 2005.

Carga horária: 4 horas

–Título: Seminário da Pós-Graduação de Geofísica Espacial do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais

Local: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Ministrante: Dr Jonas Rodrigues de Souza

Período: 21 de setembro de 2005.

Carga horária: 2 horas

3.3. Visita Técnica a Cachoeira Paulista

Ainda durante o período de bolsa, o bolsista realizou uma visita técnica à digissonda instalada em Cachoeira Paulista, onde recebeu treinamento seu funcionamento e operacinalidade, explicado em seções anteriores. Este treinamento foi ministrado pelo Eng. Sinval Domingos, chefe do laboratório SONDA, da unidade do INPE em Cachoeira Paulista.

CAPÍTULO 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 obtidos com o uso do modelo empírico IRI. Estes parâmetros ionosféricos e a classificação dos dias de acordo com a estação do ano e a atividade magnética foram discutidos nos capítulos anteriores.

1. Resultados das Análises dos Dados de São Luís

Nos gráficos da figura 4.1 apresentamos os gráficos da frequência crítica média da camada F₂ (foF₂) em função do tempo (h) em hora universal. Esses dados foram coletados pela Digissonda instalada no sítio de São Luís – MA. Os gráficos foram divididos de acordo com a tabela 2 da seção 1 do capítulo 3.

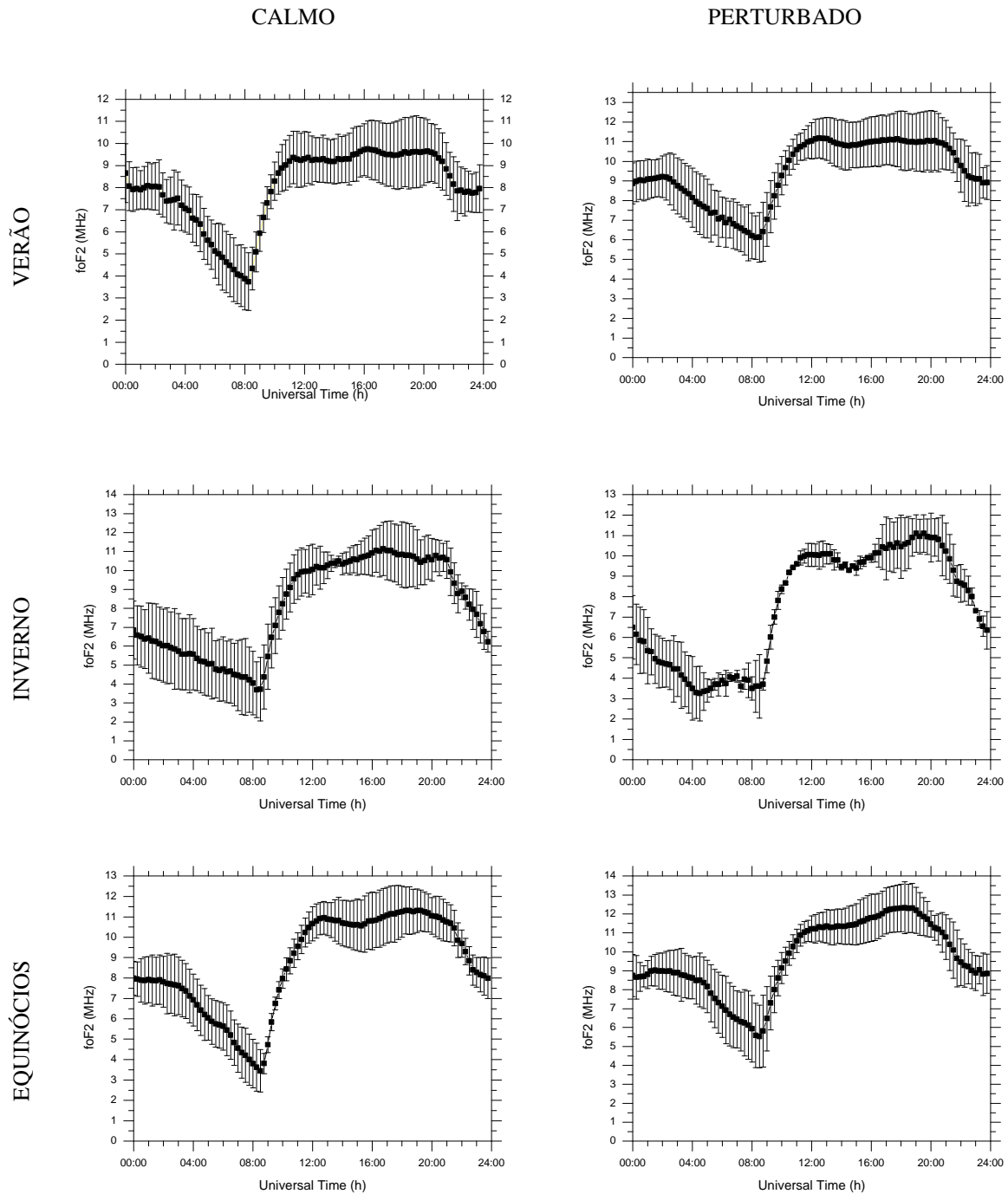


Figura 4.1- Variação da frequência crítica média em relação ao tempo para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digissonda no sítio de São Luís- MA.

Nos gráficos da figura 4.2 apresentamos os gráficos da altura média do pico da camada F (hmF_2) em função do tempo (h) em hora universal para o sítio de São Luís – MA divididos de acordo com a tabela 2 da seção 1 do capítulo 3.

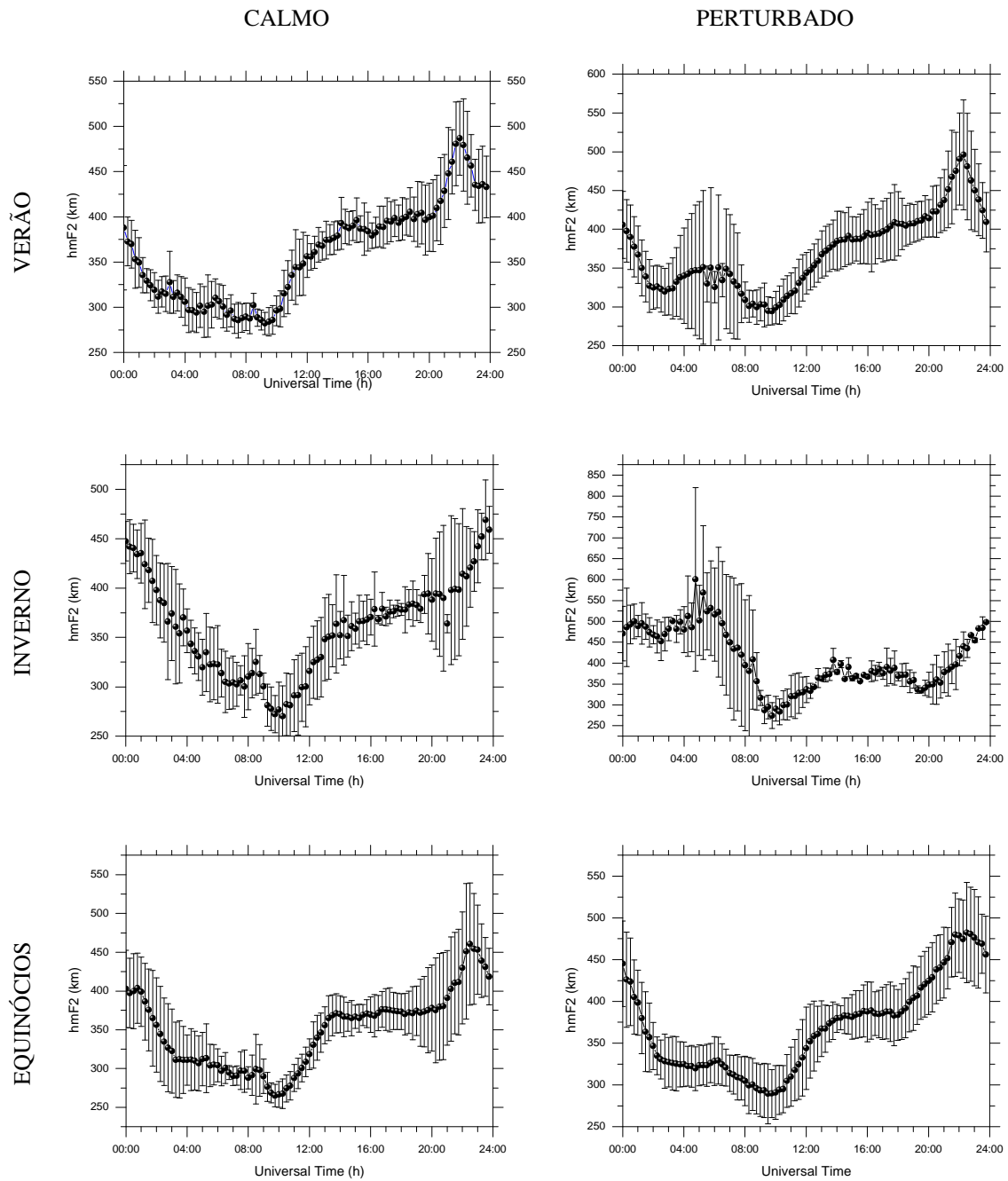


Figura 4.2- Variação da altura média do pico da camada F em relação ao tempo para os períodos calmo e perturbado, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de dados de digisonda no sítio de São Luís- MA.

2. Resultados das Análises das Simulações Numéricas

Nos gráficos da figura 4.4 apresentamos os gráficos da frequência crítica média da camada F_2 (f_oF_2) em função do tempo (h) em hora universal. Esses dados foram coletados pelo modelo empírico IRI para a localização de São Luís – MA. Os gráficos foram divididos de acordo com a tabela 2 da seção 1 do capítulo 3.

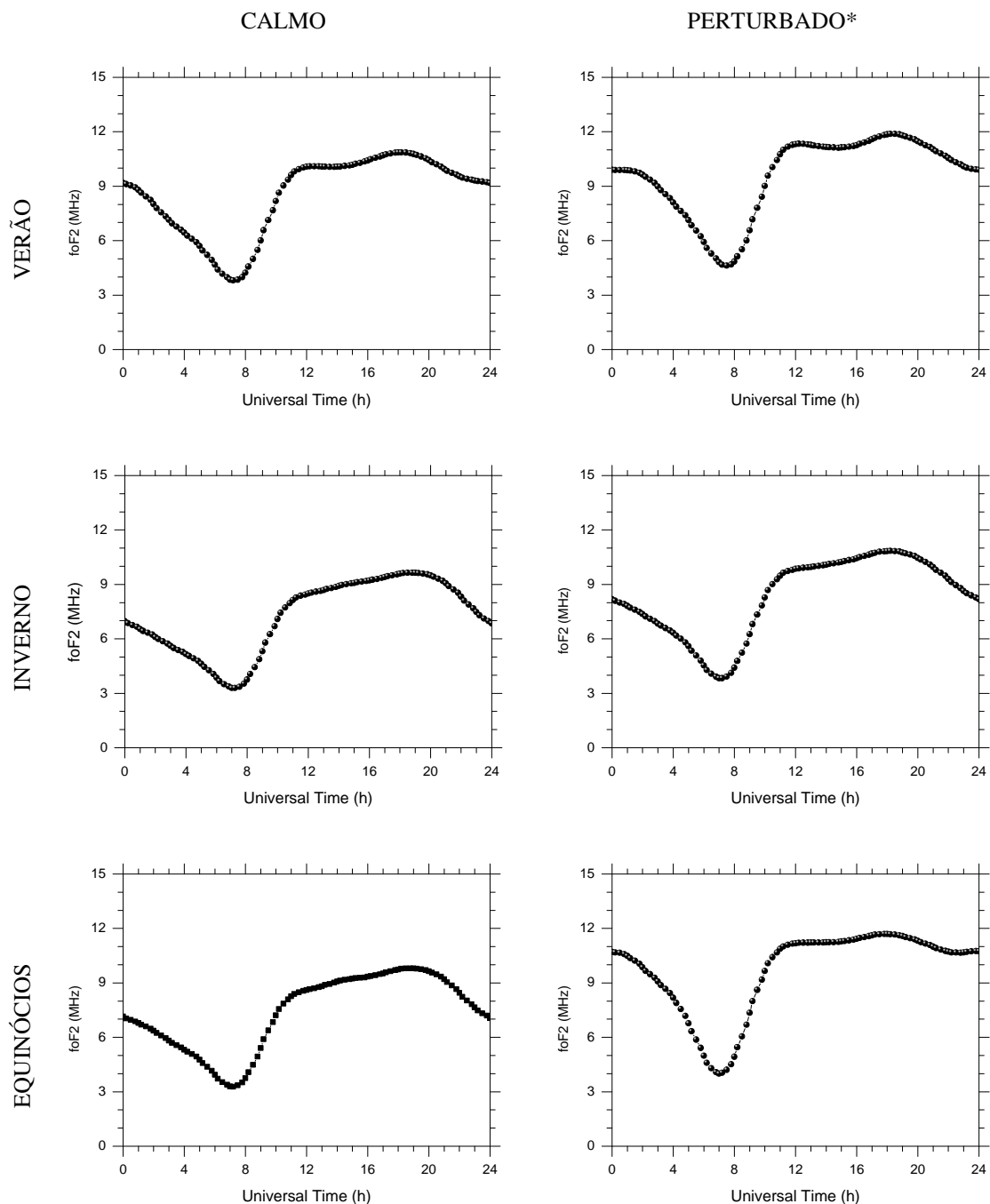


Figura 4.4- Variação da frequência crítica média em relação ao tempo obtido para o período para período calmo, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de simulações numéricas com o modelo IRI para o sítio de São Luís- MA.

Neste ponto, é importante observar que o modelo empírico IRI não possui que simula dados para períodos magneticamente perturbados. Por isso os dados classificados como perturbado estão marcados com um asterisco (*), tendo em vista que os dias simulados foram os mesmos dias foram classificados como perturbados durante a redução dos dados de digissonda coletados no sitio de São Luís.

Na figura 4.5 apresentamos os gráficos da altura média de pico da camada F (hmF_2) em função do tempo (h) em hora universal. Esses dados foram coletados pelo modelo empírico IRI para a localização de São Luís. Os gráficos foram divididos de acordo com a tabela 2 da seção 1 do capítulo 3.

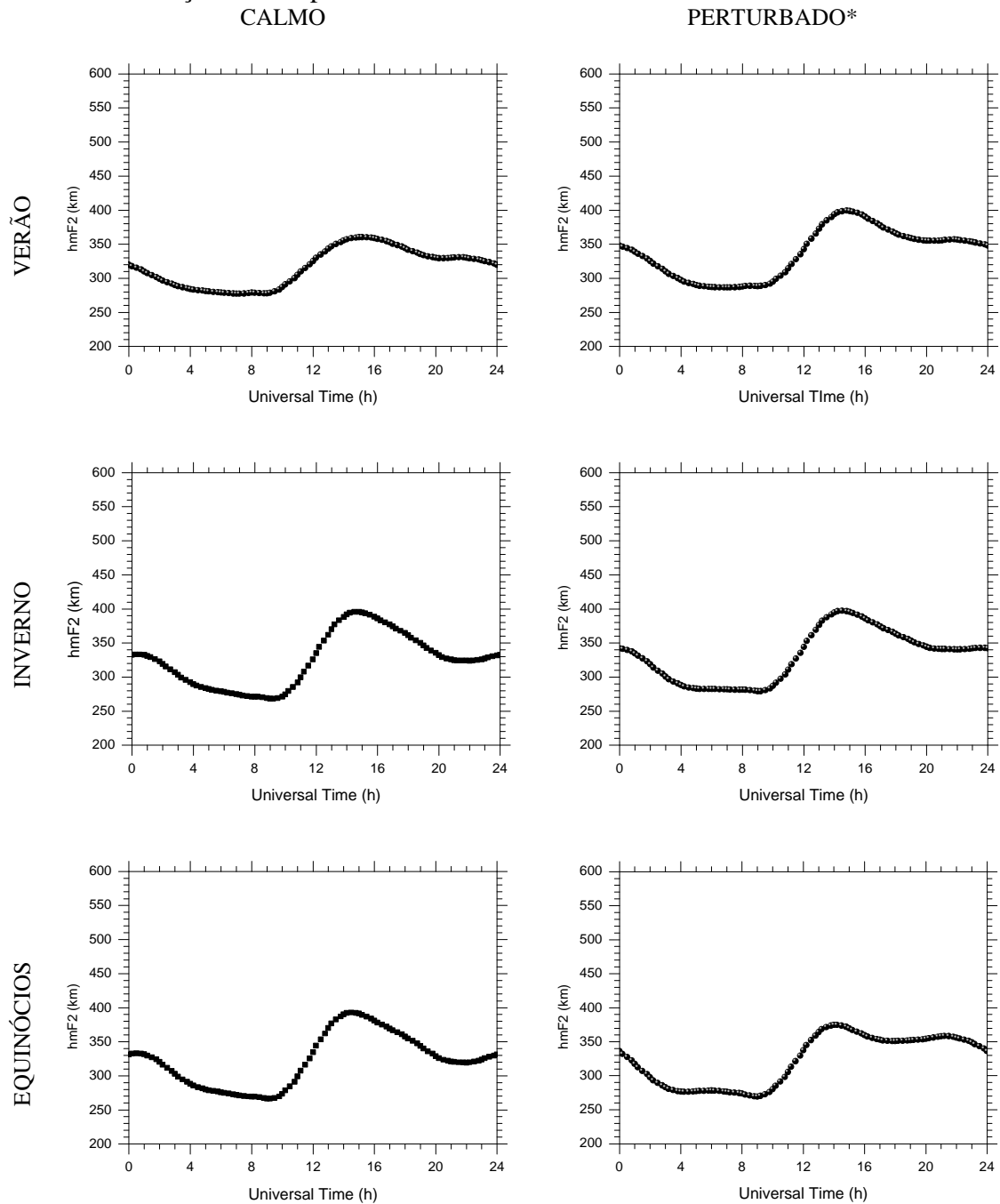


Figura 4.5- Variação da altura média do pico da camada F em relação ao tempo obtido para o período para período calmo, nas estações do ano analisadas, obtidos a partir de simulações numéricas com o modelo IRI para o sítio de São Luís- MA.

3. Discussão dos Resultados

3.1. Análise da Variação Temporal da Frequência Crítica da Camada F

Os gráficos da variação temporal da frequência crítica da camada F (foF₂) são, de fato, uma representação direta da variação da densidade eletrônica ao longo do dia, conforme demonstrado através da equação (1). Esta equação mostra a relação entre a densidade eletrônica à frequência do plasma. Esta frequência do plasma é a frequência a qual reflete os rádio-sinais emitido pela digissonda e que são registrados em forma de ionogramas.

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

Nesta equação, m_e é a massa do elétron e vale aproximadamente $9,31 \times 10^{-31}$ kg, e_o 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. Vale ressaltar que os gráficos estão em hora universal, ou seja, 3 horas em relação ao meridiano de Greenwich.

Observa-se em todos os gráficos de variação da frequência crítica média em relação ao tempo, que esta sofre um aumento significativo a partir das 5 h LT (8 UT). Tal fato ocorre pelo nascer do Sol (6 h LT), a maior fonte de ionização. Nesta hora observa-se que a produção iônica começa a dominar em relação à perda de ionização resultando em um aumento expressivo da densidade. Em contrapartida, nos horários do pôr do Sol, após às 18 h LT (21h UT) os processo de produção iônica começam a superados pela perda. Portanto, a partir desse horário a densidade eletrônica (frequência critica da camada F, foF₂) começa a reduzir até em torno das 5 h LT (8h UT).

De forma geral, o modelo empírico IRI parece ser capaz de reproduzir com razoável precisão o comportamento diário da frequência crítica da camada F com um aumento significativo da densidade no período matutino, após o nascer do sol, uma manutenção da densidade média no período da tarde e uma perda no período noturno. Entretanto, pequenas diferenças são observadas. Considere, por exemplo, a variação da frequência crítica da camada F nos períodos magneticamente calmo.

Nos períodos em torno do solstício de verão, a simulação do modelo IRI parece estar superestimando a densidade eletrônica (frequência critica da camada F, foF₂). Isto parece ser a tônica do comportamento diário dos dados nesta época. Em oposição, os resultados das simulações do IRI parecem subestimar os valores de frequência critica da camada F observada nos dados selecionados em torno dos equinócios. Isto pode ser verificado comparando-se os valores de frequência critica da camada F nos horários, por exemplo, das 00h UT, 12 h UT e 19 h UT. Contudo, os valores desta frequência oferecidos pelo modelo IRI próximo ao nascer do Sol, às 5 h LT (8 h UT), são bastante similares àqueles verificados nos dados observacionais.

Pouco pode ser dito com relação aos resultados que o modelo IRI oferece durante os dias magneticamente ativos, uma vez que já comentamos que este modelo não considera

atividade magnética em suas simulações padrões, conforme havíamos discutido na seção deste relatório que trata dos resultados obtidos. Contudo, com relação à variação da frequência crítica da camada F reduzidos dos dados da digissonda de São Luís é possível de se verificar nos gráficos que os seus valores são superiores, em todos os horários, nos períodos magneticamente perturbados em relação aos períodos magneticamente calmos. Esta característica é evidente tanto dos equinócios e em torno do solstício de verão, não sendo proeminente tanto do solstício de inverno. Isso pode ser devido à deposição de energia na ionosfera que ocorre em períodos de alta atividade magnética.

3.2. Análise da Variação Temporal da Altura Média do Pico da Camada F

Em termos gerais, verificamos um comportamento característico da variação da altura média do pico da camada F, tanto àquela obtida dos dados de digissonda instalada em São Luís e quanto àquela obtida a partir das simulações com o modelo IRI. 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. Com relação a este último aspecto, as simulações do modelo IRI parecem não ter a capacidade de manter completamente essa estabilidade na parte da tarde, oferecendo um pequeno decréscimo da camada.

Também observamos nos gráficos, que as análises da variação da altura média do pico da camada F (hmF_2) parecem estar refletindo a presença dos processos eletrodinâmicos que dominam a região equatorial. Tanto os gráficos com a variação da altura média do pico da camada F observados com a digissonda de São Luís quanto os gráficos com a variação da altura média do pico da camada F obtida com simulações pelo modelo IRI revelam que a partir de 10 h (UT) a altura média do pico da camada F apresenta uma ascensão clara até em torno das 15 h (UT). Este comportamento parece ser um reflexo da 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 e simulada 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. O mesmo não é claramente observado na variação da altura média do pico da camada F obtida com simulações pelo modelo IRI.

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 média 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. Para obtermos a deriva vertical seria interessante verificarmos a variação temporal do parâmetro da altura média virtual da base da camada F ($h'F$).

Com relação à atividade magnética, conforme comentado anteriormente, a discussão será centrada na variação média de altura do pico da camada F obtida dos dados de digissonda. Neste aspecto, verificamos que a altura média do pico da camada F (hmF_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.

CONCLUSÕES

O estudo dos fenômenos que ocorrem na ionosfera é de grande importância para o seu controle. Neste contexto, os esforços concentraram, principalmente, no campo de estudos da ionosfera, trabalhando com a Digissonda e nas análises de dados de digissondas realizadas.

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.

O instrumento de trabalho para a realização do processamento de dados de digissonda foi o software SAO-X que permite visualizar o perfil de densidade eletrônica dos dados da digissonda. Para as simulações numéricas foi utilizado o modelo IRI, o qual é um modelo empírico que fornece valores médios dos mesmos parâmetros ionosféricos observados pela digissonda.

Neste período de projeto a bolsista apresentou capacidade de interagir profissionalmente com os diversos integrantes do grupo de pesquisas ionosféricas do INPE, com os quais o bolsista foi capaz de colaborar com esforço integrado de pesquisa.

Como descrito no projeto inicial, houve a oportunidade para submeter um trabalho no nível de iniciação científica para apresentação e publicação nos anais de um congresso internacional de iniciação científica.

De acordo com as atividades propostas no projeto inicial da bolsa de Iniciação Científica, o cronograma foi parcialmente cumprido. Algumas atividades como o desenvolvimento de um modelo básico de produção não foi possível de ser realizada. Contudo, o bolsista iniciou as atividades em direção ao cumprimento desta meta. E, uma vez que esta atividade não comprometeu as demais atividades e o desenvolvimento do bolsista e que as demais atividades vinculadas ao projeto foram realizadas com sucesso, consideramos os objetivos principais cumpridos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdu, M. A. *IONEX - Ionospheric experiment (HFC, LP and ETP sensors)* [on-line] Disponível em: <<http://www.laser.inpe.br/equars/ionex.shtml>> Acesso: Fevereiro de 2006.
- Araújo, N. M. **Métodos de Observação segura do Sol e Eclipses Solares.** [on-line] Disponível em: <<http://www.geocities.com/naelton/eclipse.htm>> Acesso: Setembro de 2005
- Assis, Altair Souza de. *Tese de Mestrado: Aquecimento do Plasma com as Ondas de Alfvén Cinéticas.* Niterói: UFF/Instituto de Física, 1983.
- 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.
- Casas, R. L. **Observatório Astronômico UFMG.** [on-line] Disponível em: <<http://www.observatorio.ufmg.br/pas31.htm>> Acesso: Setembro de 2005.
- Carvalho, H. C. *Divisão de Aeronomia.* [on-line] Disponível em: <www.dae.inpe.br> Acesso: Dezembro de 2005.
- Chen, Francis F. *Introduction to Plasma Physics.* New York: Plenum Press, 1977.
- Clink, M. F. *L'atmosfera terrestre* [on-line] Disponível em: <<http://www.mclink.it/mclink/astro/ids/lib/atmosfera.htm>> Acesso: Fevereiro de 2006.
- Costa, J.R.V. **Astronomia no Zênite.** [on-line] Disponível em: <<http://www.zenite.nu/index.php?Id2=02&Id1=02>> Acesso: Outubro de 2005.
- Cunha Neto, A - **Radar de Sondagem Ionosférica Digital – Digissonda.** [on-line] Disponível em: <<http://www.dae.inpe.br/slz/digissonda.html>> Acesso em: fevereiro de 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: Outubro de 2005.
- Diegues, F. **O Sol.** [on-line] Disponível em: <<http://www.geocities.com/capecanaveral/7754/sol.htm>> Acesso: Setembro de 2005.
- Duhoux, P. **The Sun - our central star.** [on-line] Disponível em: <http://www.vt-2004.org/Background/Infol2/EIS-C2_pf.html> Acesso: Setembro de 2005.
- Echer, E.; Rigozo, N. R.; Nordemann, D. J. R.; Vieira, L. E. A.; Prestes, A.; Faria, H. H. **O número de manchas solares, índice da atividade do sol** (Revista Brasileira de Ensino de Física). [on-line] Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-47442003000200004> Acesso: Setembro de 2005.
- Ferraz Netto, L. **Feira de Ciências.** [on-line] Disponível em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala24/24_A18.asp> Acesso: Setembro de 2005.
- Fonseca, D.; Paiva, J.; Fiolhais, C. **Soft Ciências (O Sol).** [on-line] Disponível em: <<http://nautilus.fis.uc.pt/astro/hu/viag/sol.html>> Acesso: Setembro de 2005.
- Grimm, A. M. **Meteorologia Básica.** [on-line] Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-1.html>> Acesso em: Junho de 2006.

- Hamilton, C. J.; Dias, F.; Centieiroby P. **Vistas do Sistema Solar**. [on-line] Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/ast/solar/portug/sun.htm>> Acesso: Setembro de 2005.
- Kivelson, M. G., Russell, C. T. ed. **Introduction to Space Physics**, Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- Leithold, A. **Fundamentos da Propagação das Ondas de Rádio** [on-line] Disponível em: <www.angeloleithold.hpg.ig.com.br/ciencia_e_educacao/6/index_int_3.html> Acesso: Fevereiro de 2006.
- Maia D. – Investigador do Observatório Astronômico do Porto. **Portal do Astrônomo** [on-line] Disponível em: <<http://www.portaldoastronomo.org/tema5.php>> Acesso: Outubro de 2005.
- Menvielle, M.; Berthelier, A. **Service International des Indices Geomagnetiques (CETP)**. [on-line] Disponível em: <<http://www.cetp.ipsl.fr/%7Eisgi/homepag1.htm>> Acesso: Setembro de 2005.
- NASA, **National Aeronautics and Space Administration** [on-line] Disponível em: <<http://spdf.gsfc.nasa.gov/>> Acesso: Outubro de 2005.
- Netto, D. B. **Laboratório Associado de Combustão e Propulsão**. [on-line] Disponível em: <www.lcp.inpe.br> Acesso: Dezembro de 2005.
- Neves, L. F. F. **Wikipedia (O ciclo solar)**. [on-line] Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/ciclo_solar> Acesso: Setembro de 2005.
- Pante, R. **Ciência e Cultura**. [on-line] Disponível em: <<http://www.ciencia-cultura.com/ciencias00/sol.html>> Acesso: Setembro de 2005.
- Rodrigues, C. V. **Divisão de Astrofísica**. [on-line] Disponível em: <www.das.inpe.br> Acesso: Dezembro de 2005.
- Rohden, H. B. **Conhecimentos Gerais**. [on-line] Disponível em: <<http://www.conhecimentosgerais.com.br/astrologia/sistema-solar.html>> Acesso: Outubro de 2005.
- Saba, M.M.F. **Estudo da atividade magnetosférica através dos índices geomagnéticos AE, ap e Dst**. São José dos Campos, INPE, Novembro de 1992 (Dissertação de mestrado).
- Santana, D.C.S. **Estudos da Evolução Temporal/Espacial das Derivas das depleções do plasma Ionosféricos por imagens Digitais da Aeroluminescência OI 630 Nm noturna**. São José dos Campos, 131p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.
- Saramago, J. - **Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Brasil** [on-line] Disponível em: <<http://paginas.terra.com.br/arte/sarmentocampos/Reflexoes.htm>> Acesso: Fevereiro de 2006.
- Schove, D. J. - **Sunspot Cycles**, Hutchinson Ross Publishing Company, Stroudsburg, Pennsylvania (1983).
- Stabile, **Reflexão Ionosférica e Refração Ionosférica** [on-line] Disponível em: <<http://paginas.terra.com.br/arte/sarmentocampos/Glossario%20%3E>> Acesso: Fevereiro de 2006.
- 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.
- Windows to the Universe, **University Corporation for Atmospheric Research (UCAR)**. 1995-1999, 2000 [on-line],
- Yamashita, C. S. **Efeitos das** The Regents of the University of Michigan; ©2000-05 University Corporation for Atmospheric Research Disponível em: <<http://www.windows.ucar.edu/>> Acesso: Outubro de 2005.

Yamashita, C. S. *Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial*, orientada pelo Dr. José Humberto Andrade Sobral e pelo Dr. Magalathayil Ali Abdu, INPE, São José dos Campos, 2000. *tempestades magnéticas intensas na Ionosfera de baixa latitude*. São José dos Campos. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.

Zodi, A. M. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* [on-line] Disponível em: <www.cea.inpe.br/cea/> Acesso: Maio de 2006.

Apêndice A

Certificado do trabalho apresentado em congresso de autoria do bolsista correspondente ao item 1 do capítulo 3.

