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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/09.23.20.10-TDI

ESTUDO SOBRE A FORMAÇÃO E DOMINÂNCIA DAS CAMADAS E-ESPORÁDICAS CONSIDERANDO A COMPETIÇÃO ENTRE VENTOS E CAMPOS ELÉTRICOS

Láysa Cristina Araujo Resende

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Inez Staciarini Batista, e Clezio Marcos de Nardin, aprovada em 20 de outubro de 2014.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3H52UHS>

INPE
São José dos Campos
2014

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GB)
Serviço de Informação e Documentação (SID)
Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/6921
Fax: (012) 3208-6919
E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):
Presidente:
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Membros:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)
Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)
Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)
Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)
Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)
Drª Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação
Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)
BIBLIOTECA DIGITAL:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)
REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:
Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)
EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:
Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)
André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/09.23.20.10-TDI

ESTUDO SOBRE A FORMAÇÃO E DOMINÂNCIA DAS CAMADAS E-ESPORÁDICAS CONSIDERANDO A COMPETIÇÃO ENTRE VENTOS E CAMPOS ELÉTRICOS

Láysa Cristina Araujo Resende

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Inez Staciarini Batista, e Clezio Marcos de Nardin, aprovada em 20 de outubro de 2014.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3H52UHS>

INPE
São José dos Campos
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Resende, Láysa Cristina Araujo.

R311e Estudo sobre a formação e dominância das camadas E-esporádicas considerando a competição entre ventos e campos elétricos / Láysa Cristina Araujo Resende. – São José dos Campos : INPE, 2014.

xxx + 184 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/09.23.20.10-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientadores : Drs. Inez Staciarini Batista e Clezio Marcos de Nardin.

1. Ionosfera. 2. Camadas E-esporádicas. 3. Ventos. 4. Campos elétricos. I.Título.

CDU 523.4-853

Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

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

Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre

Dr. Alisson Dal Lago

Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Inez Staciarini Batista

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Clezio Marcos De Nardin

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Mangalathayil Ali Abdu

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Paulo Prado Batista

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Alexander José Carrasco

Convidado(a) / ULA / Mérida, Venezuela -

Dr. Lourivaldo Mota Lima

Convidado(a) / UEPB / Campina Grande - PB

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(✓) unanimidade

Aluno (a): ***Láysa Cristina Araujo Resende***

São José dos Campos, 20 de Outubro de 2014

"Buscai e achareis, pois o que busca acha."

Evangelho de Mateus 7,7-8

Ao meu grande pai, Arlindo Resende

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pelas oportunidades, por me fazer forte e determinada, por estar sempre cobrindo-me com o seu manto.

À Nossa Senhora de Fátima, a qual eu sou devota desde pequena e sempre ouve as minhas preces.

Primeiramente eu gostaria de agradecer ao meu marido, Ronan, pelo companheirismo, pelo entendimento e pelo apoio. Você foi um príncipe que Deus me presentou para que eu conseguisse terminar tudo da melhor maneira possível. Eu tive um ombro amigo, um abraço carinhoso e um sorriso nas horas difíceis. Você abraçou a causa comigo e me ajudou a encarar tudo com mais simplicidade. Essa tese é também grande mérito seu, pois após eu te conhecer, eu nunca mais pensei em desistir. Obrigada meu amor por tudo! Eu te amo profundamente!

Ao meu herói, meu pai, Arlindo Resende. Para este o meu agradecimento é eterno e grandioso. Eu tive um pai, uma mãe e um amigo em uma só pessoa. Os conselhos e o apoio foram fundamentais para eu ter toda a maturidade em encarar o que eu escolhi para vida. Todo o meu esforço sempre será recompensando com a sua felicidade. E, eu sei, que nesse momento o seu orgulho de mim é grande e isso não tem preço. Obrigada por ser tudo e mais um pouco, eu não teria conseguido nada sem você. Eu te amo pai!

Aos meus irmãos, Arlen e Matheus, por serem meus grandes amigos, por entenderem a minha ausência e por me ajudarem a cuidar do nosso pai.

A minha orientadora Dra. Inez S. Batista, pela dedicação, pela bondade, pelo incentivo e por compartilhar o seu grande conhecimento durante todo esse tempo.

Ao meu orientador, Dr. Clezio M. De Nardin, pelos ensinamentos, pela amizade e pela dedicação durante esses 10 anos em que sou sua aluna.

Ao Dr. Alexander José Carrasco pela amizade e pela grande ajuda com o modelo. Em pouco tempo, eu tive um aprendizado enorme e a sua participação me deu uma grande segurança.

Aos meus amigos e familiares que torceram por mim. Em especial as minhas amigas mineiras, ao meu amigo Juliano e à minha amiga Ângela. Já dizia um filósofo que amigos são anjos. E vocês, tornaram esta minha caminhada muito mais feliz.

Obrigada!

A Vânia Andrioli, também pela amizade, pela força e ajuda com alguns dados e modelagem. Você foi uma grande parceira e me sinto muito grata por toda a dedicação e paciência para suprir minhas inúmeras dúvidas.

Ao membros da banca examinadora por aceitarem avaliar essa tese.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade em realizar pesquisa em Geofísica Espacial.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a formação e dominância das camadas E-esporádicas de bloqueio, Es_b, considerando a competição entre ventos e campos elétricos para duas regiões ionosféricas brasileiras, São Luís, uma região equatorial, e Cachoeira Paulista, que se situa em baixa latitude. Neste contexto, foram utilizados dois métodos de análise. O primeiro se refere parâmetros de frequência obtidos em ionogramas, a saber: *fo*Es (frequência máxima do traço ordinário) e *fb*Es (frequência de bloqueio). Já o segundo método consistiu no aprimoramento de um modelo teórico da região E, chamado MIRE, para que fosse possível simular a dinâmica das camadas Es_b levando em consideração ventos e campos elétricos observacionais. Dessa forma, foi possível verificar o efeito de ambos na formação das camadas Es através de simulações e compará-los com os dados observacionais. Os resultados confirmam a importância dos ventos na formação de camadas Es_b. Com relação aos campos elétricos, verificou-se que eles são mais eficazes na região de São Luís, onde se constatou que quando há a presença de irregularidades no plasma nesta região, os campos elétricos verticais inibem a formação das camadas Es_b. Além disso, para complementar este estudo, foram analisados dois eventos de tempestades magnéticas em que ocorreram penetração de campos elétricos, a fim de averiguar o comportamento das camadas Es via simulação nessas condições. Nesta análise simplificada, foi observado que as camadas Es_b obtidas nas simulações foram menos expressivas quando a componente vertical do campo elétrico perturbado foi considerada. Por fim, este trabalho possibilitou uma análise mais realística envolvendo simulações e dados observacionais da dinâmica de formação das camadas Es, que validou os mecanismos de competição entre ventos e campos elétricos.

STUDY ABOUT THE FORMATION AND DOMINANCE OF THE SPORADIC E LAYERS CONSIDERING THE COMPETITION BETWEEN WINDS AND ELECTRIC FIELDS

ABSTRACT

This work presents a study on the formation and dominance of blankenting sporadic E-layers, Es_b, considering the competition between winds and electric fields for two Brazilian ionospheric regions, São Luís, an equatorial region, and Cachoeira Paulista, which is a low station. In this context, two methods were used. The first refers to analysis of the frequency parameters obtained from ionograms: *fo*Es (maximum frequency of the ordinary trace) and *fb*Es (blankenting frequency). The second method consisted in the improvement of a theoretical model for the E region, MIRE, in order to simulate the dynamics of Es_b layers taking into account winds and electric fields observations. In that way, it was possible to evaluate the effect of both, wind and electric field, in the Es layer formation through simulations and compare it with observational data. The results confirmed the significance of winds in Es_b formation. The electric fields were found to be more effective over São Luís was found that in the presence of plasma irregularities in that region, the vertical electric fields inhibit the Es_b formation. In addition, to complement this study, two magnetic storm events, during which disturbed electric fields penetrated from high to low latitudes, were analyzed in order to verify the behavior of Es layers via simulation. In this simplified analysis, it was observed that the Es_b layers simulated were less expressive when the vertical component of the disturbed electric field was considered. Finally, this work has provided a more realistic analysis involving simulations and observational data of Es layers dynamics, which validated the competition mechanisms between winds and electric fields.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

2.1 Esquema das correntes ionosféricas e campos elétricos baseados na teoria do dínamo ionosférico. 8
2.2 Perfil de condutividade mostrando a variação das condutividades longitudinal σ_0, Pedersen σ_1 e Hall σ_2 com a altura. Para conversão 1 e.m.u. (cgs) = 10^{11} S/m (SI). 10
2.3 Formação de corrente Pedersen e Hall devido a campos elétricos aplicados a duas regiões adjacentes de condutividade diferentes. 11
2.4 Perfil vertical de densidade dos íons metálicos Fe^+, Mg^+, Ca^+ e Na^+ para a região de Kiruna no dia 30 de novembro de 1980. 13
2.5 Comparação entre a variação anual do fluxo de entrada de meteoros para as regiões de Juliusruh e Andenes e dados do parâmetro *fo*Es obtidos da região de Atenas. 17
2.6 Distribuição global da ocorrência de camadas Es durante as quatro estações no hemisfério norte dos anos de 2006-2007. 17
2.7 Mecanismo de formação das camadas Es pela teoria dos cisalhamento de ventos: (a) zonal e (b) meridional. 19
2.8 Gráfico de HTI durante os meses de março e julho de 1999, e abril de 1988 mostrando um padrão regular da ocorrência de camadas Es. 21
2.9 Representação simplificada do mecanismo de instabilidade de deriva de gradiente no eletrojato equatorial diurno. 24
2.10 Perfil do pico de densidade eletrônica da camada Es calculado em 110 km em função do ângulo de inclinação. 25
2.11 Parâmetros *h*'F (parte superior) e *ft*Es (parte inferior) para o período de (a) março de 1988 e (b) dezembro de 1988. 26

3.1 Movimento dos elétrons pelo campo elétrico nos níveis de reflexão pela (a)Onda ordinária e (b) Onda extraordinária. 30
3.2 Processo de reflexão na ionosfera utilizando Digissonda. 31
3.3 Ilustração de diversas telas para manipulação e visualização dos ionogramas e parâmetros ionosféricos, obtidos através do programa *SAO Explorer*. 32
3.4 Alguns tipos de camadas Es aferidos por ionogramas. 33
3.5 Camadas Es_q em regiões equatoriais obtidas de sondadores ionosféricos para a região de Trivandrum (a) e São Luís (b). 33

3.6 Ionograma mostrando os parâmetros de frequência utilizados neste trabalho. 34
3.7 Análise da presença das camadas Es_b em São Luís no período de 1996 a 2009. 35
3.8 Sequência de ionogramas para a região de São Luís-MA, mostrando a evolução das camadas Es no dia 01/01/2000 nos horários de 09 UT às 1645 UT. 37
3.9 Sequência de ionogramas para a região de São Luís-MA, mostrando a evolução das camadas Es no dia 11/01/2005 nos horários de 12 UT às 1945 UT. 38
3.10 Sequência de ionogramas para a região de São Luís-MA, mostrando a evolução das camadas Es no dia 13/12/2009 nos horários de 1040 UT às 1550 UT. 39
3.11 Sequência de ionogramas para a região de São Luís-MA, mostrando a evolução das camadas Es no dia 21/07/2013 nos horários de 1240 UT às 1750 UT. 40
3.12 Representação do funcionamento do radar meteórico - SKiYMET. 41
3.13 Ajustes das amplitudes dos ventos das marés diurnas (a) e semidiurnas (b) da componente meridional para a estação de verão na região de Cariri em 2005. 43
3.14 Ajustes lineares das fases das marés diurnas (a) e semidiurnas (b)da componente meridional para a estação de verão na região de Cariri em 2005. 43
3.15 Deriva vertical da região F para o dia 26 de setembro de 2005 em São Luís-MA. 46
3.16 Representação das linhas de campo magnético mostrando a possibilidade de mapeamento dos campos elétricos. 46

4.1 Grade de um espaço bidimensional em tempo e altura para solucionar o problema. 50
4.2 Resultados do MIRE para o perfil de densidade eletrônica da região E utilizando o modelo de Barth et al. (1996) para o cálculo da densidade do NO. 52
4.3 Resultados do MIRE para o perfil de densidade eletrônica da região E utilizando o modelo de Mitra (1968) para o cálculo da densidade do NO. 52
4.4 Componentes zonal e meridional dos ventos utilizados no MIRE obtidos utilizando os dados observacionais de Cariri e Cachoeira Paulista para o verão de 2005. 54

4.5 Componentes zonal (E_y) e vertical (E_z) do campo elétrico obtido pelo radar RESCO para o verão de 2005. 55
4.6 Coordenadas do modelo usado por Denardini (2004) na obtenção dos dados de campo elétrico e no modelo MIRE. 55
4.7 Modelos de campo elétrico (a) empírica (b) experimental utilizados por Dagar et al. (1977). 56
4.8 Fluxograma do modelo MIRE com as modificações mencionadas. 57

5.1 Análise do parâmetro *fb*Es nas estações de primavera (laranja), verão (vermelho), outono (verde) e inverno (azul) para a região de Cachoeira Paulista em 2005. 60
5.2 Análise do parâmetro *fb*Es nas estações de primavera (laranja), verão (vermelho), outono (verde) e inverno (azul) para a região de Cachoeira Paulista em 2008. 61
5.3 Componentes dos ventos estacionários meridional (letra a) e zonal (letra b) utilizando as equações de Morton et al. (1993) para Cachoeira Paulista em 2005. 63
5.4 Perfil de densidade eletrônica do MIRE com a inclusão dos ventos estacionários (letra a) e resultados ao longo do dia da densidade eletrônica obtida pelo MIRE juntamente com os dados observacionais (letra b) para Cachoeira Paulista no verão em 2005. 64
5.5 Perfil dos ventos de cisalhamento para Cachoeira Paulista obtido pelo MIRE utilizando as equações do modelo de Morton et al. (1993). 65
5.6 Perfis das componentes zonal e meridional dos ventos variáveis em altura utilizados no MIRE às 12 UT (letra a) e resultados da densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo modelo MIRE juntamente com os dados observacionais (letra b) divididas em estações do ano para Cachoeira Paulista em 2005. 67
5.7 Perfil de densidade eletrônica obtido pelo MIRE utilizando ventos variáveis em altura para (a) primavera, (b) verão, (c) outono e (d) inverno para Cachoeira Paulista em 2005. 68
5.8 Perfis das componentes zonal e meridional dos ventos variáveis em altura utilizados no MIRE às 12 UT (letra a) e resultados da densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo MIRE juntamente com os dados observacionais (letra b) divididas em estações do ano para Cachoeira Paulista em 2008. 69

5.9 Perfil de densidade eletrônica obtido pelo MIRE utilizando ventos variáveis em altura para (a) primavera, (b) verão, (c) outono e (d) inverno para Cachoeira Paulista em 2008. 70
5.10 Ilustração da evolução da camada Es a cada duas horas no inverno de 2005 em Cachoeira Paulista. 72
5.11 Densidade eletrônica em função da altura e do tempo no inverno de 2005 em Cachoeira Paulista. 73
5.12 Ionogramas para Cachoeira Paulista entre 1320 UT e 1710 UT no dia 02 de maio de 2004 mostrando o movimento de descida de uma camada Es. 74
5.13 Análise do parâmetro *fb*Es para a primavera (laranja), o verão (vermelho) e o inverno (azul) para a região de São Luís em 2005. 76
5.14 Análise do parâmetro *fb*Es a primavera (laranja), o verão (vermelho), o outono (verde) e o inverno (azul) para a região de São Luís em 2009. . . 77
5.15 Perfil dos ventos de cisalhamento para São Luís obtido pelo MIRE utilizando as equações do modelo de Morton et al. (1993). 78
5.16 Perfis das componentes zonal e meridional dos ventos variáveis em altura utilizados no MIRE às 12 UT(letra a) e resultados da densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo MIRE juntamente com os dados observacionais (letra b) divididas em estações do ano para São Luís em 2005. 80
5.17 Perfil de densidade eletrônica obtido pelo MIRE utilizando ventos variáveis em altura para (a) primavera, (b) verão e (c) inverno para São Luís em 2005. 81
5.18 Perfil das componentes meridional e zonal dos ventos variáveis em altura utilizados no MIRE às 12 UT (letra a) e resultados da densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo MIRE juntamente com os dados observacionais (letra b) divididas em estações do ano para São Luís em 2009. 83
5.19 Perfil de densidade eletrônica obtido pelo MIRE utilizando ventos variáveis em altura para (a) primavera, (b) verão, (c) outono e (d) inverno para São Luís em 2009. 84
5.20 Ilustração da evolução da camada Es a cada duas horas no inverno de 2005 em São Luís. 85
5.21 Densidade eletrônica em função da altura e do tempo no inverno de 2005 em São Luís. 86
5.22 Ionogramas para São Luís entre 16 UT e 1830 UT no dia 30 de novembro de 2009 mostrando o movimento de descida de uma camada Es. 87

5.23 Densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo MIRE juntamente com a média dos dados observacionais dos parâmetros de frequência das camadas Es, *fb*Es (linha vermelha) e *fo*Es (linha preta) para Cachoeira Paulista em 2005. 89
5.24 Densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo MIRE juntamente com a média dos dados observacionais dos parâmetros de frequência das camadas Es, *fb*Es (linha vermelha) e *fo*Es (linha preta) para Cachoeira Paulista em 2008. 90
5.25 Densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo MIRE juntamente com a média dos dados observacionais dos parâmetros de frequência das camadas Es, *fb*Es (linha vermelha) e *fo*Es (linha preta) para São Luís em 2005. 92
5.26 Densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo MIRE juntamente com a média dos dados observacionais dos parâmetros de frequência das camadas Es, *fb*Es (linha vermelha) e *fo*Es (linha preta) para São Luís em 2009. 93
5.27 Pico de densidade eletrônica obtida pelo MIRE utilizando as componentes meridional e zonal em São Luís no verão de 2005 (linha contínua) e dados observacionais (pontos). 94
5.28 Evolução da componente meridional do vento utilizado no MIRE (letra a) e evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica simulada no MIRE (letra b) em São Luís no verão de 2005. 95
5.29 Evolução da componente zonal do vento utilizado no MIRE (letra a) e evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica simulada no MIRE (letra b) em São Luís no verão de 2005. 96
5.30 Pico de densidade eletrônica e dados observacionais para as componentes meridional e zonal em Cachoeira Paulista no verão de 2005. 97
5.31 Evolução da componente meridional do vento utilizado no MIRE (letra a) e evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica simulada no MIRE (letra b) em Cachoeira Paulista no verão de 2005. 98
5.32 Evolução da componente zonal do vento utilizado no MIRE (letra a) e evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica simulada no MIRE (letra b) em Cachoeira Paulista no verão de 2005. 99
5.33 Pico de densidade eletrônica obtida pelo MIRE utilizando as marés diurnas e semidiurnas em São Luís no verão de 2005 (linha contínua) e dados observacionais (pontos) 100

5.34 Pico de densidade eletrônica e dados observacionais (letra a) e evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtido pelo MIRE (letra b) para as marés diurnas e semidiurnas em Cachoeira Paulista no verão de 2005. 101
5.35 Densidade eletrônica em função do tempo e da altura referente à maré diurna para São Luís (a) e Cachoeira Paulista (b). 102

6.1 Ionogramas de São Luís para o dia 05 de janeiro de 2001, nos horários de 12 UT às 1545 UT, indicando a presença de camadas Es_b em setas vermelhas. 106
6.2 Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campos elétricos E_y e E_z sem a presença dos ventos de marés. 108
6.3 Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campos elétricos E_y e E_z com a presença dos ventos de marés. 109
6.4 Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campos elétricos E_y com a presença dos ventos de marés. 110
6.5 Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campos elétricos E_y e E_z constantes na presença dos ventos de marés. 112
6.6 Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campo elétrico E_y constante na presença dos ventos de marés. 112
6.7 Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campo elétrico E_z constante na presença dos ventos de marés. 113
6.8 Ionogramas de São Luís para o dia 12 de agosto de 2009, nos horários de 12 UT às 1545 UT, indicando a presença de camadas Es_b em setas vermelhas. 114
6.9 Perfil diário das componentes zonal e vertical do campo elétrico em São Luís obtido pelo radar RESCO no dia 12 de agosto de 2009. 115
6.10 Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campos elétricos E_y e E_z com a presença dos ventos de marés para dia 12 de agosto de 2009. As simulações considerando somente o campo elétrico E_z retornaram este mesmo perfil. 116
6.11 Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campos elétricos E_y com a presença dos ventos de marés para dia 12 de agosto de 2009. 116
6.12 Perfil de densidade eletrônica do modelo MIRE considerando a presença dos ventos e de um campo elétrico zonal de 2 mV/m para a estação de verão em 2005. 118

6.13 Perfil de densidade eletrônica do MIRE considerando a presença dos ventos e de um campo elétrico zonal variável em altura para a estação de verão em 2005. 118
6.14 Perfil do campo elétrico vertical da região F equatorial utilizado para obter as componentes do campo elétrico em Cachoeira Paulista no dia 26 de agosto de 2005. 119
6.15 Perfil de densidade eletrônica levando em consideração o campo E_y (letra a), o campo E_z (letra b), ambas as componentes zonal e vertical do campo elétrico (letra c) para o dia 26 de agosto de 2005. 120
6.16 Ionogramas de Cachoeira Paulista para o dia 26 de agosto de 2005 nos horários entre 00 UT e 23 UT. 122
6.17 Perfil do campo elétrico vertical equatorial que foi mapeado para a região de Cachoeira Paulista para o dia 29 de dezembro de 2005. 123
6.18 Perfil de densidade eletrônica levando em consideração o campo E_y (letra a), o campo E_z (letra b), ambas as componentes zonal e vertical do campo elétrico (letra c) para o dia 29 de dezembro de 2005. 124
6.19 Ionogramas de Cachoeira Paulista para o dia 26 de agosto de 2005 nos horários entre 00 UT e 23 UT. 125

7.1 Componente interplanetário do campo magnético vertical, Bz (laranja), índices magnéticos de perturbação, Dst (cinza) e AE (azul), e deriva vertical para a região de São Luís (verde) no dia 29 de outubro de 2003. As setas vermelhas indicam o horário que se iniciou a penetração de campos elétricos. 129
7.2 Ionogramas da região de São Luís, das 06 UT às 08 UT, indicando a presença da irregularidade do EEJ pelas setas vermelhas. 130
7.3 Ionogramas da região de Cachoeira Paulista, das 06 UT às 08 UT, indicando a presença das camadas Es_b pelas setas vermelhas. 131
7.4 Resultados do MIRE incluindo em (a) componente zonal E_y, (b) componente vertical E_z, (c) componentes E_y e E_z e (d) somente o perfil dos ventos em Cachoeira Paulista. 132
7.5 Componente interplanetário do campo magnético vertical, Bz (laranja), índices magnéticos de perturbação, Dst (cinza) e AE (azul), e deriva vertical para a região de São Luís (verde) no dia 14 de dezembro de 2006. As setas vermelhas indicam o horário que se iniciou a penetração de campos elétricos. 133
7.6 Ionogramas da região de São Luís, das 2215 UT às 23 UT, indicando a ausência das camadas Es. 134

7.7 Ionogramas da região de Cachoeira Paulista, das 2215 UT às 23 UT, indicando a ausência das camadas Es. 134
7.8 Resultados do MIRE incluindo em (a) componente zonal E_y, (b) componente vertical E_z, (c) componentes E_y e E_z e (d) somente perfil dos ventos em Cachoeira Paulista. 136

B.1 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para a primavera de 2005 em São Luís. 159
B.2 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o inverno de 2005 em São Luís. 160
B.3 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para a primavera de 2009 em São Luís. 161
B.4 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o verão de 2009 em São Luís. 162
B.5 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o outono de 2009 em São Luís. 163
B.6 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o inverno de 2009 em São Luís. 164
B.7 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o primavera de 2005 em Cachoeira Paulista. 165
B.8 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o outono de 2005 em Cachoeira Paulista. 166
B.9 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o inverno de 2005 em Cachoeira Paulista. 167
B.10 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para a primavera de 2008 em Cachoeira Paulista. 168
B.11 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o verão de 2008 em Cachoeira Paulista. 169

B.12 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o outono de 2008 em Cachoeira Paulista. 170
B.13 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o inverno de 2008 em Cachoeira Paulista. 171

C.1 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para a primavera de 2009 em São Luís. 174
C.2 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o verão de 2009 em São Luís. 175
C.3 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o outono de 2009 em São Luís. 176
C.4 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o inverno de 2009 em São Luís. 177
C.5 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para a primavera de 2005 em Cachoeira Paulista. 178
C.6 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o outono de 2005 em Cachoeira Paulista. 179
C.7 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o inverno de 2005 em Cachoeira Paulista. 180
C.8 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para a primavera de 2008 em Cachoeira Paulista. 181
C.9 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o verão de 2008 em Cachoeira Paulista. 182
C.10 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o outono de 2008 em Cachoeira Paulista. 183

C.11 Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o inverno de 2008 em Cachoeira Paulista. 184

LISTA DE TABELAS

Pág.

2.1 Reações químicas de produção mais importantes na região E 6
2.2 Reações químicas de perda mais importantes na região E 6
2.3 Reações químicas do átomo metálico Fe. 13

6.1 Cenários propostos para o estudo dos campos elétricos utilizando as simulações do MIRE. 107

A.1 São Luís - Primavera de 2005. 155
A.2 São Luís - Verão de 2005. 155
A.3 São Luís - Inverno de 2005. 155
A.4 São Luís - Primavera de 2009. 155
A.5 São Luís - Verão de 2009. 156
A.6 São Luís - Outono de 2009. 156
A.7 São Luís - Inverno de 2009. 156
A.8 Cachoeira Paulista - Primavera de 2005. 156
A.9 Cachoeira Paulista - Verão de 2005. 156
A.10 Cachoeira Paulista - Outono de 2005. 156
A.11 Cachoeira Paulista - Inverno de 2005. 157
A.12 Cachoeira Paulista - Primavera de 2008. 157
A.13 Cachoeira Paulista - Verão de 2008. 157
A.14 Cachoeira Paulista - Outono de 2008. 157
A.15 Cachoeira Paulista - Inverno de 2008. 157

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO 1

2 A REGIÃO E IONOSFÉRICA E A CAMADA E-ESPORÁDICA 5

2.1 Processos de ionização da região E 5

2.1.1 Ionização diurna e noturna 6

2.2 O dínamo da região E 7

2.3 Região E equatorial 8

2.4 A camada Es 11

2.4.1 Íons metálicos 12

2.4.2 Dinâmica e eletrodinâmica da camada Es 13

2.4.3 Sazonalidade das camadas Es 16

2.4.4 Formação das camadas Es por ventos 18

2.4.5 O mecanismo de cisalhamento de ventos 18

2.4.5.1 Ventos de marés na região E ionosférica 19

2.4.6 A camada Es equatorial 21

2.4.6.1 Instabilidade de deriva de gradiente 22

2.4.7 Efeito dos campos elétricos na formação de camadas Es em baixas e médias latitudes 24

3 METODOLOGIA E ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS 29

3.1 Sondagem ionosférica 29

3.2 Digissonda 29

3.2.1 Redução dos parâmetros da digissonda 33

3.3 Processamento e análise dos dados experimentais 34

3.4 Análise de ventos de marés nas regiões brasileiras 41

3.5 Cálculo do campo elétrico equatorial 44

3.6 Cálculo do campo elétrico em regiões fora do equador 44

4 O MODELO IONOSFÉRICO DA REGIÃO E - MIRE 47

4.1 Modificações realizadas no modelo MIRE 49

4.1.1 O método de Crank-Nicolson 49

4.1.2 Modelo para o constituinte NO 51

4.1.3 Modificações no parâmetro dos ventos neutros 52

4.1.4 Modificações no parâmetro dos campos elétricos 53
4.1.5 Análise da competição entre ventos e campos elétricos 56

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES: ANÁLISE DO EFEITO DOS VENTOS NAS CAMADAS Es 59
5.1 Análise sobre a região de baixa latitude: Cachoeira Paulista - SP 59
5.1.1 Efeito dos ventos nas camadas Es via simulação 62
5.1.1.1 Vento estacionário na formação das camadas Es 62
5.1.1.2 Vento variável na formação das camadas Es: Análise das respostas do modelo aos dados observacionais do radar SKiYMET 64
5.2 Análise para a latitude equatorial de São Luís - MA 75
5.2.1 Análise das respostas do modelo aos dados observacionais do radar SKiYMET 78
5.2.2 Comparação entre os parâmetros *fb*Es e *fo*Es 87
5.2.3 Efeito das componentes meridional e zonal do vento na formação das camadas Es 94
5.2.4 Efeito das marés diurnas e semidiurnas na formação das camadas Es . 98

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES: ANÁLISE DO EFEITO DOS CAMPOS ELÉTRICOS NAS CAMADAS Es 105
6.1 Análise do efeito do campo elétrico para a região de São Luís-MA em 2005 105
6.1.1 Resultados da influência das componentes zonal e vertical do campo elétrico analisadas conjuntamente e separadamente e ventos de marés ausentes (cenários 1, 2 e 3) 107
6.1.2 Resultados da influência das componentes zonal e meridional analisadas conjuntamente e separadamente e ventos de marés presentes (cenários 4, 5 e 6) 108
6.1.3 Resultados da influência do campo elétrico com valor constante nos horários em que as camadas Es_b ocorreram e ventos de marés presentes (cenário 7) 111
6.2 Análise do efeito do campo elétrico para a região de São Luís - MA em 2009 113
6.2.1 Resultados da influência das componentes zonal e meridional analisadas conjuntamente e separadamente e ventos de marés ausentes (cenários 1, 2 e 3) 115
6.2.2 Resultados da influência das componentes zonal e meridional analisadas conjuntamente e separadamente e ventos de marés presentes (cenários 4, 5 e 6) 115

6.3 Análise do efeito do campo elétrico de Dagar et al. (1977) 117
6.4 Análise do efeito do campo elétrico para a região de Cachoeira Paulista . 118
6.4.1 Estudo de caso: 26 de agosto de 2005 119
6.4.2 Estudo de caso: 29 de dezembro de 2005 122

7 ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO EFEITO DOS CAMPOS ELÉTRICOS DE PENETRAÇÃO NAS CAMADAS Es 127
7.1 Estudo da ocorrência de Es e seu comportamento e mecanismos de geração durante a tempestade geomagnética ocorrida em outubro de 2003 . . 128
7.2 Estudo da ocorrência de Es e seu comportamento e mecanismos de geração durante a tempestade geomagnética ocorrida em dezembro de 2006 . 132

8 CONCLUSÕES 137

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 145

APÊNDICE A - PARÂMETROS OBTIDOS DO AJUSTE DOS VENTOS 155

APÊNDICE B - ANÁLISE DAS COMPONENTES MERIDIONAL E ZONAL 159
B.1 Primavera de 2005 - São Luís 159
B.2 Inverno de 2005 - São Luís 160
B.3 Primavera de 2009 - São Luís 161
B.4 Verão de 2009 - São Luís 162
B.5 Outono de 2009 - São Luís 163
B.6 Inverno de 2009 - São Luís 164
B.7 Primavera de 2005 - Cachoeira Paulista 165
B.8 Outono de 2005 - Cachoeira Paulista 166
B.9 Inverno de 2005 - Cachoeira Paulista 167
B.10 Primavera de 2008 - Cachoeira Paulista 168
B.11 Verão de 2008 - Cachoeira Paulista 169
B.12 Outono de 2008 - Cachoeira Paulista 170
B.13 Inverno de 2008 - Cachoeira Paulista 171

APÊNDICE C - ANÁLISE DAS COMPONENTES DE MARÉS DIURNA E SEMIDIURNA 173
C.1 Primavera de 2005 - São Luís 173
C.2 Primavera de 2009 - São Luís 174

C.3 Verão de 2009 - São Luís 175
C.4 Outono de 2009 - São Luís 176
C.5 Inverno de 2009 - São Luís 177
C.6 Primavera de 2005 - Cachoeira Paulista 178
C.7 Outono de 2005 - Cachoeira Paulista 179
C.8 Inverno de 2005 - Cachoeira Paulista 180
C.9 Primavera de 2008 - Cachoeira Paulista 181
C.10 Verão de 2008 - Cachoeira Paulista 182
C.11 Outono de 2008 - Cachoeira Paulista 183
C.12 Inverno de 2008 - Cachoeira Paulista 184

1 INTRODUÇÃO

A parte ionizada da atmosfera, a ionosfera, é uma região caracterizada por apresentar uma alta densidade de elétrons livres e de íons positivos e, por ser capaz de afetar a propagação de ondas de rádio. Situa-se entre, aproximadamente, 60 e 2000 km de altitude. É dividida em regiões distintas com propriedades características, conhecidas como D, E e F.

Na região E ionosférica, compreendida entre 80 e 150 km de altitude, aproximadamente, pode-se observar a presença de picos pronunciados de densidade eletrônica, os quais são denominados camadas E-esporádicas (Es). Apesar de sua nomenclatura, essas camadas são vistas regularmente por diversos equipamentos. Elas são caracterizadas pela sua variabilidade, pela sua densidade superior à do seu ambiente e por possuir uma espessura inferior a 10 km. Dependendo da altitude e, principalmente, da latitude onde são observadas, as camadas Es apresentam diferentes mecanismos de formação, sendo classificadas em tipos de acordo com as suas características.

Em regiões de baixas e médias latitudes, a formação de camadas Es ocorre devido ao cisalhamento de ventos. Neste processo, os íons metálicos podem convergir em uma camada fina devido a ventos em direções opostas. Além disso, sob determinadas condições, os campos elétricos presentes na região de formação destas camadas podem também causar influências. Quando vistas em ionogramas, se as camadas Es impedem a propagação de ondas de rádio para altitudes superiores, costuma-se denominá-las camadas Es do tipo blankenting (Es_b).

Em regiões equatoriais, o mecanismo de cisalhamento de ventos não é efetivo devido a configuração do campo magnético nessas latitudes. Contudo, a presença da corrente do Eletrojato Equatorial (EEJ), juntamente com a geometria do campo elétrico leste-oeste e a componente horizontal do campo magnético da Terra desenvolvem instabilidades de plasma. Essas instabilidades, por sua vez, causam irregularidades no plasma nas alturas da região E. Esse tipo de fenômeno é observado nos ionogramas da região equatorial como um traço espalhado e difuso e é denominado camadas esporádicas equatoriais, Es_q, ou que não bloqueiam, Es_{nb}. Essas camadas Es possuem características distintas das demais camadas Es observadas em outras latitudes. A principal delas é não bloquear as reflexões das regiões ionosféricas superiores.

Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo sobre a formação e dominância das camadas Es, principalmente as Es_b em regiões equatoriais e de baixas latitudes, considerando a competição entre ventos e campos elétricos. A análise dos dados

obtidos pela digissonda de São Luís - MA (2° S, 44° O, I: -2,3 °), os ionogramas, revelaram um comportamento interessante. Nesta região, há uma competição entre o aparecimento das camadas Es_b e Es_{nb} devido ao afastamento do equador magnético. Por isso, o comportamento das camadas Es em São Luís foi considerado uma motivação deste trabalho, uma vez que essa região está em um processo de transição. Para fins comparativos e validação das conclusões apresentadas, foi também estudada uma região de baixa latitude, Cachoeira Paulista - SP (22,42°S, 45°O, I: -15°).

Portanto, este estudo possuiu dois objetivos principais. Um deles foi em desenvolver uma análise para setores equatoriais e de baixas latitudes para examinar o papel do vento neutro e do campo elétrico na região E ionosférica. Para isso, a análise se concentrou em parâmetros de frequência das camadas Es obtidos nos ionogramas de São Luís e Cachoeira Paulista. O outro objetivo é estudar os efeitos dos ventos de cisalhamento e campos elétricos utilizando simulações numéricas. Especificamente, foram realizadas as mudanças necessárias em um modelo ionosférico já existente, o Modelo Ionosférico da Região E (MIRE), desenvolvido por Carrasco (2005), que incluíram, entre outras atividades, a possibilidade de implementar dados de ventos e campos elétricos observacionais e teóricos. Os resultados das simulações foram comparados com os dados observacionais. Além disso, para complementar este trabalho, foram analisados dois eventos de tempestades magnéticas em que ocorreram penetração de campos elétricos na ionosfera equatorial para averiguar o comportamento das camadas Es como proposto em Abdu et al. (2013). Este último estudo foi simplificado, tendo o propósito de verificar as respostas que o modelo MIRE proporciona a estes campos elétricos perturbados.

Diante do exposto, no capítulo 2 estão apresentadas as fundamentações teóricas relacionadas com a região E ionosférica e as camadas Es, respectivamente. Neste capítulo estão abordados os principais tópicos da química e eletrodinâmica da região E, os diferentes mecanismos de formação e processos dinâmicos das camadas Es equatoriais e de baixas latitudes e as teorias sobre a influências dos ventos de marés e campos elétricos na ocorrência de camadas Es.

No capítulo 3 há uma descrição dos instrumentos e metodologias que foram utilizados neste estudos. Primeiramente, é apresentada uma análise sobre os parâmetros de frequências (fbEs e ftEs) provindos das digissondas para as duas estações estudadas: São Luís e Cachoeira Paulista. Em seguida, os tópicos abordados são os procedimentos para se obter as componentes dos ventos de marés observacionais, bem como os

campos elétricos equatoriais observados. Por fim, descreve-se a metodologia para o cálculo dos campos elétricos em regiões fora do equador.

No capítulo 4 apresenta-se a descrição do modelo teórico MIRE. Além disso, apresentam-se as modificações realizadas neste modelo, como a inclusão dos parâmetros de ventos e campos elétricos e as alterações realizadas no código, que foram necessárias para atingir os objetivos propostos.

Os resultados dos dados observacionais, juntamente com as simulações realizadas com as modificações dos ventos estão descritos no capítulo 5. Em síntese, neste capítulo, são abordadas análises dos resultados obtidos no MIRE com a inclusão dos ventos observacionais. Estes resultados são divididos para as duas localidades em estudo e comparados com os parâmetros de frequência das digissondas.

No capítulo 6 são mostrados os resultados e a discussão relacionados com o efeito dos campos elétricos equatoriais observacionais e teóricos simulados no modelo MIRE. Para isso, são escolhidos alguns dias específicos de acordo com a disponibilidade dos dados de campos elétricos. O mesmo procedimento foi realizado para Cachoeira Paulista, utilizando outra metodologia para obter os campos elétricos que poderiam influenciar nas camadas Es. Os resultados simulados são divididos em termos dos cenários, a fim de analisar as condições de resposta do MIRE.

No capítulo 7 é apresentada a análise sobre a resposta do modelo MIRE a campos elétricos perturbados. Analisa-se dois eventos em que ocorreu a penetração de campos elétricos durante o período noturno. O foco desta análise é averiguar, via simulação, as teorias abordadas por Abdu et al. (2013), onde a camada Es pode se fortalecer ou ser inibida dependendo das condições físicas do evento.

Finalmente, no capítulo 8, são apresentadas as contribuições e conclusões deste trabalho.

2 A REGIÃO E IONOSFÉRICA E A CAMADA E-ESPORÁDICA

A região E se encontra entre 80 e 150 km e está localizada entre as regiões D e F. Sua ionização é devida principalmente à radiação solar e, portanto, sua densidade eletrônica é bastante reduzida durante a noite. Nos horários noturnos sua densidade eletrônica é da ordem de $5{\times}10^3$ elétrons/cm^3, enquanto que durante o dia ela pode ser da ordem de 10^5 elétrons/cm ^{3}. O comportamento da região E é próximo ao de uma camada α-Chapman. Na média, sua frequência crítica (foE) varia com o ângulo zenital solar (χ) mediante a expressão mostrada na equação 2.1:

$$f_oE = 9 \cdot 10^3 \left(\frac{q_o}{\alpha} cos\chi\right)^{\frac{1}{4}}, \tag{2.1}$$

na qual q_o é a taxa de produção e α é o coeficiente de recombinação. Esta equação implica que o pico de densidade eletrônica (NmE) varia com (cos $\chi)^{1/2}$ (RISHBETH; GARIOTT, 1969).

Os processos fotoquímicos são os fatores dominantes na região E, uma vez que a constante de tempo de recombinação é suficientemente pequena comparada com os tempos característicos dos processos de transporte. Assim, fatores dinâmicos tais como ventos neutros, ondas de gravidade, marés, difusão e campos elétricos possuem um grau de importância menor na sua formação (HUI et al., 2005).

2.1 Processos de ionização da região E

A região E é produzida principalmente pela fotoionização do nitrogênio molecular (N_2) e oxigênio molecular (O_2). Contudo, devido aos processos químicos, os íons dominantes nesta região são os NO^+ e O_2^+. Portanto, os principais íons primários da região E são os N_2^+, O_2^+ e O^+; e os íons mais numerosos são os NO^+ e O_2^+ (HARGREAVES, 1992).

A região E é formada pelas radiações solares na faixa de 31 a 100 Å e com comprimento de onda (λ) maior que 800 Å. A linha Lyman-β (λ = 1025 Å) do espectro solar e a linha C(III) (λ = 977 Å), que ionizam o O_2 e o Lyman-contínuo (λ< 910 Å) também contribuem para a formação da camada E (BANKS; KOCKARTS, 1973). A radiação EUV entre 800 e 1027 Å é absorvida pelo oxigênio molecular para formar o íon O_2^+. Também têm influência os comprimentos de ondas de Raios-X de 10 a 100 Å que podem ionizar todos os constituintes atmosféricos presentes naquela região. Nesse contexto, as reações químicas fundamentais para os processos de ionização da

região E são mostradas na tabela 2.1. A taxa de produção por fotoionização de cada íon (q_{O^+}, $q_{O_2^+}$, $q_{N_2^+}$, q_{NO^+}) é expressa em unidades de $cm^{-3}s^{-1}$.

Tabela 2.1 - Reações químicas de produção mais importantes na região E

Reação	Taxa de ionização ($cm^{-3}s^{-1}$)
$O_2 + h\nu \rightarrow O_2^+ + e$	$q_{O_2^+}$
$N_2 + h\nu \rightarrow N_2^+ + e$	$q_{N_2^+}$
$NO + h\nu \rightarrow NO^+ + e$	q_{NO^+}
$O + h\nu \rightarrow O^+ + e$	q_{O^+}

Fonte: Chen e Harris (1971).

Os íons e elétrons podem se recombinar ou sofrer reações químicas com outros elementos neutros. Alguns exemplos das reações químicas de perda são mostrados na tabela 2.2 juntamente com os coeficientes de reações de dois corpos expressos em $cm^{+3}s^{-1}$:

Tabela 2.2 - Reações químicas de perda mais importantes na região E

Reação	Coeficiente a 300 K (cm^3s^{-1})
$O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$	$k_1 = 4{,}0 \times 10^{-11}$
$O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N$	$k_2 = 1{,}3 \times 10^{-12}$
$N_2^+ + O \rightarrow NO^+ + N$	$k_3 = 2{,}5 \times 10^{-10}$
$N_2^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N_2$	$k_4 = 1{,}0 \times 10^{-10}$
$O_2^+ + NO \rightarrow NO^+ + O_2$	$k_5 = 8{,}0 \times 10^{-10}$
$NO^+ + e \rightarrow N + O$	$\alpha_{NO^+} = 4{,}1 \times 10^{-7}\ (300/T_e)$
$O_2^+ + e \rightarrow O + O$	$\alpha_{O_2^+} = 2{,}2 \times 10^{-7}\ (300/T_e)^{0,7}$

Fonte: Chen e Harris (1971).

2.1.1 Ionização diurna e noturna

A taxa de produção dos íons e elétrons provindos da fotoionização de cada constituinte é dada pela equação 2.2 (RUSTER, 1971):

$$q_k(z,t) = \sum_j \sigma_{jk}^{(i)} S_{\infty j} n_k(z,t) \exp\left\{-Ch(\chi) \sum_l \sigma_{jl}^{(a)} n_l(z,t) H_l(z,t)\right\}, \tag{2.2}$$

onde $\sigma_{jk}^{(i)}$ é a secção transversal de ionização para cada constituinte neutro k, $S_{\infty j}$ é o fluxo de radiação solar para cada comprimento de onda, $Ch(\chi)$ refere-se a função Chapman (SWIDER; GARDNER, 1969; RUSTER, 1971; SMITH; SMITH, 1972) para o ângulo zenital solar χ, $\sigma_{jl}^{(a)}$ é a secção transversal de absorção, n_l e H_l são a densidade eletrônica numérica e a escala de altura para cada constituinte neutro, respectivamente. A partir do fornecimento dos valores de todos os parâmetros da equação 2.2 é possível calcular a taxa de produção dos íons e elétrons em função da altitude para diferentes intervalos de tempo.

No período noturno a densidade eletrônica da região E decai significativamente, uma vez que não há mais incidência direta de radiação solar. Contudo, a parte superior da atmosfera da Terra, a geocorona, emite linhas espectrais tais como o Hélio 1 (584 Å), Hélio 2 (304 Å), Lyman-α (1216Å) e Lyman-β (1026 Å). Essas linhas são emitidas para a ionosfera noturna através de múltiplas dispersões e, assim, constituem as principais fontes de ionização da região E noturna (HUI et al., 2005).

2.2 O dínamo da região E

O dínamo da região E ionosférica ocorre devido à presença de movimentos dos ventos neutros conduzidos por oscilações de marés. A sua ação pode ser descrita em termos de campos elétricos induzidos, conforme a seguir:

- o vento $\mathbf{U}$ induz um campo elétrico $\mathbf{E}_i = \mathbf{U} \times \mathbf{B}$;
- o campo elétrico induzido produz uma corrente $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot \mathbf{E}_i = \underline{\sigma} \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B})$;
- em geral esta corrente não possui o divergente igual a zero em todos os lugares e, assim, cargas elétricas acumulam onde $\nabla \cdot [\underline{\sigma}(\mathbf{U} \times \mathbf{B})] \neq 0$;
- pela Lei de Poisson, a carga produz um campo de polarização $\mathbf{E}_p$, o qual continuamente se ajusta para anular a divergência da corrente total $(\nabla \cdot [\underline{\sigma}(\mathbf{U} \times \mathbf{B}) + \underline{\sigma}\mathbf{E}_p])$.

Os ventos da região do dínamo da região E, através do campo magnético da Terra, contribuem na formação de uma força eletromotriz e estabelecem correntes (PEDATELLA et al., 2011). O resultado desse sistema de correntes é conhecido como *Solar Quiet* (Sq), o qual flui em sentido anti-horário no hemisfério Norte diurno e sentido horário no hemisfério Sul diurno (Figura 2.1) (FARLEY, 2009).

Na região E, os campos elétricos de indução ($\mathbf{E}_i$) e de polarização ($\mathbf{E}_p$) são geralmente comparáveis em magnitude. Mesmo durante a noite, quando a densidade

Figura 2.1 - Esquema das correntes ionosféricas e campos elétricos baseados na teoria do dínamo ionosférico.
Fonte: Akasofu e Chapman (1972).

eletrônica é menor, a magnitude da condutividade longitudinal é suficiente para permitir correntes fluindo, mantendo o campo de polarização.

2.3 Região E equatorial

A ionosfera terrestre é permeada por campos elétricos e magnéticos, a qual conferem características anisotrópicas às propriedades do seu plasma. Assim, a condutividade ionosférica é usualmente apresentada como uma quantidade tensorial em termos das suas três componentes da seguinte forma:

- ao longo do vetor campo magnético (direção de $\mathbf{B}$);
- ao longo da componente do vetor campo elétrico perpendicular ao campo magnético ($E_\perp$); e
- perpendicular a ambos (direção $\mathbf{E}\times\mathbf{B}$).

A componente da condutividade paralela ao campo magnético $\mathbf{B}$ (σ_0) é dada pela equação 2.3:

$$\sigma_0 = n \cdot e^2 \left(\frac{1}{m_e \nu_e} + \frac{1}{m_i \nu_i} \right). \tag{2.3}$$

A condutividade Pedersen ou transversal (σ_1) refere-se à condutividade na direção da componente do campo elétrico $\mathbf{E}$ e perpendicular a componente do campo magnético $\mathbf{B}$ dada pela equação 2.4:

$$\sigma_1 = n \cdot e^2 \left[\frac{\nu_e}{m_e(\nu_e^2 + \omega_e^2)} + \frac{\nu_i}{m_i(\nu_i^2 + \omega_i^2)} \right]. \tag{2.4}$$

A condutividade Hall (σ_2) refere-se à condutividade na direção $\mathbf{E}\times\mathbf{B}$, é dada pela equação 2.5:

$$\sigma_2 = n \cdot e^2 \left[\frac{\omega_e}{m_e(\nu_e^2 + \omega_e^2)} - \frac{\omega_i}{m_i(\nu_i^2 + \omega_i^2)} \right]. \tag{2.5}$$

Nas equações acima, m_e e m_i são as massas dos elétrons e íons, $\Omega_{e,i}$ são as giro-frequências, $\nu_{e,i}$ são as frequências de colisão, e é a carga elétrica e n é a densidade de plasma. Os subscritos e e i se referem a elétrons e íons, respectivamente.

Todas essas quantidades apresentam variações com a altura e, portanto, as condutividades seguem um comportamento que pode ser visualizado na Figura 2.2. É possível observar que as condutividades Pedersen e Hall apresentam máximos nas alturas da região E, decaindo rapidamente nas alturas abaixo e acima do máximo. No equador magnético, esse pico fica em torno dos 140 km para a condutividade Pedersen e 125 km para a condutividade Hall (Figura 2.2).

Devido à configuração das condutividades ionosféricas, a ação do dínamo se torna mais efetiva no equador magnético nas alturas da região E ionosférica. Assim, surge uma corrente que flui do terminadouro do amanhecer para o terminadouro do anoitecer nos dois lado da Terra. Dessa forma a corrente, denominada eletrojato equatorial (EEJ), fluirá para leste durante o dia e para oeste durante a noite (DENARDINI, 1999). O desenvolvimento da corrente do EEJ pelo campo elétrico do dínamo pode ser explicado na Figura 2.3. Para se entender sua composição, considera-se uma camada condutora fina, onde o fluxo de corrente está confinado entre 90 e 140 km de altura, na qual as correntes verticais são desprezíveis.

Considerando somente o plano perpendicular ao campo magnético na região equatorial (quadros da Figura 2.3), através da relação $\mathbf{J} = \underline{\sigma} \cdot \mathbf{E}$, obtemos as seguintes equações:

Figura 2.2 - Perfil de condutividade mostrando a variação das condutividades longitudinal σ_0, Pedersen σ_1 e Hall σ_2 com a altura. Para conversão 1 e.m.u. (cgs) = 10^{11} S/m (SI).
Fonte: Akasofu e Chapman (1972).

$$
\begin{aligned}
J_y &= \sigma_1 \cdot E_y - \sigma_2 \cdot E_z, \\
J_z &= \sigma_2 \cdot E_y + \sigma_1 \cdot E_z,
\end{aligned}
\tag{2.6}
$$

nas quais o eixo z é na direção vertical e o eixo y é na direção leste. Neste caso, o campo elétrico devido a polarização dos terminadouros que flui na direção leste, forçará uma corrente Pedersen na sua direção. Este campo cria também uma corrente Hall na direção perpendicular a ele e a componente do campo magnético (Figura 2.3a). Desde que a condutividade é reduzida abaixo e acima do pico de condutividade, a corrente Hall vertical produz um campo elétrico vertical (Figura 2.3b). Associadas à presença deste campo surgem correntes Pedersen e Hall. A primeira corrente reduz o efeito da corrente Hall do campo elétrico primário. A segunda corrente se somará à corrente Pedersen deste mesmo campo (Figura 2.3c). Esta anulação nas correntes verticais pode ser representada na equação 2.6 como J_z=0. Então a equação 2.6 pode ser reescrita como:

Figura 2.3 - Formação de corrente Pedersen e Hall devido a campos elétricos aplicados a duas regiões adjacentes de condutividade diferentes.
Fonte: Adaptada de Denardini (1999).

$$J_y = \left(\sigma_1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1}\right) E_y = \sigma_3 \cdot E_y, \tag{2.7}$$

na qual σ_3 é a condutividade Cowling que é na direção longitudinal do eletrojato equatorial.

Em síntese, o EEJ é uma corrente eletrônica horizontal que circula ao longo do equador magnético numa faixa de 6º de latitude (DENARDINI, 1999). Por ocasionar um aumento significativo da variação diurna da componente horizontal do campo magnético na região do equador magnético, essa corrente pode ser obtida por equipamentos conhecidos como magnetômetros. Durante a noite, quando a densidade eletrônica da região E decai, o cenário apresentado anteriormente se reverte, ou seja, a corrente flui na direção oeste. As correntes neste horário são mais fracas e elas não podem ser estudadas por magnetômetros (CASEY, 2005).

2.4 A camada Es

Em geral, o termo camada E- esporádica, abreviado por Es, refere-se a adensamentos do plasma, compostos por íons metálicos, em uma faixa de altura estreita na região E ionosférica. Tal camada geralmente tem sido investigada por meio de observações feitas por diversos equipamentos durante anos, tais como, ionossondas, radares de espalhamento incoerente, foguetes e satélites (RAO; SMITH, 1968; SMITH, 1970; MACDOUGALL, 1974; MATHEWS, 1998; HALDOUPIS et al., 2007; ARRAS et al., 2009;

HALDOUPIS, 2011). Assim, foi possível sedimentar os mecanismos de sua formação que dependem da altitude e, principalmente, da latitude onde são observadas. Em médias e baixas latitudes, o aumento da ionização que forma a camada Es é devido ao mecanismo de cisalhamento de ventos (WHITEHEAD, 1989). Em regiões equatoriais, o termo camada Es é atribuído à irregularidade de gradiente de deriva presente nessa região (COHEN; BOWLES, 1963). Além disso, as camadas Es são classificadas em tipos que são designados por letras minúsculas de acordo com esses mecanismos de formação.

2.4.1 Íons metálicos

A presença de íons metálicos como o magnésio (Mg^+), o ferro (Fe^+), o cálcio (Ca^+), o sódio (Na^+) e o silício (Si^+), tem sido observada nas alturas da região E ionosférica. A sua fonte é creditada à ablação meteórica que depositam componentes metálicos na atmosfera terrestre e, assim, pode ocorrer a reação com outros constituintes presentes que possibilita a sua formação. Em síntese, a gravidade acelera esses corpos conforme eles se aproximam da Terra até que o atrito os vaporiza. A maior parte dessa vaporização acontece entre 90 e 110 km e, uma vez depositados na atmosfera terrestre, eles podem ser ionizados (BAYRU, 2007).

O tempo de reação química para a produção dos íons metálicos tem ordem de magnitude cinco vezes menor que os tempos dos processos envolvendo íons moleculares. Como o tempo de reação de perda é longo, pode ser dito que eles possuem um tempo de vida longa. Portanto, estes íons metálicos possibilitam que o adensamento do plasma perdure um tempo suficiente, favorecendo o surgimento das camadas Es. A Figura 2.4 mostra medidas de perfis de densidade dos íons Fe^+, Mg^+, Ca^+ e Na^+ obtidas a partir de dados de foguetes para a região de Kiruna (67,85°N, 20,21°L) no dia 30 de novembro de 1980. Observa-se que os íons Fe^+ e Mg^+ são mais abundantes que os demais.

Na tabela 2.3 são mostradas as reações químicas para o Fe^+, o qual é considerado o íon metálico mais abundante na região da baixa ionosfera (CARTER, 1999).

Figura 2.4 - Perfil vertical de densidade dos íons metálicos Fe^+, Mg^+, Ca^+ e Na^+ para a região de Kiruna no dia 30 de novembro de 1980.
Fonte: Kopp (1997)

Tabela 2.3 - Reações químicas do átomo metálico Fe.

Tipo de reação química	Coeficiente de reação
$Fe + h\nu \rightarrow Fe^+ + e$	$j_1 = 5,0 \times 10^{-7} s^{-1}$
$Fe^+ + e \rightarrow Fe + 7{,}90ev$	$\gamma_2 = 1,0 \times 10^{-12} cm^3 s^{-1}$
$Fe^+ + O_2 + N_2 \rightarrow FeO_2^+ + N_2$	$\gamma_{10} = 2,5 \times 10^{-30} cm^6 s^{-1}$
$Fe^+ + N_2 + N_2 \rightarrow FeN_2^+ + N_2$	$\gamma_{11} = 2,5 \times 10^{-30} cm^6 s^{-1}$
$Fe^+ + O + N_2 \rightarrow FeO^+ + N_2$	$\gamma_{12} = 2,5 \times 10^{-30} cm^6 s^{-1}$
$Fe + NO^+ \rightarrow Fe^+ + NO$	$\gamma_{13} = 7,0 \times 10^{-10} cm^3 s^{-1}$
$Fe + O_2^+ \rightarrow Fe^+ + O_2$	$\gamma_{14} = 9,4 \times 10^{-10} cm^3 s^{-1}$
$Fe + O^+ \rightarrow Fe^+ + O$	$\gamma_{15} = 2,0 \times 10^{-9} cm^3 s^{-1}$

Fonte: Carter (1999)

2.4.2 Dinâmica e eletrodinâmica da camada Es

Para a formação da camada Es somente interessa o movimento na direção vertical, representado por V_{iz}. Esse parâmetro pode ser determinado a partir da expressão do momento de transporte, presente na equação 2.8:

$$[N_i]m_i\frac{d\mathbf{V}_i}{dt} = [N_i]e(\mathbf{E} + \mathbf{V}_i \times \mathbf{B}) - [N_i]m_i\nu_{in}(\mathbf{V}_i - \mathbf{U}) - \nabla P_i + [N_i]m_i\mathbf{g}, \quad (2.8)$$

na qual $d\mathbf{V}_i/dt$ é a derivada total da velocidade, e é a carga elétrica do íon, ν_{in} é a frequência de colisão dos íons com as partículas neutras, $\mathbf{U}$ é a velocidade do vento neutro, P_i é a pressão parcial, $\mathbf{E}$ é o campo elétrico, $\mathbf{B}$ é o campo magnético e $\mathbf{g}$ é a aceleração da gravidade. Uma vez que as componentes da aceleração são muito pequenas quando comparadas com os termos colisionais, a expressão 2.8 pode ser simplificada, resultando na equação 2.9 (CARRASCO, 2005):

$$\frac{e}{m_i}(\mathbf{E} + \mathbf{V}_i \times \mathbf{B}) - \nu_{in}(\mathbf{V}_i - \mathbf{U}) - \frac{1}{[N_i]m_i}\nabla P_i + \mathbf{g} \approx \mathbf{0}. \tag{2.9}$$

Por conseguinte, a equação 2.9 pode ser escrita na forma de três componentes cartesianas (x positivo para sul, y positivo para leste e z positivo para cima), onde $\mathbf{V}_i = (V_{ix}, V_{iy}, V_{iz})$, $\mathbf{U} = (U_x, U_y, U_z)$, $\mathbf{B} = (-Bcos(I), 0, -Bsen(I))$ e $\mathbf{E} = (E_x, E_y, E_z)$. Assim, a componente vertical pode ser descrita através da equação 2.10:

$$\begin{aligned} V_{iz}\frac{(\nu_{in}^2 + \omega_i^2)}{\omega_i^2} &= cos(I)sen(I)U_x + \frac{\nu_{in}}{\omega_i}cos(I)U_y + \left(\frac{\nu_{in}^2}{\omega_i^2} + sen^2(I)\right)U_z + \\ &\frac{1}{\nu_{in}}\frac{e}{m_i}cos(I)sen(I)E_x + \frac{e}{\omega_i m_i}cos(I)E_y + \\ &\frac{e}{\omega_i m_i}\left(\frac{\nu_{in}^2}{\omega_i^2} + sen^2(I)\right)E_z + \left(\frac{\nu_{in}^2}{\omega_i^2} + sen^2(I)\right)V_d, \end{aligned} \tag{2.10}$$

na qual I é a inclinação magnética e ω_i é a girofrequência para os íons. Adicionalmente, o termo V_d se define como a velocidade de difusão dos íons. Esta pode ser desprezada no processo de formação das camadas Es, uma vez que é muito pequena nas altitudes da região E ionosférica. Além disso, considera-se também uma atmosfera em equilíbrio hidrostático ou, em termos matemáticos, $U_z \approx 0$, de forma que a expressão final da equação do movimento é dada por:

$$\begin{aligned} V_{iz} = &\frac{\omega_i^2}{(\nu_{in}^2 + \omega_i^2)}\left[cos(I)sen(I)U_x + \frac{\nu_{in}}{\omega_i}cos(I)U_y + \frac{1}{\nu_{in}}\frac{e}{m_i}cos(I)sen(I)E_x + \right. \\ &\left. \frac{e}{\omega_i m_i}cos(I)E_y + \frac{e}{\omega_i m_i}\left(\frac{\nu_{in}^2}{\omega_i^2} + sen^2(I)\right)E_z\right]. \end{aligned} \tag{2.11}$$

Ainda, considerando um sistema de coordenadas em que o eixo vertical positivo é para cima, tem-se que a equação 2.11 pode ser analisada de outra maneira, exemplificando o efeito dos ventos e campos elétricos. Os sinais em parênteses devem ser utilizados para o hemisfério sul. Assim, segundo Kirkwood e Nilsson (1999), a

equação pode ser reescrita como:

$$V_{iz} = \frac{\omega_i^2}{\omega_i^2 + \nu_i^2}\left[\frac{eE_y}{\omega m_i} - (+)U_x senI\right] cosI + \frac{\omega_i \upsilon_i}{\omega_i^2 + \nu_i^2}\left[(-)\frac{eE_x}{\omega m_i} senI + U_y\right] cosI + \frac{\omega_i^2}{(\nu_{in}^2 + \omega_i^2)}\frac{e}{\omega_i m_i}\left(\frac{\nu_{in}^2}{\omega_i^2} + sen^2(I)\right) E_z. \tag{2.12}$$

As maneiras para a análise da produção da camada Es, segundo a equação 2.12, são descritas abaixo

a) Convergência por Cisalhamento de Ventos
$E_x = E_y = E_z = 0$

- $\omega_i >> \nu_i$ (acima de 120 a 130 km de altitude). Neste caso o primeiro termo da equação 2.12 domina e a deriva vertical iônica (V_{iz}) tem sinal oposto ao vento meridional (U_x). Quando a direção dos ventos mudam do sul para o norte em altas latitudes, e do norte para o sul em baixas latitudes, haverá uma convergência (V_{iz}) acumulando íons.
- $\nu_i >> \omega_i$ (abaixo de 100 a 110 km de altitude). Neste caso o segundo termo da equação 2.12 domina e a deriva vertical iônica ($\mathbf{V}_{iz}$) tem o mesmo sinal que o vento zonal (U_y). Quando a direção dos ventos mudam de oeste para leste em altas latitudes, e de leste para oeste em baixas latitudes, haverá uma convergência em V_{iz} acumulando íons.

b) Convergência por Campos Elétricos
$U_x = U_y = 0$; $E_x > 0$ (ou $E_x < 0$ no hemisfério sul), $E_y < 0$
Neste caso o primeiro termo da equação 2.12 domina nas alturas onde $\omega_i >> \nu_i$. Nas alturas onde $\nu_i >> \omega_i$, o segundo termo da equação 2.12 domina. Íons poderão se adensar nas faixas de alturas entre 105 e 130 km, dependendo da direção exata do campo elétrico.

Ambas as equações (equação 2.11 e equação 2.12) são equivalentes e podem ser utilizadas tanto para os íons moleculares como para os íons metálicos. Como dito anteriormente, este mecanismo não é muito efetivo para os íons moleculares, que compreendem a maior parte do conteúdo iônico total da região E, uma vez que tais íons moleculares têm um tempo de vida menor do que o tempo de formação da camada. Portanto, os íons metálicos são considerados os íons primários nas camadas Es (KOPP, 1997).

2.4.3 Sazonalidade das camadas Es

A sazonalidade de camadas Es já é bem conhecida, sendo reportada por muitos autores (ABDU; BATISTA, 1977; WHITEHEAD, 1989; MATHEWS, 1998; HALDOUPIS et al., 2007). Esta característica se mostra bem pronunciada nos meses de verão para ambos os hemisférios e regiões de médias latitudes. Este comportamento, contudo, não é explicado pelo mecanismo de cisalhamento de ventos (WHITEHEAD, 1989). O entendimento do aumento da densidade eletrônica no solstício de verão foi possível apenas após estudos com dados de radares meteóricos. O ponto principal é a análise do conteúdo de íons metálicos, uma vez que eles possuem um papel essencial na formação da camada Es (MACDOUGALL et al., 2000). A Figura 2.5, tomada como exemplo, mostra uma comparação entre as médias diárias do número de meteoros obtidos em Juliusruh (44,37°N, 13,22°L) e Andenes (69,32°N, 16,13°L) e do parâmetro de frequência ordinária da camada Es, *fo*Es, definido no capítulo posterior, para o período de setembro de 2000 a dezembro de 2005. Os dados relacionados ao *fo*Es foram obtidos pela digissonda da região de Atenas (3,9°S, 38,45°N). A expressiva correlação entre esses parâmetros evidenciaram que a variação sazonal das camadas Es pode ser descrita em termos da variabilidade do conteúdo de íons metálicos (HALDOUPIS et al., 2007).

Recentemente, análises realizadas utilizando medidas de rádio ocultação provindo de GPS (*global positioning system*) têm dado informações de parâmetros atmosféricos incluindo flutuações na densidade eletrônica. Este método tem sido adequado para estudar a ocorrência global de camadas Es ao redor do mundo. Arras et al. (2008) estudou a distribuição de ocorrência das camadas Es durante o período de um ano através dessas medidas de rádio ocultação. A Figura 2.6 mostra a distribuição global para quatro estações do ano entre setembro de 2006 e agosto de 2007. Estas estações correspondem ao hemisfério norte e são representadas da seguinte maneira: equinócio de setembro na Figura 2.6a, solstício de dezembro na Figura 2.6b, equinócio de março na Figura 2.6c e solstício de junho na Figura 2.6d. A variabilidade sazonal condiz com outros resultados observados por ionossonda, na qual a camada Es exibe um máximo no verão.

Figura 2.5 - Comparação entre a variação anual do fluxo de entrada de meteoros para as regiões de Juliusruh e Andenes e dados do parâmetro *fo*Es obtidos da região de Atenas.
Fonte: Modificada de Haldoupis (2011)

Figura 2.6 - Distribuição global da ocorrência de camadas Es durante as quatro estações no hemisfério norte dos anos de 2006-2007.
Fonte: Arras et al. (2008)

2.4.4 Formação das camadas Es por ventos

Em regiões de baixas/médias latitudes a existência das camadas Es é devido à presença de ventos de marés, uma vez que estes ventos em direções opostas, possibilitam a convergência dos íons metálicos em uma altura específica. Como já mencionado, esse processo é denominado cisalhamento de ventos.

2.4.5 O mecanismo de cisalhamento de ventos

A teoria de cisalhamento de ventos é o mecanismo mais aceito para explicar a formação da camada Es de baixas/médias latitudes. Este processo físico foi proposto por Whitehead (1961) e Axford (1963). Simplificadamente, esta teoria se baseia na ideia que finas camadas de ionização podem se formar na região do dínamo da ionosfera por convergência vertical dos íons provindos pelo cisalhamento vertical nos ventos neutros horizontais (HALDOUPIS, 2011). Estes ventos podem ser originados de ondas de gravidade (HOOK, 1970; LANCHESTER et al., 2001; JAYACHANDRAN, 1991) ou de movimentos de marés (CHIMMONAS, 1971).

A Figura 2.7a ilustra o mecanismo de convergência de cargas pelo cisalhamento de ventos zonais, indicado na figura por $U_y\hat{\mathbf{y}}$. Os íons presentes na região E são arrastados pelo movimento do ar neutro. Na presença do campo magnético da Terra $\mathbf{B}$, estes íons estão sujeitos a uma força na direção $U_y\hat{\mathbf{y}} \times \mathbf{B}$, possuindo direção para cima nas altitudes em que o vento for para leste e para baixo onde o vento for para oeste. Este efeito provoca um acúmulo de cargas na altitude onde a direção do vento inverte o seu sentido de propagação (BATISTA, 2009). O mesmo processo de convergência vertical de íons pode estar associado aos ventos meridionais, conforme mostrado na Figura 2.7b. Neste caso, os íons são carregados pelos ventos horizontais enquanto, concorrentemente, eles são aprisionados pela força de Lorentz, fazendo-os girar ao longo das linhas de campo magnético inclinadas. Como resultado, os íons se movem na direção ao campo magnético e convergem para altura onde a direção do vento se torna nula (HALDOUPIS, 2011). Contudo, abaixo dos 115 km de altitude, onde as camadas Es são mais observadas, este mecanismo não é eficiente porque os íons são menos magnetizados, o que reduz o efeito da força de Lorentz sobre o movimento dos íons.

O processo de cisalhamento de ventos só é efetivo nas regiões nas quais $\mathbf{B}$ possui uma componente vertical, ou seja, fora do equador magnético. Por possuírem frequência de colisão bem menor do que a girofrequência, os elétrons não são arrastados pelo vento neutro. A neutralidade de cargas elétricas será mantida mediante o movimento

Figura 2.7 - Mecanismo de formação das camadas Es pela teoria dos cisalhamento de ventos: (a) zonal e (b) meridional.
Fonte: (a) Modificada de Carrasco (2005), (b) Modificada de Haldoupis (2011).

dos elétrons ao longo das linhas de campo magnético (BATISTA, 2009).

2.4.5.1 Ventos de marés na região E ionosférica

A grande parte dos ventos presentes na mesosfera/baixa termosfera ($\approx$ 80-120 km) são gerados pelas marés atmosféricas solares. Estas, por sua vez, são oscilações globais da atmosfera neutra geradas pelo aquecimento solar. Elas possuem períodos de 6 (quarterdiurna), 8 (terdiurna), 12 (semidiurna) ou 24 (diurna) horas, podendo se propagar tanto para leste quanto para oeste (SAULI; BOURDILLON, 2008). As marés solares são excitadas principalmente pela absorção da radiação solar pelo vapor d'água na troposfera e pela absorção da radiação Ultravioleta (UV) pelo ozônio na estratosfera (CHAPMAN; LINDZEN, 1970).

As marés diurnas geralmente possuem uma variabilidade sazonal na amplitude, apresentando seu máximo nos meses de março e setembro. Seu comportamento característico é transportar energia para cima, enquanto que sua fase se propaga com a altura para baixo. Já as marés semidiurnas, possuem uma variabilidade sazonal menos intensa e uma das suas características é a fase não se propagar com altura, sendo assim, dita quase evanescente (FORBES; GARRETT, 1979). Na região brasileira, têm sido realizados diversos estudos sobre as componentes meridional e zonal das marés atmosféricas. Batista et al. (2004) observaram que as amplitudes da marés diurnas e semidiurnas para a região de Cachoeira Paulista possuem uma variabilidade sazonal definida caraterizada por máximos valores nos equinócios e mínimos valores nos

solstícios. Para as marés terdiurnas foi verificado que as amplitudes possuem valores mais amenos e, portanto, não mostram uma variabilidade sazonal significativa. Análises e conclusões semelhantes foram realizadas para a região de Cariri (LIMA et al., 2007; BURITI et al., 2008) e Santa Maria (ANDRIOLI et al., 2009).

Os ventos de marés presentes nas alturas da região E ionosférica são essenciais na formação das camadas Es (MACDOUGALL, 1974; ABDU; BATISTA, 1977; WHITEHEAD, 1989; MATHEWS, 1998; HALDOUPIS, 2011; PRASAD et al., 2012). Estudos realizados com o radar de espalhamento incoerente de Arecibo (18° N; 66°W) indicaram que as marés diurnas e semidiurnas são os principais agentes que controlam a formação das camadas Es (MATHEWS, 1998; HALDOUPIS, 2011). Esse fato concorda com a teoria de cisalhamento de ventos para baixas e médias latitudes, uma vez que os ventos neutros na região E são dominados pelos ventos de marés (CHAPMAN, 1970). Um exemplo é mostrado na Figura 2.8, onde é apresentado um gráfico de altura-tempo-intensidade (gráfico de HTI) para alguns dias nos meses de março e julho de 1999, e abril de 1988 (HALDOUPIS, 2011). A intensidade do mapa HTI refere-se ao gradiente vertical de densidade eletrônica, com valores máximos perto do meio dia local. É possível identificar no gráfico a presença de três diferentes traços de camadas Es. Um deles inclui um traço diurno em baixas altitudes, em torno dos 100 km. Os outros dois traços aparecem em altitudes mais altas com características semidiurnas, um durante o dia e outro menos frequente durante a noite. Além disso, Haldoupis (2011) verificou que as marés semidiurnas são responsáveis por um movimento descendente das camadas Es em altas altitudes. Essas camadas são formadas por um cisalhamento presente na alta região E ou na baixa região F (150-180 km), mas somente se caracterizam como camadas Es quando decrescem em altura. Isto ocorre devido à presença dos processos de difusão do plasma, que impossibilita a convergência dos íons nessa região. Em contrapartida, em altitudes menores (90-110 km), a maré diurna se torna mais expressiva dominando a formação da camada Es.

Figura 2.8 - Gráfico de HTI durante os meses de março e julho de 1999, e abril de 1988 mostrando um padrão regular da ocorrência de camadas Es.
Fonte: Haldoupis (2011)

2.4.6 A camada Es equatorial

Em gráficos obtidos de sondadores ionosféricos (ionogramas), as instabilidades de deriva de gradiente podem se manifestar através de um traço espalhado e difuso. Esses espalhamentos foram reportados por vários autores (MATSUSHITA, 1951; COHEN et al., 1962; COHEN; BOWLES, 1963; REDDY; DEVASIA, 1973; WHITEHEAD, 1989) e são denominados camadas Es equatoriais (Es_q). A sua formação tem origem em irregularidades de plasma da corrente do EEJ, provenientes de correntes e gradientes de instabilidades existentes que fluem nessa região (FEJER; KELLEY, 1980). Em síntese, essas irregularidades ionosféricas são definidas como perturbações na densidade eletrônica local e são fortemente alinhadas ao campo geomagnético (DENARDINI, 1999). A análise espectral destes ecos mostraram a existência de duas assinaturas distintas dessas irregularidades, denominadas de tipo 1 ou instabilidade de dois-feixes modificada (*modified two-stream*) ou de irregularidades do tipo 2 ou deriva de gradiente (*gradient drift*). Entretanto, a formação da camada Es_q é geralmente atribuída a irregularidade de deriva de gradiente. As suas principais características são:

- aparecem geralmente em horários diurno;

- são camadas parcialmente transparentes aos sinais de rádio, não bloqueando as camadas mais altas;
- são vistas como um traço bem difuso que ocorre em uma altura equivalente a 100 km;
- a frequência máxima apresentada nos ionogramas não ultrapassa os 13 MHz; e
- múltiplos ecos das $\mathrm{E}s_q$ geralmente não são vistos.

À noite, há um desaparecimento da camada Es_q ocasionado pela reversão da corrente do EEJ, que pode ser comprovada observando-se o decréscimo na componente H do campo magnético **B**. Esse decréscimo ocorre devido a uma reversão temporária da polarização vertical Hall, que inverte a sua direção usual para cima, se estabelecendo para baixo. Dessa forma, o campo elétrico de polarização se torna oposto à direção do gradiente de densidade do plasma e inibe a instabilidade (DENARDINI, 2004). Portanto, nestes horários, a camada Es_q vai se enfraquecendo concorrentemente com o desaparecimento da instabilidade. Assim, durante esses períodos podem ocorrer também outros tipos de camadas Es, tais como Es_l, Es_a, Es_c e Es_h, as quais estão associadas a outros mecanismos de formação, geralmente os ventos de cisalhamento.

2.4.6.1 Instabilidade de deriva de gradiente

A instabilidade mais frequente observada na região brasileira é conhecida como a irregularidade de deriva de gradiente ou irregularidade do tipo 2. Esta instabilidade pode ser excitada se ocorrer uma diferença de velocidade entre elétrons e íons ($\mathbf{v}_d$) e numa região onde o gradiente de densidade eletrônica tem componente perpendicular à deriva, em plasmas não homogêneos, conforme a equação 2.13:

$$\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_e - \mathbf{v}_i. \tag{2.13}$$

Essa diferença de velocidade na região E é devida às distintas mobilidades que os íons e elétrons apresentam. Os elétrons são inteiramente magnetizados, diferentemente dos íons e suas velocidades são dadas por:

$$\mathbf{v}_e = \frac{(\mathbf{E} \times \mathbf{B})}{B^2}, \tag{2.14}$$

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_n + \frac{\omega_i^2}{\omega_i^2 + \nu_i^2}\left(\frac{(\mathbf{E} \times \mathbf{B})}{B^2} + \frac{\nu_i}{\omega_i}\frac{\mathbf{E}}{B}\right). \tag{2.15}$$

Este distinto comportamento dos elétrons e íons somente existe numa faixa estreita entre 90 e 105 km e, portanto, apenas nestas alturas é possível que essa instabilidade se excite. Se o plasma é tratado como um fluido, a relação de dispersão dessa instabilidade pode ser obtida de uma forma simples, produzindo a velocidade de fase da irregularidade (equação 2.16) (SCHLEGEL, 1996).

$$v_{ph} = \frac{\omega}{k} = \frac{v_d cos(\phi)}{1+\psi}. \tag{2.16}$$

A taxa de crescimento é dada pela expressão 2.17:

$$\gamma = \frac{\psi}{1+\psi}\left[\frac{(\omega^2 - k^2 C_s^2)}{\nu_i} + \frac{\omega_e \omega}{\nu_e k L}\right]. \tag{2.17}$$

O termo L é a escala de comprimento do gradiente de densidade:

$$L = \left(\frac{1}{n_e}\frac{dn_e}{dx}\right)^{-1}. \tag{2.18}$$

Este mecanismo das irregularidades de deriva está ilustrado na Figura 2.9, na qual a linha horizontal representa um estado ionosférico não perturbado. O campo elétrico vertical ($\mathbf{E}_p$) e o gradiente de densidade eletrônica estão direcionados para cima. Uma perturbação pequena com amplitude senoidal é aplicada na densidade eletrônica. Em resposta a essa perturbação e devido ao fato da deriva de íons ser menor que a deriva Hall dos elétrons, campos de polarização secundários $\delta\mathbf{E}$ são criados. Estes, por sua vez, induzem um deslocamento da densidade eletrônica na direção $\delta\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. Como resultado, essas derivas verticais tendem a amplificar as perturbações de densidade, as quais parecem crescer em relação à densidade de fundo.

Figura 2.9 - Representação simplificada do mecanismo de instabilidade de deriva de gradiente no eletrojato equatorial diurno.
Fonte: Adaptada de Fejer e Kelley (1980)

2.4.7 Efeito dos campos elétricos na formação de camadas Es em baixas e médias latitudes

O movimento dos íons na ionosfera é causado pela a ação combinada entre as componentes do vento e do campo elétrico (CARRASCO, 2005). Em médias latitudes, entretanto, os campos elétricos do dínamo da região E são omitidos pois sua contribuição para a formação das camadas Es em relação à influência dos ventos é desprezível (HALDOUPIS et al., 2006). De fato, Dagar et al. (1977) através de modelos de ventos e campos elétricos zonal, mostraram que o efeito do campo elétrico na formação das camadas Es só é efetivo em regiões cuja inclinação magnética é menor que 2 graus, conforme apresentado na Figura 2.10. Nesta Figura é apresentado o perfil latitudinal do pico de densidade eletrônica da camada Es, calculado a 110 km, em função do ângulo de inclinação.

Esse perfil mostra separadamente o efeito do campo elétrico (NeE), o efeito dos ventos (NeU) e o efeito combinado de ambos (NeT). O foco principal do estudo de Dagar et al. (1977) foi presenciar camadas Es características de médias e baixas latitudes em regiões equatoriais. Não serão detalhados quais modelos foram utilizados. O objetivo é somente salientar que os ventos neutros são mais efetivos na formação de camadas Es a partir de 2 graus de inclinação. Da Figura 2.10 nota-se que o pico de densidade eletrônica devido ao efeito do campo elétrico zonal somente mostra um aumento em valores inferiores a 2 graus. A partir disso, este efeito decai e tende para um valor constante. Em relação ao efeito do vento, o pico de densidade eletrônica ocorre em torno dos 6 graus e permanece constante para valores mais altos do ângulo de inclinação magnética. Portanto, fica evidente a partir do trabalho de Dagar et

Figura 2.10 - Perfil do pico de densidade eletrônica da camada Es calculado em 110 km em função do ângulo de inclinação.
Fonte: Modificada de Dagar et al. (1977).

al. (1977) que em regiões de médias e baixas latitudes o mecanismo de convergência devido aos ventos neutros é predominante.

Além disso, Nygren et al. (1984) ressaltaram que, em determinadas localidades, a convergência dos íons pelos ventos zonal tem uma contribuição do campo elétrico vertical. De fato, em baixas latitudes, os campos elétricos associados ao dínamo da região F podem causar influência significativa nas camadas Es. Um estudo realizado por Abdu et al. (2003) mostrou que o acoplamento entre as regiões E e F podem interferir nas camadas Es. O acoplamento mencionado controla a deriva vertical presente na região F e pode ser explicado em função dos campos elétricos presentes nos dínamos de ambas as regiões ionosféricas. Durante o dia, o campo elétrico da região E, através da alta condutividade das linhas de campo geomagnético, é mapeado para a região F causando uma deriva de plasma. Durante a noite, em contrapartida, o acoplamento entre as regiões E e F diminui devido ao decréscimo da condutividade na região E e campos elétricos de polarização são estabelecidos na região F (BATISTA et al., 1986; HEELIS et al., 1974). Ao entardecer, essa interação causa uma intensificação no campo elétrico zonal denominado pico de pré-reversão.

A Figura 2.11 apresenta parâmetros ionosféricos obtidos da digissonda, detalhados no próximo capítulo, para a região de Fortaleza (3,9°S, 38,45°O, I: -9°) para alguns dias durante os meses de março (Figura 2.11a) e dezembro de 1988 (Figura 2.11b). Na parte superior das figuras está plotado o parâmetro de altura virtual da região F

(h'F). Já na parte inferior, encontra-se o parâmetro de frequência de topo da camada Es (ftEs), definida como a máxima frequência que a camada Es pode alcançar. O parâmetro V_{zp} refere-se à velocidade do pico deriva vertical do plasma.

Figura 2.11 - Parâmetros h'F (parte superior) e ftEs (parte inferior) para o período de (a) março de 1988 e (b) dezembro de 1988.
Fonte: Modificada de Abdu et al. (2003).

Primeiramente, o pico de pré-reversão é observado pelo rápido aumento do parâmetro h'F em torno dos horários do pôr-do-sol, mostrado pela linha vertical às 18 LT (*local time*). Este fenômeno é mais pronunciado na Figura 2.11b. Analisando o parâmetro relacionado com a camada Es (ftEs), observa-se eventos distintos entre as Figuras 2.11a e 2.11b. Na primeira, relacionada ao mês de março, a camada Es se apresenta com um comportamento típico. Já na segunda, relativa ao mês de dezembro, observa-se um abrupto desaparecimento da camada Es concorrente com o aumento do parâmetro h'F. A camada Es volta a se estabelecer após 3 horas, aproximadamente. Deste estudo, infere-se que o desaparecimento da camada Es está intimamente relacionado com eventos de picos de pré-reversão acentuados.

Abdu et al. (2003) analisaram a convergência vertical das velocidades dos íons res-

ponsável pela formação das camadas Es, a qual pode ser analisada pela equação 2.19:

$$\frac{dv_z}{dz} = \frac{1}{R_i}\left[-\frac{E_z}{B \cdot H_n} + \frac{d}{dz}\frac{E_z}{B} + \frac{U_y}{H_n} - \frac{dU_y}{dz}\right] + \frac{E_y}{B}\frac{2}{R_i^2 \cdot H_n}, \tag{2.19}$$

onde $R_i = \nu_i/\omega_i$, $H_n = R_i/(dR_i/dz)$ é a altura de escala e h é a altura. O sistema de coordenadas definido apresenta eixo x na direção do norte magnético, eixo y na direção leste e eixo z para baixo.

Verifica-se que para produzir a convergência de ionização para a formação da camada Es, através do mecanismo de cisalhamento de ventos, é necessário um gradiente de velocidade negativa (ABDU et al., 2003). De acordo com a equação 2.19 é possível inferir que um vento zonal constante para oeste, independente da altura ($U_y < 0, \frac{dU_y}{dz} = 0$), pode produzir um gradiente vertical negativo, possibilitando a convergência dos íons. A análise presente em Abdu et al. (2003) mostra que a interferência de um campo elétrico direcionado para cima pode contrapor o efeito dos ventos para oeste causando a ruptura da camada esporádica, conforme visto na figura 2.11b. Em determinadas condições, essa influência do campo elétrico pode ser notável. Uma delas é a sua intensificação durante o evento de pico de pré-reversão. Durante esses horários, o campo elétrico de polarização na região F afeta o acúmulo de cargas enfraquecendo o mecanismo dos ventos e, por conseguinte, a camada Es. Após 3 horas, quando a camada Es volta a se restabelecer, significa que o campo elétrico E_z já mudou sua direção, o que favorece o processo de convergência de cargas elétricas (CARRASCO, 2005).

3 METODOLOGIA E ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo será apresentado um embasamento teórico sobre a análise dos dados experimentais utilizando o radar de frequência variável na banda HF, denominado digissonda. Além disso, será apresentado o método para a obtenção dos dados de ventos observacionais e campos elétricos para o estudo das camadas Es.

3.1 Sondagem ionosférica

A emissão das ondas eletromagnéticas incluindo a banda de Alta-Frequência (HF), varrendo uma faixa de 1 a 30 MHz, fornece a variação de densidade eletrônica com a altitude denominado perfil ionosférico. Basicamente, essas ondas são emitidas nessas frequências em forma de sinais pulsados e ao incidirem na ionosfera podem ser refletidas. Essa reflexão ocorre quando a densidade eletrônica da região ionosférica tenha um valor proporcional à raiz quadrada da frequência do sinal emitido (REINISCH, 1986).

Quando as ondas em HF penetram na ionosfera, elas dividem-se em duas e se propagam de forma independentemente até serem refletidas. Essas ondas são denominadas ondas ordinárias (Figura 3.1a) e ondas extraordinárias (Figura 3.1b) (DAVIES, 1965; RATCLIFFE, 1962). A reflexão da onda ordinária ocorre na altura em que a frequência da onda é igual à frequência do plasma, mostrada na equação 3.1, ou seja, X=1:

$$f_p = (\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_o})^{1/2}, \quad X = \frac{f_p^2}{f^2}, \tag{3.1}$$

onde e é a carga do elétron, n_eé a densidade eletrônica, m_e é a massa dos elétrons, ϵ_o é a permissividade elétrica no vácuo, f_p é a frequência de plasma e f é a frequência da onda transmitida. As ondas ordinárias quando adentram na ionosfera fazem com que os elétrons sejam acelerados pelo campo elétrico de forma paralela ao campo magnético e, assim, a reflexão dessa onda não sofrerá alteração do seu comportamento. Já, para a onda extraordinária, o sinal é refletido quando a relação na equação 3.2 é obedecida:

$$X = 1 - Y, \quad Y = \frac{f_H}{f}, \tag{3.2}$$

onde f_H é a girofrequência do elétron.

3.2 Digissonda

A digissonda é um tipo de equipamento de sondagem ionosférica que se caracteriza por ser um radar de alta frequência constituído de um transmissor acoplado a antena

Figura 3.1 - Movimento dos elétrons pelo campo elétrico nos níveis de reflexão pela (a)Onda ordinária e (b) Onda extraordinária.
Fonte: Davies (1965)

transmissora, o qual emite curtos pulsos na faixa de rádio-frequência. Ela também possui um sistema receptor com um conjunto de antenas e circuitos de detecção dos sinais recebidos, que registra a intensidade do pulso refletido nas camadas ionosféricas e o tempo decorrido entre a transmissão e a recepção, o ângulo de chegada do sinal e o deslocamento Doppler. Em geral, os pulsos são transmitidos com potência de pico da ordem de 10 kW e potência média em torno de 500 W. Basicamente, a digissonda capta medidas ionosféricas simultâneas de sete parâmetros do sinal refletido, os quais são: altura virtual *h'*, a amplitude e a fase do sinal refletido, o ângulo de incidência, a polarização da onda eletromagnética (isto é, se o sinal de eco refletido é ordinário ou extraordinário), o deslocamento Doppler da frequência transmitida devido ao movimento do alvo refletor e, também, a curvatura da frente de onda (REINISCH, 1986). Os dados coletados pela digissonda são ecos do sinal refletido pelas camadas ionosféricas de densidade correspondente à frequência do sinal transmitido. Os pulsos transmitidos são refletidos em regiões onde a frequência do plasma ionosférico é igual à frequência do pulso no vácuo. Um exemplo do funcionamento desse processos está ilustrado na Figura 3.2.

Estes ecos são registrados em ionogramas, gráficos das alturas virtuais das camadas de reflexão versus a frequência do sinal que foi refletido. A partir dos ionogramas

Figura 3.2 - Processo de reflexão na ionosfera utilizando Digissonda.
Fonte: Modificada de UMass Lowell Center for Atmospheric Research/ Digisonde DPS (2000)

é possível obter parâmetros ionosféricos das diferentes camadas (REINISCH, 1986). Os dados brutos recebidos estão encriptados em um formato denominado TAP, ou modernamente em um formato denominado GRM. Este formato contém, além dos dados básicos, a informação da interpretação automática feita pelo programa *Automatic Real-Time Ionogram Scaler with Trueheight* (*Artist*). O *Artist* é uma coleção de programas que retiram as informações sobre a ionosfera a partir da potência do sinal versus dados de altura e frequência do ionograma. O programa usado para a análise é o *SAO-Explorer* (SAO-X), o qual permite fazer revisão da redução automática dos ionogramas. A Figura 3.3 mostra as diversas telas para manipulação e visualização dos ionogramas e parâmetros ionosféricos que podem ser obtidas com o programa *SAO-Explorer*.

Figura 3.3 - Ilustração de diversas telas para manipulação e visualização dos ionogramas e parâmetros ionosféricos, obtidos através do programa *SAO Explorer*.

Para este estudo, foram utilizadas as informações dos parâmetros obtidos nos ionogramas referentes às camadas Es. De acordo com sua aparência nos ionogramas, as camadas Es são classificadas em tipos distintos identificados por letras minúsculas. Dentre estes, pode-se citar: "f" (*flat*), "l" (*low*), "c" (*cusp*), "h" (*high*), "q" (*equatorial*), "a" (*auroral*) e "s" (*slant*). Os tipos mais comuns observados em médias e baixas latitudes estão mostrados na Figura 3.4. Estes são causados pelo mecanismo de cisalhamento de ventos e a sua forma nos ionogramas se dá pelo tipo dominante do vento presente. Um ponto importante a salientar é que as camadas dos tipos "f"/"l" possuem as mesmas características. Contudo, uma ocorre durante o período noturno e a outra no período diurno, respectivamente.

A Figura 3.5 apresenta observações de camadas Es_q em regiões equatoriais de Trivandrum (8,34° N, 76,58° L, I: 0,5°) e de São Luís obtidas de sondadores ionosféricos durante os horários diurnos. É observado em torno dos 100 km, para ambas regiões, um espalhamento difuso e transparente sobre uma larga faixa de frequências. Nota-se que quando a camada Es_q está presente, a visualização da região E nos ionogramas se torna difícil.

Figura 3.4 - Alguns tipos de camadas Es aferidos por ionogramas.
Fonte: Modificada de Resende (2010)

Figura 3.5 - Camadas Es$_q$ em regiões equatoriais obtidas de sondadores ionosféricos para a região de Trivandrum (a) e São Luís (b).
Fonte: Whitehead (1989) (a) e Resende (2010) (b)

3.2.1 Redução dos parâmetros da digissonda

Os parâmetros utilizados para o estudo das camadas Es são:

- Frequência máxima do traço ordinário da camada Es, abreviada por *fo*Es;
- Frequência de bloqueio da camada Es (*fb*Es), definida como a frequência

até a qual a camada Es bloqueia o recebimento de ecos de regiões mais altas da ionosfera;

- Altura virtual da camada Es, indicada por h'Es.

A Figura 3.6 mostra um ionograma contendo os parâmetros de frequência, foco deste trabalho. Note que nestes gráficos o que se obtém é o parâmetro de frequência de topo da camada Es (ftEs), uma vez que a distinção do traço ordinário ou extraordinário da onda não é singular. Assim, o parâmetro foEs é adquirido através da relação mostrada na equação 3.3:

Figura 3.6 - Ionograma mostrando os parâmetros de frequência utilizados neste trabalho.

$$foEs = ftEs - \frac{f_H}{2}. \tag{3.3}$$

3.3 Processamento e análise dos dados experimentais

Neste estudo foram utilizados dados obtidos por digissondas instaladas em São Luís e Cachoeira Paulista. A análise desses dados incluiu a classificação de dois tipos de camadas Es, as que bloqueiam as regiões superiores, denominadas Es_b, e as que não bloqueiam, denominadas Es_{nb}. O critério utilizado para as camadas Es_{nb} é baseado

nas regiões de espalhamentos da irregularidade, geralmente aparentes em ionogramas equatoriais, mas que não bloqueiam as regiões superiores. Uma vez que, em algumas ocasiões, a “detecção" da camada Es_q se torna difícil devido a presença conjunta de outras camadas, pode haver uma incerteza na classificação. Por sua vez, as camadas Es_b são aquelas que bloqueiam as regiões superiores e podem ser classificadas com letras minúsculas. Assim, a fim de simplificar a análise dos dados, foi adotada a nomenclatura como Es_b e Es_{nb}.

Em uma análise preliminar, realizou-se um levantamento da presença das camadas Es_b nas regiões equatoriais, entre os anos 1996 e 2009 (Figura 3.7). A metodologia de análise desse resultado foi feita, inicialmente, contabilizando para cada horário de 15 minutos a presença de uma camada Es_b ou Es_{nb}. Em seguida, realizou-se uma soma para cada horário e, por fim, uma normalização em que o número de dias que houve ocorrência das camadas Es_b foi dividido pelo número de dias em que se teve dados de digissonda naquele ano. Na Figura 3.7 é possível observar que a partir de 2003, a presença de Es_b se torna mais significativa, evidenciando o enfraquecimento da corrente do EEJ em São Luís (ABDU, 1997). Em 2008, não houve dados de digissonda para a região de São Luís.

Figura 3.7 - Análise da presença das camadas Es_b em São Luís no período de 1996 a 2009.

Na análise dos ionogramas foi visto claramente que, em São Luís, a partir de 2003, há uma competição entre o mecanismo de formação das camadas Es. Exemplos desses casos são mostrados nas Figuras 3.8 - 3.11, onde estão selecionado ionogramas

para os anos de 2000, 2005, 2009 e 2013, respectivamente. No ano 2000 (Figura 3.8), as camadas Es_b não tem uma ocorrência muito significativa. Os horários dos ionogramas são de 09 UT às 1645 UT, onde é possível observar uma fraca camada de bloqueio (Es_c) em 0945 UT e 10 UT. Após este horário, apenas a região E ionosférica é aparente e perdura até às 1430 UT. A partir desse horário (1445 UT) ocorre uma camada de irregularidade, denominada Es_{nb} ou Es_q. A camada Es_q é vista claramente até as 1615 UT e, após, ela vai se enfraquecendo. O comportamento desses ionogramas é típico para regiões próximas ao equador magnético.

Nos anos de 2005 e 2009 a presença de camadas Es_b se torna mais frequente, como visto nos exemplos das Figuras 3.9 e 3.10. Em 2005 os ionogramas apresentados são nos horários de 12 UT às 1945 UT. Às 12 UT, a presença da camada Es, em torno dos 100 km, parece ser devido às irregularidades do EEJ. Este tipo de camada perdura até às 1615 UT, quando uma nova camada Es surge e começa a bloquear as regiões superiores. Às 1915 UT a camada Es começa a enfraquecer, fato comum no período noturno em São Luís. No exemplo do ano de 2009, a camada Es_b inicia às 11 UT e perdura ao longo de todo o dia. Os ionogramas apresentados na Figura 3.10 vão até às 1550 UT, uma vez que nas próximas horas a camada Es_b assemelha-se às observadas nos ionogramas anteriores. Enfim, a Figura 3.11 apresenta a sequência dos ionogramas para o ano de 2013, nos horários de 1240 UT às 1750 UT, onde a camada Es_{nb} já não aparece em nenhum ionograma, confirmando o afastamento do equador magnético (ABDU, 1997).

Portanto, o objetivo inicial deste trabalho é contribuir para um melhor entendimento dos processos de competição entre ventos e campos elétricos na formação das camadas Es. Como há o afastamento do equador magnético em São Luís, será possível analisar a dominância do processo de formação da camada Es. Assim, foram escolhidos dois anos de dados de digissonda, 2005 e 2009, com atividade solar baixa para extrair somente informações dos processos dessa competição. Além disso, para a análise de camadas Es em baixas latitudes foi também estudada a região de Cachoeira Paulista, a fim de validar e comparar as teorias apresentadas neste trabalho. Os anos escolhidos para Cachoeira Paulista foram 2005 e 2008 e não foram conjuntos devido a ausências de dados. Os dados analisados foram trabalhados de acordo com as estações do ano, verão, outono, inverno e primavera.

Figura 3.8 - Sequência de ionogramas para a região de São Luís-MA, mostrando a evolução das camadas Es no dia 01/01/2000 nos horários de 09 UT às 1645 UT.

Figura 3.9 - Sequência de ionogramas para a região de São Luís-MA, mostrando a evolução das camadas Es no dia 11/01/2005 nos horários de 12 UT às 1945 UT.

Figura 3.10 - Sequência de ionogramas para a região de São Luís-MA, mostrando a evolução das camadas Es no dia 13/12/2009 nos horários de 1040 UT às 1550 UT.

Figura 3.11 - Sequência de ionogramas para a região de São Luís-MA, mostrando a evolução das camadas Es no dia 21/07/2013 nos horários de 1240 UT às 1750 UT.

3.4 Análise de ventos de marés nas regiões brasileiras

Neste trabalho, para o cálculo de ventos de marés foi utilizado o radar meteórico do tipo SKiYMET. Para os propósitos deste estudo, pode-se resumir o seu funcionamento como sendo o de medir os ventos neutros por efeito Doppler dos ecos meteóricos detectados (ANDRIOLI et al., 2009). Especificamente, as ondas eletromagnéticas, emitidas por este radar, são refletidas pela trilha meteórica e, assim, carregam informações sobre os ventos neutros.

O radar meteórico SKiYMET é um sistema que possui visada de todo céu e opera numa frequência de 35,24 MHz, com uma taxa de 2144 pulsos por segundo. Esses pulsos são refletidos pelos rastros ionizados deixados pela ablação dos meteoros. Os ecos desses pulsos são detectados em 5 antenas receptoras, dispostas em forma de cruz assimétrica, as quais constituem um interferômetro, esquematizado na Figura 3.12. Assim, as velocidades dos ventos são determinadas a partir de uma combinação das velocidades radiais de cada meteoro detectado em todo o céu, entre aproximadamente 80 e 100 km de altitude (HOCKING et al., 2001; ANDRIOLI, 2008; ANDRIOLI et al., 2009; PAULINO, 2010).

Figura 3.12 - Representação do funcionamento do radar meteórico - SKiYMET.
Fonte: Adaptada de Andrioli (2008)

No Brasil existem três regiões em que o radar SKiYMET está instalado, a saber:

Cachoeira Paulista, São João do Cariri ($7,38°$ S; $36,51°$ O) e Santa Maria ($2,5°$ S; $44,30°$ O). Nesse estudo, as medidas dos ventos utilizadas se concentraram em Cachoeira Paulista, representando uma região de baixa latitude. Para a análise de São Luís foram utilizados dados do radar instalado em São João do Cariri, como uma aproximação referente a uma região equatorial. Para se trabalhar com as medidas, ditas brutas, desse radar, Andrioli (2008) desenvolveu um modelo que tem a capacidade de extrair as componentes dos ventos zonal e meridional. Portanto, esse modelo fornece os parâmetros dos ventos de marés entre 80 e 100 km a um passo de 2,5 km. Especificamente, é possível obter para cada altura as componentes zonal e meridional dos ventos das marés diurnas, semidiurnas e terdiurnas utilizando o método de mínimos quadrados através da equação 3.4:

$$V(h,t) = V_o + V_1 cos(\frac{2\pi}{24}(t-\phi_1)) + V_2 cos(\frac{2\pi}{12}(t-\phi_2)) + V_3 cos(\frac{2\pi}{8}(t-\phi_3)), \quad (3.4)$$

onde V_o é o vento médio, V_1 é amplitude da maré diurna, ϕ_1 é a fase da maré diurna, V_2 é amplitude da maré semidiurna, ϕ_2 é a fase da maré semidiurna, V_3 é amplitude da maré terdiurna, ϕ_3 é a fase da maré terdiurna.

A partir dos 100 km, é necessário definir um método para a obtenção desses parâmetros. Nesse trabalho foram feitos ajustes distintos para cada componente zonal e meridional levando em consideração o que mais se aproxime da teoria. Assim, para a amplitude das marés diurna foi ajustada uma curva de Lorentz descrita por

$$U_0 = y_0 + \frac{2 \cdot A_0}{\pi} \cdot \frac{w}{(4 \cdot (h-h_0)^2) + w^2} \ , \quad (3.5)$$

onde U_0 é a amplitude do vento, h é a altura e y_0, A_0, h_0 e w são os parâmetros ajustados. Já as marés semidiurnas foram ajustadas utilizando uma função Gaussiana, descrita por

$$U_0 = y_0 + A_0 \cdot \exp\left\{-\frac{(h-h_0)^2}{4 \cdot w^2}\right\} \ . \quad (3.6)$$

Um exemplo da componente meridional é mostrado na Figura 3.13 para o verão (janeiro, fevereiro e dezembro) na região de São João do Cariri em 2005.

Na Figura 3.14 é mostrada a fase média para a mesma componente, época (estação) e ano do ajuste da amplitude. Nesse caso foi realizado um ajuste linear (linha vermelha) que possibilita obter a equação da reta ($y = a \cdot x + b$) e, assim, pode-se estimar esses parâmetros em alturas maiores que 100 km.

Além da extrapolação dos dados para alturas maiores, as funções de ajuste linear da

Figura 3.13 - Ajustes das amplitudes dos ventos das marés diurnas (a) e semidiurnas (b) da componente meridional para a estação de verão na região de Cariri em 2005.

Figura 3.14 - Ajustes lineares das fases das marés diurnas (a) e semidiurnas (b)da componente meridional para a estação de verão na região de Cariri em 2005.

fase foram utilizadas para obter o comprimento de onda vertical. No caso é inferido que o coeficiente linear da reta retorna a variação em altura da fase. Assim, para obter o comprimento de onda vertical basta multiplicar o coeficiente linear por 24 para a maré diurna, por 12 para semidiurna e 8 a maré terdiurna. Vale ressaltar que, os dados das marés terdiurnas para ambas as regiões estão com diversas falhas e sem muita precisão, impossibilitando assim, a análise dessa componente.

Os parâmetros ajustados tanto para amplitude como para fase relativos aos períodos analisados estão mostrados no Apêndice A.

3.5 Cálculo do campo elétrico equatorial

Para estimar os campos elétricos zonal e vertical em São Luís, que é uma região considerada ter influência da corrente do EEJ no período escolhido para o estudo das Es, usa-se o Radar de Espalhamento Coerente (RESCO). Ele foi construído com o objetivo de estudar as irregularidades existentes na região E ionosférica e está instalado no Observatório Espacial de São Luís. Sucintamente, são calculadas as velocidades de fase das irregularidades de plasma utilizando a relação

$$V_\phi = V_D.(1 + \omega_o)^{-1}, \tag{3.7}$$

onde ω_o é o fator anisotrópico correspondente da região do EEJ e V_D é a velocidade Dopller obtida pelo radar.

Assim, o campo elétrico de polarização do EEJ (E_z) é calculado através da relação vetorial $\mathbf{V} = \mathbf{E} \times \mathbf{B}/B^2$, onde $\mathbf{V}$ é o vetor velocidade de fase da irregularidade (sentido positivo para oeste); $\mathbf{E}$ é vetor campo elétrico (sentido positivo para cima) e $\mathbf{B}$ é o vetor campo magnético (sentido positivo para norte). O vetor $\mathbf{B}$ foi adquirido através do modelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) para a região de São Luís.

A partir da componente vertical do campo elétrico E_z, é possível inferir a componente zonal do campo elétrico, E_y, através da equação 3.8 que está relacionada com as condutividades Pedersen (σ_1) e Hall (σ_2) (KELLEY, 1989). O método utilizado para obter as condutividades e mais detalhes sobre a obtenção desses campos elétricos bem como especificações sobre o radar RESCO são descritos em Denardini (2004).

$$E_z = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \cdot E_y. \tag{3.8}$$

3.6 Cálculo do campo elétrico em regiões fora do equador

Como já dito anteriormente, a importância do campo elétrico na formação das camadas Es em regiões fora da influência do equador magnético não é um fator significativo. Contudo, em casos específicos como os mostrados e discutidos anteriormente em Abdu et al. (2003), Carrasco (2005), Abdu et al. (2013), o campo elétrico presente pode influenciar as camadas Es. A fim de averiguar esse comportamento, será analisado o campo elétrico zonal e vertical em baixas latitudes, ou seja, para a região de Cachoeira Paulista. Para este propósito, será utilizada a mesma metodo-

logia usada por Carrasco (2005), que admite que os campos elétricos na região F equatorial podem ser mapeados para as região E de baixas latitudes.

Para a análise é necessário obter o campo elétrico vertical no equador magnético da região F (E_z) e, neste caso, a região de São Luís foi usada como uma aproximação. Esse campo elétrico é dado pela expressão (HAERENDEL et al., 1992):

$$E_z = E_y \frac{\int \sigma_2 ds}{\int \sigma_1 ds} - \frac{\int \sigma_1 U_y B ds}{\int \sigma_1 ds}, \tag{3.9}$$

onde E_y é o campo elétrico zonal e U_y é o vento zonal termosférico da região F.

Para obter o parâmetro E_y foram utilizados os dados de deriva vertical da região F ionosférica em São Luís. Essa deriva vertical ionosférica é produzida pela interação do plasma com o campo elétrico zonal e o campo magnético da Terra e pode variar sua intensidade, por exemplo, de acordo com o fluxo solar, intensificação de campos elétricos ou até mesmo tempestades magnéticas (FEJER et al., 1979; FEJER et al., 1981; BATISTA et al., 1996; ABDU, 1997). Um exemplo de deriva é mostrado no gráfico da Figura 3.15 para o dia 02 de agosto de 2005 em São Luís. Durante o dia, a deriva ionosférica foi obtida pelo modelo de Fejer e Scherliess (1997) e durante a noite foram utilizados os dados do parâmetro de altura virtual da camada F (h'F), uma vez que o modelo de deriva de Fejer e Scherliess (1997) não fornece valores realísticos para os horários do pico de pré-reversão. Portanto, a deriva noturna é obtida da relação dada na expressão:

$$V_z = \frac{\triangle h'F}{\triangle t}. \tag{3.10}$$

A partir da deriva vertical é possível obter o campo elétrico zonal, como mostrado na equação:

$$E_y = V_z B. \tag{3.11}$$

Os parâmetros U_y, B, e σ_1 e σ_2 são obtidos através dos modelos Horizontal Wind Model 07 (HWM07), IGRF e o modelo de condutividades integradas ao longo de linha de campo feito por Carrasco (2005), respectivamente.

A partir de todos os parâmetros obtidos, foi possível inferir o campo elétrico vertical no equador. Nesse caso, a altura do topo da linha de campo magnético que correspondente à região de Cachoeira Paulista situa-se em 800 km (Figura 3.16). Assim, as componentes do campo elétrico em Cachoeira Paulista podem ser obtidas utilizando o mapeamento do campo elétrico vertical equatorial.

Figura 3.15 - Deriva vertical da região F para o dia 26 de setembro de 2005 em São Luís-MA.

Figura 3.16 - Representação das linhas de campo magnético mostrando a possibilidade de mapeamento dos campos elétricos.

4 O MODELO IONOSFÉRICO DA REGIÃO E - MIRE

Carrasco (2005) desenvolveu um modelo ionosférico da região E, denominado MIRE, que calcula os perfis verticais de densidade de plasma desta região e a evolução temporal da camada Es entre 86 e 140 km de altitude. Em síntese, os perfis de concentração iônica na ionosfera são determinados pelos processos químicos e de transporte. Em geral, a variação temporal da concentração de cada espécie iônica é definida pela equação da continuidade, conforme descrito na equação 4.1:

$$\frac{\partial[N_i]}{\partial t} = P - L - \nabla \cdot (\mathbf{V}_i[N_i]), \tag{4.1}$$

na qual $[Ni]$ é a densidade numérica de um íon em particular, $\mathbf{V}_i$ é a velocidade dos íons, $\mathbf{V}_i[N_i]$ é o fluxo dos íons e P e L são, respectivamente, a taxa de produção e de perda de um íon em particular por unidade de volume. O último termo no lado direito da equação da continuidade é o termo de transporte, representado pela divergência do fluxo de plasma. Neste termo, embora as variações horizontais possam existir, elas não necessariamente contribuem de forma significativa por serem muito menores que as variações verticais (RISHBETH; GARIOTT, 1969). Nestas condições, o termo de divergência pode ser escrito segundo a equação 4.2.

$$\nabla \cdot (\mathbf{V}_i[N_i]) = \frac{\partial(V_{iz}[N_i])}{\partial z}. \tag{4.2}$$

Portanto, tem-se:

$$\frac{\partial[N_i]}{\partial t} = P - L - \frac{\partial(V_{iz}[N_i])}{\partial z}, \tag{4.3}$$

onde V_{iz} é a velocidade dos íons na direção vertical.

Assim, o modelo MIRE resolve numericamente um conjunto de equações da continuidade referente à densidade para os íons moleculares mais importantes na região E e para os íon metálicos Fe^+ e Mg^+. Estes íons metálicos foram considerados os mais significantes na formação das camadas Es devido à sua abundância (CARTER, 1999). As equações da continuidade, 4.4 a 4.9, são obtidas através das reações químicas da região E, apresentadas nas tabelas do Capítulo 2. As letras minúsculas q e j referem-se às taxas de produção de fotoionização e as letras k e γ se referem às taxas de perda. Vale ressaltar que as taxas de produção e perda para o íon metálico Mg^+ (j' e γ' da equação 4.9) foram consideradas como sendo a metade das taxas do Fe^+. Ainda, nas equações 4.4 e 4.5, os íons O^+ e N_2^+ encontram-se em equilíbrio

fotoquímico, ou seja, o termo de transporte não é considerado porque estes íons são minoria na região E.

$$[O^+] = \frac{q_{O^+}}{k_1[O_2] + k_2[N_2]}, \tag{4.4}$$

$$[N_2^+] = \frac{q_{N_2^+}}{k_3[O] + k_4[O_2]}, \tag{4.5}$$

$$\frac{\partial[O_2^+]}{\partial t} = Q_{O_2^+} - k_5[O_2^+][NO] - \alpha_{O_2^+}[O_2^+]n_e - \frac{\partial(V_{O_2^+}[O_2^+])}{\partial z}, \tag{4.6}$$

$$\frac{\partial[NO^+]}{\partial t} = Q_{NO^+} - k_5[O_2^+][NO] - \alpha_{NO^+}[NO^+]n_e - \frac{\partial(V_{NO^+}[NO^+])}{\partial z}, \tag{4.7}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial[Fe^+]}{\partial t} &= [Fe]j_1 + [Fe]([NO^+]\gamma_{13} + [O_2^+]\gamma_{14} + [O^+]\gamma_{15}) - n_e[Fe^+]\gamma_2 - \\ &- [N_2][Fe^+]([O_2]\gamma_{10} + [N_2]\gamma_{11} + [O]\gamma_{12}) - \frac{\partial(V_{Fe^+}[Fe^+])}{\partial z}.\end{aligned} \tag{4.8}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial[Mg^+]}{\partial t} &= [Mg]j_1' + [Mg]([NO^+]\gamma_{13}' + [O_2^+]\gamma_{14}' + [O^+]\gamma_{15}') - n_e[Mg^+]\gamma_2' - \\ &- [N_2][Mg^+]([O_2]\gamma_{10}' + [N_2]\gamma_{11}' + [O]\gamma_{12}') - \frac{\partial(V_{Mg^+}[Mg^+])}{\partial z}.\end{aligned} \tag{4.9}$$

Os termos $Q_{O_2^+}$ e Q_{NO^+} em 4.6 e 4.7 são calculados como:

$$Q_{O_2^+} = q_{O_2^+} + k_1\frac{q_{[O^+]}}{k_1[O_2] + k_2[N_2]}[O_2] + k_4\frac{q_{[N_2^+]}}{k_3[O] + k_4[O_2]}[O_2], \tag{4.10}$$

$$Q_{NO^+} = q_{NO^+} + k_2\frac{q_{[O^+]}}{k_1[O_2] + k_2[N_2]}[N_2] + k_3\frac{q_{[N_2^+]}}{k_3[O] + k_4[O_2]}[O]. \tag{4.11}$$

Portanto, considerando a neutralidade macroscópica, isto é, escalas de comprimento muito maiores que o comprimento de Debye (λ_D) na região E ($\lambda_D \approx$3 mm), a densidade eletrônica desta região pode ser calculada pelo modelo como:

$$n_e = [O_2^+] + [NO^+] + [O^+] + [N_2^+] + [Fe^+] + [Mg^+]. \tag{4.12}$$

Note que as equações 4.4 e 4.5 podem ser resolvidas de maneira direta, quando os valores de q_{O^+}, $q_{N_2^+}$, $[O_2]$, $[N_2]$ e $[O]$ são fornecidos.

4.1 Modificações realizadas no modelo MIRE

Algumas modificações foram introduzidas no modelo MIRE a fim de atingir os objetivos propostos neste trabalho de doutorado e serão abordadas nessa sessão. Primeiramente, para deixar o código generalizado foram efetuadas as seguintes modificações:

- Conversão do código para o padrão Fortran 2008;
- utilização de precisão dupla na representação de ponto flutuante;
- atualização do modelo MSISE-90 para o MSISE-00; e
- utilização do modelo IGRF11 para cálculo automático da inclinação e declinação magnética utilizando a latitude e longitude geográficas, o dia Juliano e o ano de interesse.

Além disso, outro ponto significativo foi a inclusão do termo contendo o campo elétrico zonal (E_y). A velocidade vertical dos íons utilizados no estudo é calculada através da expressão 2.11. No caso do estudo de Carrasco (2005), a região de análise foi Fortaleza e, assim, algumas aproximações puderam ser feitas, entre elas, a desconsideração de E_y. Como já explicado no Capítulo 3, para avaliar os campos elétricos de regiões equatoriais foram utilizados os dados provindos do radar RESCO nos horários diurnos. Já para regiões de baixas latitudes, o campo elétrico foi inferido utilizando a teoria de mapeamento através das linhas de campo magnético. Além disso, os perfis de campos elétricos proposto por Dagar et al. (1977) foram testados para a região de São Luís. Detalhes sobre as implicações destas modificações serão abordadas nas seções seguintes.

4.1.1 O método de Crank-Nicolson

As densidades dos elementos $[O_2^+]$, $[NO^+]$, $[Fe^+]$ e $[Mg^+]$ são calculadas utilizando as equações 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9. Para isso, Carrasco (2005) utilizou o método de diferenças finitas com a discretização de Crank-Nicolson. Este método consiste em aproximar as derivadas parciais por diferença finitas, o que possibilita obter uma solução aproximada para o sistema a cada instante de tempo resolvendo um conjunto de equações algébricas. O domínio de solução é um espaço bidimensional em tempo e altura. Assim, a solução numérica é obtida discretizando este espaço conforme mostrado na Figura 4.1. Dessa forma, é possível mostrar que existe um algoritmo recursivo que calcula as densidades para o instante de tempo $n + 1$ utilizando os valores calculados no instante n (CARRASCO, 2005). Nesse contexto, para evitar

instabilidades no código, uma das modificações foi o passo da grade do modelo. No caso, o espaço de solução foi discretizado utilizando um passo de 0,6 minutos para o tempo e 0,05 km para a altura, resultando numa grade composta de 2401×1081 pontos. Dados os valores de contorno para as densidades dos elementos, itera-se o método para obter a solução numérica. Detalhes sobre como o método foi implementado no código podem ser vistos em Carrasco (2005). Outro ponto importante é que o sistema de equações aproximadas por diferenças finitas pode ser escrito por um sistema linear tridiagonal, que pode ser resolvido utilizando o algoritmo de Thomas (SCARBOROUGUE, 1930).

Figura 4.1 - Grade de um espaço bidimensional em tempo e altura para solucionar o problema.
Fonte: Modificada de Carrasco (2005)

4.1.2 Modelo para o constituinte NO

Para o cálculo dos constituintes da atmosfera neutra, como o oxigênio atômico e molecular, e o nitrogênio molecular, foi utilizado o modelo empírico *Mass Spectrometer Inconhrent Scatter Extension*-2000 (MSISE-00). Para o constituinte do óxido nítrico (NO) foi realizada uma análise comparativa entre dois modelos para averiguar qual melhor representaria o perfil de densidade eletrônica da região E no MIRE. Segundo a teoria, a densidade deste íon apresenta um pico em torno dos 106 km e é altamente importante na composição química da região E. Portanto, um dos modelos analisados foi o proposto por Barth et al. (1996), que é utilizado por Carrasco (2005). Este modelo calcula a concentração do NO a partir de uma taxa de misturas dos constituintes neutros atmosféricos, em função da hora local e cobre uma faixa de 50 a 130 km. Segundo Carrasco (2005), a escolha deste modelo foi feita pois apresentava resultados mais coerentes com relação aos dados observacionais.

Contudo, Santos (2005) verificou que o modelo de Barth et al. (1996) em simulações na região E ionosférica, utilizando o *Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model* (SUPIM), conduzia a valores de densidade eletrônica subestimados em relação aos dados experimentais. Neste mesmo estudo, o modelo que mais se aproximou das observações foi o de Mitra (1968),

$$n_{NO} = 0,4 \cdot n(O_2) \exp\left\{-\frac{300}{T}\right\} + 5 \cdot 10^{-7}, \tag{4.13}$$

que utiliza uma expressão baseada em estimativas de variações diurnas observadas na região D ionosférica e em medidas de composição iônica. Conforme já mencionado, os íons mais abundantes na região E ionosférica são o NO^+ e O_2^+. Assim, para avaliar o melhor modelo de NO, foram gerados perfis de densidade eletrônica da região E levando em consideração o elemento O_2. Os resultados são apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3 para o modelo de Barth et al. (1996) e o modelo de Mitra (1968), respectivamente. Com isso, as simulações revelam que o comportamento característico da região E é observado somente quando se utiliza o modelo do NO de Barth et al. (1996). Portanto, conclui-se que o modelo Mitra (1968) não é capaz de fornecer um perfil adequado para a região E através de algoritmo implementado no MIRE. Dessa forma, o modelo de Barth et al. (1996) foi selecionado para prover a densidade do elemento NO neste trabalho.

Figura 4.2 - Resultados do MIRE para o perfil de densidade eletrônica da região E utilizando o modelo de Barth et al. (1996) para o cálculo da densidade do NO.

Figura 4.3 - Resultados do MIRE para o perfil de densidade eletrônica da região E utilizando o modelo de Mitra (1968) para o cálculo da densidade do NO.

4.1.3 Modificações no parâmetro dos ventos neutros

A formação de camadas Es em baixas e médias latitudes é, geralmente, explicada pela teoria de marés atmosféricas (MACDOUGALL, 1974; WHITEHEAD, 1989; MATHEWS, 1998; HALDOUPIS et al., 2004; HALDOUPIS et al., 2006; JACOBI et al., 2008). No MIRE, desenvolvido por Carrasco (2005), os ventos meridional e zonal (U_x e U_y) são calculados pelo modelo de Morton et al. (1993), utilizando as expressões 4.14 e 4.15:

$$U_y = U_{yo} cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(z - z_o) + \frac{2\pi}{P}(t - t_o)\right), \tag{4.14}$$

$$U_x = U_{xo} sen\left(\frac{2\pi}{\lambda}(z - z_o) + \frac{2\pi}{P}(t - t_o)\right), \tag{4.15}$$

onde λ é o comprimento de onda na vertical segundo o modo de maré, P é o período de oscilação, U_{yo} e U_{xo} são as amplitudes e t_o é a fase da onda. Estes parâmetros podem variar, dependendo da região a ser estudada. Assim, um dos métodos para análise das componentes dos ventos foi obter estes parâmetros a partir de medidas

dos ventos meridional e zonal feitas com o radar SKiYMET. Os dados foram obtidos das estações de São João do Cariri e Cachoeira Paulista, representando uma região equatorial e de baixa latitude, respectivamente. A metodologia de cálculo dessas grandezas foi descrita no Capítulo 3. A Figura 4.4 mostra o perfil dos ventos meridional e zonal para o ano de 2005 em São João do Cariri e em Cachoeira Paulista, respectivamente.

4.1.4 Modificações no parâmetro dos campos elétricos

Sabe-se que o processo de cisalhamentos de ventos é o mais importante na formação de camadas Es em médias latitudes (WHITEHEAD, 1989; MATHEWS, 1998; HALDOUPIS et al., 2004). À medida que a inclinação magnética se torna menor, as componentes dos campos elétricos vão se tornando mais eficazes na formação dessas camadas. Nesse contexto, a análise do efeito dos campos elétricos foi averiguada separadamente para as duas regiões segundo a metodologia apresentada no Capítulo 3. Como mencionado anteriormente, foram consideradas no estudo as componentes zonal e vertical do campo elétrico.

As componentes dos campos elétricos de São Luís, obtidas a partir dos dados do Radar RESCO, foram utilizadas de duas maneiras distintas. Na primeira foi analisado o perfil diário do campo elétrico como mostrado na Figura 4.5 para o campo elétrico zonal (letra a) e para o campo elétrico vertical (letra b). Os horários noturnos, devido a limitação do instrumento neste período, foram preenchidos utilizando o menor valor da componente do campo elétrico em questão durante o dia com sinal contrário, uma vez que a corrente do EEJ é contrária nestes horários. Uma segunda maneira foi averiguar a resposta do MIRE a valores constante das componentes dos campos elétricos, nos horários em que a camada Es_b estava fortemente presente em São Luís. É importante estar atento à compatibilidade entre os sistemas de coordenadas utilizados nas diversas etapas do processo. A Figura 4.6 mostra o sistema de coordenadas utilizado no MIRE e o sistema de coordenadas utilizado no cálculo dos campos elétricos obtidos pelo radar RESCO. Portanto, os valores dos campos elétricos verticais obtidos pelo radar RESCO foram considerados com sinal negativo no MIRE.

A análise proposta por Dagar et al. (1977) foi realizada para verificar a influência do campo elétrico na formação de camadas Es em regiões equatoriais. Nesta análise, o campo elétrico utilizado foi inferido através de estudos realizados com medidas da densidade eletrônica e da condutividade Cowling obtida de foguetes para a região de Thumba, Índia (8,5°N, 77°L, I: 0,5°). Os resultados das amostras revelam que

Figura 4.4 - Componentes zonal e meridional dos ventos utilizados no MIRE obtidos utilizando os dados observacionais de Cariri e Cachoeira Paulista para o verão de 2005.

o campo elétrico horizontal não é constante com altura e alcança valores máximos de 1,15 mV/m em 107 km (Figura 4.7b). Além disso, Dagar et al. (1977) compara seus resultados utilizando um campo elétrico horizontal constante de intensidade de 2 mV/m (Figura 4.7a). Em síntese, os autores consideraram que nas alturas

Figura 4.5 - Componentes zonal (E_y) e vertical (E_z) do campo elétrico obtido pelo radar RESCO para o verão de 2005.

Figura 4.6 - Coordenadas do modelo usado por Denardini (2004) na obtenção dos dados de campo elétrico e no modelo MIRE.

do EEJ a corrente Hall é inibida na direção vertical, uma vez que esta não pode fluir livremente nessas alturas devido a diferença das condutividades no limiar da região E e F. Portanto, a influência do campo elétrico na direção vertical pode ser desprezada.

Em relação a Cachoeira Paulista, optou-se por utilizar a metodologia proposta por Carrasco (2005). Nesse caso, como também apresentado no Capítulo 3, os campos elétricos equatoriais verticais da região F ionosférica se mapeiam para a região E. A

Figura 4.7 - Modelos de campo elétrico (a) empírica (b) experimental utilizados por Dagar et al. (1977).
Fonte: Modificada de Dagar et al. (1977).

partir dessa projeção, o cálculo das componentes dos campos elétricos nesta região de interesse é feito utilizando as equações 4.16 e 4.17;

$$E_y = E_{eq}\frac{cos^3\phi}{\sqrt{1+3sen\phi}}, \tag{4.16}$$

$$E_z = E_{eq}cos^3\phi, \tag{4.17}$$

onde ϕ é a latitude magnética de Cachoeira Paulista e o parâmetro E_{eq} E_{eq} é o campo elétrico vertical equatorial obtido na região F obtido através da deriva vertical e do campo elétrico zonal de São Luís (vide Capítulo 3).

4.1.5 Análise da competição entre ventos e campos elétricos

O fluxograma do MIRE com as modificações mencionadas está mostrado na Figura 4.8. Os resultados obtidos dessas análises serão divididos considerando a influência apenas dos ventos, apenas dos campos elétricos e de ambos para cada região de análise. A partir disso, os perfis de densidade eletrônica obtidos do MIRE foram comparados com os parâmetros de frequência dos dados observacionais obtidos da digissonda. Os resultados e as discussões deste estudo serão apresentados nos capítulos posteriores.

Figura 4.8 - Fluxograma do modelo MIRE com as modificações mencionadas.
Fonte: Modifcada de Carrasco (2005).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES: ANÁLISE DO EFEITO DOS VENTOS NAS CAMADAS Es

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados das investigações dos efeitos dos ventos neutros na formação das camadas Es. Estas investigações foram feitas com base nas simulações do MIRE e comparadas com os parâmetros que refletem a densidade eletrônica da camada Es provindos da digissonda.

5.1 Análise sobre a região de baixa latitude: Cachoeira Paulista - SP

Primeiramente, este trabalho consistiu em estudar uma região externa ao equador magnético, para validar o comportamento geral das camadas Es. Os gráficos das Figuras 5.1 e 5.2 mostram dados observados das camadas Es sobre a região de Cachoeira Paulista para períodos calmos nos anos de 2005 e 2008, respectivamente. O parâmetro utilizado nesse estudo foi o *fb*Es, considerado o que melhor representa a densidade eletrônica das camadas Es e será discutido posteriormente. Além disso, os dados estão divididos segundo as estações do ano, designadas por cores distintas. As escalas dos gráficos referem-se à densidade eletrônica versus hora universal (UT). A relação entre a frequência obtida através do parâmetro *fb*Es e a densidade eletrônica é

$$n = 1,24 \cdot 10^4 \cdot (fbEs)^2. \tag{5.1}$$

Em relação às figuras, o comportamento típico do parâmetro *fb*Es é caracterizado por um aumento durante o período matutino, em torno das 9 UT (6 LT), alcançando valores máximos em torno das 15 UT (12 LT) e retornando a valores quiescentes a partir das 21 UT (18 LT).

Figura 5.1 - Análise do parâmetro *fb*Es nas estações de primavera (laranja), verão (vermelho), outono (verde) e inverno (azul) para a região de Cachoeira Paulista em 2005.

Figura 5.2 - Análise do parâmetro *fb*Es nas estações de primavera (laranja), verão (vermelho), outono (verde) e inverno (azul) para a região de Cachoeira Paulista em 2008.

5.1.1 Efeito dos ventos nas camadas Es via simulação

Como foi dito anteriormente, os parâmetros dos ventos observacionais foram impostos nas equações de cisalhamento de Morton et al. (1993) para avaliar o processo de formação das camadas Es. Os resultados obtidos para Cachoeira Paulista e São Luís serão mostrados nas sessões a seguir.

5.1.1.1 Vento estacionário na formação das camadas Es

Uma primeira análise foi realizada em relação aos ventos estacionários, ou seja, quando não há propagação de fase com a altura. Este estudo mais simplificado consistiu na averiguação do modelo proposto por Morton et al. (1993), onde o parâmetro que representa a fase não é considerado.

A Figura 5.3 apresenta as componentes dos ventos estacionários meridional (letra a) e zonal (letra b) para Cachoeira Paulista em 2005. Para a construção dessa dos gráficos dessa figura foi considerada a estação de verão. Com estes perfis de ventos da figura 5.3 incluídos no MIRE foi obtido o perfil da densidade eletrônica da região E ionosférica, bem como a presença da camada Es nas simulações. A Figura 5.4a representa o perfil ionosférico de densidade eletrônica em função da altura em escala logarítmica para três horário distintos, 00 UT, 08 UT e 16 UT. Na Figura 5.4b são mostrados os dados observacionais do parâmetro *fb*Es para o verão. Superposto ao mesmo gráfico, está a média do perfil diário do pico de densidade eletrônica obtido dos resultados do MIRE. Especificamente, os picos de densidade eletrônica são aqueles indicados pelas setas vermelhas na Figura 5.4a. Estes valores máximos de densidade eletrônica, que indicam a presença da camada Es, foram obtidos para cada dia e então, computou-se uma média horária para cada estação do ano, representada pela linha cinza da Figura 5.4b.

É possível observar na Figura 5.4a que há mais de uma camada Es no perfil de densidade eletrônica. Isso ocorre porque, apesar das componentes dos ventos não possuir amplitudes altas, há cisalhamento de ventos em ambas componentes em diversas alturas, possibilitando assim surgir mais de uma camadas Es. Este fato é notado também nos dados observacionais, em que a presença de duas ou mais camadas Es podem ser observadas em ionogramas de Cachoeira Paulista. Uma outra observação é que duas camadas Es permaneceram ao longo do dia, uma na altura de 110 km e outra em torno da altura de 125 km, como mostram os perfis em 08 UT e 16 UT. Em relação à camada em 125 km, sabe-se que quando uma camada Es é formada nessas alturas, ela tende a realizar um movimento de descida ao longo do dia devido aos

Figura 5.3 - Componentes dos ventos estacionários meridional (letra a) e zonal (letra b) utilizando as equações de Morton et al. (1993) para Cachoeira Paulista em 2005.

ventos de marés (HALDOUPIS et al., 2006). Como nesse caso, o vento é estacionário, a camada Es permaneceu nessa altura. A camada em 110 km é observada ao longo do dia, numa altura típica de ocorrência da camada Es, concordando com as teorias existentes (AXFORD, 1963; BISHOP; EARCLE, 2003; HALDOUPIS et al., 2006). Os resultados do modelo na Figura 5.4b, representado pela linha cinza, acompanham os valores dos dados observacionais durante o período matutino e noturno. Nesse caso, são considerados os valores de densidade eletrônica para a camada Es em 110 km, indicada na figura pela seta vermelha. De uma maneira geral, o comportamento do parâmetro *fb*Es é bem característico para regiões de baixas latitudes, ou seja, valores quiescentes durante a noite com um aumento durante o dia. As simulações do MIRE, para este caso, mostram que há uma tendência em acompanhar este perfil dos dados observacionais. Os resultados para as outras estações do ano (não mostrados aqui) são similares a este apresentado na Figura 5.4. Ainda, é importante salientar que em relação ao período diurno, nota-se que a camada Es nas simulações (Figura 5.4a) está acima do pico da região E ionosférica. Além disso, a camada Es simulada possui uma densidade eletrônica inferior comparada ao máximo de densidade eletrônica da região E. Portanto, essa camada Es não poderia ser observada nos ionogramas, prejudicando a nossa análise comparativa. Assim, conclui-se que como a fase não varia e o cisalhamento ocorre acima do pico de densidade eletrônica da região E, esta simulação não dará os resultados esperados. Por fim, as simulações também não apresentam o padrão descendente que a presença dos ventos de marés proporciona e, assim, este perfil não será considerado no estudo da região de São Luís.

Figura 5.4 - Perfil de densidade eletrônica do MIRE com a inclusão dos ventos estacionários (letra a) e resultados ao longo do dia da densidade eletrônica obtida pelo MIRE juntamente com os dados observacionais (letra b) para Cachoeira Paulista no verão em 2005.

5.1.1.2 Vento variável na formação das camadas Es: Análise das respostas do modelo aos dados observacionais do radar SKiYMET

Após a análise dos ventos estacionários, foram averiguados os perfis de ventos variáveis nas simulações do MIRE, utilizando os parâmetros de dados observacionais nas equações de cisalhamento do modelo de Morton et al. (1993). Um exemplo do perfil meridional (letra a) e zonal (letra b) do vento utilizando a equação do modelo de Morton et al. (1993) é mostrado na Figura 5.5, onde nota-se que, conforme varia a altura e a amplitude dessas componentes, o sentido desse vento muda.

Na Figura 5.6a estão representadas as componentes dos ventos meridional (linha vermelha) e zonal (linha azul) para a região de Cachoeira Paulista às 12 UT em 2005 para as quatro estações dos ano. Para exemplificar os resultados obtidos, apresentam-se os gráficos para o horário de 12 UT. Com isso, podemos definir o padrão do comportamento das componentes dos ventos em cada estação. Na Figura 5.6b estão os dados observacionais provindos do parâmetro *fb*Es da digissonda, já mostrados

Figura 5.5 - Perfil dos ventos de cisalhamento para Cachoeira Paulista obtido pelo MIRE utilizando as equações do modelo de Morton et al. (1993).

na Figura 5.1, onde a cor vermelha define o verão, em laranja está a primavera, em verde o outono e por fim, em azul o inverno. Superpostos a estes gráficos, encontram-se os resultados do pico de densidade eletrônica da camada Es obtido pelo MIRE (linha cinza). As camadas Es estão apresentadas nas Figuras 5.7 e serão discutidas posteriormente.

É notável que para todas as estações do ano em 2005 ocorre um cisalhamento de ventos em ambas as componentes. Contudo, há uma significativa variação em relação a cada período examinado, como já era esperado segundo a teoria de ventos de marés (BATISTA et al., 2004; BURITI et al., 2008). O perfil meridional, representado pela linha vermelha, alcança amplitudes maiores no outono e menores no inverno. Em relação à componente zonal (linha azul), os valores de amplitude são inferiores comparados aos da componente meridional, exceto no inverno onde em algumas alturas a amplitude da componente zonal é equivalente à da componente meridional. O cisalhamento em cada componente pode fazer com que ocorra uma camada Es no perfil de densidade eletrônica do MIRE. Por isso, em alguns casos, são observados a presença de duas ou mais camadas Es. Contudo, certas combinações destas componentes também podem fazer com que ocorra uma anulação do mecanismo de cisalhamento, ocorrendo assim o processo inverso, ou seja, o desaparecimento da camada Es no perfil de densidade eletrônica. Para mostrar este processo, estes perfis obtidos pelo MIRE são apresentados na Figura 5.7 para cada estação do ano (primavera, verão, outono e inverno), nos horários 00 UT, 08 UT e 16 UT. O padrão de todas as camadas com o vento variante possui uma característica de diminuição da

altura com o tempo, na literatura denominada camadas descendentes (BISHOP; EARCLE, 2003; HALDOUPIS et al., 2006). O perfil de densidade eletrônica apresenta mais de uma camada Es, observado principalmente nos horários noturnos na primavera e no outono. Nesses casos, o perfil do vento zonal possui um cisalhamento forte, que ao somar-se com o efeito do vento meridional, geram camadas Es bem expressivas. O cisalhamento de ventos nas outras duas estações, verão e inverno, não é tão forte ao longo das alturas e foi observado apenas o desenvolvimento de uma camada Es. Por fim, as setas vermelhas indicam quais camadas foram consideradas na construção dos gráficos da Figura 5.6b representados pela linha cinza. Estes resultados da média de densidade eletrônica do modelo MIRE mostram que há uma tendência em acompanhar os dados observacionais e também possui valores em boa concordância com as observações. Apenas no inverno os valores do modelo MIRE superestimam os dados, apesar da tendência de comportamento com as observações ser satisfatória. No verão e na primavera o modelo também apresenta valores inferiores aos dados em alguns horários do dia.

A mesma análise foi realizada para o ano de 2008, como é apresentado na Figura 5.8. Em relação às componentes do vento meridional, as amplitudes são maiores no verão e no inverno (linha vermelha da Figura 5.8a). Já nas componentes referentes ao vento zonal (linha azul), os valores de amplitude são mais significativos no inverno. Como em 2005, os cisalhamentos ocorrem de maneira distinta para cada estação do ano. A evolução das camadas Es também está apresentada na Figura 5.9, divididas nas estações: primavera (letra a), verão (letra b), outono (letra c) e inverno (letra d). Nesta figura observa-se que as camadas Es em 2008 apresentam um comportamento semelhante aos resultados das simulações para o ano de 2005, que se caracteriza em um movimento de descida ao longo do dia. Além disso, as simulações revelaram duas camadas Es no período noturno para o verão, outono e inverno. A camada Es mais expressiva nesse ano ocorreu durante o inverno, uma vez que as maiores amplitudes dos ventos foram observadas nessa estação.

Neste ano, os resultados do MIRE também mostraram boas concordâncias em relação aos dados observacionais, conforme pode ser visto na Figura 5.8b, onde o modelo consegue simular o mesmo comportamento do parâmetro *fb*Es. Os valores para 2008 foram mais satisfatórios do que os obtidos para 2005, como é observado principalmente no período diurno. Portanto, para ambos os anos, a utilização dos parâmetros de dados observacionais dos ventos nas equações de Morton et al. (1993) apresentaram bons resultados comparados aos dados de digissonda.

Figura 5.6 - Perfis das componentes zonal e meridional dos ventos variáveis em altura utilizados no MIRE às 12 UT (letra a) e resultados da densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo modelo MIRE juntamente com os dados observacionais (letra b) divididas em estações do ano para Cachoeira Paulista em 2005.

Figura 5.7 - Perfil de densidade eletrônica obtido pelo MIRE utilizando ventos variáveis em altura para (a) primavera, (b) verão, (c) outono e (d) inverno para Cachoeira Paulista em 2005.

Figura 5.8 - Perfis das componentes zonal e meridional dos ventos variáveis em altura utilizados no MIRE às 12 UT (letra a) e resultados da densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo MIRE juntamente com os dados observacionais (letra b) divididas em estações do ano para Cachoeira Paulista em 2008.

Figura 5.9 - Perfil de densidade eletrônica obtido pelo MIRE utilizando ventos variáveis em altura para (a) primavera, (b) verão, (c) outono e (d) inverno para Cachoeira Paulista em 2008.

Para exemplificar esse movimento de descida, a Figura 5.10 mostra a evolução da camada Es para cada duas horas no inverno de 2005 em Cachoeira Paulista. A seta vermelha nas simulações indica a altura da camada Es que se inicia-se em torno de 115 km às 00 UT e alcança valores inferiores as 105 km no decorrer do tempo. Outra camada Es é observada nas simulações a partir de 10 UT com a mesma característica de descida, iniciando em uma altura superior a 130 km e chegando a alturas em torno de 120 km, como mostra a simulação em 22 UT.

Esse processo de descida, para o mesma estação, pode ser observado na Figura 5.11, que mostra a densidade eletrônica em função de altura e tempo. Nota-se, claramente, a evolução de duas camada Es em um processo de descida, uma iniciando em 00 UT e a outra em 10 UT.

Nos ionogramas para a região de Cachoeira Paulista também é possível observar o movimento de descida das camadas Es como mostra a Figura 5.12. Os dados dos ionogramas nos horários entre 1320 UT e 1710 UT e refere-se ao dia 02 de maio de 2004. Às 1320 UT é possível observar uma camada em torno dos 200 km. Para alguns autores (HALDOUPIS et al., 2006) esta camada também pode ser denominada como sendo intermediária. Após este horário, a camada realiza um movimento de descida e alcançando a altura de 100 km às 17 UT. Essas observações estão de acordo com os resultados do MIRE, mostrando que o modelo é capaz de simular o movimento de descida da camada Es.

Figura 5.10 - Ilustração da evolução da camada Es a cada duas horas no inverno de 2005 em Cachoeira Paulista.

Figura 5.11 - Densidade eletrônica em função da altura e do tempo no inverno de 2005 em Cachoeira Paulista.

Figura 5.12 - Ionogramas para Cachoeira Paulista entre 1320 UT e 1710 UT no dia 02 de maio de 2004 mostrando o movimento de descida de uma camada Es.

5.2 Análise para a latitude equatorial de São Luís - MA

Como já foi mencionado anteriormente, São Luís caracteriza-se por ser uma região em que o equador magnético está se afastando e, assim, atualmente já não é mais considerada região equatorial. Portanto, as camadas Es de adensamento se tornaram cada vez mais frequentes a partir do ano 2000. Esse mesmo fato já ocorreu em Fortaleza e foi discutido por Abdu et al. (1997). Os autores constataram que as camadas Es_q, que são devidas à presença das irregularidades do EEJ, foram desaparecendo a medida que o equador magnético se afastava de Fortaleza. Nesse contexto, foram escolhidos para este trabalho os anos em que a presença do EEJ não está tão expressiva e, assim, foi possível a análise da importância dos ventos na formação das camadas Es para a região de São Luís. A metodologia foi a mesma usada em Cachoeira Paulista. Contudo, os parâmetros extraídos dos dados observacionais de ventos de cisalhamento foram para a região de São João do Cariri, devido à ausência de um radar meteórico em São Luís. Os anos analisados foram 2005 e 2009, nos quais encontram-se dados experimentais simultâneos de ventos e da densidade eletrônica. Além disso, os anos foram aproximadamente compatíveis com os utilizados na análise de Cachoeira Paulista, permitindo realizar um estudo comparativo.

As Figuras 5.13 e 5.14 mostram a variação do parâmetro *fb*Es, quando há a presença das camadas Es_b para a região de São Luís em 2005 e 2009. Em 2005 não houve dados para todos os meses e, portanto, o outono não pôde ser analisado. A principal diferença dos dados de São Luís em relação a Cachoeira Paulista é que na primeira região não foi observado um padrão bem definido de comportamento. Isto porque o trabalho se concentra em uma época de transição, na qual as camadas Es devido às irregularidades do EEJ não são levadas em consideração. Os gráficos das Figuras 5.13 e 5.14 mostram a densidade eletrônica dos horários em que as camadas Es_b foram observadas. É importante ressaltar que no ano de 2009 a ocorrência das camadas Es_b foi superior à observada em 2005, comprovando que a corrente do EEJ neste ano já estava enfraquecida. Em 2005 as camadas Es de bloqueio não ocorreram durante o período entre 00 e 08 UT para todas as estações do ano. Já para o ano de 2009, o mesmo fato somente ocorreu no verão, enquanto que nas outras estações foram observadas camadas Es_b ao longo de quase todo o dia.

Figura 5.13 - Análise do parâmetro *fb*Es para a primavera (laranja), o verão (vermelho) e o inverno (azul) para a região de São Luís em 2005.

Figura 5.14 - Análise do parâmetro *fb*Es a primavera (laranja), o verão (vermelho), o outono (verde) e o inverno (azul) para a região de São Luís em 2009.

5.2.1 Análise das respostas do modelo aos dados observacionais do radar SKiYMET

Para a análise da influência dos ventos na evolução e formação das camadas Es em São Luís via simulações, foram considerados os dados observacionais de ventos do radar SKiYMET instalado em São João do Cariri (Figura 5.15). A forma de estudo foi considerada exatamente como em Cachoeira Paulista, ou seja, utilizando as equações de cisalhamento dos ventos do modelo de Morton et al. (1993).

Figura 5.15 - Perfil dos ventos de cisalhamento para São Luís obtido pelo MIRE utilizando as equações do modelo de Morton et al. (1993).

Na Figura 5.16 são mostrados os resultados para o ano de 2005, referentes às componentes meridional e zonal dos ventos (letra a) e os dados observacionais juntamente com os resultados das simulações do MIRE divididas em relação às estações do ano (letra b). Uma das características dos ventos neutros é que as suas componentes nesta região possuem amplitudes inferiores àquelas observadas nos perfis de ventos em Cachoeira Paulista. Isso resulta no aparecimento de somente uma camada Es no perfil de densidade eletrônica nas simulações do MIRE (Figura 5.17), em contraste com os resultados de Cachoeira Paulista, onde o perfil de densidade eletrônica apresentou, em alguns casos, mais de uma camada Es. A partir da observação dos ionogramas apresentados no Capítulo 3, verificamos que para a região de São Luís, por ser uma região de transição, as camadas Es_b podem ocorrer juntamente com as camadas Es_q. Assim, a presença das camadas Es_b pode superar os efeitos das irregularidades e bloquear a detecção das regiões superiores. De fato, a análise concentra-se

na competição entre estes dois processos. Portanto, as baixas amplitudes dos ventos para o ano de 2005 justificam as observações nos ionogramas, em que as camadas Es_b, quando presentes, não são tão fortes quanto em Cachoeira Paulista. Além disso, outros processos tais como o fortalecimento da corrente para leste do dínamo da região E devido a penetração de campos elétricos, podem superar esses ventos, fazendo com que as camadas Es_q se tornem presentes. Na parte inferior da Figura 5.16b é visto que para estes ventos, as simulações de densidade eletrônica do MIRE (linha cinza) têm uma boa concordância com os resultados observacionais provindos da digissonda de São Luís para todas as estações do ano. Observa-se também que, a média das simulações do MIRE apresenta um padrão distinto daquele observado em Cachoeira Paulista. Acredita-se que este fato é devido ao padrão irregular no cisalhamento de ventos, principalmente, na componente meridional.

Os perfis de densidade eletrônica da Figura 5.17 para as três estações do ano em 2005, primavera (letra a), verão (letra b) e inverno (letra c), mostram o padrão evolutivo das camadas Es referente às simulações realizadas. As camadas Es apresentam, para todas as estações, um movimento descendente característico dos ventos de marés.

Figura 5.16 - Perfis das componentes zonal e meridional dos ventos variáveis em altura utilizados no MIRE às 12 UT(letra a) e resultados da densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo MIRE juntamente com os dados observacionais (letra b) divididas em estações do ano para São Luís em 2005.

Figura 5.17 - Perfil de densidade eletrônica obtido pelo MIRE utilizando ventos variáveis em altura para (a) primavera, (b) verão e (c) inverno para São Luís em 2005.

Na Figura 5.18a, para o ano de 2009, os ventos possuem amplitudes superiores aos de 2005, e também mais irregulares. Neste caso, ressalta-se os resultados do inverno em que as amplitudes são equiparadas aos dados de Cachoeira Paulista. Para as outras estações do ano, as componentes do vento meridional possuem um cisalhamento bem distinto em relação a cada estação. Já o perfil das componentes do vento zonal possuem um cisalhamento sutil. A combinação desses efeitos mostrou o surgimento de camadas Es com um movimento descendente, como é visto no perfil das simulações do MIRE na Figura 5.19. Note que em alguns períodos noturnos (primavera e outono), 00 UT, o perfil de densidade eletrônica parece apresentar mais de uma camada Es, uma que se inicia em 135 km aproximadamente e a outra em 105 km. Neste estudo, apenas as camadas Es indicadas pelas setas vermelhas foram consideradas na análise e a média da sua densidade máxima é representada pela linha cinza da Figura 5.18b. Os resultados da Figura 5.18b, exceto para o inverno, não apresentam um padrão típico de comportamento como em Cachoeira Paulista, ou seja, um comportamento semelhante à uma função cosseno. No inverno, uma vez que as componentes dos ventos apresentam características similares àquelas de baixas latitudes, o perfil do parâmetro *fb*Es apresenta este comportamento característico. Além disso, observa-se na Figura 5.18b que os valores simulados também estão de acordo com os valores dos dados observacionais. Contudo, no período vespertino para o outono e o inverno, os dados de digissonda possuem valores um pouco mais elevados do que o modelo calculou.

Figura 5.18 - Perfil das componentes meridional e zonal dos ventos variáveis em altura utilizados no MIRE às 12 UT (letra a) e resultados da densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo MIRE juntamente com os dados observacionais (letra b) divididas em estações do ano para São Luís em 2009.

Figura 5.19 - Perfil de densidade eletrônica obtido pelo MIRE utilizando ventos variáveis em altura para (a) primavera, (b) verão, (c) outono e (d) inverno para São Luís em 2009.

A Figura 5.20 mostra um exemplo da evolução da camada Es para o inverno de 2005, em São Luís. Observa-se uma camada Es em altura superior a 130 km às 00 UT, que evolui para altura de 100 km em 22 UT (indicada pela seta vermelha). Esses resultados foram plotados no gráfico de densidade eletrônica em função da altura e do tempo, Figura 5.21, onde nota-se uma linha expressiva com alta densidade indicando a descida da camada Es.

Figura 5.20 - Ilustração da evolução da camada Es a cada duas horas no inverno de 2005 em São Luís.

Figura 5.21 - Densidade eletrônica em função da altura e do tempo no inverno de 2005 em São Luís.

Em São Luís também é observado nos dados observacionais a presença de camadas Es que realizam um movimento descendente, como é mostrado os ionogramas da Figura 5.22. Os ionogramas estão nos horários entre 16 UT e 1830 UT, e a seta vermelha indica esse movimento. É notável que as 16 UT há uma camada em torno dos 180 km, que alcança os 100 km em 18 UT. Portanto, as simulações do MIRE estão concordando com os resultados observacionais para a região de São Luís.

Figura 5.22 - Ionogramas para São Luís entre 16 UT e 1830 UT no dia 30 de novembro de 2009 mostrando o movimento de descida de uma camada Es.

5.2.2 Comparação entre os parâmetros *fb*Es e *fo*Es

O parâmetro de frequência que melhor representa a densidade eletrônica da camada Es é o *fb*Es (REDDY; RAO, 1968). Para confirmar essa afirmação o parâmetro *fo*Es também foi plotado juntamente com os resultados das simulações com os modelos de ventos baseados nos resultados observacionais obtidos do radar SKiYMET, que foram utilizados nas equações de cisalhamento no MIRE, tanto para Cachoeira Paulista quanto para São Luís. Para transformar o parâmetro de frequência *fo*Es em densidade eletrônica foi utilizado o mesmo método do parâmetro *fb*Es, ou seja, substituindo o *fo*Es na equação 5.1.

As Figuras 5.23 e 5.24 se referem a Cachoeira Paulista para os anos estudados neste trabalho, onde a média dos parâmetros de frequências são comparadas com os resultados do modelo divididos em estação do ano. Em síntese, a linha vermelha nas figuras representa a média dos resultados do parâmetro *fb*Es, a linha preta se refere à média dos resultados do parâmetro *fo*Es e, por fim, a linha cinza representa os resultados das simulações do MIRE. Os dados experimentais referentes aos parâmetros *fb*Es e *fo*Es são apresentados com as barras de erro que representam o

desvio padrão das observações. Para o ano de 2005 observa-se que, durante a manhã, os valores do parâmetro *fo*Es são superiores aos resultados do MIRE, exceto para o inverno. Durante o período diurno, a partir das 09 UT, as simulações do MIRE estão melhor representadas pelo parâmetro *fb*Es na primavera e no outono. Já para o inverno, observa-se que o parâmetro *fo*Es representa melhor os valores do modelo. Note que o resultado do MIRE para esta estação encontra-se dentro do intervalo descrito pelas barras de erro. Em relação ao ano de 2008, nos horários entre 00 UT e 06 UT, os valores simulados concordam melhor com os resultados do parâmetro *fb*Es, exceto na primavera. No período diurno, entre 06 UT e 23 UT, os resultados do modelo aproxima-se dos valores médios do parâmetro *fo*Es. Contudo, vale salientar que em ambos os anos os resultados do modelo MIRE apresentam um comportamento caracterizado por valores baixos até as 06 UT, seguido por uma subida até alcançar o máximo em torno das 12 UT e em seguida decresce até atingir novamente valores baixos. Portanto, apesar do parâmetro *fo*Es apresentar resultados com valores próximos ao modelo em algumas estações, ele não caracteriza este tipo de comportamento. Já o parâmetro *fb*Es apresenta, em todas as estações, este comportamento característico de baixas latitudes e, por isso, representa melhor a densidade eletrônica da camada Es.

Figura 5.23 - Densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo MIRE juntamente com a média dos dados observacionais dos parâmetros de frequência das camadas Es, *fb*Es (linha vermelha) e *fo*Es (linha preta) para Cachoeira Paulista em 2005.

Figura 5.24 - Densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo MIRE juntamente com a média dos dados observacionais dos parâmetros de frequência das camadas Es, *fb*Es (linha vermelha) e *fo*Es (linha preta) para Cachoeira Paulista em 2008.

A mesma análise foi realizada em São Luís, onde as Figuras 5.25 e 5.26 representam a média dos dados observacionais utilizando os parâmetros *fb*Es (linha vermelha) e *fo*Es (linha preta) e os resultados do MIRE (linha cinza) para os anos de análise, 2005 e 2009, juntamente com as barras de erro que representam o desvio padrão das observações. Em um aspecto geral nota-se que, para ambos os anos e em todas estações, o modelo retorna valores de densidade eletrônica que diferem significativamente dos obtidos por meio de digissonda. Em 2005, na primavera, no inverno e no outono, os valores do parâmetro *fb*Es possuem melhores concordâncias com as simulações do MIRE. Para o ano de 2009, a média do parâmetro *fo*Es é muito superior aos resultados do modelo para todas as estações do ano. O parâmetro *fb*Es, em geral, também apresenta valores melhores quando comparados às simulações do MIRE, uma vez que estas estão dentro do intervalo definido pelas barras de erro deste parâmetro. Na primavera, observa-se que o parâmetro *fb*Es tem uma boa concordância no período diurno. Já no verão, os resultados deste parâmetro concordam com os resultados do modelo apenas em alguns horários específicos.

Uma análise similar já foi realizada por Reddy e Rao (1968) com o objetivo de avaliar qual o parâmetro melhor representa a densidade eletrônica das camadas Es em médias latitudes. Para isso, eles compararam estes parâmetros observados em ionogramas com dados de foguetes para os mesmos horários em regiões distintas. Os resultados do estudo mencionado mostraram que o parâmetro de frequência *fb*Es fornece valores de concentração de densidade eletrônica mais próximos aos dados observados por foguetes, enquanto que o parâmetro *fo*Es apresentou valores de densidade eletrônica superiores. Assim, em geral, os resultados das análises para as regiões de Cachoeira Paulista e de São Luís são equivalentes às observações realizadas por Reddy e Rao (1968). Portanto, neste estudo, baseados nas teorias já existentes e devido a representação do melhor comportamento, o parâmetro utilizado para representar a densidade eletrônica da camada Es foi o parâmetro *fb*Es.

Figura 5.25 - Densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo MIRE juntamente com a média dos dados observacionais dos parâmetros de frequência das camadas Es, *fb*Es (linha vermelha) e *fo*Es (linha preta) para São Luís em 2005.

Figura 5.26 - Densidade eletrônica ao longo do dia obtida pelo MIRE juntamente com a média dos dados observacionais dos parâmetros de frequência das camadas Es, *fb*Es (linha vermelha) e *fo*Es (linha preta) para São Luís em 2009.

5.2.3 Efeito das componentes meridional e zonal do vento na formação das camadas Es

Nesta sessão serão mostradas as influências que as componentes meridional e zonal, analisadas separadamente, podem exercer na formação das camadas Es. Para isso, o verão do ano de 2005 será utilizado como exemplo para as regiões de análise, Cachoeira Paulista e São Luís. Os resultados para as outras estações do ano e para os anos analisados em ambas as regiões são mostrados no Apêndice B deste trabalho.

As simulações foram realizadas levando em consideração cada uma das componentes do vento separadamente e os resultados foram plotados juntamente com os dados observacionais representados pelo parâmetro *fb*Es. Na Figura 5.27 são mostrados os dados observacionais juntamente com a média das simulações realizadas com MIRE para a região de São Luís. Em relação à componente meridional do vento, o resultado da média das simulações do MIRE apresenta um comportamento típico das regiões de baixas latitudes, ou seja, do tipo senoidal com valores baixos durante a noite. Contudo, estes valores são bem inferiores aos dados observacionais obtidos do parâmetro *fb*Es. Para a componente do vento zonal, os valores em alguns horários específicos, entre 10 UT e 13 UT e entre 20 UT e 22 UT, são mais próximos dos dados observacionais.

Figura 5.27 - Pico de densidade eletrônica obtida pelo MIRE utilizando as componentes meridional e zonal em São Luís no verão de 2005 (linha contínua) e dados observacionais (pontos).

A Figura 5.28a mostra o perfil da componente meridional do vento que foi utilizado

nas simulações, nos horários de 00 UT, 08 UT e 16 UT. Na parte b da Figura 5.28 é mostrado o perfil de densidade eletrônica obtido das simulações do MIRE para os mesmos horários. As setas vermelhas indicam as camadas Es bem como as alturas de cisalhamento que foram utilizadas para as comparações entre simulações e observações mostrados na Figura 5.27. As setas em azul indicam as outras alturas de cisalhamento e as camadas Es observadas no perfil de densidade eletrônica do MIRE. A componente meridional do vento apresenta cisalhamento em várias alturas ao longo do dia. A camada Es nas simulações do MIRE inicia-se abaixo dos 120 km às 00 UT, alcançando 115 km às 08 UT e 112 km às 16 UT, desaparecendo depois deste horário. Nos horários das 16 UT, a camada Es aparece novamente acima de 130 km, descendo para alturas inferiores nos próximos horários. Portanto, as simulações mostram um comportamento descendente semelhante ao exemplificado na Figura 5.20. Às 16 UT a camada Es considerada está acima de 130 km, uma vez que ela apresenta um movimento de descida nos próximos horários.

Figura 5.28 - Evolução da componente meridional do vento utilizado no MIRE (letra a) e evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica simulada no MIRE (letra b) em São Luís no verão de 2005.

Em relação à componente zonal do vento, as simulações não apresentam camadas Es abaixo dos 110 km, ou seja, próximo às alturas do pico da região E. Observa-

se também mais de uma camada Es no perfil de densidade eletrônica do modelo. Essas camadas Es também possuem a característica de um movimento descendente. Assim, os resultados apresentados aqui sugerem que ambas as componentes do vento possuem uma influência significativa na formação das camadas Es para os anos analisados em São Luís.

Figura 5.29 - Evolução da componente zonal do vento utilizado no MIRE (letra a) e evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica simulada no MIRE (letra b) em São Luís no verão de 2005.

Para o verão de 2005 em Cachoeira Paulista, Figura 5.30, percebe-se que, em geral, ambas as componentes meridional e zonal simulam camadas Es que condizem com os dados observacionais. Contudo, o MIRE durante o período noturno subestima os resultados observacionais tanto para a componente meridional quanto para a componente zonal do vento.

A Figura 5.31 apresenta a análise referente à componente meridional do vento nos horários de 00 UT, 08 UT e 16 UT utilizada no MIRE. Na parte b da figura 5.31 são mostrados os resultados das simulações da densidade eletrônica. O mesmo procedimento em São Luís foi seguido para Cachoeira Paulista, onde a seta em vermelho representa a camada Es considerada na análise da Figura 5.30. Note que a componente

Figura 5.30 - Pico de densidade eletrônica e dados observacionais para as componentes meridional e zonal em Cachoeira Paulista no verão de 2005.

meridional apresenta um cisalhamento em 120 km às 00 UT que não caracteriza uma camada Es, pois os resultados das simulações produzem uma camada muito espessa. Uma camada Es aparece nos horários em seguida, como é exemplificado às 08 UT e 16 UT. O cisalhamento observado na Figura 5.31a, abaixo dos 100 km, não é efetivo na formação de camadas Es nas simulações do MIRE.

Quando a componente do vento zonal é considerada (figura 5.32), as simulações mostram uma similaridade com os resultados da Figura 5.7b, ou seja, um comportamento semelhante quando comparado com os resultados referentes à presença das duas componentes. A Figura 5.32a mostra o perfil do vento para esta componente, onde nota-se cisalhamentos em várias alturas (indicadas pelas setas vermelhas e azuis). Contudo, nem todos estes cisalhamentos produzem camadas Es nas simulações do MIRE (Figura 5.32b). Acredita-se que ocorre o mesmo processo em São Luís, onde em algumas alturas a componente do vento zonal não é efetiva para formar camadas Es. Além disso, as simulações também mostram um padrão descendente para esta estação. Vale ressaltar que durante a noite, como se observa em 00 UT, as simulações são caracterizadas por apresentarem duas camadas, com a camada em 110 km apresentando maior espessura que uma camada Es em maior latitude.

Em síntese, a maioria dos resultados mostraram que a componente zonal do vento tem um efeito mais expressivo na formação de camadas Es nas simulações do MIRE em ambas as regiões (Apêndice B). Essa hipótese concorda com o estudo de Grubbor e Stupar (1988), que afirma que a componente zonal dos ventos de marés tem maior contribuição na formação de camadas Es nas alturas entre 105 e 120 km e que

Figura 5.31 - Evolução da componente meridional do vento utilizado no MIRE (letra a) e evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica simulada no MIRE (letra b) em Cachoeira Paulista no verão de 2005.

a componente meridional do vento teria uma maior importância na formação das camadas Es somente em alturas acima de 120 km. Outros autores como Whitehead (1989) e Mathews (1998) obtiveram os mesmos resultados em seus estudos. Os resultados das simulações estão semelhantes para todas as estações do ano, conforme pode ser visto no Apêndice B.

5.2.4 Efeito das marés diurnas e semidiurnas na formação das camadas Es

Outra análise realizada neste trabalho foi averiguar separadamente o efeito das marés diurnas e semidiurnas na formação das camadas Es. Neste contexto, foram analisados os dados do verão de 2005 para São Luís e Cachoeira Paulista, tomados como exemplo. Para as outras estações e os outros anos, os resultados das simulações para as duas regiões são apresentados no Apêndice C.

A Figura 5.33 representa o efeito das marés diurnas e semidiurnas analisadas separadamente para São Luís. Na parte a da Figura 5.33 são mostrados os dados observacionais juntamente com a média das simulações realizadas com o MIRE. Em ambas as componentes, os resultados não acompanham os valores do parâmetro

Figura 5.32 - Evolução da componente zonal do vento utilizado no MIRE (letra a) e evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica simulada no MIRE (letra b) em Cachoeira Paulista no verão de 2005.

*fb*Es. A evolução da camada Es quando considerada somente a maré diurna (parte superior da Figura 5.33b) se caracteriza por uma camada Es que se inicia na altura de 118 km, tendo um movimento de descida, que pode ser notado pela presença da camada Es às 08 UT em 109 km. Em relação à maré semidiurna (parte inferior da Figura 5.33b), a camada Es é nitidamente observada durante a noite, em torno dos 118 km. Durante o dia, a camada Es quase não é visualizada, mostrando que a maré semidiurna tem um menor influência na camada Es.

Em Cachoeira Paulista, para o exemplo utilizado, apenas a maré diurna teve influência na formação da camada Es. Nota-se que a simulação referente a essa maré, possui uma boa concordância com os dados observacionais (Figura 5.34a). Na Figura 5.34b, os resultados simulados no MIRE da maré diurna mostram um comportamento de descida, iniciado em torno dos 110 km às 00 UT. As simulações referentes a maré semidiurna não mostraram camada Es, como também pode ser visto na Figura 5.34b. De fato, analisando as outras estações (Apêndice C) nota-se que a maré semidiurna uma influência menor em relação a maré diurna na formação de camada Es.

Para exemplificar melhor o comportamento descendente das camadas Es, o gráfico

Figura 5.33 - Pico de densidade eletrônica obtida pelo MIRE utilizando as marés diurnas e semidiurnas em São Luís no verão de 2005 (linha contínua) e dados observacionais (pontos)

.

de densidade eletrônica em função do tempo e da altura mostra a evolução das camadas Es ao longo do dia (Figura 5.35) referente à maré diurna para São Luís (a) e Cachoeira Paulista (b). Observa-se que a maré diurna tem um papel importante no movimento de descida, característico das simulações do MIRE em todas as estações.

Figura 5.34 - Pico de densidade eletrônica e dados observacionais (letra a) e evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtido pelo MIRE (letra b) para as marés diurnas e semidiurnas em Cachoeira Paulista no verão de 2005.

Mathews (1998) e Arras et al. (2009) afirmaram que o movimento e a variabilidade das camadas Es são devidos as marés diurnas e semidiurnas na baixa termosfera. As componentes diurnas são mais expressivas em baixas latitudes enquanto as semidiurnas em médias latitudes (PANCHEVA et al., 2002). A presente análise concorda com os resultados dos estudos anteriores, pois foi mostrado que a maré diurna é mais importante na formação das camadas Es. O movimento descendente das camadas Es observado nas simulações também já foi estudado em médias latitudes (WHITEHEAD, 1989; HALDOUPIS; PANCHEVA, 2003). De fato, Haldoupis et al. (2006) concluíram

Figura 5.35 - Densidade eletrônica em função do tempo e da altura referente à maré diurna para São Luís (a) e Cachoeira Paulista (b).

que em médias latitudes, a componente da maré semidiurna era a responsável por esse movimento. Contudo, nas simulações do MIRE em ambas regiões, este movimento foi visto tanto na componente da maré diurna quanto na semidiurna. Assim, conclui-se que ambas componentes têm uma influência significativa na formação das camadas Es para as regiões aqui estudadas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES: ANÁLISE DO EFEITO DOS CAMPOS ELÉTRICOS NAS CAMADAS Es

Neste capítulo serão abordados os efeitos dos campos elétricos na formação das camadas Es via simulação para ambas as regiões de estudo, Cachoeira Paulista e São Luís. As metodologias para tal já foram introduzidas e discutidas nos Capítulos 3 e 4. Neste contexto, serão mostrados os resultados bem como as discussões necessárias para o entendimento deste tópico.

6.1 Análise do efeito do campo elétrico para a região de São Luís-MA em 2005

Os dados observacionais das componentes zonal e vertical dos campos elétricos foram obtidos do radar RESCO. Como já se sabe, os campos elétricos são os motores das irregularidades do plasma do EEJ. Portanto, as variações destes campos implicam em modificações na ocorrência e/ou variabilidade das irregularidades (FEJER et al., 1981). Além disso, como estes campos fazem parte do mecanismo do dínamo ionosférico Sq, as variações em seus valores podem resultar em alguns fenômenos, como a ocorrência de um contra-eletrojato (CEJ), ou/e a dominância dos ventos, que podem causar o aparecimento das camadas Es_b em ionogramas (RASTOGI, 1971; REDDY; DEVASIA, 1973; RASTOGI, 1997; DEVASIA et al., 2004; DEVASIA et al., 2006). Um exemplo do perfil diário dos campos elétricos zonal e meridional em São Luís está mostrado na Figura 4.5.

Estes campos elétricos são representativos das alturas de 105 km e suas componentes zonal e vertical foram utilizadas na equação 2.11 referente à velocidade iônica vertical embutida no MIRE. Várias simulações foram realizadas. Inicialmente, foi analisado o efeito conjunto das duas componentes. Em seguida analisou-se o efeito de cada componente do campo elétrico zonal e vertical, separadamente. Por fim, foram realizados estudos de casos das componentes nos horários em que as camadas Es_b ocorreram nos ionogramas. Vale ainda ressaltar que todas as simulações foram realizadas na presença e na ausência dos ventos de marés.

Para este estudo, foram escolhidos os dias de acordo com a disponibilidade de dados simultâneos entre digissonda e o radar RESCO. Em geral, os resultados mostraram um padrão similar de comportamento e, assim, para exemplificar será tomado o dia 05 de janeiro de 2005. Os ionogramas desse dia (Figura 6.1) mostraram uma competição entre as camadas Es_b e as Es_{nb}. Entre os horários de 1330 UT e 1530 UT a camada Es_b começa a dominar o processo, como indicado pelas setas vermelhas.

Após estes horários nota-se a clara dominância da camada Es_q, indicada pela seta azul, quando não houve o bloqueio das regiões superiores.

Figura 6.1 - Ionogramas de São Luís para o dia 05 de janeiro de 2001, nos horários de 12 UT às 1545 UT, indicando a presença de camadas Es_b em setas vermelhas.

O perfil das componentes dos campos elétricos para este dia já foram mostrados no Capítulo 4 (Figura 4.5). É notável que a amplitude da componente vertical é muito superior à da componente zonal. Uma característica interessante é que durante os horários em que as camadas Es_b são observadas nos ionogramas (1330 UT e 1530 UT), os valores das componentes zonal e meridional do campo elétrico estão abaixo dos valores nos horários subsequentes, em que a camada Es_b não é observada. Nos horários noturnos, devido ao enfraquecimento do EEJ, o equipamento não é capaz de medir a velocidade Doppler e, assim, não há como inferir valores de campos elétricos. Portanto, foram usados os menores valores do perfil destes campos e, por isso, estes valores são constantes.

Para a análise desse estudo, as simulações realizadas foram divididas em cenários distintos descritos a seguir:

- Cenário 1 - Componentes zonal e vertical do campo elétrico presente e

ventos de marés ausentes;

- Cenário 2 - Componente zonal do campo elétrico presente e ventos de marés ausentes;
- Cenário 3 - Componente vertical do campo elétrico presente e ventos de marés ausentes;
- Cenário 4 - Componentes zonal e vertical do campo elétrico presente e ventos de marés presentes;
- Cenário 5 - Componente zonal do campo elétrico presente e ventos de marés presentes;
- Cenário 6 - Componente vertical do campo elétrico presente e ventos de marés presentes; e
- Cenário 7 - Campo elétrico com valor constante nos horários em que as camadas Es_b ocorreram e ventos de marés presentes.

Em resumo:

Tabela 6.1 - Cenários propostos para o estudo dos campos elétricos utilizando as simulações do MIRE.

Cenários	E_y	E_z	$U(x, y)$
1	×	×	
2	×		
3		×	
4	×	×	×
5	×		×
6		×	×
7		Caso Especial	

6.1.1 Resultados da influência das componentes zonal e vertical do campo elétrico analisadas conjuntamente e separadamente e ventos de marés ausentes (cenários 1, 2 e 3)

Para estes três cenários, quando os ventos de marés não são considerados, a presença das componentes dos campos elétricos em 2005 na região de São Luís não foram suficientes para gerar adensamentos do plasma nas simulações do MIRE. Portanto,

nos casos em que somente o campo elétrico foi considerado, sejam eles conjuntos ou separadamente, não foi possível observar nos perfis de densidade eletrônica a presença das camadas Es. Nos três casos, os resultados do MIRE apresentaram somente a região E ionosférica como mostrado na Figura 6.2, para os horários de 00 UT, 08 UT e 16 UT.

Figura 6.2 - Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campos elétricos E_y e E_z sem a presença dos ventos de marés.

6.1.2 Resultados da influência das componentes zonal e meridional analisadas conjuntamente e separadamente e ventos de marés presentes (cenários 4, 5 e 6)

Nestes cenários foram incluídos os ventos de marés resultantes dos dados observacionais na estação de São João do Cariri do radar SKiYMET. Como o perfil refere-se ao verão, as componentes dos ventos de marés utilizadas foram as mostradas na Figura 5.16a. Na Figura 6.3 está apresentado o cenário 4, onde ambas as componentes do campo elétrico foram incluídas para os horários de 00 UT, 08 UT, 13 UT, 14 UT, 15 UT e 16 UT. Nas primeiras horas da manhã, a camada Es é observada nas simulações. A partir das 06 UT (não mostrado aqui), mesmo com a inclusão dos ventos de marés, a presença das componentes dos campos elétricos inibiu a formação das camadas Es. Somente quando ambas componentes tiveram um decréscimo em seus valores (entre 1330 UT e 1530 UT) a camada Es retornou sutilmente nas simulações do MIRE, como mostram as setas em vermelho da Figura 6.3. Nos horários entre 16 UT e 18 UT a camada Es também não foi vista nas simulações, aparecendo a partir das 1815 UT quando as componentes do campo elétrico voltam a enfraquecer. Estes resultados mostram que altos valores de campos elétricos superam o efeito dos ventos e, assim, a presença destes nas simulações fazem com que os adensamentos

do plasma sejam inibidos. De fato, a presença das irregularidades do plasma surgem devido estes campos elétricos presentes em São Luís e, portanto, os resultados estão condizentes com o esperado. Rastogi (1971), Reddy e Devasia (1973), Rastogi (1997) estudaram estes campos elétricos em regiões equatoriais e mostraram que as camadas Es_b nos ionogramas não ocorriam durante os horários diurnos, pois o campo elétrico presente na irregularidade do EEJ inibe a formação de camadas Es por ventos. Devasia et al. (2004) e Devasia et al. (2006) ainda analisaram a presença das camadas Es_b em horários específicos em regiões equatoriais e creditou que estas camadas só apareciam em casos de CEJ. Ou seja, nos horários em que o campo E estava enfraquecido e os ventos presentes na região E equatorial superavam este efeito do campo elétrico das irregularidades do plasma.

Figura 6.3 - Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campos elétricos E_y e E_z com a presença dos ventos de marés.

Na Figura 6.4 é mostrada a evolução do perfil de densidade eletrônica da região E levando em consideração apenas o campo elétrico zonal E_y. Nesse caso, a camada Es apareceu durante todo o dia nas simulações realizadas com o MIRE. Ainda foi notado que estas camadas Es apresentaram uma densidade um pouco superior àquelas que foram identificadas somente considerando os ventos (Figura 5.17b). Portanto, segundo os resultados das simulações, um campo elétrico zonal pode influenciar como um fator positivo para o adensamento do plasma ionosférico. Sobre esses resultados, não encontrou-se nada específico na literatura referente à análise de campos elétricos observacionais na formação das camadas Es. Contudo, Dagar et al. (1977) utilizaram em suas simulações um campo elétrico zonal equatorial de valores parecidos com os observacionais deste estudo e concluíram que este campo elétrico pode influenciar na formação das camadas Es, fortalecendo-a. Estas hipóteses feitas por Dagar et al. (1977) também foram testadas no MIRE para a região de São Luís, conforme mostrado na sessão seguinte.

Figura 6.4 - Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campos elétricos E_y com a presença dos ventos de marés.

Em relação ao cenário 6, o mesmo comportamento da Figura 6.3 foi constatado, onde a camada Es ocorreu durante a noite e nos horários em que esta componente do campo elétrico estava enfraquecida. Nos horários diurnos, com altos valores, a simulação do MIRE mostrou uma inibição das camadas de adensamento. Denardini et al. (2013) mostraram que o campo elétrico vertical tem uma influência significativa na formação das irregularidades do EEJ, por ser cerca de dez vezes mais intenso que o campo elétrico zonal e pela sua direção ser a mesma que o gradiente de densidade eletrônica na região E durante os horários diurnos, favorecendo o crescimento das irregularidades. Portanto, estes valores que inibem as camadas Es nas simulações do MIRE condizem com a presença das irregularidades do EEJ na região de São Luís. Isso também já foi exposto por Devasia et al. (2006), onde eles afirmaram que,

durante a ocorrência de um CEJ, os valores do campo elétrico vertical decresciam, levando ao desaparecimento das irregularidades, tanto nos dados de radares quanto as camadas Es_q nos ionogramas equatoriais. Assim, o campo elétrico vertical é considerado um fator dominante para o desenvolvimento ou não da irregularidade de plasma do EEJ e, assim, o efeito dos ventos para São Luís foi anulado pelo campo elétrico na formação da camada Es.

6.1.3 Resultados da influência do campo elétrico com valor constante nos horários em que as camadas Es_b ocorreram e ventos de marés presentes (cenário 7)

Outra análise realizada foi a investigação da intensidade dos campos elétricos nos horários em que as camadas Es_b apareceram nos ionogramas. Uma primeira característica observada foi que nestes horários, 1330 UT às 15 UT, ambas componentes dos campos elétricos sofreram um decréscimo em seus valores. Assim, foi investigado o efeito da menor intensidade destas componentes nos horários em que a camada Es_b esteve presente nos ionogramas. Em seguida, estes foram incluídos nas simulações do MIRE considerando a influência dos ventos de marés. Em síntese, foi considerado o menor valor de cada componente do campo elétrico do período de análise das Es_b. São eles:

- Campo elétrico zonal (E_y) - 0,061 mV/m;
- Campo elétrico vertical (E_z) - 2,750 mV/m.

Esta análise também concentrou-se em considerar o efeito das duas componentes em conjunto e separadamente. A Figura 6.5 mostra as simulações quando ambas componentes são incluídas no MIRE. Para esses valores, a camada Es é observada no perfil de densidade eletrônica simulado. Estes resultados podem ser comparados com a Figura 5.17b, que mostra resultados para a mesma estação do ano quando somente os ventos de marés estão considerados.

Figura 6.5 - Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campos elétricos E_y e E_z constantes na presença dos ventos de marés.

Os resultados do estudo das componentes dos campos elétricos incluídas separadamente são mostrados nas Figuras 6.6 e 6.7. Em relação ao efeito do campo E_y (Figura 6.6), a camada Es é observada bem pronunciada ao longo do dia. A sua maior intensidade, indicada pela seta vermelha, é superior comparada com o perfil de densidade eletrônica em que somente o vento de maré foi levado em consideração (vide Figura 5.17b). Com relação ao resultado obtido pela análise da inclusão da componente E_z (Figura 6.7), a presença das camadas Es também é notada com um perfil semelhante à Figura 5.17b, porém ocorrendo em alturas diferentes.

Figura 6.6 - Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campo elétrico E_y constante na presença dos ventos de marés.

Figura 6.7 - Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campo elétrico E_z constante na presença dos ventos de marés.

6.2 Análise do efeito do campo elétrico para a região de São Luís - MA em 2009

Os mesmos critérios da análise do campo elétrico em 2005 foram aplicados para alguns dias do ano de 2009. O resultado desta análise será apresentado e discutido em termos do exemplo do dia 12 de agosto de 2009. A Figura 6.8 mostra os ionogramas referentes a este dia, das 12 UT até as 21 UT, a cada 10 minutos. Neste ano, o efeito da corrente do EEJ é fraco devido ao afastamento do equador magnético em São Luís. Portanto, as camadas Es_b, indicada pelas setas vermelhas nos ionogramas, são frequentemente observadas ao longo do dia. Ou seja, estas camadas de bloqueio praticamente dominaram as camadas de irregularidades em quase todos os horários do dia.

Figura 6.8 - Ionogramas de São Luís para o dia 12 de agosto de 2009, nos horários de 12 UT às 1545 UT, indicando a presença de camadas Es_b em setas vermelhas.

As componentes dos campos elétricos zonal e vertical derivadas do radar RESCO são mostradas na Figura 6.9. Nota-se que a intensidade dessas componentes é inferior quando comparada com as componentes analisadas para o ano de 2005. Os mesmos cenários descritos na sessão anterior serão utilizados.

Figura 6.9 - Perfil diário das componentes zonal e vertical do campo elétrico em São Luís obtido pelo radar RESCO no dia 12 de agosto de 2009.

6.2.1 Resultados da influência das componentes zonal e meridional analisadas conjuntamente e separadamente e ventos de marés ausentes (cenários 1, 2 e 3)

Para estes cenários, os resultados mostraram ser os mesmos para o ano de 2005, ou seja, não ocorreu camada Es quando o vento não é incluído. Portanto, nestas condições, somente os valores das componentes dos campos elétricos em São Luís não são suficientes para formarem as camadas Es de adensamento no modelo MIRE.

6.2.2 Resultados da influência das componentes zonal e meridional analisadas conjuntamente e separadamente e ventos de marés presentes (cenários 4, 5 e 6)

Para os resultados dos cenários 4 e 6, quando a componente vertical do campo elétrico é considerada, os resultados são similares e o perfil das simulações é mostrado na Figura 6.10 em 00 UT, 08 UT e 16 UT. Este fato confirma que o campo elétrico vertical é dominante no processo de formação da camada Es. Como a intensidade do campo elétrico na região de São Luís em 2009 é inferior àquela registrada no ano de 2005, o modelo simulou a camada Es durante a maior parte do dia. Em síntese, a

camada Es foi observada até as 1430 UT, desaparecendo e retornando às 1700 UT. Nestes horários, a intensidade do campo elétrico vertical alcançou valores maiores inibindo a formação da camada Es.

Figura 6.10 - Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campos elétricos E_y e E_z com a presença dos ventos de marés para dia 12 de agosto de 2009. As simulações considerando somente o campo elétrico E_z retornaram este mesmo perfil.

Em relação ao cenário 5, apenas levando em consideração o campo elétrico E_y, o modelo simulou a camada Es, indicada na Figura 6.11. Comparando com os resultados em que somente os ventos são considerados, o campo elétrico zonal tem pouca influência na formação das camadas Es nas simulações do MIRE para este dia. Os resultados são similares àqueles obtidos quando somente as componentes dos ventos são consideradas (Figura 5.19d).

Figura 6.11 - Perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE utilizando campos elétricos E_y com a presença dos ventos de marés para dia 12 de agosto de 2009.

Por ocorrerem camadas Es_b durante todo o dia, o critério 7 não foi analisado. Finalmente, a partir dessas análises foi possível estabelecer um campo elétrico zonal e vertical limite que possibilita a observação das camadas Es nas simulações do MIRE. Em relação ao campo elétrico zonal, sua influência é pouco pronunciada, fortalecendo sutilmente as camadas Es. Neste estudo, os seus valores não ultrapassaram 1 mV/m e, portanto, não exerceram um papel significativo na formação das camadas Es. Já o campo elétrico vertical é considerado um fator dominante para o desenvolvimento ou não da irregularidade de plasma do EEJ e, por conseguinte, tem influência significativa no aparecimento das camadas Es_b. Nas simulações, com a inclusão dos ventos, um valor limiar constante da componente vertical do campo elétrico é de 3,85 mV/m. Os valores superiores a este, independente do valor da componente zonal, não geram camadas Es_b no perfil ionosférico do MIRE.

6.3 Análise do efeito do campo elétrico de Dagar et al. (1977)

Dagar et al. (1977) propuseram perfis de campos elétricos em regiões equatoriais que poderiam influenciar na formação das camadas Es. A fim de averiguar este fato, estes campos elétricos foram introduzidos nas simulações feitas pelo MIRE. Em síntese, foram usados um campo elétrico zonal variável com a altura e outro constante, como mostrado na Figura 4.7a. A análise apresentada será para o verão de 2005. Vale ressaltar que os resultados só foram eficazes com a presença dos ventos, que foram aproximações derivadas de medidas observacionais da região de São João do Cariri. O perfil de densidade eletrônica simulado pelo MIRE considerando um campo elétrico constante e igual a 2 mV/m é mostrado na Figura 6.12. Note que a camada Es durante a noite é observada, enquanto que durante o dia ela aparece sutilmente em alguns horários (como mostra as 08 UT) ou desaparece (como mostra as 16 UT).

Para o campo elétrico variável em altura (Figura 4.7b) os resultados são mostrados na Figura 6.13. Nesse caso, a camada Es só é vista nos horários noturnos. Dagar et al. (1977) concluíram que estes campos juntamente com os ventos poderiam resultar em valores de densidade eletrônica comparáveis aos dos dados observacionais de regiões equatoriais. No caso estudado aqui, os valores para a região noturna nas simulações do modelo MIRE ultrapassam 10^6elétrons/cm^3, valores muito mais altos que os dados observacionais já mostrados no Capítulo 5. O campo elétrico zonal, portanto, tem o efeito de aumentar o valor da densidade eletrônica da camada Es durante a noite. Nos horários diurnos, entretanto, este campo elétrico zonal tende a inibir as camadas Es. Os ventos testados por Dagar et al. (1977) foram bem simplificados em

Figura 6.12 - Perfil de densidade eletrônica do modelo MIRE considerando a presença dos ventos e de um campo elétrico zonal de 2 mV/m para a estação de verão em 2005.

relação aos simulados nesta análise e, por isso, as conclusões do trabalho de Dagar et al. (1977) ressaltavam a importância de um estudo mais completo. Portanto, nesse contexto, um campo elétrico zonal com valores relativamente maiores que 2 mV/m em regiões equatoriais não formam camadas Es ao longo do dia.

Figura 6.13 - Perfil de densidade eletrônica do MIRE considerando a presença dos ventos e de um campo elétrico zonal variável em altura para a estação de verão em 2005.

6.4 Análise do efeito do campo elétrico para a região de Cachoeira Paulista

Como foi mostrado na Figura 2.10 e também já discutido por vários autores (DAGAR et al., 1977; NYGREN et al., 1984; CARRASCO, 2005; CARRASCO et al., 2007; HALDOUPIS, 2011), o efeito do campo elétrico em baixas e médias latitudes não é significativo. Portanto, a fim de validar essa teoria, foram testados neste estudo os campos elétricos em Cachoeira Paulista. A metodologia, já explicada detalhadamente nos Capítulos 3 e 4, consiste no mapeamento de campos elétricos de regiões

equatoriais para as localidades de interesse. Para tanto, foram utilizados os dados dos parâmetros em São Luís como sendo a região equatorial. Para esta análise, é necessário que os dias sejam iguais nas regiões de São Luís e Cachoeira Paulista e, portanto, o estudo se concentrou em dois dias do ano de 2005, conforme mostrado a seguir.

6.4.1 Estudo de caso: 26 de agosto de 2005

A linha de campo magnético utilizada para os cálculos foi aquela que se mapeia a 650 km de altitude sobre o equador magnético e, assim, foram utilizadas as equações 4.16 e 4.17 para obter as componentes dos campos elétricos em Cachoeira Paulista. O perfil do campo elétrico da região F equatorial que foi mapeado para este dia é mostrado na Figura 6.14. Uma vez obtidos esses valores, eles são mapeados e utilizados nas equações para obter as componentes vertical e zonal, possibilitando analisar a sua influência. Os mesmos cenários para a região de São Luís, com exceção do 7, foram utilizados em Cachoeira Paulista.

Figura 6.14 - Perfil do campo elétrico vertical da região F equatorial utilizado para obter as componentes do campo elétrico em Cachoeira Paulista no dia 26 de agosto de 2005.

Os resultados dos primeiros cenários, quando somente a presença de campos elétricos é considerada, não mostraram a formação das camadas Es. O perfil de densidade eletrônica é similar aos mostrados anteriormente quando somente aparece a região E nas simulações. Os resultados das Figura 6.15, quando incluídos os ventos de marés, referem-se ao perfil da densidade eletrônica dos cenários 4, 5 e 6. Os gráficos superiores (a) representam o perfil de densidade eletrônica simulado levando em con-

sideração apenas o campo E_y, (b) somente o campo E_z e(c) ambas as componentes zonal e vertical do campo elétrico.

Figura 6.15 - Perfil de densidade eletrônica levando em consideração o campo E_y (letra a), o campo E_z (letra b), ambas as componentes zonal e vertical do campo elétrico (letra c) para o dia 26 de agosto de 2005.

Comparando as simulações da Figura 6.15 com os resultados da Figura 5.7d, notam-se alguns aspectos significantes. Um deles é que quando as componentes do campo elétrico são consideradas, conjuntas ou separadamente, aparece em alguns horários outra camada Es nas alturas superiores a 130 km. Essa camada Es, porém não perdura por muito tempo e, logo, o perfil de densidade eletrônica volta a ficar parecido com as simulações da Figura 5.7d. Outro aspecto interessante é que os resultados mostram que os campos elétricos em baixas latitudes, também considerando tanto a análise das componentes juntas ou separadas, causam uma diminuição no valor do pico de densidade eletrônica nas simulações do MIRE. Além disso, quando apenas o campo E_z é considerado, durante a noite há a ocorrência de outra camada Es. Por fim, em geral, o perfil quando considerados os campos elétricos é similar aos das

simulações em que somente os ventos são considerados, confirmando a teoria de que o campo elétrico nessas latitudes tem pouca influência (DAGAR et al., 1977; NYGREN et al., 1984; CARRASCO, 2005; HALDOUPIS, 2011).

Os dados observacionais do dia 26 de agosto de 2005 são mostrados na Figura 6.16 nos horários entre 00 UT e 23 UT em um intervalo de 1 hora. Nestes ionogramas é possível observar uma camada Es bem fraca até as 06 UT. A partir desse horário as camadas Es se mostram intensificadas. Em 12 UT, aparece uma camada Es intermediária na altura de aproximadamente 150 km. Essa camada Es tem um movimento de descida, alcançando a altura de 100 km em 17 UT. Este fato concorda com os resultados do MIRE tanto para as simulações em que somente o vento está presente quanto àquelas em que o campo elétrico foi incluso. Após as 17 UT a camada Es começa a enfraquecer até seu desaparecimento as 23 UT.

Figura 6.16 - Ionogramas de Cachoeira Paulista para o dia 26 de agosto de 2005 nos horários entre 00 UT e 23 UT.

6.4.2 Estudo de caso: 29 de dezembro de 2005

A mesma análise anterior foi aplicada para o dia 29 de dezembro de 2005, obtendo resultados similares ao dia 26 de agosto. O campo elétrico da região F equatorial possui valores pequenos como mostra a Figura 6.17. Após esse campo elétrico ter sido mapeado para a região de Cachoeira Paulista, foram obtidas as suas componentes zonal e vertical. Estas, por sua vez, foram utilizadas no MIRE de acordo com os critérios já citados. Os resultados simulados mostram que quando há apenas a presença de campos elétricos, somente o perfil da região E é observado, condizendo com os resultados anteriores.

Figura 6.17 - Perfil do campo elétrico vertical equatorial que foi mapeado para a região de Cachoeira Paulista para o dia 29 de dezembro de 2005.

Já os resultados após a inclusão desses campos elétricos são apresentados na figura 6.18 com os mesmos critérios utilizados na Figura 6.15. As camadas Es também aparecem em todas as análises, indicadas pelas setas vermelhas. Em geral, o comportamento é semelhante aos resultados em que somente as componentes dos ventos foram consideradas (Figura 5.7b). Além disso, quando o campo E_z é imposto nas simulações (b e c), os valores de pico da densidade eletrônica são sutilmente inferiores. Observa-se, também, no perfil noturno, que outra camada Es apareceu em alturas superiores a 130 km para os três casos em que o campo elétrico foi considerado. Por fim, como não há medidas de campos elétricos para regiões de baixas latitudes como a de Cachoeira Paulista, o estudo concentrou-se na metodologia usada em Carrasco (2005), onde as componentes dos campos elétricos podem ser encontradas utilizando campos elétricos equatoriais mapeados através das linhas de campo. Os valores dos campos elétricos têm uma influência mínima na formação das camadas Es. A sua influência parece apenas reduzir um pouco a densidade eletrônica do pico das camadas Es quando comparado com a densidade obtida das simulações que só levam em consideração os ventos.

Figura 6.18 - Perfil de densidade eletrônica levando em consideração o campo E_y (letra a), o campo E_z (letra b), ambas as componentes zonal e vertical do campo elétrico (letra c) para o dia 29 de dezembro de 2005.

A Figura 6.19 mostra os ionogramas para o dia 29 de dezembro de 2005 para Cachoeira também no intervalo de 1 hora. Neste dia, a camada Es somente apareceu bem característica a partir das 09 UT, sendo que ao longo do dia ela foi enfraquecendo até as 21 UT. Em 22 UT uma camada Es bem espalhada foi observada e durou até o final do dia (não mostrada aqui). O padrão de camada descendente não foi observada neste dia. Contudo, os resultados do modelo MIRE observados na Figura 6.17a, quando somente o campo elétrico zonal é levado em consideração, mostrou que a camada Es não apresentou uma descida tão significativa concordando com os resultados observados.

Figura 6.19 - Ionogramas de Cachoeira Paulista para o dia 26 de agosto de 2005 nos horários entre 00 UT e 23 UT.

7 ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO EFEITO DOS CAMPOS ELÉTRICOS DE PENETRAÇÃO NAS CAMADAS Es

Distúrbios magnetosféricos são fontes de campos elétricos perturbados na ionosfera que causam modificações na distribuição e dinâmica do plasma, principalmente em regiões equatoriais e de baixas latitudes (KELLEY, 1989; FEJER, 1991; ABDU, 1997; ABDU et al., 2006). Quando há um desenvolvimento de uma tempestade magnética, o vetor do campo magnético interplanetário vertical (B_z) torna-se dirigido para o sul, favorecendo a penetração de campos elétricos intensificados. Estes campos elétricos penetram nas regiões equatoriais e de baixas latitudes com polaridade para leste durante o dia e oeste durante a noite e são denominados *undershielding*. Quando há uma recuperação da tempestade magnética, o vetor Bz tem sua direção modificada para o norte, causando um decréscimo nos campos elétricos de convecção. Dessa forma, o campo elétrico da camada de blindagem na plasmasfera, denominado *overshielding*, se estabelece. Este possui direção para oeste durante o dia e para leste durante a noite. Um estudo recente realizado por Abdu et al. (2013) constatou que os processos de formação e a dinâmica das camadas Es podem sofrer influências destes campos elétricos de penetração direta na ionosfera durante períodos perturbados. Em síntese, Abdu et al. (2013) verificaram que um campo elétrico de penetração *undershielding* poderia fortalecer as camadas Es, enquanto um *overshielding* pode causar uma ruptura dependendo da hora local. Nesse contexto, foram escolhidos dois eventos de tempestades magnéticas em que há indícios de penetração de campos elétricos na ionosfera equatorial. Com isso, foi analisado o perfil das camadas Es nos dados de digissonda e via simulação a fim de averiguar as hipóteses propostas por Abdu et al. (2013). Estes estudos de caso são apresentados a seguir. Vale ressaltar que para esta análise foram utilizados os índices magnéticos, AE e Dst, a fim de definir se o período está perturbado. O índice AE (Auroral Eletroject) mede as variações nos eletrojatos aurorais e seu valor é obtido com base nas medidas da componente H do campo magnético. Sua intensidade é proporcional ao depósito de energia cinética das partículas que se precipitam na região auroral. Já o Dst indica a intensidade da corrente de anel utilizando a componente H normalizada medida por magnetômetros instalados em regiões equatoriais do globo terrestre.

7.1 Estudo da ocorrência de Es e seu comportamento e mecanismos de geração durante a tempestade geomagnética ocorrida em outubro de 2003

A Figura 7.1 mostra a variação do parâmetro interplanetário, Bz, os índices magnéticos, AE e Dst, e a deriva vertical de São Luís, V_z, para o dia 29 de outubro de 2003 em hora universal. A tempestade magnética iniciou-se no dia 29 de outubro de 2003 em torno das 06 UT visualizado pelo índice magnético Dst. Neste horário é observado que o Bz assume valores mais negativos acompanhado por uma intensificação abrupta do índice AE. Além disso, a partir das 06 UT, a deriva da região F para São Luís apresenta um movimento de descida, seguida por uma completa ausência de medidas devido ao desaparecimento da região F. Em seguida, em torno das 08 UT, a região F apresenta uma alta deriva. Essas características são indicadas pelas setas vermelhas e, em nossa interpretação, evidenciam a possibilidade de ocorrência de campos elétricos de penetração dito *undershielding* com polaridade para oeste, uma vez que o período encontra-se horários noturnos. Batista et al. (2006) e Abdu et al. (2009) confirmaram a ocorrência de penetração de campos elétricos na ionosfera equatorial para este dia, utilizando dados de satélites e magnetômetros da região de Jicamarca (11,57°S, 76,52°O).

Abdu et al. (2013) analisaram o efeito de penetração de campos elétricos nas camadas Es de baixas latitudes na região brasileira neste período perturbado de outubro de 2003. As modificações encontradas nas camadas Es foram associadas a uma ionização extra causada por precipitação de partículas na região da Anomalia Magnética da América do Sul (SAMA). Em razão disso, os campos elétricos perturbados de penetração foram testados via simulação para se ter uma ideia da resposta do MIRE a estes casos. A análise do efeito destes campos elétricos em baixas latitudes consistiu no mapeamentos dos campos elétricos verticais de uma região equatorial, já realizada no capítulo 6. A diferença neste caso foi que, antes de se fazer o mapeamento, acrescentou-se o valor de pertubação na componente vertical equatorial do campo elétrico nos horários em que ocorreram a penetração. Por fim, os resultados simulados foram comparados com os ionogramas.

A penetração de campos elétricos iniciou-se às 0610 UT do dia 29 de outubro e seus efeitos foram considerado até às 08 UT. Batista et al. (2006) estimaram que a velocidade de deriva em São Luís alcançou 130 m/s neste caso, o que foi observado às 08 UT na Figura 7.1. Para essa velocidade, é possível haver um campo elétrico zonal de 3,5 mV/m na direção oeste. Este hipótese foi considerada no MIRE para o

Figura 7.1 - Componente interplanetário do campo magnético vertical, Bz (laranja), índices magnéticos de perturbação, Dst (cinza) e AE (azul), e deriva vertical para a região de São Luís (verde) no dia 29 de outubro de 2003. As setas vermelhas indicam o horário que se iniciou a penetração de campos elétricos.

dia em questão.

A Figura 7.2 apresenta os ionogramas para São Luís entre 0615 UT e 08 UT. Em períodos calmos, os campos elétricos zonais e verticais nos horários noturnos não são fortes o suficiente para que as irregularidades de plasma sejam observadas nos ionogramas de São Luís. A região F desaparece por completo a partir das 0730 UT e reaparece a uma altura superior a 500 km às 08 UT.

Na Figura 7.3 são apresentados os ionogramas de Cachoeira Paulista, onde uma forte camada Es_b dura até às 0845 UT. Após estes horários (não mostrada aqui), a camada Es vai se enfraquecendo e, reapare após as 12 UT como uma camada Es_c, típica dessas regiões. Essa forte camada Es_b pode ter influência do campo elétrico de penetração, que modifica a deriva da região F equatorial e, por sua vez, o campo elétrico vertical. Este último pode causar modificações em regiões como Cachoeira Paulista (ABDU et al., 2003; ABDU et al., 2013). Assim, foi incluído um campo elétrico de 3,5 mV/m nos horários correspondentes a penetração de campos elétricos e fo-

Figura 7.2 - Ionogramas da região de São Luís, das 06 UT às 08 UT, indicando a presença da irregularidade do EEJ pelas setas vermelhas.

ram obtidos as componentes zonal e vertical para Cachoeira Paulista. Por fim, essas componentes foram incluídas nas simulações juntamente com um perfil de ventos observacionais. Devido a ausência de dados de ventos em 2003 para Cachoeira Paulista foram utilizados os dados de ventos da primavera de 2005. Os resultados estão apresentados na Figura 7.4, para os horários em que ocorreu a penetração (06 UT, 07 UT e 08 UT) em três etapas: considerando o efeito da componente E_y, o efeito da componente E_z e o efeito de ambas componentes.

Observa-se que quando somente foi considerada a influência do E_y, a presença das camadas Es é observada claramente nas simulações. Em relação aos efeitos da componente vertical e de ambas componentes juntas, as simulações apresentam resultados similares, com a presença de uma camada Es, mas menos expressiva. Portanto, o valor do campo elétrico para oeste ainda permite a visualização das camadas Es no MIRE, concordando com os dados observados nos ionogramas. Abdu et al. (2013) enfatizaram que o campo elétrico de penetração poderia ter relação no aparecimento de fortes camadas Es_b em regiões como Cachoeira Paulista e Fortaleza associada também a precipitação de partículas. Nesse estudo não foi realizada uma análise

Figura 7.3 - Ionogramas da região de Cachoeira Paulista, das 06 UT às 08 UT, indicando a presença das camadas Es_b pelas setas vermelhas.

detalhada de todas as variáveis possíveis e tampouco foi considerado o efeito das precipitações de partículas nas camadas Es. Apenas visou-se o objetivo de promover um estudo inicial da resposta dos campos elétricos de penetração nas simulações do MIRE. Para fins comparativos, os resultados das simulações desconsiderando estes campos elétricos, ou seja, somente considerando as componentes dos ventos, são mostrados na Figura 7.4d. Note que também existem duas camadas Es neste perfil, contudo a camada nas alturas de 130 km é mais pronunciada. Assim, o efeito do campo elétrico de penetração zonal foi suprimir essa camada Es em 130 km. Já em 110 km, altura de maior ocorrência das camadas Es, em ambos critérios, com ou sem campos elétricos, o efeito da componente oeste do campo elétrico foi intensificar esta camada Es, o que está de acordo com as observações nos ionogramas. Por fim, é importante ressaltar que os ventos também podem estar perturbados e, como isso não foi considerado no MIRE, os resultados das simulações podem ainda ter modificações em relação aos aqui apresentados.

Figura 7.4 - Resultados do MIRE incluindo em (a) componente zonal E_y, (b) componente vertical E_z, (c) componentes E_y e E_z e (d) somente o perfil dos ventos em Cachoeira Paulista.

7.2 Estudo da ocorrência de Es e seu comportamento e mecanismos de geração durante a tempestade geomagnética ocorrida em dezembro de 2006

A fim de complementar este estudo foi feita a análise para a tempestade de dezembro de 2006 (Figura 7.5), onde acredita-se que houve penetração de campos elétricos também nos períodos noturnos. No caso estudado, ocorreu um choque da estrutura solar na magnetopausa às 1425 UT, como pode ser visto através do aumento do índice AE. Após esse aumento, este índice permaneceu oscilando até o fim do dia, com valores entre 1000 e 2000 nT. Nos horários em torno das 23 UT é notado que o Bz

encontra-se para sul. Além disso, ocorreu uma queda na deriva vertical do plasma, bem como flutuações neste parâmetro, indicando a possibilidade de ocorrência de penetração de campos elétricos. Estudos anteriores (NOGUEIRA, 2009; SIQUEIRA, 2012) confirmaram a existência de penetrações de campos elétricos nestes horários utilizando além desses parâmetros, a componente H da estação de Jicamarca e índices de frequência da região F. Então, conclui-se que nesse dia há a penetração de um campo elétrico *undershieding* na direção oeste (período noturno).

Figura 7.5 - Componente interplanetário do campo magnético vertical, Bz (laranja), índices magnéticos de perturbação, Dst (cinza) e AE (azul), e deriva vertical para a região de São Luís (verde) no dia 14 de dezembro de 2006. As setas vermelhas indicam o horário que se iniciou a penetração de campos elétricos.

Para esse caso, foi considerada uma deriva de 60 m/s no horário anterior à queda neste parâmetro, equivalente à presença de um campo elétrico de 1,5 mV/m. O processo de análise foi o mesmo para o estudo de caso da tempestade de outubro de 2003. Os ionogramas das Figuras 7.6 e 7.7 representam os horários de 2215 UT até as 2330 UT para São Luís (a) e Cachoeira Paulista (b). Em São Luís não há a presença significativa da camada Es nem presença das irregularidades de deriva de

gradiente neste horário. Em Cachoeira Paulista observa-se a presença da camada Es_b até as 2230 UT, em seguida ela desaparece por completo. Portanto, se houve algum efeito desses campos elétricos em Cachoeira Paulista foi de inibição da camada Es.

Figura 7.6 - Ionogramas da região de São Luís, das 2215 UT às 23 UT, indicando a ausência das camadas Es.

Figura 7.7 - Ionogramas da região de Cachoeira Paulista, das 2215 UT às 23 UT, indicando a ausência das camadas Es.

Os resultados das simulações estão apresentados nas Figura 7.8, divididos em etapas

como a Figura 7.4. Nesse caso, os ventos utilizados foram aqueles do verão de 2005 para Cachoeira Paulista. Uma análise simplificada mostra que o campo elétrico está em direção oeste e, por isso, as camadas Es_b são vistas nas simulações. Abdu et al. (2003) concluíram que um campo elétrico zonal para oeste modificam as condutividades de plasma da região F equatoriais e, assim, poderiam intensificar as camadas Es em regiões de baixas latitudes. O seu estudo foi em torno dos horários de pico de pré-reversão. Já nesta análise, como é vista nas simulações de Cachoeira Paulista, observa-se que um campo elétrico para oeste produz o aparecimento das camadas Es_b no perfil de densidade eletrônica. Esses resultados discordam das observações nos ionogramas. Contudo, essa análise é simplificada e precisa ser melhor detalhada, incluindo modificações de condutividade, precipitação de partículas e perfis reais de ventos para estas datas. Estes tópicos serão abordados mais criteriosamente em trabalhos futuros.

Na Figura 7.8d é mostrado o perfil de densidade eletrônica considerando somente a presença dos ventos. Estes resultados assemelham-se com o perfil em que o campo elétrico E_y é levado em consideração. Quando a componente vertical do campo elétrico é incluída nas simulações, as camadas Es_b são vistas menos pronunciadas. Por fim, os resultados do MIRE possuem uma concordância razoável com os dados de ionogramas na ocorrência de camadas Es quando há inclusão de campos elétricos de penetração para oeste nos horários noturnos. Contudo, ainda necessita-se incluir outros processos nas simulações para que conclusões mais significativas sejam elaboradas e, assim, estima-se que os resultados futuros irão contribuir para uma melhor compreensão na dinâmica das variações das camadas Es vistas nos dados em períodos perturbados via simulações.

Figura 7.8 - Resultados do MIRE incluindo em (a) componente zonal E_y, (b) componente vertical E_z, (c) componentes E_y e E_z e (d) somente perfil dos ventos em Cachoeira Paulista.

8 CONCLUSÕES

O propósito deste trabalho foi qualificar o papel dos ventos de cisalhamento e dos campos elétricos na formação das camadas Es_b em setores equatoriais e de baixas latitudes. Este estudo concentrou-se na análise de dados observacionais dos parâmetros de frequências (*fb*Es e *fo*Es) obtidos nos ionogramas e nas simulações realizadas para as devidas comparações. A motivação destas análises se deu principalmente pelo estudo da região de São Luís, uma região considerada de transição, onde claramente se observa nos ionogramas a competição entre ventos de cisalhamento, vistos nas camadas Es_b, e campos elétricos das irregularidades, observados através das camadas Es_q. A região de baixa latitude, Cachoeira Paulista, foi escolhida para comparar e validar os resultados obtidos. Para atingir os objetivos propostos foi necessário realizar modificações, principalmente nos parâmetros de ventos e campos elétricos no MIRE, inicialmente desenvolvido por Carrasco (2005).

Em Cachoeira Paulista, nos anos estudados de 2005 e 2008, o parâmetro *fb*Es possui um comportamento típico, caracterizado por um aumento durante o período matutino, em torno das 9 UT, alcançando valores máximos em torno das 15 UT e retornando a valores quiescentes a partir das 21 UT. Já em São Luís, este mesmo parâmetro não tem um padrão específico de comportamento. As camadas ditas Es_q ou Es_{nb} foram excluídas desses estudo por serem camadas de irregularidades e não de adensamentos do plasma. Outra característica na região de São Luís é que em relação os anos estudados, 2005 e 2009, destaca-se uma diferença significativa. No caso, em 2009 as camadas Es_b são mais frequentes, em virtude de hipótese que as irregularidades de plasma presentes estão enfraquecidas devido ao afastamento da corrente do EEJ.

Uma das principais análises deste estudo está nas simulações realizadas com o MIRE para averiguar o comportamento das camadas Es via modelagem. Os resultados das simulações foram divididos em duas etapas, levando em consideração o efeitos dos ventos e dos campos elétricos. Em relação aos ventos, a principal abordagem foi analisar os efeitos das marés diurnas e semidiurnas das componentes zonal e meridional nas equações de cisalhamento do modelo de Morton et al. (1993). Inicialmente, para Cachoeira Paulista, foi simulado um perfil de ventos estacionário, ou seja, em que a fase não foi levada em consideração. Os resultados simulados mostraram mais de uma camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida pelo MIRE. De fato, em alguns ionogramas para Cachoeira Paulista, pode-se notar a existência de mais de uma camada Es. As camadas Es que foram observadas neste perfil estão nas altu-

ras de 110 km e de 125 km. O pico de densidade eletrônica obtido nas simulações para a camada Es em 110 km foi comparado com os dados observacionais utilizando o parâmetro *fb*Es. Os resultados das simulações do MIRE mostraram que há uma tendência em acompanhar o perfil dos dados observacionais. Contudo, as camadas Es vistas nestas simulações são estacionárias ao longo do dia, uma vez que a fase do vento foi desconsiderada, e não condizem com o padrão descendente que a presença dos ventos de marés proporciona. Portanto, simulações de ventos estacionários não foi feito para a região de São Luís.

Em seguida, foram realizadas simulações levando em consideração os ventos variáveis ao longo do dia, tanto para Cachoeira Paulista quanto para São Luís. Na região de Cachoeira Paulista, os resultados das simulações mostraram pontos significantes. Um deles é que o cisalhamento dos ventos se dá de forma diferente para cada estação do ano e, por isso, a camada Es nos perfis de densidade das simulações apresentam características distintas para cada período analisado. Em algumas estações, como primavera e outono de 2005 e verão, inverno e outono de 2008, é possível observar a presença de mais de uma camada Es. Essa caraterística é observada claramente nos períodos noturnos. Em São Luís, as componentes dos ventos em ambos os anos possuem amplitudes inferiores comparadas aos perfis de ventos de Cachoeira Paulista. Isso resulta, geralmente, no aparecimento de uma camada Es no perfil de densidade eletrônica gerado pelo MIRE. Observa-se também que a média das simulações do modelo MIRE na região de São Luís não apresenta de fato um comportamento típico que é caracterizado por um aumento durante o período matutino, em torno das 9 UT (6 LT), alcançando valores máximos em torno das 15 UT (12 LT) e retornando a valores quiescentes a partir das 21 UT (18 LT), como observado em Cachoeira Paulista. Para o ano de 2009 em São Luís, os perfis dos ventos possuem amplitudes superiores às de 2005 e também mais irregulares. Neste caso, ressaltou-se o inverno em que as amplitudes são equiparadas aos dados de Cachoeira Paulista. Em ambas as regiões de estudo, a camada Es mostrou um comportamento com padrão descendente. Esse fato, bem conhecido na literatura, é devido às componentes de marés. Além disso, as simulações das duas regiões estudadas mostraram boa concordância com os dados observacionais, tanto no comportamento quanto nos valores de densidade eletrônica.

O parâmetro *fo*Es também foi estudado neste trabalho com o objetivo de analisar a sua relação com os dados observacionais. Desse modo, foi possível averiguar qual dos parâmetros de frequência da digissonda melhor representa a densidade eletrônica da camada Es. Os resultados de Cachoeira Paulista mostraram que, na maioria

das estações e para os dois anos de análise, o parâmetro *fo*Es possui valores superiores quando comparado com os resultados das simulações. Este fato somente não foi observado na estação de inverno, onde o parâmetro *fo*Es teve uma melhor concordância com o MIRE, tanto em 2005 quanto 2008. Além disso, os resultados do MIRE apresentam um comportamento caracterizado por valores baixos até as 06 UT, seguido de uma subida até alcançar o máximo em torno das 12 UT e em seguida, um decréscimo atingindo novamente valores baixos. Esse comportamento só é observado no parâmetro *fb*Es. Em relação a São Luís nota-se que, para ambos os anos e em todas estações, o modelo retorna valores de densidade eletrônica muito inferiores quando comparados aos dados obtidos pelo parâmetro *fo*Es. Uma análise similar já foi realizada por Reddy e Rao (1968) e eles mostraram que o parâmetro de frequência *fb*Es fornece valores de concentração de densidade eletrônica mais próximos aos dados observados por foguetes, enquanto que o parâmetro *fo*Es apresentou valores de densidade eletrônica superiores. Assim, em geral, os resultados das análises para as regiões de Cachoeira Paulista e de São Luís são equivalentes às observações realizadas por Reddy e Rao (1968). Portanto, neste estudo, conclui-se que o melhor parâmetro para representar a densidade eletrônica da camada Es é o parâmetro *fb*Es.

Os resultados de campos elétricos foram divididos em cenários distintos. Na região de São Luís, os valores de campos elétricos analisados foram obtidos do radar RESCO. Dois dias distintos, um em 2005 e outro em 2009, tiveram o comportamento averiguado levando em consideração a presença ou não dos ventos de marés. No estudo das componentes dos campos elétricos, verificou-se que a amplitude da componente vertical é superior à da componente zonal. Durante as observações das camadas Es_b nos ionogramas, notou-se que os valores da componentes dos campos elétricos eram menores do que nos horários em que as camadas Es_b não eram observadas. Nas simulações em que somente as componentes E_y e E_z foram testadas, sejam elas em conjunto ou separadamente, não foi possível observar nos perfis de densidade eletrônica do MIRE a presença das camadas Es. Quando foram consideradas a componente E_y e as componentes dos ventos de marés, a camada Es foi observada nos dois dias estudados. Já quando foi incluída a componente E_z, mesmo com a presença dos ventos de marés, somente foram observadas camadas Es nas simulações quando os valores dessa componente eram baixos. Outro cenário analisado foi averiguar o efeito dos valores das componentes desses campos nos horários em que a Es_b ocorria. Em síntese, foram considerados os menores valores para cada componente do campo elétrico,referente à presença das Es_b nos ionogramas. Para este caso, a camada Es_b apareceu significativamente quando a componente E_y foi considerada, sendo até mais

pronunciada do que as camadas Es simuladas somente com a presença dos ventos de marés. Nas simulações que incluíram a componente E_z, as camada Es_b apareceram mais sutilmente. Portanto, conclui-se que o campo elétrico vertical é considerado um fator dominante para o desenvolvimento ou não da irregularidade de plasma do EEJ e, portanto, o efeito dos ventos para São Luís foi superado pela presença dessas irregularidades. O valor limite nas simulações da componente E_z é de 3,85 mV/m, ou seja, valores superiores a este não geram camadas Es_b no perfil ionosférico do MIRE.

Outro cenário analisado foi aquele utilizando os modelos de campo elétrico propostos por Dagar et al. (1977). Em síntese, foram feitas simulações utilizando um campo elétrico zonal variável em altura e outro constante de 2,0 mV/m. Os resultados foram eficazes para gerar camadas Es somente quando a presença dos ventos de marés foram considerados. Em relação aos valores constantes de campos elétricos, a camada Es durante a noite foi observada, enquanto nos horários diurnos ela apareceu sutilmente. Para o campo elétrico variável em altura, as simulações só mostram as camada Es nos horários noturnos. Estas camadas Es simuladas possuem valores que ultrapassam 10^6 elétrons/cm^3, valores tipicamente altos comparados aos dados observacionais. Nesse contexto, um campo elétrico zonal com valores relativamente altos em regiões equatoriais, não formaram camadas Es ao longo do dia nas simulações do modelo MIRE.

Em relação ao estudo da região de Cachoeira Paulista, os campos elétricos foram obtidos utilizando o mapeamento do campo elétrico vertical da região equatorial através das linhas de campo magnético e, assim, foram obtidas as componentes dos campos elétricos nesta região. Para a análise, os mesmos cenários para a região de São Luís foram utilizados, com exceção do 7. Foram feitos estudos de caso para dois dias e os resultados simulados dos primeiros cenários, quando a presença de campos elétricos é considerada na ausência dos ventos de marés não mostram a formação de camadas Es. Quando foram incluídos os ventos de marés, as camadas Es aparecem em todos os cenários analisados. Os resultados mostraram que a influência de ambas componentes dos campos elétricos, consideradas juntas ou separadas, causaram uma diminuição no valor do pico de densidade eletrônica nas simulações do MIRE. Contudo, essa diminuição não é muito relevante, confirmando que o campo elétrico não possui influência significativa em baixas latitudes.

Quanto ao estudo da influência dos campos elétricos de penetração em regiões de baixas latitudes, foram selecionados dois eventos de tempestades magnéticas. O pri-

meiro evento ocorreu no dia 29 de outubro de 2003, no qual ocorreu penetração direta de campos elétricos de altas para baixas latitudes, nos horários entre 0615 UT e 08 UT. O outro dia analisado foi no dia 14 de dezembro de 2006, em que a penetração de campos elétricos perturbados ocorreu nos horários de 2215 UT às 2330 UT. O objetivo deste estudo é averiguar, via simulação, as hipóteses levantadas por Abdu et al. (2013), de que campos elétricos de penetração *undershielding* e *overshielding* podem fortalecer ou causar uma ruptura nas camadas Es, respectivamente. A análise do efeito destes campos elétricos em baixas latitudes consistiu no mapeamento das componentes verticais dos campos elétricos equatoriais. Portanto, foi acrescentado o valor de pertubação na componente vertical do campo elétrico equatorial nos horários em que a penetração ocorreu.

Na análise de campos elétricos de penetração para o dia 29 de outubro de 2003, o valor do campo elétrico zonal de perturbação foi de 3,5 mV/m. As componentes dos campos elétricos com essa influência de perturbação foram simuladas no MIRE juntamente com a presença de ventos de marés. Os resultados mostraram que duas camada Es aparecem nas simulações, tanto considerando o efeito das componentes E_y e E_z conjuntas bem como separadas. Contudo, a componente vertical do campo elétrico, em alguns casos, faz com que a camada Es seja menos expressiva quando comparada às simulações em que somente os ventos foram considerados. Além disso, a inclusão dessa componente fez com que surgisse outra camada Es, observada no período noturno. Em síntese, o efeito do campo elétrico de penetração foi intensificar a camada Es nas alturas de 110 km, o que está de acordo com os ionogramas.

O outro evento estudo foi no dia 14 de dezembro de 2006, onde também houve penetração de campos elétricos do tipo *undershielding* nos períodos noturnos. Para esse caso, foi investigada a influência de um campo elétrico no valor de 1,5 mV/m, e utilizado o mesmo método do dia 29 de outubro de 2003. Os resultados das simulações, quando inclusos os campos elétricos perturbados em Cachoeira Paulista, mostraram o aparecimento das camadas Es_b no perfil de densidade eletrônica. Este fato, discordou das observações nos ionogramas. Contudo, vale salientar que essa análise foi simplificada e, ainda, precisa ser melhor detalhada, incluindo modificações de condutividade, precipitação de partículas e perfis reais de ventos para estas datas. Por fim, esse estudo apenas teve o propósito de promover uma análise inicial da resposta dos campos elétricos de penetração nas simulações do MIRE. Estes tópicos serão abordados mais criteriosamente em trabalhos futuros.

Finalmente, este trabalho evidencia aspectos que são considerados importantes para

o estudo das camadas Es, mostrando uma análise nova em relação ao perfil de camadas Es na região de transição, São Luís e de baixas latitudes. Os resultados mostraram a importância dos ventos de marés nas formação das camadas Es e que os valores de campos elétricos das irregularidades podem inibir este efeito dos ventos em São Luís. Além disso, as modificações no código numérico MIRE possibilitaram simulações mais realísticas das camadas Es e validaram a competição de campos elétricos e ventos em ambas regiões de análise. Em períodos calmos, foi constatado que o modelo MIRE obteve resultados satisfatórios em relação aos observacionais, condizendo com as teorias existentes. Já em períodos perturbados, é necessário um estudo mais abrangentes e investigações futuras. No caso, para a realização deste propósito serão necessárias modificações neste modelo, a fim de representar a dinâmica das camadas Es nos períodos perturbados. Nesses termos, lista-se a seguir alguns pontos considerados promissores para serem explorados em estudos futuros. São eles:

- Modificação da condutividade: Durante períodos perturbados, é possível ocorrer uma ionização extra que pode modificar a condutividade integrada ao longo das linhas de campo magnético. Esse fato foi discutido por Abdu et al. (2003), onde foi observado que a condutividade ionosférica, principalmente da região F, pode ser alterada durante uma tempestade magnética. Assim, os campos elétricos presentes também sofrem modificações. Portanto, estes campos elétricos modificados pode ser mapeados da região F para a região E ocasionando um fortalecimento ou desaparecimento da camada Es. Adicionalmente, Abdu et al. (2013) verificou que essa alteração na condutividade eletrônica durante períodos perturbados podem causar o aparecimento de uma região E noturna nos ionogramas, a qual geralmente não pode ser visualizada durante períodos calmos devido à baixa densidade eletrônica desta região nestes horários. Esta alteração na condutividade e o aparecimento da região E em períodos noturnos já se encontram modelados no Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model (SUPIM). Contudo, este modelo não simula a evolução dinâmica da camada Es. Por isso, estes fenômenos também poderão ser incluídos no modelo MIRE para que a simulação seja mais realista.

- Inclusão de ventos perturbados: Neste trabalho foi incluído no modelo MIRE a média de ventos de marés observacionais. Contudo, essa média representa adequadamente apenas períodos calmos e diz respeito a uma estatística obtida sobre estações do ano. No entanto, para obter uma mo-

delagem que possibilite analisar satisfatoriamente os efeitos em períodos perturbados, será necessário incluir perfis de ventos diários, tanto teóricos quanto observacionais. Os dados observacionais de ventos de marés podem ser obtidos dos radares meteóricos do tipo SKiYMET, que encontram-se instalados em Cariri-PB, que representa uma região equatorial, e Cachoeira Paulista, que representa uma região de baixa latitude.

- Possibilidade de campos elétricos se mapearem através das linhas de campo magnético no MIRE: Como estudado por Carrasco (2005) e Abdu et al. (2013), campos elétricos da região F equatorial podem se mapear para regiões de baixas latitudes nas alturas de 100 km (região E ionosférica) e influenciar na formação ou desaparecimento das camadas Es. A simulação deste efeito é complexa e já foi realizada por Carrasco (2005). Contudo, este fenômeno não está incluído no modelo MIRE atualmente. Dessa forma, acredita-se ser necessário também a sua inclusão para tornar o modelo mais completo e realista.

- Inclusão de campos elétricos perturbados: O modelo MIRE, conforme se encontra implementado, apresenta instabilidade na convergência do método de solução das equações diferenciais parciais quando campos elétricos de módulo elevado são simulados. Neste estudo, foi verificado que valores superiores a 3,85 mV/m inibem a formação da camadas Es nos perfis de densidade eletrônica fornecidos pelo modelo. No estudo de Abdu et al. (2013) foi estimado que um campo elétrico perturbado para formar uma camada Es com alta densidade eletrônica deverá possuir módulo maior ou igual a 12 mV/m. Assim, uma vez que esta magnitude de campo elétrico causa atualmente uma instabilidade na solução do MIRE, deve-se modificá-lo para se obter um modelo funcional de camadas Es em períodos de alta atividade magnética. Uma das possibilidades para a correção deste problema é alterar o algoritmo de solução das equações diferenciais parciais para um mais preciso, que evite tal instabilidade em modelos com dinâmica rápida. Esta modificação é essencial para o trabalho, pois atualmente não existe um modelo funcional de simulação de camadas Es em períodos perturbados.

Portanto, pretende-se futuramente desenvolver um modelo que simulará o comportamento das camadas Es em períodos perturbados e verificar sua concordância com dados observacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, M. A. Major phenomena of the equatorial ionosphere-termosphere system under disturbed conditions. **Journal of Atmospheric, Solar and Terrestrial Physics**, v. 59, p. 1505–1519, 1997. 35, 36, 45, 127

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S. Sporadic E-layer phenomena in the brazilian geomagnetic anomaly: evidence for a regular particle ionization source. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 39, n. 6, p. 723?732, 1977. 16, 20

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; MACDOUGALL, J.; SOBRAL, J. H. A.; MURALIKRISHNA, P. Permanent changes in sporadic E layers over Fortaleza, Brazil. **Advance Space Research**, v. 20, n. 11, p. 2165–2168, 1997. 75

ABDU, M. A.; KHERANI, E. A.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A. Equatorial evening prereversal vertical drift and spread F suppression by disturbance penetration electric fields. **Geophysical Research Letters**, v. 36, p. 1–5, 2009. 128

ABDU, M. A.; MACDOUGALL, J. W.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A.; JAYACHANDRAN, P. T. Equatorial evening prereversal electric field enhancement and sporadic E layer disruption: A manifestation of E and F region coupling. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. A6, p. 1–8, 2003. 25, 26, 27, 44, 129, 135, 142

ABDU, M. A.; P, B. P.; BATISTA, I. S.; BRUM, C. G. M.; CARRASCO, A. J.; REINUSCH, B. W. Planetary wave oscillations in mesospheric winds, equatorial evening prereversal electric field and spread F. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 7, p. 1–4, 2006. 127

ABDU, M. A.; SOUZA, J. R.; BATISTA, I. S.; FEJER, B. G.; SOBRAL, J. H. A. Sporadic E layer development and disruption at low latitudes by prompt penetration electric fields during magnetic storms. **Journal of Geophysical Research**, v. 118, p. 2639–2647, 2013. 2, 3, 44, 127, 128, 129, 130, 141, 142, 143

AKASOFU, S.; CHAPMAN, S. **Solar Terrestrial Physics**. Oxford: Oxford University Press, 1972. 8, 10

ANDRIOLI, V.; CLEMESHA, B. R.; BATISTA, P. P.; SCHUCH, N. J. Atmospheric tides and mean winds in the meteor region over Santa Maria (29.7S;

53.8W). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 71, n. 1718, p. 1864–1876, 2009. 20, 41

ANDRIOLI, V. F. **Estudo dos ventos entre 80 e 100 km de altitude, utilizando radar meteórico na região de Santa Maria (29,7 S; 53,8 O)**. 119 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008. 41, 42

ARRAS, C.; JACOBI, C.; WICKERT, J. Semidiurnal tidal signature in sporadic E occurrence rates derived from GPS radio occultation measurements at higher midlatitudes. **Annalles Geophysical**, v. 27, p. 2555–2563, 2009. 11, 12, 101

ARRAS, C.; WICKERT, J.; JACOBI, C.; HEISE, S.; BEYERLE, G.; SCHMIDT, T. A global climatology of ionospheric irregularities derived from GPS radio occultation. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. L14809, 2008. 16, 17

AXFORD, W. I. The formation and vertical movement of dense ionized layers in the ionosphere due to neutral wind shears. **Journal of Geophysical Research**, v. 68, p. 769–779, 1963. 18, 63

BANKS, P.; KOCKARTS, G. **Aeronomy**: Part B. New York: Academic Press, 1973. 5

BARTH, C. A.; FARMER, C. B.; SISKIND, D. E.; PERISH, J. P. Observations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. 7, p. 12489–12494, 1996. xvi, 51, 52

BATISTA, I. S. **Introdução à Ionosfera e Propagação de Ondas de Rádio**. São José dos Campos: [s.n.], 2009. Notas de aula. 18, 19

BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; BITTENCOURT, J. A. Equatorial f region vertical plasma drifts: seasonal and longitudinal asymetries in the american sector. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, p. 12055?12064, 1986. 25

BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; CARRASCO, A. J.; REINISCH, B. W.; PAULA, E. R. D.; SCHUCH, N. J.; BERTONI, F. C. P. 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, 2006. 128

BATISTA, I. S.; MEDEIROS, R. T. de; ABDU, M. A.; SOUZA, J. R.; BAILEY, G. J.; PAULA, E. R. de. Equatorial ionospheric vertical plasma drift model over

the Brazilian region. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. A5, p. 10887–10892, 1996. 45

BATISTA, P.; CLEMESHA, B. R.; TOKUMOTO, A. S.; LIMA, L. M. Structure of the mean winds and tides in the meteor region over Cachoeira Paulista, Brazil (22.7S, 45W) and its comparison with models. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, p. 623–636, 2004. 19, 65

BAYRU, K. **Numerical investigation of sporadic-E layer formation in midlatitude**. 40 p. Thesis — Department of Physics, Addis Ababa University, Ethiopia, 2007. 12

BISHOP, R. L.; EARCLE, G. D. Metallic ion transport associated with midlatitude intermediate layer development. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. A1, p. 10–19, 2003. 63, 66

BURITI, R.; HOCKING, W. K.; BATISTA, P.; MEDEIROS, A. F.; CLEMESHA, B. R. Observations of equatorial mesospheric winds over Cariri (7.4S) by a meteor radar and comparison with existing models. **Annales Geophysicae**, v. 26, p. 485–497, 2008. 20, 65

CARRASCO, A. J. **O Pico Pré-inversão na deriva vertical do plasma e a camada E-esporádica**. 157 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005. 2, 14, 19, 24, 27, 44, 45, 47, 49, 50, 51, 52, 55, 57, 118, 121, 123, 137, 143

CARRASCO, A. J.; BATISTA, I. S.; ABDU, M. A. Simulation of the sporadic E layer response to prereversal associated evening vertical electric field enhancement near dip equator. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, n. A06324, p. 1–7, 2007. 118

CARTER, L. Global transport and localized layering of metallic ions in the upper atmosphere. **Annales Geophysicae**, v. 17, n. 2, p. 190–209, 1999. 12, 13, 47

CASEY, J. P. Overview of the equatorial electrojet and related ionospheric current systems. **Communications, Imaging, and EW Sensors Department**, p. 1–80, 2005. 11

CHAPMAN, S. The solar and lunar diurnal variations of the terrestrial magnetism. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, A2, n. 18, p. 1–118, 1970. 20

CHAPMAN, S.; LINDZEN, R. S. **Atmospheric tides: thermal and gravitational**. New York: Gordon and Breach, 1970. 19

CHEN, W. M.; HARRIS, R. D. An ionospheric E-region nighttime model. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 33, n. 8, p. 1193–1207, 1971. 6

CHIMMONAS, G. Enhancement of sporadic E by horizontal transport within the layer. **Journal of Geophysical Research**, v. 76, n. 19, p. 4578–4586, 1971. 18

COHEN, R.; BOWLES, K. L. Ionospheric VHF scattering near the magnetic equator during the international geophysical year. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v. 67D, p. 459–480, 1963. 12, 21

COHEN, R.; BOWLES, K. L.; CALVERT, W. On the nature of equatorial slant sporadic E. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, n. 3, p. 965–972, 1962. 21

DAGAR, R.; VERMA, P.; NAPGAL, O.; SETTY, C. S. G. K. The relative effects of eletric fields and neutral winds on the formation of the equatorial sporadic layers. **Annalles Geophysical**, v. 33, n. 3, p. 333–340, 1977. xvii, 24, 25, 49, 53, 54, 56, 110, 117, 118, 121, 140

DAVIES, K. **Ionospheric Radio Propagation**. Washington D. C.: National Bureau of Standards, 1965. 29, 30

DENARDINI, C. M. **Desenvolvimento de um sistema de correção de fase para o radar ionosférico de São Luís do Maranhão**. 139 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1999. 9, 11, 21

DENARDINI, C. M. **Estudo da eletrodinâmica da ionosfera equatorial durante o período de máxima atividade solar (1999-2002)**. 284 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004. xvii, 22, 44, 55

DENARDINI, C. M.; AVEIRO, H. C.; SOBRAL, J. H. A.; BAGESTON, J. V.; GUIZELLI, L. M.; RESENDE, L. C. A.; MORO, J. E region electric fields at the dip equator and anomalous conductivity effects. **Advances in Space Research**, v. 51, p. 1857–1869, 2013. 110

DEVASIA, C. V.; SREEJA, V.; RAVINDRAN, S. On the role of vertical electron density gradients in the generation of type II irregularities associated with blanketing Es (Esb) during counter equatorial electrojet events: A case study. **Radio Science**, v. 39, n. RS3007, p. 1–14, 2004. 105, 109

_____. Solar cycle dependent characteristics of the equatorial blanketing Es layers and associated irregularities. **Annales Geophysicae**, v. 24, n. 11, p. 2931–2947, 2006. 105, 109, 110

FARLEY, D. T. The equatorial E-region and its plasma instabilities: A tutorial. **Annalles Geophysical**, v. 27, p. 1509–1520, 2009. 7

FEJER, B. G. Low latitude electrodynamic plasma drifts: A review. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 53, n. 8, p. 677–693, 1991. 127

FEJER, B. G.; FARLEY, D. T.; GONZALES, C. A.; WOODMAN, R. F.; CALDERON, C. F region east-west drifts at Jicamarca. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, p. 02–15, 1981. 45, 105

FEJER, B. G.; GONZALES, C. A.; FARLEY, D. T.; KELLEY, M. C.; WOODMAN, R. F. Equatorial eletctric fields during magnetically disturbed conditions. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, n. 2, p. 148–227, 1979. 45

FEJER, B. G.; KELLEY, M. C. Ionospheric irregularities. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 18, n. 2, p. 401–454, 1980. 21, 24

FEJER, B. G.; SCHERLIESS, L. Empiracal models of storms time equatorial zonal electric fields. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. 24, p. 47–56, 1997. 45

FORBES, J. M.; GARRETT, H. B. Theoretical studies of atmospheric tides. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 17, n. 8, 1979. 19

GRUBBOR, D. P.; STUPAR, P. D. Wind pattern variations as indicated by the effect of wind shear mechanisms in the lower thermosphere. **Physica Scripta**, v. 37, p. 512–515, 1988. 97

HAERENDEL, G.; ECCLES, J.; CAKIR, S. Theory of modeling the equatorial evening ionosphere and the origin of the shear in the horizontal plasma flow. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, p. 1209?1223, 1992. 45

HALDOUPIS, C. **Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere**: A tutorial review on sporadic E layers. Crete: University of Crete, 2011. 11, 12, 17, 18, 19, 20, 21, 118, 121

HALDOUPIS, C.; MEEK, C.; CHRISTAKIS, N.; PANCHEVA, D.; BOURDILLON, A. Ionogram height-time intensity observations of descending

sporadic E layers at mid-latitude. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 68, n. 539, 2006. 24, 52, 63, 66, 71, 101

HALDOUPIS, C.; PANCHEVA, D. Planetary waves and midlatitude sporadic E layers: Strong experimental evidence for a close relationship. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. A06, 2003. 101

HALDOUPIS, C.; PANCHEVA, D.; MEEK, C.; W., S.; MACDOUGALL, J. An explanation for the seasonal dependence of midlatitude sporadic E layers. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, n. A06315, 2007. 11, 12, 16

HALDOUPIS, C.; PANCHEVA, D.; MITCHELL, N. J. A study of tidal and planetary wave periodicities present in mid-latitude sporadic E layers. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. A02302, 2004. 52, 53

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**: An introduction to geospace the science of the upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere. New York: Cambridge University Press, 1992. 5

HEELIS, R. A.; KENDALL, P. C.; MOFFET, R. J.; WINDLE, D. W.; RISHETH, H. Electrical coupling of the e and f regions and its effects on f region drifts and winds. **Planet Space Science**, v. 22, p. 743?756, 1974. 25

HOCKING, W. K.; FULLER, B.; VANDEPEER, B. Real-time determiantion of meteor-related parameters utilizing modern digital technology. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 163, n. 2-3, p. 155–169, 2001. 41

HOOK, W. H. Ionospheric response to internal gravity waves 2. Lower F-region response. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n. 34, p. 7229–7243, 1970. 18

HUI, T.; WEI-XING, W.; JIU-HOU, L.; LI-BO, L.; BAI-QI, N. A theoretical model for the mid-latitude ionospheric E layer. **Chinese Journal of Geophysics**, v. 48, n. 2, p. 226–276, 2005. 5, 7

JACOBI, C.; ARRAS, C.; WICKERT, J. Semidiurnal tidal signature over Collom (51.3n, 13e) in sporadic E layer frequency obtained from FORMOSAT-3/COSMIC GPS radio occultation measurements. **Rep. Inst. Meteorol. Univ. Leipzig**, v. 42, p. 129–139, 2008. 52

JAYACHANDRAN, P. T. Sequential sporadic E layers at low latitudes in the Indian sector. **Annalles Geophysicae**, v. 17, n. 4, p. 519–525, 1991. 18

KELLEY, M. C. **The Earth's ionosphere.** England: London: Academic Press, 1989. 44, 127

KIRKWOOD, S.; NILSSON, H. High-latitute sporadic-E and other thin layers - the role of magnetospheric eletric fields. **MRI Atmospheric Research Programme**, p. 1–35, 1999. 14

KOPP, E. On the abundance of metal ions in the lower ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A5, p. 9667–9674, 1997. 13, 15

LANCHESTER, B. S.; NYGREN, T.; HUSKOMEN, A.; TURNEN, T.; JARVIS, M. J. Sporadic E as trace of atmospheric gravity waves. **Planet Space Science**, v. 39, n. 10, p. 1421–1434, 2001. 18

LIMA, L. M.; PAULINO, A. R. S.; MEDEIROS, A. F.; BURITI, R. A.; BATISTA P. P.AND CLEMESHA, B. R.; TAKAHASHI, H. First observations of the diurnal and semidiurnal oscillations in the mesospheric winds over São João do Cariri -PB, brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, p. 35–41, 2007. 20

MACDOUGALL, J. W. 110 km neutral zonal wind patterns. **Planet Space Science**, v. 22, p. 545–558, 1974. 11, 12, 20, 52

MACDOUGALL, J. W.; JAYACHANDRAN, P. T.; PLANE, J. M. C. Polar cap sporadic E: Part 1, observations. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 62, n. 13, p. 1155–1167, 2000. 16

MATHEWS, J. D. Sporadic E: current views and recent progress. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 60, n. 4, p. 413–435, 1998. 11, 12, 16, 20, 52, 53, 98, 101

MATSUSHITA, S. Intense Es ionization the near magnetic equator. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, v. 3, p. 44, 1951. 21

MITRA, A. P. A review of D-region processes in non-polar latitudes. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 30, p. 1065–1114, 1968. xvi, 51, 52

MORTON, Y. T.; MATHEWS, J. D.; ZHOU, Q. Further evidence for a 6-h tide above Arecibo. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 55, n. 3, p. 459–465, 1993. xvii, xviii, 52, 62, 63, 64, 65, 66, 78, 137

NOGUEIRA, P. A. B. **Comportamento da anomalia de ionização equatorial devido aos ventos meridionais com dados de receptores de**

GPS e digissondas. 127 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2009. 133

NYGREN, T.; JALONEN, L.; OKSMAN, J.; TURUNEN, T. The role of electric field and neutral wind direction in formation of sporadic E-layers. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 46, n. 4, p. 373–381, 1984. 25, 118, 121

PANCHEVA, D.; MERZLYAKOV, E.; MITCHELL N. J.AND PORTNYAGIN, Y.; MANSON, A. H.; JACOBI, C.; MEEK, C. E.; LUO, Y.; CLARCK, R. R.; HOCKING, W. K.; MULLER, H. G.; KURSCHNER, D.; JONES, G. O. L.; MACDOUGALL, J.; VICENT, R. A.; REID, I. M.; SINGER, W.; IGARASHI, K.; FRASER, G.; FATHRUDINOVA, A. N.; STEPHANOV, A. M.; POOLE, L. M. G.; MALINGA, S. B.; KASHCHEYEV, B. L.; OLEYNIKOV A, N. Global-scale tidal variability during the PSMOS campaign of June-August 1999: interaction with planetary waves. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 64, p. 1865–1896, 2002. 101

PAULINO, A. R. S. **Maré Lunar observada com radar meteórico em três latitudes no Brasil**. 101 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2010. 41

PEDATELLA, M. M.; FORBES, J. M.; RICHMOND, A. D. Seasonal and longitudinal variations of the solar quiet (Sq) current system during solar minimum determined by CHAMP satellite magnetic field observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n. A04317, p. 1–13, 2011. 7

PRASAD, S. N. V. S.; PRASAD, D. S. V. V. D.; VENKATESH, K.; NIRANJAN, K.; RAO, P. V. S. R. Diurnal and seasonal variations in sporadic E-layer (Es layer) occurrences over equatorial, low and mid latitude stations - A comparative study. **Indian Journal of Radio Space Physics**, v. 41, p. 26–38, 2012. 20

RAO, M. M.; SMITH, L. Sporadic E classification from rocket measumerents. **Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics**, v. 30, p. 550–645, 1968. 11, 12

RASTOGI, R. G. Equatorial sporadic E and cross-field instability. **Annales Geophysicae**, v. 28, n. 4, p. 717–727, 1971. 105, 109

_____. Midday reversal of equatorial ionospheric electric field. **Annales Geophysicae**, v. 15, p. 1309–1315, 1997. 105, 109

RATCLIFFE, J. A. **The magneto-ionic theory and its applications to the ionosphere**. Cambridge: Cambridge University Press, 1962. 29

REDDY, C. A.; DEVASIA, C. V. Formation of blanketing sporadic E layers at the magnetic equator due to horizontal wind shears. **Planetary and Space Science**, v. 21, n. 5, p. 811–812, 1973. 21, 105, 109

REDDY, C. A.; RAO, M. M. On the physical significance of the Es parameters fbEs, fEs and foEs. **Journal of Geophysical Research**, v. 73, n. 1, p. 215–224, 1968. 87, 91, 139

REINISCH, B. W. New techniques in groud-based ionospheric sounding and studies. **Radio Science**, v. 21, n. 3, p. 331–341, 1986. 29, 30, 31

RESENDE, L. C. A. **Estudo do comportamento dos parâmetros de frequência das camadas E-Esporádicas na região equatorial durante períodos perturbados (Dst <= -100 nT)**. 172 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2010. 33

RISHBETH, H.; GARIOTT, O. G. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic Press, 1969. 331p. 5, 47

RUSTER, R. Solution of the coupled ionospheric continuity equations and the equations of motion for the ions, electrons and neutral particles. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 33, p. 137–147, 1971. 6, 7

SANTOS, P. M. T. **Estudo da dinâmica do sistema ionosfera-termosfera por modelo teórico e observações experimentais**. 121 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005. 51

SAULI, P.; BOURDILLON, A. Height and critical frequency variations of the sporadic E layer at middle latitudes. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 70, n. 15, p. 1904–1910, 2008. 19

SCARBOROUGUE, J. B. **Numerical Mathematical Analysis**. London: Oxford University Press, 1930. 50

SCHLEGEL, K. Coherent backscatter from ionospheric E-region plasma irregularities. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 58, n. 8-9, p. 933–941, 1996. 23

SIQUEIRA, P. M. de. **Estudo do Conteúdo Eletrônico Total na região Brasileira em períodos magneticamente perturbados**. 217 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012. 133

SMITH, F. L.; SMITH, C. Numerical evaluation of Chapman's grazing incidence integral ch(λ,χ). **Journal of Geophysical Research**, v. 77, n. 19, p. 3592–3597, 1972. 7

SMITH, L. G. A sequence of rocket observations of night-time sporadic-E. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 32, n. 7, p. 1247–1257, 1970. 11, 12

SWIDER, W. J.; GARDNER, M. E. On the accuracy of Chapman function approximations. **Applied Optics**, v. 8, n. 3, p. 725–725, 1969. 7

UMASS LOWELL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH/ DIGISONDE DPS. **Background to Ionospheric Sounding**. [S.l.], 2000. 31

WHITEHEAD, J. The formation of the sporadic-E in the temperate zones. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 20, p. 49–58, 1961. 18

_____. Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 51, n. 5, p. 401–424, 1989. 12, 16, 20, 21, 33, 52, 53, 98, 101

APÊNDICE A - PARÂMETROS OBTIDOS DO AJUSTE DOS VENTOS

Tabela A.1 - São Luís - Primavera de 2005.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	22,82	103,55	89,07	15,39	-0,98	111,58	23,54
Meridional	Semidiurna	7,97	31,08	81,49	13,80	-3,01	38,07	36,18
Zonal	Diurna	9,97	13,84	97,34	2,59	-3,08	45,97	74,01
Zonal	Semidiurna	5,52	4,44	95,72	2,20	-5,48	20,28	65,76

Tabela A.2 - São Luís - Verão de 2005.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	20,12	109,15	89,67	19,04	-0,83	102,83	20,14
Meridional	Semidiurna	10,18	35,15	80,02	18,02	-2,67	55,18	32,05
Zonal	Diurna	8,85	10,87	77,43	1,98	-3,16	40,70	76,06
Zonal	Semidiurna	3,22	5,42	90,25	2,18	-5,06	21,56	60,72

Tabela A.3 - São Luís - Inverno de 2005.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	10,12	191,28	90,41	8,16	-1,92	79,11	46,14
Meridional	Semidiurna	15,23	153,57	97,29	5,74	-2,75	15,67	33,0
Zonal	Diurna	9,39	10,47	91,34	0,98	-3,35	45,97	80,48
Zonal	Semidiurna	6,23	0,93	97,81	5,13	-6,77	22,78	81,32

Tabela A.4 - São Luís - Primavera de 2009.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	20,42	110,49	96,57	8,38	-0,95	79,11	22,92
Meridional	Semidiurna	13,24	131,13	85,68	6,85	-5,75	23,25	69,00
Zonal	Diurna	11,26	9,27	94,12	2,00	-0,65	41,17	15,68
Zonal	Semidiurna	4,97	5,97	93,99	2,13	-6,20	25,08	74,40

Tabela A.5 - São Luís - Verão de 2009.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	11,92	10,76	96,90	1,62	-1,92	20,90	46,14
Meridional	Semidiurna	4,41	3,40	92,64	3,32	-5,67	24,84	68,34
Zonal	Diurna	11,82	7,96	90,00	12,15	-3,39	45,97	81,36
Zonal	Semidiurna	5,10	1,40	91,77	4,18	-4,08	22,78	48,98

Tabela A.6 - São Luís - Outono de 2009.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	22,13	96,61	89,54	7,71	-1,21	70,93	29,17
Meridional	Semidiurna	19,75	149,88	96,37	3,37	-3,49	21,15	41,88
Zonal	Diurna	10,06	22,20	97,46	2,98	-1,33	12,58	31,69
Zonal	Semidiurna	3,71	3,60	80,68	3,38	-0,60	-7,30	19,86

Tabela A.7 - São Luís - Inverno de 2009.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	11,74	329,62	96,05	8,21	-1,26	50,80	30,24
Meridional	Semidiurna	4,12	41,74	88,72	12,73	-2,26	14,11	27,16
Zonal	Diurna	8,43	21,69	96,25	5,48	-2,50	51,44	60,14
Zonal	Semidiurna	4,41	3,16	92,38	5,51	-4,47	22,78	53,64

Tabela A.8 - Cachoeira Paulista - Primavera de 2005.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	15,81	398,75	88,73	11,38	1,18	-3,60	28,48
Meridional	Semidiurna	11,47	100,18	91,96	11,90	-3,35	29,11	40,24
Zonal	Diurna	14,31	5,47	80,65	1,80	-0,62	3,93	14,96
Zonal	Semidiurna	5,45	12,76	100,43	5,25	-1,51	5,18	18,12

Tabela A.9 - Cachoeira Paulista - Verão de 2005.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	22,96	227,68	90,72	13,78	1,33	-5,12	32,04
Meridional	Semidiurna	9,25	107,19	90,30	9,35	-6,64	19,30	79,68
Zonal	Diurna	11,92	13,57	97,30	1,91	-0,42	10,33	10,08
Zonal	Semidiurna	7,41	4,71	85,17	3,62	-5,31	6,98	63,08

Tabela A.10 - Cachoeira Paulista - Outono de 2005.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	24,18	336,80	88,11	11,70	1,27	-3,00	30,64
Meridional	Semidiurna	10,64	132,45	87,06	9,44	-6,91	22,29	82,92
Zonal	Diurna	14,87	5,08	89,74	10,56	-0,53	22,73	12,72
Zonal	Semidiurna	5,61	14,36	97,96	4,59	2,17	-12,03	26,04

Tabela A.11 - Cachoeira Paulista - Inverno de 2005.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	18,19	308,55	88,99	9,89	0,80	20,20	19,20
Meridional	Semidiurna	4,70	174,53	84,99	13,72	-0,90	21,24	10,80
Zonal	Diurna	12,30	10,27	98,41	3,95	-0,56	23,90	13,62
Zonal	Semidiurna	5,91	9,43	97,16	5,92	-0,90	-20,04	10,80

Tabela A.12 - Cachoeira Paulista - Primavera de 2008.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	19,14	367,47	88,17	11,25	-0,14	24,68	33,36
Meridional	Semidiurna	5,16	295,24	85,42	20,15	-6,07	22,19	72,84
Zonal	Diurna	5,10	6,50	80,38	3,08	-1,29	11,42	30,96
Zonal	Semidiurna	5,35	10,43	95,97	3,41	-2,43	13,60	29,22

Tabela A.13 - Cachoeira Paulista - Verão de 2008.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	22,82	103,55	89,07	15,39	-1,02	111,57	24,48
Meridional	Semidiurna	7,97	31,08	81,49	13,80	-0,31	38,07	33,72
Zonal	Diurna	10,06	14,36	97,54	5,27	-0,71	37,00	17,04
Zonal	Semidiurna	5,52	4,44	95,72	2,20	-5,77	22,78	69,24

Tabela A.14 - Cachoeira Paulista - Outono de 2008.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	23,22	366,00	85,11	11,00	1,33	-3,24	32,04
Meridional	Semidiurna	9,10	283,97	92,10	21,75	-4,74	22,79	56,88
Zonal	Diurna	15,17	5,00	88,22	10,16	-0,71	22,44	17,04
Zonal	Semidiurna	5,26	16,48	97,53	4,22	-2,56	3,32	30,72

Tabela A.15 - Cachoeira Paulista - Inverno de 2008.

Componente	**Maré**	y_0	A_0	h_0	w	a	b	λ
Meridional	Diurna	13,94	147,88	98,23	14,36	-0,67	80,99	16,08
Meridional	Semidiurna	6,40	111,87	87,18	14,57	-3,08	27,24	37,00
Zonal	Diurna	4,45	16,81	99,81	4,23	-1,39	5,99	33,52
Zonal	Semidiurna	5,91	9,43	97,16	5,92	-2,69	-20,15	32,28

APÊNDICE B - ANÁLISE DAS COMPONENTES MERIDIONAL E ZONAL

B.1 Primavera de 2005 - São Luís

Figura B.1 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para a primavera de 2005 em São Luís.

Características Principais:

- Na análise das componente meridional são observadas três camadas Es tanto no período diurno quanto no período noturno. Elas se iniciam nas alturas de 105 km, 119 km e 127 km às 00 UT e possuem um processo descendente ao longo do dia, alcançando alturas mais baixas.
- Para a componente zonal é observada nas simulações apenas uma camada Es em 119 km que também possui um movimento de descida.

B.2 Inverno de 2005 - São Luís

Figura B.2 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o inverno de 2005 em São Luís.

Características Principais:

- Durante o dia referente à componente meridional, a camada Es é vista ser bem sutil caracterizada por um processo de descida.
- Para a componente zonal, às 00 UT a camada Es ultrapassa a densidade de 10^6 elétrons/cm^3 e durante o dia, a camada Es é bem característica, localizada em aproximadamente 105 km. Em 16 UT aparece outra camada Es.

B.3 Primavera de 2009 - São Luís

Figura B.3 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para a primavera de 2009 em São Luís.

Características Principais:

- Em relação a componente meridional são observadas, em geral, duas camadas Es nas simulações, uma que se inicia em 135 km e a outra em 109 km.
- Nos resultados da componente zonal, a camada Es tem seu desenvolvimento iniciado em alturas baixas, inferiores a 110 km, desaparecendo no começo do período diurno e reaparecendo um tempo depois.

B.4 Verão de 2009 - São Luís

Figura B.4 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o verão de 2009 em São Luís.

Características Principais:

- Nas simulações referentes à componente meridional, a camada Es inicia-se em torno dos 125 km e alcança alturas inferiores a 110 km. Durante o dia, a camada Es aparece bem sutil, desaparecendo em alguns horários.
- Para a componente zonal, a camada Es tem uma evolução semelhante à componente meridional, iniciando nas alturas de 125 km e alcançando 110 km. Contudo, neste caso, as camadas Es são mais pronunciadas, como se observa no horário de 16 UT.

B.5 Outono de 2009 - São Luís

Figura B.5 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o outono de 2009 em São Luís.

Características Principais:

- Durante o dia, para a componente meridional, a camada Es aparece sutilmente. Já no período noturno, as camadas Es são bem pronunciadas, iniciando em 125 km e 112 km.
- Nas simulações considerando a componente zonal, há duas camadas Es iniciando em 125 km e 105 km às 00 UT. Essa camada Es com altura mais alta possui uma densidade elevada. As camadas Es nessas simulações possuem também um movimento descendente.

B.6 Inverno de 2009 - São Luís

Figura B.6 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o inverno de 2009 em São Luís.

Características Principais:

- As simulações da componente meridional mostram a presença de uma camada Es localizada em 115 km durante a noite. Já durante o dia, os resultados mostram duas camadas Es.
- Em relação as simulações da componente zonal, durante a noite aparece uma camada Es que alcança uma alta densidade eletrônica. Esta camada inicia-se em 123 km e tem um movimento descendente, alcançando 110 km as 08 UT. Em 16 UT há duas camadas Es.

B.7 Primavera de 2005 - Cachoeira Paulista

Figura B.7 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o primavera de 2005 em Cachoeira Paulista.

Características Principais:

- Nas simulações para a componente meridional é observada uma camada Es com uma alta densidade eletrônica durante o período noturno. Durante o dia, as simulações revelam duas camadas Es (mostrada às 16 UT). Esta última é a evolução da camada Es observada à noite.
- Os resultados da componente zonal mostram duas camadas Es durante o período noturno, nas alturas de 130 km e 112 km. Durante o dia, só uma camada Es é observada.

B.8 Outono de 2005 - Cachoeira Paulista

Figura B.8 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o outono de 2005 em Cachoeira Paulista.

Características Principais:

- São observadas duas camadas Es com densidades eletrônicas elevadas tanto no período noturno quanto no diurno para as simulações referentes à componente meridional.
- Já para os resultados referentes à componente zonal, três camadas Es são observadas ao longo do dia. O perfil de densidade eletrônica nestas simulações se mostraram instáveis.

B.9 Inverno de 2005 - Cachoeira Paulista

Figura B.9 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o inverno de 2005 em Cachoeira Paulista.

Características Principais:

- Para as simulações referentes à componente meridional, são observadas uma camada Es durante a noite (aproximadamente 120 km) e uma camadas Es durante o dia. Em 108 km, às 16 UT, há a presença de uma camada com espessura larga e, portanto, não caracteriza-se uma camada Es.
- As simulações referentes à componente zonal, mostram duas camadas Es durante a noite (aproximadamente 125 km e 115 km) que possuem um movimento de descida.

B.10 Primavera de 2008 - Cachoeira Paulista

Figura B.10 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para a primavera de 2008 em Cachoeira Paulista.

Características Principais:

- Nas simulações em relação ao vento meridional a camada Es é observada somente em alguns horários.
- Nas simulações do vento zonal, a camada Es não é observada.

B.11 Verão de 2008 - Cachoeira Paulista

Figura B.11 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o verão de 2008 em Cachoeira Paulista.

Características Principais:

- Para as simulações do vento meridional as camadas Es não aparecem bem caracterizadas no período noturno. Em relação ao período diurno, as camadas Es são observadas em altas alturas.
- Os resultados referentes ao vento zonal, mostram a evolução de duas camadas Es ao longo de todo o dia, uma que se iniciou em 126 km e a outra em 116 km, aproximadamente.

B.12 Outono de 2008 - Cachoeira Paulista

Figura B.12 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o outono de 2008 em Cachoeira Paulista.

Características Principais:

- Em relação à componente do vento meridional, os resultados mostram que o perfil de densidade eletrônica é instável, não caracterizando a formação de camadas Es.
- As simulações em relação ao vento zonal apontam duas camadas Es durante a noite, nas alturas próximas a 125 km e 115 km. No decorrer do tempo, as camadas Es possuem um movimento de descida, sendo observadas sutilmente durante o dia.

B.13 Inverno de 2008 - Cachoeira Paulista

Figura B.13 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes meridional e zonal para o inverno de 2008 em Cachoeira Paulista.

Características Principais:

- Durante a noite referente à componente do vento meridional, os resultados mostram um perfil de densidade eletrônica instável. Durante o dia, a camada Es é observada claramente, realizando um movimento descendente.
- Para a componente zonal é observado que há uma camadas Es, localizada em 125 km que evolui para alturas mais baixas.

APÊNDICE C - ANÁLISE DAS COMPONENTES DE MARÉS DIURNA E SEMIDIURNA

C.1 Primavera de 2005 - São Luís

Figura C.1 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para a primavera de 2005 em São Luís.

Características Principais:

- Nas simulações levando em consideração a maré diurna, são observadas duas ou três camadas Es tanto no período diurno quanto no período noturno, caracterizado por um processo descendente ao longo do dia.
- Para a componente da maré semidiurna observa-se, nas simulações, uma camada Es em altitude superior a 120 km no período noturno, que desaparece no decorrer do tempo e, portanto, não aparece camada Es durante o dia.

C.2 Primavera de 2009 - São Luís

Figura C.2 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para a primavera de 2009 em São Luís.

Características Principais:

- Para a componente da maré diurna são observadas duas camadas Es nas simulações, uma delas iniciando em 125 km e a outra em 108 km. Durante o dia, uma das camadas Es (localizada em 108 km) desaparece e, outra camada Es surge como mostra no perfil das 16 UT.

- Na componente da maré semidiurna, há uma camadas Es no período noturno em torno de 130 km. A outra camada localiza-se em uma altura baixa e possui uma espessura larga, não caracterizando uma camada Es. No período diurno foram observadas camadas Es sutilmente.

C.3 Verão de 2009 - São Luís

Figura C.3 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o verão de 2009 em São Luís.

Características Principais:

- Na simulação referente à componente da maré diurna, a camada Es inicia-se em 125 km, alcançando alturas inferiores no decorrer do dia.
- Para a componente da maré semidiurna, os resultados mostram uma camada Es que se inicia em 130 km, evoluindo para alturas mais baixas durante o período diurno. Outra camada que é indicada pela seta não caracteriza uma camada Es.

C.4 Outono de 2009 - São Luís

Figura C.4 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o outono de 2009 em São Luís.

Características Principais:

- No período noturno da componente referente à maré diurna, há duas camadas Es observadas, uma em 125 km e 105 km. Durante o dia, aparece uma camada que é a evolução da camada Es localizada em 125 km.
- Na componente da maré semidiurna, há uma camada Es localizada em torno dos 120 km no período noturno. Durante o dia, não são observadas camadas Es nos resultados.

C.5 Inverno de 2009 - São Luís

Figura C.5 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o inverno de 2009 em São Luís.

Características Principais:

- Nas simulações para a componente da maré diurna durante a noite, há a presença de uma camada Es, localizada em torno de 120 km. Já durante o dia, os resultados mostram duas camadas Es,que desaparecem no decorrer do dia.

- Em relação à componente da maré semidiurna, não há observações de camadas Es características nas simulações. A seta do período noturno indica que há uma camada com uma estrutura larga.

C.6 Primavera de 2005 - Cachoeira Paulista

Figura C.6 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para a primavera de 2005 em Cachoeira Paulista.

Características Principais:

- Para a componente da maré diurna as simulações mostram uma camada Es com densidade eletrônica alta, durante o período noturno. Durante o dia, as simulações revelam duas camadas Es.
- Para a componente da maré semidiurna, o perfil é instável e as camadas Es aparecem de forma irregular.

C.7 Outono de 2005 - Cachoeira Paulista

Figura C.7 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o outono de 2005 em Cachoeira Paulista.

Características Principais:

- Nas simulações referentes à componente da maré diurna são observadas três camadas Es, sendo duas delas com densidades eletrônicas elevadas durante o período noturno. Duas dessas camadas Es apresentaram um movimento descendente e, assim, durante o dia elas foram observadas.
- Para a componente da maré semidiurna observa-se uma camada Es não bem definida.

C.8 Inverno de 2005 - Cachoeira Paulista

Figura C.8 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o inverno de 2005 em Cachoeira Paulista.

Características Principais:

- Para a componente da maré diurna, as simulações mostram um perfil instável durante a noite e duas camadas Es durante o dia.
- Os resultados referentes à componente da maré semidiurna são instáveis e, assim, não são observadas camadas Es.

C.9 Primavera de 2008 - Cachoeira Paulista

Figura C.9 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para a primavera de 2008 em Cachoeira Paulista.

Características Principais:

- São observadas nas simulações com a componente da maré diurna apenas uma camada Es durante o dia. Durante a noite, há uma camada que tem uma espessura larga, não caracterizando uma camada Es.
- Para as simulações com a componente semidiurna, as observações mostram que não há camadas Es no perfil de densidade eletrônica.

C.10 Verão de 2008 - Cachoeira Paulista

Figura C.10 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o verão de 2008 em Cachoeira Paulista.

Características Principais:

- Para as simulações com a componente da maré diurna são observadas três camadas Es. Elas iniciam-se em 135 km, 128 km e 116 km, como é visto às 00 UT. No decorrer do tempo, elas vão alcançando alturas mais baixas.
- Os resultados referentes à componente da maré semidiurna mostram um perfil instável, aparecendo uma camada durante a noite que não possui características de camadas Es.

C.11 Outono de 2008 - Cachoeira Paulista

Figura C.11 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o outono de 2008 em Cachoeira Paulista.

Características Principais:

- Em relação à componente da maré diurna, os resultados mostram que o perfil de densidade eletrônica é instável, aparecendo uma camada Es durante o dia, em torno dos 120 km.
- As simulações em relação à componente da maré semidiurna, não mostram a presença de camadas Es.

C.12 Inverno de 2008 - Cachoeira Paulista

Figura C.12 - Evolução da camada Es no perfil de densidade eletrônica obtida no MIRE para as componentes de marés diurna e semidiurna para o inverno de 2008 em Cachoeira Paulista.

Características Principais:

- Nas simulações em relação à componente da maré diurna há a presença de uma camadas Es durante a noite, em 130 km, que evolui para alturas inferiores no decorrer do tempo. Observa-se outra camada no período noturno que não caracteriza uma camada Es.
- Para a componente da maré semidiurna é observado que há uma camada Es no período noturno, localizada em 122 km. Durante o dia, as observações mostram camadas Es sutilmente.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

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

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.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

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

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.

Pré-publicações (PRE)

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

Manuais Técnicos (MAN)

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

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.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

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.