



Ministério da
Ciência e Tecnologia



MODELO IONOSFÉRICO REGIONAL PARAMETRIZADO

Wivaldo Dantas de Asevedo Júnior

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial,
orientada pelos Drs. Christiano Garnett Marques Brum, Jonas Rodrigues de Souza
e José Augusto Bittencourt, aprovada em 7 de abril de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1916/2005/05.19.15.27>>

INPE
São José dos Campos
2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

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

Membros:

Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

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

Dra. Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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

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

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

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

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



Ministério da
Ciência e Tecnologia



MODELO IONOSFÉRICO REGIONAL PARAMETRIZADO

Wivaldo Dantas de Asevedo Júnior

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial,
orientada pelos Drs. Christiano Garnett Marques Brum, Jonas Rodrigues de Souza
e José Augusto Bittencourt, aprovada em 7 de abril de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1916/2005/05.19.15.27>>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

000000 Asevedo Jr, Wivaldo Dantas.

Modelo Ionosférico Regional Parametrizado/ Wivaldo Dantas de Asevedo Júnior. – São José dos Campos: INPE, 2009.

79p. ; ()

() – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

1. Modelagem Ionosférica (Ionospheric Modelling). 2. Ionosfera (Ionosphere). 3. Modelos Parametrizados (Parametrized Models). 4. Séries de Fourier Finitas (Finite Fourier Series). 5. Normas. I. Título.

CDU

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, microfílmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

**ATENÇÃO! A FOLHA DE
APROVAÇÃO SERÁ IN-
CLUIDA POSTERIORMENTE.**

“Existe uma coisa que uma longa existência me ensinou: toda a nossa ciência, comparada à realidade, é primitiva e inocente; e, portanto, é o que temos de mais valioso.”

ALBERT EINSTEIN

*A meus amados pais,
MARIA APARECIDA SILVA DE ASEVEDO e WIVALDO DANTAS DE ASEVEDO,
pela dedicação e amor incondicional*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, por colocar em minha vida valiosas oportunidades de crescimento como a realização e conclusão deste trabalho.

A meus pais Maria Aparecida Silva de Asevedo e Wivaldo Dantas de Asevedo, a quem muito amo, e responsáveis pelo meu crescimento como pessoa consciente de deveres como cidadão e que me mostraram o caminho do conhecimento através da educação. As minhas irmãs Karinny Crisna Silva de Asevedo Câmara e Kalinne Cris Silva de Asevedo por estarem sempre presentes em minha vida.

Aos orientadores, Dr Christiano Garnett Marques Brum pela enorme contribuição dada ao desenvolvimento deste trabalho, Dr Jonas Rodrigues de Souza, pela valorosa orientação, compreensão, apoio, incentivo e amizade em momentos-chave, e ao Dr José Augusto Bittencourt, a quem tenho grande estima.

Aos membros da banca examinadora, Dr Eurico Rodrigues de Paula, Dr Icaro Vitorello, Dr Rui Tertuliano de Medeiros e Dr Odim Mendes Junior pelas sugestões e críticas sempre pertinentes e importantes ao desenvolvimento do trabalho.

Aos meus colegas de turma e amigos do curso de geofísica espacial Antônio Carlos Varela Saraiva, Erica Monteiro Diogo, Vandoir Bourscheidt, Matheus Mascarenhas, e muitos outros. Um agradecimento especial ao Francisco Carlos de Meneses Junior e Enia Paula de Araújo Olivio pela amizade de longa data.

À Mariana Cristina Falcão Neto e família presentes de uma forma muito especial durante boa parte do desenvolvimento deste trabalho.

A todos que compõem a Divisão de Aeronomia, pesquisadores e funcionários, especialmente às secretárias Cleonice Aparecida Orlandeli Sper e Fatima Aparecida Alves Usifatti, sempre solícitas e disponíveis para ajudar.

E finalmente, ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

RESUMO

Neste trabalho um modelo ionosférico regional parametrizado (PARIM) foi desenvolvido e usado para calcular variações espaciais e temporais de valores de frequência de plasma e concentração de elétrons sobre o setor brasileiro. Valores de frequência de plasma calculados pelo SUPIM (*Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model*) modificado foram utilizados para construir o modelo. O PARIM é um modelo parametrizado com dependências em altitude, longitude (hora local) e latitude, que reproduz valores de frequência de plasma para qualquer dia do ano em períodos geomagneticamente calmos ($A_p \cong 4$), e atividade solar de baixa a moderadamente alta (F10.7 entre 66 e 180). O procedimento para reproduzir os dados iniciais, utiliza as séries de Fourier para que todas as dependências dos valores de frequência de plasma, possam ser representados pelos seus coeficientes. De forma geral os valores de frequência de plasma obtidos pelo modelo PARIM apresentam boa coerência comparados aos valores do SUPIM. Em comparação aos dados da campanha COPEX, o modelo apresenta resultados satisfatórios mas ainda necessita de aprimoramentos. Os valores de frequência crítica de plasma na região E calculados com o modelo PARIM estão coerentes com os dados medidos na campanha COPEX. Os valores calculados de hmE sobre a região de Cachimbo estão de acordo com os dados obtidos, mas apresentam uma variação em sentido contrário ao anoitecer sobre as regiões de Boa Vista e Campo Grande. Os parâmetros foF2 obtidos com o PARIM estão coerentes em comparação às medidas efetuadas em Cachimbo e superestimados durante o período do dia nas estações de Boa Vista e Campo Grande. Os parâmetros hmF2 calculados para as estações de Boa vista e Campo Grande estão de acordo com o valores obtidos da campanha COPEX, mas apresentam descontinuidades entre 12:00 e 16:00 (hora local) sobre a região equatorial, o que pode estar associado a ocorrência de uma camada F3. Os valores de TEC calculados pelo PARIM, estão superestimados em comparação aos dados da campanha COPEX durante a tarde e início da noite. A diferença é bem mais acentuada próximo das 16:00 horas.

PARAMETRIZED REGIONAL IONOSPHERIC MODEL

ABSTRACT

In this work a parametrized regional ionospheric model (PARIM) was developed and used to calculate spatial and temporal variations of ionospheric plasma frequency and electron concentration over Brazilian sector. Values of plasma frequency calculated from an enhanced Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model (SUPIM) was used to construct the model. The PARIM is a parametrized model with dependencies in altitude, longitude (local time) and latitude, giving values of plasma frequency for any day of the year for quiet geomagnetic conditions ($A_p \cong 4$) and low to moderately high solar activity (F10.7 between 66 and 180). The procedure to reproduce the initial data base, uses Fourier series so that all the plasma frequency dependencies can be represented by the Fourier coefficients. In general, the plasma frequency values obtained with PARIM model shows excellent agreement with results from SUPIM model. In comparison with results from COPEX campaign, the model shows good agreement but it needs improvements. The values of critical frequency for the ionospheric E layer obtained with PARIM are in good agreement with COPEX campaign data. The values of hmE over Cachimbo shows coherence with COPEX campaign measurements, but over Boa Vista and Campo Grande during evening time there is not good agreement. The parameters foF2 calculated over Cachimbo are in agreement with the data, but their are overestimated over Boa Vista and Campo Grande during day time. The values of hmF2 calculated for Boa Vista and Campo Grande show good agreement with COPEX campaign data, but over equatorial sector the values from PARIM show inconsistencies between 12:00 and 16:00 (local time). The explanation to this inconsistencies may be connected with the occurrence of F3 layer. The values of Total Electron Content (TEC) calculated by PARIM are overestimated in comparison with the observational data from COPEX, during the day and early evening time. The differences are more noticeable near 16 LT.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO	21
2	CONTEXTO CONCEITUAL DO MODELO PARIM	27
2.1	Anomalia equatorial e a dinâmica da ionosfera equatorial	27
2.1.1	Dínamo da região F	28
2.1.2	Dínamo da região E	29
2.1.3	Derivas de plasma na região F equatorial	32
2.1.4	A anomalia equatorial	34
2.2	O modelo SUPIM	36
2.2.1	Desenvolvimento e equações do modelo SUPIM	36
2.2.2	Parâmetros de entrada	41
2.2.2.1	Fluxo de radiação ionizante	41
2.2.2.2	Atmosfera neutra	41
2.2.2.3	Vento Neutro	41
2.2.2.4	Deriva $\vec{E} \times \vec{B}$	42
2.2.3	Parâmetros de saída	42
2.3	Séries de Fourier	43
2.3.1	Definição	43
2.3.1.1	Condições de convergência de Dirichlet	45
2.3.2	Serie de Fourier finita	46
3	O MODELO PARIM	49
3.1	Metodologia	50
3.1.1	Preparação dos dados	50
3.1.2	Construção do modelo PARIM	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1	Comparação entre os modelos PARIM, SUPIM e IRI	57

4.2	Comparação entre os modelos PARIM, IRI e dados da campanha COPEX	62
4.3	Outras saídas do modelo PARIM	66
5	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Posição geográfica das estações de coleta de dados utilizadas durante a campanha COPEX.	25
2.1 Eletrodinâmica da região F da ionosfera, onde definimos um modelo simplificado em que a densidade e condutividade estão distribuídas em camadas e sob a influência de um vento neutro zonal constante.	29
2.2 Ilustração esquemática do eletrojato equatorial e da dinâmica da região E. A região E é considerada como uma fina camada submetida a um campo elétrico.	31
2.3 Derivas vertical e zonal, registradas pelo radar de Jicamarca durante o equinócio.	33
2.4 Modelo esquemático de Farley et al. (1986) do pico pré-inversão na região F, onde foi considerado um vento uniforme.	34
2.5 Concepção artística da anomalia equatorial, evidenciando também o efeito fonte e o eletrojato equatorial.	35
2.6 Reconstrução de uma onda periódica quadrada para os harmônicos (a) $n = 1$, (b) $n = 1,3$ (c) $n = 1,3,5$ e (d) $n = 1,3,5$ e 7.	44
3.1 Fluxo solar extremo ultravioleta integrado em função do índice F10.7 calculado pelo modelo Solar2000.	51
3.2 Espectro de potência dos harmônicos da dependência temporal ao longo de um ano.	56
4.1 Corte meridional do contorno da frequência de plasma da camada E e base da camada F calculados com o SUPIM, PARIM, e IRI em hora local para: 06:00, 12:00 e 20:00 durante períodos de equinócio e mínimo de fluxo solar ($F10.7 = 90$).	58
4.2 Mesma que a figura 4.1, mas para condições de fluxo solar máximo ($F10.7 = 180$).	59
4.3 Corte meridional do contorno da frequência de plasma da camada F e topo da camada F calculados com o SUPIM, PARIM, e IRI em hora local para: 06:00, 12:00 e 20:00 durante períodos de equinócio e mínimo de fluxo solar ($F10.7 = 90$).	60

4.4	Mesma que a figura 4.3, mas para condições de fluxo solar máximo($F_{10.7} = 180$).	61
4.5	Comparação de valores observados da frequência crítica da camada E (f_oE) e da altura do pico (h_mE) sobre Boa Vista, Cachimbo e Campo Grande com valores calculados pelo IRI e PARIM	63
4.6	Comparação de valores observados da frequência crítica da camada F (f_oF2) e da altura do pico (h_mF2) sobre Boa Vista, Cachimbo e Campo Grande com valores calculados com o IRI e PARIM.	64
4.7	Comparação de valores observados de TEC (<i>Total Electron Content</i>) durante a campanha COPEX com valores calculados com o PARIM.	65
4.8	Mapa de valores de frequência crítica da camada F (f_oF2) calculado pelo PARIM sobre o setor brasileiro destacando as estações de Cachimbo, Campo Grande e Boa Vista.	67

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Número de harmônicos relevantes utilizados para construir os coeficientes de Fourier	55

1 INTRODUÇÃO

A ionosfera terrestre é uma camada da atmosfera que está localizada entre 50 km e 1000 km de altura aproximadamente. É composta de íons e elétrons em grandes quantidades a ponto de influenciar a propagação de ondas eletromagnéticas que nela se propagam (RISHBETH; GARRIOT, 1969). Dentre os processos de ionização responsáveis pela criação da ionosfera, o principal é resultante da interação da radiação solar na faixa espectral do EUV, UV e dos raios X com a atmosfera neutra. Os fótons são capazes de ionizar os constituintes neutros da atmosfera, sendo ao mesmo tempo responsáveis pelo aquecimento da mesma. As partículas ionizadas adquirem elevada energia cinética e podem produzir ionização através de colisões. A ionosfera é dividida nas regiões D, E, F1, F2 e F3 apresentando perfis de densidade eletrônica que dependem diretamente da localização geográfica, hora local, dia do ano e atividades solar e geomagnética (HARGREAVES, 1992; BATISTA et al., 2002). O critério determinante para a divisão em regiões está associado à composição química, e aos processos físico-químicos distribuídos em altitude. Face a atual importância dos estudos relacionados a ionosfera assim como a compreensão de processos físicos e mecanismos envolvidos, a modelagem vem se destacando como uma excelente ferramenta para compreensão e explicação de muitos fenômenos ligados à ela.

A modelagem ionosférica, tem como objetivo a elaboração de um modelo que contenha as principais características do comportamento da ionosfera. Através da modelagem ficou mais fácil compreender os processos eletrodinâmicos envolvidos, analisando o efeito conjunto dos ventos termosféricos, campos elétricos e da atmosfera neutra no plasma dessa região, explicando uma variedade de fenômenos, como por exemplo, a anomalia de Appleton também conhecida como anomalia equatorial (ANDERSON, 1973a; ANDERSON, 1973b; SOUZA, 1997; LIN et al., 2005; SASTRI, 1990). Souza (1997) definiu três tipos de modelos ionosféricos: modelos empíricos, modelos físicos e modelos semi-empíricos. No momento pode ser acrescentada mais uma definição, modelos parametrizados. Os modelos supracitados são definidos como:

- a) Modelos Empíricos - Utilizam funções empíricas que resultam das observações e análise do comportamento da ionosfera, ou seja, as fontes de observações e análises são dados experimentais. Essas funções empíricas podem apresentar dependência espacial, com hora local, estações do ano e atividades solar(ex.: número de manchas solares) e geomagnética.

- b) Modelos Físicos - Também conhecidos como modelos teóricos ou matemáticos, são modelos que utilizam cálculos da distribuição global da ionização utilizando apenas a aplicação das leis físicas que regem o comportamento da ionosfera terrestre. Alguns modelos conseguem reproduzir com grande consistência e semelhança os fenômenos ionosféricos.
- c) Modelos Semi-empíricos - Combinam os modelos físicos e empíricos. As informações provenientes dos dois tipos de modelos se complementam de acordo com a necessidade.
- d) Modelos Parametrizados - São simulações numéricas semelhantes as empregadas nos modelos empíricos, entretanto, os parâmetros utilizados em sua confecção são oriundos de resultados fornecidos por outros modelos, tais como físicos e/ou semi-empíricos.

O desenvolvimento dos modelos ionosféricos iniciou-se nos anos de 1960, quando foram criados os primeiros modelos físicos para a ionosfera. Desde então vários modelos têm surgido e trazido contribuições com a finalidade de tornar os seus resultados mais precisos. A base teórica na qual os modelos físicos são construídos é resolver um sistema de equações básicas que regem o comportamento da ionosfera. Essas equações são: equação da continuidade, do movimento e do equilíbrio de energia. A solução é efetuada separadamente para cada íon. Os modelos mais modernos e sofisticados resolvem o problema para os principais íons que fazem parte do plasma ionosférico (O^+ , He^+ , H^+ , N_2^+ , O_2^+ e NO^+) (SOUZA, 1997).

Outra característica importante é a escolha da forma do campo geomagnético a ser considerado. Muitos modelos consideram o campo geomagnético como sendo um dipolo centrado com o eixo alinhado ao eixo de rotação terrestre (STERLING et al., 1969; YOUNG et al., 1980; DE PAULA, 1987; BAILEY; SELLEK, 1990; BONELLI, 1995). Essa consideração faz com que as diferenças longitudinais na configuração do campo geomagnético não possam ser investigadas. O modelo proposto por Bonelli (1995) apresenta a propriedade de auto-consistência em que as equações da continuidade para os elétrons e a equação do vento (HEELIS et al., 1974) são resolvidas simultaneamente de forma explícita.

Dentre os modelos com um maior grau de sofisticação podemos destacar os modelos *Low-latitude Ionospheric model* (LION) desenvolvidos por Bittencourt (BITTEN-

COURT et al., 2007) e o *Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model* (SUPIM) (BAILEY et al., 1997). O modelo proposto por Bittencourt é um modelo ionosférico para baixas latitudes com o campo magnético semelhante ao campo de um dipolo inclinado em relação ao eixo de rotação da terra, capaz de calcular as concentrações para os íons O^+ , O_2^+ , NO^+ , N_2^+ e N^+ e elétrons. O modelo SUPIM, considera o campo geomagnético do tipo dipolo excêntrico (eixo inclinado e deslocado em relação ao eixo de rotação da terra) com os valores para o campo magnético calculados pelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF2000) e, por meio do acoplamento entre as equações da continuidade, movimento e equilíbrio de energia, calcula as distribuições das densidades e das temperaturas dos íons O^+ , He^+ , H^+ , N_2^+ , O_2^+ , N^+ e NO^+ e elétrons com cobertura espacial e temporal (detalhamento do SUPIM é apresentado no Capítulo 2).

Dentre os mais conhecidos modelos empíricos e semi-empíricos podemos citar o *Semi-Empirical Low Latitude Ionospheric Model* (SLIM) (ANDERSON et al., 1987a), o *International Reference Ionosphere Model* (IRI) (BILITZA, 2001) e o *Fully Analytic Ionospheric Model* (FAIM) (ANDERSON; FORBES, 1989). Embora a maioria destes modelos representem muito bem os dados de foF2 (frequência do pico da região F ionosférica), nenhum deles representa bem o Conteúdo Eletrônico Total (CET). A causa provável é uma representação imprecisa do perfil de densidade eletrônica no topo da ionosfera calculada por cada modelo (BROWN et al., 1991). Como exemplos de modelos parametrizados podemos citar o modelo desenvolvido por Chiu (1975) construído com equações analíticas e o *Parametrized Ionospheric Model* (PIM) (DANIELL et al., 1995), que é um modelo global que foi desenvolvido de forma híbrida utilizando uma combinação de funções empíricas ortonormais, construídas a partir de um banco de dados gerado com a utilização de 4 diferentes modelos físicos: (1) um modelo para região F em baixas latitudes (LOWLAT) (ANDERSON, 1973b), (2) um modelo para a região F em médias latitudes (MIDLAT), (3) um combinado para a região E em médias e baixas latitudes (ECSD) (JASPERSE, 1982) e (4) um modelo para as regiões E e F em altas latitudes (TDIM) (SCHUNK, 1988). O tipo de configuração de campo geomagnético que os quatro modelos utilizam é a do dipolo inclinado (DANIELL et al., 1995). Por utilizar um banco formado pelos modelos físicos, esse tipo de modelo, obviamente, herda as características dos resultados provenientes de cada modelo fonte.

A ionosfera sobre o setor brasileiro apresenta características particulares como a

presença da anomalia equatorial, também conhecida como anomalia de Appleton. Através de modelos físicos, pode-se obter resultados bastante satisfatórios na descrição da ionosfera sobre o setor brasileiro, porém, tais modelos, pelo fato de serem construídos sobre a base teórica complexa que envolve o comportamento da ionosfera, apresentam um elevado consumo computacional em tempo de execução e obtenção de resultados. Modelos empíricos, apesar de não possuírem tais características, são construídos com a análise de dados coletados ao longo do globo e por falta de uma boa representatividade dos dados, principalmente nos setores equatoriais e no hemisfério sul, acabam sub-estimando ou superestimando grandezas relevantes nos estudos do plasma ionosférico (ABDU et al., 2004b). O modelo Ionosférico Regional Parametrizado (sigla em inglês PARIM - *Parametrized Regional Ionospheric Model*), desenvolvido neste trabalho foi construído com o propósito de apresentar resultados com grau de aceitação semelhantes aos modelos físicos sobre o Brasil, com maior economia no gasto de tempo computacional de execução. O modelo físico escolhido para gerar o banco de dados primordial foi uma modificação do modelo SUPIM (SOUZA et al., 2009). A escolha se baseia no fato de que o modelo apresenta resultados coerentes em relação aos dados experimentais (SOUZA et al., 2000). Os valores provenientes da saída do SUPIM que foram utilizados são frequência de plasma com dependência temporal (hora local e dia do ano), espacial (latitude magnética e altitude), e atividade solar. Todas as dependências serão representadas por funções paramétricas, construídas com a utilização de series de Fourier finitas (JENKINS; WATTS, 1968), exceto a atividade solar considerada como uma relação de dependência linear (SOUZA et al., 2009).

No Capítulo 2 apresentaremos alguns conceitos chaves para o compreensão e entendimento do desenvolvimento do trabalho como: a anomalia equatorial, onde apresentaremos uma descrição do fenômeno de grande importância para a compreensão da dinâmica da ionosfera na região de interesse, apresentando os mecanismos de sua criação; O modelo SUPIM, discutindo suas características, equações e técnicas envolvidas na criação do modelo, parâmetros de entrada e saída; e por fim, as séries de Fourier que são a base da construção do modelo que desenvolvemos neste trabalho.

No Capítulo 3 apresentaremos o modelo PARIM destacando sob quais condições e qual a metodologia empregada em sua construção.

No Capítulo 4 serão apresentados resultados obtidos através do modelo PARIM, traçando um paralelo entre dados de frequência de plasma na longitude de Cachimbo

(PA), obtidos com o modelo SUPIM e o modelo empírico IRI (BILITZA, 2001). Mostraremos também resultados de foF2, hmF2 comparando os com dados obtidos através da campanha COPEX, SUPIM e IRI, na estações de Cachimbo (PA), Campo Grande (MS) e Boa Vista (RR). A Figura 1.1 mostra o posicionamento geográfico das estações de coleta de dados da campanha COPEX.

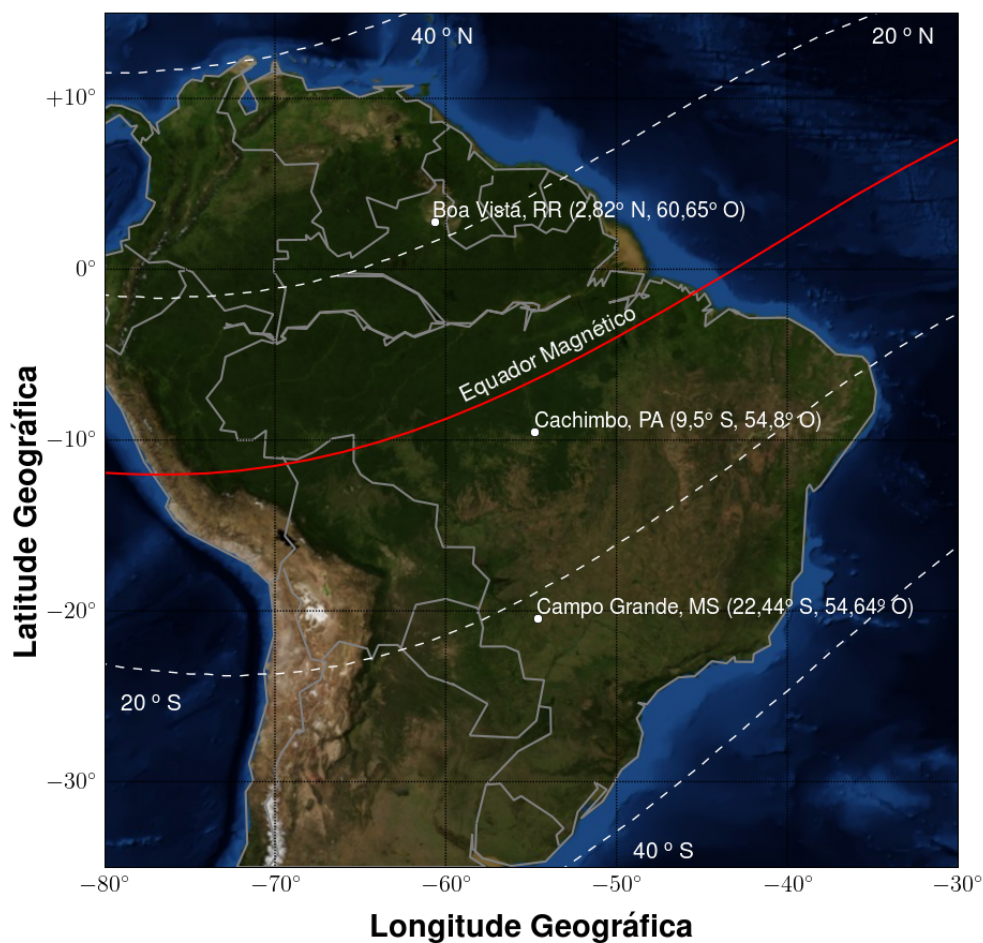


Figura 1.1 - Posição geográfica das estações de coleta de dados utilizadas durante a campanha COPEX.

No Capítulo 5 , finalmente, destacaremos as principais conclusões observadas e encontradas ao longo do desenvolvimento do trabalho.

2 CONTEXTO CONCEITUAL DO MODELO PARIM

Antes de descrever a metodologia na qual é construída o PARIM, faz-se necessário discutir alguns conceitos chaves importantes no contexto do desenvolvimento do trabalho. Portanto, este capítulo tem por objetivo contextualizar, como uma preparação para o desenvolvimento e posteriores discussões sobre o modelo desenvolvido (PARIM). Na seção 2.1 é apresentada a anomalia equatorial, assim como a dinâmica da ionosfera na região equatorial para uma melhor compreensão dos mecanismos de geração da anomalia, que é um fenômeno importantíssimo no contexto da modelagem ionosférica, presente também sobre a região brasileira. Na seção 2.2 é apresentado em detalhes, as bases e equações com as quais foi construído o modelo SUPIM, apresentando também os parâmetros de entrada e saída, e finalmente a seção 2.3 descreve as séries de Fourier, destacando suas características e definição geral, assim como condições nas quais podemos empregar a técnica, e por fim o desenvolvimento de séries de fourier finitas, de enorme aplicabilidade em vários campos do conhecimento, e que, como veremos a diante no Capítulo 4, é utilizada na construção do modelo PARIM.

2.1 Anomalia equatorial e a dinâmica da ionosfera equatorial

Nesta seção será descrita a anomalia equatorial, fenômeno que influencia a ionosfera nas proximidades da região equatorial em todo o planeta também presente sobre o setor brasileiro. Esse fenômeno é o resultado da interação entre o plasma ionosférico com os campos elétricos e geomagnético na região equatorial. Antes de definir e descrevê-la, faz-se necessário compreender sua origem, assim como a variação dos campos elétricos e derivas de plasma ionosférico em baixas latitudes, que são de grande importância na compreensão dos fenômenos eletrodinâmicos responsáveis pela geração da Anomalia. Os campos elétricos globais e as correntes são resultante da ação direta dos dínamos da ionosfera e magnetosfera. Tais parâmetros são de grande importância nos estudos e modelagem da ionosfera.

Durante períodos geomagneticamente calmos, as derivas de plasma são produzidas devido a presença de campos elétricos gerados pelos dínamos das regiões E e F da ionosfera. Já em períodos perturbados, os campos elétricos na ionosfera em regiões de baixa latitude, podem ser bastante afetados devido a processos que perturbam o sistema de dínamos ionosféricos (FEJER et al., 1991). A seguir são apresentados os dínamos das regiões E e F destacando aspectos importantes no movimento de plasma

em baixas latitudes, e também fenômenos ligados ao acoplamento elétrico das regiões E e F da ionosfera equatorial, responsáveis por variações no campo elétrico durante o entardecer.

2.1.1 Dínamo da região F

A absorção de radiação solar na termosfera, provoca um aquecimento nesta região. Isso faz com que apareçam gradientes horizontais de pressão, dando origem aos ventos termosféricos. Os ventos termosféricos são responsáveis pelo movimento de partículas carregadas na região F da ionosfera através do arrasto iônico, esse movimento induz o aparecimento de uma deriva de íons e elétrons ao longo das linhas de campo geomagnético de intensidade igual à componente do vento na direção do campo. Existe também um movimento bem menos intenso na direção perpendicular tanto ao campo como ao vento, cuja velocidade é obtido pela expressão:

$$\vec{V} = \frac{v\omega}{v^2 + \omega^2} \frac{\vec{U} \times \vec{B}}{B} \quad (2.1)$$

onde:

\vec{V} é a velocidade das partículas carregadas;

\vec{U} é a velocidade do vento neutro;

\vec{B} o campo magnético da terra;

v é a frequência de colisão entre as partículas neutras e carregadas;

$\omega = \frac{qB}{m}$ é a giro-frequência das partículas, e;

q e m são carga e massa das partículas, respectivamente.

A atuação desse vento em cargas positivas e negativas, faz com que haja uma separação de cargas, onde as cargas positivas se movem na direção de $\vec{U} \times \vec{B}$. Esse movimento por sua vez provoca o aparecimento de uma corrente elétrica caracterizada pelo vetor densidade de corrente (\vec{J}). Para melhor compreender tal fenômeno e o aparecimento do vetor densidade de corrente \vec{J} , observe a Figura 2.1, onde consideramos a região F equatorial, como uma camada fina, e dentro dela existindo

uma condutividade σ_P constante e fora dela igual a zero. Consideramos também um vento zonal para leste, atuando em toda a camada. A ação conjunta do vento zonal e do campo geomagnético cria um movimento de cargas na vertical. Como a condutividade fora da camada é nula, as cargas se acumulam nas fronteiras fazendo surgir um campo elétrico \vec{E} , conhecido como campo de polarização da região F. Este campo de polarização só existe durante a noite e sua intensidade é bem menor que o campo elétrico gerado na região E. Note também que a ação do campo de polarização em conjunto com o campo geomagnético provoca o aparecimento de uma deriva zonal na direção leste. O campo elétrico de polarização é importante em situações específicas como as que ocorrem ao entardecer. Essas situações veremos com mais detalhes a seguir.

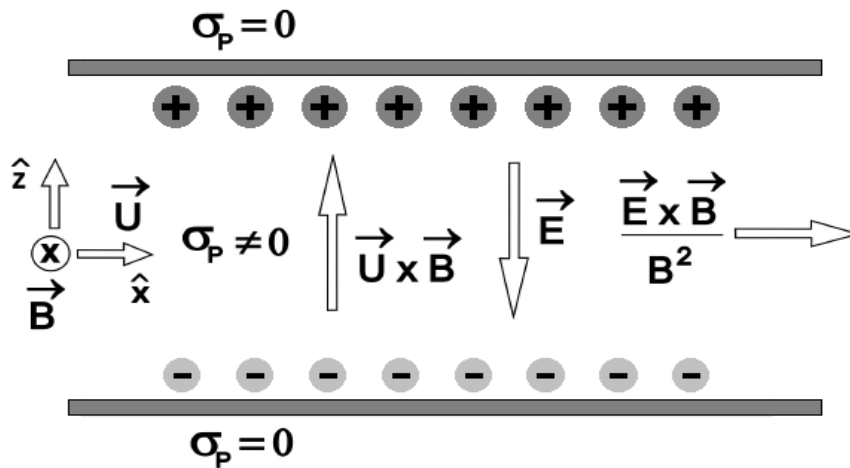


Figura 2.1 - Eletrodinâmica da região F da ionosfera, onde definimos um modelo simplificado em que a densidade e condutividade estão distribuídas em camadas e sob a influência de um vento neutro zonal constante.

Fonte: Adaptada de Souza (1997) e Carrasco (2005).

2.1.2 Dínamo da região E

O aquecimento da estratosfera devido a absorção de radiação solar pelo ozônio, e na região da troposfera devido a absorção de radiação pelo vapor d'água, são os principais responsáveis pelo aparecimento de marés atmosféricas. Estas oscilações de marés se propagam para cima provocando o surgimento de ventos na região E durante o dia. Estes ventos são os principais geradores dos campos elétricos na

ionosfera.

Durante o dia, a condutividade na região E possui um valor elevado, e o campo elétrico nessa região não deve ser considerado inteiramente gerado pelos ventos locais, como na região F. Podemos entender isso pelo aparecimento de um sistema global de ventos de maré que por sua vez faz surgir um sistema de correntes global representado pelo vetor densidade de corrente dado pela expressão (KELLEY, 1989):

$$\vec{J}_v = \boldsymbol{\sigma}(\vec{r}, t) \cdot \left[\vec{U}(\vec{r}, t) \times \vec{B} \right] \quad (2.2)$$

O tensor condutividade ($\boldsymbol{\sigma}(\vec{r}, t)$) e os ventos ($\vec{U}(\vec{r}, t)$) dependentes do tempo, também possuem uma dependência em \vec{r} (vetor posição), isso faz com que a densidade de corrente \vec{J}_v , em geral, não precise ter divergência nula ($\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_v \neq 0$). Esse fato faz com que surja um campo elétrico $\vec{E}(\vec{r}, t)$ para que o divergente do vetor densidade de corrente total seja zero. Ou seja,

$$\vec{\nabla} \cdot \left[\boldsymbol{\sigma}(\vec{r}, t) \cdot \left(\vec{E}(\vec{r}, t) + \vec{U}(\vec{r}, t) \times \vec{B} \right) \right] = 0. \quad (2.3)$$

Para melhor entender o dínamo da região E, assim como fizemos na seção anterior para a região F, vamos considerar a região E como uma camada condutora fina, como mostrada na Figura 2.2. A camada está sujeita a um campo elétrico na direção zonal constante $E_x \hat{x}$ gerado pelos ventos de marés. A interação entre o plasma ionosférico e os campos geomagnético e elétrico, perpendiculares entre si, na região equatorial, provoca o aparecimento de duas correntes diferentes no plasma ionosférico: a corrente Pedersen e a corrente Hall. A atuação do campo elétrico constante na direção zonal ($E_x \hat{x}$) faz surgir uma densidade de corrente Pedersen ($\sigma_P E_x$), também na direção zonal, e uma densidade de corrente Hall ($\sigma_H E_x$) perpendicular ao campo geomagnético e elétrico simultaneamente. Esta corrente Hall não pode fluir através das fronteiras da camada (condutividade zero fora da camada). Dessa forma, as cargas se acumulam nas fronteiras provocando o surgimento de um campo elétrico para cima ($E_z \hat{z}$). A ação deste campo de polarização, cria uma densidade de corrente Pedersen ($\sigma_P E_z$) que anula a densidade de corrente Hall ($\sigma_H E_x$) na direção \hat{z} , e

também faz surgir uma densidade de corrente Hall ($\sigma_H E_z$) na direção zonal. O cancelamento dos vetores densidade de corrente na direção \hat{z} ($J_z = \sigma_P E_z - \sigma_H E_x = 0$), implica que:

$$E_z = \frac{\sigma_H}{\sigma_P} E_x \quad (2.4)$$

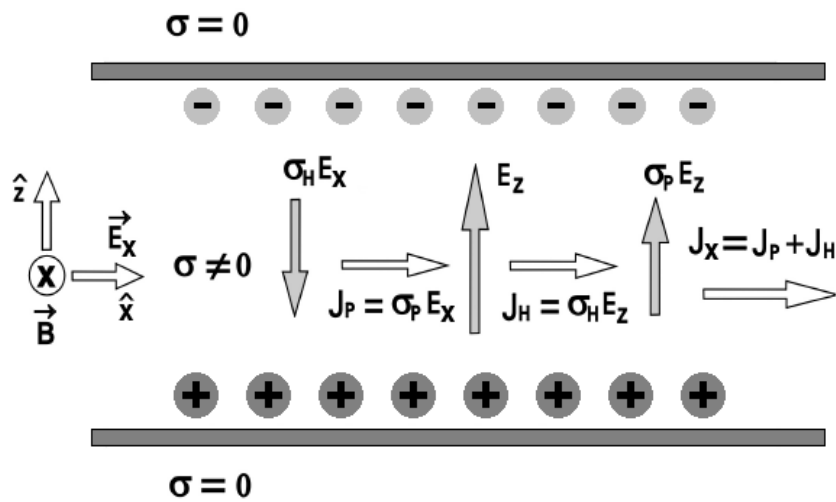


Figura 2.2 - Ilustração esquemática do eletrodo equatorial e da dinâmica da região E. A região E é considerada como uma fina camada submetida a um campo elétrico.

Fonte: Adaptada de Souza (1997) e Carrasco (2005).

Na direção zonal a densidade de corrente resultante é calculada pela soma das densidades de correntes $\sigma_P E_x$ e $\sigma_H E_z$, portanto:

$$J_x = \sigma_H E_z + \sigma_P E_x \quad (2.5)$$

substituindo a equação 2.4 na equação 2.5, obtemos J_x total

$$J_x = \left(\frac{\sigma_H^2}{\sigma_P^2} + 1 \right) \sigma_P E_x = \sigma_c E_x \quad (2.6)$$

onde σ_c é conhecida como condutividade Cowling.

Esta equação mostra um aumento na condutividade zonal por um fator de $1 + \sigma_H^2/\sigma_P^2$, que proporciona um aumento na corrente na direção zonal. As condições consideradas neste modelo, apenas ocorrem na região equatorial, onde o campo elétrico zonal é perpendicular ao campo geomagnético. Condição fundamental para a intensificação máxima da corrente sobre o equador geomagnético. Essa forte corrente elétrica que existe no equador geomagnético é conhecida como eletrojato equatorial.

2.1.3 Derivas de plasma na região F equatorial

Os dínamos ionosféricos explicados anteriormente, bem como os campos elétricos ionosféricos, são fundamentais para o movimento de plasma da região F em baixas latitudes. Neste setor o transporte de plasma perpendicular ao campo geomagnético é controlado pela deriva $\vec{E} \times \vec{B}$. Contudo, o campo elétrico na região F é bem menor do que o campo elétrico gerado na região E durante o dia, e pode ser descarregado por correntes que fluem ao longo das linhas de campo geomagnético que são ótimos condutores, fechando assim o circuito na região E (RISHBETH, 1971; HEELIS et al., 1974; BATISTA; ABDU, 1986). Porém, devido a essa característica das linhas de campo geomagnético, os campos elétricos gerados na região E equatorial podem ser mapeados para a região F praticamente sem atenuação (FARLEY, 1960). Portanto, durante o dia o plasma se move para cima e para oeste, devido a ação conjunta da deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ causada pelo campo mapeado da região E (para leste) e do campo de polarização na direção vertical (discutido na seção 2.1.1), respectivamente. No período da noite ocorre uma inversão na direção do vento termosférico e as derivas de plasma fluem para leste e para baixo. Podemos ver este fato na Figura 2.3, onde são mostradas as derivas zonal e vertical da região F sobre Jicamarca (FEJER et al., 1991), considerando as direções positivas para leste e para cima. Observe que a deriva zonal para oeste é negativa durante o dia e positiva para leste à noite. A deriva vertical é positiva durante o dia e negativa durante o período da noite.

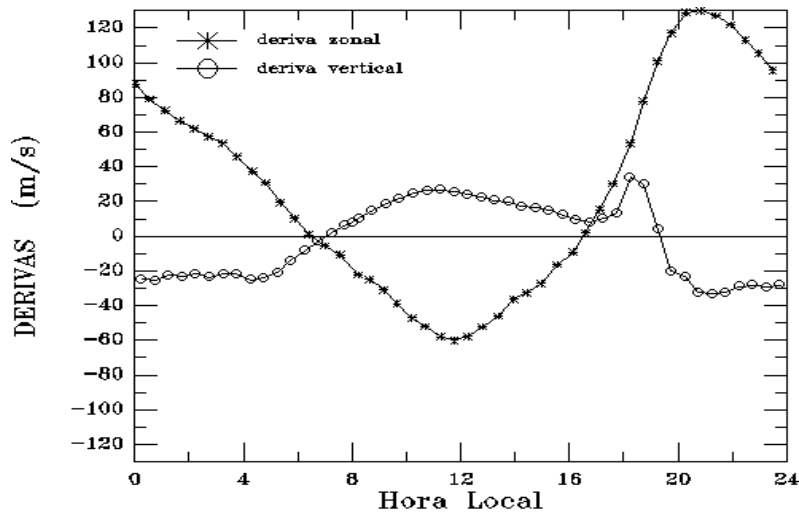


Figura 2.3 - Derivas vertical e zonal, registradas pelo radar de Jicamarca durante o equinócio.

Fonte: Fejer et al. (1991, p. 13902).

Na Figura 2.3 podemos perceber que a deriva vertical apresenta um máximo, logo antes de se tornar negativa, em torno das 18:00. Essa intensificação é conhecida como pico pré-inversão. A explicação para este aumento súbito na deriva vertical pode ser compreendida por meio da Figura 2.4. Observe que perto da fronteira entre dia e noite (terminadouro solar), o dínamo da região F gera o campo de polarização E_z , como já visto, esse campo aparece à noite e a essa altura ele já é intenso. A alta condutividade das linhas de campo geomagnético mapeiam o campo E_z para a região E com o sentido apontado para o equador (E_y). O campo E_y por sua vez, na presença do campo geomagnético cria uma densidade de corrente Hall (J_{xy}) apontando na direção oeste. A baixa condutividade do lado noturno faz com que apareça um acúmulo de cargas negativas no terminadouro, criando um campo elétrico E_x , conseqüentemente uma densidade de corrente J_{xx} surge para cancelar J_{xy} . O campo elétrico E_x é mapeado de volta para a região F intensificando a deriva vertical, logo após decresce rapidamente, uma vez que já é noite e ocorre a inversão do campo.

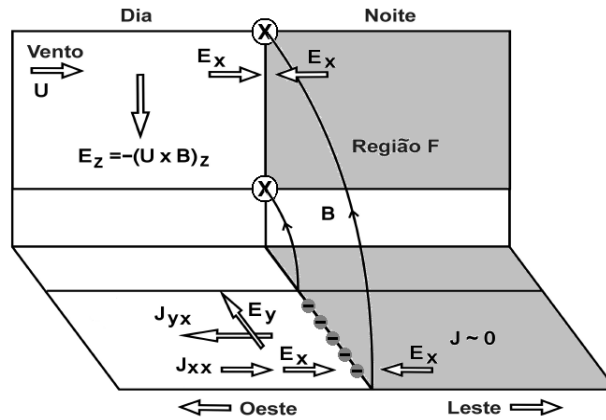


Figura 2.4 - Modelo esquemático de Farley et al. (1986) do pico pré-inversão na região F, onde foi considerado um vento uniforme.

Fonte: Adaptada de Carrasco (2005).

2.1.4 A anomalia equatorial

Nas subseções anteriores apresentamos uma breve explicação sobre a eletrodinâmica das regiões E e F sobre a região equatorial, com o objetivo de uma melhor compreensão do fenômeno conhecido como anomalia equatorial que recebe este nome pois ocorre em regiões de baixas latitudes equatoriais. Neste setor, durante o dia, esperava-se encontrar uma maior concentração de íons e elétrons em comparação a regiões de latitudes mais elevadas, uma vez que a região equatorial recebe maior radiação solar por unidade de área. No entanto, o que se observa é que na região equatorial existe uma baixa concentração de plasma. Portanto, temos uma anomalia, que é conhecida como anomalia equatorial ou anomalia de Appleton. O mecanismo de formação da anomalia equatorial pode ser compreendido devido à ação da deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$ criada pelo campo elétrico zonal. Durante o dia, o plasma da região próxima ao equador geomagnético é transportado para altitudes elevadas e devido a ação da força gravitacional e da força gerada por gradientes de pressão, as partículas fluem ao longo das linhas de campo geomagnético, movendo-se tanto na direção sul, como na direção norte descrevendo trajetórias semelhantes às que podemos ver na Figura 2.5, caracterizando o que conhecemos como efeito fonte. Ao fluírem ao longo das linhas de campo geomagnético, as partículas atingem regiões onde a difusão é baixa, o que provoca um acúmulo de plasma em latitudes mais altas, tanto no hemisfério norte, como no sul em torno de $\pm 14^\circ$. Portanto, em horários onde a deriva

vertical é positiva e suficientemente intensa o plasma é retirado da região equatorial e depositado em latitudes mais altas (SOUZA, 1997).

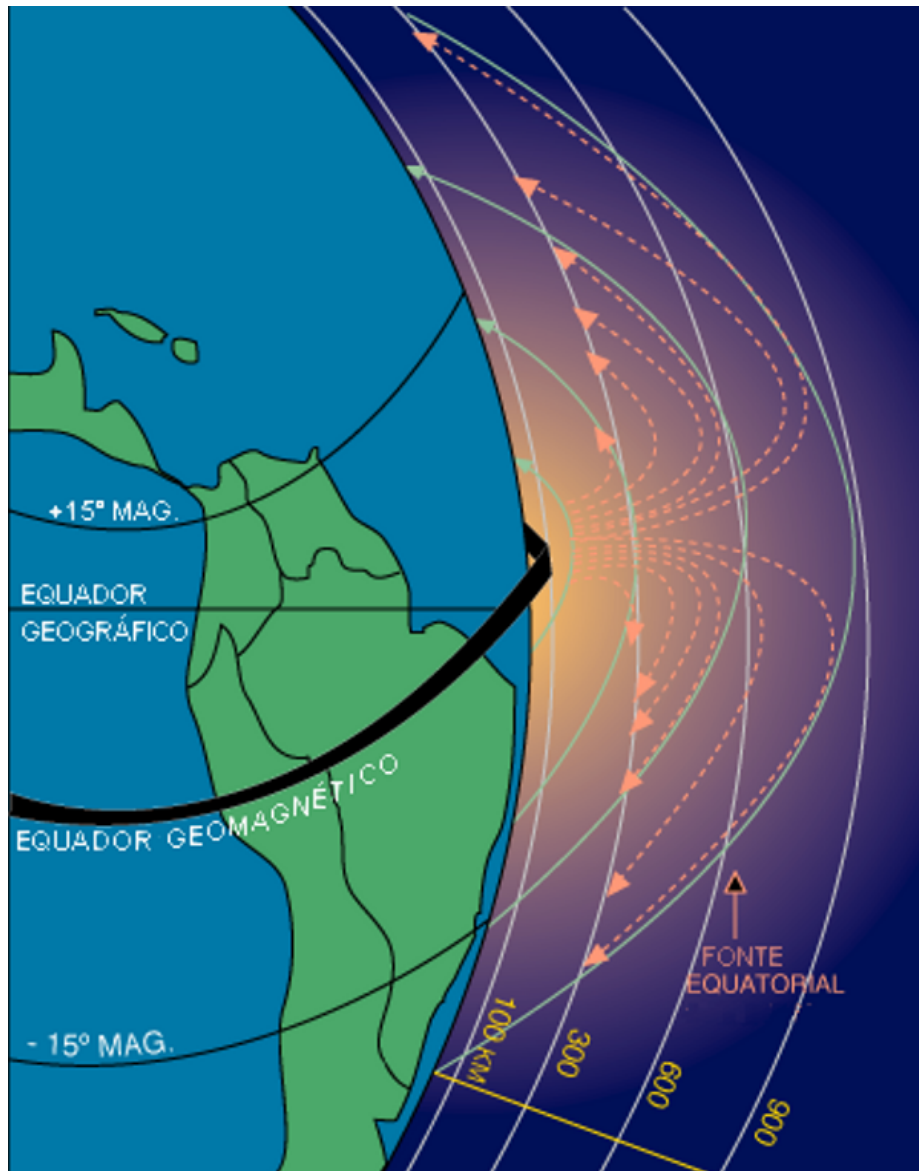


Figura 2.5 - Concepção artística da anomalia equatorial, evidenciando também o efeito fonte e o eletrojato equatorial.

Fonte: Abdu (1992) e Souza (1997, p. 30).

2.2 O modelo SUPIM

O modelo SUPIM foi desenvolvido nas últimas décadas (BAILEY; SELLEK, 1990; BAILEY et al., 1993; BAILEY et al., 1997). No modelo, as equações de continuidade, movimento, e balanço de energia, todas dependentes do tempo, são resolvidas ao longo das linhas de campo magnético fechadas para cada íon (O^+ , H^+ , He^+ , N_2^+ , O_2^+ , N^+ e NO^+). Para esse trabalho a versão do SUPIM considera as linhas de campo fechadas para regiões de médias e baixas latitudes, com altura de base de 95 km em ambos os hemisférios. Os principais processos químicos e físicos envolvidos no modelo incluem a produção de íons, causada pela radiação solar, produção e perda devido à reação entre os íons e os gases neutros, difusão ambipolar e térmica, efeito das colisões íon-íon e íon-neutro, ventos termosféricos, derivas eletrodinâmicas, conduções térmicas, aquecimento fotoelétrico e aquecimento por fricção (BAILEY et al., 1997). Como o SUPIM leva em consideração as linhas de campo magnético, faz-se necessário definir o campo geomagnético a ser considerado. A configuração de campo geomagnético utilizado para esse trabalho é a de um dipolo centrado e inclinado em relação ao eixo da terra, com correções realizadas com o IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) (MAUS et al., 2005).

2.2.1 Desenvolvimento e equações do modelo SUPIM

O procedimento para resolver o conjunto de equações que o modelo envolve é baseado nos resultados de Kendall e Pickering (1967), onde se mostra que o movimento térmico do plasma na ionosfera é causado pela difusão ambipolar paralela às linhas de campo magnético combinado ao movimento de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$, perpendicular ao campo magnético. Para manter a consistência com a forma do dipolo escolhida, a deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ varia de acordo com a geometria da linha de campo (BAILEY; SELLEK, 1990). A equação da continuidade para o i -ésimo íon é escrita como:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (N_i \vec{V}_i) = P_i - L_i; \quad (2.7)$$

onde t é o tempo, N_i , V_i , P_i e L_i são a concentração, a velocidade e a taxa de produção e perda do i -ésimo íon, respectivamente. Como o movimento dos íons é regido pela influência do campo magnético, vamos decompor o movimento em perpendicular e paralelo ao campo magnético fazendo a velocidade $\vec{V}_i = \vec{V}_i^{\parallel} + \vec{V}_{em}$, onde \vec{V}_i^{\parallel} é a

velocidade paralela e \vec{V}_{em} é a velocidade perpendicular resultante entre a velocidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ e a velocidade de co-rotação. Com isso, a Equação 2.7 torna-se (SOUZA, 1997):

$$\frac{dN_i}{dt} + \vec{\nabla} \cdot (N_i \vec{V}_i^{\parallel}) = P_i - L_i - N_i \vec{\nabla} \cdot \vec{V}_{em}; \quad (2.8)$$

onde a diferencial exata $\frac{dN_i}{dt}$ vem da equação:

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{\partial N_i}{\partial t} + \vec{V}_{em} \cdot \vec{\nabla} N_i.$$

O cálculo da divergência do fluxo paralelo ao campo magnético é dado pela equação (DE PAULA, 1987; BAILEY; SELLEK, 1990; SOUZA, 1997):

$$\vec{\nabla} \cdot (N_i \vec{V}_i^{\parallel}) = \frac{1}{A} \frac{\partial [AN_i V_i^{\parallel}]}{\partial s}. \quad (2.9)$$

Os parâmetros A e s são a área da seção transversal do tubo de fluxo magnético e a distância ao longo da linha de campo, respectivamente.

Substituindo 2.9 na Equação 2.8 obtemos:

$$\frac{dN_i}{dt} + \frac{1}{A} \frac{\partial [AN_i V_i^{\parallel}]}{\partial s} = P_i - L_i - N_i \vec{\nabla} \cdot \vec{V}_{em}. \quad (2.10)$$

P_i é obtido por (BAILEY; SELLEK, 1990; SOUZA, 1997):

$$P_i = \sum_{\lambda} \Phi(\lambda) \sigma_i(\lambda) n_i \exp \left(- \sum_j \sigma_j(\lambda) n_j H_j Ch_j(\chi) \right). \quad (2.11)$$

Na equação acima, Φ é a intensidade da radiação do fluxo solar EUV, $\sigma_i(\lambda)$ a seção transversal de foto-ionização do i -ésimo constituinte neutro, n_i é a concentração do

i-ésimo constituinte neutro, $\sigma_j(\lambda)$ é a seção transversal de foto-absorção do j-ésimo constituinte neutro, n_j é a concentração do j-ésimo constituinte neutro, $Ch_i(\chi)$ é a função Chapman do j-ésimo constituinte neutro e χ é o ângulo zenital solar.

O termo de perda L_i da equação 2.10 para o i-ésimo íon é dado pela relação (SOUZA, 1997):

$$L_i = \beta_i N_i. \quad (2.12)$$

O parâmetro β_i é o coeficiente de perda do i-ésimo íon, o qual é determinado a partir de uma seleção das reações químicas importantes que ocorrem na ionosfera.

A equação do movimento para o i-ésimo íon considera apenas o transporte de plasma ao longo das linhas de campo geomagnético em condições estacionárias para os íons i , j , k . As forças que atuam no plasma ionosférico em tais condições são: a força devido ao gradiente de pressão, a gravitacional, a força elétrica, a magnética e a colisional. Para o i-ésimo íon (se $i = O^+$, então $j = He^+$ e $k = H^+$) teremos (BAILEY; BALAN, 1996):

$$\begin{aligned} 0 = & -gSen(I) - \frac{kT_i}{m_i N_i} \frac{\partial N_i}{\partial s} - \frac{kT_e}{m_i N_e} \frac{\partial N_e}{\partial s} - \frac{k}{m_i} \frac{\partial(T_e + T_i)}{\partial s} \\ & - \frac{k}{m_i} \left[\beta_i^* \frac{\partial T_i}{\partial s} - \beta_{ij}^* \frac{\partial T_j}{\partial s} - \beta_{ik}^* \frac{\partial T_k}{\partial s} \right] - [\nu_{ij}(1 - \Delta_{ij}) - R_{ijk} + R_{ikj}](V_i^{\parallel} - V_j^{\parallel}) \\ & - [\nu_{ik}(1 - \Delta_{ik}) - R_{ikj} + R_{ijk}](V_i^{\parallel} - V_k^{\parallel}) - \sum_m \nu_{im}(V_i^{\parallel} - V_m^{\parallel}) \\ & - \sum_n \nu_{in}(V_i^{\parallel} - U^{\parallel}). \end{aligned} \quad (2.13)$$

Onde g é a aceleração gravitacional, m_i é a massa do íon, N_e é a concentração de elétrons, T_i , T_e e k são as temperaturas dos íons e elétrons, e a constante de Boltzmann, respectivamente, ν_{ij} a frequência de colisão entre o i-ésimo e o j-ésimo íon, ν_{ik} é a frequência de colisão entre o i-ésimo e o k-ésimo íon, ν_{im} a frequência de

colisão entre o i -ésimo íon e o m -ésimo íon molecular, β_i^* , β_{ij}^* e β_{ik}^* são os coeficientes de difusão térmica do i -ésimo íon, U^{\parallel} é a velocidade do vento neutro paralelo definido como:

$$U^{\parallel} = u_{\theta} \text{Cos} D \text{Cos} I + u_{\phi} \text{Sen} D \text{Cos} I. \quad (2.14)$$

onde u_{θ} é a componente meridional da velocidade do vento neutro em coordenadas geográficas (positiva do norte para o sul), u_{ϕ} é a componente zonal da velocidade do vento neutro em coordenadas geográficas (positiva do oeste para leste), D é a declinação magnética, I é a inclinação magnética.

Os somatórios em m e n que aparecem na Equação 2.13 são efetuados sobre os íons moleculares e gases neutros, respectivamente. Os valores de Δ_{ij} , Δ_{ik} , R_{ijk} e R_{ikj} estão definidos em [Quegan et al. \(1981\)](#).

A equação do movimento para os íons moleculares e o nitrogênio ($i = N_2^+$, O_2^+ , N^+ e NO^+) é ([BAILEY; BALAN, 1996](#)):

$$0 = -g \text{Sen}(I) - \frac{kT_i}{m_i N_i} \frac{\partial N_i}{\partial s} - \frac{kT_e}{m_i N_e} \frac{\partial N_e}{\partial s} - \frac{k}{m_i} \frac{\partial (T_e + T_i)}{\partial s} - \sum_{j \neq i} \nu_{ij} (V_i^{\parallel} - V_j^{\parallel}) - \sum_n \nu_{in} (V_i^{\parallel} - U^{\parallel}). \quad (2.15)$$

A equação do equilíbrio de energia do plasma, também considera o plasma distribuído ao longo das linhas de campo, é representada por ([BAILEY; SELLEK, 1990](#)):

$$\frac{3}{2} k N_i \frac{DT_i}{Dt} = Q_i - k N_i T_i \vec{\nabla} \cdot \vec{V}_i + \vec{\nabla} \cdot (\kappa_i \vec{\nabla} T_i) + F_{in}; \quad (2.16)$$

O termo Q_i corresponde a soma das taxas de aquecimento por colisão, \vec{V}_i a velocidade, κ_i é a condutividade térmica, a diferencial exata $\frac{DT_i}{Dt}$ é dada por:

$$\frac{DT_i}{Dt} = \frac{\partial T_i}{\partial t} + \vec{V}_i \cdot \vec{\nabla} T_i \quad (2.17)$$

e F_{in} é calculado com a equação:

$$F_{in} = \sum_n \frac{m_i m_n}{m_i + m_n} \nu_{in} N_i \left[(V_i^{\parallel} - U^{\parallel})^2 + (V^{\perp} + U^{\perp})^2 + (V^{\Phi})^2 \right]. \quad (2.18)$$

V^{Φ} é a velocidade de deriva zonal a qual é considerada igual a zero no modelo. U^{\perp} é a velocidade do vento neutro perpendicular definida como:

$$U^{\perp} = u_{\theta} \text{Sen} D \text{Sen} I + u_{\phi} \text{Cos} D \text{Sen} I. \quad (2.19)$$

2.2.2 Parâmetros de entrada

Destacaremos nesta seção os principais parâmetros de entrada utilizados pelo modelo SUPIM. São eles: o fluxo solar, a atmosfera neutra, os ventos neutros e a velocidade de deriva eletromagnética.

2.2.2.1 Fluxo de radiação ionizante

Na versão do SUPIM que consideramos nesse trabalho foram utilizados dois modelos de fluxo solar. O primeiro modelo adotado foi o EUVAC (RICHARDS *et al.*, 1994), que foi desenvolvido com base no modelo EUV94 (TOBISKA, 1996) para fluxo solar EUV e apresenta uma boa representação para a fotoionização da região F. Este fornece o fluxo EUV para 37 grupos de comprimentos de onda de 50 - 1050 Å. Dentro deste espectro não estão faixas extremamente importantes para a região E, que são os raios X e Lyman- α . Então foi utilizado outro modelo, o SOLAR2000 (TOBISKA *et al.*, 2000) para completar a radiação ionizante da Região E.

2.2.2.2 Atmosfera neutra

As concentrações dos constituintes neutros (He , O , N_2 , O_2 , Ar , H e N) e a temperatura do gás neutro são obtidos pelo NRLMSIS-00 (PICONE *et al.*, 2002), enquanto que o óxido nítrico (NO) é calculado pela relação empírica dada por (MITRA, 1968).

$$N(NO) = 0,4 \exp\left(\frac{-3700}{T_n}\right) N(O_2) + 5,0 \cdot 10^{-7} N(O). \quad (2.20)$$

2.2.2.3 Vento Neutro

O vento neutro que atua em um meridiano magnético controla a altura da camada F e causa a assimetria do plasma alinhado ao campo magnético. O modelo SUPIM utiliza o HWM93 *thermosphere wind model* (HEDIN *et al.*, 1995) e algumas versões modificadas do mesmo. Os valores são calculados por meio de uma formulação empírica obtida de medidas observacionais.

2.2.2.4 Deriva $\vec{E} \times \vec{B}$

As velocidades de deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$ noturnas e diurnas, possuem variações diárias com dependência nas estações do ano e ciclo solar (BAILEY et al., 1997). O modelo de deriva utilizado no SUPIM é um modelo empírico proposto por (SCHERLISS; FEJER, 1999), os quais, tomaram como base, dados de radar de Jicamarca e do satélite AE-E. O modelo considera variações na deriva vertical em hora local, longitude, estação do ano e ciclo solar

2.2.3 Parâmetros de saída

Os valores que o SUPIM fornece como saída são as concentrações e temperaturas dos elétrons e dos íons O^+ , He^+ , H^+ , N_2^+ , O_2^+ , N^+ e NO^+ em função do tempo, latitude e altitude, além do fluxo de plasma ao longo das linhas de campo geomagnético (BAILEY et al., 1997; SOUZA, 1997).

2.3 Séries de Fourier

As séries de Fourier recebem esse nome em homenagem a Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 - 1830), matemático e engenheiro francês, que contribuiu de forma significativa para o desenvolvimento e estudo das séries trigonométricas. O problema que motivou Fourier em seu trabalho foi desenvolver uma técnica matemática com a finalidade de resolver a equação de calor. Seus resultados iniciais foram publicados no artigo *Théorie analytique de la chaleur* em 1822, inserido, portanto, no contexto histórico da revolução industrial do século XIX. Mesmo nos dias atuais, a utilização das séries de Fourier em vários campos do conhecimento, como a Física, a engenharia e o processamento de sinais, tem um papel de grande destaque demonstrando ser um dos principais métodos de análise de sinais. Aplicada originalmente nos estudos de funções periódicas intrínsecas a fenômenos ondulatórios, como som e luz, suas generalizações se aplicam em situações mais gerais como a análise em frequência e tempo, anteriores as teorias mais atuais como análise de wavelets e análise trigonométricas locais.

2.3.1 Definição

As séries de Fourier se baseiam no fato de que uma função arbitrária poder ser representada por um somatório de funções ortogonais periódicas, senos e cossenos, cujas fases e amplitudes são ajustadas convenientemente. Ou seja, é uma superposição de funções formadas por senos e cossenos de fase e amplitudes variáveis.

Para entender melhor o conceito vamos definir uma função contínua no intervalo $[-L, L]$ e fora desse intervalo por $f(x + 2L) = f(x)$, ou seja, suponhamos que $f(x)$ é periódica com um período de $2L$. A série de Fourier, ou desenvolvimento de Fourier, de $f(x)$ fica então definida como (SPIEGEL, 1976):

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cos \frac{n\pi x}{L} + B_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right); \quad (2.21)$$

onde A_n e B_n são conhecidos como coeficientes de Fourier, e são determinados por:

$$A_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx \quad \text{e} \quad B_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx, \quad (2.22)$$

para valores de $n = 1, 2, 3, \dots$

O termo constante A_0 em 2.21, é igual a:

$$\frac{A_0}{2} = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f(x) dx, \quad (2.23)$$

e é identificado como sendo a média de $f(x)$ sobre o período considerado.

A reconstrução de $f(x)$ será tão mais exata quanto mais valores para n , ou harmônicos, sejam considerados na aplicação da Equação 2.21. Podemos ver um exemplo de reconstrução para alguns valores de n na Figura 2.6, onde temos uma onda periódica quadrada reconstruída com valores de $n = 1, 3, 5$ e 7.

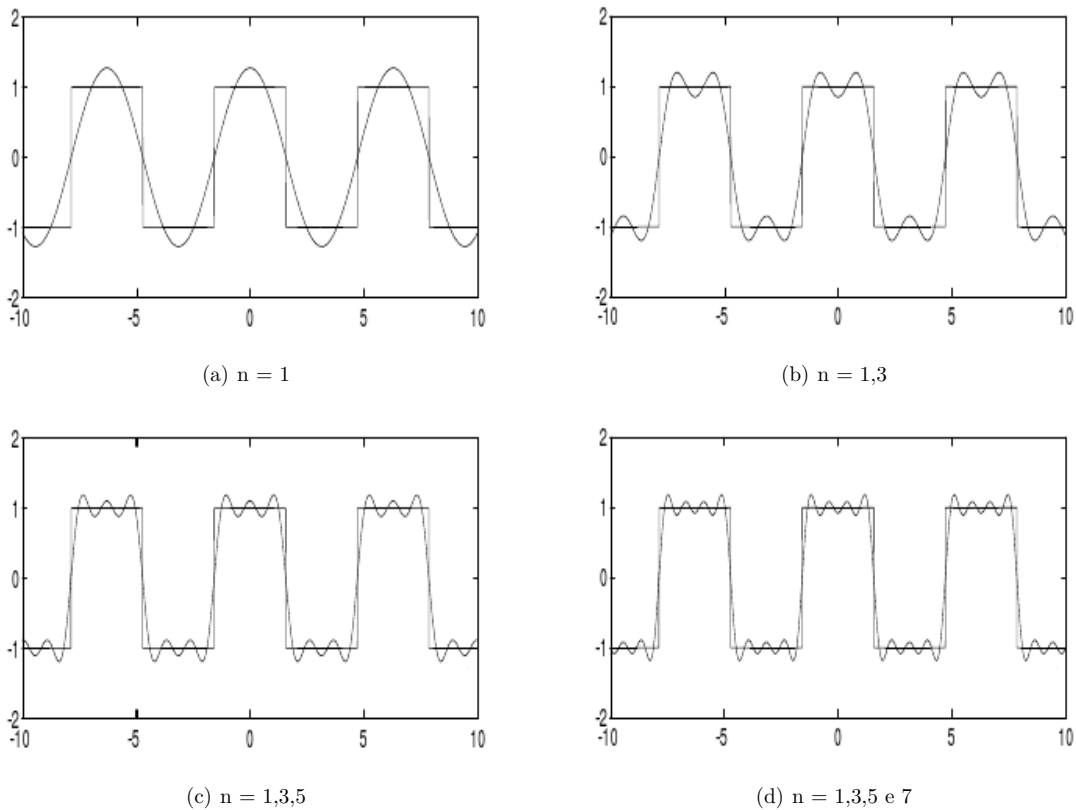


Figura 2.6 - Reconstrução de uma onda periódica quadrada para os harmônicos (a) $n = 1$, (b) $n = 1, 3$ (c) $n = 1, 3, 5$ e (d) $n = 1, 3, 5$ e 7.

2.3.1.1 Condições de convergência de Dirichlet

A Equação 2.21, como podemos notar, é uma série que corresponde à $f(x)$. Não sabemos, por enquanto, se a série que representa a função converge, ou se, em caso afirmativo, se tal série converge para $f(x)$. Apesar de toda a contribuição de Fourier, os estudos de convergência das séries de Fourier, foi estudado por *Dirichlet*, que formulou as condições de convergência das séries de Fourier. Segundo Spiegel (1976), as condições de convergência de *Dirichlet* são as seguintes:

- i) $f(x)$ seja definida, com exceção de um número finito de pontos de $(-L, L)$;
- ii) $f(x)$ seja periódica com um período $2L$;
- iii) $f(x)$ e sua derivada de 1ª ordem sejam seccionalmente contínuas no intervalo $(-L, L)$. Então a equação 2.21 onde os coeficientes são determinados pelas equações 2.22 convergem para:
 - (a) $f(x)$ se x é ponto de continuidade
 - (b) $\frac{f(x+0)+f(x-0)}{2}$ se x é ponto de descontinuidade.

As condições (i), (ii) e (iii), são consideradas suficientes, mas não necessárias, isto é, se elas são satisfeitas, a convergência está garantida. Contudo, se não, a série em 2.21 poderá, ou não, convergir. Em geral essas condições são satisfeitas em problemas que surgem nas ciências, ou mesmo na engenharia.

2.3.2 Serie de Fourier finita

A técnica das séries de Fourier não se aplicam apenas em funções contínuas, como já exposto em seções anteriores. Em verdade, boa parte da aplicabilidade é feita para séries temporais discretas, no que diz respeito a utilização da técnica como uma ferramenta de aplicabilidade em estudos práticos em análises de sinais.

Para o melhor entendimento, vamos considerar uma série temporal composta de N valores discretos, cada valor seja indexado por $S_r(S_1, S_2, S_3, \dots, S_N)$ recebendo um índice que o identifique, e que obedeçam as condições de Dirichlet. Para isso, consideremos a série temporal como parte de um sinal contínuo $S(t)$ de duração T onde os valores discretos estejam igualmente espaçados, sendo o intervalo entre eles igual a Δ , o que resulta em $N = T/\Delta$ valores para S_r , onde $S_r = S(t = r\Delta)$. De forma conveniente assumimos que N seja par e representado por $2n$, onde o índice r assumira novos valores distribuídos de $-n, \dots, 0, 1, \dots, n-1$. Podemos definir uma série de Fourier para a função $S(t)$ reescrevendo a Equação 2.21. Portanto, a equação fica

$$S(t) = A_0 + 2 \sum_{m=1}^{n-1} [A_m \text{Cos}(2\pi m f_1 t) + B_m \text{Sen}(2\pi m f_1 t)] + A_n \text{Cos}(2\pi n f_1 t) \quad (2.24)$$

é composta de N constantes, A_m e B_m , definidas de forma que os valores da função contínua $S(t)$ coincidam com os valores discretos da série temporal (S_r), nos pontos em que $t = r\Delta$. Ou seja, a função $S(t)$, definida em um intervalo $-T/2 \leq t < T/2$, representada pelas série de Fourier, é uma aproximação contínua da série temporal discreta S_r .

O termo f_1 em 2.24, é conhecido como freqüência fundamental de $S(t)$, e corresponde ao inverso do período da série temporal considerada, ou seja $f_1 = 1/N\Delta$. Portanto, a função $S(t)$ é um somatório de funções senos e cossenos cujas freqüências são múltiplos, ou harmônicos da freqüência fundamental (f_1) (JENKINS; WATTS, 1968).

As equações que representam os coeficientes de Fourier A_m e B_m são modificações das Equações 2.22, pelo fato de serem determinadas pelos valores da série temporal S_r . Desta forma as equações ficam como

$$A_m = \frac{1}{N} \sum_{r=-n}^{n-1} S_r \text{Cos} \frac{2\pi m r}{N} \quad \text{e} \quad B_m = \frac{1}{N} \sum_{r=-n}^{n-1} S_r \text{Sen} \frac{2\pi m r}{N}, \quad (2.25)$$

para valores de $m = 1, 2, 3, \dots, n$. O termo A_0 , agora é a média dos valores de S_r . Quando o número da amostra (N) é ímpar, ou $2n - 1$, o termo A_n não é considerado na Equação 2.24.

Assim como já visto nas séries de Fourier contínuas, a função $S(t)$ se aproximará dos valores de S_r tanto quanto queiramos, basta para isso considerar todos os harmônicos. Contudo, muitas vezes na prática, isso representa um problema. Basta que o número de valores da série temporal seja um número muito elevado. Felizmente, uma excelente representação pode ser feita sem considerar todos os harmônicos. Para determinarmos quais devem ser os harmônicos a serem utilizados para representar a função, vamos considerar o valor quadrático médio

$$\frac{1}{N} \sum_{r=-n}^{n-1} S_r^2. \quad (2.26)$$

Fazendo uso da equação 2.24, podemos verificar que:

$$\frac{1}{N} \sum_{r=-n}^{n-1} S_r^2 = R_0^2 + 2 \sum_{r=-n}^{n-1} R_m^2 + R_n^2. \quad (2.27)$$

Onde, $R_0 = A_0$, $R_n = A_n$ e

$$R_m = \sqrt{A_m^2 + B_m^2}. \quad (2.28)$$

Podemos notar da Equação 2.27, que o valor quadrático médio, ou potência média dissipada por S_r , pode ser decomposto em contribuições provenientes de cada harmônico. A expressão 2.28 é conhecida como a amplitude do harmônico. Apenas os valores em que a amplitude do harmônico é não nula contribuirão para a reconstrução do sinal. Um gráfico $R_m^2 \times m$ (harmônico) é conhecido como *espectro de potência*, ou *linha espectral de Fourier*.

3 O MODELO PARIM

A modelagem ionosférica construída a partir de modelos físicos sofisticados tem mostrado eficiência em descrever o comportamento da ionosfera, bem como a maioria dos fenômenos a ela associados. Contudo, tais modelos utilizam uma carga matemática computacional considerável. Apesar da evolução tecnológica alcançada nos dias atuais (máquinas cada vez mais rápidas e com maior capacidade em processamento e armazenamento de dados), tais modelos consomem um razoável tempo computacional e espaço em memória. O modelo PARIM é um modelo parametrizado construído com as séries de Fourier finitas, e tem como objetivo obter valores de frequência de plasma sobre o setor brasileiro com dependência em fluxo solar decimétrico (F10.7), latitude, altitude, e tempo (hora local e dia do ano). Uma vez tendo a distribuição vertical da frequência de plasma, pode-se calcular a concentração de elétrons (Equação 3.1), conseqüentemente, por meio de sua integração em altitude, obtém-se TEC (*Total Electron Content*). A principal vantagem do PARIM é fornecer uma resposta rápida, ou seja quase em tempo real, porém, com resultados semelhantes àqueles obtidos pelos modelos físicos. O modelo apresenta as seguintes limitações:

- 1) Cobertura latitudinal (magnética) na faixa de $-22,0^\circ$ a $22,0^\circ$;
- 2) Faixa de Altitude: entre 95 e 1160 km;
- 3) Faixa de longitude geográfica: hora local convertida em longitude geográfica;
- 4) Hora local: cobertura total;
- 5) Fluxo solar até o valor de $F107 = 180$ (em unidades de $10^{-22} W m^{-2} Hz^{-1}$);
- 6) Condições geomagnéticas: válido para períodos geomagneticamente calmo.

3.1 Metodologia

3.1.1 Preparação dos dados

A primeira etapa na construção do PARIM foi a escolha de um modelo ionosférico físico adequado, no qual deveríamos obter valores para compor um banco de dados inicial necessário para a construção dos parâmetros que serviriam para o modelo PARIM. O modelo escolhido foi o SUPIM por apresentar resultados bastantes satisfatórios na tarefa de descrever a ionosfera bem como fenômenos eletrodinâmicos envolvidos (BAILEY et al., 1997) principalmente sobre a região brasileira, que é a região de interesse nesse estudo. Antes, porém, de executar o modelo SUPIM, devemos determinar as condições nas quais vamos construir o modelo PARIM. Inicialmente, queremos um modelo capaz de descrever o comportamento da ionosfera sob condições específicas determinadas por parâmetros geofísicos importantes. Portanto, foram considerados períodos de atividade geomagnética calma ($A_p \cong 4$). Uma outra condição associada a ionosfera de grande importância é a sua dependência com fluxo solar.

A resolução temporal desejada, para o modelo PARIM, é de 15 minutos em um ano inteiro, o que nos dá, considerando um ano bissexto, 366 dias vezes 96 valores de tempo (35136 pontos amostrais). Para obter os parâmetros com tal resolução, foram calculados valores de frequência de plasma para o dia 15 de cada mês ao longo do ano. Para calcular como cada valor de f_p varia ao longo de cada dia do ano, efetuamos uma interpolação com séries de Fourier, onde os pontos de controle foram os doze valores da hora local de cada mês. Após a interpolação obtemos 366 valores de cada hora local. Dessa forma, construímos o banco de dados utilizado no cálculo dos parâmetros do modelo PARIM, que são valores de frequência de plasma segundo a Equação 3.1 apresentada abaixo.

$$f_p(l, t, h) = \sqrt{80,6 \times 10^{-6} N_e(l, h, t)}. \quad (3.1)$$

Onde l é a latitudemagnética, t é o tempo, h é a altitude e N_e é a concentração de elétrons.

Vários parâmetros ionosféricos apresentam uma dependência linear com valores de

fluxo decimétrico solar (F10.7 cm) até aproximadamente o valor de 200 (BALAN et al., 1994; BATISTA et al., 1994; SOUZA et al., 2003; FEJER et al., 2005), onde apresentam uma variação mais acentuada, e tendem a saturar após este nível, ou apresentam uma dependência linear com menor variação. A explicação está no fato de que a radiação ionizante apresenta a mesma tendência. Conforme pode ser observado na figura 3.1.

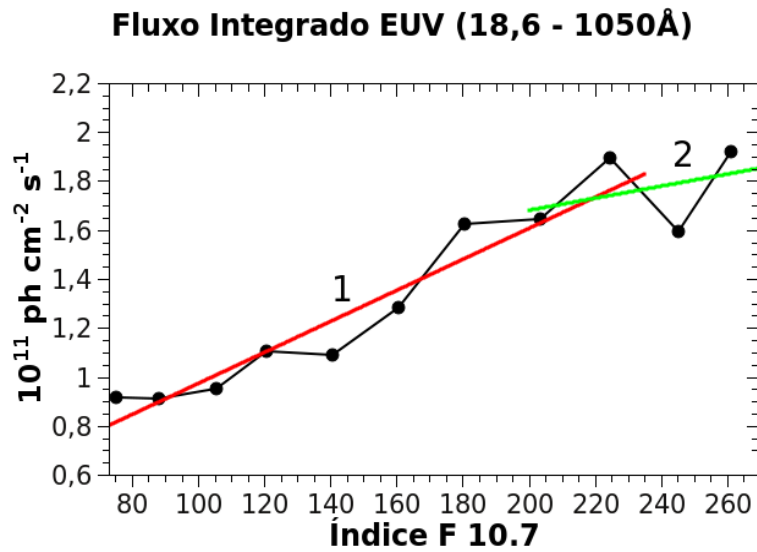


Figura 3.1 - Fluxo solar extremo ultravioleta integrado em função do índice F10.7 calculado pelo modelo Solar2000.

Considerando esta dependência com F10.7, o cálculo dos valores de frequência de plasma foram efetuados para dois níveis de fluxo solar (F10.7 = 90.0 e F10.7 = 180.0), ou seja, dentro da primeira faixa de fluxo solar, antes do limite de F10.7 = 200. A partir disso, obtemos os parâmetros referentes a esse comportamento linear que são: coeficiente angular $\alpha(l, t, h)$ e o termo independente $\beta(l, t, h)$ de forma que

$$f_p(l, t, h) = \alpha(l, t, h)F10.7 + \beta(l, t, h), \quad (3.2)$$

O modelo PARIM é construído com a utilização dos valores de $\alpha(l, t, h)$ e $\beta(l, t, h)$ e as séries de Fourier. Portanto, essa versão do PARIM é representativa para a primeira faixa de fluxo solar ($F10.7 \leq 200$).

3.1.2 Construção do modelo PARIM

O modelo PARIM calcula valores de frequência de plasma por meio da Equação 3.2. O comportamento de $\alpha(l, t, h)$ e $\beta(l, t, h)$ em latitude magnética, tempo e altitude, são calculados pela aplicação das séries de Fourier, onde, os coeficientes das séries são os coeficientes de Fourier obtidos de $\alpha(l, t, h)$ e $\beta(l, t, h)$. Antes de calcular os coeficientes precisamos garantir que $\alpha(l, t, h)$ e $\beta(l, t, h)$, em suas três dependências, obedeçam as condições de convergência de Dirichlet, fundamentais para se utilizar a técnica das séries de Fourier finitas. A principal preocupação é garantir a periodicidade de $\alpha(l, t, h)$ e $\beta(l, t, h)$. Esta periodicidade já é apresentada pela dependência temporal. A periodicidade das outras dependências (latitude magnética e altitude) garantimos efetuando uma expansão analítica em $\alpha(l, h)$ e $\beta(l, h)$. A seguir é mostrado o procedimento para o cálculo dos coeficientes de Fourier para α e β :

1) Para determinar a forma como $\alpha(l, t, h)$ varia na dependência latitudinal, calculamos os coeficientes de Fourier $A_m(t, h)$ e $B_m(t, h)$, onde

$$A_m(t, h) = \frac{1}{N_1} \sum_{i=-nl}^{nl} \alpha(l_i, t, h) \text{Cos} \left(\frac{2\pi i}{N_1} \right) \quad \text{e}$$
$$B_m(t, h) = \frac{1}{N_1} \sum_{i=-nl}^{nl} \alpha(l_i, t, h) \text{Sen} \left(\frac{2\pi i}{N_1} \right). \quad (3.3)$$

Nas equações acima $m = 0, 1, \dots, nl$, N_1 corresponde ao número de valores de latitude magnética obtidos com o SUPIM, ou pontos de controle, e o valor de $nl = N_1/2$. O índice m é o número de harmônicos da frequência fundamental da variação em latitude.

2) Aplicamos a técnica das séries de Fourier sobre os coeficiente $A_m(t, h)$ e $B_m(t, h)$ para obter novos coeficientes que reproduzem a variação temporal em um ano inteiro. Os novos coeficientes, portanto, são:

$$A_{m,n}(h) = \frac{1}{N_2} \sum_{j=-nt}^{nt} A_m(t_j, h) \text{Cos} \left(\frac{2\pi j}{N_2} \right) \quad \text{e}$$

$$B_{m,n}(h) = \frac{1}{N_2} \sum_{j=-nt}^{nt} B_m(t_j, h) \text{Sen} \left(\frac{2\pi j}{N_2} \right), \quad (3.4)$$

onde $n = 0, 1, \dots, nt$, N_2 corresponde ao número de valores da coordenada temporal obtidos pelo SUPIM e $nt = N_2/2$. O índice n corresponde ao número de harmônicos da frequência fundamental para a variação temporal dos coeficientes de Fourier $A_m(t, h)$ e $B_m(t, h)$ variando discretamente de 0 a nt .

3) Para reproduzir o comportamento em altitude dos coeficientes $A_{m,n}(h)$ e $B_{m,n}(h)$, calculamos os coeficientes de Fourier tal qual os procedimentos anteriores. Os novos coeficientes são:

$$A_{m,n,p} = \frac{1}{N_3} \sum_{k=-nh}^{nh} A_{m,n}(h_k) \text{Cos} \left(\frac{2\pi k}{N_3} \right) \quad \text{e} \quad (3.5)$$

$$B_{m,n,p} = \frac{1}{N_3} \sum_{k=-nh}^{nh} B_{m,n}(h_k) \text{Sen} \left(\frac{2\pi k}{N_3} \right). \quad (3.6)$$

Onde, N_3 corresponde ao número de valores da coordenada em altitude, nh é equivalente a $N_3/2$, e o índice p corresponde ao número de harmônicos da frequência fundamental para a variação em altitude dos coeficientes de Fourier $A_{m,n}(h)$ e $B_{m,n}(h)$ variando discretamente de 0 a nh .

Para reconstruir os valores de $\alpha(l, t, h)$ utilizamos os coeficientes $A_{m,n,p}$ e $B_{m,n,p}$ para reproduzir a distribuição em altitude dos coeficientes $A_{m,n}$ e $B_{m,n}$ que por sua vez são utilizados na reconstrução da distribuição temporal de A_m e B_m . Dessa forma, podemos reconstruir o parâmetro $\alpha(l, t, h)$ com a expressão:

$$\alpha(l, t, h) = A_0(t, h) + 2 \left(\sum_{m=1}^{nl-1} A_m(t, h) \text{Cos}(2\pi f m \Delta) + \sum_{m=1}^{nl-1} B_m(t, h) \text{Sen}(2\pi f m \Delta) \right). \quad (3.7)$$

Nessa expressão $f = 1/N_1 \Delta$ onde Δ é o intervalo em latitude.

O mesmo procedimento é efetuado para a obtenção dos valores de $\beta(l, t, h)$, e com isso podemos obter os valores de frequência de plasma com dependência em F10.7, latitude magnética, hora local e altitude apenas guardando os coeficientes de Fourier $A_{m,n,p}$ e $B_{m,n,p}$. Como os valores do SUPIM foram calculados sobre a longitude de Cachimbo, e a faixa de longitude que contém o Brasil possui uma declinação entre $3, 18^\circ$ e $22, 78^\circ$ para oeste, nesta versão do PARIM, consideramos como se o setor longitudinal brasileiro possuísse a declinação magnética de Cachibo, que é de $16, 61^\circ$ para oeste. Dessa forma, a dependência com a longitude geográfica é obtida fazendo uma transformação de hora local para longitude geográfica.

Os resultados obtidos do PARIM, podem ser tão próximos dos dados de entrada (calculados com o SUPIM) quanto se queira. Se na Equação 3.7 fossem considerados todos os harmônicos, os valores calculados pelo SUPIM seriam exatamente reproduzidos. Na prática, não é preciso considerar todos os harmônicos, basta fazer uma escolha criteriosa de quais seriam os harmônicos mais importantes para reconstruir os valores dos coeficientes de Fourier, e por conseqüência dos valores de f_p . O critério de escolha de quais harmônicos serão considerados na Equação 3.7 é feita por meio da análise do espectro de potência dos harmônicos, que assinala a importância do harmônico na reconstrução, onde, foram escolhidos aqueles não nulos e de maiores valores nas amplitudes (Equação 2.28).

A ionosfera terrestre é composta de regiões diferentes, distribuídas aproximadamente em altitude. Cada região da ionosfera, possui propriedades diferentes, seja na formação, comportamento, ao longo dia, estações do ano e ciclo solar. Isto se deve ao

fato de cada região apresentar uma dinâmica diferente. Considerando estes fatos, a construção dos coeficientes de Fourier foi dividida em três faixas de altitude: a primeira faixa compreendida de 95 à 180 km, corresponde a região E e a base da região F; a segunda faixa, de 185 à 700 km, compreende a região F e; a terceira faixa compreendida de 700 à 1160 km, que corresponde ao topo da região F e base da protonosfera. Esta escolha fez com que o número de harmônicos escolhidos para cada dependência dos coeficientes α e β fosse diferente para cada região da ionosfera. A Tabela 3.1 mostra o número de harmônicos relevantes para cada região da ionosfera.

Tabela 3.1 - Número de harmônicos relevantes utilizados para construir os coeficientes de Fourier.

Regiões da ionosfera	Número de harmônicos relevantes					
	$\alpha(l, t, h)$			$\beta(l, t, h)$		
	latitude	tempo	altitude	latitude	tempo	altitude
Região E e base da F	5	56	12	5	52	12
Região F	25	125	30	25	112	25
Topo da região F	12	63	12	12	65	12

Como podemos perceber, o número de harmônicos considerados é diferente nas três regiões da ionosfera. Note que o número de harmônicos considerados na região F em geral são maiores nas três dependências em relação as outras duas regiões, tanto para os coeficientes $\alpha(l, t, h)$ como para os coeficientes $\beta(l, t, h)$. Isso se deve ao fato de que a região F apresente uma maior complexidade intrínseca à sua dinâmica, o que faz com que as funções representadas pelas séries de Fourier necessitem de um número maior de harmônicos representativos. Percebe-se também que o número de harmônicos para a dependência temporal é maior dentre eles. Isto se deve ao fato de que entre as três dependências a dependência temporal apresenta maior variação. Uma outra característica a se destacar sobre os harmônicos referentes a dependência temporal é o número ao qual corresponde o harmônico. A Figura 3.2 mostra o espectro de potência dos harmônicos, para a reconstrução da dependência temporal das regiões: E e base da F, F e topo da região F da ionosfera, respectivamente. Observe que são múltiplos de 366 (ou frequência fundamental), o que já é esperado uma vez que o harmônico está relacionado às periodicidades inerentes aos dados de entrada.

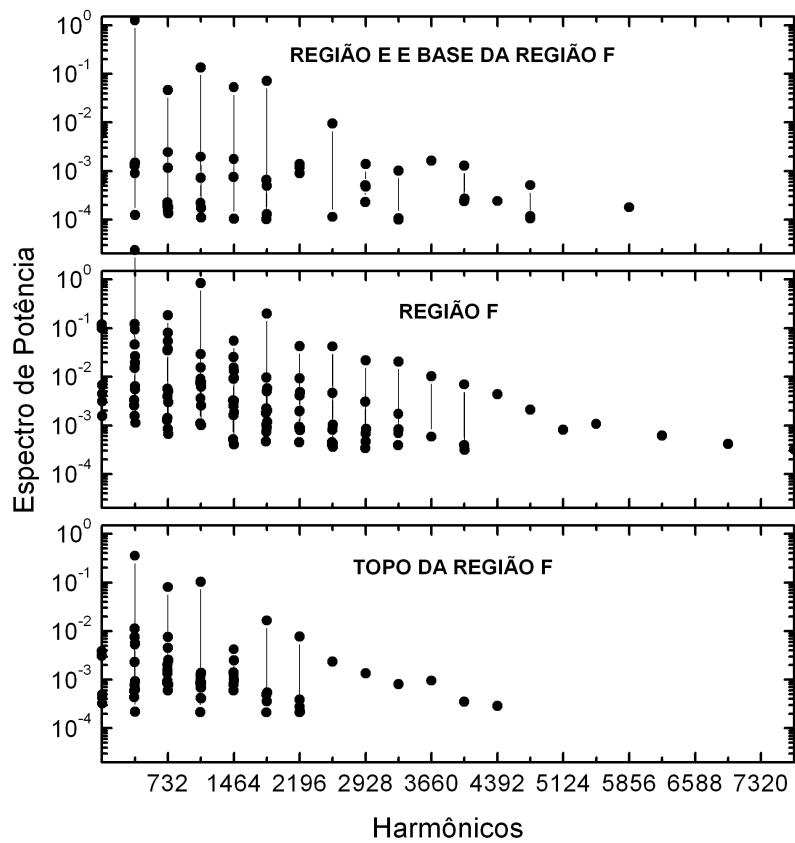


Figura 3.2 - Espectro de potência dos harmônicos da dependência temporal ao longo de um ano.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresentaremos alguns resultados provenientes do modelo PARIM discutindo alguns parâmetros importantes e fazendo uma análise comparativa com os modelos representativo SUPIM (teórico), IRI (climatológico empírico), e dados observacionais adquiridos por medições efetuadas durante a realização da campanha COPEX no ano de 2002, onde foram efetuadas medidas de frequência crítica de plasma nas regiões de Cachimbo ($9,5^\circ$ S, $54,8^\circ$ O e latitude magnética $-1,8^\circ$), localizada próximo ao equador magnético, e os pontos conjugados Boa Vista ($2,82^\circ$ N, $60,65^\circ$ O e latitude magnética 11°) e Campo Grande ($20,44^\circ$ S, $54,65^\circ$ O e latitude magnética -11°). Por fim, apresentaremos um mapa de frequência de pico da região F (foF2), como forma de destacar algumas características e potencialidades do modelo PARIM.

Os parâmetros de entrada do modelo PARIM, são: dia do ano (1 à 366), longitude geográfica, hora local e fluxo solar (índice F10.7 entre 66 e 180). Como parâmetros de saída obtemos valores de frequência de plasma ou densidade eletrônica resultantes da Equação 3.1. Para essa primeira versão do PARIM comparamos apenas dados simulados para o período do equinócio.

4.1 Comparação entre os modelos PARIM, SUPIM e IRI

Analisaremos a seguir alguns resultados comparativos entre o modelo teórico e climatológico empírico dado pelos modelos PARIM e IRI. Os resultados são provenientes de simulações efetuadas em períodos de equinócio durante fluxo solar mínimo, e moderadamente alto sobre o meridiano magnético que cruza a região de Cachimbo. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram contornos de frequência de plasma na região E e base da região F calculadas pelo SUPIM (1ª coluna), PARIM (2ª coluna) e IRI (3ª coluna) para as seguintes horas locais: 6:00 (1ª linha), 12:00 (2ª linha) e 20:00 (3ª linha) para solar mínimo e máximo ($F10.7 = 90$ e 180), respectivamente.

Em geral o que observamos é que os valores do SUPIM para a frequência de plasma em regiões de baixa latitude são muito bem reproduzidos pelos cálculos efetuados pelo PARIM em condições de solar mínimo e máximo. A frequência de plasma na região E, calculada pelo PARIM, apresenta uma assimetria em corte latitudinal, principalmente durante o período da manhã quando os valores de frequência de plasma, como podemos ver, mostram-se mais elevados no hemisfério sul. Como os

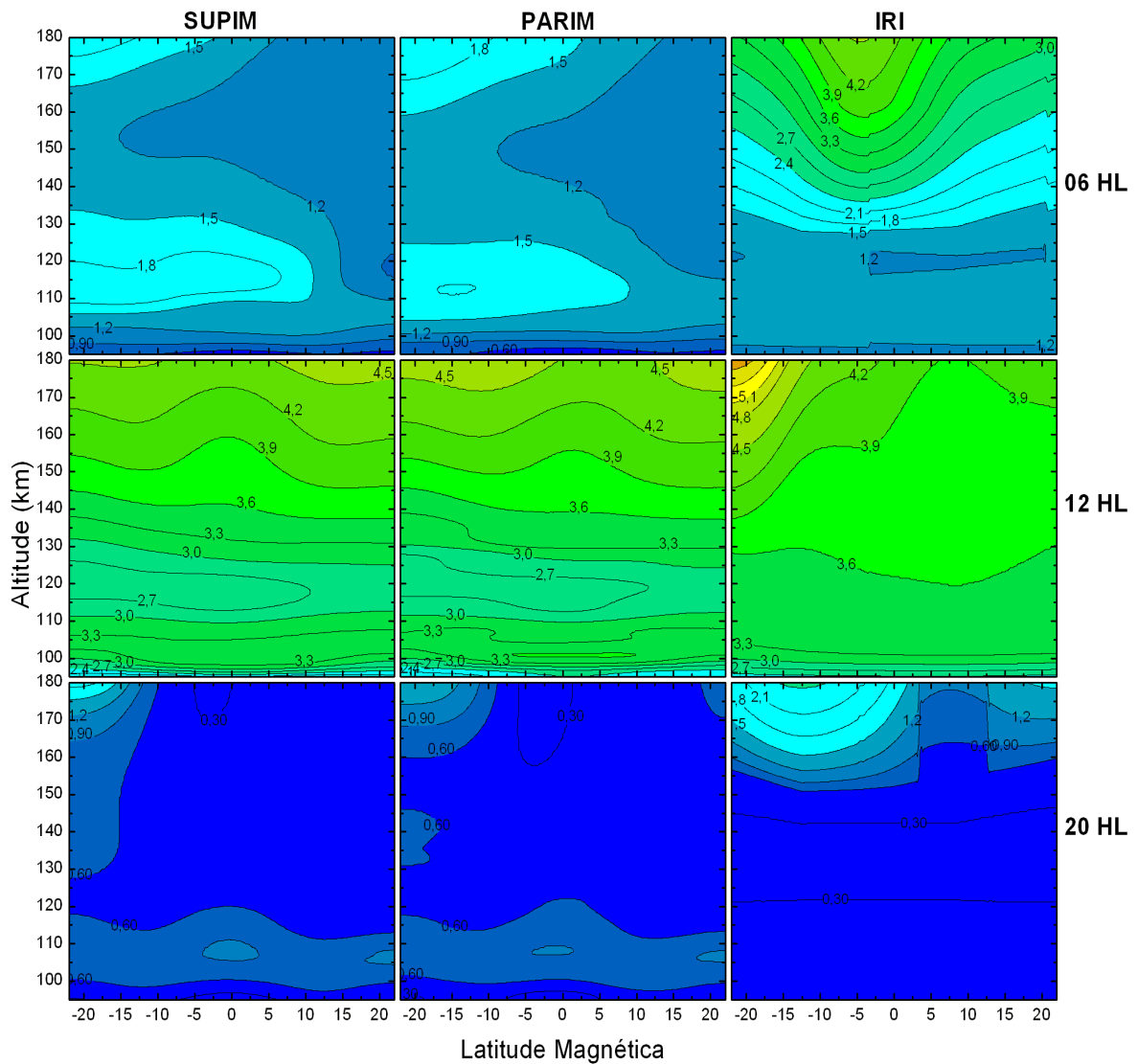


Figura 4.1 - Corte meridional do contorno da frequência de plasma da camada E e base da camada F calculados com o SUPIM, PARIM, e IRI em hora local para: 06:00, 12:00 e 20:00 durante períodos de equinócio e mínimo de fluxo solar ($F10.7 = 90$).

cálculos efetuados pelo modelo SUPIM foram realizados em coordenadas magnéticas e considerando que na região da baixa ionosfera a influência de efeitos dinâmicos é fraca em comparação com a fotoionização, e que a declinação nesta região é 20°S , tal assimetria é explicada pela fotoionização ao amanhecer iniciar primeiro no hemisfério sul do que no hemisfério norte. Os resultados calculados com o IRI para a região E e base da camada F apresentam discontinuidades durante períodos da manhã e à noite. A mudança mais abrupta e significativa é na base da camada F durante

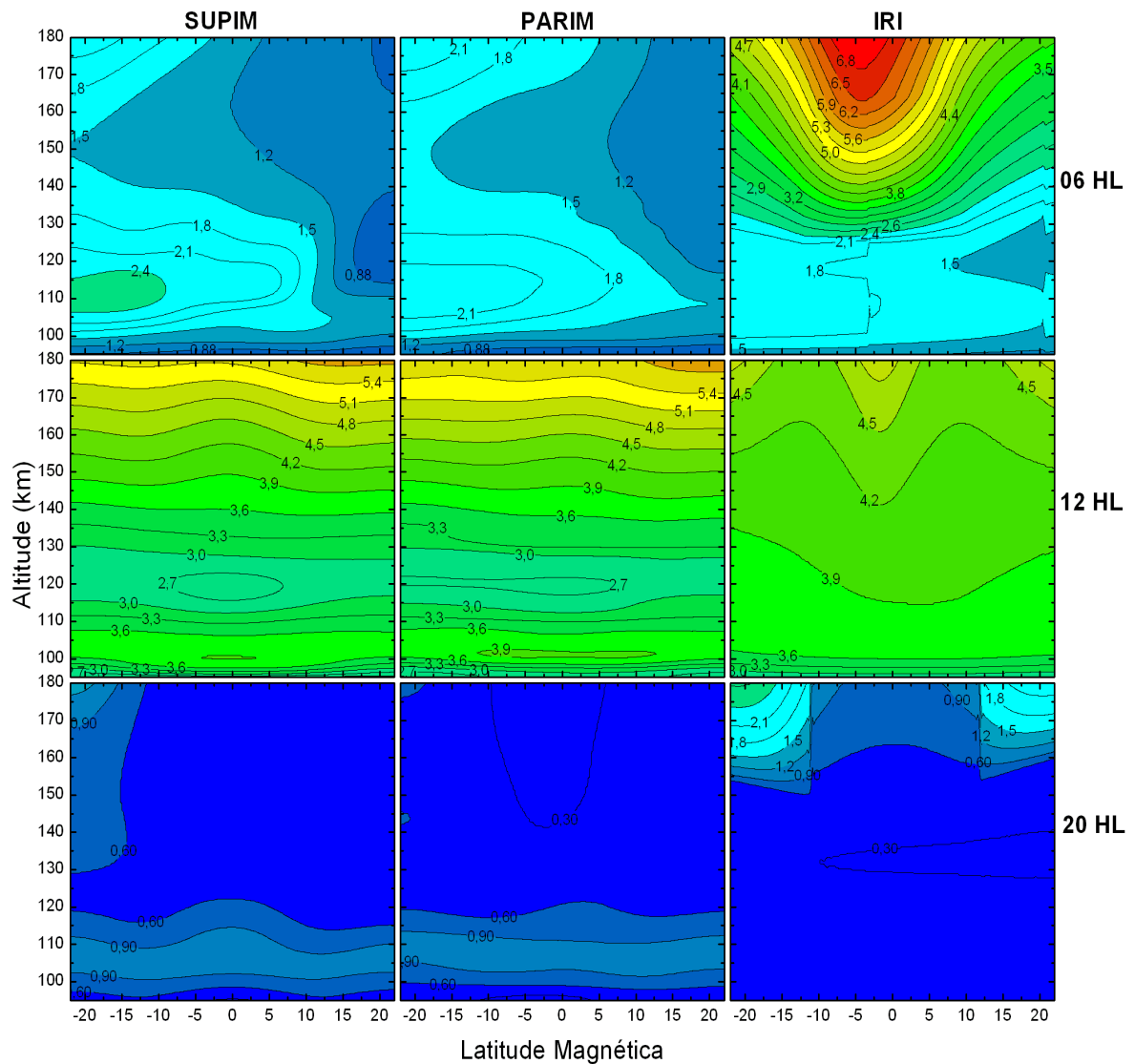


Figura 4.2 - Mesma que a figura 4.1, mas para condições de fluxo solar máximo ($F_{10.7} = 180$).

a noite. Reinisch e Huang (2006), conforme relatado por Bilitza (2006), também notaram tais discontinuidades na base da região F em valores de densidade eletrônica calculadas com o IRI. Os autores em questão, identificaram como causa de tais discontinuidades, uma mudança brusca na espessura da camada F1 modelada pelo IRI.

Os contornos de frequência de plasma da camada F e protonosfera (185 a 1160 km) calculados pelos três modelos: SUPIM, PARIM e IRI para 6:00, 12:00 e 20:00 em hora

local durante o equinócio para períodos de solar mínimo e máximo são apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4, respectivamente.

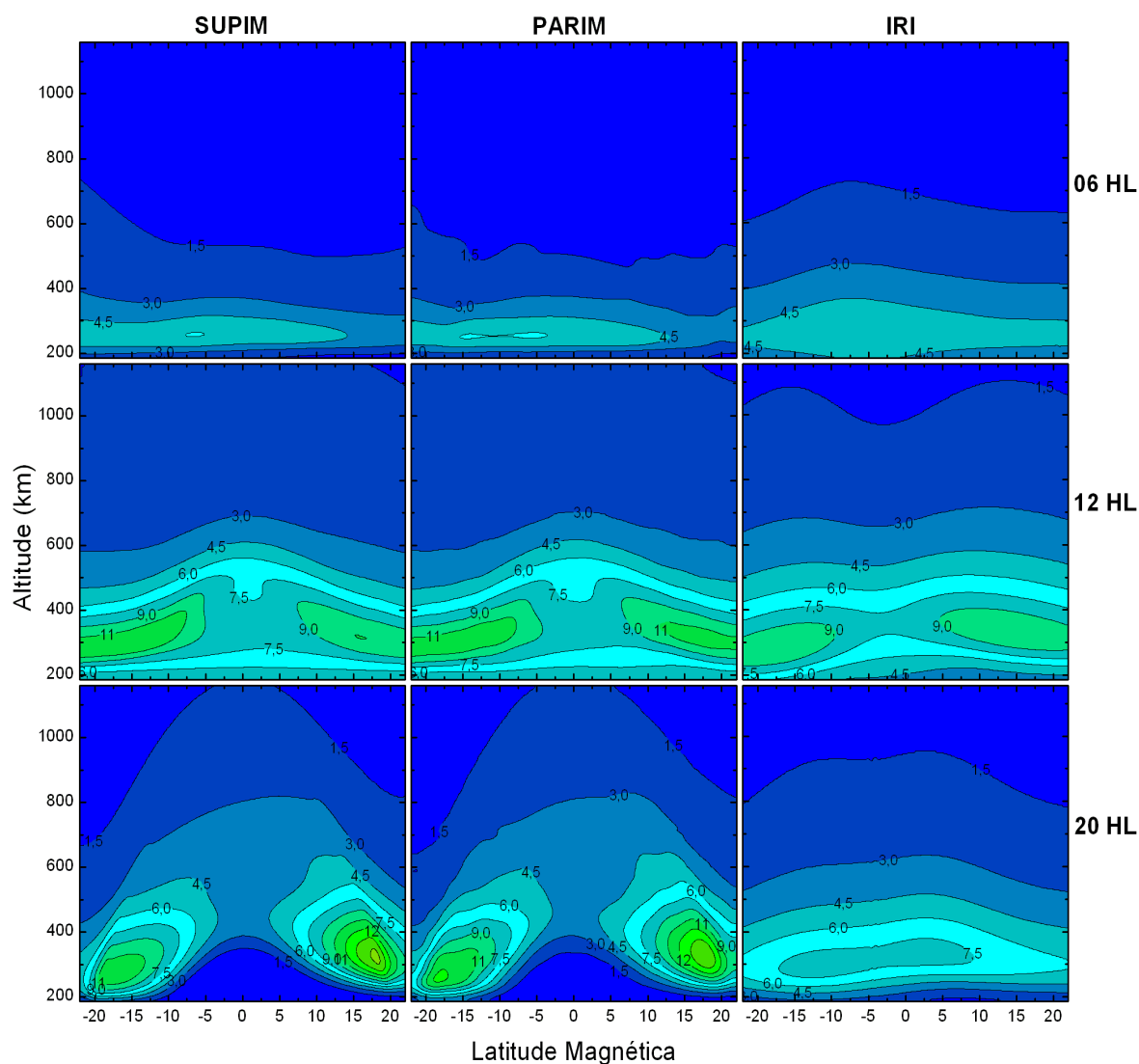


Figura 4.3 - Corte meridional do contorno da frequência de plasma da camada F e topo da camada F calculados com o SUPIM, PARIM, e IRI em hora local para: 06:00, 12:00 e 20:00 durante períodos de equinócio e mínimo de fluxo solar ($F_{10.7} = 90$).

Como podemos notar nos gráficos, o modelo PARIM, apresenta bons resultados (ver gráfico do meio), ou seja, os valores de frequência de plasma oriundos do SUPIM estão bem reproduzidos pelo PARIM. A exceção são alguns valores acima do pico da camada F que apresentam uma certa oscilação em comparação aos valores apre-

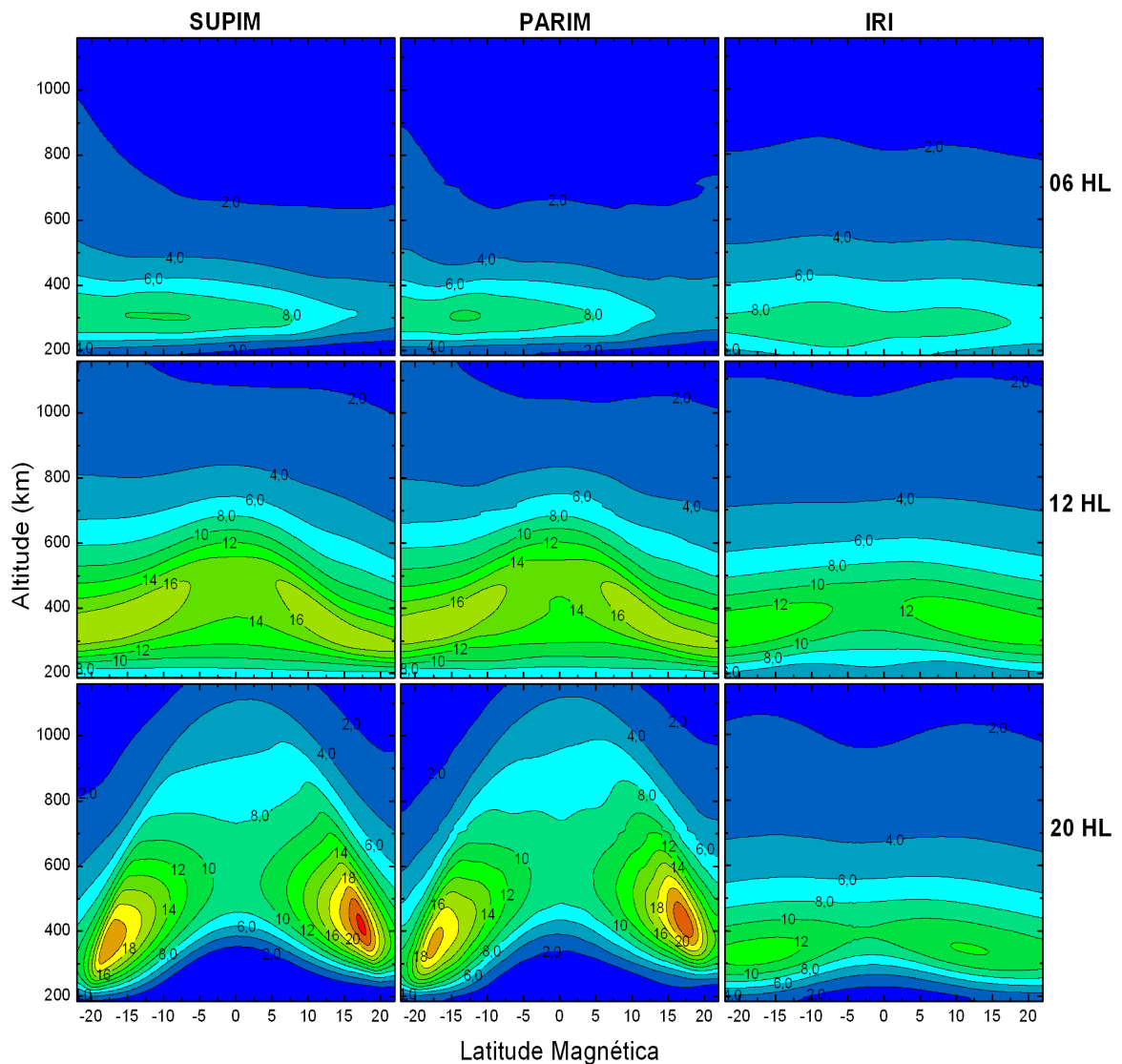


Figura 4.4 - Mesma que a figura 4.3, mas para condições de fluxo solar máximo ($F_{10.7} = 180$).

sentados pelo SUPIM durante o período da manhã. Observamos também que todos fenômenos presentes na ionosfera de baixa-latitude apresentados pelos resultados do SUPIM, como a presença, e evolução ao longo do dia da anomalia equatorial, estão bem representados nos resultados do PARIM. O modelo IRI, também mostra a presença da anomalia equatorial bem definida, porém com menor intensidade. No período noturno, devido a intensificação do efeito fonte, é possível notar nos resultados do SUPIM e PARIM uma distribuição de plasma quase alinhada com as linhas de campo geomagnético. Em contrapartida, tal efeito, que é consistente com a dinâ-

mica da ionosfera nessa região, não está presente nos resultados apresentados pelo IRI.

4.2 Comparação entre os modelos PARIM, IRI e dados da campanha COPEX

A campanha COPEX (*Conjugate Point Equatorial Experiment*), foi realizada durante os períodos de 1º de outubro à 9 de Dezembro de 2002, em três lugares: Cachimbo, próximos ao equador magnético, e os pontos conjugados magneticamente Boa Vista e Campo Grande. Durante este período foram efetuadas muitas medições com a utilização de vários aparelhos diferentes como: Digissonda, imagiadores all sky, monitoramento de cintilações e medições de conteúdo total eletrônico através do GPS, receptores de alta frequência (VHF), radares de alta frequência (HF) além de magnetômetros (BATISTA et al., 2008). Nesta seção apresentaremos uma comparação mais detalhada entre os modelos PARIM, IRI e dados obtidos durante a realização da campanha COPEX.

As Figuras 4.5 e 4.6 mostram valores observados e simulados pelo PARIM e IRI, de frequência crítica e altura do pico da camada E (foE e hmE) e da camada F (foF2 e hmF2), respectivamente. Os dados são representativos para períodos geomagnéticos calmos em condições de fluxo solar máximo (valor médio de F10.7 = 165,5) durante o equinócio, medidos simultaneamente por digissondas nas estações de Boa Vista, Cachimbo e Campo Grande (REINISCH et al., 2004; ABDU et al., 2004a; ABDU et al., 2009; SOBRAL et al., 2009). Os valores de foE calculados por ambos os modelos, PARIM (círculos abertos), IRI (linha contínua), mostram excelente concordância com dados de todas as estações durante o dia. Devido a processos de absorção, baixos valores de frequência crítica de plasma da região E, não pode ser registrado por digissonda, durante os períodos da noite e manhã. Ambos os valores de hmE, observados e calculados pelo PARIM apresentam mudanças bruscas próximo ao amanhecer e anoitecer, enquanto que a representação do modelo IRI mostra valores constantes de 110 km em todas as estações da campanha COPEX. Nas estações de Boa Vista e Campo Grande ao anoitecer os valores de hmE calculados pelo PARIM apresentam uma variação em sentido contrário aos dados referentes à campanha COPEX.

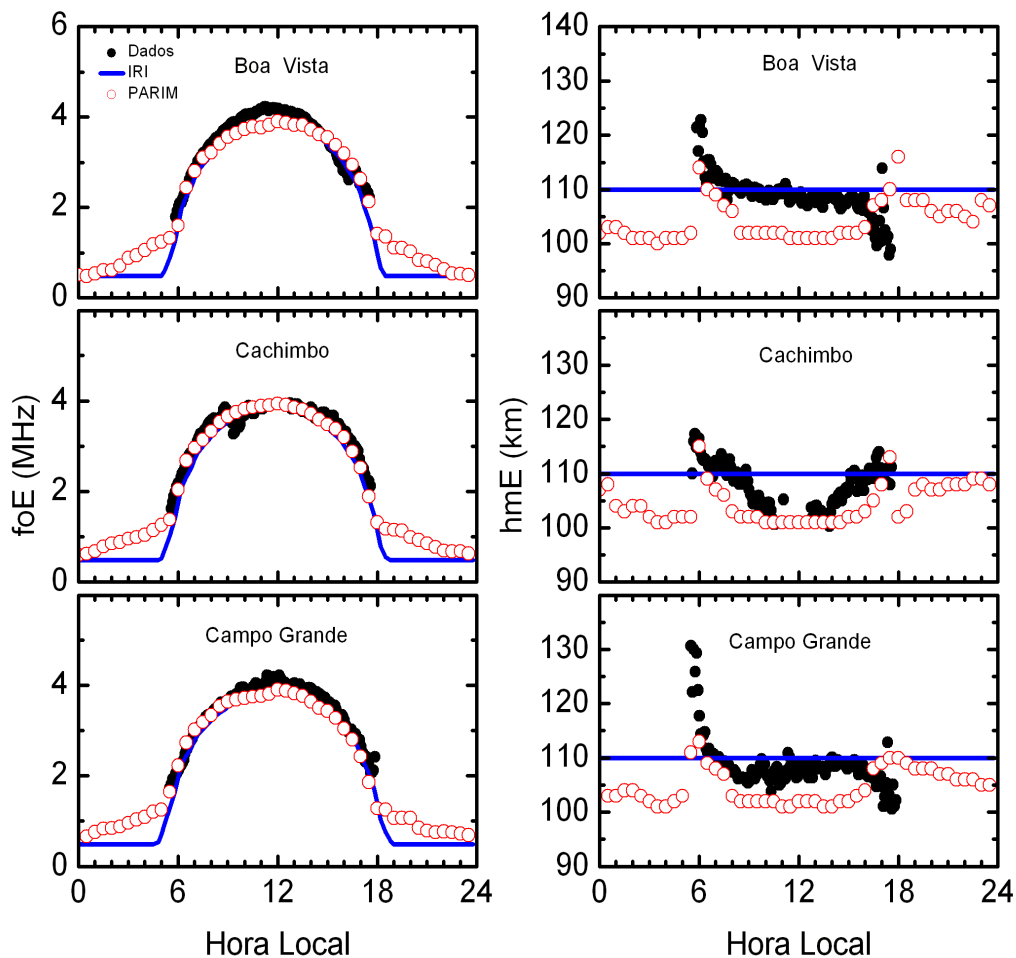


Figura 4.5 - Comparação de valores observados da frequência crítica da camada E (foE) e da altura do pico (hmE) sobre Boa Vista, Cachimbo e Campo Grande com valores calculados pelo IRI e PARIM

Os parâmetros da região F (foF2 e hmF2) calculados com o PARIM estão em boa concordância com os valores observados, mas podemos observar algumas exceções durante horas do dia sobre a estação de Boa Vista e Campo Grande, onde os valores modelados estão superestimados (ver Figura 4.6). O parâmetro hmF2 calculado pelo PARIM mostra uma incoerente descontinuidade, principalmente próximo do equador geomagnético (estação de Cachimbo) próximo ao meio dia, o qual corresponde a horário de ocorrência da camada F3. Isto indica que o PARIM precisa ser alterado para levar em consideração a influência da camada F3 sobre o formato da região F da ionosfera. O modelo IRI subestima os valores de foF2 sobre Boa Vista e Campo Grande, na maior parte do tempo entre 12:00 e 05:00 hora local. Os valores de

foF2 calculados pelo IRI sobre a estação de Cachimbo estão de acordo com os dados observados, exceto próximo ao meio dia. Os valores de hmF2 estão significativamente subestimados pelo IRI durante períodos do início da noite sobre as estações onde foi realizada a campanha COPEX, assim como mostrou [Abdu et al. \(2004b\)](#). Estas discrepâncias nos resultados do IRI sobre a região equatorial sobre o setor brasileiro também foram identificada por [Sobral et al. \(2003\)](#).

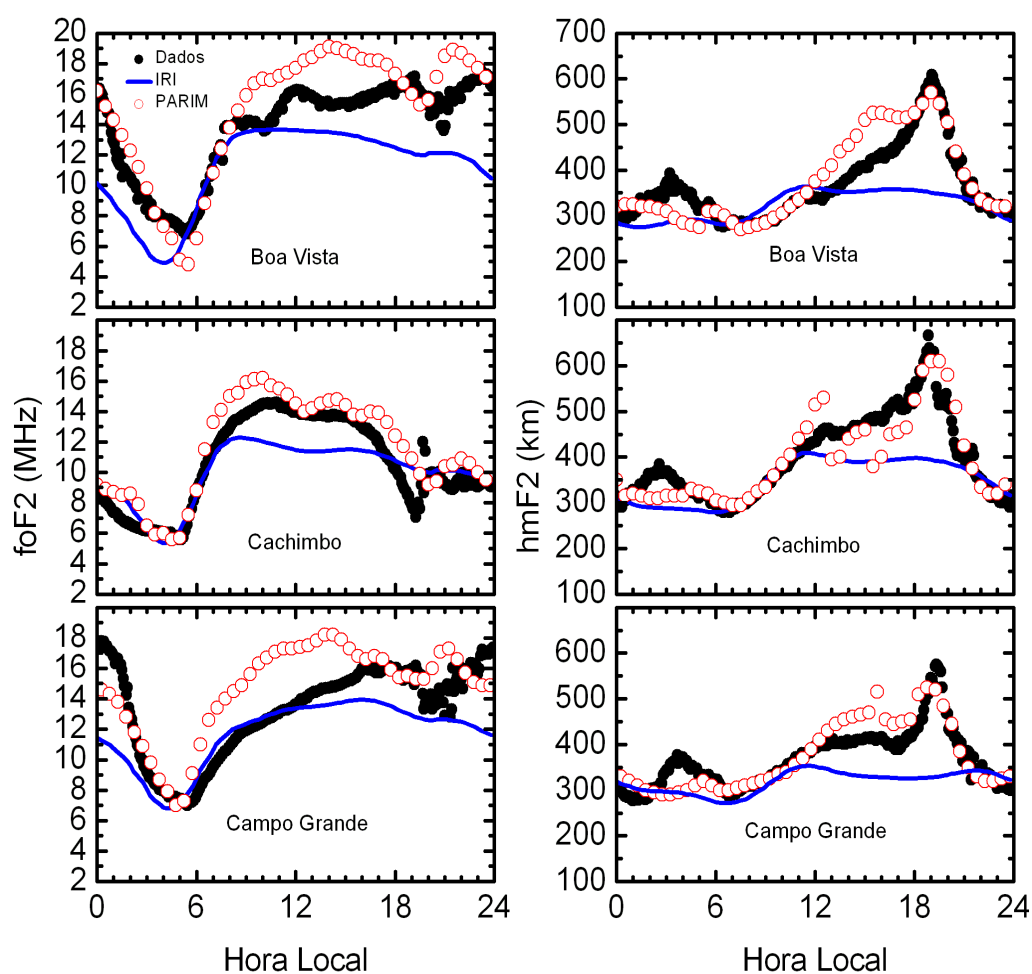


Figura 4.6 - Comparação de valores observados da frequência crítica da camada F (foF2) e da altura do pico (hmF2) sobre Boa Vista, Cachimbo e Campo Grande com valores calculados com o IRI e PARIM.

Na Figura 4.7 é mostrado uma comparação dos valores de TEC calculados pelo PARIM (círculos abertos) e valores de TEC absoluto durante a campanha COPEX (círculos fechados) para períodos de equinócio. O cálculo de TEC realizado pelo modelo PARIM, é feito pela integração em altitude dos valores de concentração de elétrons, considerando como altitude base 95 km e topo 1160 km. Observa-se que os valores de TEC calculados pelo PARIM durante o dia e início da noite (06:00 às 19:00) nas estações de Cachimbo e Campo Grande estão discrepantes e superestimados em comparação com os valores obtidos na campanha COPEX, acentuando-se a diferença é bastante acentuada às 16:00. Para a estação de Boa Vista, a divergência entre os valores começa ao meio dia, também acentuando-se às 16:00. No período noturno os valores calculados pelo PARIM apresentam uma boa concordância com os dados da campanha COPEX. Essas diferenças podem ser fruto da forma do perfil de densidade eletrônica em altitude e do valor de foF2 calculados pelo PARIM. De maneira geral, apesar de coerentes com o comportamento da ionosfera ao longo do dia, os valores de TEC calculados pelo PARIM estão discrepantes durante o dia em comparação com dados obtidos durante a campanha COPEX.

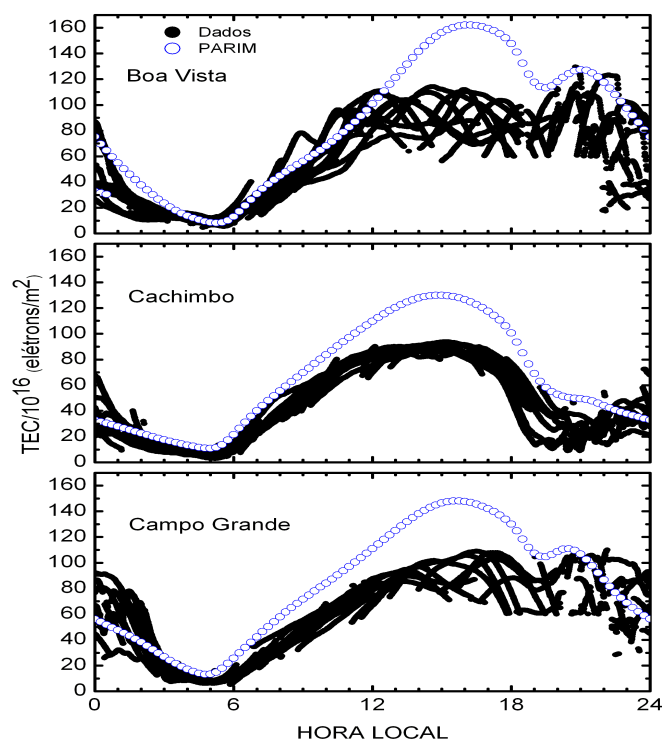


Figura 4.7 - Comparação de valores observados de TEC (*Total Electron Content*) durante a campanha COPEX com valores calculados com o PARIM.

4.3 Outras saídas do modelo PARIM

Um dos dados de saída bem ilustrativos que podemos mostrar são mapas, onde podemos ver como determinados parâmetros ionosféricos estão distribuídos espacialmente (geograficamente localizados). Atualmente tem sido de grande importância estudos envolvendo mapas de TEC. No entanto, pode-se obter mapas de outros parâmetros como o pico da frequência de plasma da camada E (foE) bem como altura do pico (hmE), valor máximo da frequência de plasma da região F (foF2) e a altura (hmF2). Dentre esses parâmetros mencionados, certamente um dos mais importantes, além do TEC, são valores de foF2.

O mapa de foF2 apresentado na Figura 4.8 foi calculado durante o período de equinócio de 2002 (período de realização da campanha COPEX), para às 18:00 hora local na estação de Cachimbo. Na figura é destacado a localização do equador magnético (linha contínua vermelha), as latitudes magnéticas conjugadas $+15^\circ$ e -15° (linhas tracejadas) além das estações de Cachimbo, Boa Vista e Campo Grande. As regiões do mapa que apresentam a cor azul escuro, correspondem a regiões onde não temos cobertura do PARIM, uma vez que essa versão do modelo possui uma faixa de validade, em latitude magnética, de -22° a 22° . Como o PARIM é construído com valores obtidos sobre a longitude de Cachimbo, podemos obter a dependência em longitude pela transformação de hora local em longitude geográfica. Isto pode ser feito, desde que os valores da declinação magnética na região de interesse sejam semelhantes ao valor da declinação em Cachimbo. Dessa forma, observando o equador magnético, pode-se notar que a faixa de longitude válida, ou seja, com declinação magnética fixa e similar àquela de Cachimbo, corresponde bem a faixa de longitude na qual o Brasil está situado. O mapa apresentado evidencia bem a presença da anomalia equatorial, notada pela intensificação de regiões situadas a $\pm 15^\circ$ (cristas da anomalia equatorial), e presença de uma menor intensidade sobre o equador magnético. Também observa-se uma assimetria entre os valores das cristas. O valor da crista norte é mais intenso em comparação com a crista sul. A explicação para tal fato está na atuação dos ventos meridionais que sopram na direção norte em um período do dia fazendo com que o plasma seja arrastado provocando um depósito de plasma maior na região da crista norte, como pode-se ver.

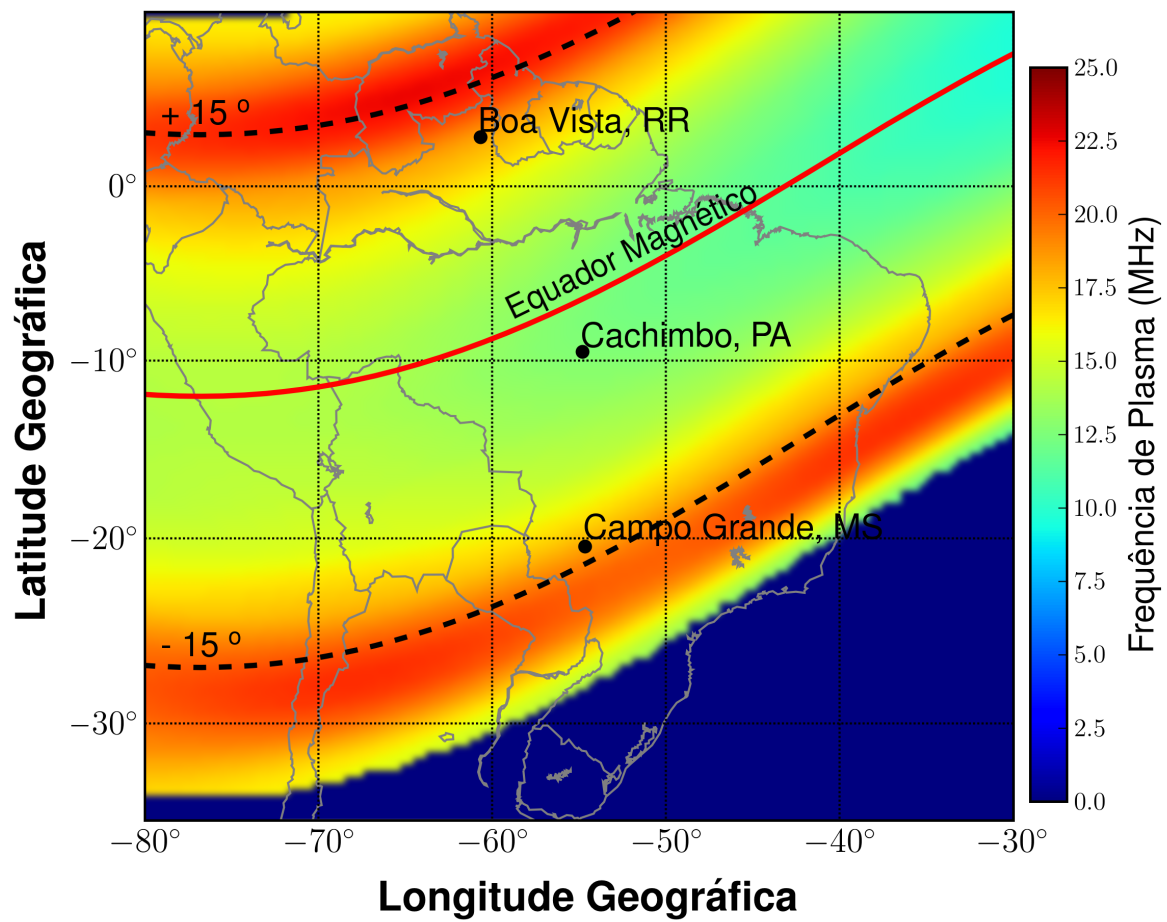


Figura 4.8 - Mapa de valores de frequência crítica da camada F (foF2) calculado pelo PARIM sobre o setor brasileiro destacando as estações de Cachimbo, Campo Grande e Boa Vista.

5 CONCLUSÕES

1. Descrevemos um modelo parametrizado para a ionosfera sobre o setor brasileiro (PARIM) para reproduzir valores de frequência de plasma (densidade eletrônica) provenientes do modelo SUPIM. Construído utilizando funções parametrizadas com utilização das séries de Fourier. De modo geral o modelo apresentou uma concordância bem satisfatória, produzindo bons resultados com uma economia em tempo de execução computacional. No entanto, é necessário desenvolver alguns melhoramentos para que o modelo PARIM possa reproduzir resultados mais de acordo com os dados reais, a exemplo dos dados da campanha COPEX. Uma provável causa para as diferenças apresentadas entre os valores calculados pelo PARIM e os valores obtidos durante a campanha COPEX, reside no fato de o PARIM reproduzir valores calculados pelo modelo SUPIM, que provavelmente necessita de aprimoramentos para melhor descrever o comportamento da ionosfera sobre o setor brasileiro.

2. Os valores de frequência crítica de plasma na camada E (f_oE) calculadas com o modelo PARIM, estão coerentes com o comportamento apresentado em dados observacionais medidos durante a campanha COPEX. Já os valores de hmE calculados pelo PARIM apresentam uma variação em sentido contrário ao anoitecer sobre Boa Vista e Campo Grande quando comparados com dados da campanha COPEX, e uma boa concordância sobre a estação de Cachimbo. O modelo IRI apresenta um valor constante de hmE em 110 km.

3. Os parâmetros $foF2$ calculados pelo PARIM estão superestimados durante o dia nas estações de Boa Vista e Campo Grande, e apresentam uma boa concordância na estação de Cachimbo. Os valores de $hmF2$ gerados pelo PARIM estão condizentes com os dados obtidos da campanha COPEX sobre as estações de Boa Vista e Campo Grande. Sobre a estação de Cachimbo entre as 12:00 e 16:00 (hora local), os valores de $hmF2$ apresentam descontinuidades em comparação aos dados da campanha COPEX, que pode estar relacionado à ocorrência de uma camada F3. O modelo IRI subestima os valores de $hmF2$ no período da noite na região equatorial (Cachimbo) e em latitudes baixas, especificamente sobre as regiões de Boa Vista e Campo Grande.

4. Os valores de TEC calculados pelo PARIM estão discrepantes e superestimados em comparação aos valores da campanha COPEX durante períodos do dia e início da noite nas estações de Cachimbo e Campo Grande. Valores calculados para Boa Vista estão superestimados a partir do meio dia. A diferença entre os valores obtidos

com o PARIM e COPEX é mais intensa às 16:00. Uma causa provável para estas discrepâncias nos valores de TEC é a forma dos perfis de densidades eletrônicas calculados pelo modelo PARIM acima do pico da região F, principalmente sobre a estação de Cachimbo. Nas demais estações as discrepâncias podem estar associadas também aos valores de foF2 calculados pelo modelo. Durante a noite os valores apresentam boa concordância com o comportamento esperado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDU, M. A. The international equatorial electrojet year. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 73, n. 5, p. 49–49, fev. 1992. [35](#)
- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; REINISCH, B. W.; SOUZA, J. R.; DE PAULA, E. R.; SOBRAL, J. H.; BULLET, T. W. Equatorial spread F variability investigations in Brazil: Preliminary results from conjugate point equatorial experiments campaign-COPEX. In: **AGU SPRING MEETING, 2004, Montreal. Proceedings...** Montreal: AGU, 2004a. [62](#)
- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; REINISCH, B. W.; CARRASCO, A. J. Equatorial F- layer heights, evening prereversal electric field, and night E- layer density in the American sector: IRI validation with observations. **Advances in Space Research**, v. 34, n. 9, p. 1953–1965, abr. 2004b. [24](#), [64](#)
- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; REINISCH, B. W.; SOUZA, J. R.; SOBRAL, J. H.; PEDERSEN, T. R.; MEDEIROS, A. F.; SCHUNCH, N. J.; DE PAULA, E. R.; GROVES, K. M. Conjugate point equatorial experiment (COPEX) campaign in brazil: Electrodynamics highlights on spread F development conditions day-to-day variability. **Journal of Geophysical Research**, 2009. [aceito]. [62](#)
- ANDERSON, D. N. Theoretical study of the ionospheric F region equatorial anomaly-I. **Planetary and Space Science**, v. 21, n. 3, p. 409 – 419, mar. 1973a. [21](#)
- _____. Theoretical study of the ionospheric F region equatorial anomaly-II. results in the America and Asia sectors. **Planetary and Space Science**, v. 21, n. 3, p. 421– 442, mar. 1973b. [21](#), [23](#)
- ANDERSON, D. N.; FORBES, J. M. A fully analytic, low- and middle-latitude ionospheric model. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. A2, p. 1520–1524, fev 1989. [23](#)
- ANDERSON, D. N.; MENDILLO, M.; HERNITER, B. A semi-empirical low-latitude ionospheric model. **Radio Science**, v. 22, p. 292–306, 1987a. [23](#)
- BAILEY, G. J.; BALAN, N. A low-latitude ionosphere-plasmasphere. In: SCHUNKS, R. M. (Ed.). **Solar-terrestrial energy program**:. handbook of ionospheric models. Logan: Utah State University, 1996. p. 173–206. [38](#), [39](#)

- BAILEY, G. J.; BALAN, N.; SU, Y. Z. The Sheffield University Ionosphere-Plasmasphere Model a review. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, p. 1541–1552, 1997. [23](#), [36](#), [42](#), [50](#)
- BAILEY, G. J.; SELLEK, R. A mathematical model of earth's plasmasphere and its application in study of he^+ at $l = 3$. **Annales Geophysicae**, v. 8, n. 3, p. 171–189, mar. 1990. [22](#), [36](#), [37](#), [39](#)
- BAILEY, G. J.; SELLEK, R.; RIPPETH, Y. A modelling study of the equatorial topside ionosphere. **Annales Geophysicae**, v. 11, n. 4, p. 263–272, 1993. [36](#)
- BALAN, N.; BAILEY, G. J.; JENKINS, B.; RAO, P. B.; MOFFETT, R. J. Variations of ionospheric ionization and related solar fluxes during an intense solar cycle. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 2243–2253, 1994. [51](#)
- BATISTA, I. S.; ABDU, M. A. Equatorial f- region vertical plasma drifts: Seasonal and longitudinal asymmetries in the american sector. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, p. 12055–12064, 1986. [32](#)
- BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; CARRASCO, A. J.; REINISCH, B. W.; DE PAULA, E. R.; SCHUCH, N. J.; BERTONI, F. C. Equatorial spread F and sporadic E-layer connections during the brazilian conjugate point equatorial experiment (COPEX). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 70, p. 1133–1143, 2008. [62](#)
- 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 and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 12, p. 1409–1412(4), ago. 2002. [21](#)
- BATISTA, I. S.; SOUZA, J. R.; ABDU, M. A.; DE PAULA, E. R. Total electron content at low latitudes and its comparison with IRI90. **Advances in Space Research**, v. 14, n. 12, p. 87–90, 1994. [51](#)
- BILITZA, D. International Reference Ionosphere 2000. **Radio Science**, v. 36, n. 2, p. 261–275, 2001. [23](#), [25](#)
- _____. New measurements for improved IRI TEC representation. In: **IRI WORKSHOP, 2006, Buenos Aires. Proceedings...** Greenbelt, Maryland: Space Science Data Center, 2006. p. 1–4. Disponível em: <http://iri.gsfc.nasa.gov>. [59](#)

BITTENCOURT, J. A.; PILLAT, V. G.; FAGUNDES, P. R.; SAHAI, Y.; PIMENTA, A. A. LION: A dynamic computer model for low-latitude ionosphere. *Annales Geophysicae*, p. 2371–2392, nov. 2007. [23](#)

BONELLI, E. A self-consistent numerical model for the ionospheric dynamo. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 3, n. 13, p. 236–270, 1995. [22](#)

BROWN, L. D.; DANIELL, R. E. J.; FOX, M. W.; KLOBUCHAR, J. A.; DOHERTY, P. H. Evaluation of six ionospheric models as predictors of total electron content. *Radio Science*, v. 26, n. 4, p. 1007–1015, jul. 1991. [23](#)

CARRASCO, A. J. **O pico pré-inversão na deriva vertical de plasma de e a camada E esporádica.** (INPE-13054-TDI/1022). Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos Campos, 2005. [29](#), [31](#), [34](#)

CHIU, Y. T. An improved phenomenological model of ionospheric density. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 37, p. 1563–1570, mar. 1975. [23](#)

DANIELL, R. E.; BROWN, L. D.; ANDERSON, D. N.; FOX, M. W.; DOHERTY, P. H.; DECKER, D. T.; SOJKA, J. J.; SCHUNK, R. W. Parameterized ionospheric model: A global ionospheric parameterization based on first first principles models. *Radio Science*, v. 30, n. 5, p. 1499–1510, out. 1995. [23](#)

DE PAULA, E. R. **Resposta da região F ionosféricas às tempestades magnéticas em baixas latitudes no Brasil.** 210 p. (INPE-4106-TDL/259). Tese (Doutorado em Geofísica espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos Campos, Fev 1987. [22](#), [37](#)

FARLEY, D. T. A theory of electrostatic fields in the ionosphere at nonpolar geomagnetic latitudes. *Journal of Geophysical Research*, v. 65, n. 3, p. 869–877, mar. 1960. [32](#)

FARLEY, D. T.; BONELLI, E.; FEJER, B. G.; LARSEN, M. F. The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, v. 91, n. 212, p. 13723–13728, dez. 1986. [17](#), [34](#)

FEJER, B. G.; DE PAULA, E. R.; GONZÁLEZ, A. S.; WOODMAN, R. F. Average vertical and zonal F region plasma drifts over Jicamarca. *Journal of Geophysical Research*, v. 96, p. 13901–13906, 1991. [27](#), [32](#), [33](#)

- FEJER, B. G.; SOUZA, J. R.; SANTOS, A. S.; COSTA PEREIRA, A. E. Climatology of F zonal plasma drifts over Jicamarca. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, 2005. A12310, doi:10.1029/2005JA011324. [51](#)
- HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. [21](#)
- HEDIN, A. E.; FLEMING, E. L.; MANSON, A. H.; SCHMIDLIN, F. J.; AVERY, S. K.; CLARK, R. R.; FRASER, G. J.; TSUDA, T.; VIAL, F.; VINCENT, R. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 58, p. 1421–1447, 1995. [41](#)
- HEELIS, R. A.; KENDALL, P. C.; MOFFETT, R. J.; WINDLE, D. W.; RISHBETH, H. Electrical coupling of the E and F region and its effects on F region drifts and winds. **Planetary and Space Science**, v. 25, n. 5, p. 734–756, maio 1974. [22](#), [32](#)
- JASPERSE, J. R. The protoelectron distribution function in the terrestrial ionosphere. In: CHANG, T. S.; COPPI, B.; JASPERSE, J. R. (Ed.). **Physics of space plasmas**. Cambridge, Massachusetts: Sci Publ., 1982. p. 53–84. [23](#)
- JENKINS, G. M.; WATTS, D. G. **Spectral analysis and its applications**. San Francisco: Holden-Day, 1968. Series in Time Series Analysis. [24](#), [46](#)
- KELLEY, M. C. **The earth's ionosphere**. New York: Academic Press, 1989. [30](#)
- KENDALL, P. C.; PICKERING, W. M. Magnetoplasma diffusion at F2-region altitudes. **Planet Space Science**, n. 15, p. 825–833, 1967. [36](#)
- LIN, C. H.; RICHMOND, A. D.; HEELIS, R. A.; BAILEY, G. J.; LU, G.; LIU, J. Y.; YEH, H. C.; SU, S.-Y. Theoretical study of the low- and midlatitude ionospheric electron density enhancement during the october 2003 superstorm: Relative importance of the neutral wind and the electric field. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. A9, p. 12312, dez. 2005. [21](#)
- MAUS, S.; MACMILLAN, S.; CHERNOVA, T.; CHOI, S.; DATER, D.; V., G.; LESUR, V.; LOWES, F.; LÜHR, H.; MAI, W.; MCLEAN, S.; OLSEN, N.; ROTHER, M.; SABAKA, T.; THOMSON, A.; ZVEREVA, T. The 10th generation International Geomagnetic Reference Field. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 151, p. 320–322, mar. 2005. [36](#)

MITRA, A. P. A review of D-region process in non polar latitudes. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 30, p. 1065–1114, 1968. [41](#)

PICONE, J. M.; HEDIN, A. E.; DROB, D. P.; AIKIN, A. C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. A12, p. 1468, 2002. [41](#)

QUEGAN, S.; BAILEY, G. J.; MOFFETT, R. J. Diffusion coefficients for three major ions in the topside ionosphere. **Planetary and Space Sciences**, v. 29, n. 8, p. 851–867, 1981. [39](#)

REINISCH, B. W.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; SALES, G. S.; KHYMYROV, G.; BULLET, T. W.; CHAU, J.; RIOS, R. Multistation digisonde observations of equatorial spread F in South America. **Annales Geophysicae**, v. 22, p. 3145–3153, 2004. [62](#)

REINISCH, B. W.; HUANG, X. Some problems with the current IRI Ne profiles. In: **IRI WORKSHOP, 2006, Buenos Aires. Proceedings...** Greenbelt, Maryland: Space Science Data Center, 2006. [59](#)

RICHARDS, P. G.; FENNELLY, J. A.; TORR, D. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 8981–8992, 1994. [41](#)

RISHBETH, H. Polarization fields produced by winds in the equatorial F-region. **Planetary and Space Science**, v. 19, n. 3, p. 357–369, 1971. [32](#)

RISHBETH, H.; GARRIOT, O. K. **Introduction to ionosphere physics**. New York: Academic Press, 1969. [21](#)

SASTRI, J. H. Equatorial anomaly in F-region - a review. **Indian Journal of Radio and Space Physics**, v. 19, p. 225–240, aug 1990. [21](#)

SCHERLIESS, L.; FEJER, B. G. Radar and satellite global equatorial F-region vertical drift model. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, p. 6829–6842, 1999. [42](#)

SCHUNK, R. W. A mathematical model of the middle and latitude ionosphere. **Pure appl phys**, v. 127, p. 255–303, 1988. [23](#)

SOBRAL, J. H.; ABDU, M. A.; MURALIKRISHNA, P.; LABELLE, J.; CASTILHO, V. M.; ZAMLUTTI, C. J. Rocket and ground-based electron density soundings versus IRI representation. **Advances in Space Research**, v. 31, n. 3, p. 569–575, 2003. [64](#)

SOBRAL, J. H.; ABDU, M. A.; PEDERSEN, T. R.; CASTILHO, V. M.; ARRUDA, D. C. S.; MUELLA, M. T. A. H.; BATISTA, I. S.; MASCARENHAS, M.; BURITI, A. F.; TAKAHASHI, H.; SHUCH, N. J.; DENARDINI, C. M.; ZAMLUTTI, C. J.; PIMENTA, A. A.; SOUZA, J. R.; BERTONI, F. C. Ionospheric zonal velocities at conjugate points over South America: Experimental observations and theoretical validations during the COPEX campaign. **Journal of Geophysical Research**, 2009. [aceito]. [62](#)

SOUZA, J. R. **Modelagem ionosferica em baixas latitudes no Brasil**. 182 p. (INPE-6395-TDI/611). Tese (Doutorado em Geofísica espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, maio 1997. [21](#), [22](#), [29](#), [31](#), [35](#), [37](#), [38](#), [42](#)

SOUZA, J. R.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S. Determination of vertical drift and meridional wind using the Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model and ionosphere data at equatorial and low latitudes in Brazil: Summer solar minimum and maximum conditions. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. A6, p. 12813–12821, jun. 2000. [24](#)

_____. An empirical model for the ionospheric electron content at low latitude in Brazil and comparison of its results with IRI95. **Advances in Space Research**, v. 31, n. 3, p. 629–634, 2003. [51](#)

SOUZA, J. R.; BRUM, C. G. M.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; ASEVEDO JR, W.; BAILEY, G. J.; BITTENCOURT, J. A. Parameterized regional ionospheric model and comparison of its results with experimental data and IRI representations. **Advances in Space Research**, 2009. [Submetido]. [24](#)

SPIEGEL, M. R. **Análise de Fourier**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Ltda, 1976. [43](#), [45](#)

STERLING, D. L.; HANSON, W. B.; MOFFETT, R. J.; BAXTER, R. G. Influence of electromagnetic drifts and neutral air winds on some features of F2 region. **Radio Science**, v. 4, n. 11, p. 1005–1023, nov. 1969. [22](#)

TOBISKA, W. K. The empirical solar EUV irradiance model EUV94. **AGU**, v. 74, n. 43, p. 490, 1996. [41](#)

TOBISKA, W. K.; WOODS, T.; EPARVIER, F.; VIERECK, R.; FLOYD, L.; BOUWER, D.; ROTTMAN, G.; WHITE, O. R. The SOLAR2000 empirical solar irradiance model and forecast tool. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, n. 62, p. 1233–1250, 2000. [41](#)

YOUNG, E. R.; TORR, D. G.; NAGY, A. F. A computer simulation of the midlatitude plasmasphere and ionosphere. **Planetary and Space Science**, v. 28, n. 8, p. 881–893, ago. 1980. [22](#)

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)