



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/08.24.19.06-TDI

VARIABILIDADE DE LONGO PERÍODO DA CAMADA F2 NO SETOR SUL-AMERICANO

Cristina Sayuri Yamashita

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Ezequiel Echer, e Mariza Pereira de Souza Echer, aprovada em 25 de agosto de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3K5FA2L>>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

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

Membros:

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

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

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

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/08.24.19.06-TDI

VARIABILIDADE DE LONGO PERÍODO DA CAMADA F2 NO SETOR SUL-AMERICANO

Cristina Sayuri Yamashita

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Ezequiel Echer, e Mariza Pereira de Souza Echer, aprovada em 25 de agosto de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3K5FA2L>>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Yamashita, Cristina Sayuri.

Y14v Variabilidade de longo período da camada F2 no setor Sul-Americano / Cristina Sayuri Yamashita. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxvi + 93 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/08.24.19.06-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacia/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. Ezequiel Echer, e Mariza Pereira de Souza Echer .

1. Variabilidade solar e ionosférica. 2. Efeitos no clima espacial.
3. Ionossonda. 4. Digissonda. 5. Modelo climatológico. I.Título.

CDU 550.388:521.93




Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

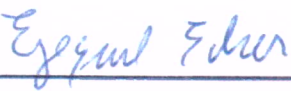
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
**Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente
Solar-Terrestre**

Dr. Alisson Dal Lago



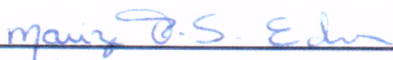
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Ezequiel Echer




Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Mariza Pereira de Souza Echer



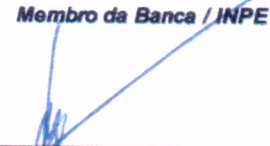
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Alicia Luisa Clúa de Gonzalez Alarcon



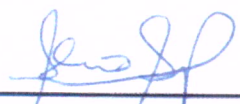
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. José Humberto Andrade Sobral



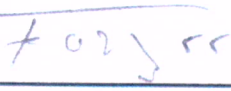
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Alessandra Abe Pacini



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

Dr. Fernando Celso Perin Bertoni



Convidado(a) / UEPB / Campina Grande - PB

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Título: "VARIABILIDADE DE LONGO PERÍODO DA CAMADA F2 NO SETOR SUL-AMERICANO"

Aluno (a): **Cristina Sayuri Yamashita**

São José dos Campos, 25 de Agosto de 2015

A meus pais, as minhas irmãs e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento da bolsa de doutorado.

Agradeço aos Drs. Ezequiel Echer, Christiano Garnett Marques Brum e à Dra. Mariza Pereira de Souza Echer pela orientação e apoio durante todo o período de execução da tese.

Agradeço à Coordenação do Curso de Geofísica Espacial do INPE pelo apoio.

Os meus agradecimentos à Dra. Inez Staciari Batista do Grupo IONO da Divisão de Aeronomia do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) pelo fornecimento dos dados ionosféricos utilizados nesta tese de doutorado.

Aos colegas do grupo IONO, Maria Goreti dos Santos Aquino pela atenção, disponibilidade e ajuda na redução dos dados ionosféricos e à aluna de Iniciação Científica, Renata Guimarães Donatelli F. Costa, à Dra. Vivian Moreira de Castilho Batista e à Dra. Daniela Cristina Santana Arruda pelo auxílio e esclarecimento na redução dos dados.

Aos membros da banca de defesa pelas observações e sugestões feitas à tese.

Agradeço a todos os colegas e pessoas que me apoiaram durante o período da realização da tese.

RESUMO

Nesta Tese de Doutorado, estudou-se a variabilidade de longo período do pico da ionosfera (camada F2) de baixa latitude e da região equatorial do setor sul-americano baseado nos parâmetros foF2, hpF2 e hmF2 obtidos através dos registros de sondagem ionosféricas dos sítios de Cachoeira Paulista (22,67° S, 44,99° O) e Fortaleza (3,71° S, 38,54° O), em condições geomagneticamente calmas e às 12 horas LT. Criaram-se modelos empíricos baseados nos principais forçantes de produção de pares de íons diurnos, isto é, na variação de incidência de radiação solar ao longo dos anos. Para tal, estudaram-se as variações nos últimos 4 ciclos solares (desde 1970) dos parâmetros solares: índice do número de manchas solares, fluxo de rádio solar em 10,7 cm (F10,7) e radiação no extremo ultravioleta em duas bandas (26-34 nm e 0,1-50 nm) medidas pelo instrumento SOHO/SEM. Resultados obtidos das análises históricas do fluxo de radiação solar mostram que a radiação EUV emitida sofreu uma redução de aproximadamente 25% no ciclo #24 quando comparado ao ciclo #23 (tendo como base o período de baixa atividade solar). Estes resultados indicam uma tendência de diminuição na quantidade de irradiância solar incidente na atmosfera terrestre, o que teria implicações para a produção de íons por fotoionização. Através do estudo da variabilidade dos parâmetros ionosféricos (excluindo a sua autovariação devido a deposição de energia solar através da incidência de radiação), constatou-se que a quantidade de elétrons do pico da ionosfera acima de Cachoeira Paulista (baseado no parâmetro foF2) diminuiu aproximadamente ~-20% no período de inverno do hemisfério sul e aumentou em torno de ~15% no período de verão, apesar da tendência negativa de decréscimo da respectiva altitude do pico (parâmetros hpF2 e hmF2). Tal comportamento aponta para a possível variação da escala de altura do oxigênio atômico ao longo dos anos, e que esta variabilidade é fortemente modulada pelo período do ano. Para Fortaleza, notou-se que o parâmetro foF2 teve uma tendência positiva entre 13-24% para quase todo o ano. Os parâmetros hpF2, hmF2 mostraram tendência negativa de ~-11-14% em julho, positiva de ~+10-18% no verão e equinócios.

LONG TERM VARIABILITY OF F2 LAYER IN THE SOUTH AMERICAN SECTOR

ABSTRACT

In this thesis, the long term variability of the peak of the ionosphere (F2 layer) at low-latitude and equatorial regions of the South American sector is studied. This work is based on foF2, hpF2 and hmF2 parameters obtained through the ionospheric sounding records of the sites from Cachoeira Paulista (22,67° S, 44,99° O) and Fortaleza (3,71° S, 38,54° O). Data during quiet geomagnetic conditions at 12 LT (Local Time) were studied. Empirical models were created based on the main forcing production of diurnal ion pairs, that is, variation in the incidence of solar radiation over the years. In order to perform this study, the variations in solar parameters over the past four solar cycles (since 1970) have been studied: the index number of sunspots, solar radio flux at 10.7 cm (F10.7) and extreme ultraviolet radiation in two bands (26-34 nm and 0.1-50 nm) measured by SOHO/SEM instrument. Results of the historical analysis of the solar radiation flux show that the EUV radiation was reduced by approximately 25% in the cycle # 24 compared to the cycle # 23. These results indicate a decreasing trend in the quantity of incident solar irradiance at the Earth's atmosphere, which would have implications for the production of ions by photoionization. Through the study of variation of ionospheric parameters (excluding the auto variation due to deposition of solar energy by radiation incidence) it was found that the amount of peak electrons of the ionosphere above Cachoeira Paulista (based on foF2 parameter) decreased approximately ~ -20% during the southern hemisphere winter and increased by around ~ 15% during the summer. Such behavior indicates the range of possible variation in height of the atomic oxygen over the years, and this variability is strongly modulated by the period of the year. For Fortaleza, it was noted that the parameter foF2 showed a positive trend between 13-24% for most of the year. The parameters hpF2, hmF2 showed a negative trend of ~ -11-14% in July, and a positive trend of ~ +10-18% in summer and equinoxes.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Ilustração das características e alguns fenômenos que ocorrem na superfície do Sol.	6
Figura 2.2 - (A) Espectro de radiação eletromagnética e, (B) espectro de radiação solar assumindo o Sol como corpo negro a uma temperatura de 5777 K.	7
Figura 2.3 - Esquema do ciclo de atividade solar, ilustrando o mecanismo de como o campo magnético solar é alterado.....	9
Figura 2.4 - Ilustração da inversão do campo magnético solar nos períodos próximos ao máximo de atividade solar.	10
Figura 2.5 - Atividade solar derivada de reconstrução utilizando grupo de manchas solares, isótopos de ^{10}Be e ^{14}C	13
Figura 2.6 - Irradiância solar total (TSI) medidas pelos satélites Nimbus 7 (em preto), SMM/ACRIM (em vermelho), ERBS (em verde) e SOHO/VIRGO (em azul).	14
Figura 2.7 - Série do Fluxo solar observado (média mensal) em 2800 MHz (10,7 cm) no período de janeiro de 1947 a janeiro de 2014, com a marcação dos ciclos de 11 anos.	15
Figura 2.8 - Irradiância EUV solar entre 26-34 nm no último ciclo solar medido pelo SOHO/SEM.	17
Figura 3.1 - (A) Distribuição vertical da temperatura na homosfera e heterosfera; (B) variação com a altura dos principais componentes na atmosfera.	19
Figura 3.2 - (A) Representação da formação de um pico de ionização de um possível constituinte na ionosfera. (B) Perfil ionosférico ilustrando as distintas regiões verticais para o período diurno e noturno.	23

Figura 3.3 - Figura de um ionograma típico com os principais parâmetros de cada camada.....	30
Figura 3.4 - (A) Ionograma obtido por uma ionossonda analógica às 15:00 horas LT (hora local) em Cachoeira Paulista do dia 19/10/78. Na abscissa está a frequência da densidade eletrônica e na ordenada a altura virtual e; (B) exemplo de um filme de 35 mm onde são armazenados os registros da ionossonda analógica.....	32
Figura 3.5 - (A) Imagem de um ionograma de uma ionossonda digital modelo CADI de Fortaleza do dia 26/11/94 às 10:55 UT (hora universal). Na abscissa está à frequência da densidade eletrônica e na ordenada a altura virtual, e, (B) Imagem de um ionograma do modelo DPS-4 de Fortaleza do dia 2/5/2010 às 15:00 UT, na abscissa está à frequência da densidade eletrônica e na ordenada a altura real.....	32
Figura 4.1 - Série mensal histórica do Número de Manchas Solares (painel A) e o período utilizado neste estudo (painel B).....	36
Figura 4.2. - Similar a Figura 4.1, mas apresentando a Série mensal do Fluxo solar observado em 10,7 cm.....	36
Figura 4.3 - Série mensal do fluxo de EUV do instrumento SEM/SOHO nas bandas 0,1-50 nm e 26-34 nm (linhas contínuas preta e cinza, respectivamente).....	37
Figura 4.4 - Diagrama de dispersão mostrando a correlação entre o índice F10,7 cm e os registros do SOHO para o período entre Janeiro de 1996 e Maio de 2013.....	37
Figura 4.5 - Localização dos sítios de observação no setor Sul-americano.	39
Figura 4.6 - (A) Configuração do sistema de projeção e digitalização dos ionogramas analógicos; (B) ionograma analógico de CP do dia 13/11/1978 às 12:00 LT com a identificação de h'F, hpF2 e foF2, e; (C) ionograma analógico de Fz do dia 13/2/1979 às 17:30 LT com a identificação h'F, hpF2 e foF2.	41

Figura 4.7 - (A) Sistema Ionocadi com as janelas de configuração de entrada e saída e redução dos dados, e; (B) Imagem de um ionograma com a identificação de alguns parâmetros da estação de Fortaleza da ionossonda digital CADI do dia 16/5/1995 às 15:00 UT.....	42
Figura 4.8 - Ionogramas com a identificação de alguns parâmetros das estações de (A) Cachoeira Paulista do dia 28/6/2001 às 15:00 UT e; (B) Fortaleza do dia 2/5/2010 às 15:00 UT.....	44
Figure 4.9 - Dependência da altura real do pico da região F (h_mF_2) em função da altura virtual (h_pF_2) e sua melhor aproximação sigmoïdal (linha contínua em azul, coluna de painéis à esquerda); dependência do resíduo entre os dados de h_mF_2 menos a função sigmoïdal apresentada no painel à esquerda em função da frequência de plasma do pico da região F (f_oF_2) e sua melhor aproximação sigmoïdal (linha contínua em azul, coluna de painéis central), e diagramas de dispersão entre os valores estimados de h_mF_2 baseados na descrição sigmoïdal e os dados registrados. Os painéis superiores e inferiores dizem respeito aos registros de Cachoeira Paulista e Fortaleza, respectivamente.....	45
Figura 4.10 - Série de dados utilizado neste trabalho de Cachoeira Paulista e Fortaleza (bloco de painéis à esquerda e direita, respectivamente). Os círculos em vermelho representam a série de h_mF_2 expandida baseado nos registros de h_pF_2 e f_oF_2	47
Figura 5.1 - Dados utilizados para a definição da atividade solar ao longo dos anos. Do painel superior ao inferior apresentam-se os registros diários: de F10,7cm observado da superfície, R_z e EUV (SOHO).....	51
Figura 5.2 - Correlação entre os valores diários de R_z e F10,7 cm para todo período de 1964 a 2014.....	54

- Figura 6.1 - Dependência dos coeficientes $A0_{(PS)}$, $Am_{(PS)}$ e $Bm_{(PS)}$ do parâmetro foF2 de Cachoeira Paulista e Fortaleza (azul e vermelho, respectivamente) em relação ao F10,7cm. 61
- Figura 6.2 - Diagrama de dispersão entre os resíduos dos parâmetros ionosféricos de Cachoeira Paulista ($A0_{(PS)}$) (foF2, hpF2 e hmF2, de cima para baixo, respectivamente) versus F10,7 cm, Rz, e os registros do SOHO nos comprimentos de onda 24-34 nm e 0,1-50 nm (da esquerda para direita, respectivamente). 62
- Figura 6.3 - Diagrama de dispersão entre os resíduos dos parâmetros ionosféricos de Fortaleza ($A0_{(PS)}$) (foF2, hpF2 e hmF2, de cima para baixa, respectivamente) versus F10,7 cm, Rz, e os registros do SOHO nos comprimentos de onda 24-34 nm e 0,1-50 nm (da esquerda para direita, respectivamente). 62
- Figura 6.4 - Média dos resíduos dos parâmetros ionosféricos de Cachoeira Paulista (dados menos $A0_{(PS)}$) (foF2, hpF2 e hmF2, de cima para baixo, respectivamente) versus dia do ano para os forçantes solares F10,7 cm, Rz, e EUV/SOHO nos comprimentos de onda 24-34 nm e 0,1-50 nm. A sazonalidade reconstruída por FFT (Fast Fourier Transform) em linha vermelha contínua e em cinza a componente sazonal de Fortaleza. 64
- Figura 6.5 - Média dos resíduos dos parâmetros ionosféricos de Fortaleza (dados menos $A0_{(PS)}$) (foF2, hpF2 e hmF2, de cima para baixa, respectivamente) versus dia do ano para os forçantes solares F10,7 cm, Rz, e EUV/SOHO nos comprimentos de onda 24-34 nm e 0,1-50 nm ; A sazonalidade reconstruída por FFT em linha vermelha contínua e em cinza a componente sazonal de Cachoeira Paulista. 64
- Figura 6.6 - Variação do ângulo zenital (painéis superiores) e da concentração do oxigênio atômico a uma altitude de 300 km (painéis inferiores) ao longo do ano para as regiões de Cachoeira Paulista e Fortaleza (coluna de

painéis à esquerda e à direita, respectivamente) e a concentração do oxigênio atômico na mesma altitude para baixa e alta atividade solar (azul e vermelho, respectivamente) (painéis inferiores)..... 65

Figura 6.7 - Diagrama de dispersão entre os parâmetros ionosféricos estimados (abscissas) e os respectivos registros de Cachoeira Paulista (ordenadas) sobre semelhantes condições geofísicas. 69

Figura 6.8 - Diagrama de dispersão entre os parâmetros ionosféricos estimados (abscissas) e os respectivos registros de Fortaleza (ordenadas) sobre semelhantes condições geofísicas. 70

Figura 6.9 - Valores de foF2 estimados de Cachoeira Paulista e Fortaleza (coluna de painéis da esquerda para a direita, respectivamente) para diferentes condições de atividade solar baseados em F10,7, Rz e os registros do SOHO nos comprimentos de onda 24-34 nm e 0,1-50 nm (de cima para baixo, respectivamente)..... 71

Figura 6.10 - Semelhante à Figura 6.9, porém para as estimativas de hpF2. 72

Figura 6.11 - Semelhante à Figura 6.9, porém para as estimativas de hmF2. 72

Figura 6.12 - Variabilidade mensal dos resíduos de Cachoeira Paulista entre os registros de foF2, hpF2 e hmF2 e os valores estimados (da esquerda para direita) nas mesmas condições de atividade solar baseado nos valores do índice F10,7 ao longo do período de estudo. 74

Figura 6.13 - Variabilidade mensal dos resíduos de Cachoeira Paulista entre os registros de foF2, hpF2 e hmF2 e os valores estimados (da esquerda para direita) nas mesmas condições de atividade solar baseado nos valores de Rz ao longo do período de estudo. 75

Figura 6.14 - Variabilidade mensal dos resíduos de Fortaleza entre os registros de foF2, hpF2 e hmF2 e os valores estimados (da esquerda para direita) nas

mesmas condições de atividade solar baseado nos valores do índice F10,7 ao longo do período de estudo.	76
Figura 6.15 - Variabilidade mensal dos resíduos de Fortaleza entre os registros de foF2, hpF2 e hmF2 e os valores estimados (da esquerda para direita) nas mesmas condições de atividade solar baseado nos valores de Rz ao longo do período de estudo.	77
Figura 6.16 - Taxa de variabilidade dos parâmetros ionosféricos em função do ano para Cachoeira Paulista em relação ao F10,7. Nos painéis superiores é mostrada a variabilidade mensal dos resíduos e nos painéis inferiores as estimativas absolutas da variação do período, ou seja a taxa vezes 40 anos. A linha vermelha representa o desvio padrão entre os valores do resíduo e a aproximação linear mostrada na Figura 6.12.	81
Figura 6.17 - Taxa de variabilidade dos parâmetros ionosféricos em função do ano para Cachoeira Paulista em relação à Rz. Nos painéis superiores é mostrada a variabilidade mensal dos resíduos e nos painéis inferiores as estimativas absolutas da variação do período, ou seja a taxa vezes 40 anos. A linha vermelha representa o desvio padrão entre os valores do resíduo e a aproximação linear mostrada na Figura 6.13.	82
Figura 6.18 - Taxa de variabilidade dos parâmetros ionosféricos em função do ano para Fortaleza em relação ao F10,7. Nos painéis superiores é mostrada a variabilidade mensal dos resíduos e nos painéis inferiores as estimativas absolutas da variação do período, ou seja a taxa vezes 40 anos. A linha vermelha representa o desvio padrão entre os valores do resíduo e a aproximação linear mostrada na Figura 6.14.	82
Figura 6.19 - Taxa de variabilidade dos parâmetros ionosféricos em função do ano para Fortaleza em relação à Rz. Nos painéis superiores é mostrada a variabilidade mensal dos resíduos e nos painéis inferiores as estimativas absolutas da variação do período, ou seja a taxa vezes 40 anos. A linha	

vermelha representa o desvio padrão entre os valores do resíduo e a
aproximação linear mostrada na Figura 6.15. 83

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Rotação diferencial na fotosfera	9
Tabela 3.1 - Descrição dos parâmetros obtidos por uma ionossonda.....	31
Tabela 3.2 - Descrição das principais letras qualitativas.....	34
Tabela 3.3 - Descrição das principais letras descritivas.....	34
Tabela 4.1 - Período dos dados e espaço amostral dos registros utilizados neste trabalho.....	39
Tabela 4.2 - Descrição dos dias calmos e perturbados para o ano de 2010.....	40
Tabela 4.3 - Valores das constantes da aproximação sigmoidal de reconstrução do parâmetro hmF2 em função de hpF2 e foF2 de Cachoeira Paulista e Fortaleza.....	46
Tabela 5.1 - Definição de cada intervalo de ciclo solar estudado nesta tese.....	50
Tabela 5.2 - Períodos de mínima e máxima atividade solar.....	50
Tabela 5.3 - Estatística dos parâmetros solares para cada ciclo solar. Média e desvio padrão (mediana).....	52
Tabela 5.4 - Estatística dos parâmetros solares para períodos de máxima atividade solar. Média e desvio padrão (mediana).....	52
Tabela 5.5 - Estatística dos parâmetros solares para períodos de mínima atividade solar. Média e desvio padrão (mediana).....	53
Tabela 5.6 - Correlação linear simples entre F10,7 e Rz. F10,7 = (A + B x Rz) para diferentes períodos.....	55
Tabela 5.7 - Correlação linear simples entre as séries da atividade solar	57
Tabela 6.1 Valores médios e desvio padrão dos parâmetros ionosféricos para Cachoeira Paulista e Fortaleza para todo o período de dados.....	78

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ARTIST	Automatic Real-Time Ionogram Scaler with True-height
ASZ	Angle Solar Zenital (Ângulo zenital solar)
CADI	Canadian Advanced Digital Ionosonde
CEA	Ciências Espaciais e Atmosféricas
CELIAS	Charge, Element and Isotope Analysis System
CP	Cachoeira Paulista
DAE	Divisão de Aeronomia
DGE	Divisão de Geofísica Espacial
DPS-4	Digisonde Portable Sounder
DRAO	Dominion Radio Astrophysical Observatory - Penticton
ESA	European Space Agency
EUV	Extreme Ultraviolet (Ultravioleta Extremo)
F10,7	Fluxo de rádio no comprimento de onda de 10,7 cm
fc	Série do EUV correspondente à banda 0,1-50 nm
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada rápida de Fourier)
foF2	Frequência crítica da camada F2
fp	Série do EUV correspondente à banda 26-34 nm
Fz	Fortaleza
hmF2	Altura real do pico da camada F2
hpF2	Altura virtual do traço ordinário do pico da camada F2
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LT	Local Time (hora local)
NASA	U. S. National Aeronautics and Space Administration
NmF2	Densidade eletrônica do pico da camada F2
Rz	Número de manchas solares
SAO-Explorer	Standard Archiving Output
SD	Standard Deviation (desvio padrão)
SEM	The Solar Extreme Ultraviolet Monitor
SFU	Solar Flux Units (unidade de fluxo solar): $1\text{SFU}=10^{-22}\text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$
SOHO	Solar Heliospheric Observatory

TSI	Total Solar Irradiance (Irradiância Solar Total)
UT	Universal Time (hora universal)
UV	Ultra Violet Emission (Radiação Ultravioleta)

SUMÁRIO

		<u>Pág.</u>
1	INTRODUÇÃO	1
2	O AMBIENTE SOLAR-TERRESTRE	5
2.1.	O Sol	5
2.1.1.	Manchas solares.....	8
2.2.	Parâmetros que são modulados pela variabilidade solar.....	13
2.2.1.	Fluxo solar em rádio em 10,7 cm	14
2.2.2.	Irradiância solar no extremo ultravioleta	15
3	ATMOSFERA DA TERRA	19
3.1.	A Ionosfera da Terra.....	22
3.1.1.	Regiões da ionosfera	23
3.1.2.	Anomalia Equatorial de ionização ou Anomalia de Appleton	25
3.2.	Fontes de Ionização na Ionosfera	26
3.3.	Instrumentação para observação da Ionosfera	27
3.3.1.	A Ionossonda	27
3.3.2.	O Ionograma.....	29
3.3.3.	Parâmetros ionosféricos e Letras Qualificativas e Descritivas.....	32
4	SÉRIES DE DADOS UTILIZADAS NA TESE.....	35
4.1.	Índices Solares.....	35
4.1.1.	Número de manchas solares (Rz).....	35
4.1.2.	Fluxo em Rádio 10,7 cm	36
4.1.3.	Radiação Solar na faixa do Extremo Ultravioleta (EUV).....	37

4.2.	Dados Ionosféricos	38
4.3.	Metodologia de redução dos dados ionosféricos.....	39
4.3.1.	Método de expansão dos registros de hmF2.....	44
5	ANÁLISE DA VARIABILIDADE SOLAR.....	49
5.1.	Variabilidade solar.....	49
5.2.	Análise de correlação	54
6	INTER-RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS SOLARES E IONOSFÉRICOS ...	59
6.1.	Desenvolvimento do modelo climatológico ionosférico	59
6.2.	Obtenção das tendências de longo período	72
7	CONCLUSÕES.....	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1 INTRODUÇÃO

O ambiente solar-terrestre passa por transformações constantes que estão, por sua vez, relacionadas à natureza dos processos dinâmicos que ocorrem no Sol e também na Terra. Estas mudanças climáticas que afetam o ambiente espacial e terrestre resultantes dos processos físicos que começam no Sol e que se propagam até o ambiente terrestre, é o objeto de pesquisa desta tese que ao longo dos últimos anos tornou-se conhecido como clima espacial.

Conhecer o Sol e compreender os mecanismos de sua atuação no ambiente Sol-Terra tem sido o grande desafio do homem desde o início da era espacial, entretanto um filósofo notório para a humanidade, Sócrates, já afirmava que para o homem compreender o mundo em que vive, ele deveria erguer-se acima da Terra, para o topo da atmosfera e além, e somente assim sua percepção do ambiente em que vive, começaria a ser satisfatória.

Como parte da presente Tese de Doutorado, pretende-se apresentar a principal fonte de energia para a Terra – O Sol, bem como a sua importância como agente modulador da radiação que interage com a atmosfera da Terra e impulsiona todas as reações químicas e processos físicos, produzindo resposta dinâmica desde o topo da atmosfera até a superfície. A radiação solar total recebida pela Terra provém das três camadas da atmosfera solar, a saber, fotosfera, cromosfera e coroa.

No presente trabalho, as variações observadas no Sol foram analisadas por meio do número de manchas solares (R_z), das observações do fluxo de rádio no comprimento de onda de 10,7 cm (índice F10,7), e da irradiância solar na faixa do extremo ultravioleta (EUV - 26-34 nm; 0,1-50 nm), que aqui são descritos como índices solares.

A ionosfera/termosfera são as regiões da atmosfera terrestre estudadas nesta Tese de Doutorado.

A ionosfera está embebida na atmosfera neutra, sendo uma camada cuja concentração de elétrons varia com a altitude e está situada entre 60 e 1000 km. Onde os seus limites verticais variam do dia para a noite, em função das atividades solares e geomagnéticas, com a estação do ano e a localização geográfica.

A termosfera terrestre está situada entre 85 e 600 km de altitude, e sua principal característica é a variação da temperatura com a altitude em função da forçante solar.

No presente trabalho, estudou-se os efeitos ionosféricos (variação em altura e frequência) sobre duas localidades no setor sul-americano. Uma localizada na região do equador, Fortaleza ($3,71^{\circ}$ S; $38,54^{\circ}$ O) e a outra em baixa latitude, Cachoeira Paulista ($22,67^{\circ}$ S; $44,99^{\circ}$ O).

O equipamento utilizado para o estudo foi a ionossonda, pois esta funciona ininterruptamente durante longos períodos, fornecendo longas séries temporais de dados contínuos.

Os índices solares foram superpostos com os parâmetros ionosféricos (variação em altura e frequência), com o objetivo de compreender possíveis comportamentos considerados diferenciados ou especiais para a atmosfera terrestre na região ionosférica equatorial e de baixa latitude no setor sul-americano.

Foi desenvolvido um modelo empírico climatológico baseado na metodologia de [Brum et al., 2011](#), para estudar o comportamento da ionosfera durante longo período em função dos índices solares mencionados acima.

Tendo em vista a dependência dos parâmetros ionosféricos em função da variabilidade da atividade solar e os efeitos no clima espacial devido à variação solar de longo período, como o recente prolongado mínimo da atividade solar, tem-se como objetivo geral desta tese de doutorado estudar a resposta da

ionosfera/termosfera em baixas latitudes no setor sul-americano às variabilidades solares de longo prazo.

Para alcançar o objetivo principal do trabalho, alguns objetivos específicos foram realizados, tais como:

- i) Estudar o comportamento de longo período da atividade solar no número de manchas solares (Rz) e nas faixas de rádio F10,7 cm e EUV, e suas inter-relações;
- ii) Estudar a resposta da ionosfera/termosfera do setor sul-americano a variabilidade supracitada, e;
- iii) Estudar a viabilidade da implementação de ferramentas de diagnóstico e previsão da variabilidade do clima espacial a partir dos resultados obtidos utilizando dados do pico da ionosfera das regiões de Fortaleza e Cachoeira Paulista.

A apresentação do presente trabalho consistirá em 7 capítulos.

O capítulo 2 é uma breve descrição sobre o Sol e suas características e os índices solares utilizados na tese.

O capítulo 3 trata de conceitos básicos relacionados à atmosfera terrestre com ênfase na ionosfera, descreve o instrumento (analógica e digital) e as estações de superfície.

O capítulo 4 apresenta o intervalo dos índices solares e dos dados ionosféricos utilizados nesta tese e a metodologia para a redução dos parâmetros ionosféricos.

O capítulo 5 apresenta resultados estatísticos da análise da variabilidade dos índices solares por ciclo solar, intervalo de 13 meses centrado no mínimo e máximo do ciclo solar e pelo intervalo total dos dados.

No capítulo 6 são apresentados os resultados dos parâmetros solares e suas inter-relações e as respostas ionosféricas a estes forçantes, além das tendências de longo prazo.

O capítulo 7 apresenta a conclusão deste trabalho.

2 O AMBIENTE SOLAR-TERRESTRE

Neste capítulo faremos uma descrição do Sol e de suas características e uma descrição dos índices solares utilizados nesta tese.

2.1. O Sol

A década de 1960 trouxe grandes avanços científicos e tecnológicos em especial para a ciência espacial e atmosférica, pois com o lançamento de várias sondas orbitais foi possível conhecer o comportamento e posteriormente a física que envolve o ambiente Solar-Terrestre, de modo um pouco mais detalhado, a fonte de energia que alimenta esse sistema, o Sol.

O Sol é uma estrela que tem cerca de 4,5 bilhões de anos e é constituído basicamente de matéria na forma de plasma, composto de aproximadamente 90% de Hidrogênio (H), 10% de Hélio (He) e 0,1% de elementos mais pesados, como: Carbono (C), Nitrogênio (N) e Oxigênio (O). A sua temperatura superficial é de cerca de 5780 K. A distância média da Terra ao Sol é de 150.10^6 km (definida como 1 Unidade Astronômica). A atmosfera solar consiste de três camadas: fotosfera, cromosfera e coroa, como pode ser visto na Figura 2.1. A Figura 2.1 também apresenta alguns dos principais fenômenos que ocorrem na superfície solar ([BRASSEUR; SOLOMON, 1986](#)).

A irradiância solar provém das três camadas da atmosfera solar (fotosfera, cromosfera e coroa). A radiação mais intensa, situada no visível, origina-se basicamente na fotosfera, onde as suas propriedades são relativamente estáveis no tempo e por isso, a radiação emitida pelo Sol no visível e infravermelho é praticamente constante.

Ao contrário, a radiação emitida em comprimentos de ondas mais longos ou mais curtos é variável, sendo originada nas camadas solares mais externas (a cromosfera e a coroa) onde as temperaturas sofrem maior variação ([BRASSEUR; SOLOMON, 1986](#)). A cromosfera é a camada que se estende

acima da fotosfera. Por ser uma região de transição entre a fotosfera e a coroa solar (região mais externa do Sol), a cromosfera apresenta maior variabilidade durante as fases do ciclo solar (BRASSEUR; SOLOMON, 1986; LEAN, 1991; LANG, 2001). A coroa é a camada mais externa da atmosfera solar, sendo que o seu limite exterior não é bem definido, e onde a temperatura aumenta até atingir milhões de graus. A coroa solar também apresenta uma variação na radiação durante o ciclo solar (BRASSEUR; SOLOMON, 1986).

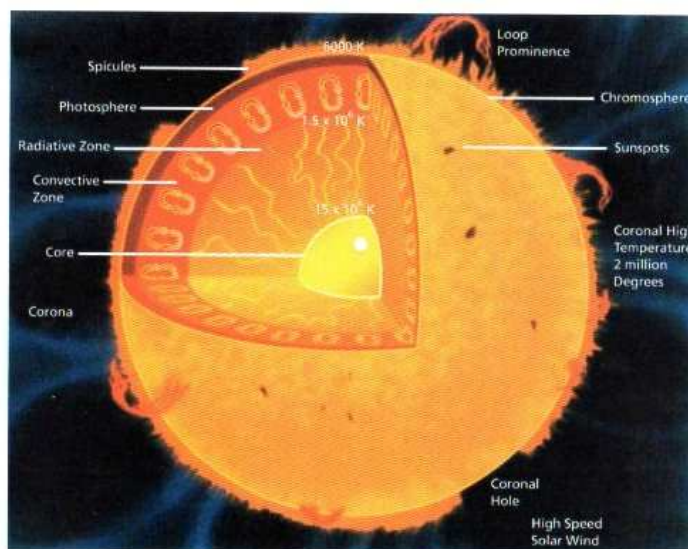


Figura 2.1 – Ilustração das características e alguns fenômenos que ocorrem na superfície do Sol.
 Fonte: LANG (2001)

A energia eletromagnética, quando disposta de acordo com seus comprimentos de onda (ou de acordo com suas frequências) forma um arranjo contínuo, conhecido como espectro eletromagnético. A Figura 2.2 (A) apresenta o espectro da distribuição da energia eletromagnética. Da esquerda para a direita, encontram-se as ondas curtas, conhecidas como raios gama e raios X ($<0,001 \mu\text{m}$) ($\sim 0,1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$), a seguir, na ordem crescente de comprimentos de onda, vem a radiação ultravioleta ($0,001 \mu\text{m}$ a $0,39 \mu\text{m}$), a luz visível ($0,39 \mu\text{m}$ a $0,77 \mu\text{m}$), a infravermelha ($0,77 \mu\text{m}$ a $1000 \mu\text{m}$) e os comprimentos de onda usados em RADAR, TV, rádio ($>1000 \mu\text{m}$) (IQBAL, 1993). A emissão solar em todas as suas faixas não é constante, sendo que diferentes

comprimentos de onda do espectro de radiação solar tem diferentes taxas de variabilidade relacionadas à condição da atividade solar.

A atmosfera da Terra é seletiva à absorção da radiação solar, sendo o vapor d'água (H_2O)_{vap}, o ozônio (O_3) e o gás carbônico (CO) os principais agentes absorvedores. Dentre eles, o ozônio atua principalmente na região do ultravioleta e os dois outros gases atuam na faixa do infravermelho do espectro eletromagnético. A Figura 2.2 (B) apresenta na abscissa o comprimento de onda e na ordenada a intensidade para a curva aproximada para o espectro de emissão do Sol com o comportamento de um Corpo Negro com temperatura de 5777 K. Observa-se na abscissa que os valores apresentam perfil crescente a partir dos intervalos da faixa do ultravioleta, atingindo pico de emissão entre 0,3 μm a 0,8 μm , no intervalo Visível (VIS) do espectro solar. Em seguida observa-se a curva suavemente declinando.

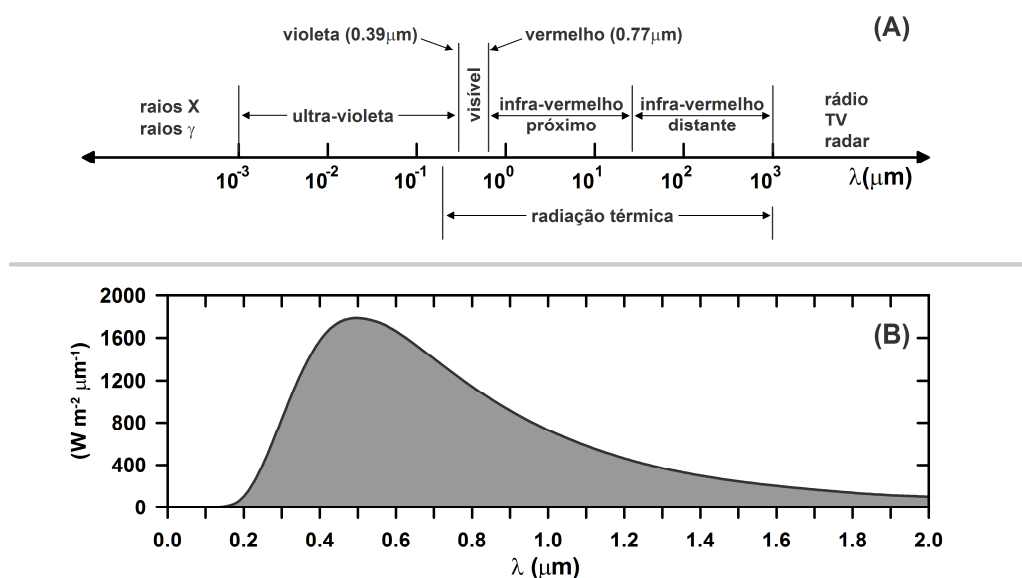


Figura 2.2 - (A) Espectro de radiação eletromagnética e, (B) espectro de radiação solar assumindo o Sol como corpo negro a uma temperatura de 5777 K.
 Fonte: Modificada de IQBAL (1993)

A resposta do modelo do Corpo Negro apresenta singularidades para a atmosfera da Terra, pois ela é praticamente transparente à radiação solar na faixa do Visível. Outros intervalos do espectro solar que são especiais em

termos da atmosfera terrestre se encontram na banda entre 8 μm e 12 μm (radiação infravermelha), onde a absorção atmosférica é também mínima (exceto na região próxima a 9,6 μm , em que o ozônio absorve intensamente). Estas regiões do espectro eletromagnético com reduzida absorção atmosférica são conhecidas como Janelas Atmosféricas.

Atualmente consegue-se determinar com grande precisão a quantidade de radiação emitida pelo Sol, que alcança o topo da atmosfera terrestre utilizando para isso, informações relacionadas à Irradiância Solar Total (TSI – Total Solar Irradiance) obtidas por instrumentos a bordo de satélites. (LANG, 2001; HATHAWAY, 2010, 2015).

2.1.1. Manchas solares

O campo magnético do Sol é gerado pelo processo de dínamo na zona convectiva (região abaixo da fotosfera). As mudanças no campo magnético são explicadas a seguir e podem ser vistas na Figura 2.3: A rotação diferencial do Sol (Tabela 2.1) interfere na camada convectiva, provocando rotação diferencial em latitude (a). Com o decorrer do tempo, a rotação diferencial modifica o campo magnético poloidal de polo a polo, transformando-o em campo magnético toroidal (meridional) (b), na base da camada convectiva (abaixo da fotosfera), a rotação diferencial provoca estiramento e intensifica o campo toroidal (c). Com o passar do tempo este campo torna-se instável e as forças de flutuação/empuxo o empurra em direção à superfície (d) e o campo toroidal confinado em vastos tubos de fluxo começa a emergir e alcança a fotosfera (e, f), desta forma surge um arco magnético assentado em duas zonas frias e de polaridade magnética oposta (a mancha solar) (g). A convecção meridional de grande escala atua na regeneração do campo poloidal, realizando o transporte do fluxo emergente para os pólos (h). O processo descrito acima termina com o restabelecimento do campo poloidal inicial, porém com polaridade oposta, onde os hemisférios apresentam polaridade invertida (i). Tem-se o início de um novo ciclo de 11 anos, com seu

magnetismo e surgimento de novas manchas (DAL PINO, 1995; LANG, 2001; MARQUES, 2010).

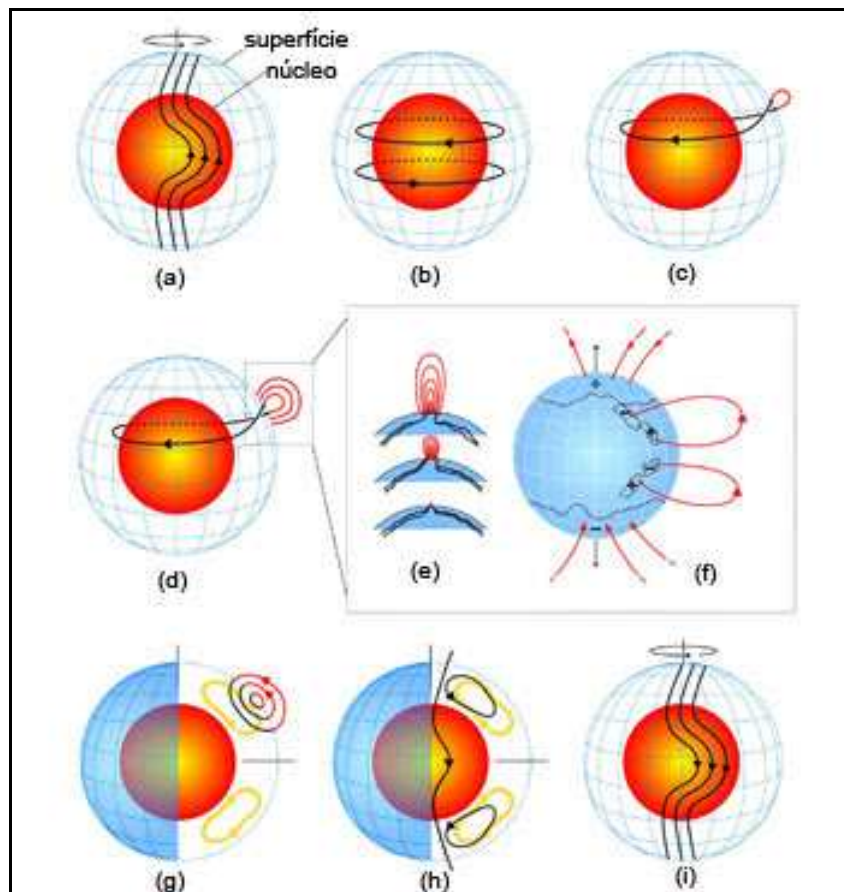


Figura 2.3 - Esquema do ciclo de atividade solar, ilustrando o mecanismo de como o campo magnético solar é alterado.
 Fonte: Modificado de MARQUES (2010)

Tabela 2.1 - Rotação diferencial na fotosfera

Latitude Solar (graus)	Período	Velocidade (km/h)
0 (Equador)	25,67	7097
15	25,88	6807
30	26,64	5922
45	28,26	4544
60	30,76	2961
75	33,40	1416

Fonte: Modificada de LANG (2001, página 87)

Portanto, as manchas solares apresentam uma variação periódica com duração média de aproximadamente 11 anos relacionadas com o magnetismo do Sol. Esse ciclo influencia a distribuição dos campos magnéticos e partículas carregadas no meio interplanetário e tem importantes consequências no estado físico da atmosfera da Terra, incluindo a variabilidade da atividade geomagnética (LEAN, 1991; FRÖLICH; LEAN, 1998).

O número de manchas solares é o índice mais antigo da atividade solar com registros oriundos da China datados de ≈ 800 AC (EDDY, 1976). Samuel Heinrich Schwabe, astrônomo alemão observou em 1843, no número de manchas solares, uma variação periódica de 9 a 12 anos. Esta variação da emissão do Sol de aproximadamente 11 anos ficou conhecida como ciclo solar de 11 anos ou ciclo solar de Schwabe.

Em 1908, George Ellery Hale, astrônomo americano, observou que ao final de cada ciclo de 11 anos ocorria uma inversão de polaridade do campo magnético, e após 2 ciclos (~ 22 anos), a configuração inicial era restaurada, como pode ser visualizado na Figura 2.4. A cor em azul representa as regiões magnéticas do Sol com polaridade negativa e as regiões em amarelo representam a polaridade positiva. Este ciclo de 22 anos ficou conhecido como ciclo de Hale (HOYT; SCHATTEN, 1997).

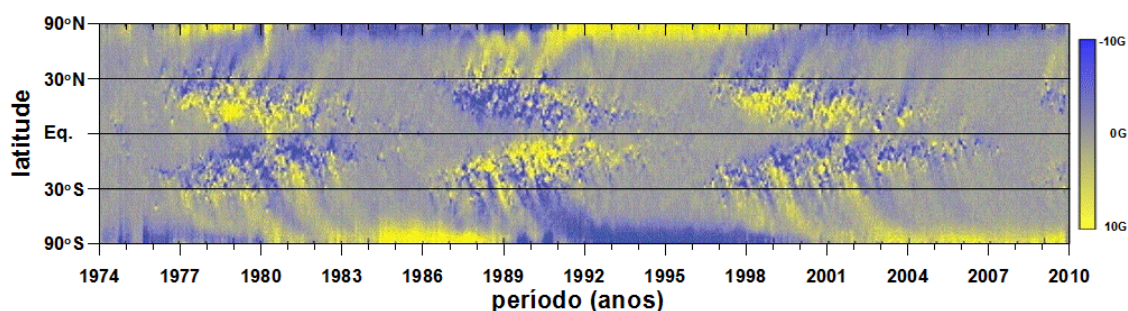


Figura 2.4 - Ilustração da inversão do campo magnético solar nos períodos próximos ao máximo de atividade solar.
Fonte: Modificada de MIESCH (2012)

É possível observar que as regiões de formação das manchas durante a evolução de um ciclo solar tendem a se deslocar das regiões de médias

latitudes (entre 30°-40° em ambos os hemisférios solares) para as regiões próximas ao equador (entre 10°-20°) seguindo um padrão que é descrito pela lei de Spörer (descrito pelo astrônomo inglês Richard Christopher Carrington em 1861 e refinado pelo astrônomo alemão Gustav Spörer). A distribuição latitudinal de manchas solares ao longo dos anos é mostrada na Figura 2.4 (HATHAWAY, 2010).

O ciclo solar pode ser monitorado através da determinação do número de manchas solares, da variação da emissão de rádio na faixa decamétrica de radiação e/ou em registros da variação de emissão nos comprimentos de onda relativos às emissões de UV/EUV (como as realizadas pelo satélite SOHO), dentre outros.

Com a invenção do telescópio em 1610, tiveram início as observações instrumentais do Sol. Uma característica que tem sido observada continuamente desde então é o número de manchas solares e os grupos de manchas solares (EDDY, 1976; HOYT; SCHATTEN, 1997).

Wolf em 1850 criou uma quantificação para as manchas solares, que foi designada por Rz (o número de manchas solares de Wolf), que foi composto por médias anuais do número de manchas solares, com dados obtidos de vários observatórios da Europa. Hoje a série compilada pode ser acessada on-line, por exemplo, a partir do National Geophysical Data Center, em Boulder, no Colorado. O número de Wolf é definido como:

$$R_z = k(10g + f) \quad (2.1)$$

onde 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. O fator de correção k é usado para compensar diferenças causadas por variações nos tamanhos de telescópio, de condições atmosféricas e de critérios entre diferentes observadores. Os períodos sem dados foram preenchidos por Wolf com valores interpolados

(EDDY, 1976; HARGREAVES, 1992; HOYT; SCHATTEN, 1997; ECHER ET AL. 2003, 2005; CLETTE ET AL., 2014; HATHAWAY, 2015).

Muitos trabalhos têm sido propostos com o objetivo de estabelecer possíveis mecanismos entre a variabilidade da atividade solar e seus possíveis impactos na Terra. Dentre as periodicidades supostas como oriundas da atividade solar com períodos mais longos que o ciclo de Schwabe, podem ser citados os ciclos de Gleissberg (Wolfgang Gleissberg), com oscilações entre 70-100 anos e o de Suess, com periodicidades de 210 anos. Tais periodicidades podem ser observadas através dos registros de crescimento de anéis de árvores, sedimentos marinhos e amostras de gelo (YOUSEF, 2000).

Vindas do espaço sideral temos os raios cósmicos que são partículas extremamente penetrantes e de alta energia, maiores que 1 MeV, que se deslocam a velocidades próximas da luz e penetram a atmosfera terrestre (LANG, 2001). O fluxo de raios cósmicos é composto por partículas divididos em 90% de prótons, 9% de partículas alfa e o restante de núcleos de elementos mais pesados (LANG, 2001; BRUM, 2004; OLIVEIRA ET AL., 2014). Os raios cósmicos podem ser de origem galáctica ou solar e ainda temos os raios cósmicos anômalos formados por partículas neutras de gás interestelar (BRUM, 2004; OLIVEIRA ET AL., 2014).

Os raios cósmicos que transitam no meio interplanetário não são os mesmos que observamos na superfície da Terra. São chamadas de raios cósmicos primários as partículas que circulam pelo meio interplanetário. Essas partículas primárias quando chegam à superfície terrestre interagem com elétrons, núcleos de átomos e moléculas, que constituem a atmosfera, sofrendo uma perda de energia que resulta na criação de novas partículas conhecidas como raios cósmicos secundários (LANG, 2001; OLIVEIRA ET AL., 2014).

Quando o Sol está menos ativo (ou mais calmo), o seu campo magnético não blindava tão efetivamente os raios cósmicos galácticos, os quais colidem com átomos e moléculas da atmosfera da Terra produzindo radioisótopos

cosmogênicos (e.g, ^{14}C , ^{10}Be , ^7Be , ^{22}Na , entre outros). Contrariamente, quando o Sol está mais ativo, a Terra recebe menos raios cósmicos galácticos, produzindo menos radioisótopos. Isótopos de ^{14}C , encontrado em anéis de árvores, e ^{10}Be , aprisionado em depósitos de gelo, são sensíveis ao influxo de raios cósmicos galácticos. Os registros desses isótopos existem há milhares de anos. Eles exibem variações cíclicas em torno de 2300, 210 e 88 anos, bem como os ciclos de 11 anos da atividade solar (HOYT; SCHATTEN, 1997).

Ao longo dos anos, foi constatado, através de registros naturais, que a Terra passou por alguns períodos atípicos e extremos do clima, que coincidem com períodos em que a atividade solar aparentemente foi extrema. Os grandes máximos e mínimos detectados ao longo dos ciclos são, aproximadamente: Mínimo de Oort (1040-1080), Máximo Medieval (1100-1250), Mínimo de Wolf (1280-1350); Mínimo de Spörer (1460-1550) e Mínimo de Maunder (1645-1715), Máximo Moderno (1900 - até o presente) (EDDY, 1976). Esses períodos podem ser visualizados na Figura 2.5 que apresenta a reconstrução da atividade solar usando como indicador o Grupo de Manchas Solares (GSN – Group Sunspot Number), ^{10}Be , e ^{14}C (USOSKIN, 2008).

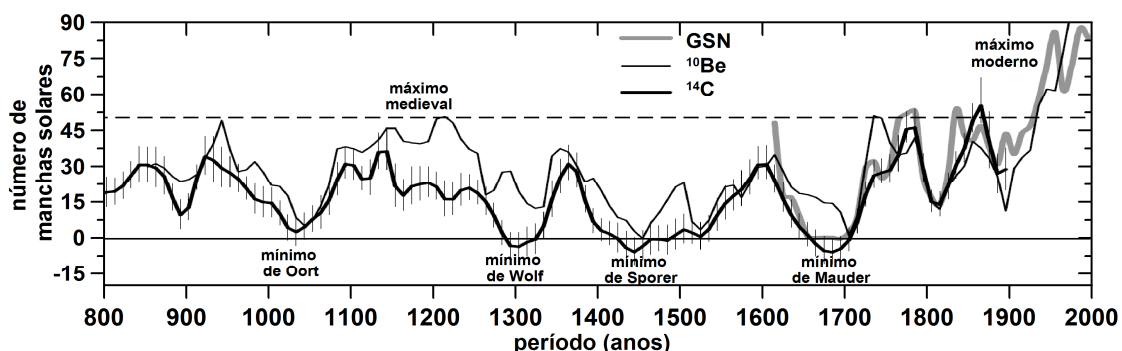


Figura 2.5 - Atividade solar derivada de reconstrução utilizando grupo de manchas solares, isótopos de ^{10}Be e ^{14}C .
Fonte: Modificado de USOSKIN (2008)

2.2. Parâmetros que são modulados pela variabilidade solar

A Irradiância Solar Total (TSI – Total Solar Irradiance) é a energia radiante emitida pelo Sol em todos os comprimentos de onda que atravessam um metro

quadrado por segundo no topo da atmosfera da Terra (ABBOT ET AL., 1913). A TSI varia com o comprimento de onda e durante o curso do ciclo de 11 anos, a irradiância solar emitida pelo Sol muda por aproximadamente 0.1% (LEAN, 1991; FRÖLICH; LEAN, 1998). A Figura 2.6 mostra as medições diárias da TSI proveniente de diferentes satélites exibindo o comportamento de longo período (HATHAWAY, 2010).

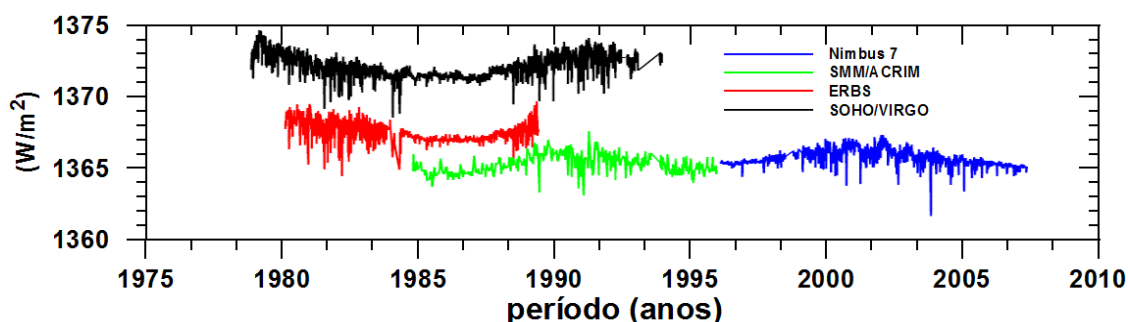


Figura 2.6 - Irradiância solar total (TSI) medidas pelos satélites Nimbus 7 (em preto), SMM/ACRIM (em vermelho), ERBS (em verde) e SOHO/VIRGO (em azul).
Fonte: HATHAWAY (2010)

2.2.1. Fluxo solar em rádio em 10,7 cm

O fluxo solar em 10,7 cm é definido como a emissão no comprimento de onda de rádio de 10,7 cm (2800 MHz) do disco solar (cromosfera superior e coroa) (TAPPING, 1987). O monitoramento do fluxo solar em rádio em 10,7 cm, F10,7 remonta a 1947, e é o registro direto da atividade solar de mais longa duração disponível (com exceção da quantidade de manchas solares). O índice F10,7 pode ser usado como indicador para outras emissões solares ou quantidades que são mais difíceis de obter ou como indicador simples de nível de atividade, por exemplo nos comprimentos de onda do ultravioleta e extremo ultravioleta (TAPPING, 2013).

É medido diariamente ao meio-dia local em uma largura de banda de 100 MHz centrada em 2800 MHz (equivalente ao comprimento de onda de 10,7 cm) em Penticton – Dominion Radio Astrophysical Observatory (DRAO), no Canadá. São feitas três medidas por dia que duram em torno de uma hora cada. Dentro

da hora da medida são feitas quatro medições. No verão as medidas estão centradas às 17:00, 20:00 e 23:00 UT e no inverno às 18:00, 20:00 e 22:00 UT. O F10,7 é geralmente expresso em unidades de fluxo solar SFU (*Solar Flux Units*) ($1\text{SFU}=10^{-22}\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$) (TAPPING, 2013).

O fluxo solar F10,7 é medido por monitores de fluxo que usam dois pequenos radiotelescópios, que funcionam em paralelo, um sendo o principal e outro atuando como um backup. Cada radiotelescópio é uma antena parabolóide de 1,8 m de diâmetro montada equatorialmente e conectada através de um guia de ondas até o sistema receptor. (TAPPING, 1987, 2013; HOYT; SCHATTEN, 1997). A Figura 2.7 apresenta o fluxo solar rádio de 10,7 cm (ou índice F10,7) e sua variabilidade ao longo dos anos.

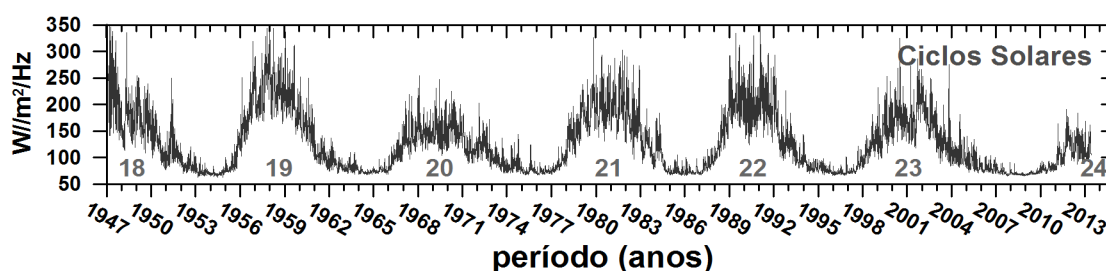


Figura 2.7 - Série do Fluxo solar observado (média mensal) em 2800 MHz (10,7 cm) no período de janeiro de 1947 a janeiro de 2014, com a marcação dos ciclos de 11 anos.

O índice solar F10,7 pode ser usado como um índice de resolução diária em períodos longos para encontrar tendências na atividade solar. Em relação ao número de manchas solares, tem a vantagem de descrever pequenas variações das emissões solares durante períodos de atividade solar mínima, mesmo na ausência de manchas solares.

2.2.2. Irradiância solar no extremo ultravioleta

Na investigação da variação da atividade solar também foram utilizados os registros de fluxo solar na banda do Extremo Ultravioleta (EUV) obtidos a partir da sonda Solar and Heliospheric Observatory – SOHO (DOMINGO ET AL., 1995), do experimento Solar EUV Monitor (SEM) que faz parte do instrumento

Charge Element and Isotope Analysis System (CELIAS), abordo da sonda SOHO (JUDGE ET AL., 1998; FLOYD ET AL., 2005; DIDKOYSKY ET AL., 2009; SOLOMON ET AL., 2010; BRUM, 2011).

A missão SOHO é um projeto de cooperação internacional entre a Agência Espacial Européia (ESA) e da NASA com a finalidade de estudar o Sol desde o núcleo até a coroa solar, o vento solar, além de estudar a interação Sol-Terra (DOMINGO ET AL., 1995; DIDKOYSKY ET AL., 2009, 2012). Foi lançada em dezembro de 1995 e conta com 12 instrumentos independentes que realizam observações do Sol, sendo um deles o instrumento CELIAS/SEM (WIEMAN ET AL., 2011; DIDKOYSKY ET AL., 2006, 2009, 2012).

O instrumento CELIAS foi desenvolvido para estudar a composição do vento solar e as partículas energéticas solares e interplanetárias em correlação com o fluxo EUV solar. O CELIAS é constituído por três sensores diferentes, que são utilizados para um estudo direcionado da composição de carga elementar, isotópica e iônica do vento solar ou íons energéticos que emanam do Sol (DIDKOYSKY ET AL., 2006, 2009, 2012). O monitor de EUV solar (SEM) incluso no CELIAS monitora o fluxo total EUV do Sol (JUDGE ET AL., 1998; DIDKOYSKY, 2009; SOLOMON ET AL., 2010).

Solomon et al., (2010) encontraram um comportamento anômalo para o EUV durante o último mínimo solar. A irradiância solar na faixa do UV tem sua variação associada ao período de rotação solar de 27 dias e ao ciclo solar de 11 anos. A amplitude da variação é maior para menores comprimentos de onda. O EUV absorvido na termosfera (~90-500 km) é a principal fonte ionizante da ionosfera terrestre. Em altitudes próximas a 400 km a temperatura ionosférica é da ordem de 600 K durante o mínimo solar; enquanto durante o período de máximo solar, este valor pode chegar a ~1500 K. Esta variação da temperatura em ~400 km causa a variação da densidade na termosfera superior. Neste mínimo 23/24 foram registrados valores muito baixos nas emissões de EUV quando comparados com os ciclos anteriores (SOLOMON

ET AL., 2010). Por conseguinte, a Ionosfera apresentou-se atipicamente mais baixa e mais fria do que nos ciclos anteriores durante o mínimo solar e a termosfera superior também esteve menos densa durante este mesmo período (APONTE ET AL., 2013).

A Figura 2.8 apresenta medidas de EUV feitas pelo Solar EUV Monitor (SEM) do Solar and Heliospheric Observatory – SOHO. O instrumento SEM apresenta medidas de banda integrada no EUV entre 26-34 nm e na banda 0,1-50 nm. As duas linhas horizontais inseridas nesta figura mostram a diferença no fluxo de radiação entre os dois mínimos.

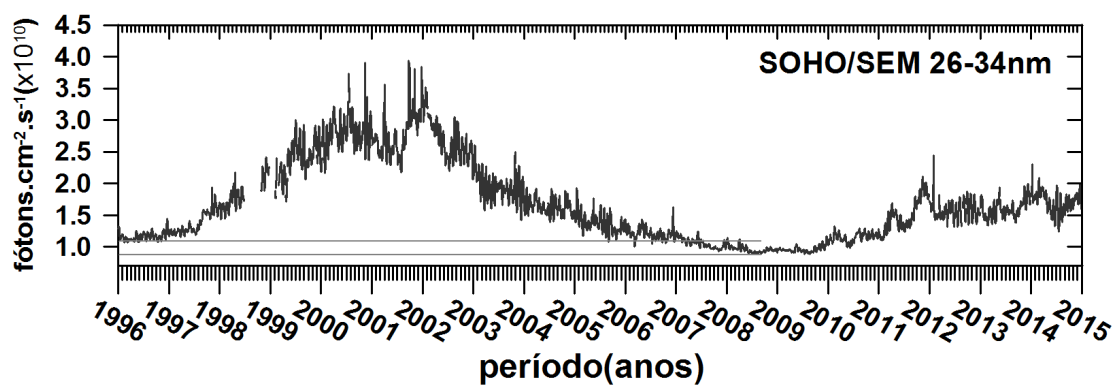


Figura 2.8 - Irradiância EUV solar entre 26-34 nm no último ciclo solar medido pelo SOHO/SEM.

3 ATMOSFERA DA TERRA

A atmosfera terrestre apresenta diferentes regiões cuja classificação é feita de acordo com as peculiaridades observadas frente à variação das características do meio, tais como: temperatura, composição atmosférica e também quanto ao escape dos gases atmosféricos (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; RATCLIFFE, 1972; KIVELSON; RUSSELL, 1995; BRUM, 2004).

A Figura 3.1 em seu painel (A) apresenta a distribuição vertical em função da altitude das diferentes camadas atmosféricas divididas em função de sua temperatura (troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera) e mistura (homosfera, heterosfera). Separando as camadas temos as 'pausas', que em função da temperatura as camadas são denominadas de tropopausa, estratopausa, mesopausa e termopausa. O painel (B) da mesma figura mostra a distribuição altitudinal dos principais constituintes neutros da atmosfera obtidos pelo modelo NRLMSISE-00 Atmosphere que podem ser encontrados neste link (<http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>).

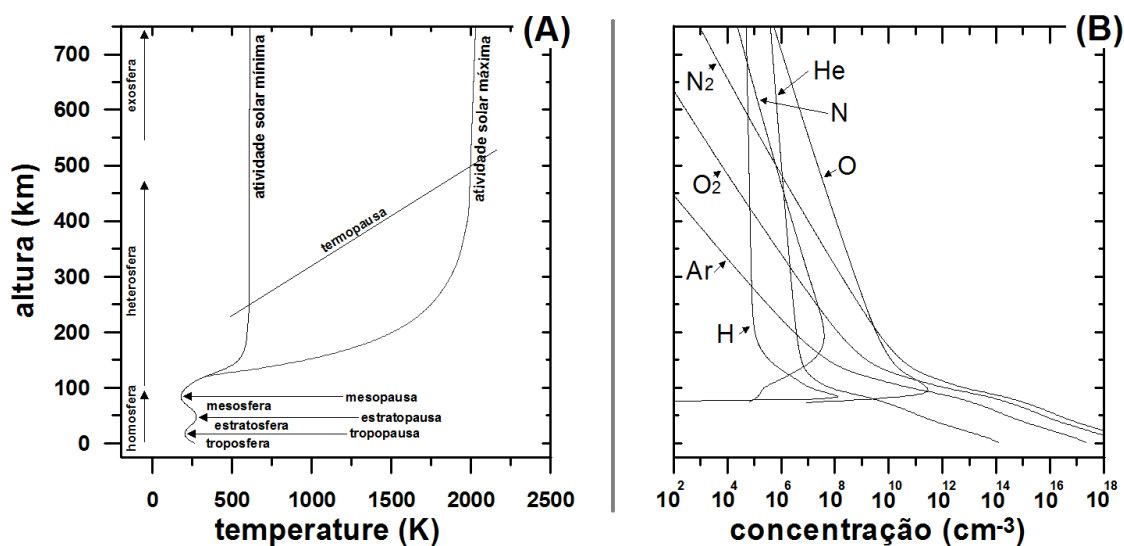


Figura 3.1 - (A) Distribuição vertical da temperatura na homosfera e heterosfera; (B) variação com a altura dos principais componentes na atmosfera.
Fonte: O painel A foi modificado de [BANKS; KOCKARTS \(1973\)](#)

De acordo com o perfil vertical de temperatura a primeira camada conhecida da atmosfera da Terra a partir da superfície é:

- Troposfera, a qual se estende da superfície terrestre até a base da tropopausa em torno de aproximadamente 18 km acima do nível do mar. Quase todos os fenômenos meteorológicos ocorrem nesta camada. A temperatura nesta camada decresce com a altitude, em torno de 10 K/km. Devido a variações na temperatura, pressão e densidade podem existir muita turbulência (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; HARGREAVES, 1992).
- Estratosfera, se estende desde a tropopausa até cerca de 50 km da base da estratopausa, nesta região fica a maior parte do ozônio da atmosfera. Caracterizada pelas correntes horizontais e aumento de temperatura com a altitude suave, ou seja, pouca variação de temperatura (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; HARGREAVES, 1992).
- Mesosfera, desde a estratopausa até cerca de 80 km de altitude, conhecida também como média atmosfera. Aqui a temperatura torna a decrescer com a altitude até em torno de 180 K. Nesta região podemos estudar as ondas de gravidade e ondas de maré devido ao movimento de propagação dos gases ionizados (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; HARGREAVES, 1992).
- Termosfera, desde a mesopausa até cerca de 600 km. A temperatura aumenta com a altitude rapidamente devido à energia recebida do Sol, em torno de 1000 K. (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; RATCLIFFE, 1972; KELLEY, 1989; HARGREAVES, 1992; KIVELSON; RUSSELL, 1995). O fluxo solar na faixa do EUV é a força motriz para o aquecimento da termosfera (acima de \approx 80 km). A irradiância nesses comprimentos de onda é absorvida pelos constituintes O, O₂ e N₂. O EUV também ioniza a atmosfera neutra da Terra formando a ionosfera. O fluxo de EUV pode

variar do mínimo para o máximo no ciclo solar em um fator de 2 para 10 vezes (LEAN, 1991).

- Finalizando, a exosfera é a região mais distante da superfície da Terra, acima de 600 km, marcando a transição da atmosfera da Terra com o meio-interplanetário e extremamente rarefeita. A temperatura pode variar de 1000-2000 K, em função da atividade solar e período do dia (REES, 1964; RISHBETH; GARRIOTT, 1969; RATCLIFFE, 1972; BRASSEUR; SOLOMON, 1986; HARGREAVES, 1992; KIVELSON; RUSSELL, 1995).

De acordo com o perfil vertical da composição atmosférica, a atmosfera é uma mistura de gases onde o nitrogênio e o oxigênio moleculares são os componentes mais abundantes. Essa mistura é praticamente constante na homosfera ou turbosfera (região abaixo do limite denominado de turbopausa, a qual se encontra a aproximadamente 100-110 km de altitude). Nesta região, a proporção de mistura de certo constituinte em relação ao todo se mantém quase inalterada, mantendo-se uma proporcionalidade em torno de 78% de nitrogênio molecular (N_2), 21% de oxigênio molecular (O_2), seguidos pelo argônio (Ar), dióxido de carbono (CO_2), gases nobres e outros constituintes em proporções ainda menores (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; RATCLIFFE, 1972; HARGREAVES, 1992; KIVELSON; RUSSELL, 1995).

Em contraste com a camada inferior, a homosfera, a heterosfera, que se estende a partir da turbopausa e apresenta o peso molecular médio do ar variando com a altitude e os gases separando-se sob o efeito da gravidade com suas próprias escalas de altura (difusão molecular). A difusão molecular por movimento aleatório de átomos e moléculas é considerada um processo de transporte importante para explicar a distribuição das espécies químicas nesta região da atmosfera terrestre (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; RATCLIFFE, 1972; HARGREAVES, 1992; KIVELSON; RUSSELL, 1995).

Na heterosfera, o nitrogênio (N_2) e o oxigênio molecular (O_2) deixam de serem os componentes majoritários devido à difusão molecular, substituídos pelo

oxigênio atômico (O), hélio (He) e hidrogênio (H). Entre os constituintes minoritários mais importantes incluem-se o ozônio (O₃), os óxidos de nitrogênio, os metais alcalinos, o dióxido de carbono (CO₂) e a água (H₂O)_{vap}. Os constituintes minoritários, os quais são responsáveis por apenas uma milionésima parte do total dos constituintes atmosféricos locais, têm um papel importante na química e na composição da baixa ionosfera (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; RATCLIFFE, 1972; HARGREAVES, 1992; KIVELSON; RUSSELL, 1995).

3.1. A Ionosfera da Terra

A densidade eletrônica na ionosfera varia em função da densidade e proporção dos constituintes da atmosfera neutra e de sua razão de ionização, sofrendo aumento considerável durante o dia em presença do forçante solar e do decaimento à noite (KIVELSON; RUSSELL, 1995) devido aos processos de recombinação e transporte.

A ionosfera encontra-se embebida na atmosfera neutra e existe em conjunto com parte da mesosfera e com a termosfera da Terra (HARGREAVES, 1992). Em especial, é nessa região da atmosfera que a quantidade de elétrons livres embebida pela atmosfera neutra é suficiente para influenciar a propagação de ondas de rádio (RATCLIFFE, 1972), tornando-se assim uma camada de grande relevância para todos os processos de comunicação que utilizam tal banda de frequência.

Na ionosfera terrestre o perfil da taxa de produção de pares de elétrons-íons varia com a altitude, dependendo da queda exponencial com a altura da concentração dos gases atmosféricos e com a intensidade da radiação solar, que se torna crescente em função da altura, como pode ser visto na Figura 3.2 (A).

Em consequência imagina-se que a produção de pares elétrons-íons deva passar por um máximo em alturas distintas na atmosfera e em especial na

ionosfera, como visto anteriormente. A ionosfera terrestre apresenta três valores máximos de densidade eletrônica formando três regiões distintas denominadas de regiões D, E e F (Figura 3.2 B).

Tal divisão deve-se, principalmente, aos diferentes constituintes da atmosfera neutra, aos processos de ionização dominantes nas diferentes alturas, aos processos de difusão, bem como às condições ambientais envolvidas no processo de recombinação.

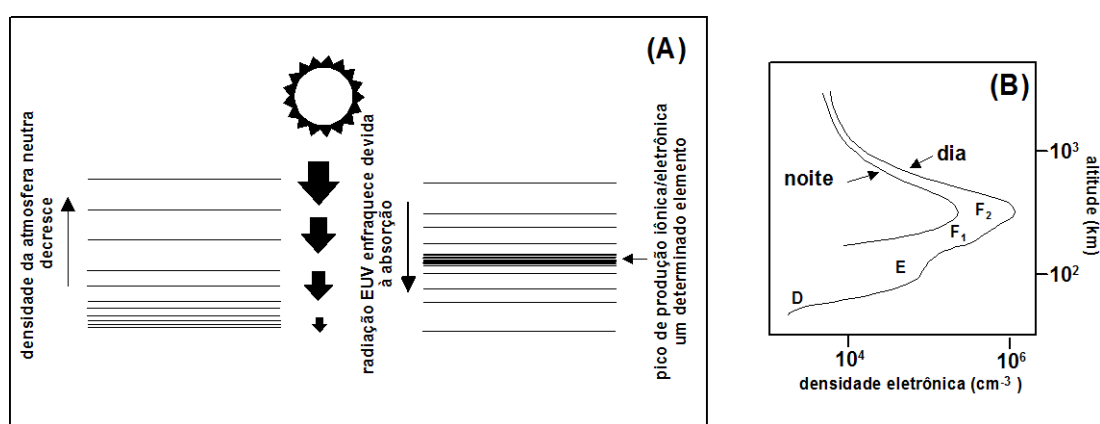


Figura 3.2 - (A) Representação da formação de um pico de ionização de um possível constituinte na ionosfera. (B) Perfil ionosférico ilustrando as distintas regiões verticais para o período diurno e noturno.

Fonte: Modificada de [MCNAMARA \(1991\)](#) por [BRUM \(2004\)](#)

3.1.1. Regiões da ionosfera

A região D é a mais baixa e menor em extensão, quando comparada às outras duas regiões ionosféricas. Situada entre aproximadamente 60-95 km de altitude, possui pico de densidade em torno de 10^3 cm^{-3} elétrons (em condições normais) a 85 km. Este valor de densidade equivale a 1% da densidade eletrônica no pico da região E, e ainda a cerca de 0,1% a 0,2% da densidade do pico da camada na região F. Embora menos densa, a região D é a principal responsável pela absorção das ondas de rádio em alta frequência que é refletida nas regiões superiores ([HARGREAVES, 1992](#)).

A região E, entre 95 km e 180 km de altitude, tem seu pico de densidade em ~105 km. Essa região é importante pela presença de correntes elétricas que nela fluem e por sua interação com o campo geomagnético. Sua alta condutividade é responsável pelas correntes elétricas ionosféricas. A região E possui uma estrutura iônica mais simplificada quando comparada à da região D. Os principais íons primários desta região são: N_2^+ , O_2^+ , O^+ e NO^+ . Ainda podem estar presentes uma grande quantidade de íons metálicos de origem meteórica, tais como Fe^+ , Mg^+ , Ca^+ e Si^+ , os quais podem contribuir para a formação da camada E esporádica (Es). A camada E esporádica tem este nome porque ela só aparece quando temos um alto nível de ionização da camada E. Ela costuma aparecer com mais frequência no verão. Quanto mais perpendiculares são os raios solares que incidem sobre a ionosfera, maiores serão as probabilidades de aparição da camada E esporádica diurna. (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; KELLEY, 1989; HARGREAVES, 1992).

Acima de 180 km de altitude, encontra-se a região F, que apresenta três subcamadas que são as regiões refletoras mais importantes. Estas são a camada F1, que é encontrada de dia e esporadicamente à noite, a camada F2, que é encontrada durante o dia e a noite (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; HARGREAVES, 1992), e na região equatorial a camada F3 (BATISTA ET AL., 2002; BATISTA; ABDU, 2004).

O principal íon da região F é o O^+ , que é principalmente formado pela ionização do oxigênio atômico (O) pela radiação UV/EUV. A concentração de elétrons varia com a atividade solar e geomagnética, e com a sazonalidade. A camada F1 é constituída por elétrons livres e O^+ . A transição entre a perda eletrônica, que ocorre na parte inferior da ionosfera, e a perda linear na parte superior produz um pico ou uma inflexão no perfil vertical da densidade eletrônica.

A camada F2 também é formada por elétrons livres e O^+ , englobando toda a parte superior da ionosfera onde encontramos o pico máximo da densidade eletrônica ao longo do dia e da noite. A concentração eletrônica da camada F2

é basicamente modulada pelos processos químicos, difusão e deriva eletromagnética **ExB** (na região equatorial e em baixas latitudes). Acima do pico da camada F2 o plasma pode ser considerado em equilíbrio difusivo (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; HARGREAVES, 1992).

Na camada F2 em torno da região equatorial quando temos uma combinação adequada de ventos, campos elétricos e geomagnéticos, pode aparecer esporadicamente uma camada denominada F3. (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; HARGREAVES, 1992; BATISTA ET AL., 2002; BATISTA; ABDU, 2004).

3.1.2. Anomalia Equatorial de ionização ou Anomalia de Appleton

Era esperado que na região equatorial ionosférica a incidência da densidade de ionização fosse alta durante o dia, devido à concentração maior de partículas ionizadas em relação a locais de latitudes mais afastadas. Mas foi observado que nas latitudes da região equatorial existe baixa concentração de plasma, isto se deve a processos de transporte que elevam o plasma para latitudes geomagnéticas mais altas nos dois hemisférios. Esta anomalia é conhecida como Anomalia Equatorial de Ionização ou Anomalia de Appleton (APPLETON, 1946; KELLEY, 1989; SOUZA, 1997; DIOGO, 2008; ELY, 2010; BATISTA ET AL., 2011).

A formação da anomalia se deve a interação entre o campo elétrico equatorial e zonal direcionado para leste e o plasma ionosférico que gera a deriva vertical eletromagnética **ExB** para cima. Os campos elétricos são induzidos pela ação dos ventos de maré na região E e pelos ventos termosféricos na região F, onde os elétrons e os íons se movimentam através das linhas do campo geomagnético.

Durante o dia esta deriva vertical eleva o plasma para latitudes altas e altitudes mais baixas nos dois hemisférios. Devido à ação da força da gravidade e da força do gradiente de pressão, estas partículas fluem ao longo das linhas de campo, movendo-se no sentido dos pólos em torno de $\pm 14^\circ$ de latitude

geomagnética, formando as chamadas cristas da Anomalia Equatorial de Ionização. A elevação do plasma ionosférico em latitudes geomagnéticas mais altas é chamada de Efeito Fonte e é responsável pelo aparecimento da Anomalia Equatorial de Ionização diurna ou Anomalia de Appleton (KELLEY, 1989; SOUZA, 1997; DIOGO, 2008; ELY, 2010; BATISTA ET AL., 2011). Ao fluírem pelas linhas de campo, os elétrons retirados das regiões equatoriais atingem altitudes de baixa difusão, ocorrendo nestas localidades um acúmulo de plasma no período noturno. No hemisfério sul a localidade de Cachoeira Paulista está inserida nesta faixa de acúmulo de plasma (SOUZA, 1997).

3.2. Fontes de Ionização na Ionosfera

Para todos os processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera terrestre, a radiação solar é a principal força motriz. Além das fontes de ionização de origem solar (radiação solar e raios cósmicos solares), existe outra fonte de origem externa que são os raios cósmicos galácticos.

Em condições normais, a principal fonte de ionização abaixo de 65 km são os raios cósmicos galácticos. Abaixo de 85 km, a radiação Lyman α (121,6 nm) torna-se a principal fonte de fotoionização da molécula de óxido nítrico (NO) (1100 – 1300 Å). Acima desta altura, a fotoionização deve-se principalmente aos raios-X solares que ionizam O_2 e N_2 com comprimento de onda menor que 100 Å e também à radiação ultravioleta com um comprimento de onda menor que 1030 Å. A linha do Lyman β em 1025,7 Å e a linha C(III) em 977 Å são todas de grande importância, pois ionizam o O_2 . O Lyman continuum de $\lambda < 910 \text{ Å}$ também contribui, através da ionização do oxigênio atômico (RISHBETH; GARRIOTT, 1969; HARGREAVES, 1992).

Portanto, a principal fonte de formação de íons na ionosfera é devido aos constituintes da atmosfera neutra absorverem a radiação solar nas faixas espectrais do extremo ultravioleta (EUV) e de raios X, onde os átomos neutros ficam carregados positivamente devido ao processo de fotoionização, e ocorre um aumento da quantidade de elétrons livres (MCNAMARA, 1991). Desta

forma, a concentração eletrônica da ionosfera é altamente correlacionada com a atividade solar.

Um dos problemas no estudo da ionosfera é a variabilidade da densidade de elétrons livres em função de diversas variáveis, como: a hora do dia, a época do ano, a localização geográfica, a configuração do campo geomagnético, o nível de atividade geomagnética e a atividade solar de 11 anos.

3.3. Instrumentação para observação da Ionosfera

Para estudarmos os fenômenos que ocorrem na Ionosfera são utilizados dados ionosféricos obtidos pelo instrumento conhecido como ionossonda. O uso das ionossondas analógicas (também denominadas de convencionais) foi muito difundido devido ao baixo custo de manutenção e sua boa aplicabilidade como instrumento científico para realizar medidas da ionosfera e monitorar as condições ionosféricas ([RISHBETH; GARRIOT, 1969](#); [BIBL](#); [REINISCH, 1978](#); [REINISCH, 1986A](#); [HARGREAVES, 1992](#); [BERTONI, 1998](#); [BIBL, 1998](#)). Com o avanço tecnológico, as técnicas de sondagem ionosférica evoluíram e as ionossondas analógicas foram substituídas por ionossondas digitais (ex. digissonda, CADI, etc), onde todo o controle sobre o processamento e armazenamento dos dados se tornou digital. Com este novo instrumento foi possível expandir o número de dados ionosféricos a ser observado e o custo de manutenção também foi reduzido ([BIBL; REINISCH, 1978](#); [REINISCH, 1986A,B](#); [REINISCH ET AL., 1989](#); [FERREIRA, 2007](#); [GONÇALVES ET AL., 2007](#))

3.3.1. A Ionossonda

A ionossonda é um instrumento de sondagem utilizado para monitoramento e pesquisa da ionosfera, que mede o perfil de densidade eletrônica em função da frequência de sondagem. É um radar de alta frequência composto por um conjunto de antenas e um sistema transmissor-receptor. O transmissor emite pulsos de energia para a ionosfera na faixa de radio frequência (entre 1 a 30

MHz) e o receptor registra a intensidade do pulso refletido nas camadas ionosféricas. O tempo decorrido entre a transmissão do pulso e o seu retorno ao receptor é registrado pela ionossonda fornecendo a altura onde ocorreu a reflexão do pulso. Através da varredura em frequência destes pulsos, temos um registro de frequência em função da altura virtual, obtendo-se assim um perfil de densidade eletrônica da ionosfera, o qual é conhecido como ionograma. (RISHBETH; GARRIOT, 1969; BIBL; REINISCH, 1978; REINISCH, 1986A,B; BATISTA ET AL., 1991; HARGREAVES, 1992; FERREIRA, 2007; GONÇALVES ET AL., 2007; ELY, 2010).

A ionossonda analógica mede a altura de reflexão de diferentes frequências emitidas e deste modo o perfil de densidade eletrônica da ionosfera. A ionossonda digital mais moderna e sofisticada, além de medir a densidade eletrônica, por exemplo, pode também medir a velocidade de deriva do plasma ionosférica (BIBL; REINISCH, 1978; REINISCH, 1986A,B; REINISCH ET AL., 1989; REINISCH, 1995; BERTONI, 1998; BIBL, 1998; YAMASHITA, 1999; REINISCH ET AL., 2004; FERREIRA, 2007; GONÇALVES ET AL., 2007; ELY, 2010).

Neste estudo foram utilizados os dados das ionossondas analógicas e digitais (digissondas e CADI) das estações ionosféricas de Fortaleza e Cachoeira Paulista do INPE. A estação de Cachoeira Paulista começou a operar em fevereiro de 1973, com uma ionossonda analógica modelo Magnetic AB que foi transferida de São José dos Campos e que funcionou até os meados de maio de 1991, tendo sido posteriormente deslocada para São Luis. Em 1990 foi instalada uma digissonda DGS256 a qual funcionou até o final de agosto de 1994 (também deslocada para São Luis). Em fevereiro de 1996 foi instalada uma nova digissonda DGS256 a qual se encontra em funcionamento até o presente (BERTONI, 1998; FERREIRA, 2007; GONÇALVES ET AL., 2007; ELY, 2010; AQUINO, 2015).

Uma ionossonda analógica modelo C4 que pertencia a Marinha Americana e estava operando em Natal em 1967 foi doada ao INPE e transferida para a estação de Fortaleza em julho de 1975, a qual se manteve operacional até março de 1993. Em setembro de 1994 foi instalada uma ionossonda digital modelo CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde) em Fortaleza a qual operou até outubro de 2003. Em janeiro de 2001 foi instalada uma digissonda DPS-4 (Digisonde Portable Sounder) que funcionou paralelamente ao CADI até este último ser transferido para a estação de Cariri. Atualmente em Fortaleza se encontra em operação uma digissonda modelo DPS-4 (BERTONI, 1998; FERREIRA, 2007; GONÇALVES ET AL., 2007; ELY, 2010; AQUINO, 2015).

3.3.2. O Ionograma

O ionograma é um registro produzido por sondadores ionosféricos (ionossondas) que mostra a variação da altura virtual (h') de reflexão da onda de rádio em função da frequência (f) dessa onda. A altura medida é chamada virtual porque o sondador mede o tempo (t) decorrido entre a transmissão e a recepção do mesmo pulso considerando que a onda se propagou à velocidade da luz no vácuo (c), obtendo assim a relação:

$$h'(f)=ct/2 \quad (3.1)$$

O pulso recebido é chamado de eco e a altura virtual é sempre maior que a altura real, devido ao atraso sofrido pelo pulso ao se propagar num meio mais denso que o vácuo, ou seja, a velocidade de propagação da onda na ionosfera é menor que a velocidade da luz no vácuo (c).

Na parte inferior da ionosfera, a onda de rádio incidente na presença do campo magnético terrestre geralmente se divide em duas ondas de diferentes polaridades as quais são refletidas independentemente na ionosfera e são denominadas de onda de modo ordinário (o) e onda de modo extraordinário (x).

Como as condições de reflexão das ondas são diferentes, cada uma produz o seu próprio padrão $h'(f)$, porém deslocados em frequência, sendo que a onda extraordinária é a que mostra a frequência crítica mais alta. À medida que a frequência transmitida aumenta, a altura virtual também aumenta e quando a onda atinge a altura onde a densidade eletrônica é máxima (o pico da camada), a onda incidente atravessa a camada, não havendo o retorno do pulso incidente. Neste caso, o sondador mede a altura virtual como infinita e a frequência é chamada de frequência crítica (PIGGOTT; RAWER, 1978; WAKAI ET AL., 1987).

A Figura 3.3 apresenta uma representação idealizada de um ionograma típico e seus principais parâmetros de cada camada da ionosfera, enquanto que na Tabela 3.1 são descritos alguns dos parâmetros que podem ser obtidos por uma ionosonda visto na Figura 3.3.

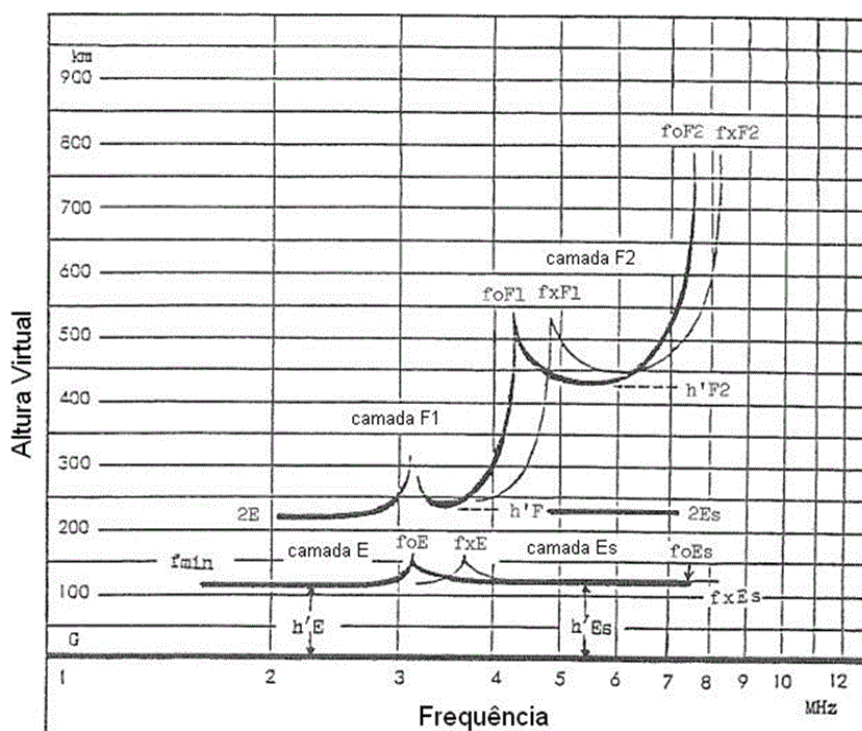


Figura 3.3 - Figura de um ionograma típico com os principais parâmetros de cada camada.

Fonte: Figura modificada de WAKAI ET AL. (1987)

Tabela 3.1 - Descrição dos parâmetros obtidos por uma ionossonda.

Parâmetro	Descrição
fmin	menor frequência na qual o traço do eco foi observado no ionograma.
fbEs	frequência de bloqueio da camada Es, ou seja, menor frequência da onda ordinária, na qual a camada Es começa a ser transparente.
foEs	máxima frequência da onda ordinária, na qual o traço contínuo da camada Es é observado.
foE	frequência crítica da onda ordinária correspondente a camada densa mais inferior na região E que causa descontinuidade na altura do traço E.
foE2	frequência crítica da onda ordinária da camada E2 densa que aparece algumas vezes entre a camada E normal e a camada F1.
foF1	frequência crítica da onda ordinária da camada F1.
foF2	frequência crítica da onda ordinária da camada F2.
foF3	frequência crítica da onda ordinária da camada F3, observada em latitudes próximas ao equador magnético principalmente durante períodos de baixa atividade solar.
M(3000)F2	fator MUF para um percurso de 3000 km, usando a camada F2.
fml	mínima frequência na qual os traços de espalhamento são observados na camada F.
fxl	máxima frequência do traço extraordinário na qual reflexões da região F são registradas.
h'Es	altura virtual mínima da camada Es observada.
h'E	altura virtual mínima em toda a região E normal.
h'E2	altura virtual mínima da camada E2.
h'F	altura virtual mínima do traço da onda ordinária de toda a região F.
h'F2	altura virtual mínima do traço da onda ordinária da camada estável mais alta na região F.
h'F3	altura virtual mínima do traço da onda ordinária da camada F3, quando a mesma esta presente.
hpF2	altura virtual do traço ordinário medida na frequência $0.834 \times f_oF_2$.
hmF2	altura real do traço ordinário da camada F2.

Geralmente os ionogramas são fornecidos diariamente em intervalos de tempo de 15 em 15 minutos, salvo quando são utilizados em campanhas e que podem ter intervalos menores de aquisição. Os ionogramas obtidos pelas ionossondas analógicas (Figura 3.4 A) estão disponíveis em filmes de 35 mm (Figura 3.4 B) enquanto que os ionogramas obtidos pelas ionossondas digitais são armazenados em arquivos digitais (Figura 3.5) (BERTONI, 1998; YAMASHITA, 1999; FERREIRA, 2007; GONÇALVES ET AL., 2007; ELY, 2010).

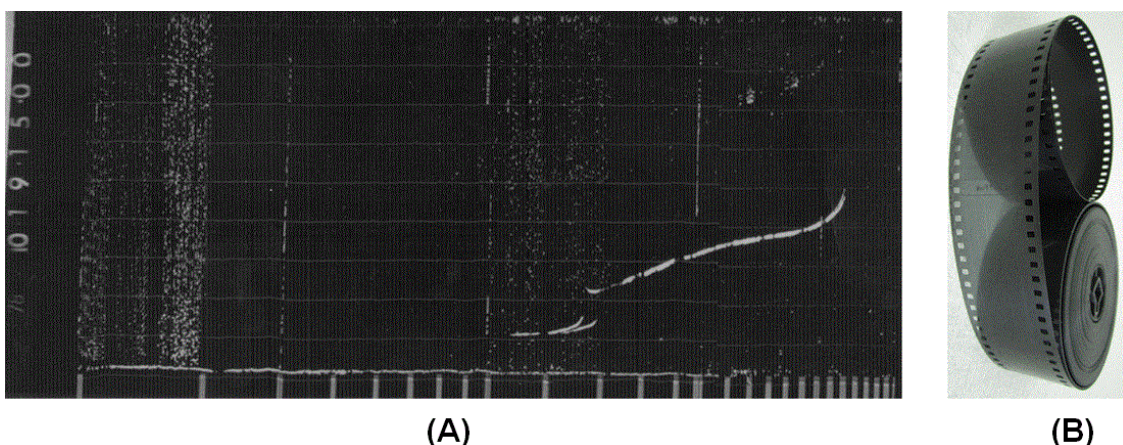


Figura 3.4 - (A) Ionograma obtido por uma ionossonda analógica às 15:00 horas LT (hora local) em Cachoeira Paulista do dia 19/10/78. Na abscissa está a frequência da densidade eletrônica e na ordenada a altura virtual e; (B) exemplo de um filme de 35 mm onde são armazenados os registros da ionossonda analógica.

Fonte: (A) Imagem cedida por Aquino (2015)

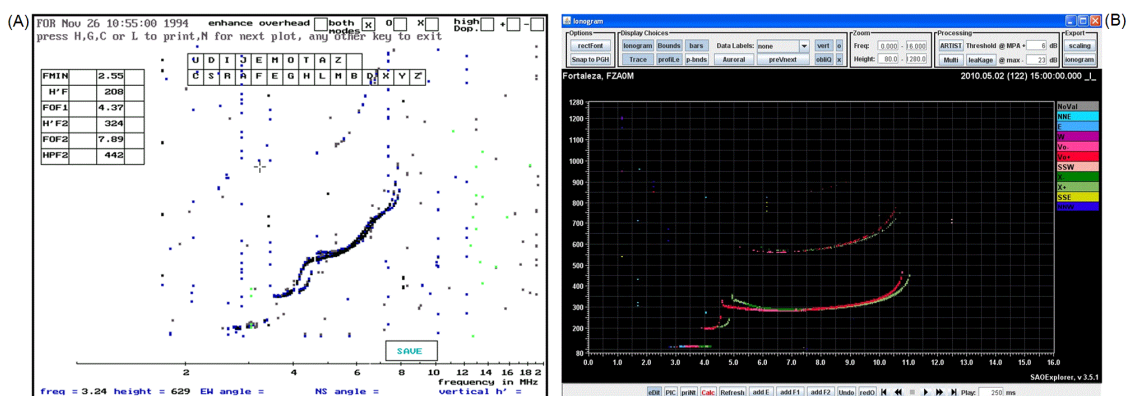


Figura 3.5 - (A) Imagem de um ionograma de uma ionossonda digital modelo CADI de Fortaleza do dia 26/11/94 às 10:55 UT (hora universal). Na abscissa está à frequência da densidade eletrônica e na ordenada a altura virtual, e, (B) Imagem de um ionograma do modelo DPS-4 de Fortaleza do dia 2/5/2010 às 15:00 UT, na abscissa está à frequência da densidade eletrônica e na ordenada a altura real.

Fonte: (A) Imagem cedida por Aquino (2015)

3.3.3. Parâmetros ionosféricos e Letras Qualificativas e Descritivas

Os parâmetros ionosféricos obtidos por um ionograma podem ser acompanhados por um conjunto de letras qualificativas e descritivas que indicam a confiabilidade do registro e características específicas.

Os parâmetros ionosféricos se dividem em 3 grupos: um grupo específico de parâmetros para a região E (contendo a letra E na nomenclatura dos mesmos); um grupo específico de parâmetros para a região F (contendo as letras F1, F2 ou F3 em sua nomenclatura) e um grupo que não contem as letras E ou F na nomenclatura, porém fornecem informações valiosas da região monitorada (PIGGOTT; RAWER, 1978; WAKAI ET AL., 1987; YAMASHITA, 1999; FERREIRA, 2007; GONÇALVES ET AL., 2007).

Nos ionogramas podemos encontrar certos efeitos ionosféricos, problemas no equipamento ou interferência que podem interferir ou impossibilitar a leitura de um parâmetro. As letras Descritivas e Qualificativas são um conjunto de letras maiúsculas utilizadas para descrever esses efeitos. Uma Letra Qualificativa indica a natureza da incerteza que acompanhou a medida, não podendo ser usada para substituir um valor. Uma Letra Descritiva, por outro lado, descreve a causa que levou à incerteza ou a falta da medida.

Dependendo da necessidade pode-se colocar uma ou duas letras para informar os detalhes do parâmetro, com a letra qualificativa indicando uma incerteza e a letra descritiva a causa desta incerteza.

O uso das letras é muito importante, pois ao utilizar o parâmetro ionosférico reduzido e este apresentar um comportamento fora do esperado pode-se verificar se este parâmetro possui alguma letra qualificativa e/ou descritiva para justificar o comportamento anômalo do parâmetro.

Caso ao se analisar o parâmetro, este não possuir nenhuma informação, a solução será verificar o ionograma novamente e comprovar se o valor encontrado foi reduzido corretamente (PIGGOTT; RAWER, 1978; WAKAI ET AL., 1987; YAMASHITA, 1999; FERREIRA, 2007; GONÇALVES ET AL., 2007). As Tabelas 3.2 e 3.3 apresentam a descrição das principais Letras Qualificativas e Letras Descritivas, respectivamente.

Tabela 3.2 - Descrição das principais letras qualitativas.

I	Valor interpolado (substitui valor faltante)
M	Incerteza quanto à interpretação dos modos.
T	Valor determinado a partir de uma sequência de observações, porque o valor real observado é inconsistente ou duvidoso.
U	Valor incerto ou duvidoso

Tabela 3.3 - Descrição das principais letras descritivas.

B	Medida influenciada ou impossível devido à presença de absorção nas vizinhanças de f_{min}
C	Medida influenciada ou impossível devido a motivos não ionosféricos
F	Medida influenciada ou impossível devido à presença de espalhamento
H	Medida influenciada ou impossível devido à presença de estratificações
M	Interpretação da medida é incerta pois os traços ordinário e extraordinário são indistinguíveis.
S	Medida influenciada ou impossível devido à interferência.

4 SÉRIES DE DADOS UTILIZADAS NA TESE

Um dos objetivos principais desta tese é identificar e quantificar os maiores forçantes que atuam no pico da região F em duas distintas latitudes do território brasileiro. Para tal foram utilizados dados e índices de longo período a fim de definir os melhores indicadores a serem utilizados na estimativa da variabilidade dos parâmetros em estudo das distintas regiões. O número de manchas solares de Wolf (Rz), o fluxo solar na faixa do rádio 10,7cm (Índice F10,7cm) e a irradiância solar na faixa do UV/EUV (26-34 nm; 0,1-50 nm) são utilizados para definição da atividade solar.

[Lean \(1991\)](#) apresenta um sumário dos atuais indicadores utilizados para monitorar a atividade solar. Esta autora também apresenta a energia radiante por faixas do espectro solar desde sua origem nas diferentes camadas da atmosfera solar, bem como descreve a região preferencial na atmosfera terrestre de atuação como modulador da radiação de determinado comprimento de onda.

4.1. Índices Solares

4.1.1. Número de manchas solares (Rz)

O intervalo de dados do número de manchas solares (Rz) utilizado na tese foi obtido através do site da National Center For Environmental Information – NOAA e Space Physics Interactive Data Resource – SPIDR. Os painéis (A) e (B) da Figura 4.1 mostram as médias mensais de Rz para o período entre 1700-2013 e o período de análise usado para o presente trabalho (de 1973-2014), respectivamente.

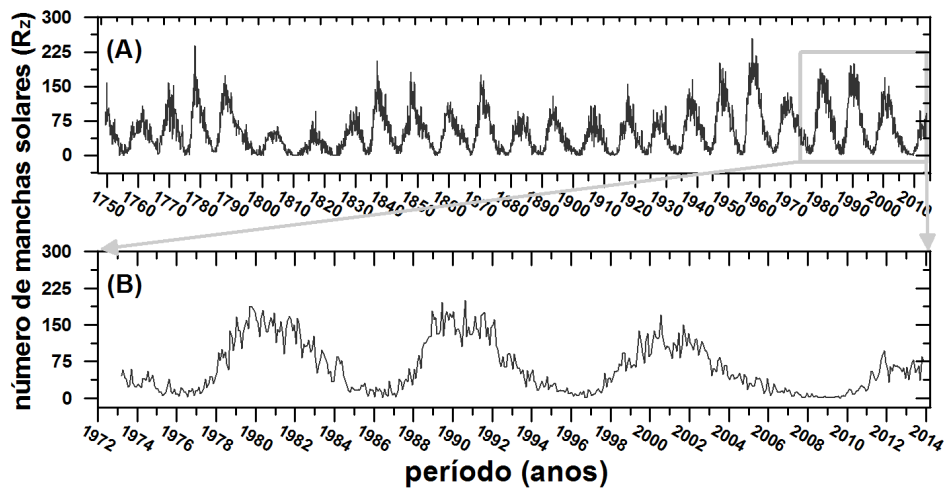


Figura 4.1 - Série mensal histórica do Número de Manchas Solares (painel A) e o período utilizado neste estudo (painel B).

4.1.2. Fluxo em Rádio 10,7 cm

O intervalo de dados do fluxo em rádio em 10,7 cm utilizado na tese foi obtido através do site da National Center For Environmental Information – NOAA e Space Physics Interactive Data Resource – SPIDR. Seguindo o critério da Figura 4.1, o painel (A) da Figura 4.2 mostra as médias mensais históricas para o fluxo solar observado em 10,7 cm para o período entre 1947 e 2014, enquanto o painel (B) da mesma figura apresenta o período de análise para o presente trabalho.

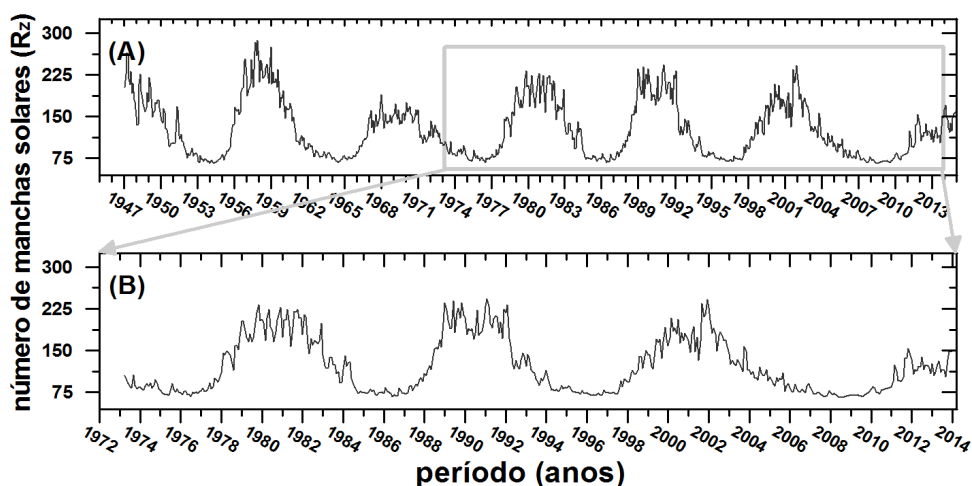


Figura 4.2. - Similar a Figura 4.1, mas apresentando a Série mensal do Fluxo solar observado em 10,7 cm.

4.1.3. Radiação Solar na faixa do Extremo Ultravioleta (EUV)

O intervalo de dados da radiação no extremo ultravioleta (EUV) utilizado na tese foi obtido através do site da Solar and Heliospheric Observatory – SOHO/ The Solar Extreme Ultraviolet Monitor – SEM. A Figura 4.3 apresenta as médias mensais para o fluxo solar observado no EUV para o período entre Janeiro de 1996 a Dezembro de 2014 para os intervalos espectrais de 0,1-50 nm, baseado no canal 2 do sensor SEM e o intervalo de banda mais estreita de 26-34 nm, baseados nos canais 1 e 3 do SEM.

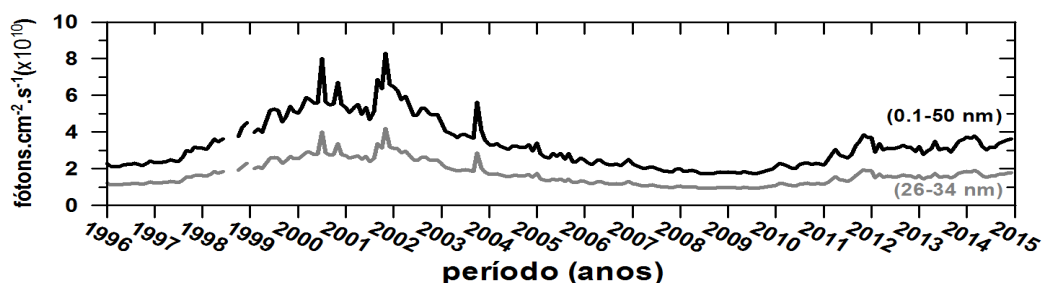


Figura 4.3 - Série mensal do fluxo de EUV do instrumento SEM/SOHO nas bandas 0,1-50 nm e 26-34 nm (linhas contínuas preta e cinza, respectivamente).

Embora a radiação solar em 10,7 cm não tenha efeito direto na atmosfera terrestre, ela varia relativamente em boa concordância com o fluxo solar no UV e no EUV, os quais tem grande efeito sobre a ionosfera, sendo utilizada como indicador para as variações dos fluxos na região ultravioleta do espectro solar (TAPPING, 1987; HARGREAVES, 1992). A Figura 4.4 apresenta a relação não-linear do EUV com o F10,7 cm.

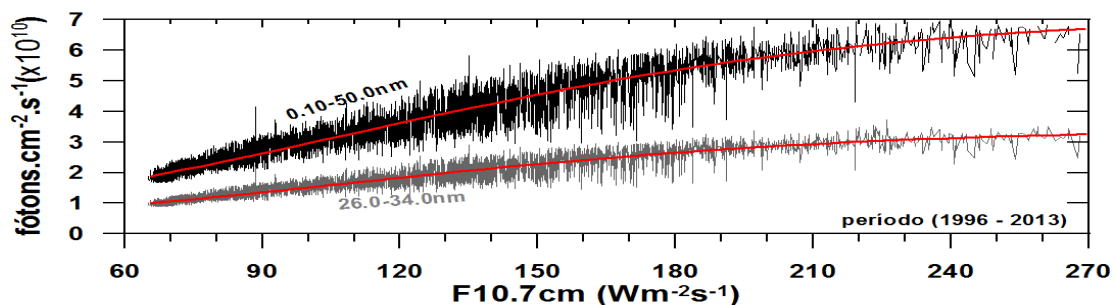


Figura 4.4 - Diagrama de dispersão mostrando a correlação entre o índice F10,7 cm e os registros do SOHO para o período entre Janeiro de 1996 e Maio de 2013.

4.2. Dados Ionosféricos

Para cumprir os objetivos da presente tese, foram utilizados os parâmetros ionosféricos apresentados a seguir.

A frequência crítica de plasma (f_oF2) da camada F2, que é a frequência máxima de reflexão da onda eletromagnética no pico da camada F2 da ionosfera, a qual é obtida em função da densidade eletrônica do pico da região F ($NmF2$) (RISHBETH; GARRIOT, 1969; YAMASHITA, 1999) pela relação:

$$f_oF2 = (80.6 \times NmF2)^{0.5} \text{ MHz} \quad (4.1)$$

A altura h_pF2 , que é uma estimativa da altura virtual obtida a partir da leitura da frequência crítica do traço ordinário do pico da camada F2, f_oF2 , até aproximadamente 83% da frequência crítica seguindo o perfil do traço que geralmente se assemelha a uma parábola (altura virtual do traço ordinário medido na frequência da camada F2) (BERTONI, 1998; YAMASHITA, 1999)

$$h_pF2 = 0,834 \times f_oF2 \text{ Km} \quad (4.2)$$

A altura h_mF2 - altura real do pico da camada F2 (REINISCH, 1986A,B; REINISCH ET AL., 1989; REINISCH, 1995; BERTONI, 1998; BIBL, 1998; YAMASHITA, 1999).

A Figura 4.5 apresenta no mapa a localização dos sítios de observação/coleta de dados de Fortaleza (3,71° S, 38,54° O) e Cachoeira Paulista (22,67° S, 44,99° O) utilizados no presente trabalho. Os dados cobrem um espaço temporal de aproximadamente 39 e 38 anos para Cachoeira Paulista e Fortaleza, respectivamente. A Tabela 4.1 apresenta a data inicial e final da coleta de dados de cada estação bem como o número de amostras para os parâmetros f_oF2 , h_pF2 e h_mF2 . Note que o número de amostras de h_mF2 é substancialmente inferior aos demais parâmetros. Isso ocorre devido ao fato que inicialmente os registros eram feitos de forma analógica (ionossonda

analógica) e a obtenção da altura real dependia muito da interpretação do redutor de dados. A partir de meados de 1990 os dados começaram a ser registrados digitalmente e com o desenvolvimento de softwares adequados o processo de obtenção de hmF2 tornou-se “semi automático”.

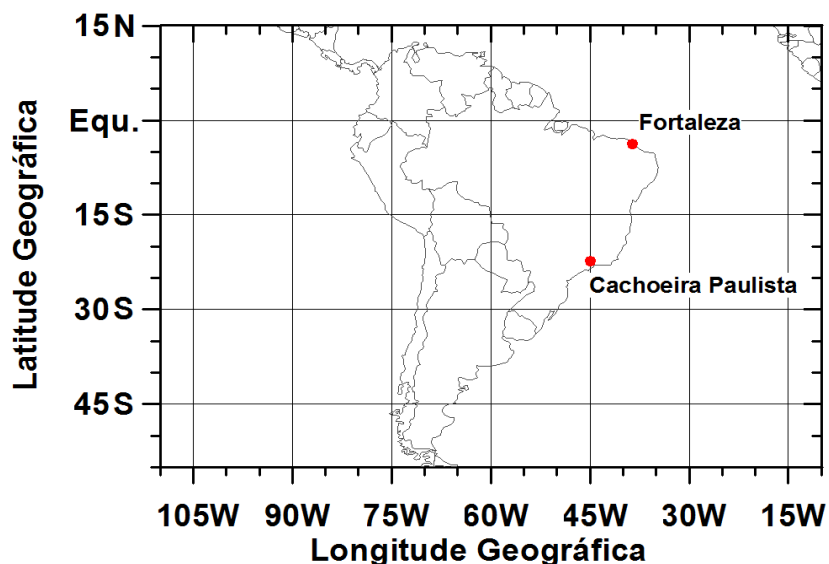


Figura 4.5 - Localização dos sítios de observação no setor Sul-americano.

Tabela 4.1 - Período dos dados e espaço amostral dos registros utilizados neste trabalho.

Sítio	Início	Fim	<i>foF2</i>	<i>hpF2</i>	<i>hmF2</i>
Cachoeira Paulista	15/03/1973	14/01/2012	374	329	202
Fortaleza	29/07/1975	02/12/2013	415	371	149

4.3. Metodologia de redução dos dados ionosféricos

A redução dos dados ionosféricos realizada nesta Tese se concentra no pico da região F2 da ionosfera e estuda as tendências de longo período de aproximadamente 40 anos de dados associados à variabilidade solar. Para a composição do banco de dados ionosféricos foram utilizados dados de ionossondas analógicos e digitais de Cachoeira Paulista e Fortaleza. A estação de Fortaleza foi escolhida por se encontrar próxima do equador geográfico e geomagnético e Cachoeira Paulista por ficar em baixa latitude no Brasil. Como

o volume de dados era muito grande, cerca de 40 anos, e o processo de redução parcialmente manual, optou-se em reduzir o dia mais calmo de cada mês no horário das 12:00 LT (Local Time – Hora Local) onde temos a maior contribuição de produção de pares de íons pela radiação solar.

Dias geomagneticamente perturbados foram ignorados e somente dias calmos foram selecionados para as análises. Para a escolha do dia mais calmo foi utilizado como referência o índice geomagnético Kp. Selecionou-se o primeiro dia geomagneticamente mais calmo (Q1), segundo classificação da IAGA (Tabela 4.2). Verificamos se existiam os parâmetros ionosféricos para este dia, caso não existissem então selecionaríamos o segundo dia mais calmo (Q2) em seguida, o terceiro dia mais calmo (Q3) e assim por diante até que encontrássemos um dado para reduzir. Caso não fosse encontrado nenhum dia dentro deste critério então para este dia do mês teríamos um dado nulo. A Tabela 4.2 pode ser obtida no site:

<http://www.gfz-potsdam.de/sektion/erdmagnetfeld/daten-dienste/kp-index/archiv>

Tabela 4.2 - Descrição dos dias calmos e perturbados para o ano de 2010.

Mês	Dias Quietos										Dias Perturbados				
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	D1	D2	D3	D4	D5
Janeiro	17	7	9	2	8	27	6	16	19	1	20*	13*	11*	21*	30*
Fevereiro	20	21	27	5	28	9	26	10	23	7	15*	2*	3*	16*	1*
Março	22	23	21	9	8	13	15	5	19	16	11*	12*	10*	3*	17*
Abril	26	10	18	25	30	16	28	13	17	20	5	6	12*	7	2*
Mai	23	24	27	9	13	15	1	14	22	16	2	29	3	30	31*
Junho	12	20	8	19	9	23	14	11	22	7	16*	30*	4*	26*	27*
Julho	10	17	18	7	13	6	19	8	5	16	27*	28*	1*	14*	15*
Agosto	30	22	21	29	14	20	31	13	19	7	4	3	24	25*	27*
Setembro	11	12	30	4	22	10	3	13	19	20	24*	28*	8*	7*	14*
Outubro	2	14	1	3	4	30	21	7	28	10	23	11	24*	17*	12*
Novembro	6	26	19	2	7	5	20	9	30	1	11*	12*	23*	28*	15*
Dezembro	10	22	11	3	23	9	4	5	21	1	14*	20*	28*	15*	13*

O processo de redução dos dados pode ser descrito por 3 etapas distintas:

1) Redução dos dados das ionossondas analógicas, que são os instrumentos mais antigos. Esses registros estão armazenados em filmes fotográficos de 35 mm (Figura 3.4 B) em hora local (LT). Para Cachoeira Paulista foi reduzido o período de fevereiro de 1973 até maio de 1991 e para Fortaleza o período de julho de 1975 até março de 1993. Para os dados deste período é necessário utilizar um projetor para ler o ionograma que está armazenado em um rolo de filme fotográfico, o qual está acoplado a uma mesa digitalizadora conectada a um computador de mesa (desktop) (Figura 4.6 A). A imagem do ionograma é projetada sobre a mesa digitalizadora, onde as informações são extraídas manualmente pelo usuário de cada ionograma selecionado. Os parâmetros do ionograma são interpretados através de um programa de computador. Então sendo reduzidos os parâmetros foF2 e hpF2 às 12:00 LT para o dia mais calmo do mês (Fortaleza e Cachoeira Paulista). Os painéis B e C da Figura 4.6 mostram um exemplo de ionograma analógico de Cachoeira Paulista (CP) e Fortaleza (Fz), respectivamente.

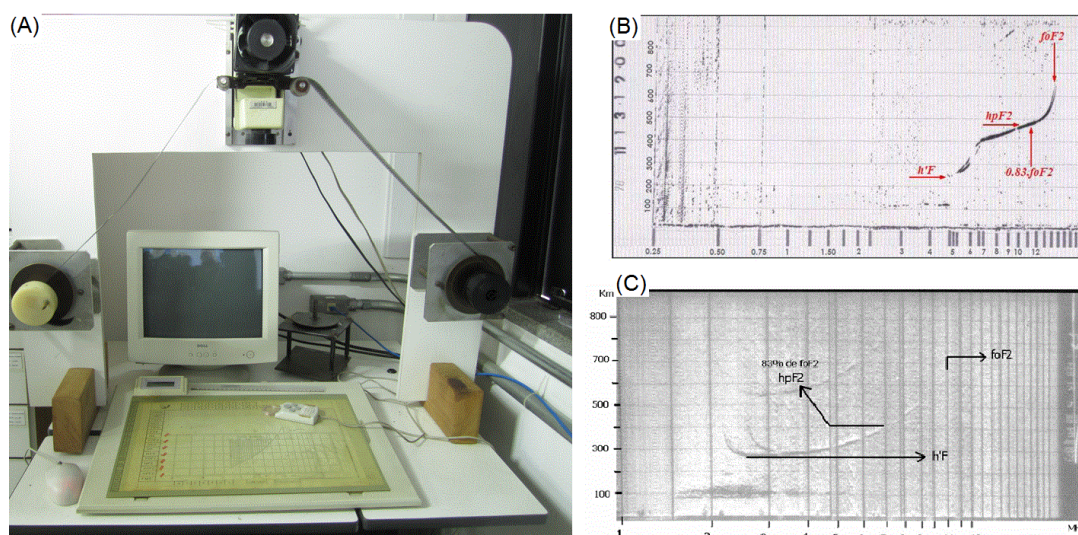


Figura 4.6 - (A) Configuração do sistema de projeção e digitalização dos ionogramas analógicos; (B) ionograma analógico de CP do dia 13/11/1978 às 12:00 LT com a identificação de h'F, hpF2 e foF2, e; (C) ionograma analógico de Fz do dia 13/2/1979 às 17:30 LT com a identificação h'F, hpF2 e foF2. Fontes: (B) [GONÇALVES ET AL. \(2007\)](#) e (C) [FERREIRA \(2007\)](#)

2) Redução dos dados da ionossonda digital CADI de Fortaleza no período de setembro de 1994 a dezembro de 2000. Selecionados os parâmetros foF2 e hpF2 às 15:00 UT (Universal Time – Hora Universal), pois os dados digitais estão em hora universal e estamos trabalhando em hora local. Para reduzir os ionogramas da CADI é necessário utilizar um programa chamado Ionocadi (Figura 4.7 A) que extrai as informações do ionograma e as armazena num arquivo. O usuário deve identificar e interpretar o parâmetro manualmente de modo semelhante ao que foi feito com a ionossonda analógica. O painel B da mesma figura mostra um exemplo do ionograma obtido pela CADI.

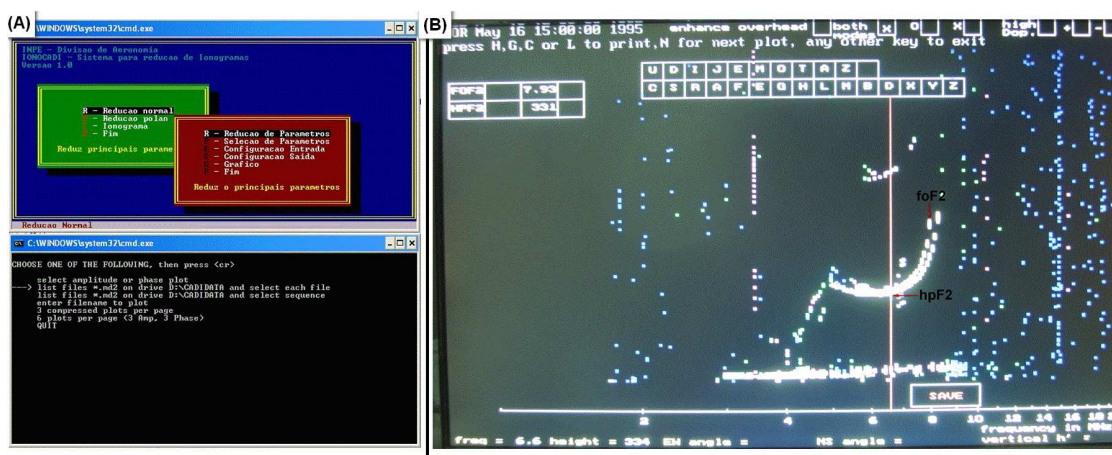


Figura 4.7 - (A) Sistema Ionocadi com as janelas de configuração de entrada e saída e redução dos dados, e; (B) Imagem de um ionograma com a identificação de alguns parâmetros da estação de Fortaleza da ionossonda digital CADI do dia 16/5/1995 às 15:00 UT.

3) Redução dos dados das digissondas que estão em hora universal. Como mencionado anteriormente, a partir de meados de 1990, a coleta de dados passou a ser digital, o que facilitou a redução dos mesmos. Parte destes dados já estavam processados pelos alunos de iniciação científica Roberta de Cássia Ferreira (entre 1973 a 2006 - Fz) e Everaldo Marcos Gonçalves (entre 1975 a 2005 - CP) que foram orientados pela Dra. Inez Staciari Batista (DAE/CEA/INPE) (FERREIRA, 2007; GONÇALVES ET AL., 2007). Para esta redução de dados, foi utilizado um programa chamado SAO-Explorer (Standard Archiving Output) desenvolvido pela equipe do Centro de Pesquisas Atmosféricas da Universidade de Massachusetts Lowell, EUA, para extrair o

espectro digital multicanal de fase e amplitude o qual é transferido para o processamento pelo ARTIST (Automatic Real-Time Ionogram Scaler with True-height), que é uma coleção de programas que são utilizados para se obterem os parâmetros do ionograma e são armazenado em um arquivo digital (Figura 4.8 A, B). (BERTONI, 2004; FERREIRA, 2007; GONÇALVES ET AL., 2007). Invariavelmente, às vezes estes dados necessitavam que o usuário corrigisse a leitura feita pelo ARTIST. Para Cachoeira Paulista foi selecionado o intervalo de setembro de 1991 até dezembro de 2013 e para Fortaleza o intervalo foi de janeiro de 2001 até dezembro de 2013. Os parâmetros reduzidos foram foF2, hmF2 às 15:00 UT, pois os dados estão em hora universal e estamos trabalhando em hora local.

Aqui reduzimos manualmente um intervalo de 14 anos (1996-2009) para Cachoeira Paulista e de 10 anos (2004-2013) para Fortaleza do parâmetro foF2, porque a digissonda fornecia o parâmetro hmF2 e não o hpF2 e era preciso ter os dados do mesmo tipo. Foi reduzido manualmente o parâmetro foF2, utilizando a fórmula “ $0,834 \times foF2$ ” para se encontrar o hpF2 equivalente ao hmF2. Esta relação foi utilizada para se obter a conversão do parâmetro hpF2 da ionossondas que fornecem este parâmetro e que não fornecem o parâmetro hmF2 com precisão.

Foi necessário encontrar a melhor função de dependência entre hmF2 e hpF2 (na seção 4.3.1 é discutido em detalhes esta relação para os dois sítios em estudo). Os dados digitais pós 1990 foram utilizados para o estudo da variabilidade ionosférica de longo período e dependência com atividade solar. Os dados ionosféricos pré-digitais foram utilizados para estudo de longas tendências na ionosfera e para teste de modelos empíricos que foram desenvolvidos utilizando os dados digitais.

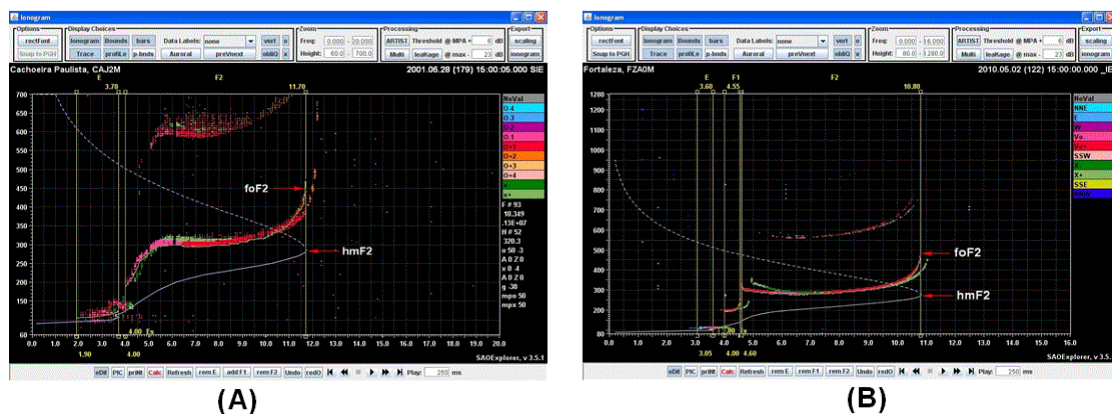


Figura 4.8 - Ionogramas com a identificação de alguns parâmetros das estações de (A) Cachoeira Paulista do dia 28/6/2001 às 15:00 UT e; (B) Fortaleza do dia 2/5/2010 às 15:00 UT.

Na seção a seguir será discutido o método de expansão dos dados de hmF2 baseado nos dois outros parâmetros registrados (hpF2 e foF2). A Figura 4.10 apresenta a série de dados ionosféricos (incluindo a expansão) do presente trabalho.

4.3.1. Método de expansão dos registros de hmF2

A coluna de painéis à esquerda da Figura 4.9 mostra as relações de dependência entre a altura do pico da região F (hmF2) e as correspondentes alturas virtuais (hpF2) para Cachoeira Paulista e Fortaleza e seus melhores ajustes sigmoidais (linhas contínuas azuis). Utilizou-se o ajuste sigmoidal devido a sua propriedade acumulativa (parte de um regime assintótico o qual aumenta progressivamente até uma situação também assintótica), evitando assim problemas de bordas como as ocorrentes em aproximações polinomiais, por exemplo. O ajuste sigmoidal é descrito como:

$$S_{(x)} = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} \quad (4.3)$$

onde A_1 e A_2 são os valores mínimos e máximos alcançados pela equação 4.3, respectivamente (ou numericamente falando, valores para $-\infty$ and $+\infty$), x_0

representa o centro da sigmoidal e x o termo de dependência, enquanto dx representa a largura do perfil. $S_{(x)}$ para o caso do presente trabalho será o valor reconstruído de $hmF2$. O período utilizado para o ajuste foi de 14 anos (1996-2009) para Cachoeira Paulista e 10 anos (2004-2013) para Fortaleza. Os pontos vermelhos apresentados nos painéis da Figura 4.9 representam os registros não utilizados na obtenção das aproximações sigmoidais. Esses pontos não foram utilizados por se tratarem de valores extremos, os quais por análise de inspeção visual mostraram-se bem distantes do comportamento médio da massa dos dados.

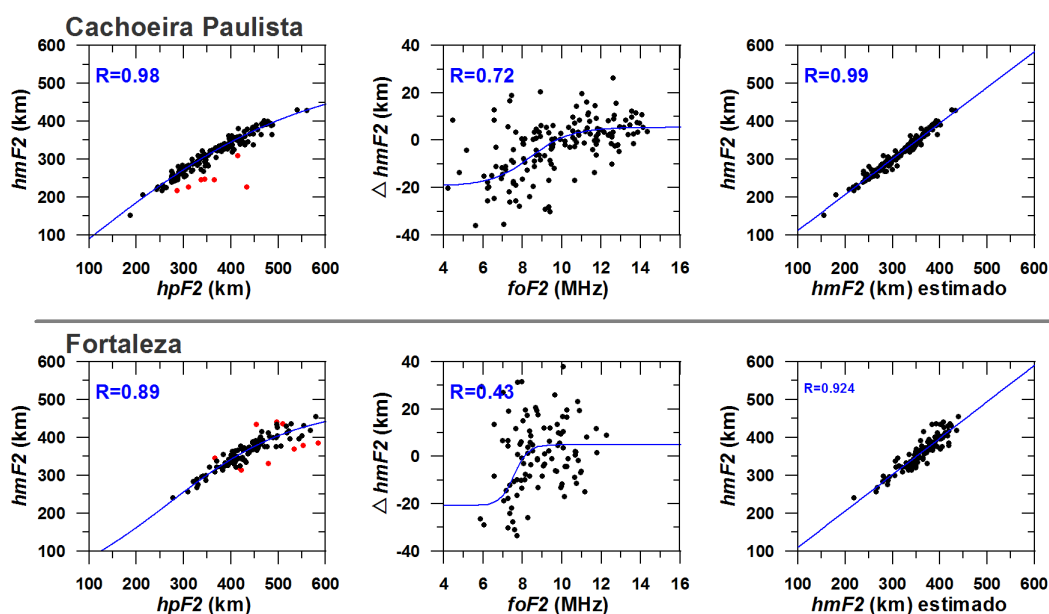


Figure 4.9 - Dependência da altura real do pico da região F ($hmF2$) em função da altura virtual ($hpF2$) e sua melhor aproximação sigmoidal (linha contínua em azul, coluna de painéis à esquerda); dependência do resíduo entre os dados de $hmF2$ menos a função sigmoidal apresentada no painel à esquerda em função da frequência de plasma do pico da região F ($foF2$) e sua melhor aproximação sigmoidal (linha contínua em azul, coluna de painéis central), e diagramas de dispersão entre os valores estimados de $hmF2$ baseados na descrição sigmoidal e os dados registrados. Os painéis superiores e inferiores dizem respeito aos registros de Cachoeira Paulista e Fortaleza, respectivamente.

Retornando a Figura 4.9, os painéis da coluna central mostram a dependência dos resíduos de $hmF2$ ($\Delta hmF2$) versus $foF2$. $\Delta hmF2$ foi obtida da diferença dos

valores de hmF2 menos os valores estimados pelas sigmoidais apresentadas nos painéis à esquerda (em função de hpF2). Finalmente, os painéis da coluna à direita mostram os diagramas de dispersão entre os valores estimados pelas aproximações demonstradas nas outras duas colunas de painéis para cada estação em estudo, ou seja, o valor estimado para uma das duas estações em função de hpF2 e foF2 ($S_{(hpF2,foF2)}$):

$$S_{(hpF2, foF2)} = S_{(hpF2)} + S_{(foF2)} \quad (4.4)$$

A Tabela 4.3 apresenta os valores das constantes da função sigmoidal de ajuste/reconstrução de hmF2 para Cachoeira Paulista e Fortaleza.

Tabela 4.3 - Valores das constantes da aproximação sigmoidal de reconstrução do parâmetro hmF2 em função de hpF2 e foF2 de Cachoeira Paulista e Fortaleza.

Cachoeira Paulista			Fortaleza		
	$S_{(hpF2)}$	$S_{(foF2)}$		$S_{(hpF2)}$	$S_{(foF2)}$
A₁	-371,83	-19,342	A₁	-33,417	-20,647
A₂	539,51	5,3657	A₂	481,76	4,9162
x₀	92,904	8,4241	x₀	266,11	7,5670
dx	235,19	1,0186	dx	134,93	0,34795

Como pode ser visto na Figura 4.9 no painel à esquerda a correlação da altura real com a virtual em Cachoeira Paulista foi melhor que em Fortaleza ($r = 0,98$ contra $r = 0,89$). Nos painéis do meio, se observa a dependência do resíduo de hmF2 (dados – ajuste sigmoidal) em função de foF2. Neste caso a correlação é melhor para Cachoeira Paulista do que para Fortaleza. No painel da direita pode-se notar que a correlação entre hmF2 estimado e observado é muito alta, acima de 0,92, o que indica que o método adotado pode ser utilizado para estimar hmF2 quando estes dados não estiverem disponíveis.

A Figura 4.10 apresenta a série de dados ionosféricos do presente trabalho, incluindo a expansão do hmF2 através do cálculo de ajuste, para Cachoeira Paulista e Fortaleza (colunas de painéis à esquerda e direita, respectivamente). Dos painéis superiores aos inferiores mostram-se: frequência crítica no pico da região F2 (foF2), altura virtual do pico da região F (hpF2) e a altura real no pico da região F2 (hmF2). Os círculos vermelhos dos painéis inferiores são os registros estimados de hmF2 baseados na descrição de expansão da fórmula 4.4.

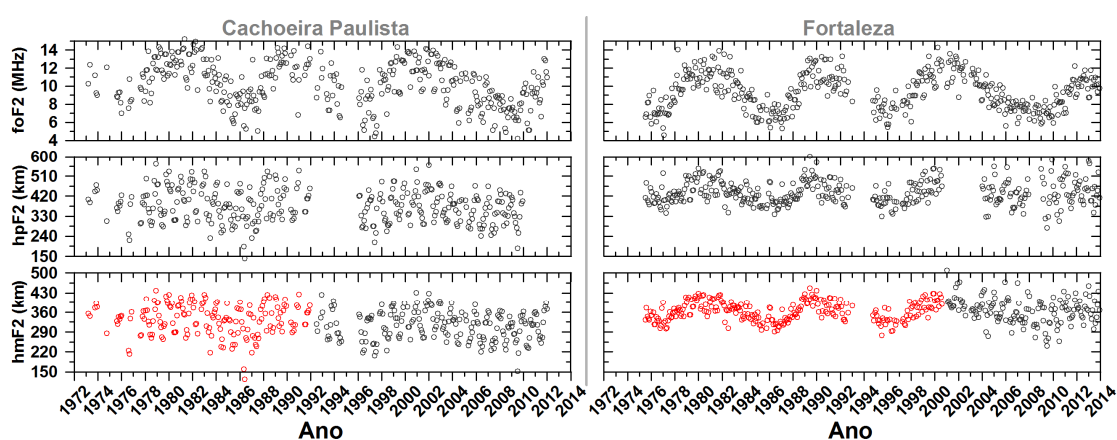


Figura 4.10 - Série de dados utilizado neste trabalho de Cachoeira Paulista e Fortaleza (bloco de painéis à esquerda e direita, respectivamente). Os círculos em vermelho representam a série de hmF2 expandida baseado nos registros de hpF2 e foF2.

5 ANÁLISE DA VARIABILIDADE SOLAR

Neste capítulo apresentamos a análise da variabilidade da atividade solar em termos do número de manchas solares e da radiação em F10,7 e no EUV para os últimos 5 ciclos solares.

5.1. Variabilidade solar

No presente capítulo são apresentadas os estudos das variações da atividade solar registradas no índice de manchas solares Rz, e na banda de rádio do índice solar F10,7 cm e na faixa de EUV, com observações do instrumento SEM/SOHO. O propósito fundamental da investigação é o de obter as variações na atividade solar de longo período, para estudar a tendência da atividade solar na faixa do Extremo Ultravioleta EUV/UV que tem efeito direto sobre a ionosfera terrestre.

A Tabela 5.1 apresenta os períodos referentes a cada ciclo solar utilizado neste trabalho. Os dados foram analisados em resolução mensal e anual para o período de 1964-2014, bem como por ciclos solares e dentro dos ciclos por fases de máximos e mínimos solares como pode ser visto na Tabela 5.2. A seleção para os períodos de atividade solar – épocas do mínimo e máximo - segue o proposto por [Hathaway \(2010\)](#).

O ciclo solar é definido como iniciando no mês de mínima atividade do índice Rz, e terminando no mês anterior ao mínimo seguinte, conforme definido pela média suavizada dos dados mensais do Rz e apresentado em [Hathaway \(2010\)](#). Para estudar os períodos de mínima e máxima atividade solar, foram usados os meses de mínimo ou máximo no índice Rz, mais um período de 6 meses anteriores e 6 meses posteriores ao mês de mínimo/máximo.

Os ciclos solares estudados são os de número #20, #21, #22, #23 e parte do #24, delineados por [Hathaway \(2010\)](#) como ocorrendo, respectivamente, de Outubro de 1964 a Fevereiro de 1976 (ciclo #20); de Março de 1976 a Agosto

de 1986 (ciclo #21); de Setembro de 1986 a Abril de 1996 (ciclo #22); de Maio de 1996 a Novembro de 2008 (ciclo #23), e em Dezembro de 2008 o início do ciclo solar #24.

Tabela 5.1 - Definição de cada intervalo de ciclo solar estudado nesta tese.

Ciclo	Intervalo
#20	Out.1964 a Fev.1976
#21	Mar.1976 a Ago.1986
#22	Set.1986 a Abr.1996
#23	Mai.1996 a Nov.2008
#24	Dez.2008 a Dez/2014

Fonte: [HATHAWAY \(2010\)](#)

Os ciclos solares 20, 21, 22 e 23 estão completos. Para o ciclo solar 24, utilizou-se o período até dezembro/2014. Para os períodos de mínimo na atividade solar, a Tabela 5.2 ilustra os mínimos entre os ciclos 19-20, 20-21, 21-22, 22-23 e 23-24. Para o período de máxima atividade solar, têm-se os períodos de máximo nos ciclos 20, 21, 22 e 23, obtidos a partir de [Hathaway \(2010\)](#), e o ciclo 24, com o máximo definido em abril/2014 a partir das análises apresentadas pelo Space Weather Prediction Center da NOAA.

Tabela 5.2 - Períodos de mínima e máxima atividade solar.

Atividade Solar Mínima			Atividade Solar Máxima		
ciclos	Mínimo	Intervalo	ciclo	Máximo	Intervalo
#19/20	Out.1964	Abr.1964 a Abr.1965	#20	Nov.1968	Mai.1968 a Mai.1969
#20/21	Mar.1976	Set.1975 a Set.1976	#21	Dez.1979	Jun.1979 a Jun.1980
#21/22	Set.1986	Mar.1986 a Mar.1987	#22	Jul.1989	Jan.1989 a Jan.1990
#22/23	Mai.1996	Nov.1995 a Nov.1996	#23	Abr.2000	Out.1999 a Out.2000
#23/24	Dez.2008	Jun.2008 a Jun.2009	#24	Abr.2014	Out.2013 a Out.2014

Fonte: [HATHAWAY \(2010\)](#).

A Figura 5.1 apresenta um painel com os índices solares utilizados durante o desenvolvimento do presente trabalho. A figura mostra, da parte superior para a parte inferior, a série de médias mensais do fluxo solar F10,7 observado, das manchas solares (Rz) e as séries de EUV do SOHO/SEM. A série fp corresponde à banda 26-34 nm e a série fc à banda 0,1-50 nm. A partir de Janeiro de 1996 todos os indicadores utilizados no presente trabalho como índices de atividade solar são disponíveis. Pode-se ver que a linha de base para todos os índices no último mínimo solar (ao redor de 2008) foi a menor da história recente das observações solares. O período próximo ao máximo do ciclo 24 (em 2014), também apresenta uma redução na intensidade em todos os parâmetros solares em relação aos ciclos anteriores.

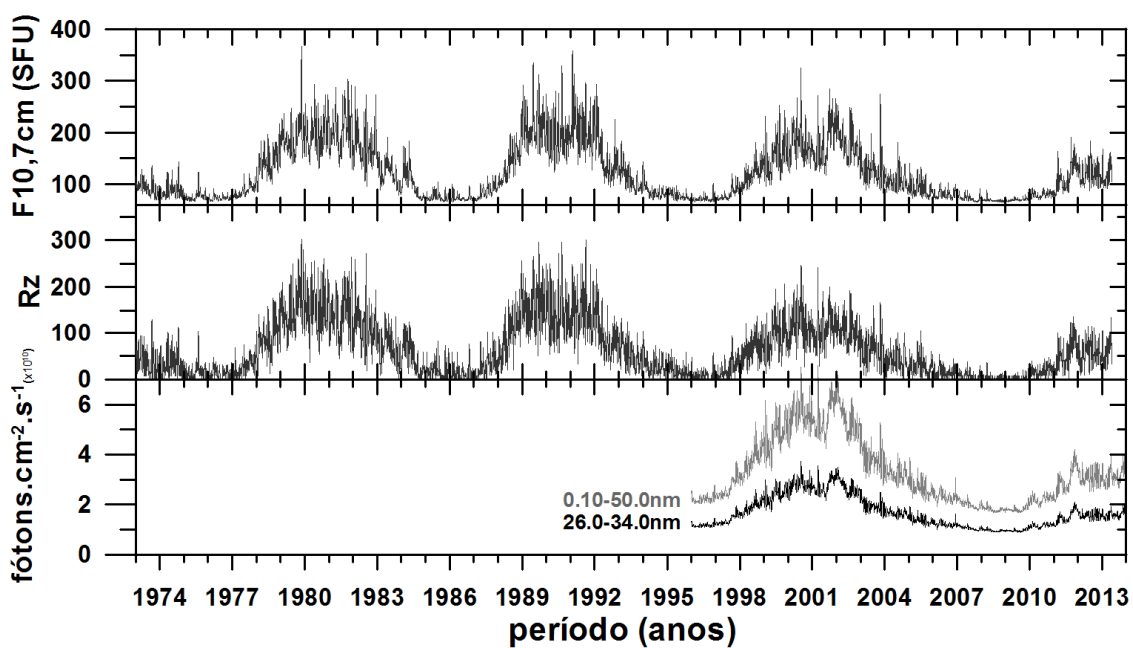


Figura 5.1 - Dados utilizados para a definição da atividade solar ao longo dos anos. Do painel superior ao inferior apresentam-se os registros diários: de F10,7cm observado da superfície, Rz e EUV (SOHO).

A Tabela 5.3 apresenta as estatísticas – média, desvio padrão e mediana – para o Rz e F10,7 para os ciclos solares de 20 a 23. Pode-se notar que o valor de Rz é menor no ciclo 23, sendo 73% do valor médio para os outros ciclos, e do F10,7 é menor nos ciclos 20 e 23 do que nos ciclos 21 e 22. Como o ciclo 24 ainda está em andamento, não se calculou a média dos parâmetros para

este ciclo. Como os dados de EUV estão disponíveis apenas a partir de 1996, não se pôde compará-los com ciclos anteriores.

Tabela 5.3 - Estatística dos parâmetros solares para cada ciclo solar. Média e desvio padrão (mediana).

Ciclo	Rz	F10,7
#20	61,2 ± 37,1 (57,6)	114.3 ±31.7 (110.4)
#21	79,7 ± 57,8 (76,5)	133.8 ±53.1 (128.3)
#22	80,6 ± 57,8 (63,9)	135.5 ±55.7 (116.7)
#23	53,9 ± 43,8 (43,3)	118.8 ±45.3 (107.1)

Para avaliar melhor a variação dos parâmetros, as Tabelas 5.4 e 5.5 apresentam as estatísticas para as épocas de máxima e mínima atividade solar (definidos na Tabela 5.2) incluindo as séries de EUV do SOHO fp e fc.

Tabela 5.4 - Estatística dos parâmetros solares para períodos de máxima atividade solar. Média e desvio padrão (mediana).

Máximo do ciclo	Rz	F10,7cm	fp (26-34 nm)	fc (0,1-50 nm)
#20	111,6 ± 12,9 (109,5)	149,1±9,6 (146,9)		
#21	163,6 ± 18,6 (159,5)	197,8±21,0 (200,1)		
#22	159,3 ± 21,3 (163,2)	213,4±18,5 (211,5)		
#23	119,8 ± 22,2 (119,1)	180,3±15,8 (176,5)	2.81x10 ¹⁰ ±3.89x10 ⁹ (2.74 x10 ¹⁰)	5.63x10 ¹⁰ ±7.70x10 ⁹ (5.51x10 ¹⁰)
#24	81,3±10,9 (79,8)	144,1±14,3 (145,5)	1.70x10 ¹⁰ ±1.19x10 ⁹ (1.68x10 ¹⁰)	3.41x10 ¹⁰ ±2.49x10 ⁹ (3.42x10 ¹⁰)

Para os períodos de máxima atividade solar, o índice Rz apresenta o menor valor no máximo do ciclo 24 (81,3), enquanto nos demais máximos sempre apresenta valores acima de 100 (variando de 111 a 163). Então o valor de Rz no máximo do ciclo 24 chega a ser apenas a metade do máximo dos ciclos mais ativos (21 e 22). A média de Rz para os máximos de 20 a 23 é 138,6, então o valor de Rz é 58% do valor médio dos outros ciclos.

O índice F10,7 apresenta o valor menor também no máximo do ciclo 24, mas este valor é comparável ao máximo do ciclo 20 (144 e 149). Ambos os valores

são bem menores que os outros três máximos (de 180 a 213), sendo apenas 67% do máximo mais ativo (22). O valor médio do F10,7 para os ciclos 20-23 é 185,1, então o máximo do ciclo 24 atinge um valor de 78% da média histórica dos máximos solares.

O EUV do SOHO tem dados para apenas os dois últimos máximos. Pode-se notar que o fluxo médio é bem menor para o ciclo 24, da ordem de 60% do valor do máximo do ciclo 23.

A Tabela 5.5 apresenta os resultados da estatística básica para os períodos de mínimo dos ciclos solares para o Rz, F10,7 e as duas bandas de EUV do SOHO.

Tabela 5.5 - Estatística dos parâmetros solares para períodos de mínima atividade solar. Média e desvio padrão (mediana).

Mínimo entre ciclos	Rz	F10,7cm	fp (26-34 nm)	fc (0,1-50 nm)
19/20	9.5±4.2 (8,85)	72.5±3.6 (72.3)		
20/21	12.3±5.9 (12,3)	74.3±3.8 (74.7)		
21/22	12.5±9.1 (12,0)	73.1±4.2 (72.6)		
22/23	8.4±4.9 (8.6)	71.9±2.8 (71.0)	1.19x10 ¹⁰ ± 5.70x10 ⁸ (1.15 x10 ¹⁰)	2.28 x10 ¹⁰ ± 1.25 x10 ⁹ (2.20 x10 ¹⁰)
23/24	1.8±1.2 (1.2)	68.3±1.6 (68.5)	9.43x10 ⁹ ± 2.06 x10 ⁸ (9.48x10 ⁹)	1.77 x10 ¹⁰ ± 3.96 x10 ⁸ (1.78 x10 ¹⁰)

Nota-se na Tabela 5.5 que Rz e F10,7 apresentam o menor valor no mínimo do ciclo 23/24. A redução é muito maior comparativamente para Rz do que para F10,7 cm devido à própria característica da série do fluxo solar. Os valores médios de Rz e F10,7 cm para os ciclos anteriores é de 10,7 e 72,9, portanto os valores do último mínimo correspondem a somente 17% para Rz e 94% para F10,7. Para o EUV do SOHO, o mínimo do ciclo 23/24 é de cerca de ~77-79 % dos valores durante o mínimo do ciclo 22/23.

Para a resposta da ionosfera, os resultados mostram que a radiação EUV que é agente modulador dessa região, é bem menor no ciclo 24 do que nos demais ciclos, sendo reduzida por um fator de ~1/4. O valor da amplitude do EUV entre

o máximo e mínimo no ciclo 24 foi reduzida em relação ao 23, também por um fator de $\sim 1/4$.

5.2. Análise de correlação

Análise de correlação linear simples foi realizada para as séries solares para os diferentes ciclos. A Figura 5.2 apresenta, através do diagrama de dispersão, a correlação entre os registros diários de Rz e F10,7 cm para todo o período 1964-2014. A relação é da forma $F10,7 \text{ cm} = (A + B \times Rz)$. O valor do coeficiente de correlação é $R = 0,97$. Isto resulta num coeficiente de determinação $R^2 = 0,94$, o que significa que 94% da variação de F10,7 é explicada pela dependência linear com Rz. O coeficiente angular B tem valor = 0.91, ou seja, um valor de 100 em Rz resulta em um valor de 91 em F10,7.

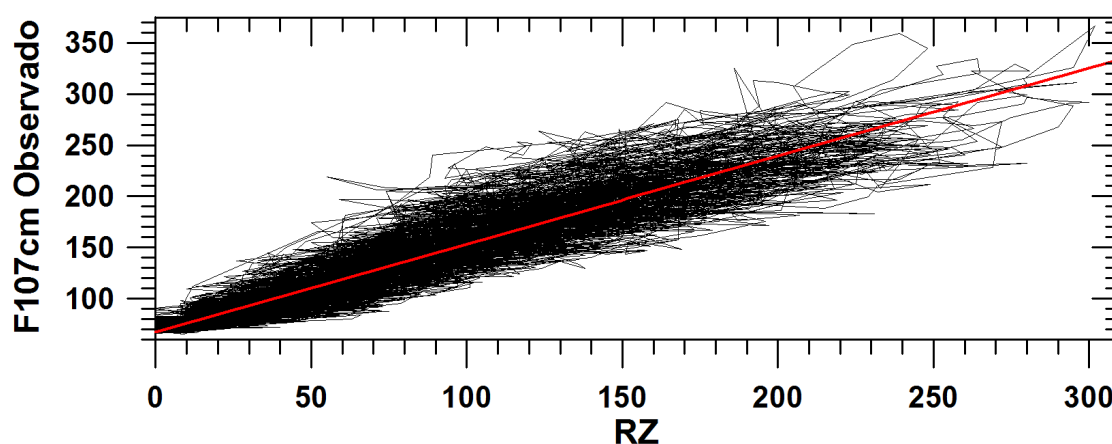


Figura 5.2 - Correlação entre os valores diários de Rz e F10,7 cm para todo período de 1964 a 2014.

A Tabela 5.6 apresenta um sumário dos valores de r para a correlação simples para todos os ciclos e épocas de máximo e mínimo entre F10,7 e Rz. Nota-se que a correlação é maior durante períodos longos, para todo o período ou durante intervalos do ciclo completo do que durante períodos de mínima ou máxima atividade solar. Os períodos de mínima e máxima atividade solar compreendem apenas 13 meses, enquanto os períodos ao longo de um ciclo são da ordem de 10 vezes maiores (~ 130 meses). A correlação entre Rz e F10,7 é mais alta para períodos mais longos do que para períodos curtos

(TAPPING, 1987; HATHAWAY, 2010). O coeficiente de dependência angular também é maior para os períodos mais longos de ciclos inteiros, entre 0,83 e 1,0, do que para períodos mais curtos ao longo dos máximos/mínimos.

Tabela 5.6 - Correlação linear simples entre F10,7 e Rz.
 $F10,7 = (A + B \times Rz)$ para diferentes períodos.

Período	B	R
Todo período 1964-2014	0,91	0,97
Ciclo 20	0,83	0,97
Ciclo 21	0,90	0,98
Ciclo 22	0,94	0,98
Ciclo 23	1,00	0,96
Mínimo 19/20	0,68	0,80
Mínimo 20/21	0,43	0,68
Mínimo 21/22	0,40	0,84
Mínimo 22/23	0,43	0,76
Mínimo 23/24	0,06	0,05
Máximo 20	0,52	0,70
Máximo 21	0,89	0,79
Máximo 22	0,73	0,84
Máximo 23	0,53	0,74
Máximo 24	0,62	0,48

A correlação é maior nos períodos de máximo solar que nos períodos de mínimo solar. A correlação também é maior para períodos maiores, como um

ciclo solar completo, do que para períodos menores como épocas de máximo ou mínimo da atividade solar.

Como pode ser visto na Tabela 5.6 a diferença na correlação entre os diferentes ciclos é muito pequena, com valores de R entre 0,96 e 0,98. Em relação ao mínimo solar o ciclo mínimo 23/24 foi o que obteve o menor índice de correlação cerca de 0,05 enquanto que o maior foi o ciclo mínimo 21/22 com 0,84. Este valor tão baixo se deve ao mínimo anômalo que ocorreu no mínimo do ciclo 24. Para os máximos, a menor correlação também se deu no ciclo 24, $R = 0,48$, enquanto a maior correlação ocorreu no máximo do ciclo 22, $r = 0,84$. Os coeficientes de proporcionalidade B são menores durante os períodos de mínimo do que os períodos de máximo solar. O coeficiente B no mínimo recente foi muito mais baixo que nos outros mínimos.

Ainda não se tendo o ciclo solar 24 completo, pode-se concluir que a relação de longo período de Rz e F10,7, ao longo de um ciclo solar inteiro, apresenta uma pequena variação. No entanto, para períodos mais curtos, como entre de um mínimo ou máximo para outro, há grandes variações, sendo que a dependência entre Rz e F10,7 é muito reduzida ou inexistente no recente mínimo. Isto provavelmente se deve aos valores de Rz estarem muito baixo no mínimo recente, apresentando uma variação (desvio padrão) de apenas 1,2 em contraste com os mínimos anteriores com variações de 4,2 a 9,1.

A Tabela 5.7 apresenta a correlação linear simples entre as séries solares (Rz e F10,7) e a banda do EUV nas séries de fp (26,0 – 34,0 nm) e fc (0,10 – 50,0 nm) utilizadas no presente trabalho. Analisando a Tabela 5.7 vemos que a correlação entre as bandas fp e fc do SOHO dá resultados próximos de 1 (0.99), como esperado, uma vez que fp está contida na banda fc.

Da mesma forma que para a relação entre Rz e F10,7, as correlações são maiores para períodos longos (todo intervalo ou um ciclo solar), do que para períodos mais curtos ao redor dos mínimos e máximos de atividade solar.

Para todo o período, a correlação do EUV é maior com o F10,7 cm do que com o Rz. A correlação é maior nos períodos de máximos que nos mínimos entre o EUV e o Rz. A correlação com Rz foi menor no mínimo e máximo do ciclo 24 do que no ciclo 23. Com F10,7 cm ocorreu o contrário, a correlação aumentou do ciclo 23 para o ciclo 24.

Tabela 5.7 - Correlação linear simples entre as séries da atividade solar

Período	Rz X fp	Rz x fc	F10,7cm x fp	F10,7cm x fc
Todo 1996-2014	0,92	0,92	0,99	0,99
Ciclo 23	0,95	0,95	0,97	0,97
Ciclo 24 (parcial)	0,96	0,96	0,96	0,97
Mínimo 22/23	0,58	0,59	0,61	0,61
Mínimo 23/24	0,48	0,50	0,83	0,82
Máximo 23	0,79	0,81	0,63	0,66
Máximo 24	0,61	0,58	0,82	0,88

6 INTER-RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS SOLARES E IONOSFÉRICOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos parâmetros solares e as suas inter-relações com os parâmetros ionosféricos e também as tendências de longo prazo ionosféricas.

6.1. Desenvolvimento do modelo climatológico ionosférico

Sabe-se que a produção de pares de íons na ionosfera terrestre é modulada basicamente pela radiação solar, em especial na faixa do EUV/UV (nas regiões polares e subaurorais a contribuição de raios cósmicos solares e galácticos na produção de pares de íons também é bastante significativa, porém para as regiões em estudo deste trabalho podem ser ignorados). Com o aumento do fluxo do agente ionizante, espera-se o aumento da ionização de forma acumulativa, ou seja, quanto maior o fluxo radiativo nos comprimentos de onda ionizante, haverá mais produção e conseqüentemente haverá o aumento do número de elétrons. Partindo deste princípio, para a análise quantitativa da variabilidade da ionosfera sobre as regiões em estudo, desenvolveram-se modelos ionosféricos empíricos baseados nos mais conhecidos e largamente utilizados “indicadores” (F10,7 cm e RZ) e também baseados em registros diretos do fluxo de radiação solar na faixa do UV-EUV seguindo a metodologia proposta por [Brum et al. \(2011\)](#).

O modelo climatológico ionosférico é baseado na reconstrução do comportamento médio dos registros em estudo para diferentes níveis de atividade solar, tendo como condições de entrada o dia do ano e a condição da atividade solar (a condição solar sendo baseada nos parâmetros descritos anteriormente). O caráter cíclico da variabilidade de foF2, hmF2 e hpF2, que em outras palavras significa a dependência sazonal, ou em função do dia do ano, é reconstruído utilizando a série de Fourier, enquanto que a variabilidade acumulativa (atividade solar) é empregada nos termos dos harmônicos da descrição cíclica através da formula a seguir ([BRUM ET AL., 2011](#)):

$$S_{(t,PS)} = A0_{(PS)} + 2 \sum_m [Am_{PS} \cos(2\pi f_1 t) + Bm_{PS} \text{sen}(2\pi f_1 t)] \quad (6.1)$$

Onde $S_{(t,PS)}$ é o sinal reconstruído (S) em função do indicador de atividade solar (PS) e do período (t) (onde t é igual ao número do dia do ano menos uma unidade). f_1 é a frequência fundamental do sinal (neste caso $f_1=365$), $A0_{(PS)}$ é a média anual para uma determinada condição de atividade solar e $Am_{(PS)}$ e $Bm_{(PS)}$ são os coeficientes de Fourier relacionados aos harmônicos m .

$A0_{(PS)}$, $Am_{(PS)}$ e $Bm_{(PS)}$ são os termos que carregam a dependência solar e são descritos no modelo através de aproximações sigmoidais. Uma função sigmoideal é uma função acumulativa no formato de “S” cuja principal característica é possuir um perfil assintótico em suas extremidades. Como exemplo, a Figura 6.1 apresenta a dependência em função do F10,7 (SFU) dos termos $A0_{(PS)}$, $Am_{(PS)}$ e $Bm_{(PS)}$ referentes ao parâmetro foF2 de Cachoeira Paulista e Fortaleza (azul e vermelho, respectivamente). O valor de $A0_{(PS)}$ para Cachoeira Paulista (curva azul) para um dado valor do F10,7 é sempre maior que o de Fortaleza (curva vermelha), apesar de Fortaleza receber mais radiação por área (cm^2).

Tal comportamento, implica uma menor abundância de elétrons em Fortaleza quando comparada a Cachoeira Paulista, podendo ser explicado pelos processos de transporte de plasma das regiões equatoriais (equador magnético) para regiões mais afastadas (fenômeno que forma a Anomalia Equatorial ou Anomalia de Appleton).

Retornando a discussão do parâmetro $A0_{(PS)}$, nota-se também que o comportamento é não linear, com uma certa proporcionalidade linear entre foF2 e F10,7 até valores de ~ 115 SFU e uma saturação acima destes valores de fluxo, com a saturação da curva. Tal comportamento pode ser explicado pela relação não linear entre o fluxo do comprimento de onda de 10,7 cm e os fluxos nos comprimentos de onda EUV, como visto na Figura 4.4.

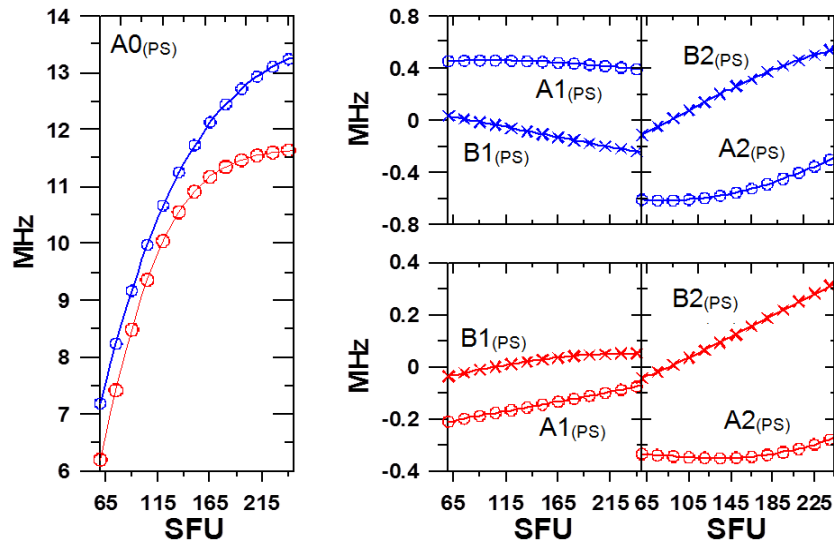


Figura 6.1 - Dependência dos coeficientes $A0_{(PS)}$, $A1_{(PS)}$ e $B1_{(PS)}$ do parâmetro foF2 de Cachoeira Paulista e Fortaleza (azul e vermelho, respectivamente) em relação ao F10,7cm.

A dependência do termo $A0_{(PS)}$ (ou média anual para uma determinada atividade solar) em função dos forçantes utilizados na reconstrução empírica através da série de Fourier é mostrada nas Figuras 6.2 e 6.3 para as estações de Cachoeira Paulista e Fortaleza, respectivamente. Cada bloco de painéis horizontais está representando um dos parâmetros ionosféricos oriundos das sondagens de rádio, sendo eles foF2, hpF2 e hmF2 (de cima para baixo, respectivamente), enquanto as colunas de painéis são os mesmos parâmetros ionosféricos, em função dos agentes forçantes solares F10,7, Rz, SOHO (24-34 nm) e SOHO (0,1-50 nm) (da esquerda para a direita, respectivamente). Em todos os painéis também são mostrados como círculos azuis os valores dos resíduos obtidos pela subtração dos valores dos registros menos os termos de somatória obtidos da equação 6.1, ou em outras palavras, os registros menos a contribuição sazonal ao longo do ano.

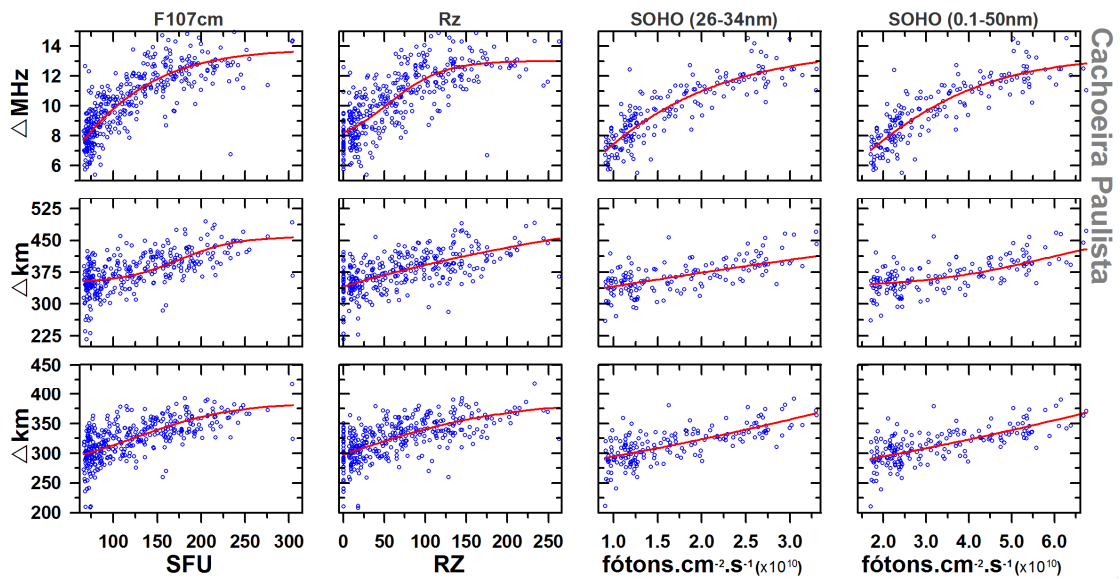


Figura 6.2 - Diagrama de dispersão entre os resíduos dos parâmetros ionosféricos de Cachoeira Paulista ($A0_{(PS)}$) (foF2, hpF2 e hmF2, de cima para baixo, respectivamente) versus F10,7 cm, Rz, e os registros do SOHO nos comprimentos de onda 24-34 nm e 0,1-50 nm (da esquerda para direita, respectivamente).

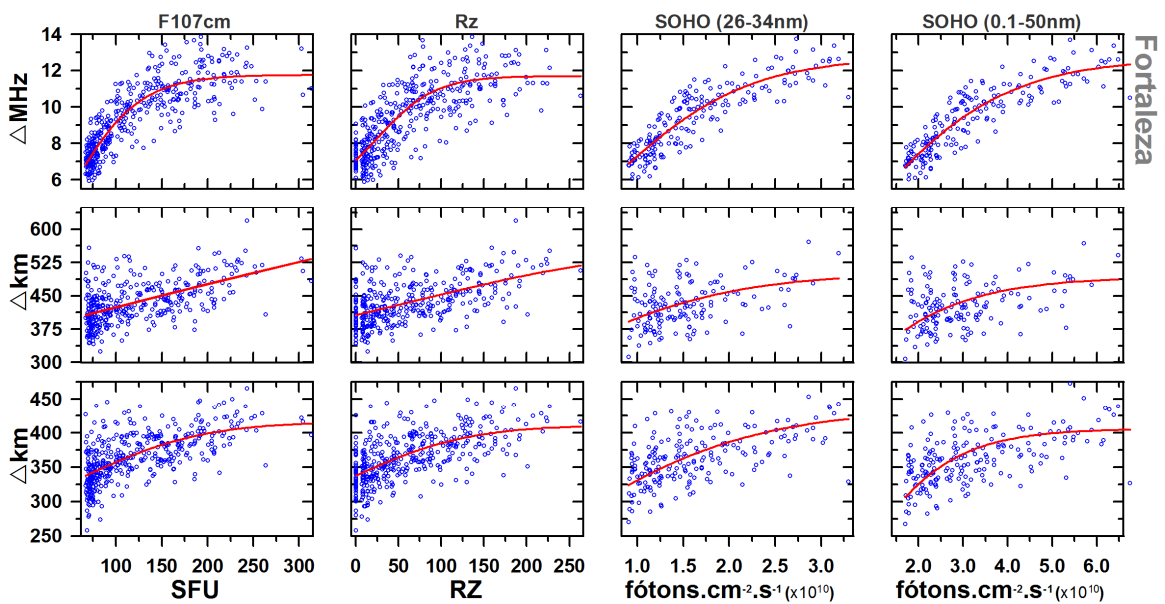


Figura 6.3 - Diagrama de dispersão entre os resíduos dos parâmetros ionosféricos de Fortaleza ($A0_{(PS)}$) (foF2, hpF2 e hmF2, de cima para baixo, respectivamente) versus F10,7 cm, Rz, e os registros do SOHO nos comprimentos de onda 24-34 nm e 0,1-50 nm (da esquerda para direita, respectivamente).

As Figuras 6.4 e 6.5 apresentam a distribuição similar à distribuição dos parâmetros ionosféricos e dados solares das Figuras 6.2 e 6.3, i.e., a distribuição horizontal dos painéis refere-se aos parâmetros foF2, hpF2 e hmF2 (de cima para baixo), enquanto as colunas apresentam os resíduos extraídos utilizando as estimativas obtidas pelos diferentes moduladores (F10,7 cm, Rz, SOHO (26-34 nm) e SOHO (0,1-50 nm), da esquerda para a direita). A abscissa agora corresponde ao dia do ano. Diferentemente das duas figuras anteriores, o resíduo agora apresentado foi obtido dos valores registrados menos o termo $A0_{(PS)}$ da equação 6.1 (dados menos termo médio anual $A0_{(PS)}$ do modelo empírico para uma determinada condição solar). As linhas contínuas vermelhas representam a reconstrução do termo da somatória da equação 6.1 (fixos para uma atividade solar moderada, i.e., F10,7 cm = 110 SFU, Rz = 75, SOHO (26-34 nm) = $1,75 \times 10^{10}$ fótons.cm⁻².s⁻¹ e SOHO (0,1-50 nm) = $3,0 \times 10^{10}$ fótons.cm⁻².s⁻¹) enquanto os círculos azuis são a média de 10 dias adjacentes ao valor de referência (dia do ano). Em cada painel também é mostrado (cinza claro) a sobreposição da sazonalidade do outro sítio de observação para efeitos de comparação. Torna-se importante salientar aqui que a representação da variabilidade sazonal das Figuras 6.4 e 6.5 é uma representação média deste comportamento, uma vez que para cada dia do ano há uma dependência diferente entre os valores de foF2, hpF2 e hmF2 em função da atividade solar.

Neste caso, nós estamos assumindo os harmônicos $Am_{(PS)}$ e $Bm_{(PS)}$ como sendo de atividade solar moderada ao longo do ano. Entretanto, através de tal representação é possível observar de forma satisfatória o comportamento sazonal dos parâmetros em discussão, uma vez que a contribuição sazonal devido à variabilidade solar para as condições geomagnéticas calmas serem bem menores quando comparada a amplitude total deste sinal ($A0_{(PS)}$), como mostrado na Figura 6.1 nos blocos de painéis à direita.

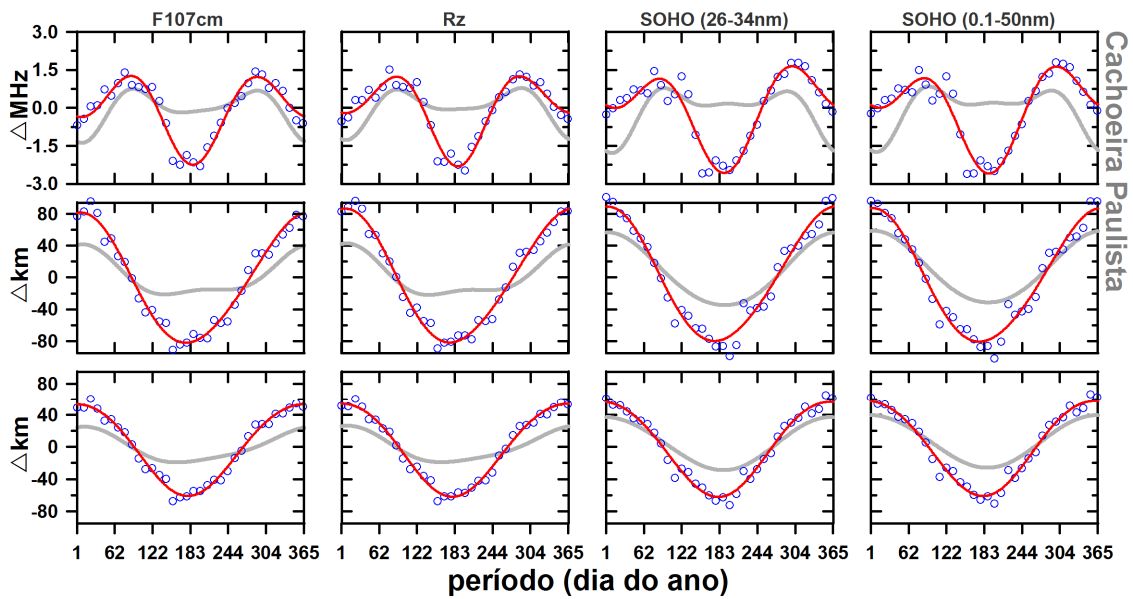


Figura 6.4 - Média dos resíduos dos parâmetros ionosféricos de Cachoeira Paulista (dados menos $A0_{(PS)}$) (foF2, hpF2 e hmF2, de cima para baixo, respectivamente) versus dia do ano para os forçantes solares F10,7 cm, Rz, e EUV/SOHO nos comprimentos de onda 24-34 nm e 0,1-50 nm. A sazonalidade reconstruída por FFT (Fast Fourier Transform) em linha vermelha contínua e em cinza a componente sazonal de Fortaleza.

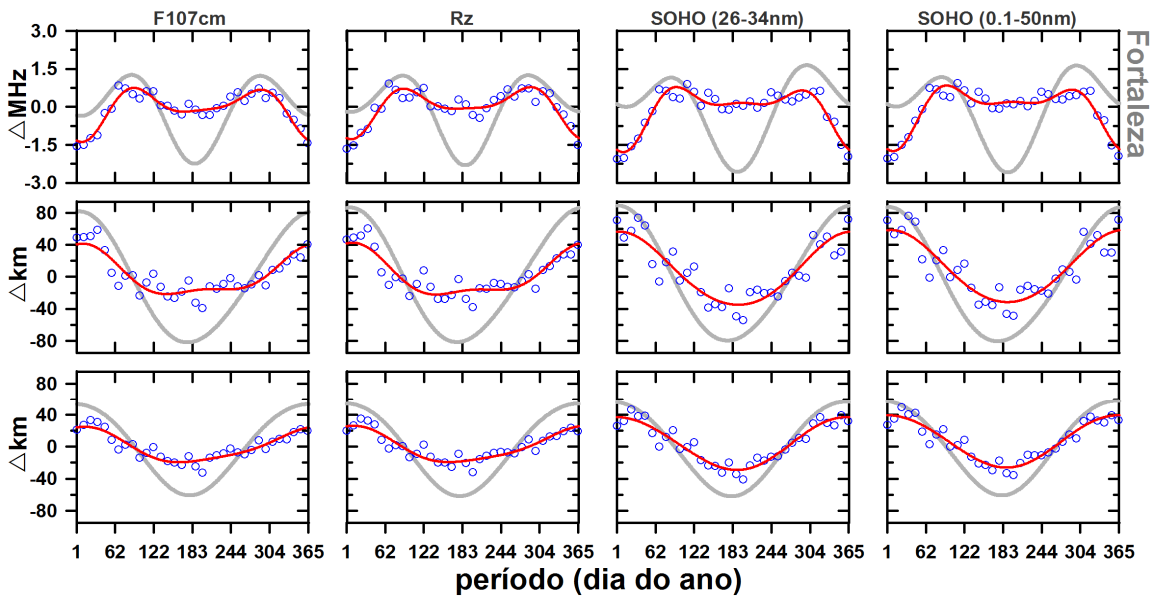


Figura 6.5 - Média dos resíduos dos parâmetros ionosféricos de Fortaleza (dados menos $A0_{(PS)}$) (foF2, hpF2 e hmF2, de cima para baixo, respectivamente) versus dia do ano para os forçantes solares F10,7 cm, Rz, e EUV/SOHO nos comprimentos de onda 24-34 nm e 0,1-50 nm ; A sazonalidade reconstruída por FFT em linha vermelha contínua e em cinza a componente sazonal de Cachoeira Paulista.

A variabilidade sazonal do meio dia local das duas estações em condições de baixa atividade geomagnética pode ser explicada por dois fatores: a incidência de radiação (em função do ângulo zenital solar - ASZ) e a concentração do principal componente ionizável da atmosfera neutra do pico da camada F, o oxigênio atômico. Para ilustrar tal comparação a Figura 6.6 mostra a variação do ângulo zenital e da concentração do oxigênio atômico a uma altitude de 300 km ao longo do ano para as regiões de Cachoeira Paulista e Fortaleza.

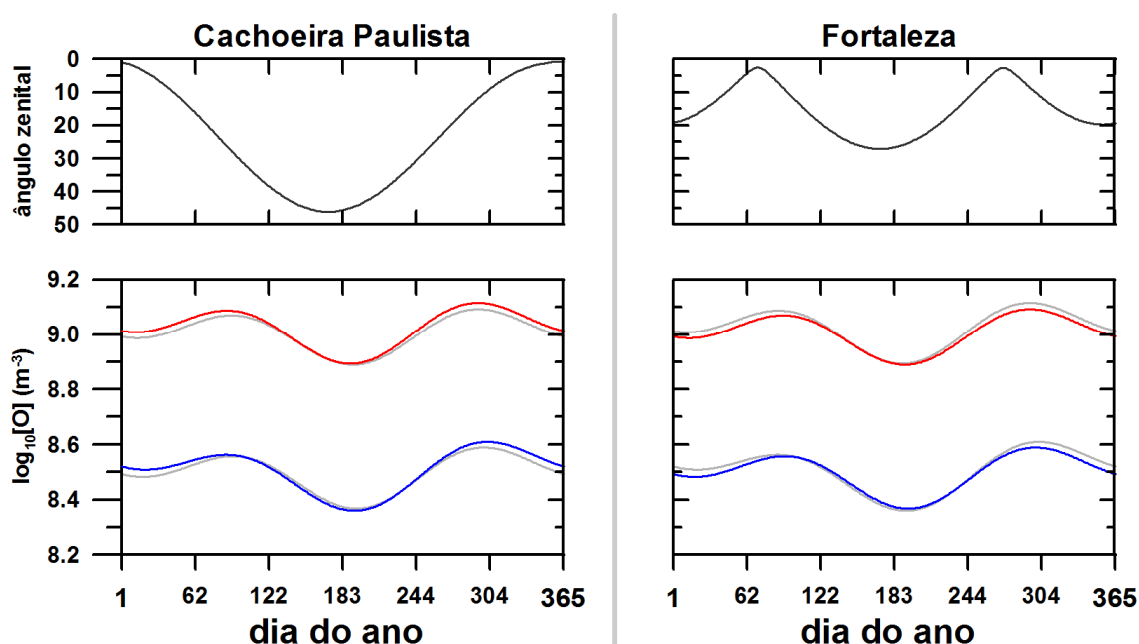


Figura 6.6 - Variação do ângulo zenital (painéis superiores) e da concentração do oxigênio atômico a uma altitude de 300 km (painéis inferiores) ao longo do ano para as regiões de Cachoeira Paulista e Fortaleza (coluna de painéis à esquerda e à direita, respectivamente) e a concentração do oxigênio atômico na mesma altitude para baixa e alta atividade solar (azul e vermelho, respectivamente) (painéis inferiores).

Em geral, baseado nos registros apresentados nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6, é fácil identificar o predomínio da periodicidade do harmônico $m=1$, ou seja, do período de 365 dias, da altura do pico da região F sobre Cachoeira Paulista e que este é diretamente proporcional ao ângulo zenital solar. Os parâmetros h_pF2 e h_mF2 de Cachoeira Paulista apresentam duas estações do ano bem distintas (inverno e verão), sendo a diferença média de altitude entre o verão e o inverno em torno de 100 km e 160 km de altitude, respectivamente.

Em relação à produção de ionização, o comportamento do foF2 de Cachoeira Paulista em condições de baixa atividade geomagnética mostra que a variabilidade da concentração de (O) é o fator dominante, sendo os picos de produção centrados nos equinócios de março e setembro. Em média, o inverno apresenta valores de foF2 ~3.25 MHz abaixo dos registrados nos equinócios, enquanto para o período de verão estes são ~2.25 MHz.

Os parâmetros hpF2 e hmF2 de Fortaleza também apresentam um comportamento similar quando comparados aos registrados de Cachoeira Paulista, ou seja o domínio do período de 12 meses com os máximos e mínimos centrados no pico de verão e inverno, respectivamente. Entretanto, se observarmos a variabilidade do ângulo zenital solar desta localidade percebemos que o mesmo varia muito menos ao longo do ano em relação ao de Cachoeira Paulista e que também há dois picos nos equinócios.

A menor variabilidade ao longo do ano explica a menor variabilidade de amplitude de hpF2 e hmF2 de Fortaleza, em torno de ~60 km e ~35 km, respectivamente. No parágrafo anterior a variabilidade de hpF2 e foF2 de Cachoeira Paulista foi explicada apenas em relação ao ângulo zenital, e o mesmo deveria ser válido para Fortaleza. Entretanto, não vemos os picos de hpF2 e foF2 de Fortaleza como os mostrados no painel superior à direita da Figura 6.6.

Nota-se que há uma diferença significativa no comportamento do ângulo zenital para Cachoeira Paulista e Fortaleza. Para Cachoeira Paulista, o ângulo de zênite apresenta um mínimo anual próximo ao verão, enquanto em Fortaleza, devido à localização quase-equatorial, são observados dois mínimos no ASZ centrados nos equinócios de primavera e outono. Isto tem efeito direto na quantidade de irradiância solar que atinge a atmosfera, a qual depende do ASZ local. A irradiância será maior para valores mínimos do ASZ.

Então teremos um máximo na irradiância e na densidade ionosférica ao longo do verão em Cachoeira Paulista e próximo aos equinócios em Fortaleza. A

variação da irradiância incidente e da fotoionização será predominantemente anual em Cachoeira Paulista e semi-anual em Fortaleza. Nota-se que a densidade de (O) apresenta uma variação com dois picos equinociais como o ASZ para Fortaleza. Para Cachoeira Paulista, a densidade de (O) também apresenta uma distribuição semianual, contrastando com o observado no ASZ. Isto indica que para Fortaleza, processos de transporte têm grande importância além da fotoionização na densidade ionosférica.

Como parte do trabalho proposto, com o objetivo de aferir se a resposta do modelo climatológico é compatível com a realidade observada, foi realizada a simulação para a frequência f_o da camada F2, para a altura virtual e a real, mantendo as condições dos agentes moduladores e esses dados estimados foram confrontados com a realidade observada. Para tal, foram desenvolvidos 4 modelos empíricos diferentes baseados nos forçantes solares escolhidos (F10,7cm, Rz e as duas faixas de frequência (EUV) registradas pelo SOHO) utilizando a metodologia descrita no início desta sessão.

A comparação entre as simulações e os registros em semelhantes condições geofísicas (neste caso para baixa atividade geomagnética e mesma condição de atividade solar) e para o mesmo dia do ano são apresentadas nas Figuras 6.7 e 6.8 para as regiões de Cachoeira Paulista e Fortaleza, respectivamente. Estas figuras apresentam 12 painéis dispostos em três (03) colunas e quatro (04) linhas. Na abscissa observam-se os valores estimados dos parâmetros f_oF2 , h_pF2 e h_mF2 (da esquerda para a direita, respectivamente) estimados pelos modelos enquanto que na ordenada os valores observados para os sítios em análise.

Cada linha de painéis representa o forçante solar de referência (indicador) utilizado na estimativa simulada (F10,7 cm, Rz, SOHO/26-34 nm e SOHO/0,1-50 nm, de cima para baixo). Os diagramas de dispersão apresentados nas figuras em discussão mostram que as frequências do pico da região F são mais estáveis e mais fáceis de se estimar baseando-se apenas nos indicadores

solares para condições geomagneticamente calmas quando comparadas as posições de hmF2 e foF2.

Em comum, às Figuras 6.7 e 6.8 mostram que as estimativas das altitudes (hmF2 e hpF2) em função de F10,7 cm e Rz se apresentam bastante semelhantes, com índices correlativos não se distanciando mais de 0,01. O desvio em relação à média assumindo qualquer condição de atividade solar também não varia muito entre as estimativas utilizando como indicadores F10,7 cm e Rz.

O desvio padrão de Cachoeira Paulista nos parâmetros hmF2 e hpF2 para os diferentes indicadores variou entre 22 e 19 km para hmF2 e 34 e 29 km para hpF2 (o equivalente a uma dispersão de aproximadamente 9.4% em relação à variabilidade das altitudes ao longo do ano e diferentes condições de atividade solar, respectivamente).

As menores dispersões são encontradas quando as estimativas são feitas utilizando os registros do SOHO, ou seja uma queda de dispersão de aproximadamente 15.94% (~5.5 km) e 13.63% (~3.0 km) para hpF2 e hmF2, respectivamente. Já os resultados de Fortaleza mostram um desvio padrão um pouco maior quando comparado com os de Cachoeira Paulista, aproximadamente 2 km acima, variando em valores absolutos entre 22 e 40 km.

Ainda discutindo as estimativas baseadas nos indicadores F10,7 cm e Rz, os diagramas de dispersão das Figuras 6.7 e 6.8 referentes aos registros de foF2 mostram que as estimativas de F10,7 cm quando comparados com as estimativas de Rz são praticamente as mesmas em termos do coeficiente de correlação.

Os índices correlativos obtidos através de F10,7 cm como indicador são apenas ~0,04 maiores quando comparados com as obtidas de Rz. As dispersões em termos do desvio padrão, entretanto, corroboram com a melhor

representação a partir de F10,7 cm. As dispersões calculadas a partir das estimativas de Rz são aproximadamente 0,14 MHz e 0,21 MHz maiores para Cachoeira Paulista e Fortaleza, respectivamente.

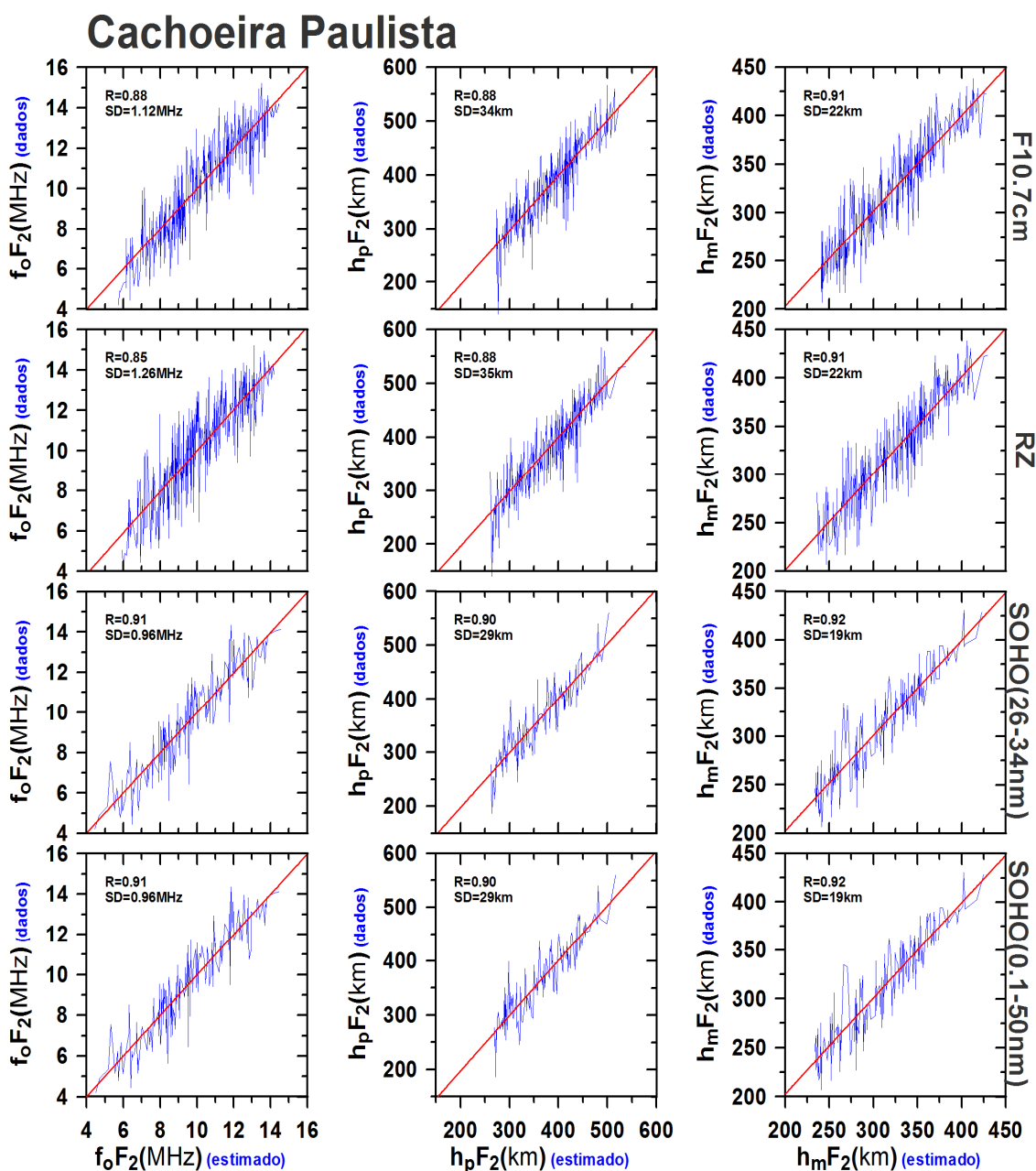


Figura 6.7 - Diagrama de dispersão entre os parâmetros ionosféricos estimados (abscissas) e os respectivos registros de Cachoeira Paulista (ordenadas) sobre semelhantes condições geofísicas.

Fortaleza

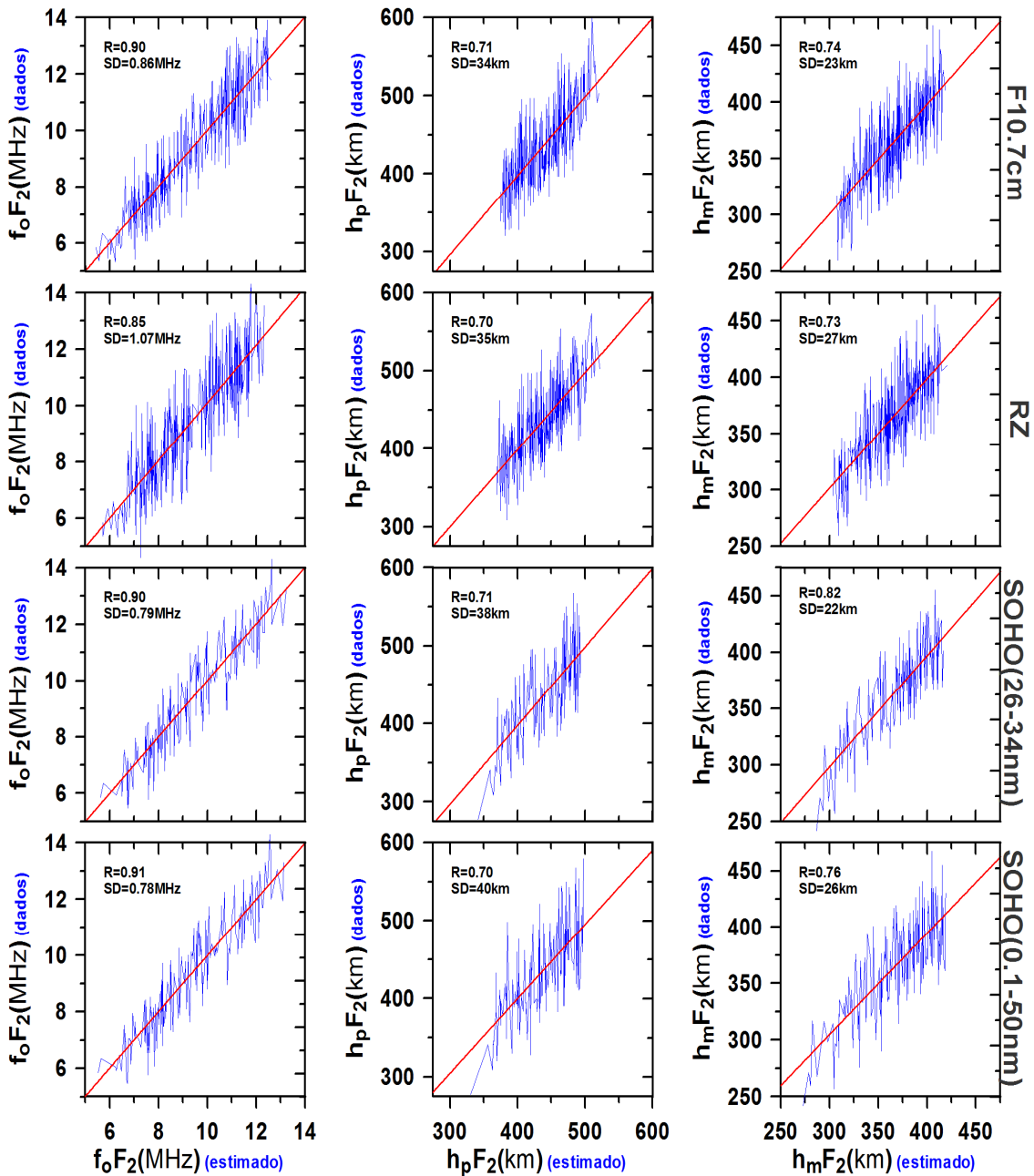


Figura 6.8 - Diagrama de dispersão entre os parâmetros ionosféricos estimados (abscissas) e os respectivos registros de Fortaleza (ordenadas) sobre semelhantes condições geofísicas.

As Figuras 6.9, 6.10 e 6.11 mostram os resultados dos valores estimados de f_oF_2 , h_pF_2 e h_mF_2 em função do dia do ano e dos parâmetros de atividade solar F10,7, Rz e o EUV do SOHO nos comprimentos de onda de 24-34 nm e

0,1-50 nm. Pode-se notar que existe uma similaridade nos dois equinócios (outono e primavera) em Cachoeira Paulista para o parâmetro foF2 para os diferentes parâmetros de atividade solar.

Isto não ocorre para Fortaleza, dois claros picos isolados são observados nos equinócios para Rz e F10,7 e dois picos com contínua distribuição para as duas bandas do EUV (Figura 6.9). Para a altura, podemos ver que no solstício de verão ocorrem os maiores valores de altura e no solstício de inverno ocorrem os menores valores de altura (Figuras 6.10 e 6.11). Como pode ser visualizado nas Figuras 6.10 e 6.11 para Cachoeira Paulista e em Fortaleza ocorrem grandes variações nas alturas de hpF2 e hmF2 nos dois solstícios. Este aumento da altura que é visualizado no solstício de inverno em Fortaleza é devido a Anomalia de Appleton e existe uma variação não linear entre os parâmetros hpF2 e hmF2 em Fortaleza.

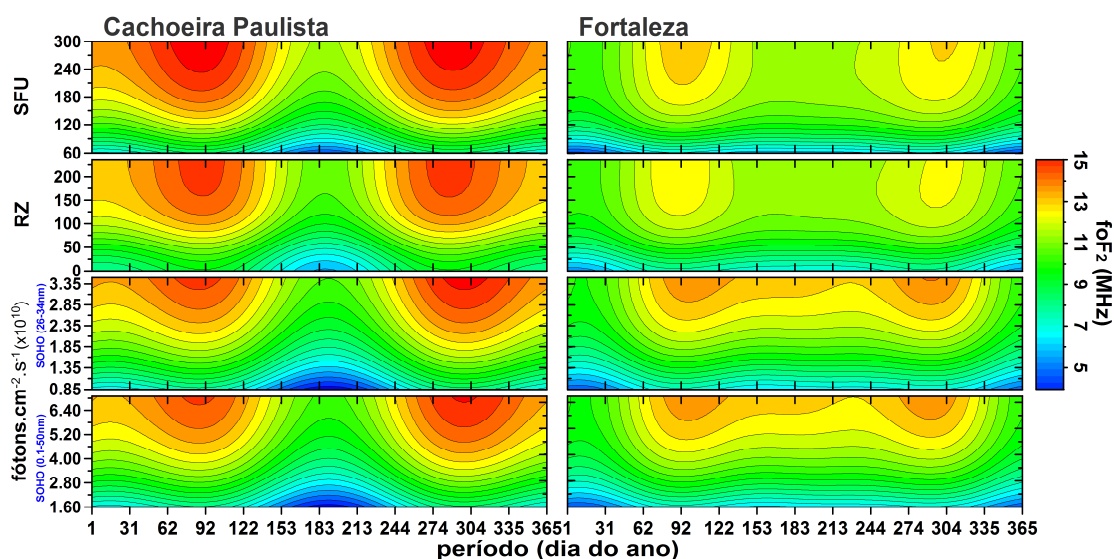


Figura 6.9 - Valores de foF2 estimados de Cachoeira Paulista e Fortaleza (coluna de painéis da esquerda para a direita, respectivamente) para diferentes condições de atividade solar baseados em F10,7, Rz e os registros do SOHO nos comprimentos de onda 24-34 nm e 0,1-50 nm (de cima para baixo, respectivamente).

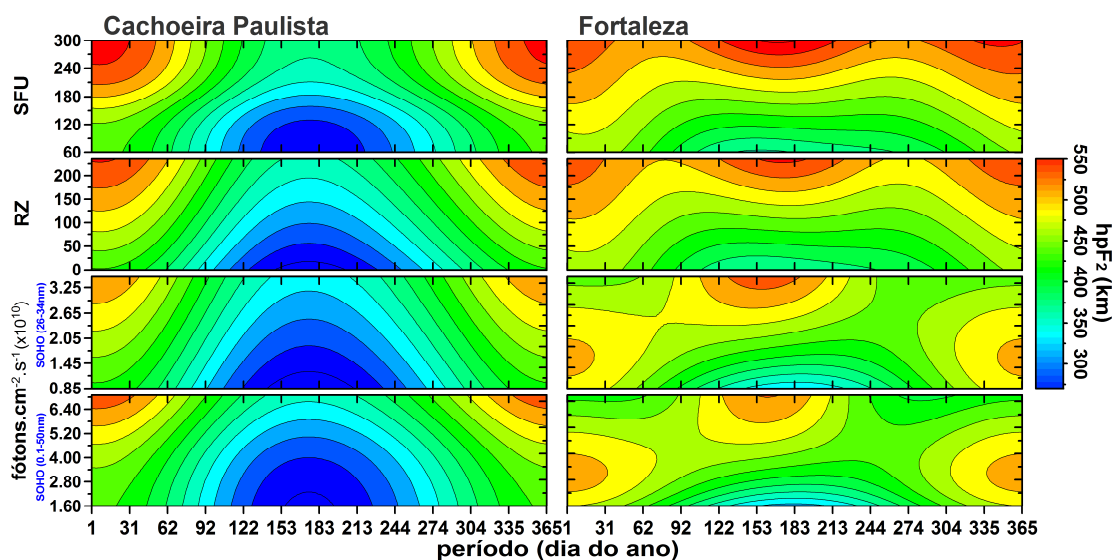


Figura 6.10 - Semelhante à Figura 6.9, porém para as estimativas de hpF2.

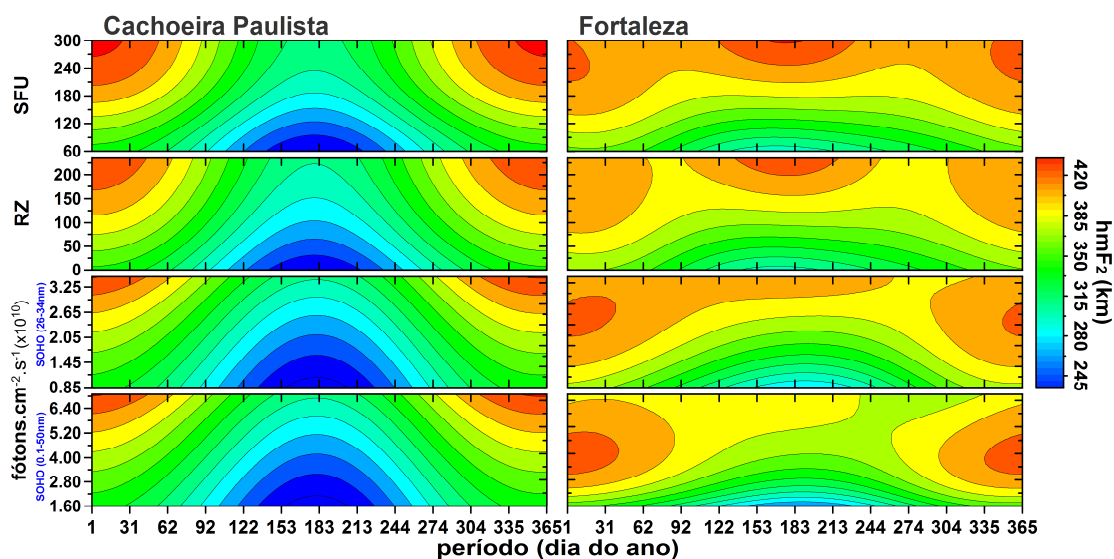


Figura 6.11 - Semelhante à Figura 6.9, porém para as estimativas de hmF2.

6.2. Obtenção das tendências de longo período

Determinou-se a variação de longo período através da análise dos resíduos obtidos entre os valores registrados menos o modelo empírico climatológico e para cada mês do ano. As Figuras 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15 apresentam os resíduos dos parâmetros foF2, hpF2 e hmF2 estimados baseados no F10,7 (Figuras 6.12 e 6.14) e Rz (Figuras 6.13 e 6.15) para Cachoeira Paulista

(Figuras 6.12 e 6.13) e Fortaleza (Figuras 6.14 e 6.15). Os painéis apresentam os valores dos resíduos juntamente com os melhores ajustes lineares obtidos pela técnica de regressão linear para cada mês ao longo do período inteiro de dados.

Comparando às Figuras 6.12 e 6.13 para o sítio de Cachoeira Paulista pode-se ver uma similaridade na distribuição da variabilidade mensal dos resíduos entre as duas figuras, ou seja, não existe uma discrepância muito grande entre os valores dos resíduos dos parâmetros ionosféricos determinados usando F10,7 ou Rz como índice solar. Porém, verificamos que existe uma pequena diferença na tendência de longo período facilmente visualizada pelos ajustes lineares. Para as duas séries de registro (F10,7 e Rz) no mês de setembro para os três parâmetros ionosféricos (foF2, hpF2 e hmF2) e outra visível no parâmetro hpF2 no mês de outubro vista na duas séries.

Do mesmo modo, comparando às Figuras 6.14 e 6.15 para Fortaleza temos uma similaridade entre todos os parâmetros das duas figuras, com uma pequena diferença nos ajustes lineares dos resíduos no mês de junho para os parâmetros ionosféricos foF2 e hmF2.

Comparando às Figuras 6.12 e 6.14 que são os resíduos e ajustes lineares para os sítios de Cachoeira Paulista e Fortaleza baseados nos valores de F10,7, respectivamente, verificamos que existe uma variação maior em hpF2 em Fortaleza do que em Cachoeira Paulista e uma inversão de tendência em alguns dos meses nos três parâmetros ionosféricos. O mesmo ocorre para as Figuras 6.13 e 6.15 baseados nos valores de Rz para os sítios de Cachoeira Paulista e Fortaleza, respectivamente.

A variação encontrada no parâmetro hpF2 em Fortaleza é devida à baixa concentração de plasma nesta região e devido aos processos de transporte que elevam o plasma para latitudes mais altas nos dois hemisférios, mesmo sendo os registros estudados em condições geofísicas quietas. Esta anomalia é conhecida como Anomalia de Appleton.

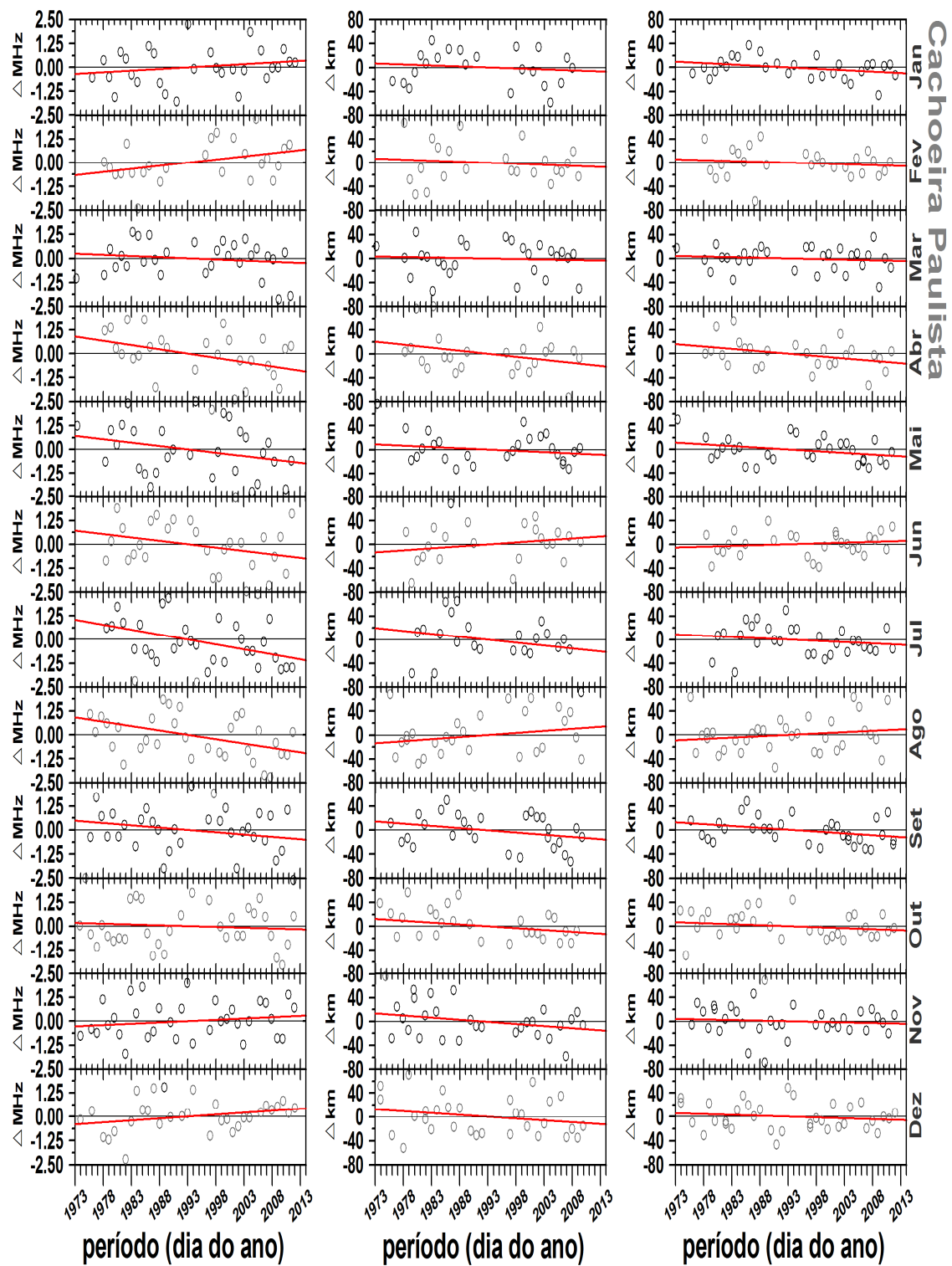


Figura 6.12 - Variabilidade mensal dos resíduos de Cachoeira Paulista entre os registros de foF2, hpF2 e hmF2 e os valores estimados (da esquerda para direita) nas mesmas condições de atividade solar baseado nos valores do índice F10,7 ao longo do período de estudo.

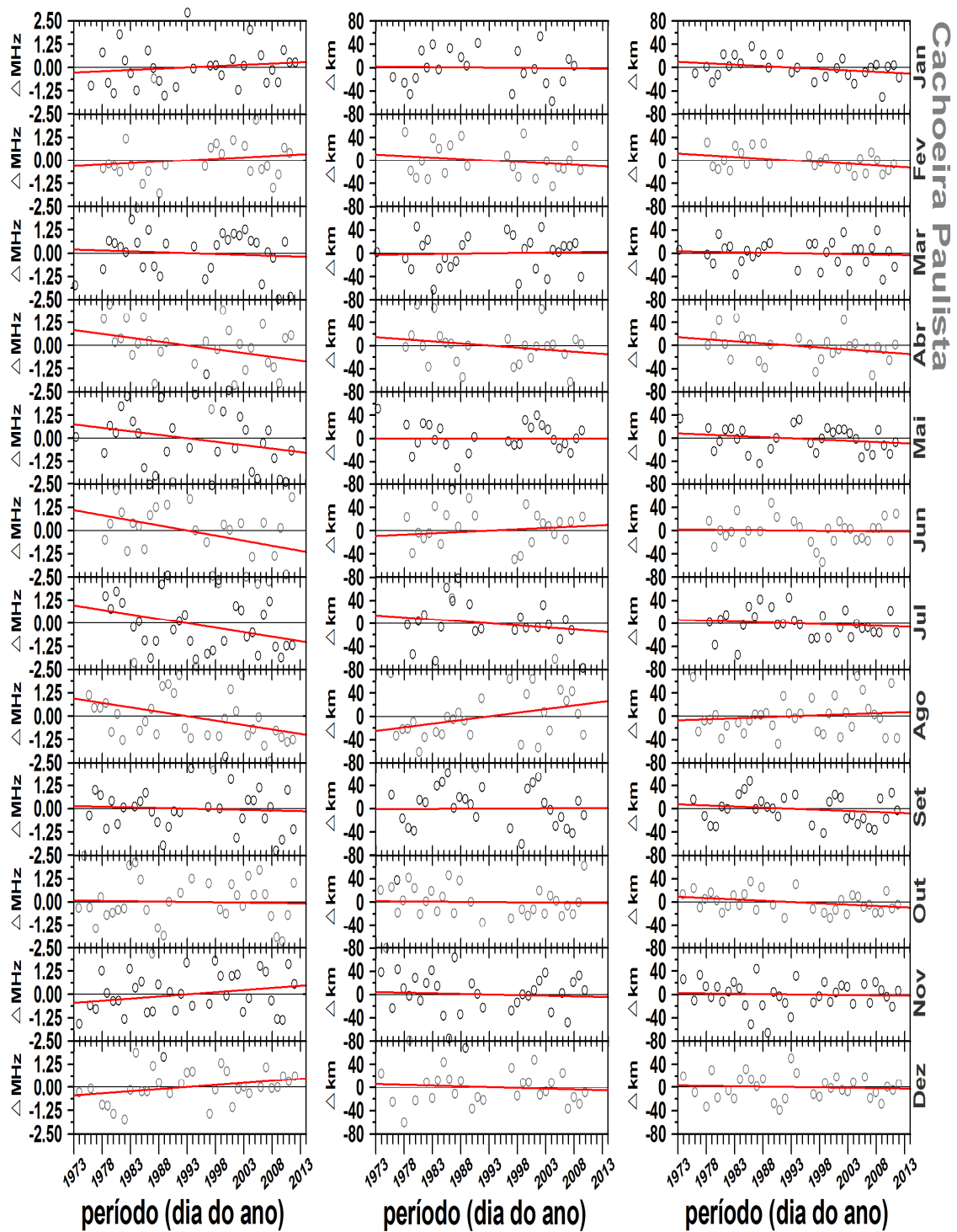


Figura 6.13 - Variabilidade mensal dos resíduos de Cachoeira Paulista entre os registros de foF2, hpF2 e hmF2 e os valores estimados (da esquerda para direita) nas mesmas condições de atividade solar baseado nos valores de Rz ao longo do período de estudo.

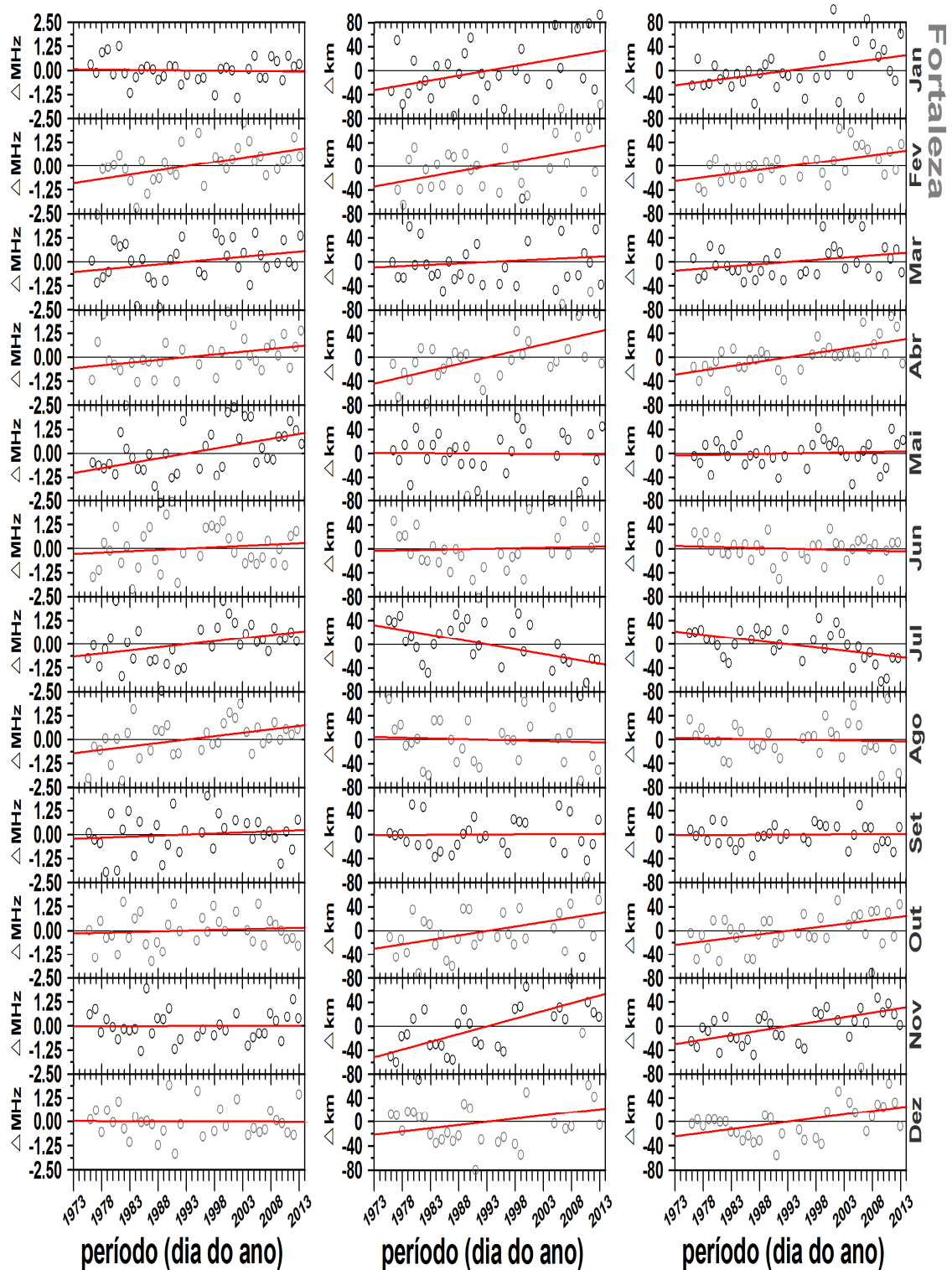


Figura 6.14 - Variabilidade mensal dos resíduos de Fortaleza entre os registros de foF2, hpF2 e hmF2 e os valores estimados (da esquerda para direita) nas mesmas condições de atividade solar baseado nos valores do índice F10,7 ao longo do período de estudo.

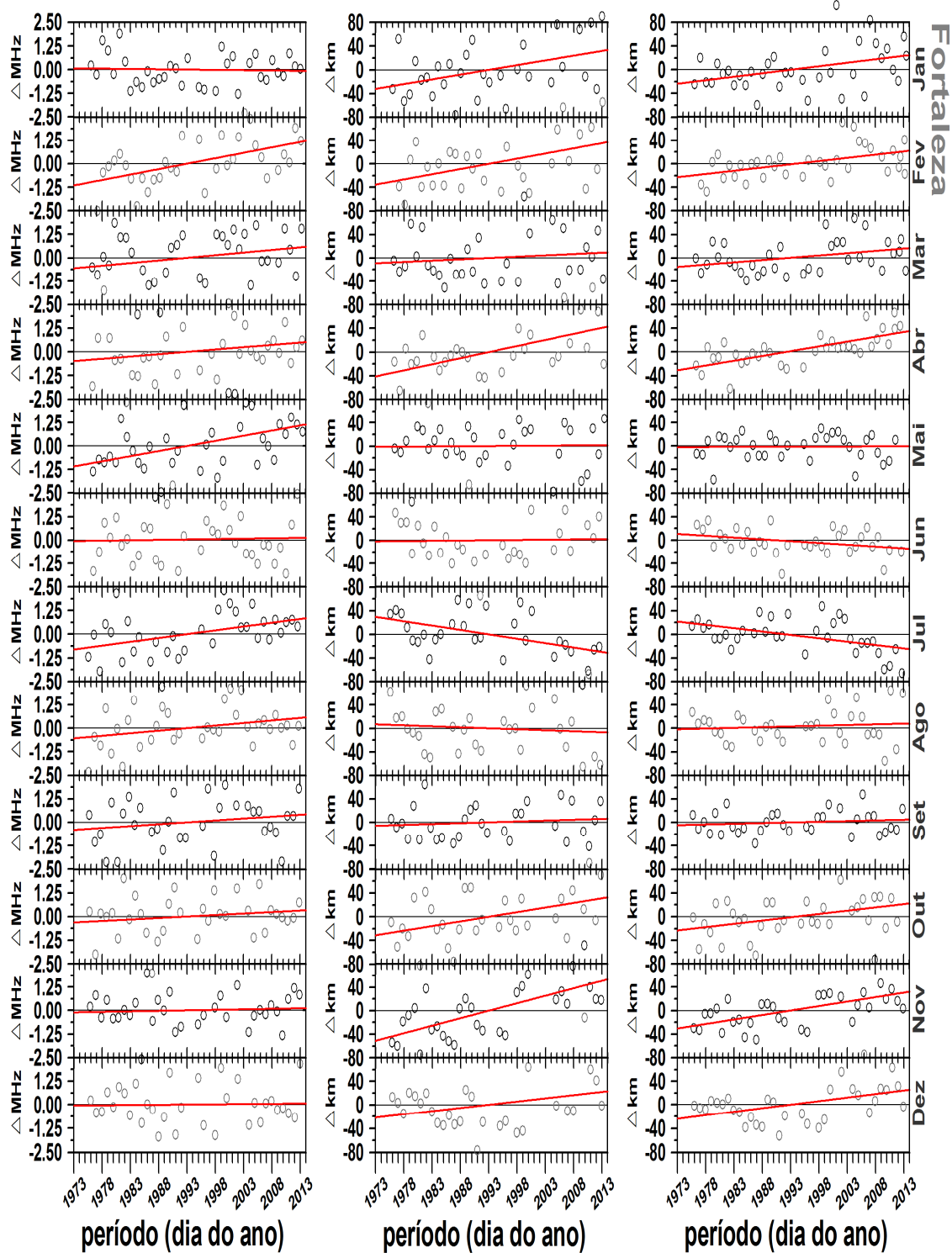


Figura 6.15 - Variabilidade mensal dos resíduos de Fortaleza entre os registros de foF2, hpF2 e hmF2 e os valores estimados (da esquerda para direita) nas mesmas condições de atividade solar baseado nos valores de Rz ao longo do período de estudo.

As taxas de variabilidade dos parâmetros ionosféricos em função do ano obtidas pela regressão linear são apresentadas nos painéis superiores das Figuras 6.16 a 6.19, mostrando a variabilidade mensal dos resíduos tendo como indicador de referência os índices F10,7 (Figuras 6.16 e 6.18) e Rz (Figuras 6.17 e 6.19). Os painéis inferiores são as estimativas absolutas de variação do período em estudo, ou seja, as taxas vezes 40 anos. As linhas vermelhas representam o desvio padrão obtidas entre os valores do resíduo e a aproximação linear mostradas nas Figuras 6.12 a 6.15. Os painéis à esquerda representam a variabilidade de foF2, os painéis centrais de hpF2 e os painéis à direita de hmF2. As tendências significativas podem ser estimadas como sendo as que excedem os desvios padrão (linhas vermelhas dos painéis inferiores) das Figuras 6.16 a 6.19. Para efeitos de discussão, estas tendências absolutas foram convertidas em tendências relativas (percentuais) tomando-se como base os valores médios para todo o período apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 Valores médios e desvio padrão dos parâmetros ionosféricos para Cachoeira Paulista e Fortaleza para todo o período de dados.

Local/parâmetro	foF2 (MHz)	hpF2 (km)	hmF2 (km)
Cachoeira Paulista	10,22 ± 2,40	377 ± 74	324 ± 54
Fortaleza	9,37 ± 2,03	436 ± 52	365 ± 38

Tendo F10,7 como indicador, observou-se em Cachoeira Paulista as seguintes variabilidades em relação a sazonalidade: ao longo do período em estudo, foF2 diminuiu em termos de valores absolutos ~-1.50 MHz durante os meses de inverno do hemisfério sul, alcançando um mínimo de -2.25 MHz no mês de Julho. Um comportamento inverso foi observado para os meses considerados de verão. Para Fevereiro há uma tendência positiva de ~+1.50 MHz. Em termos relativos (assumindo a amplitude média de variância de foF2 ao longo do ano e em diferentes condições de atividade solar, ou seja, a variabilidade da amplitude no painel a esquerda da Figura 6.1, temos foF2_{ampl.} = 10,22 MHz) foF2 sobre Cachoeira Paulista apresentou uma variabilidade ao longo dos últimos 40 anos de -22,0% no inverno e +14.7% no verão.

As alturas apresentam tendências marginalmente significativas, hpF2 em torno de -40 km em Abril e Julho e $\sim +30$ km em Junho e Agosto. O parâmetro hmF2 apresenta o mesmo padrão, entretanto com uma amplitude menor em sua variabilidade, ~ -30 km em Abril, ~ -25 km em Maio e Setembro e $\sim +20$ km em Agosto. Em termos relativos, hpF2 apresenta variação de $\sim -10.6\%$ em Abril e Julho e $\sim +8\%$ em Junho e Agosto. Já hmF2 mostra variações relativas de $\sim -9.2\%$ em Abril, $\sim -7.7\%$ em Maio e Setembro e $\sim +6.2\%$ em Agosto. Apesar da variabilidade das altitudes ao longo dos 40 anos não ser maior do que a auto variabilidade (estão basicamente dentro do limite de $\pm 1SD$) é possível notar que houve uma constante queda em altitude para quase todos os meses em Cachoeira Paulista.

Em relação ao indicador Rz, em Cachoeira Paulista observou-se basicamente o mesmo comportamento. foF2 apresenta uma tendência de > -1.50 MHz para o período de inverno. Esta tendência chega a ~ -2.25 MHz em Junho e -1.50 MHz de Abril, Maio, Julho e Agosto. Em Fevereiro há uma tendência positiva de $> +1.50$ MHz. Em termos relativos, a tendência de frequência é de -22.0% no inverno e $+14.7\%$ no verão. As alturas apresentam tendências também marginalmente significativas: para hpF2, $+50$ km em agosto e -30 km em abril. Para hmf2, -20 km em Janeiro e -25 km em Abril. Em termos relativos, hpF2 apresenta variação de $\sim +13.2\%$ em Agosto e $\sim -8\%$ em Abril. Para hmF2, de $\sim -6.2\%$ em Janeiro e $\sim -7.7\%$ em Abril.

Sumarizando, em Cachoeira Paulista observou-se que foF2 apresenta uma tendência negativa de $\sim -20\%$ no inverno e positiva de $\sim 15\%$ no verão. Os parâmetros hpF2, hmF2 apresentam em geral tendência negativa, com alguns meses do inverno mostrando tendências positivas.

Em face aos resultados apresentados acima podemos conjecturar: Assumindo que o pico da ionosfera sofreu o mesmo abaixamento ao longo do ano (média de -11.6 km e -15.8 km para hmF2 e hpF2, respectivamente) esperava-se uma diminuição não proporcional ao longo do ano dos valores de foF2, uma vez que

o pico estaria em menores altitudes onde os processos de recombinação são mais efetivos devido à maior densidade da atmosfera neutra. Entretanto os resultados mostram que durante o verão local foF2 aumentou ~1.5 MHz nos últimos 40 anos, ao contrário do esperado. A hipótese mais plausível neste caso seria a ocorrência de um aumento da concentração do oxigênio atômico nas altitudes do pico da ionosfera ou aumento da componente meridional dos ventos neutros na direção do equador. Porém esta segunda hipótese elevaria a altitude do pico, e o mesmo não foi registrado.

O período de inverno mostra uma situação análoga, porém inversa. Os valores dos resíduos das altitudes são mais próxima de zero e há uma diminuição de aproximadamente -2.25 MHz. Da mesma maneira, não havendo significativa variação nas altitudes, a única explicação para tal resultado nesta ordem de magnitude seria uma diminuição da concentração do oxigênio atômico nas altitudes da camada F neste período do ano.

Para Fortaleza, com relação a F10,7 (Figura 6.18), foF2 apresenta uma tendência de +2.25 MHz em Maio, +1.75 MHz em Fevereiro, ~+1.25 MHz em julho e agosto. Em termos de variação relativa, as tendências são de +24% em Maio, +18,7% em Fevereiro e 13,3 % em julho e agosto. As alturas apresentam tendências significativas: para hpF2, >+80 km em novembro e abril, +70 km em fevereiro, +65 km em outubro e janeiro, +50 km em janeiro, fevereiro, outubro e dezembro. Para hmF2, +50 km em Janeiro, fevereiro, outubro e dezembro, +60 km em abril e novembro e -50 km em julho. Em termos relativos, tem-se para hpF2 > 18% em novembro e abril, 16% em fevereiro, +15% em outubro e janeiro, +11,5% em janeiro, fevereiro, outubro e dezembro. Para hmF2, 13,7% em Janeiro, fevereiro, outubro e dezembro, +16,4% em abril e novembro e -13,7% em julho.

Para Fortaleza, com relação à Rz (Figura 6.19), foF2 apresenta uma tendência de +2.25 MHz em Fevereiro e Maio, +1.50 MHz em julho e +1.25 MHz em agosto. As alturas apresentam tendências: para hpF2, > +80 km em novembro,

+80 km em abril, +70 km em fevereiro, +65 km em janeiro e outubro, +45 km em dezembro e -60 km em julho. Para hmf2, +60 km em novembro, > +45 km em janeiro, fevereiro, abril, setembro e dezembro e -40 km em julho. Em termos de tendência relativa, foF2 apresenta uma tendência de 24% em Fevereiro e Maio, +16% em julho e +13,3% em agosto. As alturas apresentam tendências: para hpF2, > 18,3% em novembro e abril, +16% em fevereiro, +14,5% em janeiro e outubro, +10,3% em dezembro e -13,8% em julho. Para hmF2, +16,4% em novembro, > +12,3% em janeiro, fevereiro, abril, setembro e dezembro e -11% em julho.

Em sumário, para Fortaleza, notou-se para foF2, tendência positiva entre 13-24% para quase todo o ano. Os parâmetros hpF2, hmF2 mostraram tendência negativa de ~-11-14% em julho e positiva de ~+10-18% no verão e equinócios.

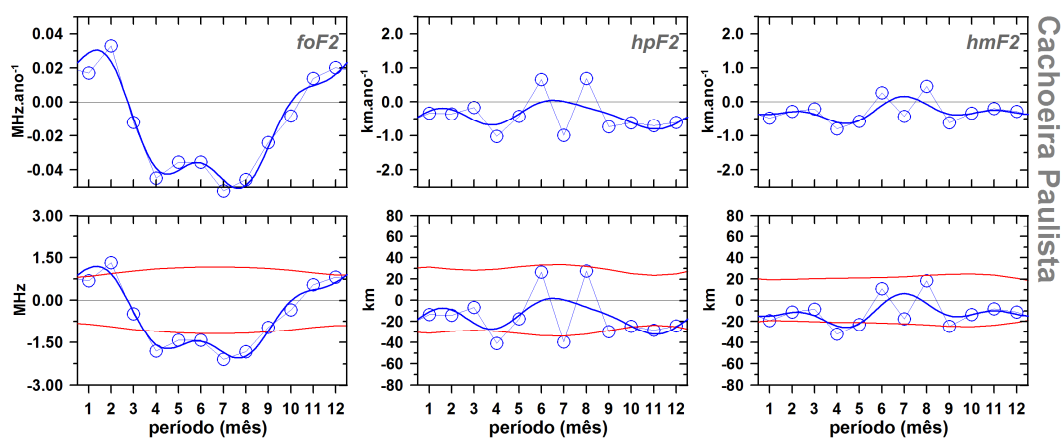


Figura 6.16 - Taxa de variabilidade dos parâmetros ionosféricos em função do ano para Cachoeira Paulista em relação ao F10,7. Nos painéis superiores é mostrada a variabilidade mensal dos resíduos e nos painéis inferiores as estimativas absolutas da variação do período, ou seja a taxa vezes 40 anos. A linha vermelha representa o desvio padrão entre os valores do resíduo e a aproximação linear mostrada na Figura 6.12.

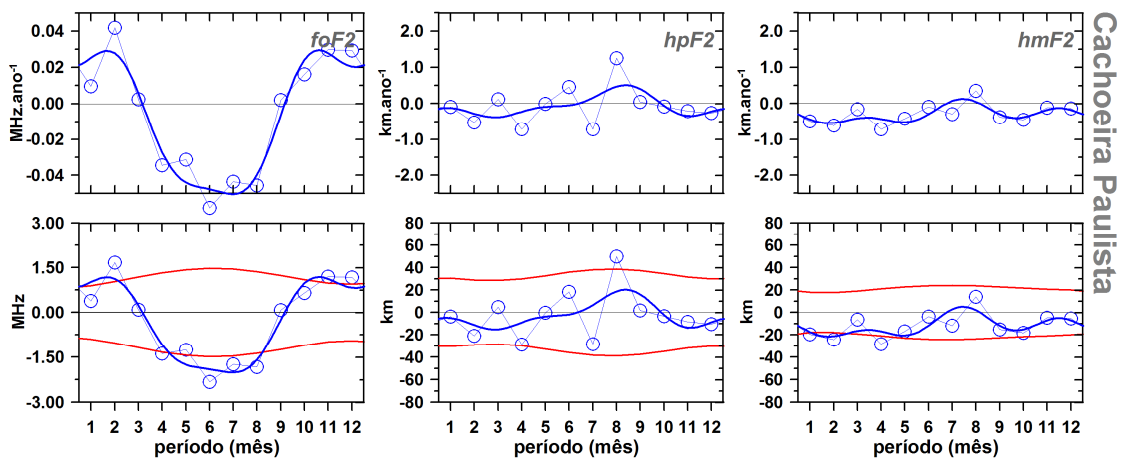


Figura 6.17 - Taxa de variabilidade dos parâmetros ionosféricos em função do ano para Cachoeira Paulista em relação à Rz. Nos painéis superiores é mostrada a variabilidade mensal dos resíduos e nos painéis inferiores as estimativas absolutas da variação do período, ou seja a taxa vezes 40 anos. A linha vermelha representa o desvio padrão entre os valores do resíduo e a aproximação linear mostrada na Figura 6.13.

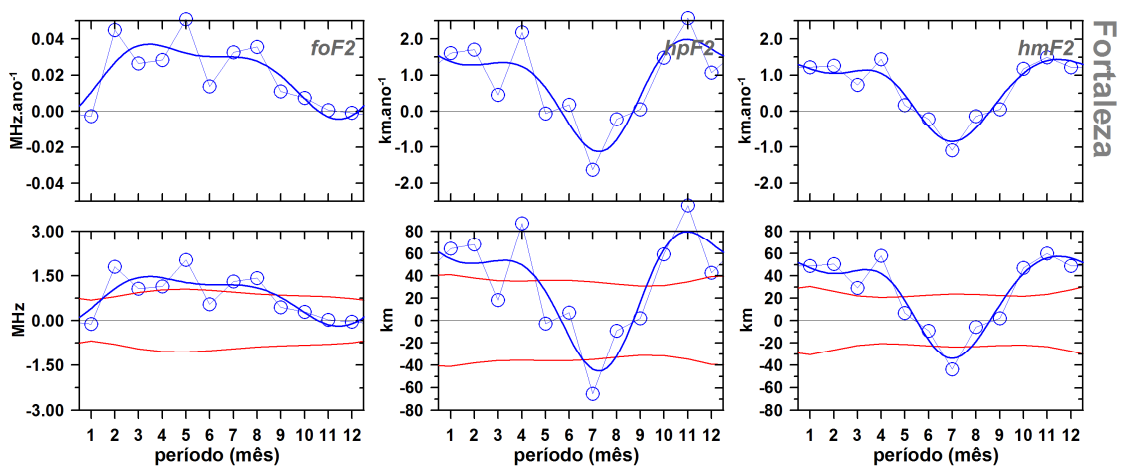


Figura 6.18 - Taxa de variabilidade dos parâmetros ionosféricos em função do ano para Fortaleza em relação ao F10,7. Nos painéis superiores é mostrada a variabilidade mensal dos resíduos e nos painéis inferiores as estimativas absolutas da variação do período, ou seja a taxa vezes 40 anos. A linha vermelha representa o desvio padrão entre os valores do resíduo e a aproximação linear mostrada na Figura 6.14.

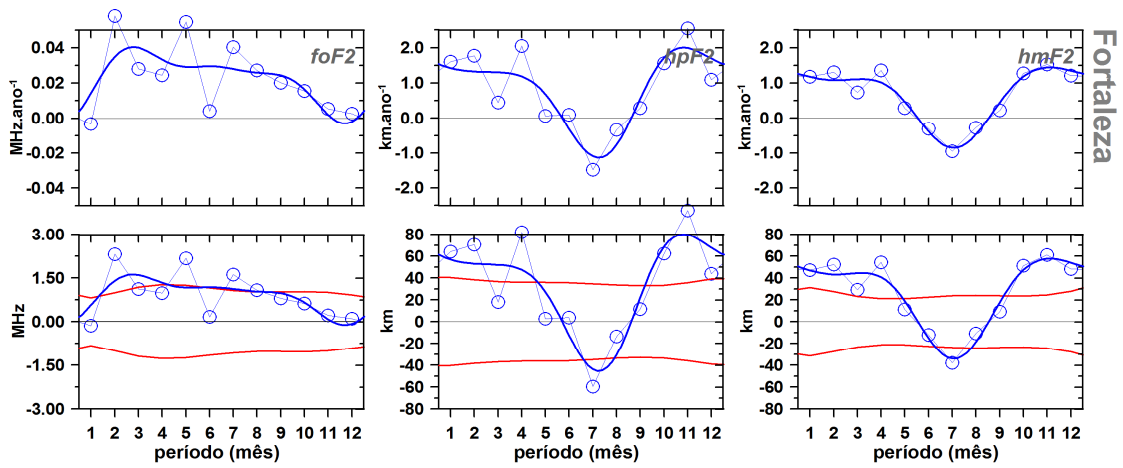


Figura 6.19 - Taxa de variabilidade dos parâmetros ionosféricos em função do ano para Fortaleza em relação à R_z . Nos painéis superiores é mostrada a variabilidade mensal dos resíduos e nos painéis inferiores as estimativas absolutas da variação do período, ou seja a taxa vezes 40 anos. A linha vermelha representa o desvio padrão entre os valores do resíduo e a aproximação linear mostrada na Figura 6.15.

7 CONCLUSÕES

Nesta Tese de Doutorado, estudou-se a variabilidade ionosférica de longo período do pico da camada F2 em baixas latitudes e equatorial no setor sul-americano. Estudaram-se as variações nos últimos 4 ciclos solares (desde 1970) dos parâmetros solares: índice do número de manchas solares (R_z), fluxo de rádio solar em 10,7 cm ($F_{10,7}$) e radiação no extremo ultravioleta em duas bandas (26-34 nm e 0,1-50 nm) medidas pelo instrumento SOHO/SEM. Para os dados ionosféricos, estudaram-se os parâmetros foF_2 , hpF_2 e hmF_2 em condições geomagneticamente calmas, às 12 horas LT das estações de sondagem ionosférica de Cachoeira Paulista e Fortaleza. Desenvolveu-se um modelo empírico climatológico para analisar a longa tendência da frequência crítica e altura de pico de ionização da camada F2.

A atividade solar foi estudada ao longo dos ciclos solares 20 a 24 (parcial). Observou-se que o último ciclo 24, apresentou menores valores de R_z , $F_{10,7}$ e fluxo no EUV comparado a ciclos anteriores. A radiação EUV, é menor por um fator de $\sim 1/4$ no ciclo 24 do que no ciclo 23. Estes resultados indicam uma tendência de diminuição na quantidade de irradiância solar incidente na atmosfera terrestre, o que teria implicações para a produção de íons por fotoionização.

Para Cachoeira Paulista, observou-se que foF_2 apresenta uma tendência negativa de $\sim -20\%$ no inverno e positiva de $\sim 15\%$ no verão. Os parâmetros hpF_2 , hmF_2 apresentam em geral tendência negativa, com alguns meses do inverno tendências positiva. A interpretação é de que para Cachoeira Paulista, a frequência foF_2 varia significativamente e as alturas de pico não apresentam variações significativa, devido provavelmente ao efeito de fotoionização e produção de (O^+). Neste caso, haveria uma tendência de maior produção de (O^+) nos meses de verão e uma tendência de menor produção nos meses de inverno.

Para Fortaleza, se notou para foF2, tendência positiva entre 13-24% para quase todo o ano. Os parâmetros hpF2, hmF2 mostraram tendência negativa de ~-11-14% em julho, positiva de ~+10-18% no verão e equinócios.

Para um trabalho futuro podemos estender o estudo da tendência de longo período e desenvolver um modelo climatológico ionosférico utilizando outros horários e para dias perturbados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOT, C.G.; FOWLE, F.E.; ALDRICH, L.B. The Variation of the Sun. **Astrophysical Journal**, v. 38, 181–186, 1913.
- APONTE, N.; BRUM, C.G.M.; SULZER, M.P.; GONZALEZ, S.A. Measurements of the O+ to H+ transição height and ion temperatures in the lower topside ionosphere over Arecibo for equinox conditions during the 2008–2009 extreme solar minimum. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v.118, 4465-4470, 2013. doi:10.1002/jgra.50416.
- APPLETON, E. V. Two anomalies in the ionosphere. **Nature**, v. 157, p. 691, 1946.
- AQUINO, M.G.S. **Informações técnicas e históricas sobre as ionossondas utilizadas em Cachoeira Paulista e Fortaleza**. São José dos Campos: INPE, 2015. Comunicação pessoal.
- BANKS, P. M.; KOCKARTS, G. **Aeronomy**, Part B, 355. [S.I.]: Academic Press, 1973
- BATISTA, I. S.; LIMIRO, L. A. T.; ABDU, M. A. Altura real da ionosfera: uma comparação entre dois métodos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 9, n. 2, p. 125-134, 1991. INPE-8743-PRE/4476.
- BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; MACDOUGALL, J.; SOUZA, J. R. Long term trends in the frequency of occurrence of the F3 layer over Fortaleza Brazil. **Journal of Atmospheric, Solar and Terrestrial Physics**, v. 64, p. 1409-1412, ago. 2002.
- BATISTA, I. S.; ABDU, M. A. Ionospheric variability at Brazilian low and equatorial latitudes: comparison between observations and IRI model. **Advances in Space Research**, v. 34, p. 1894-1900, 2004.
- BATISTA, I. S.; DIOGO, E. M.; SOUZA, J. R.; ABDU, M. A.; BAILEY, G. J. Equatorial ionization anomaly: the role of thermospheric winds and the effects of the geomagnetic field secular variation. In: ABDU, M. A.; PANCHEVA, D.; BHATTACHARYYA, A. (eds.). **Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere**. Springer, 2011. v. cap.23, p. 317-328.
- BRASSEUR, G.P.; SOLOMON, S. **Aeronomy of the middle atmosphere**. Springer Netherlands, 1986. 646p
- BERTONI, F. C. P. **Estudos de derivas ionosféricas por meio de ionossondas digitais**. 1998. 135p. (INPE-7169-TDI/675). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - INPE, São José dos Campos, 1998.

Disponível em:<<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/09.14.13.10>>. Acesso em: 09 out. 2015.

BERTONI, F. C. P. **Derivas ionosféricas em latitudes equatoriais: observações e modelagem**. Diss. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, fevereiro 2004. Disponível em:< <http://mtc-m16.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2004/04.14.11.32/doc/publicacao.pdf>>.

BIBL, K. Evolution of the ionosonde. **Annali de Geofisica**, v. 41, n. 5-6, 1998.

BIBL, K.; REINISCH, B. W. The universal digital ionosonde. **Radio Science**, v.13, n.3, p. 519-530, 1978.

BRUM, C.G.M. **Variabilidade da absorção de ruído cósmico via riômetro e modelagem numérica dos processos associados**. 2004. 297 p. (INPE-12330-TDI/993). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/08.04.16.30>>. Acesso em: 09 out. 2015.

BRUM, C. G. M.; RODRIGUES, F. D. S.; DOS SANTOS, P. T.; MATTA, A. C.; APONTE, N.; GONZALEZ, S. A.; ROBLES, E. A modeling study of foF2 and hmF2 parameters measured by the Arecibo incoherent scatter radar and comparison with IRI model predictions for solar cycles 21, 22, and 23. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 116, n. A3, Mar 2011.

CLETTE, F.; SVALGAARD, L.; VAQUERO, J.M.; CLIVER, E.W. Revisiting the sunspot number. A 400-year perspective on the solar cycle. **Space Sci. Rev.**, v. 186, .n. 1-4, p. 35-103, 2014. DOI. [10.1007/s11214-014-0074-2](https://doi.org/10.1007/s11214-014-0074-2).

DAL PINO, E. M. G. **Teaching AGA 5719** – plasma astrophysics. 1995. Disponível em: <<http://astroweb.iag.usp.br/~dalpino/PLASMAS-aga5719.html>> Data de acesso 30 de maio de 2014

DIDKOVSKY, L. V.; JUDGE, D. L.; JONES, A. R.; WIEMAN, S.; TSURUTANI, B. T.; MCMULLIN, D. Correction of SOHO CELIAS/SEM EUV measurements saturated by extreme solar flare events. **arXiv preprint astro-ph/0610123**. 2006.

DIDKOVSKY, L.; JUDGE, D.; WIEMAN, S.; MCMULLIN, D. Minima of solar cycles 22/23 and 23/24 as seen in SOHO/CELIAS/SEM absolute solar EUV flux. **arXiv preprint arXiv:0911.0870**. 2009.

DIDKOVSKY, L.; JUDGE, D.; WIEMAN, S.; WOODS, T.; JONES, A. EUV spectrophotometer (ESP) in extreme ultraviolet variability experiment (EVE): algorithms and calibrations. **Solar Physics**, v.. 275, n. 1, p 179-205, 2012.

DIOGO, E. M. **Estudo da anomalia equatorial de ionização**. 2008. 100 p. (INPE-15377-TDI/1396). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/342H5K8>>. Acesso em: 09 out. 2015.

DOMINGO, V.; FLECK, B.; POLAND, A. I. The SOHO mission: an overview. **Solar Phys.**, v. 162, p. 1–37, 1995.

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**, v. 25, n. 2, p.157-163, 2003.

ECHER, E. et al. Introduction to space weather. **Advances in Space Research**, v. 35, n. 5, p. 855-865, 2005. (INPE-13146-PRE/8405).

EDDY, J.A. The maunder minimum. **Science**, v.192, p.1189–1202, 1976.

ELY, C. V. **Estudo da ionosfera da região brasileira com dados dos satélites FORMOSAT-3/COSMIC e de digissondas**. 2010. 147 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/02.10.20.18-TDI). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/36TT72L>>. Acesso em: 16 junho 2015.

FERREIRA, R. C. Estudo das tendências de longo termo dos parâmetros ionosféricos sobre a região brasileira: Fortaleza. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO INPE (SICINPE)., 2007, São José dos Campos.: INPE, 2007. p. 47. Papel; On-line. (INPE-15027-PRE/9938). Disponível em:<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/01.28.14.25>>. Acesso em: 27 maio 2015

FLOYD, L.; NEWMARK, J.; COOK, J.; HERRING, L.; McMULLIN, D. Solar EUV and UV spectral irradiances and solar indices. **Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics**, v. 67, n. 1, p. 3-15, 2005.

Frölich, C.; Lean, J. The Sun's total irradiance: cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976. **Geophys. Res. Lett.**, v. 25, p. 4377-4380, 1998.

GONÇALVES, E. M.; FERREIRA, R. C.; BATISTA, I. S. Estudo das tendências de longo termo dos parâmetros ionosféricos sobre a Região Brasileira: Cachoeira Paulista (SP). In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, (SICINPE)., 2007, São José dos Campos: INPE, 2007. p. 35. CD-ROM; Papel; On-line. (INPE-15056-PRE/9966). Disponível em:<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.12.15.56>>. Acesso em: 27 maio 2015

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**: An introduction to geospace the science of the upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere. New York: Cambridge University Press, 1992.

HATHAWAY, D. H. The solar cycle. **Living Rev. Solar Phys.**, v. 7, n. 1, 2010.

HATHAWAY, D. H. **Solar Cycle Prediction**, Updated 2015/08. Disponível em: <<http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>>. Acesso em 20 de agosto de 2015

HOYT, D.V.; SCHATTEN, K.H. **The role of the sun in climate change**. New York: Oxford University Press, 1997. 288p.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Academic Press, 1983. 390p.

JUDGE, D. L.; MCMULLIN, D. R.; OGAWA, H. S.; HOVESTADT, D.; KLECKER, B.; HILCHENBACH, M. WURZ, P. First solar EUV irradiances obtained from SOHO by the CELIAS/SEM. In: PAP, J, M.; FROHLICH, C.; ULRICH, R, K, **Solar Electromagnetic Radiation Study for Solar Cycle 22**. Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 161-173. Proceedings of the SOLERS22 Workshop held at the National Solar Observatory, Sacramento Peak, Sunspot, New Mexico, June 17-21, 1996.

KELLEY, M. C. **The Earth's ionosphere**. San Diego: Academic Press, 1989.

KIVELSON , M.G.; RUSSEL, C. T. **Introduction to space physics**. Los Angeles: University of California, Ed. Cambridge University Press, 1995

LANG, K. R. **The Cambridge encyclopedia of the sun**. Medford, Massachusetts, USA: Tufts University, 2001. 256 p.

LEAN, J. Variations in the Sun's radiative output. **Reviews of Geophysics**, v.29, n. 4, 505-535, 1991.

MIESCH, M. S. The solar dynamo. **Phil. Trans. R. Soc.**,v.370, p. 3049–3069, 2012. DOI: 10.1098/rsta.2011.0507.

MARQUES, A.A.P.S. **The role of hydrogen and beryllium isotopes as tracers of solar and climate variability**. 2010. 118 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2010/09.10.18.49-TDI). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/388CFJS>>. Acesso em: 09 out. 2015. .

McNAMARA, L.F. **The ionosphere**: communications, surveillance, and direction finding. Miami: Krieger Publishing Company, 1991. 237p.

OLIVEIRA, A.G. I.; ROCKENBACH, M.; PACINI, A.A. Raios cósmicos e a heliosfera. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, v. 36, n. 2, p. 1-13, 2014. ISSN 1806-1117. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172014000200016>.

PIGGOTT, W. R.; RAWER, K. **URSI handbook of ionogram interpretation and reduction**. Boulder, CO (USA): World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, 1978. (November 1972) Revision of chapters 1-4. No. PB-285994.

RATCLIFFE, J. A. **An introduction to the ionosphere and magnetosphere**. Cambridge: Cambridge University Press, 1972.

REES, M.H. Ionization in the Earth's atmosphere by aurorally associated bremsstrahlung X-ray. **Planetary and Space Science**, v.12, n.7, p.1093-1097, 1964.

REINISCH, B. W. New techniques in ground-based ionospheric sounding and studies. **Radio Science**, v. 21, n. 3, p. 331-341, 1986a.

REINISCH, B.W. The digisonde 256 system and ionospheric research, URSI INAG. **Ionospheric Station Inf. Bulletin**, v.48, 1986b.

REINISCH, B.W.; BIBL, K.; KITROSSER, D.F.; SALES, G.S.; TANG, J.S.; ZHANG, Z.M.; BULLETT, T.W.; RALLS, J.A. The digisonde 256 ionospheric sounder, world ionosphere/ thermosphere study. In: LIU, C.H. (ed.). **WITS Handbook**, 1989. v. 2.

REINISCH, B. W. **The digisonde network and databasing**. Boulder: World Data Center A for Solar-Terrestrial Physical, 1995. P. 8-15. Report UAG-104, Ionosonde Networks and Stations.

REINISCH, B.W.; GALKIN, I.A., KHYMYROV, G., KOZLOV, A.; KITROSSER, D. Automated collection and dissemination of ionospheric data from the digisonde network. **Adv. Radio Sci.**, v. 2, p. 241-247, 2004. doi:10.5194/ars-2-241-2004.

RISHBETH, H.; GARRIOTT, O.K. **Introduction to ionosphere physics**. New York: Academic Press, 1969. 331p.

SOLOMON, S. C.; WOODS, T. N.; DIDKOVSKY, L. V.; EMMERT, J.T.; QIAN, L. Anomalously low solar extreme ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum, **Geophys. Res. Lett.**, V. 37, L16103, 2010. doi:10.1029/2010GL044468

SOUZA, J. R. **Modelagem ionosférica em baixas latitudes no Brasil**. 1997. 181 p. (INPE-6395-TDI/611). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São Jose dos Campos, 1997. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3r59YCT/GUnSj>>. Acesso em: 09 out. 2015.

TAPPING, K. F. Recent solar radio astronomy at centimeter wavelength: the temporal variability of the 10,7-cm flux. **J. Geophys. Res.** v. 92, n. (D1), p. 829–838, 1987.

TAPPING, K. F. The 10,7 cm solar radio flux (F10.7). **Space Weather**, v. 11, n. 7, p. 394-406, 2013.

USOSKIN, I. G. A history of solar activity over millennia. **Living Rev. Sol. Phys.**, v. 5, n. 3, 2008. doi: 10.12942/lrsp-2008-3.

WAKAI, N.; OHYAMA, H.; KOIZUMI, T. **Manual of ionogram scaling**. Japan: Radio Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications, 1987.

WIEMAN, S. R.; JUDGE, D. L.; DIDKOVSKY, L. V. Solar EUV Monitor (SEM) absolute irradiance measurements and how they are affected by choice of reference spectrum. In: **SPIE Optical Engineering+ Applications**, 2011. (pp. 81480G-81480G). International Society for Optics and Photonics.

YAMASHITA, C. S. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. 2000. 75 p. (INPE-7516-TDI/729). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/2000/07.19.09.11>>. Acesso em: 09 out. 2015.

YOUSEF, S.M. The solar Wolf-Gleissberg cycle and its influence on the Earth. In: ICEHM2000, 2000, Cairo, Egypt. **Proceedings...** Cairo: Cairo University, 2000.

Sites consultados:

National Center For Environmental Information – NOAA

Disponível em:

<<http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?t=102827&s=1&d=8,4,9>>

Acesso em 20 maio de 2013

Space Physics Interactive Data Resource – SPIDR

Disponível em: <<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>> Acesso em 20 maio de 2013

The Solar Extreme Ultraviolet Monitor – SEM

Disponível em: <http://www.usc.edu/dept/space_science/OLD_WEB/sem.htm>

Acesso em 20 maio de 2013

THE DIGISONDE NETWORK AND DATABASING

Disponível em: <<http://www.ips.gov.au/IPSHosted/INAG/uag-104/text/bodo.html>>
Acesso em 04 maio 2015

SOHO, the Solar & Heliospheric Observatory

Disponível em: <<http://sohowww.nascom.nasa.gov/about/about.html>> Acesso em
10 junho 2015