MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.17.20.47-TDI

CAMPOS ELÉTRICOS E DERIVAS DO PLASMA NA IONOSFERA EQUATORIAL DO SETOR AMERICANO DURANTE TEMPESTADES MAGNÉTICAS

Ângela Machado dos Santos Valentim

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Mangalathayil Ali Abdu, Jonas Rodrigues de Souza, e José Humberto Andrade Sobral, aprovada em 15 de abril de 2015.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J6F9C5>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

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

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):
Presidente:
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Membros:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)
Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)
Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)
Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)
Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)
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)
Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)
REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)
EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:
Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)
André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.17.20.47-TDI

CAMPOS ELÉTRICOS E DERIVAS DO PLASMA NA IONOSFERA EQUATORIAL DO SETOR AMERICANO DURANTE TEMPESTADES MAGNÉTICAS

Ângela Machado dos Santos Valentim

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Mangalathayil Ali Abdu, Jonas Rodrigues de Souza, e José Humberto Andrade Sobral, aprovada em 15 de abril de 2015.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J6F9C5>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Valentim, Ângela Machado dos Santos.
V234c Campos elétricos e derivas do plasma na ionosfera equatorial do setor americano durante tempestades magnéticas / Ângela Machado dos Santos Valentim. – São José dos Campos : INPE, 2015.
xxx + 227 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.17.20.47-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.
Orientadores : Drs. Mangalathayil Ali Abdu, Jonas Rodrigues de Souza, e José Humberto Andrade Sobral.

1. Derivas Ionosféricas. 2. Campos elétricos. 3. Tempestades magnéticas. I.Título.

CDU 537.8:550.388

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

Dra. Inez Staciarini Batista

Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Mangalathayil Ali Abdu

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Jonas Rodrigues de Souza

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. José Humberto Andrade Sobral

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Walter Demetrio Gonzalez Alarcon

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Gilvan Luiz Borba

Convidado(a) / UFRN / Natal - RN

Dr. Marcio Tadeu de Assis Honorato Muella

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

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

Título: ***"Campos Elétricos e Derivas do Plasma na Ionosfera Equatorial do Setor Americano Durante Tempestades Magnéticas".***

Aluno (a): ***Angela Machado dos Santos Valentim***

São José dos Campos, 15 de Abril de 2015

"Quando não souberes para onde ir, olha para trás e sabe pelo menos de onde vens"

(Provérbio africano).

À minha filha Isabelle e ao meu esposo Camilo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela dádiva da vida e da inteligência.

Aos meus orientadores Dr. Mangalathayil Ali Abdu, Dr. Jonas Rodrigues de Souza e Dr. José Humberto Andrade Sobral pelo acolhimento, parceria e preciosas discussões.

Ao meu esposo Camilo pelo apoio e companheirismo em todos os momentos. Serei eternamente grata pelo amor dedicado, por cada palavra de apoio e pelos inúmeros momentos em que cuidou da nossa filha durante a minha ausência.

À minha querida filha Isabelle por tornar os meus dias infinitamente melhores. Não foi fácil te deixar, algumas vezes chorando e até mesmo sorrindo, para prosseguir com meus estudos, mas sei que todo esse nosso sacrifício valerá a pena. Costumo dizer que este doutorado foi para e por você!

À minha querida mãe, ao meu pai *(in memoriam)*, aos meus irmãos e a todos os meus familiares pelo incentivo e orações. Com vocês compreendi que o título que hoje conquisto não me torna melhor do que ninguém. Quando olho para trás e vejo a educação e o amor com que cuidaram de mim, reconheço que isso foi e sempre será muito valioso para o meu crescimento profissional.

À minha sogra Dona Berenice que, mesmo diante das suas dificuldades, não mediu esforços para me ajudar e me incentivar. Serei eternamente grata pelo cuidado, amor e carinho dedicado à Isabelle e ao Camilo nos momentos em que eu não estava presente.

Às minhas amigas Laysa Resende e Vivian Castilho por todo o apoio e sábias palavras nos momentos difíceis e, também, por toda alegria compartilhada uma com a outra nos momentos em que isso nos era permitido. Às minhas amigas, Goreti Aquino e Fátima Usifatti pelas boas e descontraídas risadas.

Aos colegas e amigos de curso pela amizade e companheirismo dedicado. Em especial aos amigos Juliano Moro, Régia Pereira, Jonas Sousa, Ricardo Paes e Paulo Alexandre pelo auxílio e amizade dedicada no decorrer deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora por aceitarem avaliar esta tese.

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

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela oportunidade de realizar essa pesquisa de doutorado e por permitir a utilização de suas instalações e dos dados obtidos por diferentes equipamentos, tais como digissondas, magnetômetros e imageador.

À Universidade do Vale do Paraíba que, na pessoa do Dr. Márcio Tadeu de Assis Honorato Muella, gentilmente disponibilizou os dados da ionossonda CADI.

Ao Rádio Observatório de Jicamarca pelos dados do radar de espalhamento incoerente e da digissonda.

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se um estudo sobre a conexão entre os campos elétricos e as derivas do plasma ionosférico do setor sul americano, durante a ocorrência de distúrbios magnéticos. No decorrer da pesquisa, também objetivou-se estudar a influência da atividade solar mínima prolongada do ano de 2008, no comportamento da deriva zonal de Jicamarca durante o dia, mesmo na ausência de qualquer atividade magnética. Além disso, a recorrente presença de uma camada E-esporádica sobre a região brasileira, observada em ~ 140 km de altura, durante o período noturno, também foi brevemente discutida. Para tanto, alguns eventos de tempestades magnéticas foram escolhidos para que as componentes vertical e zonal das derivas do plasma, obtidas pelo radar de espalhamento incoerente de Jicamarca (11.95°S, 76.87°O), pela Digissonda de Fortaleza (3,43°S, 38,52°O) e pelos dados de imageador ótico all-sky (deriva zonal) de São João do Cariri-Brasil (7,4°S, 38.52°O) pudessem ser estudadas. As perturbações na deriva zonal do plasma foram investigadas juntamente com as variações simultâneas na deriva vertical, as quais são regidas pelo campo elétrico de penetração, durante o desenvolvimento de uma tempestade. Uma vez que o enfoque desse estudo está nos fatores físicos e eletrodinâmicos que regem a dinâmica da deriva zonal perturbada do plasma, foi possível, por meio de uma análise quantitativa detalhada, avaliar os parâmetros que controlam a deriva zonal do plasma e, assim, propor uma explicação para a conexão observada entre as derivas zonal e vertical. Nesse contexto, adotou-se o modelo SUPIM-INPE – *Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model at INPE* –, o qual se configurou como uma importante ferramenta para que todos os fatores necessários para o cálculo da deriva zonal do plasma pudessem ser quantificados e a deriva zonal calculada pudesse ser comparada aos dados observados. Os dados analisados mostraram que a deriva zonal se inverte para oeste (a partir do seu movimento normal para leste) e que as variações entre a deriva zonal e vertical, durante condições perturbadas, são anticorrelacionadas entre si. Os resultados encontrados confirmam que a inversão da deriva zonal e a perfeita anticorrelação entre as derivas vertical e zonal da ionosfera, durante o desenvolvimento de uma tempestade magnética, foram geradas, principalmente, pelo campo elétrico Hall, induzido pelo campo elétrico de penetração, na presença de um aumento da taxa das condutividades Hall-Pedersen integradas ao longo das linhas de campo ($\sum_H/\sum_P$). Com relação aos resultados de Jicamarca, esta conclusão só foi possível porque as oscilações nas derivas foram observadas no início de uma tempestade magnética e, assim, os efeitos dos ventos perturbados puderam ser excluídos. Para a região brasileira, as análises das derivas foram feitas em diferentes fases da tempestade magnética e mostraram, quantitativamente, que a modificação na velocidade zonal das bolhas de plasma apresentou uma clara competição entre os ventos perturbados e o aumento na razão $\sum_H/\sum_P$.Tal aumento foi gerado, principalmente, por um acréscimo na condutividade Hall integrada decorrente da precipitação de partículas energéticas na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), cuja comprovação foi possível através da ocorrência de camadas E-esporádicas anômalas observadas nas regiões de Fortaleza, Cachoeira Paulista e São José dos Campos. Tais camadas também representam uma evidência do desenvolvimento do campo elétrico Hall, o qual é responsável por modificar a deriva zonal.

ELECTRIC FIELDS AND EQUATORIAL IONOSPHERIC PLASMA DRIFTS OVER AMERICAN SECTOR DURING MAGNETIC STORMS

ABSTRACT

In the present work, we investigate the connection between electric fields and plasma drifts in the ionosphere over South American longitude sector, during conditions of magnetic disturbances. We also investigated the influence of deep and prolonged solar minimum of the year 2008, on the behavior of the daytime zonal plasma drift over Jicamarca in the absence of any magnetic activity. In addition, the recurring presence of a sporadic E-layer observed at ~ 140 km during the night on the Brazilian region are also briefly discussed.To make this investigation possible, we selected a few magnetic storm intervals, during which plasma drifts, in both vertical and zonal components, were analyzed using incoherent scatter radar data from Jicamarca (11,95 ° S, 76,87 ° W), Digisonde data from Fortaleza (3,43 ° S, 38,52 ° O), and all-sky imager data from Sao Joao de Cariri (7,4°S, 37,5° W). Zonal plasma drift perturbations are investigated together with the simultaneous variations in vertical plasma drifts that are identified as arising from prompt penetration zonal electric field during storm developments. This study focus on the physical and electrodynamic factors that govern the dynamics of the storm time zonal plasma drifts and, based on detailed quantitative evaluation of controlling parameters, proposes an explanation for the observed relationship between the zonal and vertical drifts. The SUPIM-INPE - *Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model at INPE* - is used as an important tool to represent realistic ionosphere that provided all the key parameters necessary for the calculation of zonal plasma drifts that are then compared to the observed data. It is found that the plasma zonal drift reverses to westward (from its quiet time eastward direction) and the vertical and zonal drifts are anti correlated under disturbed conditions. The results confirm that the reversal of the zonal drift and the perfect anticorrelation between vertical and zonal drifts observed during magnetic storm development phase are driven mainly by a vertical Hall electric field induced by the primary zonal electric field in the presence of an increase in the field line integrated Hall-to-Pedersen conductivities ratio, Σ_H / Σ_P. In the case of the results over Jicamarca this definitive verification was possible because fluctuations in drifts were observed at the beginning of a magnetic storm when the effects of disturbance winds could be excluded. For the Brazilian region, where the observations were made at varying phases of magnetic disturbances, it is shown quantitatively that the change in zonal velocity of the plasma bubble are subject to clear competition between the disturbance winds and the increased ratio Σ_H / Σ_P. Such increase in the conductivity ratio are most often generated by an increase in integrated Hall conductivity, due to precipitation of energetic particles in the region of the South Atlantic Magnetic Anomaly (SAMA) for which evidence is provided from observation of anomalous sporadic E layers over Jicamarca, Fortaleza, Cachoeira Paulista and Sao Jose dos Campos. Such sporadic E layers are also evidence for the development of the Hall electric field that modifies zonal drift.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 - Ilustração das condutividades Paralela σ_o, Pedersen σ_P e Hall σ_H em função da altitude. 9

Figura 2.2 - Contribuição do vento meridional para a deriva vertical durante condições magnéticas calmas e perturbadas. As setas pontilhadas em azul/vermelho indicam a direção em que os ventos estão soprando durante períodos calmos/perturbados. As setas laranjas indicam como o vento pode influenciar no movimento vertical da camada F no hemisfério norte e sul. 11

Figura 2.3 - Eletrodinâmica da região E. 13

Figura 2.4 - Loop de corrente gerada pelo vento neutro zonal na região F..... 15

Figura 2.5 - Comportamento do campo elétrico vertical de acordo com a contribuição dos termos da condução Hall, da corrente vertical e do vento neutro. 21

Figura 2.6 - Dependência sazonal e com o ciclo solar da deriva zonal média da região F para períodos calmos. A barra de dispersão representa o desvio padrão e a curva sólida representa os resultados de um modelo empírico. 23

Figura 2.7 - Deriva vertical de plasma para região de Fortaleza durante períodos de alta atividade solar. 24

Figura 2.8 - Modelo simplificado da geração do campo elétrico zonal. 26

Figura 2.9 - Representação esquemática das condições favoráveis à geração da instabilidade Rayleigh-Taylor. 28

Figura 2.10 - a) Sequência de eventos em que o CMI para sul se conecta-se ao CMT. Fonte: Kelley, 2008. b) Mecanismo ilustrativo da penetração direta de campos elétricos e seus efeitos na ionosfera equatorial diurna e noturna. 31

Figura 2.11 - Mecanismo pelo qual o efeito de blindagem se desenvolve num corte transversal da magnetosfera equatorial. 32

Figura 2.12 - Ilustração das correntes da Região 1 e Região 2. 33

Figura 2.13 - Mecanismo de geração do campo elétrico do dínamo perturbado. 33

Figura 2.14 - Comportamento da deriva vertical do plasma em função de a) penetração de campos elétricos e b) dínamo perturbado. 35

Figura 2.15 - Comportamento dos parâmetros Sym-H, By, Bz, AE e da deriva vertical Vz sobre São Luís, durante a tempestade magnética de 30 de setembro de 2002 a 02 de outubro de 2002. 37

Figura 2.16 - Variação do índice AE durante os dias 30 e 31 de outubro de 2003, da altura da camada F para diferentes frequências num intervalo de 1 MHz e do parâmetro hmF2 em Jicamarca e São Luís. 38

Figura 2.17 - Comportamento da deriva zonal e vertical de Fortaleza durante a tempestade magnética de 20 de novembro de 1994. 39

Figura 2.18 - Variação do campo magnético interplanetário Bz e da pressão dinâmica do vento solar obtido pelo satélite WIND com 23 minutos de atraso (painéis a e b), componente horizontal do campo geomagnético em Jicamarca (painel c) e derivas do plasma (painéis d,e). 41

Figura 2.19 - Variação da atividade auroral, da deriva vertical e zonal para a região de Cachimbo durante os dias 24 e 25 de outubro de 2002..... 42

Figura 2.20 - Representação esquemática do campo elétrico Hall produzido na Região E (setas em azul), o qual é mapeado verticalmente para a região F. A deriva zonal para oeste é indicada pelas setas em vermelho. As setas em verde, apontando para a direção leste, representam o campo elétrico zonal primário perturbado..... 44

Figura 2.21 - Distribuição da intensidade do campo magnético total representado pelas isolinhas para o globo terrestre. O menor valor da

intensidade do campo magnético em nT define a posição do centro da Anomalia Magnética do Atlântico Sul. 47

Figura 2.22 - a) Localização da região central da AMAS com o passar dos anos, com a escala de cores representando a intensidade do campo magnético total. b) Decréscimo da intensidade do campo magnético total (em nT) desde 1900 até os dias atuais. 48

Figura 2.23 - Representação esquemática dos efeitos na deriva vertical da camada F e da camada Es devido a penetração de um campo elétrico zonal primário. 51

Figura 3.1 – Configuração do arranjo de antenas receptoras da digissonda. .. 54

Figura 3.2 – Ionograma registrado em Fortaleza onde destacam-se a frequência crítica e altura virtual da camada F (foF2 e h'F) e as frequências de blanketing e de topo (fbEs e ftEs) das camadas Es. 56

Figura 3.3 - Evolução temporal da densidade eletrônica da ionosfera em função do tempo e da altura. 57

Figura 3.4 – Variação temporal da altura real da camada F para diferentes frequências de sondagem. 58

Figura 3.5 - Sequência de ionogramas na presença de espalhamento do sinal eletromagnético. 59

Figura 3.6 - Frequência crítica da camada F (foF2) e altura do pico da camada F (hmF2) em ionogramas com diferentes tipos de *spread-F*. 60

Figura 3.7 - Exemplo de redução de ionogramas espalhados utilizando a segunda reflexão como guia. 62

Figura 3.8 - Variação das concentrações de O_2 e N_2 de acordo com a altura e com a hora para um dia magneticamente perturbado. 66

Figura 3.9 - Múltiplos ecos em alta frequência retornados de uma estrutura ionosférica. 67

Cada eco retornado tem uma diferente frequência de deslocamento Doppler se a estrutura se mover com a velocidade V_d. 67

Figura 3.10 - Componentes do vetor velocidade na direção vertical, norte e zonal da camada F para a região de Jicamarca. 69

Figura 3.11 - Deriva vertical e zonal obtida pelo radar de espalhamento incoerente de Jicamarca. 72

Figura 3.12 - Função de distribuição normalizada da dissipação de energia... 85

Figura 3.13- Representação esquemática da integral de *s* resolvida na vertical para os diferentes pontos ao longo da linha de campo magnético. O cálculo de *s* foi realizado para o hemisfério norte e para o hemisfério sul. 86

Figura 3.14 - Taxa de ionização produzida pela precipitação de partículas para um fluxo de 10^8 elétrons por $cm^{-2}s^{-1}$ sob diferentes condições de energia inicial (Ep). 89

Figura 4.1 - Comportamento dos índices SYM-H/ASY-D, Bz, Ey, AE/AL durante os dias 21 a 25 de junho de 2008. A área hachurada indica o período em que será realizada a análise das derivas zonal e vertical. 95

Figura 4.2 - Efeitos da tempestade magnética de junho de 2008 nas derivas vertical (Vz) e zonal (Vy) medidas pelo radar de Jicamarca. De cima para baixo, apresenta-se o comportamento dos índices SYM-H, Bz, AE (painéis a, b e c). A curva em cinza nos painéis d e e se referem às derivas para um dia calmo e foram obtidas pelo modelo de Sherliess e Fejer (1999) (Vz) e Fejer et al (2005) (Vy), respectivamente. A área hachurada destaca as variações anticorrelacionadas entre Vz e Vy. As setas em vermelho indicam os horários de inversão de Vy para leste de acordo com os dados observados e o modelo de Fejer et al. (2005). A linha pontilhada vertical indica o horário em que ocorreu o pôr do sol (~1753 LT). 97

Figura 4.3 - Comparação entre os parâmetros foF2 e hmF2 obtidos pela digissonda de Jicamarca e pelo modelo SUPIM-INPE para diferentes valores do modelo de irradiância solar - SOLAR2000. 100

Figura 4.4 - Condutividades Hall e Pedersen das regiões E e F integradas ao longo das linhas de campo (painéis a, b e c), razão $\sum_H/\sum_P$, (painel d), deriva vertical (painel e) e zonal medidas pelo radar de Jicamarca e as derivas zonal calculadas para diferentes condições (painéis f e g). As setas vermelhas denotam o horário de inversão da deriva para leste e as diferenças entre as intensidades da deriva zonal observada e a calculada. 105

Figura 4.6 - Do topo até a base apresenta-se o comportamento da atividade auroral (painel a), da razão $\sum_H/\sum_P$ (painel b), do vento zonal inicial Uy(i) e modificado Uy(m) das regiões E e F (painéis c e d), da deriva vertical Vz (painel e) e da deriva zonal Vy observada e calculada (painel f) considerando (VyUy(m)P0) e não considerando a modificação nos ventos (de ventos VyUy(i)P0). 109

Figura 4.7 - Do topo até a base apresenta-se o comportamento da atividade auroral (painel a), da razão $\sum_H/\sum_P$ incluindo (P1) ou não (P0) a precipitação de partículas (painel b), da deriva vertical Vz (painel c) e da deriva zonal Vy observada e calculada (painel d) considerando somente a modificação nos ventos (VyUy(m)P0) e a modificação nos ventos + a precipitação de partículas (VyUy(m)P1). 112

Figura 4.8 - Comportamento das condutividades Hall (curva vermelha) e Pedersen (curva azul) incluindo (P1) ou não (P0) a precipitação de partículas para a latitude magnética de -12°, durante o dia 24 de junho de 2008. A precipitação de partículas foi incluída somente entre 2345 UT e 0015 UT. 114

Figura 4.9 - Perfil espectral da precipitação de elétrons na baixa ionosfera para a região auroral e para a região da AMAS. O perfil adotado nas simulações para o evento de junho de 2008 é apresentado pela curva em azul..... 116

Figura 4.10 - Ionogramas de Jicamarca para o dia 24 de junho de 2008 para diferentes horários. As setas em azul indicam redução do parâmetro foF2,

enquanto que os círculos pretos indicam o encurvamento do traço da camada F na sua frequência mínima. 118

Figura 4.11 - Ionogramas de Cachoeira Paulista para o dia 24 de junho de 2008 para diferentes horários. As setas verticais em azul indicam redução do parâmetro foF2, enquanto horizontais indicam a presença de camadas esporádicas..... 121

Figura 4.12 - Ionogramas de Fortaleza para o dia 24 de junho de 2008 para diferentes horários. As setas verticais em azul indicam redução do parâmetro foF2, enquanto horizontais indicam a presença de camadas esporádicas..... 123

Figura 4.13 - Comportamento da deriva zonal de Jicamarca para diferentes anos de atividade solar mínima. As barras em vermelho indicam a hora de reversão da deriva zonal ao entardecer e a barra horizontal azul indica a intensidade da deriva zonal durante o dia para o mês de junho de 2008. Os dados de deriva zonal foram obtidos no site http://jro.igp.gob.pe/madrigal/. 126

Figura 4.14 - Comportamento dos índices SYM-H/ASY-D, Bz, Ey, AE/AL durante os dias 08 a 11 de abril de 1997. A área hachurada indica o período em que será realizada a análise das derivas zonal e vertical. 127

Figura 4.15 - Efeitos da tempestade magnética de abril de 1997 nas derivas vertical (Vz) e zonal (Vy) medidas pelo radar de Jicamarca. De cima para baixo, apresenta-se o comportamento dos índices SYM-H, Bz, AE (painéis a, b e c). A curva em cinza nos painéis d e e se referem às derivas para um dia calmo e foram obtidas pelo modelo de Sherliess e Fejer (1999) (Vz) e Fejer et al (2005) (Vy), respectivamente. A área hachurada destaca as variações anticorrelacionadas entre Vz e Vy. A linha pontilhada vertical indica o horário em que ocorreu o pôr do sol (~1805 LT). 129

Figura 4.16 - Comparação entre os parâmetros foF2 e hmF2 obtidos pela digissonda de Fortaleza (curva preta sólida e pontilhada) e pelo modelo SUPIM-INPE. 131

Figura 4.17 - Do topo até a base apresenta-se o comportamento da atividade auroral (painel a), das condutividades integradas Pedersen e Hall das regiões E e F (painel b), da razão $\sum_H/\sum_P$ (painel c), do vento zonal das regiões E e F (painéis d, e), da deriva vertical Vz (painel f) e da deriva zonal Vy observada e calculada (painéis g e h) sem considerar os efeitos da precipitação de partículas (P0) para diferentes condições. A área hachurada indica alguns intervalos em que o comportamento de Vy foi discutido no texto. 134

Figura 4.18 - Do topo até a base apresenta-se o comportamento da atividade auroral (painel a), das condutividades integradas Pedersen e Hall das regiões E e F (painel b), da razão $\sum_H/\sum_P$ (painel c), da deriva vertical Vz (painel d) e da deriva zonal Vy observada e calculada (painéis e e f) considerando os efeitos da precipitação de partículas (P1) para diferentes condições. 136

Figura 4.19 - Comportamento das condutividades Hall (curva vermelha) e Pedersen (curva azul) incluindo (P1) ou não (P0) a precipitação de partículas para a latitude magnética de -12°, durante o dia 10 de abril de 1997. A precipitação de partículas foi incluída somente entre 0005 UT e 0030 UT. 138

Figura 4.20 - Ionogramas de Jicamarca para o dia 10 de abril de 1997. As setas horizontais indicam um enfraquecimento da camada Es do tipo “q”, enquanto as setas verticais indicam a redução do parâmetro foF2. 140

Figura 4.21 - Ionogramas de Cachoeira Paulista para o dia 10 de abril de 1997. As setas horizontais indicam o surgimento da camada Es, e as setas verticais indicam a redução do parâmetro foF2 e o aumento do parâmetro fbEs no ionograma das 0115 UT. 143

Figura 5.1 - Comportamento dos índices SYM-H/ASY-D, Bz, Ey e AE/AL durante os dias 21 a 25 de setembro de 2003. A área hachurada indica, aproximadamente, o intervalo em que se observaram variações no movimento zonal da bolha do plasma para leste. 146

Figura 5.2 - Comportamento dos índices Bz e AE, da deriva zonal da bolha de São João de Cariri (Vy_Bolha), da deriva vertical (Vz) e zonal (Vy) obtida pela digissonda de Fortaleza através do software Drif-Explorer e do parâmetro fbEs durante os dias 23 e 24 de setembro de 2003. A curva em cinza representa a deriva zonal média das bolhas para períodos calmos, enquanto a barra horizontal laranja representa a intensidade do spread-F observada no intervalo em questão. As linhas pontilhadas em azul, obtidas a partir de uma análise visual, indicam ótima concordância entre a velocidade da bolha e a velocidade do plasma ambiente, e ajudam o leitor a identificar a anticorrelação entre Vy e Vz. 148

Figura 5.3 - Comparação entre os parâmetros foF2 e hmF2 obtidos pela digissonda de Fortaleza (curva preta sólida e pontilhada) e pelo modelo SUPIM-INPE considerando os ventos meridionais iniciais obtidos pelo modelo HWM93 (curva zinza) e os ventos meridionais modificados (curva vermelha). A curva pontilhada indica os dados obtidos na presença de spread-F..... 152

Figura 5.4 - Distribuição latitudinal e atitudinal do vento meridional efetivo obtido pelo modelo HWM93 para diferentes horários, durante os dias 23 e 24 de setembro de 2003. Os painéis da esquerda apresentam o comportamento do vento meridional inicial, enquanto os painéis da direita se referem aos ventos meridionais modificados. 153

Figura 5.5 - Do topo até a base apresenta-se o comportamento da atividade auroral (painel a), da razão $\sum_H/\sum_P$ incluindo (P1) ou não (P0) a precipitação de partículas (painel b), do vento zonal inicial Uy(i) das regiões E e F(painéis c e d), da deriva vertical Vz (painel e) e da deriva zonal Vy observada e calculada (painel f) considerando os ventos iniciais

(VyUy(i)P0) e os ventos iniciais + a precipitação de partículas (VyUy(i)P1). 156

Figura 5.6 - Variação da deriva zonal de Jicamarca medida pelo radar de espalhamento incoerente. Os dados foram obtidos no site http://jro.igp.gob.pe/madrigal/ para os dias 22 a 26 de setembro de 2003. 159

Figura 5.7 - Do topo até a base apresenta-se o comportamento da atividade auroral (painel a), da razão $\sum_H/\sum_P$ incluindo (P1) ou não (P0) a precipitação de partículas (painel b), do vento zonal inicial Uy(i) e modificado Uy(m) das regiões E e F(painéis c e d), da deriva vertical Vz (painel e) e da deriva zonal Vy observada e calculada (painel f) considerando os ventos modificados (VyUy(m)P0) e os ventos modificados + a precipitação de partículas (VyUy(m)P1). 161

Figura 5.9 - Comportamento das condutividades Hall (curva vermelha) e Pedersen (curva azul) incluindo (P1) ou não (P0) a precipitação de partículas para a latitude magnética de -12°, durante os dias 23 e 24 de setembro de 2003. A precipitação de partículas foi incluída somente entre 03 UT e 07 UT 164

Figura 5.10 - Ionogramas de Fortaleza para os dias 23 e 24 de setembro de 2003 para diferentes horários. As setas em azul indicam a presença de camadas esporádicas. 166

Figura 5.11 - Ionogramas de Cachoeira Paulista para os dias 23 e 24 de setembro de 2003 para diferentes horários. As setas em azul indicam a presença de camadas esporádicas. 168

Figura 5.12 - Comportamento dos índices SYM-H/ASY-D, Bz, Ey e AE/AL durante os dias 04 a 10 de novembro de 2004. A área hachurada indica, aproximadamente, o intervalo em que se observaram variações no movimento zonal da bolha do plasma para leste. 172

Figura 5.13 - Comportamento dos índices Bz e AE, da deriva zonal da bolha de São João de Cariri (Vy_Bolha), da deriva vertical (Vz) e zonal (Vy) obtida pela digissonda de Fortaleza através do software Drif-Explorer e do parâmetro fbEs durante os dias 08 e 09 de novembro de 2004. A curva em cinza representa a deriva zonal média das bolhas para períodos calmos, enquanto a barra horizontal laranja representa a intensidade do spread-F observada no intervalo em questão. As linhas pontilhadas em azul, obtidas a partir de uma análise visual, indicam ótima concordância entre a velocidade da bolha e a velocidade do plasma ambiente, e ajudam o leitor a identificar a anticorrelação entre Vy e Vz. 173

Figura 5.14 - Comparação entre os parâmetros foF2 e hmF2 obtidos pela digissonda de Fortaleza (curva preta sólida e pontilhada) e pelo modelo SUPIM-INPE considerando os ventos iniciais obtidos pelo modelo HWM93 (curva cinza) e os ventos meridionais modificados (curva vermelha). A curva pontilhada indica os dados obtidos na presença de spread-F. 175

Figura 5.15 - Deriva zonal calculada de acordo com o vento original obtido pelo modelo HWM93 (curva azul). A curva em preto refere-se a deriva zonal da bolha de plasma de São João do Cariri. 177

Figura 5.16 - Do topo até a base apresenta-se o comportamento da atividade auroral (painel a), da razão $\sum_H/\sum_P$ incluindo (P1) ou não (P0) a precipitação de partículas (painel b), do vento zonal inicial Uy(i) e modificado Uy(f) das regiões E e F(painéis c e d), da deriva vertical Vz (painel e) e da deriva zonal Vy observada e calculada (painel f) considerando os ventos iniciais (VyUy(i)P0), os ventos iniciais + a precipitação de partículas (VyUy(i)P1) e os ventos modificados + precipitação de partículas (VyUy(f)P1). 178

Figura 5.17 – Vento original Uy(0) e modificado Uy(f) obtidos pelo modelo HWM93. A linha vertical pontilhada indica o horário em que a bolha se inverteu para oeste. 181

Figura 5.18 - Ionogramas de Fortaleza durante os dias 08-09 de novembro de 2004. As setas horizontais indicam formação da camada Es e as setas verticais indicam a redução do parâmetro foF2. 183

Figura 5.19 - Ionogramas de São José dos Campos para os dias 08 de novembro de 2004. O eixo x corresponde à frequência em MHz e o eixo y a altura em km. 185

Figura 5.20 - Ionogramas de São José dos Campos durante os dias 08-09 de novembro de 2004. O eixo x corresponde a frequência em MHz e o eixo y a altura em km. 187

Figura 5.21 - Ionogramas de Jicamarca durante os dias 08-09 de novembro de 2004. As setas verticais indicam uma redução do parâmetro foF2. Os círculos pretos denotam o encurvamento do traço da camada F na sua frequência mínima. 189

Figura 5.22 - Derivas zonal e vertical de Fortaleza obtidas pelo software *Drift-Explorer* para o dia 08 de novembro de 2004. 191

Figura 5.23 - Ionogramas de Fortaleza para o dia 08 de novembro de 2004. As setas horizontais indicam presença da camada Es e as setas verticais indicam uma redução do parâmetro foF2. Os círculos pretos denotam um encurvamento da base da camada F na sua frequência mínima. 193

Figura 5.24 - Derivas zonal e vertical de Jicamarca obtidas pelo software *Drift-Explorer* para o dia 08 de novembro de 2004 195

Figura 5.25 - Ionogramas de Jicamarca para os dias 08 e 09 de novembro de 2004. A seta horizontal indica a presença da camada Es e as setas verticais indicam uma redução do parâmetro foF2. Os círculos pretos denotam um encurvamento da base da camada F na sua frequência mínima. 197

Figura 5.26 - Ionogramas de São José dos Campos para o dia 08 de novembro de 2004. O eixo x corresponde à frequência em MHz e o eixo y a altura em km. O quadrado de bordas brancas denota a presença de uma possível

camada E formada pela precipitação de partículas, enquanto o quadrado branco demostra a presença de uma camada Es do tipo blanketing..... 199

Figura 5.27 - Ionogramas de São José dos Campos para o dia 08 de novembro de 2004. O eixo x corresponde à frequência em MHz e o eixo y a altura em km. 201

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO 1

2 ELETRODINÂMICA DA REGIÃO EQUATORIAL 7

2.1 Dínamos ionosféricos 7

2.1.1 Condutividades ionosféricas 7

2.1.2 Vento neutro 10

2.1.3 Dínamo da região E 12

2.1.4 Dínamo da região F 14

2.2 Derivas ionosféricas 16

2.2.1 Deriva zonal e vertical durante períodos calmos 22

2.2.2 Formação do pico pré-reversão (PRE) e o desenvolvimento das bolhas de plasma 25

2.3 Campos elétricos perturbados 29

2.3.1 Penetração direta de campos elétricos 29

2.3.2 Dínamo perturbado 33

2.3.3 Deriva vertical durante períodos perturbados 34

2.3.4 Deriva zonal durante períodos perturbados 38

2.3.4.1 Mecanismo proposto para explicar as perturbações na deriva zonal segundo Abdu et al. (1998) 43

2.3.4.2 Precipitação de partículas energéticas na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul 46

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA UTILIZADA 53

3.1 Digissonda 53

3.1.1 Redução dos ionogramas com traço F espalhados 60

3.1.2 Deriva vertical obtida através dos ionogramas e do software *DRIFT-EXPLORER* 63

3.2 Radar de espalhamento incoerente (ISR) 69

3.3 Imageador óptico all-sky OI 630 nm 72

3.4 Magnetômetros 73

3.5 O modelo SUPIM-INPE 74

3.5.1 Equações resolvidas pelo SUPIM-INPE 75

3.5.2 Solução das equações do modelo 80

3.5.3 Parâmetros de entrada e saída do modelo 81

3.5.4 Procedimentos utilizados na execução do modelo SUPIM-INPE 82

3.5.4.1 Inclusão da precipitação de partículas no cálculo da densidade eletrônica 84

3.5.4.2 Inclusão dos valores de U_Z^H 89

3.5.4.3 Alteração no sistema de ventos 90

3.5.4.4 Alteração do fluxo solar ionizante 91

4 ANÁLISE DA DERIVA ZONAL DO PLASMA SOBRE A REGIÃO PERUANA DURANTE TEMPESTADES MAGNÉTICAS: OBSERVAÇÕES E SIMULAÇÕES 93

4.1 Critérios utilizados para a seleção dos eventos de tempestades magnéticas 94

4.2 Tempestade magnética de 24 de junho de 2008 94

4.2.1 Análise comparativa entre os dados experimentais de foF2 e hmF2 e os resultados do modelo SUPIM-INPE 99

4.2.2 Análise comparativa entre a deriva zonal observada e a calculada pelo modelo SUPIM-INPE 102

4.2.3 Deriva zonal considerando a modificação no vento zonal e a inclusão da precipitação de partículas 106

4.2.4 Evidências do aumento de ionização na região e registradas nos ionogramas 116

4.3 Variabilidades observadas na deriva zonal do plasma durante atividade solar mínima 124

4.4 Tempestade magnética de 10 de abril de 1997 127

4.4.1 Análise comparativa entre os dados experimentais de foF2 e hmF2 e os resultados obtidos pelo modelo SUPIM-INPE..... 130

4.4.2 Análise comparativa entre a deriva zonal observada e a calculada pelo modelo SUPIM-INPE 132

4.4.4 Evidências do aumento de ionização na região e registradas nos ionogramas 138

5 ANÁLISE DA DERIVA ZONAL DA BOLHA DE PLASMA SOBRE A REGIÃO BRASILEIRA DURANTE TEMPESTADES MAGNÉTICAS: OBSERVAÇÕES E SIMULAÇÕES 145

5.1 Tempestade magnética de 23-24 de setembro de 2003.....145

5.1.1 Análise comparativa entre os dados experimentais de foF2 E hmF2 E os resultados do modelo SUPIM-INPE..... 150

5.1.2 Deriva zonal considerando a modificação no vento zonal e a inclusão da precipitação de partículas 154

5.1.3 Evidências do aumento de ionização na região e registradas nos ionogramas 165

5.2 Tempestade magnética de 08-09 de novembro de 2004 171

5.2.1 Análise comparativa entre os dados experimentais de foF2 e hmF2 E os resultados do modelo SUPIM-INPE..... 174

5.2.2 Deriva zonal considerando a modificação no vento zonal e a inclusão da precipitação de partículas 176

5.2.3 Evidências do aumento de ionização na região e registradas nos ionogramas 181

5.2.4 Comportamento das derivas zonal e vertical durante o dia 08 de novembro de 2004 190

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS 203

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 217

1 INTRODUÇÃO

Durante a ocorrência de tempestades magnéticas, o sistema ionosfera-termosfera equatorial sofre significantes modificações decorrentes dos campos elétricos de origem magnetosférica, que penetram nas latitudes equatoriais e de baixas latitudes, dos campos elétricos gerados pelo dínamo perturbado, e pelos ventos termosféricos perturbados (ABDU, 2005). Por ser um assunto de grande relevância para o estudo do Clima Espacial no domínio da ionosfera/termosfera equatorial e de baixas latitudes, encontra-se na literatura um grande número de trabalhos, os quais descrevem e exemplificam a influência das tempestades magnéticas sobre o campo elétrico zonal. Esse campo, o qual é responsável por gerar a deriva vertical do plasma, controla diversos fenômenos importantes da ionosfera equatorial, tais como a geração das irregularidades das bolhas ionosféricas, o efeito fonte da anomalia equatorial, entre outros (ABDU et al., 1995; 2003; 2007; 2009; BATISTA et al., 1991, 2006; SANTOS et al., 2012; SASTRI et al., 1993; SOBRAL et al., 1997, 2001; TSURUTANI et al., 2008; entre outros). No entanto, em relação aos estudos específicos do comportamento perturbado do campo elétrico vertical (deriva zonal), o qual também pode estar presente em muitos fenômenos da ionosfera equatorial, tais como a inversão da deriva zonal e a formação/rompimento das camadas E-esporádicas anômalas, existe apenas um número muito limitado de estudos.

O comportamento da deriva zonal e vertical noturna para a região brasileira, durante períodos perturbados, foi estudada por Abdu et al. (1998, 2012). Os autores mostraram casos interessantes em que as flutuações na deriva zonal ionosférica estavam anticorrelacionadas tanto com a deriva vertical quanto com as flutuações na atividade auroral. Esse efeito teria ocorrido em virtude da conexão existente entre as diferentes derivas, através do chamado efeito Hall. Tal conexão depende das distribuições das condutividades ionosféricas (Hall e Pedersen), as quais podem sofrer fortes modificações durante a ocorrência de distúrbios magnéticos.

Acredita-se que o mecanismo proposto para explicar as flutuações entre as derivas vertical e zonal do plasma esteja basicamente associado às perturbações no campo elétrico zonal primário. Enquanto essa perturbação zonal tem um impacto direto na deriva vertical, a deriva zonal seria afetada por um campo elétrico vertical Hall na região E, criado pela componente perturbada do campo elétrico zonal. Esse campo induzido é então mapeado para a região F, por meio das linhas do campo magnético, e causa a perturbação na deriva zonal dessa região. Para que esse mecanismo funcione, é preciso que haja um decréscimo na condutividade da região F e/ou um aumento da condutividade Hall na região E, o qual pode estar associado a uma ionização extra produzida pela precipitação de partículas energéticas que ocorre com maior intensidade na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) (ABDU et al, 1998).

A perturbação na deriva zonal das bolhas de plasma na região equatorial brasileira também foi um interessante assunto abordado por Abdu et al. (2003). Foi verificado que a inversão no movimento da bolha de plasma para oeste teve uma contribuição significativa decorrente da penetração de um campo elétrico zonal, num momento em que a ionosfera estava sob forte influência dos efeitos gerados pelo dínamo perturbado. As flutuações observadas na deriva, durante esse período, sugerem a importante contribuição do campo elétrico vertical Hall induzido na inversão do sentido de propagação da bolha de plasma.

As respostas da ionosfera aos campos elétricos Hall não ficam restritas somente à região F. Recentemente, Abdu et al. (2013) estudaram alguns casos em que a penetração de um campo elétrico com polaridade para oeste, durante a noite, induziu a formação de uma camada E-esporádica (Es) próximo a 100 km de altura. Por outro lado, também foi verificado que um campo elétrico de penetração para leste, o qual domina na parte diurna e ao entardecer, contribuiu para o desaparecimento da Es. Acredita-se que o campo elétrico vertical Hall induzido por uma perturbação no campo elétrico zonal, na presença de uma intensificação na condutividade da região E, pode ter sido o responsável pela convergência vertical na velocidade dos íons, a qual é

suficiente para influenciar a formação da Es. A conclusão desse estudo é que, enquanto um campo elétrico Hall para baixo pode conduzir a formação de uma Es, um campo elétrico vertical para cima pode causar o rompimento da Es.

Diante do exposto, têm-se fortes evidências de que o campo elétrico zonal de penetração exerce grande influência nas regiões E e F da ionosfera equatorial e de baixas latitudes. Essa influência ocorre pela ação direta produzida por esses campos elétricos (nas derivas verticais) ou através dos efeitos induzidos pelo campo elétrico vertical Hall. Nesse contexto, este trabalho apresenta um estudo quantitativo e qualitativo da conexão existente entre as derivas vertical e zonal perturbadas do setor americano, considerando um aumento de ionização na região E produzido pela precipitação de partículas energéticas na região da AMAS. Para tanto, serão avaliadas as derivas noturnas medidas sobre Fortaleza (3,43°S, 38,52°O), São João do Cariri (7,4°S, 37,5°O) e Jicamarca (11.95°S, 76.87°O). Como o cálculo da deriva zonal engloba parâmetros ionosféricos integrados ao longo da linha de campo magnético, os ionogramas de Cachoeira Paulista também serão estudados, a fim de verificar o que ocorreu próximo à latitude em que a linha de campo intercepta a região E. Isso se torna necessário, uma vez que será considerado um aumento de ionização nessa região.

Assim sendo, o principal objetivo desse estudo de tese é explicar a anticorrelação observada entre as derivas zonal e vertical da região F na ionosfera brasileira e peruana, durante a ocorrência de algumas tempestades magnéticas. O presente estudo também se desenvolve com o intuito de examinar eventos de penetração de campos elétricos e os seus efeitos na deriva zonal do plasma ionosférico. Isso se torna necessário para que se estabeleçam, quantitativamente, os possíveis fatores físicos/eletrodinâmicos que possam contribuir para aprimorar o conhecimento da dinâmica da deriva zonal do plasma durante tempestades magnéticas, a exemplo de alguns resultados preliminares publicados por Abdu et al. (1998, 2003 e 2012). Investigar-se-á também, a partir de dois eventos, qual seria o papel do campo

elétrico Hall na geração e dinâmica das irregularidades da bolha de plasma sobre a região brasileira.

Nesse sentido, o modelo SUPIM-INPE configura-se como uma importante ferramenta para que a deriva zonal seja calculada da forma mais realista possível e, assim, ser comparada aos dados observados. Além disso, conforme mencionado anteriormente, para que as flutuações na deriva zonal sejam explicadas, faz-se necessário incluir um aumento de ionização na região E produzido pela precipitação de partículas energéticas originadas do cinturão de radiação. Como a versão do modelo SUPIM-INPE inclui previamente as equações responsáveis por tal aumento, é preciso apenas que ocorram alguns ajustes nesse parâmetro para que o objetivo proposto nessa tese possa ser em partes atingido. Por outro lado, a deriva zonal também apresenta forte dependência com vento zonal. Assim sendo, importantes modificações no sistema de ventos utilizados são necessárias para que a deriva zonal do plasma seja corretamente simulada.

Nesse processo, ressaltam-se algumas particularidades, que, neste estudo, são tratadas como objetivos secundários, a saber: destacar a influência da atividade solar mínima prolongada, durante o ano de 2008, no comportamento da deriva zonal de Jicamarca durante o dia e avaliar a recorrente presença de uma camada E-esporádica observada em altitudes superiores à que geralmente se observa.

Para exposição deste estudo, organiza-se o trabalho em 5 capítulos. Primeiramente, no capítulo 2, apresenta-se a fundamentação teórica necessária para o entendimento da geração e do comportamento dos campos elétricos e das derivas ionosféricas para a região equatorial, durante períodos calmos e perturbados. Ainda nesse capítulo, apresentam-se em uma seção separada, as possíveis influências da precipitação de partículas sobre a região da AMAS na eletrodinâmica da ionosfera equatorial.

A seguir, no capítulo 3, descrevem-se os instrumentos e a metodologia que foi utilizada. Dentre outras coisas, este capítulo explica como as derivas verticais e

zonais foram obtidas para a região brasileira e peruana. Além disso, apresenta-se uma descrição do modelo SUPIM-INPE e dos procedimentos realizados com esse modelo, principalmente no que se refere à inclusão da precipitação de partículas no cálculo da densidade eletrônica/ionização.

Os cálculos da deriva zonal para a região de Jicamarca, incluindo ou não a precipitação de partículas e a modificação nos ventos são apresentados no capítulo 4. A discussão desses resultados é feita com base na comparação entre as derivas calculadas e os dados de deriva observados, juntamente com análise dos ionogramas das regiões de Jicamarca, Fortaleza e Cachoeria Paulista. Neste capítulo, apresentam-se os resultados do estudo realizado para duas tempestades durante períodos de atividade solar mínima, a saber, em junho de 2008 e em abril de 1997.

O capítulo 5, por sua vez, traz os resultados obtidos com o modelo SUPIM-INPE para a região brasileira, durante a ocorrência das tempestades magnéticas de setembro de 2003 e novembro de 2004. A deriva zonal da bolha para oeste foi simulada e avaliada através da competição dos ventos perturbados e de um aumento na condutividade ionosférica, gerado pela precipitação de partículas energéticas. Similar ao que foi feito no capítulo 4, os ionogramas para as diferentes regiões também são avaliados, a fim de encontrar evidências que justifiquem a inclusão de precipitação de partículas nos cálculos da deriva zonal. Por fim, as conclusões e considerações finais deste estudo.

2 ELETRODINÂMICA DA REGIÃO EQUATORIAL

Campos elétricos ($\vec{E}$), ventos neutros e derivas de plasma são parâmetros essenciais para o entendimento da eletrodinâmica da ionosfera terrestre. Tais campos elétricos, juntamente com o campo geomagnético ($\vec{B}$), são os responsáveis pela geração das derivas ionosféricas. Se $\vec{E}$ for paralelo a $\vec{B}$, o movimento dos íons e elétrons não será afetado por $\vec{B}$. No entanto, se $\vec{E}$ for perpendicular a $\vec{B}$, o movimento das partículas dirigido pelo campo elétrico será afetado pela força $\vec{E}x\vec{B}$ e, no regime de colisão, a deriva será variável com a altura e será dependente do próprio $\vec{B}$ (RISHBETH; GARRIOT, 1969). A fim de se entender como são gerados os campos elétricos das regiões ionizadas, os quais são responsáveis pelas derivas ionosféricas, será feita uma breve revisão sobre as condutividades ionosféricas e sobre o comportamento dos ventos neutros. Além disso, como o continente da América do Sul está sob forte influência da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, este capítulo também apresentará uma discussão sobre os efeitos que a precipitação de partículas têm sobre a eletrodinâmica da região brasileira e peruana, mais especificamente no comportamento da deriva zonal da camada F sobre essas localidades.

2.1 Dínamos ionosféricos

2.1.1 Condutividades ionosféricas

Segundo Rishbeth (1997), as correntes elétricas da ionosfera surgem da interação entre os ventos e o campo magnético e através dos campos elétricos que conduzem íons e elétrons em diferentes direções. Durante o dia, a maior parte da corrente ionosférica flui na região E, no entanto, à noite, com a queda da ionização dessa região, o dínamo da região F conduz a maior parte da corrente.

Em altitudes menores que 70 km, o movimento das partículas não é afetado pelo campo magnético, uma vez que a frequência de colisão de elétrons (ν_e) e

íons (ν_i) com as partículas neutras é muito maior do que suas respectivas girofrequências $(\omega_{e,i})$. Já para regiões localizadas entre 70 e 130 km, $\nu_i >> \omega_i$ e $\nu_e << \omega_e$. Essa condição permite que os elétrons sejam magneticamente dominados enquanto os íons estão livres para se moverem através das linhas do $\vec{B}$ em resposta aos gradientes de pressão, aos campos elétricos ou aos movimentos da atmosfera neutra. Dessa maneira, um campo elétrico aplicado na região E resultará num fluxo de corrente, a qual é controlada pela condutividade nessa região que é considerada anisotrópica. Para altitudes que compreendem a região F, tem-se que $\nu_i << \omega_i$ e $\nu_e << \omega_e$. Então, desprezando-se as colisões tanto de íons como de elétrons com moléculas neutras, os campos elétricos dessa região perpendiculares ao campo magnético não podem causar um fluxo de corrente e sim uma deriva na mesma direção tanto de elétrons como de íons (BANKS; KOCKARTS, 1973).

A condutividade elétrica na ionosfera é dada em termos da condutividade paralela, direta ou longitudinal (σ_o), da condutividade Pedersen ou transversal (σ_P) e da condutividade Hall (σ_H). A condutividade na direção paralela ao campo geomagnético é dada por:

$$\sigma_o = Ne^2\left(\frac{1}{m_e\nu_e} + \frac{1}{m_i\nu_i}\right), \tag{2.1}$$

em que $m_{e,i}$ representa a massa dos elétrons e dos íons, e representa a carga do elétron, N representa a densidade do plasma e $\nu_{e,i}$ representa frequência de colisão dos elétrons e dos íons.

A condutividade na direção paralela a $\vec{E}$ e perpendicular a $\vec{B}$ é definida pela expressão:

$$\sigma_P = Ne^2\left(\frac{\nu_e}{m_e\left(\nu_e^2 + \omega_e^2\right)} + \frac{\nu_i}{m_i\left(\nu_i^2 + \omega_i^2\right)}\right). \tag{2.2}$$

Íons e elétrons contribuem para o pico de σ_P nas alturas em que $\left(\frac{\nu}{\omega}\right)_i = 1$ (~140 km) e $\left(\frac{\nu}{\omega}\right)_e = 1$ (~80 km), respectivamente.

A condutividade Hall, por sua vez, é definida na direção perpendicular tanto a $\vec{E}$ quanto a $\vec{B}$:

$$\sigma_H = Ne^2\left(\frac{\omega_e}{m_e\left(\nu_e^2 + \omega_e^2\right)} + \frac{\omega_i}{m_i\left(\nu_i^2 + \omega_i^2\right)}\right). \tag{2.3}$$

Os valores típicos das condutividades ionosféricas Paralela, Pedersen e Hall são ilustrados na Figura 2.1. Nota-se que σ_H decresce mais rapidamente com a altura do que σ_P. A condutividade Pedersen apresenta um pico em ~ 140 km e a condutividade Hall em ~120 km de altura. A condutividade paralela é dominada pelos elétrons e aumenta exponencialmente com a altura.

Figura 2.1 - Ilustração das condutividades Paralela σ_o, Pedersen σ_P e Hall σ_H em função da altitude.
Fonte: Akasofu e Chapman (1972)

2.1.2 Vento neutro

De acordo com Titheridge (1995), o movimento da ionosfera de baixas latitudes é controlado por uma interação eletrodinâmica complexa que envolve os ventos neutros, o campo magnético da terra e os campos elétricos produzidos pela ação do dínamo nas regiões E e F. Os ventos na atmosfera neutra são gerados principalmente pelos gradientes de pressão estabelecidos através da diferença de temperatura entre o lado do dia (mais quente) e da noite (mais frio).

Em altitudes que compreendem as regiões E e F, o movimento das camadas ionizadas provém da ação dos campos elétricos e dos ventos neutros. O vento neutro modifica o movimento da ionosfera regido pelo campo elétrico. A componente zonal do vento (oeste/leste durante o dia/noite) arrasta a ionização na direção perpendicular às linhas de força do campo magnético, gerando, assim, os campos elétricos. O campo elétrico zonal gerado na região E pelos ventos de máres atmosféricas se mapeia para a região F e produz a deriva vertical do plasma para cima/baixo durante o dia/noite. A componente meridional do vento, por sua vez, flui em direção aos polos/equador durante o dia/noite e contribui para que a região F desça/suba em ambos os hemisférios em períodos calmos, conforme esquematizado na Figura 2.2. Porém, essa configuração pode ser alterada durante períodos perturbados. De acordo com Sridharan (1998), quando a região de altas latitudes recebe uma fonte adicional de energia, um fluxo convergente em direção ao equador é gerado e o excesso de energia é redistribuído. Essa condição faz com que a região F apresente um movimento de subida em ambos os hemisférios, tanto durante o dia quanto a noite, conforme ilustra na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Contribuição do vento meridional para a deriva vertical durante condições magnéticas calmas e perturbadas. As setas pontilhadas em azul/vermelho indicam a direção em que os ventos estão soprando durante períodos calmos/perturbados. As setas laranjas indicam como o vento pode influenciar no movimento vertical da camada F no hemisfério norte e sul.

A componente meridional do vento pode alterar o perfil de densidade eletrônica e causar a assimetria na intensidade e no posicionamento dos picos da anomalia equatorial de ionização. Devido à configuração horizontal das linhas de força nas proximidades do equador magnético, o vento meridional não contribui para o transporte vertical do plasma e, portanto, não altera o pico de densidade eletrônica da camada F nessas regiões (TITHERIDGE, 1995).

Na região F, os ventos são produzidos pelos gradientes de pressão devido à maré térmica solar e são limitados principalmente pelos efeitos do arraste iônico, pela força de Coriolis e pela viscosidade. O arraste iônico é a principal

força de retardo do vento na região em que o movimento da ionização é fortemente influênciado pelo campo geomagnético. A força de Coriolis, por sua vez, tem grande importância nas altas e médias latitudes, sendo nula na região equatorial. A viscosidade, a qual resulta das variações horizontais e verticais da velocidade, controla o perfil horizontal de velocidade dos ventos e seu efeito aumenta exponencialmente com a altura e acima de ~ 250 km a velocidade dos ventos torna-se praticamente independente da altitude (TITHERIDGE, 1995).

2.1.3 Dínamo da região E

Os campos elétricos existentes na região E são gerados pelos ventos de maré ($\vec{U}$), estabelecidos pela absorção da radiação solar na estratosfera pelo ozônio e na troposfera pelo vapor d'água. Esses ventos transmitem movimento às camadas ionizadas através das colisões, levando consigo apenas os íons, já que os elétrons ficam aprisionados ao campo geomagnético. Desta forma, a interação dos ventos de maré com o plasma ionosférico na presença do $\vec{B}$ dá origem a um movimento relativo entre os íons e os elétrons, fazendo com que um campo elétrico induzido $(\vec{U} \times \vec{B})$ se desenvolva. A corrente induzida associada a esse campo não é estacionária, ou seja, $\nabla \cdot \vec{J} \neq 0$. Isso gera campos elétricos de polarização ($\vec{E}_P$) na região E, de modo que $\nabla \cdot \vec{J} = 0$. Assim sendo, o campo elétrico total dessa região ionosférica pode ser expresso como:

$$\vec{E}_T = \vec{E}_P + (\vec{U} \times \vec{B}). \tag{2.4}$$

Em virtude da condição de equipotencialidade das linhas de força, o campo elétrico $\vec{E}_P$ é mapeado para as alturas superiores da ionosfera (Região F). Assim, pode-se dizer que, durante o dia, as derivas do plasma na região F são representativas dos ventos neutros da região E. Durante a noite, a queda da condutividade da região E faz com que o acoplamento entre as regiões E e F

decresça na mesma proporção e assim o dínamo da região F passa a ser dominante (RISHBETH, 1971a).

Devido à configuração das condutividades ionosféricas, a ação do dínamo ionosférico é mais efetiva na região equatorial entre 90 e 120 km. Nessa faixa de altura, flui uma intensa corrente elétrica para leste durante o dia, a qual é denominada por Eletrojato Equatorial (EEJ). Segundo Kelley (2008), o EEJ pode ser explicado da seguinte maneira: considera-se que o fluxo de corrente esteja confinado entre 90 e 120 km de altura conforme ilustra a Figura 2.3. Essa região está sujeita a um campo elétrico zonal E_y, o qual é dirigido para leste, constante em altura e perpendicular a $\vec{B}$. O campo E_y induz dois tipos de correntes na região E equatorial, denominadas como Hall e Pedersen. A corrente Hall ($\sigma_H E_y$) flui na direção perpendicular a $\vec{B}$ e a E_y. Já a corrente Pedersen ($\sigma_P E_y$) flui paralela ao campo elétrico zonal E_y e perpendicular a $\vec{B}$. Como a corrente Hall não pode fluir para fora dos limites de altitude da camada E devido à baixa condutividade dessas regiões, um acúmulo de cargas é gerado nesses limites. Esse acúmulo de cargas proporciona a geração de um campo elétrico de polarização ($E_Z \hat{a}_z$). Associado a E_Z, surgem as correntes Hall ($\sigma_H E_Z$) e Pedersen ($\sigma_P E_Z$). Na Figura 2.3, $\hat{a}_y$ e $\hat{a}_z$ são vetores unitários nas direções leste e vertical para cima, respectivamente.

Figura 2.3 - Eletrodinâmica da região E.
Fonte: adaptada de Kelley (2008)

Num estado estacionário, considera-se que as correntes verticais não conseguem fluir, então $\sigma_H E_y = \sigma_P E_Z$. Dessa igualdade, o campo elétrico vertical de polarização E_Z pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$E_Z = \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_P}\right) E_y. \tag{2.5}$$

Na direção horizontal, as correntes $\sigma_P E_y$ e $\sigma_H E_Z$ se somam e formam assim o eletrojato equatorial. Essa corrente intensificada é dada por:

$$J_y = \left(\frac{\sigma_H^2 + \sigma_P^2}{\sigma_P}\right) E_y = \sigma_C E_y, \tag{2.6}$$

em que σ_C é denominado de condutividade Cowling.

2.1.4 Dínamo da região F

O dínamo da região F é gerado pelos ventos termosféricos que induzem o movimento dos íons e elétrons ao longo das linhas de campo, com velocidade igual à componente dos ventos neutros nessa direção. Devido à dependência com a carga das partículas carregadas, os íons se movimentam na direção $\vec{U} \times \vec{B}$ enquanto os elétrons se movimentam na direção contrária, dando origem assim a uma corrente elétrica. Qualquer divergência nessa corrente tende a criar um campo elétrico de polarização na região F(E_p). Devido ao forte acoplamento que existe entre as regiões E e F durante o dia, o campo Ep da região F é descarregado por correntes que fluem ao longo de $\vec{B}$ e através da região E, fechando assim o circuito de correntes entre as regiões E e F. Durante a noite, com a queda da condutividade na região E, o fluxo de correntes é obstruido, o circuito não se fecha e isso dá origem a campos elétricos de polarização na região F (RISHBETH, 1971a,b). A Figura 2.4 exemplifica o mecanismo acima descrito.

Figura 2.4 - Loop de corrente gerada pelo vento neutro zonal na região F
Fonte: adaptada de Heelis (2004)

Em síntese, os campos elétricos ionosféricos podem ser originados de diferentes maneiras, seja pelo vento neutro ($\vec{E}_w = \vec{U} \times \vec{B}$) seja pelos campos eletrostáticos de polarização dados por $\vec{E}_P = -\nabla\Phi$, em que Φ é o potencial eletrostático. Dessa forma, o campo elétrico total é dado por:

$$\vec{E}_T = \vec{E}_w + \vec{E}_P \,, \tag{2.7}$$

e a densidade de corrente elétrica ($\vec{J}$) pode ser escrita pela lei de Ohm, ou seja,

$$\vec{J} = [\sigma] \cdot \left(\vec{E}_w + \vec{E}_P\right) = [\sigma] \cdot \left(\vec{U} \times \vec{B} - \nabla\Phi\right) \,, \tag{2.8}$$

em que $[\sigma]$ é o tensor condutividade.

Segundo Rishbeth (1997), os campos elétricos de polarização na ionosfera são fortemente influenciados pelos campos elétricos oriundos de processos magnetosféricos, os quais são gerados nas altas latitudes ionosféricas, mas que podem penetrar nas baixas latitudes, bem como pelos campos elétricos gerados devido ao aquecimento da região auroral. Esse assunto será discutido posteriormente na seção 2.3.

2.2 Derivas ionosféricas

As derivas ionosféricas, em especial a deriva vertical causada por $\vec{E}x\vec{B}$, têm sido um assunto de constante estudo pela comunidade científica, uma vez que permite um melhor entendimento sobre a distribuição temporal e espacial do plasma ionosférico. No setor equatorial, a conexão entre a atmosfera neutra, a ionosfera e a configuração praticamente horizontal do campo magnético propicia diariamente uma variabilidade nas estruturas do campo elétrico equatorial (HAERENDEL et al.,1992), tornando, assim, este parâmetro físico um interessante objeto de investigação.

As derivas zonal e vertical do plasma resultam de um sistema de campos elétricos verticais e zonais ao longo do tubo de fluxo magnético. A eletrodinâmica da ionosfera equatorial durante a noite, para períodos calmos, foi modelada por Haerendel et al. (1992) utilizando para isso um sistema bidimensional de equações. Posteriormente, Eccles (1998) propôs algumas simplificações no modelo proposto por Haerendel et al. (1992) e com base na condição $\vec{\nabla}x\vec{E} = 0$ conseguiu inferir, através de uma fórmula simples, o campo elétrico zonal e vertical no plano equatorial magnético. Desse modo, uma aproximação razoável do campo elétrico entre 150 e 1500 km de altitude pôde ser encontrada. Além disso, as simplificações propostas permitem diretamente a identificação das causas primárias da estrutura do campo elétrico de baixas latitudes. Essas causas consistem basicamente nos campos de polarização criados pela divergência das correntes, e nos efeitos gerados pela condição de $\vec{\nabla}x\vec{E} = 0$.

Segundo Eccles (1998), outras considerações foram utilizadas para que o modelo simplificado do campo elétrico de baixa latitude integrado nas linhas do campo magnético fosse determinado. São elas:

- A física do campo elétrico de baixa latitude em escala média e escala global foram simplificadas, supondo-se que as linhas do campo magnético são eletricamente equipotenciais;

- Um sistema de coordenadas planas perpendicular ao campo magnético foi escolhido. Por simplicidade, o plano equatorial magnético foi definido pelas coordenadas y (distância angular leste-oeste) e L (altura vertical em raios terrestres);

- O campo magnético foi considerado dipolar, assim uma fórmula simples pode ser encontrada relacionando as magnitudes do campo elétrico zonal e vertical (E_y, E_L), e do campo magnético B no ápex da linha de força às magnitudes de $\vec{E}$ e $\vec{B}$ em qualquer ponto ao longo da linha de força (HAERENDEL et al., 1992).

As expressões para E e B podem ser utilizadas para produzir integrações simples ao longo das linhas de campo para várias quantidades eletrodinâmicas, a fim de se inferir uma equação da continuidade da corrente em parâmetros integrados dada por (ECCLES, 1998):

$$\frac{1}{R_E L}\left(\frac{\partial L J_L}{\partial L} + \frac{\partial J_y}{\partial y}\right) = 0\,, \tag{2.9}$$

em que $J_y(J_L)$ é a densidade da corrente zonal (vertical) integrada ao longo da linha de campo e R_E denota o raio terrestre. De acordo com Haerendel et al. (1992), as densidades de correntes integradas vertical e zonal podem ser escritas como:

$$J_L = \sum_P \left(E_L + B(L)U_y^P\right) - \sum_H \left(E_y + B(L)U_L^H\right), \tag{2.10}$$

$$J_y = \tilde{\sum}_P \left(E_y + B(L)U_L^P\right) + \sum_H \left(E_L + B(L)U_y^H\right), \tag{2.11}$$

em que $\sum_P$ e $\sum_H$ são as condutividades Pedersen e Hall integradas ao longo das linhas de campo; $U_{L,y}^H$ e $U_{L,y}^P$ correspondem ao vento neutro vertical e zonal ponderados pela condutividade Hall e Pedersen. O termo $\tilde{\sum}_P$ na Equação (2.11) expressa uma condutividade Pedersen que, nesse caso, foi

integrada com um fator de peso diferente de $\sum_P$. Conforme mencionado por Eccles (1998), os valores de $\tilde{\sum}_P$ e $\sum_P$ são aproximadamente idênticos na região equatorial.

Combinando as equações (2.9), (2.10) e (2.11) com a definição do potencial conservativo do campo elétrico, a equação do potencial pode ser obtida:

$$E_L = -\frac{\partial \phi}{\partial L}, \tag{2.12}$$

e

$$E_y = -\frac{1}{L}\frac{\partial \phi}{\partial y}. \tag{2.13}$$

O modelo numérico eletrostático descrito acima é utilizado para determinar a estrutura do campo elétrico para uma dada ionosfera, atmosfera e campo de vento neutro. Ele é válido somente para regiões de médias e baixas latitudes devido as restrições de equipotencialidade das linhas entre as regiões de médias e altas latitudes. Com o propósito de encontrar um modelo simplificado de campo elétrico, outras suposições também foram consideradas, tais como:

- A tênue espessura da ionosfera (~300 km) é muito menor do que a sua extensão zonal (~ 40.000 km). Essa condição permite supor que as derivadas verticais das correntes do dínamo sejam muito maiores do que as derivadas zonais;

- A eletrodinâmica das baixas latitudes é ponderada pela condutividade Pedersen dentro de um modelo integrado pelas linhas de campo. A corrente Pedersen domina os dínamos das regiões E e F acima do eletrojato equatorial, assim, o modelo de campo elétrico proposto por Eccles (1998) é válido para alturas superiores a 150 km;

- A maior parte do dínamo das correntes próximo ao pico da condutividade Pedersen domina a produção do campo elétrico zonal.

Uma relação simples para a corrente vertical pode ser obtida integrando a Equação (2.9) em função da altura. Tomando como início da integração a altura no topo do eletrojato equatorial (150 km) e supondo que a derivada zonal da corrente zonal é pequena, obtém-se:

$$J_L\left(Z_{eq} > 150\right) = \frac{L_{150}}{L} J_L^{150}, \tag{2.14}$$

em que Z_{eq} é definido como a altitude equatorial e J_L^{150} é a corrente vertical em $Z_{eq} = 150\,km$. A Equação (2.14) é o resultado da suposição de que as derivadas verticais são muito maiores do que as zonais e, além disso, reafirma que a corrente vertical que deixa a região do eletrojato equatorial não é atenuada pela região F.

Considerando as equações (2.10) e (2.14), o campo elétrico vertical E_L pode então ser determinado a partir de um efeito combinado entre a condução Hall, o dínamo do vento neutro e a divergência na corrente equatorial vertical, ou seja (ECCLES, 1998):

$$E_L = \frac{\sum_H}{\sum_P}\left(BV_L - BU_L^H\right) - BU_y^P + \frac{L^{150}}{L}\frac{J_L^{150}}{\sum_P}, \tag{2.15}$$

em que V_L representa a deriva vertical do plasma.

De acordo com Haerendel et al. (1992), as definições das quantidades eletrodinâmicas integradas da Equação (2.15) são dadas por:

$$\sum_H = 2R_E L\int_0^{\zeta m} \sigma_H\left(1+3\zeta^2\right)^{\frac{1}{2}} d\zeta \tag{2.16}$$

$$\sum_P = 2R_E L\int_0^{\zeta m} \sigma_P\left(1+3\zeta^2\right)^{\frac{1}{2}} d\zeta \tag{2.17}$$

$$U_L^H = \frac{2R_E L}{\sum_H} \int_0^{\zeta m} \sigma_H u_q \frac{\left(1+3\zeta^2\right)}{\left(1-\zeta^2\right)^{\frac{3}{2}}} d\zeta \tag{2.18}$$

$$U_y^P = \frac{2R_E L}{\sum_P} \int_0^{\zeta m} \sigma_P u_s \frac{\left(1+3\zeta^2\right)}{\left(1-\zeta^2\right)^{\frac{3}{2}}} d\zeta, \tag{2.19}$$

em que $\zeta = sen\lambda$ (λ é a latitude geomagnética do dipolo); 0 e ζ_m são os limites de integração representando o equador e a altitude mínima ao longo da linha de campo, respectivamente; u_s representa o vento zonal local nas coordenadas geomagnéticas λ, L e u_q denota o vento meridional-vertical no plano meridional magnético e perpendicular a B, em λ, L.

A Figura 2.5 mostra o comportamento do campo elétrico E_L válido durante as horas do pôr do sol. Observa-se que os termos referentes ao campo elétrico zonal e o vento zonal são dominantes na determinação de E_L. O vento neutro ponderado pela condutividade Pedersen tem uma importante contribuição na determinação do campo elétrico vertical em altitudes acima do pico da região F, e faz com que o plasma derive para leste no período noturno.

Figura 2.5 - Comportamento do campo elétrico vertical de acordo com a contribuição dos termos da condução Hall, da corrente vertical e do vento neutro.
Fonte: adaptada de Haerendel et al. (1992)

A deriva zonal do plasma da região F ionosférica surge através da ação direta entre o campo elétrico vertical e o campo magnético, ou seja (HAERENDEL et al., 1992):

$$V_y = -\frac{E_L}{B}. \tag{2.20}$$

Substituindo a Equação (2.15) em (2.20), a deriva zonal do plasma pode ser escrita como:

$$V_y = -\frac{\sum_H}{\sum_P}\left(V_L - U_L^H\right) + U_y^P - \frac{L^{150}}{L}\frac{J_L^{150}}{B\sum_P}. \tag{2.21}$$

Eccles (1998) propôs que algumas simplificações podem ser feitas na expressão da deriva zonal, tais como desconsiderar o primeiro termo da Equação (2.21), uma vez que os parâmetros V_L e U_L^H geralmente têm a mesma magnitude e sinal, e desconsiderar o termo referente à corrente vertical, o qual é pequeno, exceto próximo ao terminadouro solar abaixo da borda da região F (HAERENDEL et al., 1992). No entanto, essas

considerações podem não ser válidas para períodos em que ocorrem distúrbios magnéticos, principalmente no que se refere ao primeiro termo da Equação (2.21), pois o comportamento do campo elétrico zonal e vertical e, consequentemente, das derivas do plasma nessas condições exibe uma variação complexa quando comparada ao padrão dos dias calmos. Nos resultados desta tese de doutorado, ver-se-á, por exemplo, que campo elétrico vertical noturno, em condições magneticamente perturbadas, pode ser influenciado fortemente pela penetração de um campo elétrico zonal, seja devido a um aumento na condutividade Hall, seja devido a uma variação na condutividade Pedersen. Esta última, por sua vez, pode se originar em virtude de uma variação na deriva vertical causada pela própria penetração de tal campo. Antes de entrar em detalhes sobre esse assunto, a seção a seguir mostrará como se comporta a deriva zonal e vertical durante períodos calmos e, posteriormente, será mostrado o comportamento das derivas durante períodos perturbados.

2.2.1 Deriva zonal e vertical durante períodos calmos

O dínamo da região F induz a uma corrente vertical Pedersen cuja divergência gera um campo elétrico de polarização vertical responsável pela deriva zonal do plasma ionosférico. Durante o dia, os campos elétricos da região E (vertical para cima) são mapeados para a região F e assim geram a deriva zonal do plasma desta região. Durante a noite, o campo elétrico atuante na região F é gerado pelo próprio dínamo local e causa a deriva zonal desta região. A Figura 2.6 mostra a deriva zonal obtida pelo radar de espalhamento incoerente de Jicamarca em função da sazonalidade e do fluxo solar (F10.7), durante períodos calmos.

Figura 2.6 - Dependência sazonal e com o ciclo solar da deriva zonal média da região F para períodos calmos. A barra de dispersão representa o desvio padrão e a curva sólida representa os resultados de um modelo empírico. Fonte: adaptada de Fejer et al. 2005.

Nota-se que, durante o dia, a deriva é para oeste (negativa) e apresenta pouca dependência com a sazonalidade e com a atividade solar (representada pelo índice F10.7), atingindo um valor de ~ -40 m/s às 12 LT. Durante a noite, a deriva é para leste (positiva) e atinge magnitudes muito maiores do que a deriva para oeste. Observa-se que tanto nos casos de solstício de verão e inverno, quanto no equinócio, a amplitude máxima da deriva durante o dia e o horário da reversão próximo ao amanhecer e ao anoitecer não variam muito com o fluxo solar. Os pontos em vermelho na Figura 2.6 ilustram que, de uma maneira geral, o pico da deriva para leste durante períodos de alta atividade solar tem magnitudes maiores do que em períodos de baixa atividade, e que, o horário em que a deriva para leste atinge seu valor máximo ocorre mais cedo quanto maior for o índice F10.7. Nota-se ainda que o aumento do pico de velocidade para leste com o índice F10.7 durante a noite é maior durante o

solstício de dezembro (novembro-fevereiro) e equinócio (março-abril, setembro-outubro) do que no solstício de junho (maio-agosto).

Em relação à deriva vertical ionosférica da região F para a região brasileira, Batista et al. (1996) apresentou um estudo sobre a variação sazonal da deriva vertical de Fortaleza em função da hora local para períodos magneticamente calmos durante alta atividade solar, conforme mostra a Figura 2.7.

Figura 2.7 - Deriva vertical de plasma para região de Fortaleza durante períodos de alta atividade solar.
Fonte: Batista et al. (1996)

Na Figura 2.7, observa-se que, durante o dia, a deriva vertical do plasma é positiva (campo elétrico para leste) e, durante a noite, é negativa (campo elétrico para oeste). Uma característica importante é a intensificação que a deriva vertical apresenta nos horários do pôr do sol. Essa intensificação, a qual é conhecida como pico pré-reversão da deriva vertical do plasma (sigla em inglês: PRE), eleva o plasma da região F para altas altitudes, local em que os processos de recombinação que conduzem à perda de ionização são lentos e

as colisões são raras. Para a região brasileira, o PRE é mais intenso durante o solstício de dezembro e menor durante o solstício de junho.

A dependência da deriva vertical com a longitude, com a hora local e com a sazonalidade para condições de fluxo solar moderado foi discutida por Fejer et al. (2008). A partir dos dados obtidos pelo satélite ROCSAT-1, o autores constataram que a deriva para os diferentes setores longitudinais é positiva durante o dia e negativa a noite, variando significantemente com a hora local e a longitude, principalmente durante o solstício de junho. A intensificação da deriva nas horas do pôr do sol foi observada em quase todos os setores longitudinais e atingiu maiores amplitudes durante o equinócio e solstício de dezembro. Além disso, o horário de reversão da deriva noturna (de positivo para negativo) apresentou pouca variação com a longitude durante o equinócio, no entanto, durante o solstício de junho e dezembro, as variações foram consideráveis. A respeito do comportamento da deriva vertical durante o dia, grandes variações foram detectadas entre as diferentes longitudes avaliadas entre o hemisfério leste e oeste.

No capítulo que se refere aos resultados deste estudo de tese, será apresentada a influência de alguns parâmetros físicos de interesse no comportamento do PRE e na geração e dinâmica das bolhas de plasma durante eventos de tempestades magnéticas. Diante disso, julga-se necessário neste momento fazer uma breve revisão sobre esses dois assuntos que serão apresentados na seção a seguir.

2.2.2 Formação do pico pré-reversão (PRE) e o desenvolvimento das bolhas de plasma

A eletrodinâmica da ionosfera nas horas do pôr do sol é caracterizada pela subida brusca do plasma da camada F ionosférica, a qual é decorrente dos efeitos do vento termosférico e do gradiente longitudinal de condutividade da camada E que se acentua nesses horários (HEELIS et al., 1974; BATISTA et al., 1986). A elevação do plasma para altitudes superiores da ionosfera faz com que a camada F se torne instável e, assim, qualquer perturbação nesse

ambiente pode favorecer a formação das bolhas de plasma. Mais detalhes sobre a formação das bolhas serão apresentados no final desta seção.

O acoplamento elétrico entre as regiões E e F via linhas de campo magnético é fundamental para se entender o PRE. Heelis et al. (1974) mostraram que a deriva vertical do plasma para a região de Jicamarca durante o dia é bem representada pelo dínamo da região E, no entanto, para as horas em que ocorre o PRE (~ 18 - 19 LT), o dínamo da região F deve ser considerado para explicar essa intensificação na deriva. Isso confirma que a formação do PRE é um efeito do dínamo da região F no momento em que a condutividade da região E diminui drasticamente através do terminadouro.

A Figura 2.8 mostra passo a passo como ocorre o PRE. Conforme explicado por Farley et al. (1986), o vento termosférico $\vec{U}$, soprando para leste em direção ao terminadouro solar, gera um campo elétrico $E_z \cong -\vec{U} \times \vec{B}$ na região F. Esse campo é então mapeado para a região E em direção ao equador (E_θ) e gera uma corrente Hall zonal para oeste $J_{\theta y}$.

Figura 2.8 - Modelo simplificado da geração do campo elétrico zonal.
Fonte: adaptada de Farley et al. (1986)

Com a queda da condutividade na região E ao anoitecer, um acúmulo de cargas negativas é produzido próximo ao terminadouro solar, induzindo assim um campo elétrico zonal para leste/oeste (E_y) no período diurno/noturno a fim de manter o equilíbrio eletrostático. O campo E_y cria uma corrente Pedersen J_{yy} que anula $J_{\theta y}$ num estado estacionário e, assim, E_y é mapeado para a região F e lá produz um aumento súbito na deriva vertical do plasma ao entardecer.

Os estudos mostram que o PRE apresenta grande variabilidade que pode ser atribuída a vários fatores, tais como a sazonalidade, a propagação de ondas planetárias, a variabilidade no fluxo solar, o grau de alinhamento do terminadouro solar com o meridiano magnético, a penetração de campos elétricos de origem magnetosférica e o campo elétrico devido ao dínamo perturbado.

Conforme explicado por Abdu (2005), a eletrodinâmica da ionosfera nas horas do pôr do sol, caracterizada pela intensificação do campo elétrico zonal e o gradiente vertical de densidade eletrônica que se acentua na parte inferior da ionosfera, forma um conjunto de pré-condições favoráveis ao desenvolvimento das bolhas de plasma. No momento em que a região F está alta o suficiente para superar os efeitos da recombinação, ou o gradiente de densidade eletrônica está alto, há um crescimento vertical da instabilidade em direção à parte superior da ionosfera, o qual pode ser verificado através das flutuações espaciais e temporais na densidade eletrônica. Essas flutuações geradas pela propagação de ondas de gravidade dão origem às chamadas bolhas ionosféricas, que são imensas regiões do espaço onde a concentração de elétrons livres é acentuadamente reduzida. As bolhas de plasma apresentam um alto grau de variabilidade, seja ela de curto prazo ou variações sazonais e anuais e com as atividades solar e geomagnética (SOBRAL et al., 2002).

A teoria mais aceita para explicar a geração das bolhas ionosféricas é a de instabilidade Rayleigh – Taylor (KELLEY, 2008). Na Figura 2.9, consideram-se

dois fluídos com densidades diferentes representadas por n_1 e n_2, tal que $n_1 > n_2$, sujeitos à ação da gravidade e à do campo magnético. Desprezando-se os efeitos colisionais, a corrente produzida pela gravidade é dada por $\vec{J} = \left(nM\vec{g} \times \vec{B}\right)/B^2$. A corrente na direção x, a qual é estritamente horizontal, é dada por $J_x = nMg/B$. De acordo com essa expressão, J_x depende da densidade n, então qualquer perturbação na superfície que separa os dois fluídos causará uma divergência na corrente. Desse modo, um acúmulo de cargas será gerado na borda da perturbação e dará origem a um campo elétrico de polarização, o qual, na presença do campo magnético, causará a deriva de íons e elétrons $(\delta\vec{E} \times \vec{B})$. Essa deriva faz com que o plasma de menor densidade suba e o de maior densidade desça, formando assim a bolha ionosférica.

Figura 2.9 - Representação esquemática das condições favoráveis à geração da instabilidade Rayleigh-Taylor.
Fonte: adaptada de Kelley (2008)

De acordo com Abdu (2001), os principais parâmetros que controlam a taxa de crescimento da instabilidade e o desenvolvimento do spread-F equatorial são os seguintes: 1) A intensificação da deriva vertical noturna devido ao dínamo da região F; 2) o vento meridional / transequatorial termosférico que controla a

condutividade integrada ao longo da linha de força; e 3) a perturbação inicial na densidade e na deriva vertical/campo elétrico zonal de polarização que age como fonte semeadora para o início da instabilidade. Dentre esses três parâmetros citados, a intensificação da deriva vertical noturna é uma das mais estudadas e observadas (ABDU, 2001).

2.3 Campos elétricos perturbados

Durante períodos geomagneticamente perturbados, os campos elétricos, as derivas ionosféricas e o início das instabilidades do plasma na região F equatorial exibem uma variação complexa quando comparadas ao padrão dos dias calmos. Esta complexidade surge em decorrência da natureza variável do acoplamento entre as regiões de alta e baixa latitude de acordo com dois mecanismos básicos, a saber: 1) dínamo magnetosférico (SPIRO et al., 1988) e 2) dínamo perturbado ionosférico (BLANC; RICHMOND, 1980). O primeiro resulta em mudanças no potencial da calota polar e causa a penetração de campos elétricos para baixas latitudes. O segundo, por sua vez, é causado por mudanças na circulação termosférica global induzida através do aquecimento Joule nas latitudes aurorais durante tempestades magnéticas. Com o intuito de entender como as derivas ionosféricas podem ser influenciadas pelos campos elétricos perturbados, será apresentada primeiramente uma breve discussão sobre como tais campos são gerados.

2.3.1 Penetração direta de campos elétricos

Campos elétricos perturbados são as principais fontes de modificações da eletrodinâmica ionosférica normalmente governada pelos ventos de maré. Quando o campo magnético interplanetário (CMI) se inverte para sul, um potencial campo elétrico amanhecer-anoitecer se desenvolve na região polar e pode penetrar nas latitudes equatoriais (SOBRAL et al., 1997). Tal campo elétrico, que é originado através do impacto do vento solar e do CMI com a magnetosfera é dado por (KELLEY, 2008):

$$\vec{E}_{vs} = -\vec{V}_{vs} \times \vec{B}_{CMI}, \tag{2.22}$$

em que o subscrito vs significa vento solar, $\vec{E}_{vs}$,$\vec{V}_{vs}$ e $\vec{B}_{CMI}$ representam o campo elétrico interplanetário, a velocidade do vento solar e o campo magnético interplanetário, respectivamente. Quando o CMI estiver orientado para sul, um campo elétrico amanhecer-anoitecer é criado na magnetosfera e, se o transporte do fluxo magnético descrito por esse campo elétrico se estender para a magnetosfera através da reconexão magnética (passos 2 e 4 da Figura 2.10a), existirá então uma convecção do plasma em direção à terra dada por $\vec{E} \times \vec{B}$. Se esse campo elétrico, conhecido como *undershielding* (leste/oeste durante o dia/noite), penetrar na ionosfera equatorial no lado diurno/noturno, o plasma será lançado para as altas/baixas altitudes através da deriva $\vec{E}_{VS} \times \vec{B}_{CMT}$, em que $\vec{B}_{CMT}$ é o campo magnético terrestre (Figura 2.10b) (TSURUTANI et al., 2008).

Figura 2.10 - a) Sequência de eventos em que o CMI para sul se conecta-se ao CMT. Fonte: Kelley, 2008. b) Mecanismo ilustrativo da penetração direta de campos elétricos e seus efeitos na ionosfera equatorial diurna e noturna.
Fonte: Tsurutani et al. (2008)

A resposta da ionosfera para o campo elétrico de penetração que fora criado e que se propaga em direção às regiões equatoriais e de baixas latitudes é dada em termos da criação de um campo elétrico de blindagem, o qual é estabelecido em uma escala de tempo que varia de 30 minutos a várias horas (TSURUTANI; GONZALEZ, 1997). Acredita-se que essa blindagem se deva basicamente à corrente de anel e à corrente responsável pela conexão entre a magnetosfera e a ionosfera denominada por correntes da Região 2.

Devido aos gradientes e à curvatura do campo magnético, os íons derivam da meia-noite em direção ao anoitecer e os elétrons da meia-noite em direção ao amanhecer, formando assim a corrente de anel global e um campo elétrico

anoitecer-amanhecer $(\vec{E}_b)$, conforme ilustra a Figura 2.11. Tal campo de blindagem tenderá a cancelar o campo elétrico amanhecer-anoitecer $\vec{E}_{VS}$. Desse modo, a magnetosfera interna ficará blindada contra os campos elétricos magnetosféricos.

Figura 2.11 - Mecanismo pelo qual o efeito de blindagem se desenvolve num corte transversal da magnetosfera equatorial.
Fonte: adaptada de Senior e Blanc (1984).

Richmond et al. (2003) afirmam que o efeito de blindagem da ionosfera se deve também às correntes alinhadas ao campo geomagnético na Região 2 (R2). De acordo com Nakano et al. (2009), essas correntes são geradas basicamente pelos gradientes térmicos e de pressão magnética no interior da magnetosfera. A Figura 2.12 mostra que as correntes R2 fluem para dentro e para fora da região auroral e em direção ao equador da calota polar. A penetração direta dos campos elétricos da calota polar para baixas latitudes é modulada pela interação entre o plasma quente da magnetosfera e a ionosfera. Essa interação faz com que as correntes R2 sejam intensificadas e um campo elétrico anoitecer-amanhecer seja criado. Tal campo elétrico atua no sentido de blindar a ionosfera, ou seja, reduzir a penetração dos campos elétricos em direção às médias e baixas latitudes.

Figura 2.12 - Ilustração das correntes da Região 1 e Região 2.
Fonte: http://www.meted.ucar.edu/hao/aurora/txt/x_m_3_1.php.
Acesso: 07/10/2014

2.3.2 Dínamo perturbado

O mecanismo de geração do campo elétrico formado devido ao dínamo dos ventos perturbados pode ser entendido com o auxílio da Figura 2.13.

Figura 2.13 - Mecanismo de geração do campo elétrico do dínamo perturbado.
Fonte: Modificada de Abdu et al. (2006).

De acordo Blanc e Richmond (1980) (veja também Abdu et al. 2006), a entrada de energia magnetosférica nas altas latitudes conduz ventos termosféricos perturbados em direção ao equador (U_s). A rotação da terra faz com que surjam movimentos zonais para oeste devido à força Coriolis (U_y). O

movimento zonal dos íons, na presença do campo magnético terrestre, gera a corrente Pedersen que flui em direção ao equador (J_P) e tende a carregar positivamente a ionosfera de baixas latitudes até o momento em que o fluxo de corrente seja interrompido por um campo elétrico de polarização resultante (E_P). O campo E_P, perpendicular às linhas de $\vec{B}$, tem o efeito de produzir uma deriva do plasma para oeste e uma corrente Hall (J_H). A interrupção desta corrente nos terminadouros resulta em dois laços de correntes que estabelecem o campo elétrico anoitecer-amanhecer. Esse campo elétrico zonal tem polaridade oposta ao campo elétrico do dínamo dos dias calmos e se estende para as regiões equatoriais e de baixas latitudes através da ionosfera condutora.

2.3.3 Deriva vertical durante períodos perturbados

Na literatura, encontram-se muitos exemplos de como a penetração de campos elétricos e o campo elétrico devido ao dínamo perturbado podem influenciar a deriva vertical ionosférica. Fejer et al. (2008), por exemplo, utilizaram medidas obtidas pelo satélite ROCSAT a fim de determinar a dependência sazonal e longitudinal da deriva vertical perturbada da região F equatorial. A Figura 2.14a mostra o resultado desta análise para o caso em que o comportamento da deriva vertical é modificado pela penetração de campos elétricos, enquanto a Figura 2.14b se refere aos efeitos ocasionados pelo dínamo perturbado. Em relação à Figura 2.14a, observa-se que a velocidade é positiva entre ~ 07 e 23 LT, e atinge picos positivos às 11 LT e às 19 LT e negativos entre 03 e 05 LT. Observa-se também que a velocidade perturbada durante o dia é maior durante equinócio e a reversão da velocidade ao amanhecer ocorre um pouco mais cedo durante os solstícios e mais tarde no equinócio.

Figura 2.14 - Comportamento da deriva vertical do plasma em função de a) penetração de campos elétricos e b) dínamo perturbado.
Fonte: Fejer et al. (2008).

Com respeito aos efeitos causados na deriva vertical por meio da ação do dínamo perturbado (Figura 2.14b), observam-se algumas características, tais como: pequena velocidade de deriva entre 07 e 17 LT, queda da velocidade ao entardecer e a noite (maior para o equinócio), velocidade positiva entre 21 LT e 07 LT e maior durante o solstício de dezembro. Já para o equinócio e solstício de junho, o pico nesse horário tem magnitudes praticamente iguais (~ 10 m/s). Além disso, nota-se que a dependência da deriva durante eventos de dínamo perturbado com a hora local e a sazonalidade está amplamente anticorrelacionada com as derivas causadas pela penetração de campos elétricos.

Santos et al. (2013) estudaram dois casos em que o efeito dos campos elétricos foram observados através da inibição parcial do PRE. Observa-se na Figura 2.15 que, no dia 30 de setembro de 2002, a atividade auroral (índice AE) apresentou uma intensificação das 03 UT até às 14 UT. Acredita-se que essa intensificação foi suficiente para gerar um campo elétrico com polaridade para oeste no setor noturno devido ao dínamo do vento perturbado. Como consequência disso, o PRE, que durante períodos calmos atinge um pico de ~45 m/s (curva preta), foi parcialmente inibido e atingiu um valor de 20 m/s.

Nota-se que o índice AE apresentou uma recuperação a partir das 14 UT e que, na hora de ocorrência do PRE, a atividade auroral já estava praticamente ausente - o que sustenta a suposição de que o campo elétrico devido ao dínamo perturbado tenha sido o responsável pela inibição parcial do PRE para este dia.

A Figura 2.15 ainda mostra que no dia 01 de outubro de 2002, o índice AE apresentou-se mais ativo do que no dia anterior e atingiu picos com intensidade variando entre ~1500 a 1750 nT. Em comparação com a média de dias calmos, observa-se uma inibição quase completa do PRE até 2140 UT, a qual foi possivelmente causada por um campo elétrico *overshielding,* associado à recuperação da atividade auroral entre 2010 UT e 2130 UT, bem como pela ação do campo elétrico do dínamo perturbado. Na sequência do evento, com Bz para sul, observa-se que a atividade auroral apresentou uma rápida intensificação variando de 500 nT para 1250 nT às 2130 UT. Praticamente no mesmo horário, a deriva vertical (Vz) também se intensificou e atingiu um pico de ~70 m/s às 2210 UT. Esse aumento de Vz parece ter sido uma consequência direta da penetração de um campo elétrico *undershielding*. O subsequente decréscimo de Vz às 2210 UT foi causado, possivelmente pelo campo elétrico *overshielding* associado a uma recuperação de AE a partir desse horário.

Figura 2.15 - Comportamento dos parâmetros Sym-H, By, Bz, AE e da deriva vertical Vz sobre São Luís, durante a tempestade magnética de 30 de setembro de 2002 a 02 de outubro de 2002.
Fonte: Santos et al. (2013)

Com base nas observações do parâmetro hmF2 obtido pela digissonda de São Luís, Abdu et al. (2008) apresentaram um caso em que a deriva vertical foi drasticamente modificada durante a tempestade de outubro de 2003. A Figura 2.16 mostra que imediatamente após uma grande intensificação na atividade auroral às ~ 2110 UT (indicada pela seta cinza), o parâmetro hmF2 apresentou uma rápida subida e variou de ~ 500 km para altitudes superiores a ~1100 km de altura. Essa variação corresponde a uma deriva vertical de ~ 700 m/s (determinada como dhmF2/dt). Acredita-se que essa subida da camada tenha sido gerada pela penetração de um campo elétrico para leste, associado a uma grande intensificação da atividade auroral de 2000 nT para 4000 nT observada nesse mesmo horário. A correspondente variação da altura do pico da camada F para a região de Jicamarca também é apresentada na Figura 2.16 e, ao contrário de São Luís, observa-se somente uma pequena variação na altura da camada às ~2110 UT. Ademais, observa-se que, às 24 UT, o parâmetro hmF2 em São Luís atingiu valores superiores ao padrão dos dias calmos (curva

tracejada), enquanto em Jicamarca identificou-se apenas um comportamento de hmF2 inferior ao padrão calmo. De acordo com os autores deste trabalho, a grande diferença observada na intensidade dos campos elétricos de penetração sobre São Luís e Jicamarca, parece estar associada à intensificação dos campos elétricos perturbados na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, já que essa região está sujeita a um gradiente espacial de condutividade em grande escala produzido pela precipitação de partículas.

Figura 2.16 - Variação do índice AE durante os dias 30 e 31 de outubro de 2003, da altura da camada F para diferentes frequências num intervalo de 1 MHz e do parâmetro hmF2 em Jicamarca e São Luís.
Fonte: Abdu et al. (2008)

2.3.4 Deriva zonal durante períodos perturbados

Dentre os dois mecanismos geradores do campo elétrico perturbado, citados nas seções 2.3.1 e 2.3.2, o presente trabalho enfoca no primeiro mecanismo, ou seja, na penetração de campos elétricos. A escolha desse tema se baseia em alguns trabalhos anteriores em que a penetração de um campo elétrico

zonal, na presença de um aumento na condutividade da região E e um decréscimo na condutividade da região F, foi considerada como a percursora das variações observadas na deriva zonal do plasma noturno. Esse aumento da condutividade foi atribuído à precipitação de partículas energéticas na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul. Diante disso, os exemplos de derivas zonais e verticais mostradas a partir deste ponto foram de extrema importância para a realização do estudo proposto nesta tese de doutorado.

Pela primeira vez, Abdu et al. (1998) mostraram evidências de que grandes flutuações na deriva zonal das irregularidades noturnas (~ 50 a 180 m/s) poderiam estar associadas aos distúrbios magnetosféricos. Conforme ilustra a Figura 2.17, observa-se que as flutuações na deriva vertical noturna (Vz) de Fortaleza estão correlacionadas com as variações no índice AL. Esse comportamento sugere que o campo elétrico responsável por tal flutuação em Vz tem a mesma fonte de perturbação do campo que produz as flutuações no índice AL. Observa-se também que tais flutuações na deriva zonal (Vzon) (positiva para leste) estão anticorrelacionadas com as flutuações em Vz (positiva para cima) e no índice AL.

Figura 2.17 - Comportamento da deriva zonal e vertical de Fortaleza durante a tempestade magnética de 20 de novembro de 1994.
Fonte: Abdu et al. (1998).

De acordo com os autores, é improvável que as flutuações na deriva zonal tenham sido causadas pela penetração de campo elétrico vertical com origem nas altas latitudes. Diante disso, dois mecanismos foram propostos para explicar essas flutuações na deriva zonal, sendo eles: 1) campo elétrico vertical de polarização Hall na região E, o qual é mapeado para a região F e 2) campo elétrico gerado pela corrente vertical oriunda da divergência na corrente Pedersen zonal integrada ao longo das linhas de campo (J_z na Equação 2.15); ambos seriam induzidos por distúrbios no campo elétrico zonal primário. Para que esses mecanismos sejam operantes, é necessário uma intensificação na condutividade da região E noturna com um possível gradiente espacial. Neste mesmo trabalho de Abdu et al. (1998), outros casos de flutuações na deriva zonal durante a noite para os dias 3 e 18 de janeiro de 1995 também foram mostrados.

Fejer e Emmert (2003) também observaram a anticorrelação entre a deriva vertical e zonal sobre Jicamarca, porém no período diurno durante a tempestade magnética ocorrida em 19 de outubro de 1998. Acredita-se que as variações observadas na deriva vertical e zonal são consistentes com a ocorrência de penetração de campos elétricos de curta duração, os quais parecem ter sido desencadeados primeiramente devido ao aumento da pressão do vento solar. Conforme ilustra a Figura 2.18, observa-se um aumento na pressão do vento solar às ~1730 LT e pouco tempo depois uma inversão de Bz para norte. Neste mesmo horário, a deriva vertical apresentou uma intensa subida que não poderia ser explicada com essa inversão de Bz para norte, uma vez que tal inversão deveria gerar um campo elétrico com polaridade para oeste nessas horas. Desse modo, acredita-se que a inversão de Bz para norte contribuiu para o rápido decréscimo da penetração de um campo elétrico o qual foi gerado inicialmente pelo aumento na pressão dinâmica do vento solar (painel b). A contribuição do efeito Hall na flutuação da deriva zonal para este caso não foi descartada pelos autores.

Figura 2.18 - Variação do campo magnético interplanetário Bz e da pressão dinâmica do vento solar obtido pelo satélite WIND com 23 minutos de atraso (painéis a e b), componente horizontal do campo geomagnético em Jicamarca (painel c) e derivas do plasma (painéis d,e).
Fonte: Fejer e Emmert (2003)

Diferente dos casos estudados por Abdu et al. (1998, 2003), a anticorrelação entre as derivas zonal e vertical em Jicamarca estudada por Fejer e Emmert (2003) foi observada durante o dia. Já os casos estudados para a região brasileira correspondem ao período noturno, quando uma ionização extra deve ocorrer para explicar tal anticorrelação. Nesta tese, pela primeira vez serão apresentados alguns casos em que esta anticorrelação associada a eventos de tempestade magnética também foi observada durante a noite para o setor de Jicamarca.

Outro caso de anticorrelação entre a deriva zonal e vertical para a região brasileira associada a distúrbios magnéticos é apresentado na Figura 2.19.

Figura 2.19 - Variação da atividade auroral, da deriva vertical e zonal para a região de Cachimbo durante os dias 24 e 25 de outubro de 2002.
Fonte: Abdu et al. (2012)

Observa-se que, entre ~ 17 UT e ~00 UT, as flutuações na deriva vertical em Cachimbo apresentaram um comportamento similar às flutuações do índice AE. O desvio negativo da deriva vertical (identificado como “1”) próximo às 18 LT ocorre simultaneamente a um decréscimo na atividade auroral. Esta característica sugere a ação de um campo elétrico de penetração para oeste (*overshielding),* bem como a ação do campo elétrico do dínamo perturbado, considerando a forte atividade auroral observada nas horas anteriores ao evento em questão. Entre 19 e 22 LT, verifica-se que a atividade auroral se intensificou, fazendo com que um campo elétrico *undershielding* ocasionasse

na deriva vertical uma variação de -20 para 20 m/s. Posteriormente, o índice AE mostrou uma tendência de recuperação, a qual foi acompanhada com uma tendência de inversão de Bz para norte (não mostrado aqui). Nesse intervalo, observa-se um decréscimo na deriva vertical possivelmente causado por um campo elétrico do tipo *overshielding*.

Nota-se, através dessa sequência de eventos apresentados na Figura 2.19, um controle dos campos elétricos de penetração no comportamento da deriva vertical. Ao mesmo tempo, é notável também a anticorrelação entre a velocidade vertical e a zonal observada nesse horário associada às diferentes fases de intensificação e recuperação da atividade auroral, conforme mencionado anteriormente. Isso indica que um campo elétrico *undershielding* durante o dia e ao entardecer produz uma perturbação na deriva vertical para cima a qual é acompanhada por uma perturbação na deriva zonal para oeste. Já um campo elétrico *overshielding* produz uma perturbação na deriva vertical para baixo, a qual é acompanhada por uma perturbação na deriva zonal para leste. Diante disso, têm-se evidências de que a conexão entre a deriva zonal e vertical durante a noite só pode existir se a penetração de um campo elétrico zonal induzir um campo elétrico vertical através da condução Hall e através do fluxo de corrente vertical na presença de uma intensificação da ionização da região E. É possível que essa intensificação na ionização tenha sido causada pela intensificação na precipitação de partículas na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul.

2.3.4.1 Mecanismo proposto para explicar as perturbações na deriva zonal segundo Abdu et al. (1998)

De acordo com o trabalho pioneiro de Abdu et al. (1998), é improvável que as variações na deriva zonal durante eventos de tempestade magnética apresentados sejam causadas diretamente pela penetração no campo elétrico vertical de origem magnetosférica. Conforme esquematizado na Figura 2.20, acredita-se que as flutuações observadas na deriva zonal noturna sejam produzidas por uma perturbação no campo elétrico zonal primário (setas

verdes), responsável por produzir a deriva vertical. Tal perturbação teria induzido um campo elétrico Hall na região E (seta em azul), que, ao ser mapeado para a região F, teria produzido a deriva zonal do plasma perturbada (setas em vermelho).

Figura 2.20 - Representação esquemática do campo elétrico Hall produzido na Região E (setas em azul), o qual é mapeado verticalmente para a região F. A deriva zonal para oeste é indicada pelas setas em vermelho. As setas em verde, apontando para a direção leste, representam o campo elétrico zonal primário perturbado.
Fonte: adaptada de Abdu et al. (1998)

Durante o início de uma tempestade magnética, a entrada de energia nas latitudes aurorais faz com que essa região se aqueça e gere ventos perturbados. No entanto, devido à inércia das partículas neutras, algumas horas são necessárias para que o sistema de ventos perturbados seja estabelecido e assim alcance as regiões equatoriais e de baixas latitudes (RICHMOND et al., 2003). Nesse sentido, desconsiderando qualquer contribuição do vento neutro devido às razões citadas acima, e desconsiderando também qualquer contribuição da corrente vertical, a qual tem maior importância somente nos horários do pôr do sol, o campo elétrico vertical teria sido criado inteiramente pelo termo referente à condução Hall. Desse modo, a Equação 2.15 se reduz a:

$$\Delta E_L = \frac{\sum_H}{\sum_P} \Delta E_y \tag{2.23}$$

Fazendo uma simples manipulação matemática, encontra-se que a razão entre a deriva zonal e a deriva vertical é igual à razão entre a condutividade Hall e Pedersen integrada ao longo das linhas do campo, isto é,

$$\frac{\Delta E_L}{\Delta E_y} = \frac{\sum_H}{\sum_P} = -\frac{\Delta V_y}{\Delta V_L} \tag{2.24}$$

Dos casos estudados por Abdu et al. (1998), dentre os quais um foi apresentado na Figura 2.15, observou-se em um deles que a razão entre as velocidades zonal e vertical variou aproximadamente de 0,5 a 3. Sabe-se que a densidade eletrônica da região E pode ser intensificada durante períodos perturbados. Esse aumento na densidade pode causar um significante aumento na razão $\frac{\sum_H}{\sum_P}$, uma vez que a contribuição de $\sum_H$ vem principalmente de uma estreita faixa de altura localizada nas alturas da região E. Três diferentes maneiras que poderiam evidenciar o aumento na densidade eletrônica noturna na região E foram sugeridas por Abdu et al. (1998). São elas:

- Intensificação da corrente do eletrojato equatorial durante a noite;
- Intensificação da camada esporádica (Es), a qual pode ser identificada pelo parâmetro fbEs (frequência de Blanketing);
- Intensificação na precipitação de partículas energéticas na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul.

Diante deste cenário, esta tese de Doutorado investigou em detalhes a contribuição da precipitação de partículas energéticas como percursora de um aumento na densidade eletrônica da região E e, consequentemente, da geração do campo elétrico Hall e das derivas do plasma associadas. Portanto,

faz-se necessário, a partir deste momento, apresentar uma breve revisão sobre como a precipitação de partículas energéticas na região da AMAS, a qual pode ser intensificada durante um evento de tempestade magnética, afeta a eletrodinâmica da região equatorial e de baixas latitudes.

2.3.4.2 Precipitação de partículas energéticas na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul

A eletrodinâmica do sistema ionosfera-termosfera da região brasileira pode sofrer forte modificação devido à AMAS, a qual é caracterizada pela intensidade mínima da componente total do campo geomagnético (ABDU et al., 1973, 1981, 1998; BATISTA; ABDU, 1977). A AMAS permite maior grau de interação entre a magnetosfera e a atmosfera e, consequentemente, favorece a precipitação de partículas energéticas do cinturão da radiação, modificando assim a distribuição das condutividades e das correntes elétricas desta região (Abdu et al., 1998). A Figura 2.21 mostra a distribuição da intensidade do campo geomagnético representada por contornos de isolinhas em que é possível observar que o menor valor da intensidade do campo geomagnético está centrado ao redor do sul do Brasil e do Paraguai.

Figura 2.21 - Distribuição da intensidade do campo magnético total representado pelas isolinhas para o globo terrestre. O menor valor da intensidade do campo magnético em nT define a posição do centro da Anomalia Magnética do Atlântico Sul.
Fonte: adaptada de Maus et al. (2010)

Ao longo dos anos, as observações referentes à intensidade do campo magnético total têm mostrado que a AMAS tem se deslocado tanto para o sul quanto para oeste, mas quase que exclusivamente para oeste desde 1955 (Figura 2.22a). No entanto, esta análise se refere somente ao valor mínimo da intensidade do campo, uma vez que a abrangência espacial da AMAS tem aumentado significantemente durante o último século. Além disso, conforme mostrado na Figura 2.22b, uma característica interessante é que o valor mínimo da intensidade do campo total dentro da AMAS tem sistematicamente decrescido mais abruptamente a partir de 1940, quando a intensidade do campo magnético era ~24.954 nT, até os dias atuais, com a intensidade do campo alcançando um valor de ~ 22.590 nT no ano de 2010 (FINLAY et al., 2010).

Figura 2.22 - a) Localização da região central da AMAS com o passar dos anos, com a escala de cores representando a intensidade do campo magnético total. b) Decréscimo da intensidade do campo magnético total (em nT) desde 1900 até os dias atuais.
Fonte: adaptada de Finlay et al. 2010. (2010).

Devido ao baixo valor do campo magnético na região da AMAS, o fluxo de partículas energéticas oriundas do Sol não é completamente blindado pelo campo magnético da terra e, assim, a intensidade das partículas precipitadas nessa região é maior do que em qualquer outra localidade do globo terrestre. Durante eventos de tempestades magnéticas, a alta velocidade do vento solar e a condição do campo magnético interplanetário para sul geram forças elétricas que fazem com que as partículas carregadas de alta energia penetrem profundamente para dentro da magnetosfera interna, fazendo assim com que a intensidade, o espectro e a localização da precipitação de partículas sejam funções da atividade solar e magnética (BAKER, 2004).

Os efeitos da interação entre as partículas carregadas e o campo magnético da terra podem se manifestar de diferentes maneiras na atmosfera, tais como, na intensificação da densidade eletrônica ionosférica (GALANDI, 2001; ABDU et al. 2005), na condutividade (GALANDI; RICHMOND, 2001), na temperatura dos elétrons e íons (GLEDHILL, 1976), como também no fluxo de partículas. Abdu et al. (2005), por exemplo, mostraram que a precipitação de partículas pode influenciar o comportamento da camada E-esporádica (Es) durante a

ocorrência de uma tempestade magnética. Os autores observaram um aumento nos parâmetros foEs (frequência de topo da camada Es) e fbEs (frequência de bloqueio da camada Es) quando comparados ao padrão dos dias calmos. As oscilações na intensidade da camada Es sugerem uma intensificação na ionização da camada E, e a sua ocorrência durante o período noturno sugere a precipitação de partículas nas alturas da região E como uma fonte de ionização extra necessária para produzir tais camadas Es.

O aumento de ionização faz com que a condutividade ionosférica seja intensificada e assim a sua distribuição espacial é modificada. Essa condição permite que, durante um evento de tempestade magnética, a penetração de um campo elétrico zonal nas regiões de baixas latitudes afete a eletrodinâmica desta região. Conforme já mencionado na seção 2.3.4, Abdu et al. (1998) foram os primeiros pesquisadores a sugerirem que as oscilações entre as derivas zonal e vertical poderiam estar associadas a eventos de penetração de campos elétricos zonais sob influência de uma condutividade extra na região E, possivelmente causada pela intensificação da precipitação de partículas nesta região.

Recentemente, Abdu et al. (2013) mostraram que os efeitos da ionização extra podem afetar a formação e/ou rompimento das camadas Es. Investigou-se a possível influência do campo elétrico vertical, induzido pela penetração de um campo elétrico zonal, na formação (ou intensificação) e rompimento da camada esporádica noturna durante a forte tempestade magnética ocorrida em 29 de outubro de 2003. Esse estudo mostrou que a penetração de um campo elétrico zonal foi o responsável pela descida rápida da camada F sobre a região de Jicamarca. A sequência de ionogramas para esta localidade indicou que a camada Es estava bem fraca logo após o início da tempestade, com a frequência de topo atingindo valores de ~ 2 MHz. Sob influência de uma forte penetração de campo elétrico para oeste, a camada Es se intensificou e atingiu valores de foEs superiores a 15 MHz às 0715 LT. Após esse horário, a camada Es praticamente desapareceu. A presença de uma corrente para oeste, conforme verificado pela variação da componente H do campo magnético entre

0610 UT e 08 UT, pode ser um indicativo da intensificação da produção iônica noturna nas alturas da região E. Neste mesmo evento, Abdu et al. (2013) também mostraram as respostas da camada Es sobre as regiões equatorial e de baixa latitude brasileira à mesma tempestade. A conclusão desse estudo foi que o campo elétrico vertical Hall, induzido por uma perturbação no campo elétrico zonal, pode ter sido responsável pela convergência vertical na velocidade dos íons, a qual pode ser suficiente para influenciar a formação da Es. Enquanto um campo elétrico Hall para baixo pode favorecer a formação de uma Es, um campo elétrico vertical para cima pode causar o rompimento da mesma (ABDU et al. 2013).

Com base nas informações de alguns trabalhos citados aqui, o diagrama da Figura 2.23 mostra de maneira resumida a conexão entre um campo elétrico de penetração e o campo elétrico vertical induzido, e seus efeitos nas derivas zonal, vertical e na formação/rompimento de uma camada Es, durante o dia e a noite. Deve-se lembrar que Bz para sul dá origem a uma penetração do campo elétrico *undershielding* (leste dia/oeste noite), ao passo que Bz para norte dá origem a um campo elétrico de penetração *overshielding* (oeste dia/leste noite). É interessante ressaltar que todos os casos de respostas da camada Es aos campos elétricos perturbados reportados até o momento se referem às observações noturnas.

Figura 2.23 - Representação esquemática dos efeitos na deriva vertical da camada F e da camada Es devido a penetração de um campo elétrico zonal primário.

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA UTILIZADA

Neste capítulo, descrevem-se brevemente os instrumentos que foram utilizados na obtenção dos dados deste estudo de tese, bem como a metodologia empregada na análise. Além disso, será feita uma descrição sobre o modelo SUPIM-INPE (Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model at INPE, http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/), e sobre a inclusão das equações que regem a ionização produzida pela precipitação de partículas energéticas nesse modelo. O uso do modelo SUPIM-INPE foi de extrema importância para se quantificar os parâmetros físicos integrados ao longo das linhas de campo, necessários para o cálculo da deriva zonal.

A conexão entre as derivas vertical e zonal da ionosfera durante períodos perturbados foi aqui estudada para as regiões peruana e brasileira. As derivas para a região brasileira foram obtidas através dos dados disponibilizados pela digissonda (deriva vertical e zonal) e através das informações coletadas pelo imageador óptico all-sky instalado na região equatorial de São João do Cariri (deriva zonal). Em relação às derivas para a região peruana, os dados foram obtidos pelo radar de espalhamento incoerente, um importante instrumento que faz medidas precisas da velocidade de deriva. Os ionogramas obtidos pelas digissondas brasileira e peruana também foram utilizados a fim de se obter informações sobre alguns parâmetros das regiões E e F.

3.1 Digissonda

A digissonda é um dos instrumentos mais representativos para a medida dos parâmetros ionosféricos. Trata-se de um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética em frequências que variam de 1 a 30MHz. Os pulsos são transmitidos com potência de pico da ordem de 10 kW para os modelos de digissondas DGS 256 e da ordem de 300 W para as digissondas do tipo Digisonde Portable Sounder (DPS) (REINISCH, 1986). A transmissão das ondas polarizadas é feita através do uso de duas antenas tipo Delta em planos cruzados. O espaçamento das antenas receptoras forma um

triângulo equilátero com 60 m de comprimento na base, com uma das antenas localizadas no centro do triângulo como indicado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Configuração do arranjo de antenas receptoras da digissonda.
Fonte: <http://ulcar.uml.edu/uda>>

A partir do tempo decorrido (t) entre um pulso transmitido e a recepção dele após ser refletido pela ionosfera, a altura virtual da camada ionosférica (h') (DAVIES, 1965) pode ser calculada de acordo com a expressão:

$$h' = \frac{1}{2}ct, \tag{3.1}$$

em que c representa a velocidade da onda eletromagnética no vácuo. Como a velocidade do pulso é menor do que a velocidade da luz e varia com a densidade eletrônica do meio da propagação, a altura real na qual a reflexão realmente aconteceu é sempre menor do que a altura virtual. Isso ocorre porque há um retardo do sinal eletromagnético pela ionização existente abaixo do ponto de reflexão.

O princípio básico de funcionamento da digissonda consiste na reflexão e refração das ondas eletromagnéticas pelo plasma ionosférico. Desprezando os efeitos do campo geomagnético, bem como as colisões entre elétrons e as

partículas neutras, o índice de refração do plasma ionosférico μ é dado por (RATCLIFFE, 1962):

$$\mu^2 = 1 - X = 1 - \left(\frac{f_N}{f}\right)^2, \tag{3.2}$$

em que f é a frequência da onda, $f_N^2 = \frac{N_e e^2}{4\pi^2 \varepsilon_o m}$, e, N_e, m e ε_0 são, respectivamente, a carga, a densidade, a massa dos elétrons e a permissividade elétrica no espaço livre. Na atmosfera neutra, o índice de refração é igual a 1, N_e é nulo e, portanto, X também é nulo. No entanto, a partir da altura em que N_e é diferente de zero devido à presença dos elétrons livres, $X > 0$ e assim μ tende a ficar cada vez menor até anular-se, momento esse em que ocorre a reflexão da onda incidente. Desse modo, a Equação (3.2) se reduz a:

$$f^2 = \frac{N_e e^2}{4\pi^2 \varepsilon_o m}. \tag{3.3}$$

Uma relação simples entre a frequência do plasma e a densidade eletrônica pode ser encontrada da seguinte forma:

$$f = (80{,}5 N_e)^{\frac{1}{2}} \tag{3.4}$$

ou

$$N_e = (1{,}24x10^4) f^2. \tag{3.5}$$

Na Equação (3.4), as unidades de f e N_e estão no sistema internacional de medidas, ou seja, f em Hz e N_e em elétrons/m^3. Já na Equação (3.5), f deve ser expresso em MHz e N_e em elétrons/cm^3.

Os ecos do sinal refletido pelas camadas ionosféricas são registrados por meio de gráficos (ionogramas) da medida da amplitude do sinal com a frequência e a altura. Os dados da sondagem são pré-processados pela digissonda através de uso do software ARTIST (*Automatic Real Time Ionogram Scaler with True Height*) e depois de gravados podem ser manualmente editados através de uso do software SAO-Explorer (*Standard Archive Output Format*). Dentre os parâmetros ionosféricos que esse software permite obter, estão, por exemplo, a altura virtual (h'F) e a frequência crítica da camada F (foF2), a frequência de blanketing (fbEs) e a frequência de topo (ftEs) da camada E-esporádica (Es). A Figura 3.2 mostra um ionograma obtido pela digissonda de Fortaleza para o dia 02 de outubro de 2004, em que os parâmetros citados são indicados na figura.

Figura 3.2 – Ionograma registrado em Fortaleza onde destacam-se a frequência crítica e altura virtual da camada F (foF2 e h'F) e as frequências de blanketing e de topo (fbEs e ftEs) das camadas Es.

O software SAO-Explorer também permite verificar a evolução da ionosfera em um determinado período desejado. Na Figura 3.3, observa-se a subida da camada F, por volta das 21 UT, devido à deriva vertical da camada F que se intensifica no pôr do sol pelo mecanismo do PRE e a variação do gradiente da densidade eletrônica (indicado pelos contornos em cores) que se acentua nesse mesmo horário.

Figura 3.3 - Evolução temporal da densidade eletrônica da ionosfera em função do tempo e da altura.

A altura real da ionosfera, e, portanto, a distribuição da densidade eletrônica com altura, também é um parâmetro fornecido pelo SAO-Explorer. A Figura 3.4 mostra essas alturas para diferentes frequências de sondagem. Os valores de altura real da camada F obtidos através da Figura 3.4 são muito úteis na hora de se fazer o cálculo da deriva vertical. Ao contrário de outros sondadores, os dados assim fornecidos pela digissonda, permite que o usuário não fique limitado a utilizar somente as informações de altura da base ou do pico da camada F para o cálculo da deriva vertical.

Figura 3.4 – Variação temporal da altura real da camada F para diferentes frequências de sondagem.

Outra característica das digissondas é que esses equipamentos podem operar tanto no modo ionograma quanto no modo de deriva. Esse último modo permite ao usuário obter as diferentes componentes da velocidade do plasma, ou seja, vertical, zonal e meridional. A técnica utilizada para fazer estas medidas de velocidade será detalhada na seção 3.1.2.

Como durante a noite o ambiente ionosfera-termosfera pode sofrer constantes modificações, a ionosfera equatorial se torna frequentemente instável às perturbações na sua densidade eletrônica. Assim sendo, quando o pulso eletromagnético emitido pela digissonda encontra uma ionosfera instável e perturbada, o sinal da onda de rádio refletido apresenta-se degradado e espalhado (*spread-F*) numa determinada faixa de altura e/ou de frequência. Essa característica de espalhamento no ionograma torna muito incerta a redução dos parâmetros ionosféricos como, por exemplo, a redução da altura do pico (hmF2) e da frequência crítica da camada F (foF2). A Figura 3.5 mostra a sequência de alguns ionogramas livres do espalhamento (2100 UT - 2120 UT), bem como alguns ionogramas espalhados (2130 UT - 2220 UT).

Figura 3.5 - Sequência de ionogramas na presença de espalhamento do sinal eletromagnético.

Observa-se que, nos ionogramas das 2100 UT até às 2130 UT, é possível obter os parâmetros de frequência e altura da camada com segurança, porém, no caso dos ionogramas seguintes, isso se torna mais difícil. Como alguns eventos estudados neste trabalho ocorreram durante a noite e na presença de *spread-F,* tornou-se necessário adotar alguns critérios para a redução dos ionogramas espalhados para que alguns parâmetros obtidos pelo modelo SUPIM-INPE (tais como o parâmetro foF2, considerado importante para o cálculo da condutividade Pedersen) pudessem ser comparados ao dado experimental. Desse modo, tinha-se uma ideia de quanto o dado obtido pelo modelo estaria ou não discrepante do dado observado, mesmo esse último não sendo confiável devido à presença do *spread-F*. Além disso, a redução adequada dos ionogramas é necessária para que a deriva vertical seja calculada corretamente.

3.1.1 Redução dos ionogramas com traço F espalhados

Os dados ionosféricos otidos pelas digissondas e pré-processados pelo software ARTIST nem sempre fornecem a melhor representação dos parâmetros ionosféricos, principalmente quando há a presença de *spread-F* e, assim, os ionogramas precisam ser manualmente editados pelo usuário. Em determinadas situações, é possível identificar com alguma segurança os parâmetros da camada F mesmo com o ionograma espalhado. A Figura 3.6 ilustra essa situação.

Figura 3.6 - Frequência crítica da camada F (foF2) e altura do pico da camada F (hmF2) em ionogramas com diferentes tipos de *spread-F*.

Observa-se que o ionograma a) da Figura 3.6 apresenta-se espalhado principalmente em frequência, porém mesmo assim é possível identificar os traços ordinários e extraordinários da camada. Porém, há outras condições em

que o ionograma apresenta espalhamento tanto em altura quanto em frequência. No exemplo b) da Figura 3.6, observa-se um determinado grau de espalhamento até a frequência de ~11MHz e após isso é perceptível um tipo de espalhamento que diminui em termos de altura de acordo com aumento da frequência. Em situações como essa, desconsiderou-se esse espalhamento após 11 MHz.

A segunda reflexão da camada F observada nos ionogramas é uma importante característica a ser considerada na hora de se fazer a redução no traço da camada F. No ionograma b) da Figura 3.6, nota-se que a segunda reflexão da camada localiza-se no dobro da altura da primeira reflexão. Tomando como referência a frequência de 5 MHz, observa-se que primeira reflexão da camada F esta localizada em ~ 350 km de altura, enquanto a segunda esta em ~700 km de altura. A redução de um ionograma considerando essa condição de altura da segunda reflexão permite que se obtenha as informações da altura do traço devido à reflexão de um eco na vertical e assim o cálculo da deriva vertical é válido sob essas condições. Deve-se mencionar, neste ponto, que o cálculo da deriva vertical a partir dos dados da digissonda só é válido quando a altura da camada estiver acima de 300 km, uma vez que abaixo desta, os processos fotoquímicos, de foto-ionização e de perda decorrente da recombinação do plasma produzem um movimento aparente da camada e, assim, a deriva vertical precisa ser corrigida. A seção 3.1.2 apresentará mais detalhes sobre essa correção.

Além desse cenário de espalhamento exemplificado na Figura 3.6, há muitas situações em que identificar os parâmetros da camada F torna-se mais complicado. Em tais casos, deve-se avaliar o comportamento dos ionogramas anteriores e posteriores ao(s) ionograma(s) da dúvida. Um exemplo dessa situação pode ser visto na sequência de ionogramas do dia 01 de dezembro de 2004 apresentados na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Exemplo de redução de ionogramas espalhados utilizando a segunda reflexão como guia.

Analisando a Figura 3.7, observa-se que logo após a subida da camada devido ao PRE (2130 UT), ocorre um espalhamento da camada F, porém, ainda assim, é possível identificar o traço da camada F neste horário. A seta indica a frequência crítica da camada em ~ 9 MHz. Logo após esse horário, observa-se, nos ionogramas das 2230 UT e 23 UT, a presença de um espalhamento tanto em altura quanto em frequência, o que dificulta a obtenção dos parâmetros ionosféricos. Nesses dois ionogramas, não é possível nem mesmo identificar a segunda reflexão da camada e assim a redução fica muito comprometida. Em situações como essa, para que fosse feita uma redução razoável nesses horários, observou-se, primeiramente, o comportamento do(s) ionograma(s) anteriore(s). Nota-se que o parâmetro foF2 em torno de ~9MHz está muito evidente às 2130 UT. Após esse horário, o ionograma das 2330 UT indica que o mesmo parâmetro deve estar oscilando entre 9 e 11 MHz. Nesse ionograma, a segunda reflexão da camada F começa a ser evidente. No ionograma seguinte (0110 UT), nota-se um aparente aumento de foF2 que também é

observado através da segunda reflexão. Esse aumento fica mais aparente às 0120 UT, situação em que foF2 parece atingir um valor de ~11 MHz mesmo na presença de um determinado grau de espalhamento. Após a análise do comportamento dos ionogramas anteriores e posteriores aos ionogramas da dúvida, pode-se, através de uma análise visual, tentar sanar a incerteza que se tem em relação à redução dos ionogramas das 2230 UT, 2300 UT e 2330 UT que, nesse caso, deve ter a frequência crítica da camada apresentando um leve aumento de 9 MHz até 11 MHz.

As sugestões de redução dos ionogramas com *spread-F* apresentadas nesta seção foram seguidas na redução dos ionogramas dos dias de interesse deste estudo. Apesar da redução em situações como a descrita acima apresentar incertezas nos valores obtidos, optou-se por tentar utilizar os dados da digissonda da melhor forma possível, já que essa era a única maneira de se obterem as informações necessárias para avaliar o cálculo da condutividade Pedersen feita pelo modelo SUPIM-INPE a partir do parâmetro foF2.

3.1.2 Deriva vertical obtida através dos ionogramas e do software *DRIFT-EXPLORER*

Uma vez feita a redução dos ionogramas conforme explicado na seção anterior, a deriva vertical do plasma para a região brasileira, em determinados horários, foi obtida efetuando-se a diferença entre duas medidas sucessivas de altura real da camada F (hF) dividida pela diferença entre seus respectivos horários, ou seja, dhF/dt. A deriva calculada aqui foi com base nas informações de altura real da camada para diferentes frequências de sondagem (4, 5 ou 6 MHz).

A deriva vertical obtida a partir da expressão dhF/dt só é válida para situações em que a região F estiver acima de 300 km de altitude (BITTENCOURT; ADBU, 1981), condição essa que geralmente é observada durante as horas do pôr do sol. Abaixo desse limite de altura, a camada F se encontra em uma região dominada pelos processos de recombinação e, assim, a deriva que se

obtém é denominada deriva aparente, uma vez que não representa o movimento real do plasma. Sendo assim, a velocidade real de subida ou descida da região F (V_r) durante o entardecer e a noite será dada por:

$$V_r = dhF / dt - \beta H, \tag{3.6}$$

em que β é o coeficiente de recombinação e *H* é a altura de escala de ionização (SUBBARAO; KRISHNAMURTHY, 1983). Considerando uma atmosfera em que os constituintes O_2 e N_2 são igualmente importantes nos processos de perda da ionização, o coeficiente β pode ser obtido da seguinte maneira:

$$\beta = k_1[N_2] + k_2[O_2] \tag{3.7}$$

em que k_1 é a taxa de reação para:

$$O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N, \tag{3.8}$$

e k_2 a taxa de reação para:

$$O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O. \tag{3.9}$$

A altura de escala da ionização pode ser obtida pela expressão $H = N / \left(\frac{dh}{dN} \right)$, em que N é a densidade eletrônica e h, a altura da camada. A densidade eletrônica N deve ser calculada a partir do valor da frequência escolhida, conforme as Equações (3.4) ou (3.5). Os coeficientes k_1 e k_2 são facilmente encontrados na literatura, como por exemplo, em Anderson e Rush (1980). Os valores das concentrações de O_2 e N_2 e da temperatura neutra (necessária

para o cálculo de k_2) foram obtidos através do modelo atmosférico MSISE-90 (HEDIN, 1991).

De posse dos valores de N_2 e O_2, verificou-se que a variação da concentração desses constituintes com a altura é mais significativa do que com a hora. A Figura 3.8 exemplifica essa situação para um dia magneticamente perturbado $\left(\sum Kp = 33-\right)$. Primeiramente, fixou-se uma determinada altura, nesse caso em 150 km, e obteve-se a concentração de N_2 e O_2 para as 24 horas do dia. Depois, fixou-se uma determinada hora (21 UT) e obteve-se a concentração desses mesmos constituintes para diferentes alturas. Observando esses dois casos, concluiu-se que a variação das concentrações com a altura é muito mais relevante do que a variação com a hora. Com base nessas informações, os valores de O_2 e N_2 utilizados para a correção da deriva neste trabalho foram obtidos a cada hora para uma faixa de altura variando de 100 a 300 km, de 1 em 1 km. Os valores de O_2 e N_2 utilizados no cálculo de βH foram obtidos para a altura mais próxima à altura do dado observado.

Figura 3.8 - Variação das concentrações de O_2 e N_2 de acordo com a altura e com a hora para um dia magneticamente perturbado.

Outra maneira de se obter a deriva do plasma a partir dos dados da digissonda é através do software *Drift-Explorer*. A técnica utilizada para isso é baseada na interferometria Doppler (REINISCH et ., 1998). O sinal transmitido pela digissonda ilumina uma área ionosférica que varia de centenas de quilômetros de diâmetro e, assim, as antenas receptoras observam os múltiplos ecos verticais e oblíquos vindos de diferentes localizações. A onda se reflete quando a sua frequência encontra uma superfície de densidade eletrônica que corresponda à densidade do plasma e se a ionosfera estiver perfeitamente estratificada, o eco será recebido a partir do ponto em que a normal da superfície for paralela à normal da frente da onda incidente. Se a ionosfera apresentar ondulações e irregularidades no seu contorno de densidade, muitos ecos retornarão nas antenas receptoras conforme ilustra a Figura 3.9.

Figura 3.9 - Múltiplos ecos em alta frequência retornados de uma estrutura ionosférica. Cada eco retornado tem uma diferente frequência de deslocamento Doppler se a estrutura se mover com a velocidade V_d..
Fonte: Reinisch et al. (1998).

Os ecos oblíquos ocorrem quando as irregularidades ionosféricas perturbam os contornos de densidade. Os múltiplos ecos se sobrepõem um ao outro à medida que eles chegam ao receptor e permanecem inseparáveis para as análises convencionais das ionossondas. Pela análise espectral de Fourier, os ecos individuais podem ser distinguidos através das diferentes frequências de deslocamento Doppler. Utilizando um arranjo de 4 antenas para a recepção do sinal emitido, a digissonda tem grande capacidade de medir os ângulos de chegada dos ecos ionosféricos. De acordo com Kouba et al. (2008), uma vez que se tem informações sobre a localização das fontes de reflexão, a velocidade de deriva da estrutura ionosférica que atravessa a área sondada pode então ser obtida. Supondo a velocidade de fase do sinal igual à velocidade da luz, a frequência de deslocamento Doppler é dada por:

$$D_i = -2(\vec{k}_i.\vec{v}_i)\, f_o / c, \tag{3.10}$$

em que $\vec{k}_i$ é o vetor unitário na direção da fonte, f_o é a frequência de sondagem e $\vec{v}_i$ é o vetor velocidade na localização da fonte. Numa situação ideal, a velocidade em pelo menos três diferentes fontes linearmente independentes é a mesma. No entanto, os dados obtidos são acompanhados por ruídos e o movimento do plasma não é uniforme para todos pontos da fonte. Nesse caso, o vetor velocidade pode ser obtido fazendo um ajuste de mínimos quadrados nos pontos da fonte, ou seja:

$$\varepsilon^2 = \sum \left[2\left(V_N \cos\phi_i sen\Theta_i + V_E sen\phi_i sen\Theta_i + V_z \cos\Theta_i \right) f_o / c + D_i \right]^2 . \qquad (3.11)$$

Na Equação 3.11, V_N, V_E, V_Z são as componentes do vetor velocidade na direção norte, leste e vertical, respectivamente. Θ_i e ϕ_i são os ângulos zenital e azimutal para o sinal que chega da fonte i.

O software utilizado para calcular a velocidade de deriva é chamado de *Digisonde Drift Analysis (DDA)* e atualmente encontra-se implementado num software de análise interativa denominado por *Drift-Explorer*. A Figura 3.10 mostra um exemplo das diferentes componentes da velocidade de Jicamarca obtida com esse software para o dia 29 de setembro de 2004. Observa-se que o PRE referente à componente vertical da velocidade (V_Z) atinge um valor de ~35 m/s após as 2230 UT. A velocidade zonal mostra um comportamento típico da ionosfera com um movimento para oeste durante o dia e para leste durante a noite.

Figura 3.10 - Componentes do vetor velocidade na direção vertical, norte e zonal da camada F para a região de Jicamarca.
Fonte: Reinish et al. (2005)

As derivas do plasma obtidas pelas digissondas têm sido comparadas às derivas obtidas pelo radar de espalhamento incoerente. Bullett (1994) encontrou boa concordância entre tais derivas obtidas para uma região localizada em médias latitudes durante a noite. Woodman et al. (2006), por sua vez, observaram que somente em alguns horários próximos ao PRE é possível encontrar boa coerência entre os dados para uma região equatorial. Boa concordância entre esses dados também foi verificada por Bertoni et al. (2006) nos horários entre o pôr do sol e às ~22 LT, entre 02 e 03 LT e nas horas anteriores ao nascer do sol (até as 08 LT). Este trabalho de tese mostrará nos seus resultados que uma boa concordância foi encontrada entre os dados de deriva zonal obtidos pela digissonda e aqueles obtidas pelo imageador all-sky referentes à bolha de plasma.

3.2 Radar de espalhamento incoerente (ISR)

Conforme citado por Kirchhoff (1978), os primeiros estudos sobre espalhamento de ondas eletromagnéticas envolveram um caso particular de espalhamento da luz solar pelas moléculas da atmosfera. Posteriormente, Thomson, o descobridor do elétron, demonstrou também que essa partícula,

atuando com um dipolo, é capaz de espalhar energia radiante. A partir do reconhecimento de que o movimento térmico aleatório dos elétrons deveria causar um alargamento Doppler na frequência da onda eletromagnética espalhada, o desenvolvimento de teorias mais completas a respeito desse assunto foram surgindo e avançando, fazendo com que os primeiros radares de espalhamento coerentes fossem se desenvolvendo. Neste trabalho, utlizaram-se os dados do ISR instalado na região equatorial de Jicamarca (11.95° S, 76.87° O).

O princípio de funcionamento do ISR fundamenta-se na detecção da energia espalhada pelo plasma no movimento cinético dos elétrons e íons. Para que essa detecção seja possível, é necessário que tanto a frequência quanto a potência do pulso sejam elevadas, bem como um arranjo de antenas de alto ganho para que o pequeno valor da seção de espalhamento seja compensado. Sincronizando a recepção dos ecos que foram emitidos em diferentes intervalos de tempo, as informações da parte inferior e superior ao pico de densidade eletrônica da região F podem ser obtidas.

Como os ecos incoerentes provêm de um grande número de elétrons em constante estado de agitação térmica, a movimentação dos elétrons produz o efeito Doppler na frequência da onda espalhada e, por isso, os ecos se distribuem em um intervalo de frequências em torno da frequência transmitida (que é sempre maior do que a frequência crítica da região F para atingir alturas superiores - *topside* - da ionosfera). Portanto, o sinal recebido é representado por um espectro de potência. Conhecendo-se os processos envolvidos no espalhamento da radiação incidente, é possível utilizar o espectro de potência para estudar as características do meio. Como o sinal recebido é composto por diversos comprimentos de onda, o espectro de potência obedece a uma função mais complexa, a qual é dependente da densidade, da temperatura dos elétrons e dos íons, do comprimento de Debye do plasma e do comprimento das ondas eletromagnéticas utilizadas na sondagem.

Dentre os parâmetros físicos que a técnica do espalhamento permite medir, estão a densidade, a temperatura, a composição e as medidas de deriva do

plasma ionosférico. Em relação a essa última, elas podem ser obtidas apontando a antena do radar perpendicular ao campo magnético ou usando o feixe quasi simétrico apontando na direção perpendicular a B e perpendicular à direção leste-oeste. O primeiro modo permite a medida da densidade relativa do elétron, enquanto o segundo permite medidas da deriva zonal do plasma. Informações adicionais sobre o funcionamento do ISR podem ser encontradas no site do Radio Observatório de Jicamarca em http://jro.igp.gob.pe.

O radar de espalhamento incoerente de Jicamarca opera em diferentes modos com uma frequência de 49,92 MHz e coleta dados da ionosfera dessa região desde 1961. Dentre os modos que o ISR pode operar, o modo de deriva foi bastante útil para realização desta pesquisa de doutorado, uma vez que este permite que as medidas de velocidade de deriva sejam obtidas com alta precisão, já que é possível apontar o feixe incidente perpendicular ao campo magnético.

Os dados de deriva do ISR de Jicamarca estão disponíveis para download no site http://jro.igp.gob.pe/madrigal/. Nesse endereço eletrônico, o usuário deve, inicialmente, definir o tipo de instrumento e experimento em que deseja obter o dado, bem como outras informações como ano, mês e dia do evento de interesse. Após isso, várias opções lhe são oferecidas como, por exemplo, a visualização de diferentes gráficos das derivas. A altura de interesse em que se deseja visualizar e/ou fazer o download dos dados de deriva também pode ser escolhida. A Figura 3.11 mostra um exemplo dos diferentes tipos de gráficos da deriva zonal e vertical para o dia 12 de dezembro de 2012 obtidos no site.

Figura 3.11 - Deriva vertical e zonal obtida pelo radar de espalhamento incoerente de Jicamarca.
Fonte: http://jro.igp.gob.pe/madrigal/. Acesso 25/11/2014

3.3 Imageador óptico all-sky OI 630 nm

Atualmente, muitos estudos têm sido realizados com os imageadores all-sky a fim de se verificar a existência e comportamento de alguns fenômenos que ocorrem nas altas camadas da atmosfera neutra e ionizada. Nesta pesquisa especificamente, utilizaram-se os dados obtidos por esse equipamento para fazer os cálculos da deriva zonal das bolhas de plasma para a região brasileira de São João do Cariri (7,4ºS; 38,52ºO).

De acordo com os constituintes presentes nos mecanismos de recombinação, a aeroluminencência atmosférica pode ocorrer em diversos comprimentos de onda. Neste trabalho, utilizou-se a emissão da radiação do oxigênio atômico em $\lambda = 630nm$, também conhecida como linha vermelha. Essa emissão tem sido muito utilizada para estudar a propagação das irregularidades ionosféricas, uma vez que sua intensidade está relacionada diretamente com a dinâmica da camada F.

Conforme mencionado por Santana (2005), a emissão do OI630nm é uma importante ferramenta para o entendimento da dinâmica da ionosfera noturna. Isso porque essa emissão é fortemente influenciada pela deriva vertical ionosférica, uma vez que o movimento da ionosfera para cima/baixo faz com que a concentração e a intensidade do O_2^+ diminua/aumente. Como a intensidade da emissão do OI630nm é diretamente proporcional à concentração de elétrons livres e dos íons O_2^+, e como as bolhas de plasma são regiões de densidade eletrônica muito reduzida, isso implica que a emissão do OI630nm na presença dessas bolhas também será reduzida. Assim sendo, as bolhas de plasma podem ser estudadas a partir da medida da intensidade da emissão do oxigênio atômico.

Para que as imagens obtidas pelo imageador sejam utilizadas, é necessário primeiramente que elas passem por um processo de linearização, fazendo com que as unidades de pixel sejam convertidas em quilômetros. A partir desse tratamento e utilizando um código desenvolvido por Santana (2000), as imagens foram processadas e assim a deriva zonal da bolha de plasma foi calculada.

3.4 Magnetômetros

Os magnetômetros são instrumentos que utilizam sensores capazes de medir as três componentes do campo magnético da terra. Neste trabalho, as informações obtidas pelos magnetômetros do tipo fluxgate instalados nas regiões brasileiras de São Luís (MA) e Vassouras (RJ) foram de grande interesse, uma vez que tais informações eram necessárias para calcular a deriva vertical do plasma durante o dia. Esse cálculo foi feito a partir da diferença entre a componente H de uma estação localizada no equador magnético (São Luís) e outra mais afastada (Vassouras).

A ideia de que a diferença da componente horizontal do campo magnético (ΔH) entre duas estações (separadas por ~6 a 9 graus a partir do equador

magnético) representa a intensidade do eletrojato equatorial foi inicialmente proposta por Rastogi e Klobuchar (1990). Posteriormente, Anderson et al. (2002) apresentaram uma estudo quantitativo relacionando a deriva vertical diurna com o ΔH. Em seguida, Anderson et al. (2004) reportaram uma forma mais abrangente para o cálculo da deriva vertical sobre o setor peruano utilizando um grande conjunto de dados de agosto de 2001 a setembro de 2003. Esses dados foram analisados com base em três diferentes técnicas, a saber, regressão linear, regressão múltipla e simulação por redes neurais e os resultados obtidos foram validados pela deriva vertical obtida pelo radar de espalhamento incoerente de Jicamarca.

Adotando a mesma metodologia proposta por Anderson et al. (2002, 2004), a deriva vertical diurna para a região brasileira foi calculada a partir dos dados dos magnetômetros instalados na região de São Luís (2,33° S, 44,6ºE; lat.mag 1,7°S) e Vassouras (22.4° S, 34.6° W; dip latitude 18.5°). A expressão utilizada para o cálculo da deriva foi a seguinte (ANDERSON et al., 2004):

$$\begin{aligned} V = & -1989{,}51 + 1{,}002 \times (ano) - 0{,}00022 \times (dia\ do\ ano) - 0{,}0222 \times (F10.7) - \\ & 0{,}0282 \times (F10.7A) - 0{,}0299 \times (Ap\ diario) + 0{,}0589 \times (Kp) - 0{,}3661 \times (hora\ local) + \\ & + 0{,}1865 \times (\Delta H) + 0{,}0028 \times (\Delta H^2) - 0{,}0000023 \times (\Delta H^3) \end{aligned} \tag{3.12}$$

As variáveis independentes da Equação (3.12) são o ano, o dia do ano, os parâmetros F10.7, F10.7A (valor médio), os índices Ap e Kp, a hora local e o valor de ΔH . A deriva vertical nesse caso é dada em m/s.

3.5 O modelo SUPIM-INPE

O desenvolvimento de modelos matemáticos aplicáveis à ionosfera e à atmosfera tem sido uma importante ferramenta para o entendimento dos processos físicos e químicos dessas regiões. Os primeiros modelos matemáticos surgiram na década de 60 e, desde então, tais modelos vêm se aperfeiçoando devido ao avanço da capacidade computacional e, assim, investigações mais precisas têm sido feitas sobre a natureza variável do sistema ionosfera-termosfera equatorial e de baixas-latitudes. Para este

trabalho em particular, o modelo SUPIM-INPE foi utilizado para quantificar os processos físicos e químicos da ionosfera superior terrestre necessários para o desenvolvimento do estudo proposto desta tese. É importante mencionar que a versão do modelo SUPIM-INPE se difere da versão SUPIM em alguns aspectos, tais como nos cálculos referentes à região E (SANTOS et al., 2005) que não estavam inclusos na versão original.

O modelo SUPIM-INPE permite que o comportamento da região equatorial e de baixas latitudes seja reproduzido de maneira realista. Para isso, as equações da continuidade, do movimento e do balanço de energia são resolvidas ao longo das linhas do campo magnético fechadas e, assim, os valores de concentração, velocidade alinhada ao campo e temperatura dos elétrons e íons podem ser obtidos (BAILEY; BALAN, 1996). O campo magnético é representado neste modelo por um dipolo excêntrico, sendo definido matematicamente pelos oito primeiros termos não nulos da expansão dos harmônicos do potencial escalar geomagnético, com os coeficientes obtidos pelo modelo de campo geomagnético *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF). O modelo do campo magnético pode ser adaptado para um dipolo centrado no eixo de rotação da terra ou dipolo centrado cujo eixo está inclinado, truncando a expansão dos harmônicos esféricos após o primeiro ou terceiro termo diferente de zero, respectivamente.

3.5.1 Equações resolvidas pelo SUPIM-INPE

De acordo com Bailey et al. (1997), os principais processos dinâmicos e fotoquímicos considerados no SUPIM, os quais foram mantidos na versão SUPIM-INPE, incluem a produção iônica devido à radiação solar, a produção e as perdas causadas pelas reações químicas entre íons e os constituintes neutros, as difusões térmica e ambipolar, as colisões íon-íon e íon-neutro, os ventos termosféricos, a deriva do plasma, a condução fotoelétrica, o aquecimento por atrito e o aquecimento e resfriamento local. Desse modo, várias equações são introduzidas no modelo para representar todos esses

processos químicos e físicos citados. Essas equações serão apresentadas a seguir seguindo a mesma descrição feita por Bailey et al. (1996).

- **Equação da continuidade**

A equação da continuidade para o i-ésimo íon é dada por:

$$\frac{dN_i}{dt} = P_i - L_i - \nabla.(N_i v_i), \tag{3.13}$$

em que N_i é a concentração dos íons, *t* é o tempo, v_i é velocidade dos íons, P_i é taxa de produção de íons, e L_i é taxa de perda dos íons. Considerando as variações ao longo das linhas de campo, a Equação (3.13) pode ser reescrita como:

$$\frac{dNi}{dt} + \frac{1}{A}\frac{\partial(AN_i v_i^{//})}{\partial s} = P_i - \beta_i N_i - N_i \nabla \cdot (v_{em}), \tag{3.14}$$

em que A é a área da seção transversal do tubo de plasma, $v_i^{//}$ é a velocidade dos íons alinhada ao campo, s é a distância ao longo da linha de campo magnético, β_i é o coeficiente da taxa de perda iônica e v_{em} é a velocidade de deriva.

- **Equação do movimento**

A equação do movimento para o i-ésimo íon é resolvida separadamente para os íons atômicos e moleculares. A equação para os íons O^+, H^+ e He^+ inclui os termos da difusão térmica conforme a equação abaixo:

$$
\begin{aligned}
0 = & -gsenI - \frac{kT_i}{m_i N_i}\frac{\partial N_i}{\partial s} - \frac{kT_e}{m_i N_e}\frac{\partial N_e}{\partial s} - \frac{k}{m_i}\frac{\partial(T_e + T_i)}{\partial s} \\
& + \frac{k}{m_i}\left[-\beta_i \frac{\partial T_i}{\partial s} + \beta_{ij}^* \frac{\partial T_j}{\partial s} + \beta_{ik}^* \frac{\partial T_k}{\partial s}\right] \\
& - \left[\nu_{ij}(1-\Delta_{ij}) - R_{ijk} + R_{ikj}\right](v_i^{//} - v_j^{//}) \\
& - \left[\nu_{ik}(1-\Delta_{ik}) - R_{ikj} + R_{ijk}\right](v_i^{//} - v_k^{//}) \\
& - \sum_m \nu_{im}(v_i^{//} - v_m^{//}) - \sum_n \nu_{in}(v_i^{//} - u_\theta \cos D \cos I + u_\phi senD \cos I),
\end{aligned}
\tag{3.14}
$$

em que:

g é a aceleração da gravidade;

k é a constante de Boltzmann;

m_i é a massa do íon;

T_i é a temperatura do íon;

T_e é a temperatura dos elétrons;

N_e é a concentração eletrônica;

ν_{im} é a frequência de colisão para transferência de momento entre o i-ésimo íon e o m-ésimo íon molecular;

ν_{in} é a frequência de colisão para transferência de momento entre o i-ésimo íon e o n-ésimo gás neutro;

u_θ é a componente meridional do vento neutro (positiva na direção de norte para sul) no sistema de coordenadas geográficas;

u_ϕ é a componente zonal do vento neutro (positiva na direção de oeste para leste) no sistema de coordenadas geográficas;

$v_i^{//}$ é a velocidade do i-ésimo íon alinhada ao campo;

D é o ângulo de declinação magnética (positivo para leste);

I é o ângulo de inclinação magnética;

β_i , $\beta_{ij}^*, \beta_{ik}^*$ são os coeficientes de difusão térmica;

$\Delta_{ij}, \Delta_{ik}, R_{ijk}, R_{ikj}$ são os fatores de correção para o coeficiente de difusão do i-ésimo íon. Os valores desses coeficientes podem ser encontrados em Quegan et al. (1981).

O somatório $\sum_m$ é realizado sobre todos os íons e o somatório $\sum_n$ é realizado sobre todos os gases neutros. Quando $i = O^+$, então $j = H^+$ e $k = He^+$; quando $i = H^+$, então $j = O^+$ e $k = He^+$, e finalmente quando $i = He^+$, então $j = H^+$ e $k = O^+$.

A equação do movimento para os íons moleculares (NO^+, O_2^+ e N_2^+) é dada por:

$$\begin{aligned} 0 = & -gsenI - \frac{kT_i}{m_i N_i}\frac{\partial N_i}{\partial s} - \frac{kT_e}{m_i N_e}\frac{\partial N_e}{\partial s} - \frac{k}{m_i}\frac{\partial(T_e + T_i)}{\partial s} \\ & - \sum_{j \neq i} \nu_{ij}\left(v_i^{//} - v_j^{//}\right) - \sum_n \nu_{in}(v_i^{//} - u_\theta \cos D \cos I + u_\phi senD \cos I), \end{aligned} \tag{3.15}$$

em que o somatório $\sum_{j \neq i}$ é calculado sobre todos os íons com exceção do i-ésimo.

Para os elétrons, supõe-se que a neutralidade de carga é preservada, ou seja:

$$N_e = \sum_i N_i, \tag{3.17}$$

e que não há correntes alinhadas ao campo, isto é:

$$N_e v_e = \sum_i N_i v_i^{//}. \tag{3.18}$$

Na Equação (3.18), v_e refere-se à velocidade dos elétrons alinhados ao campo e $\sum_i$ denota o somatório para todos os íons.

- **Equação do balanço de energia**

A equação da conservação da energia resolvida pelo SUPIM-INPE para os íons e elétrons é dada por:

$$\frac{3}{2} k N_i \left(\frac{\partial T_i}{\partial t} + v_i^{//} \frac{\partial T_i}{\partial s} \right) = Q_i - k N_i T_i \left(\frac{1}{A} \frac{\partial A v_i^{//}}{\partial s} \nabla . \vec{v}_{em} \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial s} \left(A \kappa_i \frac{\partial T_i}{\partial s} \right) + F_{in}, \tag{3.19}$$

em que o índice i se refere aos íons e elétrons, Q_i é a taxa de aquecimento colisional, κ_i é a condutividade térmica. F_{in} é taxa de aquecimento por atrito decorrente do movimento relativo entre o i-ésimo íon e os constituintes neutros e pode ser calculada com a seguinte expressão:

$$F_{in} = \sum_n \frac{m_i m_n}{m_i + m_n} v_{in} N_i \begin{bmatrix} \left(v_i^{//} - u_\theta \cos D \cos I + u_\phi sen D \cos I \right)^2 + \\ \left(v^\perp - u_\theta sen D sen I + u_\phi \cos D sen I \right)^2 + \left(v^\phi \right)^2 \end{bmatrix}. \tag{3.20}$$

Na Equação (3.20), m_n é a massa do n-ésimo constituinte neutro e o somatório é feito para todos os constituintes neutros. O termo de aquecimento referente ao movimento relativo entre íons e os neutros foi negligenciado, uma vez que seu valor é desprezível quando comparado aos outros termos da equação. A equação da conservação de energia para os íons moleculares não está incluída no modelo e as suas temperaturas são consideradas iguais à do íon O^+.

3.5.2 Solução das equações do modelo

As equações do modelo SUPIM-INPE são resolvidas numericamente para cada íon, considerando que o movimento do plasma ionosférico segue uma difusão ambipolar na direção paralela às linhas do campo magnético, e com uma deriva adicional $\vec{E}x\vec{B}$ perpendicular a estas linhas. Tais equações foram formuladas para uma linha de um campo magnético dipolar em termos das coordenadas L, s e t, em que s é a distância ao longo da linha de campo magnético, t o tempo e $L = R_{eq} / a$, sendo R_{eq} a distância radial equatorial da linha do campo geomagnético e a o raio da terra. Contudo, essas coordenadas não são ortogonais e trabalhar com elas quando $\vec{v}_{em}$ e $\vec{E}x\vec{B}$ são diferentes de zero introduz complicações matemáticas desnecessárias. Sendo assim, para facilitar os cálculos, é necessário que as coordenadas (L, s, t) sejam transformadas para as coordenadas (p, q, t), conforme Kendal (1962), em que *p* e *q* são dados por:

$$p = \frac{R}{asen^2\Theta}, \tag{3.21}$$

e

$$q = \frac{a^2 \cos\Theta}{R^2}. \tag{3.22}$$

Nas Equações (3.21) e (3.22), as coordenadas R e Θ são a distância radial a partir do centro da terra e a colatitude, respectivamente. Duas importantes propriedades dessa transformação são: 1) a coordenada p é constante ao longo da linha do campo magnético dipolar $(p = L)$ e, 2) para uma longitude fixa, a constante q é ortogonal às linhas de campo. Além disso, para uma linha de campo magnético dipolar, tem-se que (BAILEY; SELLEK, 1990):

$$R = R_{eq} sen^2\Theta, \tag{3.23}$$

e

$$\frac{\partial}{\partial s} = -\frac{\left(1+3\cos^2\Theta\right)^{0,5}}{a}\left(\frac{a}{R}\right)^3 \frac{\partial}{\partial q} = \eta \frac{\partial}{\partial q}. \tag{3.24}$$

Aplicando essa transformação de coordenadas às equações da continuidade, movimento e balanço de energia e utilizando o método de diferenças finitas, as equações do modelo SUPIM-INPE são numericamente resolvidas. Maiores informações sobre a solução das equações aplicadas ao SUPIM-INPE podem ser encontradas Bailey e Balan (1996) e Souza (1997).

3.5.3 Parâmetros de entrada e saída do modelo

Os principais parâmetros de entrada utilizados pelo modelo SUPIM-INPE são o fluxo solar, as informações sobre a atmosfera neutra, os ventos neutros e a velocidade de deriva eletromagnética. Além disso, algumas informações adicionais devem ser dadas, tais como o dia, o ano, o índice Ap, a latitude e a longitude geográfica.

Os dados referentes ao fluxo solar usados na versão do SUPIM-INPE para esse estudo foram obtidos pelo modelo SOLAR 2000 (TOBISKA et al., 2000). Esse modelo apresenta boa representação para a fotoionização da região E e da região F, caracterizando assim com precisão a variabilidade da radiação solar em todo o espectro ionizante.

Para representar a atmosfera neutra, utilizou-se o modelo NRLMSISE-00 (PICONE et al. 2002) para que as concentrações dos gases neutros O, H, He, O_2, N_2, e a temperatura (T_n) pudessem ser obtidas. A concentração do óxido nítrico (NO) é calculado separadamente de acordo com (MITRA, 1968):

$$n(NO) = 0,4\exp\left(\frac{-3700}{Tn}\right)n(O_2) + 5.10^{-7}\,n(O). \tag{3.25}$$

A velocidade do vento neutro, também utilizada como entrada do modelo SUPIM-INPE, é obtida pelo modelo de vento termosférico HWM93 (HEDIN et al., 1996). Esse modelo baseia-se em observações feitas por satélites e radares e fornece as componentes meridional e zonal do vento neutro em função da hora local, da altitude, da latitude, da longitude e da atividade solar.

Por fim, outro parâmetro de entrada de grande importância no modelo SUPIM-INPE é a deriva vertical ionosférica. Neste estudo, os eventos foram simulados com base nas derivas diurnas e noturnas obtidas pelo radar de espalhamento incoerente de Jicamarca, na deriva diurna obtida pelos dados de magnetômetro, bem como na deriva noturna obtida pela digissonda. Na falta de dados obtidos por estes diferentes equipamentos em determinados horários, a deriva vertical utilizada foi a obtida pelo modelo empírico proposto por Sherliess e Fejer (1999).

Uma vez que o modelo esteja preparado para simular os parâmetros ionosféricos de um determinado dia, várias saídas podem ser obtidas e escolhidas pelo usuário, tais como as concentrações e temperaturas dos elétrons e íons em função do tempo, a latitude e a altitude; as densidades das regiões E e F, a altura do pico da região F e as condutividades Pedersen e Hall das regiões E e F integradas ao longo das linhas de campo. Esta última saída citada foi um dos parâmetros chaves para a execução deste trabalho de tese.

3.5.4 Procedimentos utilizados na execução do modelo SUPIM-INPE

Nesta seção, apresentam-se as alterações que foram introduzidas no código do modelo SUPIM-INPE a fim de se obter os resultados de interesse deste estudo. Uma delas foi a inclusão das equações referentes à ionização produzida pela precipitação de partículas energéticas. Essa tarefa foi inicialmente feita pelo Dr. Jonas Rodrigues de Souza e o primeiro resultado sobre esse assunto foi publicado no trabalho de Abdu et al. (2013).

Nas versões do modelo SUPIM-INPE anteriores à utilizada neste trabalho, a ionização era computada baseando-se somente na fotoionização dos gases

neutros pela radiação solar na faixa EUV e pelas reações químicas com os gases neutros. A taxa de produção P_i do i-ésimo íon por fotoionização do i-ésimo gás neutro era calculada pelo modelo de acordo com a seguinte expressão:

$$P_i = \sum_{\lambda} \phi(\lambda)\sigma_i(\lambda) n_i \exp\left(-\sum_j \sigma_j(\lambda) n_j H_j Ch_j(\chi)\right), \tag{3.26}$$

em que:

$\phi(\lambda)$ é a intensidade do fluxo de radiação solar no EUV;

$\sigma_i(\lambda)$ é a seção transversal de fotoionização do i-ésimo gás neutro;

n_i é a concentração do i-ésimo gás neutro;

$\sigma_j(\lambda)$ é a seção transversal de fotoabsorção do j-ésimo gás neutro;

n_j é a concentração do j-ésimo gás neutro;

H_j é a altura de escala do é j-ésimo gás neutro;

$Ch_j(\chi)$ é a função de Chapman do j-ésimo gás neutro.

O somatório $\sum_{\lambda}$ refere-se a faixa de comprimento de onda da radiação ionizante e o somatório $\sum_j$ é feito sobre os gases neutros O, O_2, e N_2 que absorvem a radiação EUV. As seções transversais de fotoionização e fotoabsorção são dadas por Torr e Torr (1982).

Para que os parâmetros responsáveis pelas variações na deriva zonal fossem simulados pelo SUPIM-INPE, havia a necessidade de se incluir uma ionização extra na região E. Como durante eventos de tempestade magnética a precipitação de partículas pode ser intensificada e afetar fortemente a ionosfera (GALANDI, 2001; ABDU et al. 1973; 1981; 2005; BATISTA; ABDU 1977; GALANDI; RICHMOND, 2001, entre outros), atribuiu-se que tal ionização

poderia estar relacionada à precipitação de partículas energéticas. Desse modo, a Equação (3.26) ganhou um termo adicional, o qual foi denominado neste trabalho por $Q(z)$. A metodologia utilizada para a inclusão deste termo no modelo SUPIM-INPE, bem como as outras alterações necessárias para atingir o objetivo desta tese serão apresentadas a seguir.

3.5.4.1 Inclusão da precipitação de partículas no cálculo da densidade eletrônica

As partículas energéticas que precipitam na atmosfera podem vir de diferentes fontes, seja diretamente do sol, da aurora e dos cinturões de radiação durante tempestades e sub-tempestades magnéticas ou ainda de raios cósmicos. Essas partículas têm diferentes espectros de energia e interagem diferentemente com o campo magnético da terra, afetando assim diferentes altitudes e regiões geográficas, bem como a eletrodinâmica da ionosfera terrestre (SHINNHUBER et al.; 2012). Neste trabalho de doutorado, uma fonte adicional de ionização na região E foi inicialmente sugerida para explicar a anticorrelação entre as derivas vertical e zonal noturna durante eventos de penetração de campos elétricos. Como os eventos aqui estudados foram observados numa região que pode ser afetada fortemente pela precipitação de partículas energéticas devido à presença da Anomalia Magnética Brasileira (ou do Atlântico Sul), decidiu-se que seria coerente incluir uma ionização adicional no modelo SUPIM-INPE com o intuito de verificar se, de fato, essa ionização extra, a qual geraria um aumento de condutividade na região E, seria suficiente para explicar os fenômenos observados.

A metodologia utilizada para o cálculo de um perfil vertical de ionização devido à precipitação de elétrons energéticos foi a mesma proposta por Rees (1989). Primeiramente, uma função de dissipação de energia teve que ser definida. Considerou-se uma função de dissipação normalizada para um feixe de elétrons incidentes, com uma distribuição angular isotrópica para ângulos de arremesso variando entre 0 ° e 80°, conforme mostrado na Figura 3.12.

Figura 3.12 - Função de distribuição normalizada da dissipação de energia
Fonte: adaptada de Rees (1989)

Na Figura 3.12, $\Lambda(s/R)$ é a função de dissipação de energia normalizada relativa ao parâmetro *s/R,* em que *s e R* são definidos como as profundidades de espalhamento atmosférico (gm cm^{-2}) na altitude de interesse e no alcance máximo dos elétrons incidentes. A variável *s* é dada por:

$$s = \int_{z}^{\infty} \rho(z) dz, \tag{3.27}$$

em que $\rho(z)$ é a densidade de massa e *z* é a altura. Para o intervalo de energia de 200 eV< E< 50 keV, a profundidade máxima de espalhamento *R* pode ser relacionada com a energia inicial do elétron (*E*) de acordo com a seguinte relação:

$$R(E) = 4{,}3x10^{-7} + 5{,}36x10^{-6} E^{1.67}. \tag{3.28}$$

De posse dessas definições, pode-se agora definir taxa de ionização por unidade de volume *Q(z)*, por fluxo unitário de elétrons incidentes *(F)* (REES, 1989):

$$Q(z) = FE_p \Lambda(s/R) \frac{\rho(z)}{\Delta\varepsilon_{ion} R(E_p)}. \tag{3.29}$$

Na Equação (3.29), *F* é definido como o fluxo de elétrons precipitantes ($cm^{-2}s^{-1}$), $E_p(eV)$ é a energia do elétron monoenergético e $\Delta\varepsilon_{ion}$ é a energia média perdida por par de íons formado. Para uma atmosfera superior composta basicamente por N_2, O_2 e O, $\Delta\varepsilon_{ion}$ tem aproximadamente o mesmo valor para os constituintes majoritários, sendo 37 eV para o N_2 e 33 eV para o O_2. Neste trabalho adotou-se um valor intermediário de $\Delta\varepsilon_{ion}$ igual a 35 eV.

Para que a ionização produzida pela precipitação de partículas fosse incluída no código do modelo SUPIM-INPE, a equação 3.27 precisava ser resolvida. A densidade $\rho(z)$ foi obtida do modelo NRLMSISE-2000. Como o SUPIM-INPE faz os cálculos ao longo das linhas do campo magnético, para cada ponto sobre a linha de campo foi aplicada uma integração numérica, sendo que o limite inferior dessa integração foi definido como o próprio ponto sobre a linha, ao passo que o limite superior foi fixado em 1000 km. O intervalo de altura adotado foi de 5 km. A Figura 3.13 ilustra este procedimento acima descrito.

Figura 3.13- Representação esquemática da integral de *s* resolvida na vertical para os diferentes pontos ao longo da linha de campo magnético. O cálculo de *s* foi realizado para o hemisfério norte e para o hemisfério sul.

A precipitação de partículas foi incluída entre 80 e 120 km de altura, e para altitudes superiores a essa (entre 120 e 150 km), utilizou-se uma interpolação

linear para que a ionização decaísse para os valores sem os efeitos da precipitação.

Depois de efetuado o cálculo da integral de *s*, o próximo passo foi computar a taxa de ionização pela precipitação de partículas *Q(z)*. Nesta etapa, foi necessário decidir qual a faixa de energia deveria ser utilizada e, qual deveria ser o espectro do fluxo de elétrons precipitantes (*F*) a ser incluído nos cálculos para que os resultados encontrados fossem compatíveis com os observados. Para tanto, tomou-se como referência inicial a faixa de energia adotada por Abdu et al. (2013), e com base na distribuição espectral do fluxo de elétrons obtido pelo satélite *Discoverer 29* (MANN et al.,1963), definiu-se o fluxo de elétrons a ser utilizado nos cálculos. As medidas coletadas por esse satélite foram feitas sobre a região da AMAS, em ~ 500 km de altura. Mais especificamente, os seguintes procedimentos foram realizados para que a taxa de produção por elétrons precipitantes pudesse ser calculada:

- Primeiramente, fixou-se um valor de fluxo de elétrons com base na mesma variação da energia utilizada por Abdu et al. (2013), ou seja, entre 7 e 28 keV e iniciou-se os primeiros testes. Na tentativa de verificar o quão diferente seriam os resultados encontrados se outra faixa de energia fosse utilizada, verificou-se que a energia que melhor atendia os objetivos propostos se concentrava basicamente entre ~ 2 e 32 keV. Essa faixa de energia foi então fixada e utilizada para todos os eventos de tempestades magnéticas a serem estudados.

- Com a faixa de energia definida, os testes seguintes se concentraram basicamente na escolha ideal dos valores de fluxo a serem levados em consideração nos cálculos. Para isso, o modelo SUPIM-INPE foi rodado várias vezes para um mesmo evento até que os resultados finais fossem compatíveis com os dados observados. Um comentário oportuno neste momento é que existem poucas informações sobre o fluxo de elétrons precipitantes necessário para produzir uma ionização nas alturas da região E. A maioria dos satélites fornece essa informação de fluxo para determinadas faixas de energia definidas como “> 30 keV” ou “>100

keV”, por exemplo. Não foi encontrado nenhum satélite que passasse sobre a região da anomalia e que fornecesse os dados para a faixa de energia que foi definida como ideal. Por este motivo, utilizou-se inicialmente os dados publicados por Mann et al., (1963), e a partir da necessidade de cada evento, ajustou-se os valores de fluxo de modo a encontrar resultados satisfatórios.

- Sabendo qual o fluxo de energia ideal para um determinado caso, e conhecendo qual a faixa de energia deveria ser utilizada nos cálculos, efetuou-se para cada ponto sobre a linha de campo magnético uma integração para que a taxa de produção total por precipitação de partículas (Q_T) para todos os níveis de energia utilizados pudesse ser computada, ou seja:

$$Q_T = \int_{E1}^{E2} Q(z,E)dE, \tag{3.31}$$

Uma vez obtido o valor de Q_T, este resultado foi então somado à ionização produzida pela radiação solar e pelas reações químicas, para que a taxa de produção total pudesse ser contabilizada.

Para fins ilustrativos, a Figura 3.14 mostra a taxa de produção gerada pela precipitação de partículas para diferentes valores de energia inicial (E_p). Neste caso, o fluxo de elétrons utilizado foi de 10^8 elétrons $cm^{-2}s^{-1}$.

Figura 3.14 - Taxa de ionização produzida pela precipitação de partículas para um fluxo de 10^8 elétrons por $cm^{-2}s^{-1}$ sob diferentes condições de energia inicial (Ep).

Observa-se que quanto maior a energia inicial do elétron (E_p), maior é a taxa de ionização produzida pela precipitação de partículas. Além disso, uma característica importante a ser notada é que elétrons com maiores energias penetram mais profundamente na atmosfera neutra e, assim, alcançam altitudes bem menores de precipitação.

3.5.4.2 Inclusão dos valores de U_Z^H

O parâmetro U_Z^H representa a média ponderada da componente do vento perpendicular a B no plano meridional, cujo peso é a condutividade Hall. Como o cálculo é efetuado ao longo das linhas de campo, para cada linha tem-se um valor de U_Z^H. Embora a contribuição deste termo seja pequena e desprezada por alguns autores, como, por exemplo, em Haerendel et al. (1992), decidiu-se introduzi-lo no cálculo da deriva zonal já que ele é dependente da

condutividade Hall, um importante parâmetro que se modifica quando a precipitação de partículas é incluída no modelo.

3.5.4.3 Alteração no sistema de ventos

Um parâmetro essencial utilizado como entrada no modelo SUPIM-INPE foi a deriva vertical ionosférica. Após rodar o modelo com uma deriva confiável obtida pelo radar de Jicamarca, ou pelo magnetômetro ou ainda pela digissonda (dhF/dt e *Drift–Explorer*), conferia-se como se comportavam os parâmetros foF2 e hmF2 obtidos pelo modelo SUPIM-INPE em relação aos dados observacionais. Em um dos eventos estudados para a região brasileira, o resultado desta comparação não foi bom. Assim sendo, corrigiu-se essa diferença fazendo-se alterações na componente meridional magnética do vento, já que a deriva vertical utilizada foi considerada a verdadeira. Neste caso, foi necessário que o vento fosse modificado em determinados horários, de tal modo que uma parcela foi somada e/ou subtraída ao vento original a fim de encontrar resultados satisfatórios.

Além disso, para outros três eventos estudados, sendo um deles para a região peruana e outros dois para a região brasileira, tornou-se necessário uma modificação na componente zonal do vento. Para o evento da região peruana, a correção foi necessária porque houve a inversão no sentido do vento de oeste para leste mais cedo do que previsto pelo modelo de vento utilizado (HWM93). A modificação foi similar ao explicado anteriormente, ou seja, a alteração dos ventos foi realizada para uma faixa de horário específico, somando uma determinada parcela ao vento original. Para os eventos estudados para o Brasil, os resultados de deriva zonal calculada indicavam valores superior à deriva zonal observada. Após realizar algumas pesquisas que justificassem a alteração do vento zonal neste caso, o procedimento de correção utilizado foi multiplicar o vento original por um determinado fator. Em um dos eventos especificamente, além de multiplicar por tal fator, foi necessário também subtrair uma determinada parcela do vento zonal original.

Mais detalhes sobre as modificações dos ventos serão dados no capítulo referente aos resultados desta tese.

3.5.4.4 Alteração do fluxo solar ionizante

Em um dos eventos estudados, observou-se uma discordância acentuada entre os valores de foF2 observados e os modelados logo após o amanhece. Como nesses horários a deriva vertical tem pouca influência no controle deste parâmetro (devido ao seu baixo valor), e como neste evento não foi detectada nenhuma atividade auroral anterior capaz de gerar modificações nos ventos, levantou-se a hipótese de que o motivo pelo qual os valores de foF2 obtidos com o modelo SUPIM-INPE foram inferiores aos dados observados, poderia ser decorrente de um possível erro no modelo de fluxo de irradiância solar utilizado (SOLAR2000, versão 2.31). A primeira medida para corrigir tal erro foi utilizar uma versão mais atualizada do SOLAR2000. Ao comparar os resultados obtidos entre a versão mais antiga e a versão mais atualizada do modelo, observaram-se diferenças significativas nos valores do fluxo de fótons. Ao rodar o modelo com os valores do fluxo solar obtidos pela versão mais recente do SOLAR2000, observou-se que os valores de foF2 obtidos pelo modelo foram superiores aos valores de foF2 observados. Como o evento em questão se referia a uma época (ano de 2008) em que o fluxo solar atingiu valores inferiores ao esperado, concluiu-se que tanto a primeira versão do SOLAR2000 quanto a segunda não estavam representando bem esta época. Diante disso, tornou-se necessário ajustar valores do fluxo solar até que fosse encontrado um resultado mais coerente entre foF2 modelado e foF2 observado. Mais detalhes sobre este evento serão dados no capítulo seguinte.

4 ANÁLISE DA DERIVA ZONAL DO PLASMA SOBRE A REGIÃO PERUANA DURANTE TEMPESTADES MAGNÉTICAS: OBSERVAÇÕES E SIMULAÇÕES

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados referentes às variações observadas na deriva zonal do plasma sobre Jicamarca. Dois eventos de tempestades magnéticas foram escolhidos para esse estudo e, com base nas simulações feitas com o modelo SUPIM-INPE, investigou-se a necessidade de um aumento na razão $\sum_H/\sum_P$ para que os efeitos observados na deriva zonal do plasma da região F fossem explicados.

O aumento da razão $\sum_H/\sum_P$ está basicamente associado a um correspondente aumento na condutividade Hall integrada e/ou a uma correspondente diminuição na condutividade Pedersen integrada. Sabe-se que a maior contribuição de $\sum_H$ ocorre nas alturas da região E. Sendo assim, pode-se dizer que um aumento nesse parâmetro pode ser decorrente, por exemplo, de um aumento na ionização dessa região devido à precipitação de partículas, o qual pode ser verificado através da formação de uma camada Es, ou através do encurvamento da frequência inicial do traço da camada F, ou ainda através da formação de uma camada E noturna. A formação da camada E-esporádica, que será a forma mais discutida da ionização extra nos diversos casos a serem aqui estudados, pode ocorrer por diferentes mecanismos, tais como através da convergência dos íons pelo cisalhamento de ventos ou até mesmo por um campo elétrico vertical Hall, induzido pelo campo elétrico zonal de penetração. Com relação à condutividade integrada Pedersen, é importante mencionar que, durante tempestades magnéticas, esse parâmetro pode sofrer um importante decréscimo devido à subida brusca da camada F regida pela penetração de campo elétrico zonal e, assim, contribuir para o aumento da razão $\sum_H/\sum_P$.

Sabendo dos motivos pelos quais $\sum_H/\sum_P$ pode aumentar, alguns cuidados tiveram que ser tomados, tais como verificar a coerência dos valores de foF2 obtidos pelo modelo SUPIM-INPE, já que a densidade do plasma da região F é quem mais contribui para o cálculo de $\sum_P$. Uma vez certificado de que o cálculo de $\sum_P$ está sendo feito corretamente, no entanto se mesmo assim as variações

na deriva zonal calculada não forem similares às variações da deriva zonal observada, então um aumento de $\sum_H$ nas alturas da região E, gerado pela precipitação de partículas energéticas, foi avaliado. Essa consideração é razoável, uma vez que durante tempestades magnéticas há um considerável aumento de precipitação de partículas na região da AMAS.

4.1 Critérios utilizados para a seleção dos eventos de tempestades magnéticas

Conforme já discutido no Capítulo 2, a entrada de energia nas regiões aurorais durante distúrbios magnéticos provoca o aquecimento Joule dessa região. Esse aquecimento gera ventos perturbados que alcançam a região equatorial em apenas 2 a 3 horas (podendo perdurar durante vários dias) e mudam a eletrodinâmica da ionosfera dessa região. Na tentativa de excluir os efeitos dos ventos perturbados na caracterização das derivas, para que somente os efeitos da penetração de campos elétricos fossem levados em consideração, optou-se por escolher eventos (sempre que possível) em que as variações na deriva zonal e vertical ocorressem no início de uma tempestade magnética. Nesse sentido, duas tempestades foram escolhidas, as que ocorreram em 24 de junho de 2008 e 10 de abril de 1997.

4.2 Tempestade magnética de 24 de junho de 2008

No dia 24 de Junho de 2008, os dados de deriva zonal e vertical obtidos pelo radar de espalhamento incoerente de Jicamarca apresentaram significativas flutuações anticorrelacionadas entre si, as quais foram possivelmente geradas pelos distúrbios magnéticos iniciados neste mesmo dia. Antes de mostrar essas flutuações, torna-se necessário apresentar o comportamento dos diferentes índices interplanetários (Bz, Ey) e geomagnéticos (SYM-H, ASY-D, AE, AL) para os dias anteriores ao dia 24 com o intuito de verificar o que foi descrito no início deste capítulo sobre a possível influência dos ventos perturbados.

Na Figura 4.1, observa-se uma pequena atividade auroral no dia 21 de junho, a qual atingiu um valor máximo de ~500 nT às ~11 UT. Em relação ao comportamento do campo elétrico (E_y) e magnético interplanetário (B_z), apenas pequenas oscilações podem ser vistas neste mesmo horário. Após esse dia, nota-se um comportamento típico de dias calmos, com os índices em questão apresentando pequenas oscilações em torno do zero. Essa situação se modifica no final do dia 24 de junho, quando os índices AE, Bz e SYM-H atingiram um valor de ~800 nT, -6 nT e -30 nT, respectivamente. Mesmo essa tempestade sendo classificada como fraca (GONZALEZ et al., 1994), a ionosfera de Jicamarca sofreu interessantes impactos no que diz respeito ao comportamento das derivas zonal e vertical.

Figura 4.1 - Comportamento dos índices SYM-H/ASY-D, Bz, Ey, AE/AL durante os dias 21 a 25 de junho de 2008. A área hachurada indica o período em que será realizada a análise das derivas zonal e vertical.

A Figura 4.2 apresenta o comportamento dos índices SYM-H, Bz, AE e das derivas vertical (Vz, positiva/negativa para cima/baixo) e zonal (Vy,

positiva/negativa para leste/oeste) durante o dia 24 de junho de 2008. As derivas representativas de dias calmos são representadas pela curva cinza nos painéis d e e, e foram obtidas pelos modelos de Sherliess e Fejer (1999) (Vz) e Fejer et al. (2005) (Vy). Observa-se que Bz se inverte fracamente para sul às 13 UT/08 LT enquanto a atividade auroral apresenta um leve aumento aproximadamente uma hora depois. Em relação ao comportamento das derivas, nota-se no painel d que, durante o dia, Vz (curva preta) comporta-se de maneira semelhante a um dia calmo, ao passo que Vy (painel e) apresenta o mesmo comportamento somente até às 18 UT/13 LT. A partir desse horário, uma grande discrepância entre o dado observado e a deriva obtida pelo modelo de Fejer et al. (2005) pode ser vista, principalmente no que diz respeito à hora de inversão da deriva de oeste para leste, que neste caso apresentou uma defasagem de ~2 horas conforme indicado pelas setas em vermelho. Esse comportamento da deriva zonal traz uma forte evidência de que o modelo de Fejer et al. (2005) não leva em consideração a variabilidade diária do vento zonal que é o principal causador da deriva zonal do plasma durante o dia, e sim apenas um comportamento médio. É interessante notar que este comportamento da deriva zonal ocorreu mesmo na ausência de qualquer atividade auroral. As possíveis causas dessa alteração serão discutidas no decorrer deste capítulo.

A Figura 4.2 também mostra que, às 1305 UT/0805 LT, Bz se inverteu para sul e permaneceu nesse mesmo sentido até ~1830 UT/1330 LT. Após esse horário, Bz se inverteu para norte e nos instantes seguintes, uma série de flutuações nesse índice pode ser verificada. Verifica-se também que, tanto a atividade auroral quanto o índice Dst (representado pelo SYM-H), apresentaram poucas variações e praticamente não causaram nenhum efeito nas derivas ionosféricas sobre Jicamarca nas primeiras horas desse intervalo. Os efeitos marcantes no equador tiveram início às 2230 UT/1730 LT com uma rápida inversão do Bz para sul, a qual foi seguida por um aumento da atividade auroral. Após esse horário, Bz apresentou um decréscimo lento e a atividade auroral se intensificou e atingiu um valor máximo de ~800 nT às 0130 UT/ 2030 LT.

Figura 4.2 - Efeitos da tempestade magnética de junho de 2008 nas derivas vertical (Vz) e zonal (Vy) medidas pelo radar de Jicamarca. De cima para baixo, apresenta-se o comportamento dos índices SYM-H, Bz, AE (painéis a, b e c). A curva em cinza nos painéis d e e se referem às derivas para um dia calmo e foram obtidas pelo modelo de Sherliess e Fejer (1999) (Vz) e Fejer et al (2005) (Vy), respectivamente. A área hachurada destaca as variações anticorrelacionadas entre Vz e Vy. As setas em vermelho indicam os horários de inversão de Vy para leste de acordo com os dados observados e o modelo de Fejer et al. (2005). A linha pontilhada vertical indica o horário em que ocorreu o pôr do sol (~1753 LT).

Ainda na Figura 4.2, observa-se que a deriva vertical no painel d, a qual vinha apresentando um comportamento típico de dias calmos, apresenta um súbito aumento às 2330 UT/1830 LT e atingiu um valor de ~30 m/s às 00 UT/19 LT. Essa intensificação de Vz, que ocorreu nos horários de queda brusca da condutividade da região E minutos após o pôr do sol (1753 LT), parece ser o resultado de uma penetração de um campo elétrico zonal para leste (*undershielding*) gerado pela convecção polar associada à atividade auroral que se iniciou nessas horas. Logo após esse aumento de Vz, observa-se que a atividade auroral apresenta uma tendência de recuperação (a partir das 19 LT) que coincide com um decréscimo na deriva vertical, o qual parece ser decorrente da penetração de um campo elétrico para oeste associado à condição *overshielding.* A deriva vertical para os dias calmos (curva cinza) mostra claramente a ausência do PRE para esta época do ano (solstício de junho) e seu valor no mesmo horário foi de apenas ~ -10 m/s.

Em relação ao índice SYM-H (painel a da Figura 4.2), nota-se que esse evento pode ser classificado como uma tempestade magnética de fraca intensidade, na qual os efeitos na ionosfera equatorial de Jicamarca foram observados antes mesmo do início da fase principal da tempestade. A partir das 20 UT/15 LT, a deriva zonal observada se inverte para leste e entre 22 UT/17 LT e 23 UT/18 LT apresenta uma clara tendência de constância próximo a 50 m/s, a qual é interrompida por uma queda que se inicia ~ às 23 UT/18 LT. Essa queda está possivelmente associada a uma perturbação no campo elétrico zonal primário evidenciada pelo aumento da deriva vertical ao mesmo tempo. Tal perturbação induziu um campo elétrico Hall na região E que, ao ser mapeado para a região F, produziu a deriva zonal perturbada do plasma. Após às 00 UT/19 LT, nota-se um enfraquecimento da deriva vertical que foi acompanhada por uma tendência de recuperação da atividade auroral e por uma forte intensificação da deriva zonal para leste, a qual atingiu um pico de 60 m/s à 01 UT/20 LT.

Diante deste cenário de variações observadas nas derivas zonal e vertical, dois principais pontos precisam ser investigados. São eles:

- O que explica a inversão da deriva zonal para leste praticamente duas horas antes do previsto, considerando que neste horário nenhuma variação significativa foi observada na deriva vertical e na atividade magnética?

- Qual o mecanismo físico responsável pelas variações anticorrelacionadas entre as derivas vertical e zonal sob condições magneticamente perturbadas?

Para responder a essas questões, o modelo SUPIM-INPE foi utilizado para que as variáveis necessárias para o cálculo da deriva zonal do plasma fossem obtidas e, assim, com o auxílio da simulação, ter-se-ia condições de avaliar como os parâmetros relacionados à deriva zonal deveriam variar para que as observações fossem explicadas.

4.2.1 Análise comparativa entre os dados experimentais de foF2 e hmF2 e os resultados do modelo SUPIM-INPE

Como o parâmetro foF2 representa uma medida de densidade eletrônica e, considerando que esta última é necessária para o cálculo das condutividades integradas, tornou-se necessário verificar o quão realistas eram os valores de foF2 e hmF2 obtidos pelo modelo quando comparados aos dados observacionais. A Figura 4.3 apresenta o resultado desta análise para o evento de 24 e 25 de junho de 2008. Notam-se diferentes curvas referentes aos valores de foF2 adquiridos pelo modelo SUPIM-INPE. O dado experimental é indicado pela curva preta, sendo que a curva sólida/pontilhada representa os valores de foF2 e hmF2 obtidos através de ionogramas sem/com a presença de spread-F. O primeiro resultado gerado pelo modelo está representado pela curva em azul denominada por FS1, em que FS indica fluxo solar. Notam-se grandes diferenças entre o dado experimental e o modelado durante todo o período avaliado, situação em que os valores de foF2 simulado foram inferiores aos valores experimentais.

Figura 4.3 - Comparação entre os parâmetros foF2 e hmF2 obtidos pela digissonda de Jicamarca e pelo modelo SUPIM-INPE para diferentes valores do modelo de irradiância solar - SOLAR2000.

Certificando-se de que a deriva vertical utilizada como entrada no modelo era a correta e considerando que, apesar de inferiores, a curva de foF2 modelada apresenta aproximadamente a mesma forma da curva referente ao foF2 observado, levantou-se a possibilidade desse resultado estar associado a algum equívoco gerado pelo modelo de irradiância solar utilizado (SOLAR2000). Na verdade, os resultados do modelo foram inferiores desde as primeiras horas da manhã, horário em que os efeitos da dinâmica são menores do que aqueles produzidos pela fotoionização. É relevante mencionar que a deriva vertical nesses horários é muito pequena, pois se trata de um momento em que ocorre a inversão do sentido da velocidade de baixo para cima.

Com o intuito de investigar se o modelo de irradiância solar estava inadequado para o evento em questão, primeiramente, optou-se por utilizar uma versão mais recente do modelo SOLAR2000 (FS2). Os resultados para esta versão

são indicados pela curva cinza na Figura 4.3. Novamente, verifica-se uma boa coerência no que diz respeito à forma da curva de foF2 simulada, porém, em relação aos valores fornecidos pelo modelo, esses foram superiores aos dados de foF2 observados. Diante dos diferentes resultados obtidos com o modelo, decidiu-se ajustar os valores de FS2 até que fosse encontrado um resultado razoável de foF2 e hmF2, o qual está denotado na Figura 4.3 pela curva em vermelho (FS3). Uma ótima concordância com os dados observados foi alcançada (exceto para algumas horas após às 01 UT/20 LT) dividindo-se o fluxo de irradância FS2 por um fator de 1,35. Como o horário de interesse desta análise se concentra entre ~ 18 UT do dia 24/06 e 01 UT do dia 25, essa discrepância entre os dados não comprometeu a análise aqui proposta. Os dados a partir da 01 UT foram obtidos na presença de diferentes níveis de spread-F, sendo assim, não dá para afirmar o quão errado está ou não os resultados obtidos pelo modelo. Em relação ao comportamento do parâmetro hmF2, o que se apresenta na Figura 4.3 é apenas o resultado obtido a partir do fluxo solar ionizante ajustado (FS3). Percebe-se boa concordância entre o dado modelado e o experimental, exceto para as horas em que a presença do spread-F foi detectada.

A análise feita sobre o comportamento dos parâmetros foF2 e hmF2 mostrou que existe uma possibilidade muito grande de que o modelo SOLAR2000 não esteja representando bem a época de atividade mínima acentuada conforme foi considerado o ano de 2008. Segundo uma conversa particular com o Dr. Jonas Rodrigues de Souza, esse mesmo comportamento de foF2 simulado, os quais superestimaram os dados observados, tem sido observado em outras datas referentes a esse mesmo ano.

Além disso, investigações recentes, como a publicada por Liu et al., (2012), têm mostrado que uma redução em 15% da radiação solar na faixa do extremo ultravioleta (EUV) entre o mínimo solar registrado em 1996-1997, até o mínimo mais recente (2008-2009), tem feito com que a ionosfera exibisse características substancialmente diferentes do esperado. Os autores verificaram que os valores médios de foF2 para a região equatorial de

Jicamarca foram menores em 2008-2009 do que em 1996-1997, tanto durante o dia quanto durante a noite.

A respeito da comparação entre os dados observados e os dados obtidos por modelos, Luhr e Xiong (2010) encontraram diferenças significativas nos resultados obtidos. Os autores verificaram que os dados de densidade eletrônica obtidos com o modelo ionosférico IRI foram superiores ao dado experimental por um fator de 1,5.

Portanto, os resultados de foF2 apresentados na Figura 4.3 para a região de Jicamarca corroboram com alguns estudos anteriores. Além disso, reforçam que a discrepância encontrada entre os modelos ionosféricos e os dados experimentais são fortes indicadores da condição especial em que a ionosfera se encontrou durante este ano de atividade solar mínima acentuada (2008).

Uma vez certificado de que os valores de foF2 e hmF2 obtidos pelo modelo SUPIM-INPE estavam coerentes com os dados experimentais, o próximo passo foi calcular a deriva zonal do plasma de acordo com Equação (2.21). Deve-se entender como deriva zonal calculada pelo modelo SUPIM-INPE aquela que foi obtida através das informações fornecidas por este modelo, como, por exemplo, as condutividades integradas, bem como as informações obtidas sobre o vento zonal U_y e o vento U_Z no plano meridional magnético calculados a partir do modelo HWM93.

4.2.2 Análise comparativa entre a deriva zonal observada e a calculada pelo modelo SUPIM-INPE

De acordo com a Equação 2.21, a deriva zonal do plasma foi calculada considerando os parâmetros integrados ao longo da linha de campo, porém, sem o termo referente a corrente vertical J_Z. Segundo Haerendel et al. (1992), esse termo tem uma importante contribuição no movimento zonal do plasma somente nos horários próximos ao pôr do sol e abaixo do pico da região F. De fato, esse termo não foi considerado neste trabalho. Eccles (1998) mostra que

a possível contribuição de J_Z para a deriva zonal em 400 km é praticamente desprezível.

A Figura 4.4 apresenta, do topo até a base, as condutividades Hall e Pedersen das regiões E e F integradas ao longo das linhas de campo, a razão $\sum_H/\sum_P$, a deriva vertical e zonal obtida pelo radar de Jicamarca e a deriva zonal calculada para a linha de campo que atinge o ápex em 400 km (painéis f e g). Quanto ao comportamento das derivas experimentais (curvas sólidas em preto), é possível constatar que a deriva vertical (painel e) inicia um movimento de subida às 2330 UT/1830 LT, o qual é coincidente com um decréscimo no movimento do plasma para leste (painel f). Além disso, é interessante notar que as variações na deriva zonal e vertical ocorreram em um intervalo no qual é possível identificar algumas variações nas condutividades integradas das regiões E e F (painéis a e b). Essas variações fizeram com que a razão $\sum_H/\sum_P$ aumentasse significantemente a partir desse horário.

Os painéis f e g da Figura 4.4 mostram a deriva zonal calculada para três diferentes condições. A curva azul tracejada no painel f representa a deriva zonal calculada considerando-se somente o termo U_y^P da Equação (2.21). A equação utilizada para fazer este cálculo é dada por:

$$V_y = U_y^P = \frac{\sum_P^E U_y^{PE} + \sum_P^F U_y^{PF}}{\sum_P^E + \sum_P^F}, \tag{4.1}$$

em que U_y^{PE} e U_y^{PF} representa o vento zonal das regiões E e F ponderado pela condutividades Pedersen, respectivamente.

A parcela da deriva envolvendo o termo $-\frac{\sum_H}{\sum_P}\left(V_Z - U_Z^H\right)$ da Equação (2.21) também é apresentada no painel f pela curva azul pontilhada, e por fim no painel g apresenta-se a deriva calculada envolvendo os dois termos juntos, ou seja, $\frac{\sum_H}{\sum_P}\left(V_Z - U_Z^H\right) - U_y^P$. Três principais características podem ser encontradas

ao se comparar as três diferentes curvas de deriva zonal calculada com os dados observados. A primeira delas é que entre ~ 1830 UT e 2330 UT, as discrepâncias encontradas entre os dados e o modelo parecem ser devidas principalmente ao vento zonal, já que a contribuição do termo $-\frac{\Sigma_H}{\Sigma_P}\left(V_Z - U_Z^H\right)$, o qual contempla os valores reais de Vz, é bem pequena e chega a ser nula em determinados horários. A segunda característica é que as oscilações na deriva zonal, observadas entre 2330 UT e 0130 UT, só podem ser simuladas se o termo que envolve a deriva Vz for considerada no cálculo. Ao comparar a curva tracejada com a curva referente ao dado observado, nota-se, às ~0010 UT/1910 LT, uma diferença de ~ 60 m/s entre a deriva observada e a calculada. No entanto, quando a comparação é feita com a deriva calculada apresentada no painel g, nota-se que essa diferença diminui para ~20 m/s. A terceira característica refere-se ao horário de inversão da deriva calculada para leste. Similar ao que se apresentou na Figura 4.2, novamente os resultados apresentados na Figura 4.4 também mostram uma defasagem de ~2 horas no que diz respeito ao horário em que a deriva zonal observada se inverteu para leste.

Os resultados apresentados no painel f e g na Figura 4.4 mostram evidências claras de que o modelo de ventos utilizado no cálculo da deriva (HWM93) não está correto, principalmente próximo ao horário em que ocorre a inversão no sentido da deriva zonal observada. Além disso, a diferença de ~20 m/s detectada no painel g às 0010 UT/1910 LT, indica que pode haver outro fator influenciando a deriva zonal. Esses pontos serão discutidos na próxima seção. O índice “P0” indicado na Figura 4.4 indica que os cálculos das derivas zonais foram feitos sem incluir a precipitação de partículas.

Figura 4.4 - Condutividades Hall e Pedersen das regiões E e F integradas ao longo das linhas de campo (painéis a, b e c), razão $\sum_H/\sum_P$, (painel d), deriva vertical (painel e) e zonal medidas pelo radar de Jicamarca e as derivas zonal calculadas para diferentes condições (painéis f e g). As setas vermelhas denotam o horário de inversão da deriva para leste e as diferenças entre as intensidades da deriva zonal observada e a calculada.

4.2.3 Deriva zonal considerando a modificação no vento zonal e a inclusão da precipitação de partículas

Com o intuito de esclarecer as diferenças identificadas entre os dados observados e a deriva zonal calculada conforme apresentado na Figura 4.4, dois parâmetros foram investigados, sendo eles o vento zonal e a precipitação de partículas energéticas. Acredita-se que uma possível mudança no comportamento do vento zonal poderia explicar a inversão da deriva para leste mais cedo do que o previsto. Além disso, a inclusão da precipitação de partículas (através do aumento da condutividade Hall) poderia contribuir significantemente para que o mínimo da deriva zonal observada às 0010 UT/1910 LT pudesse ser melhor representada pelo modelo. Primeiramente, será apresentada uma discussão sobre a modificação no vento zonal a fim de esclarecer parte das diferenças notadas no comportamento da deriva zonal, e após isso, serão avaliados também os efeitos da precipitação de partículas na deriva zonal.

Conforme apresentado no painel f da Figura 4.4, a deriva zonal calculada considerando a equação 4.1 indica que a diferença observada entre os resultados obtidos se deve possivelmente a uma variação no vento zonal e na condutividade integrada Pedersen. Porém, como a densidade eletrônica da região F calculada pelo SUPIM-INPE mostra boa concordância com os dados observados, acredita-se que a distribuição espacial e temporal das condutividades estejam corretas e, assim, as diferenças encontradas entre as derivas seriam devido, principamente, ao vento zonal calculado erroneamente pelo modelo HWM93. É bem conhecido que os ventos termosféricos apresentam grande variabilidade e afetam diretamente a ionosfera em todas as latitudes, no entanto, o número muito limitado de dados disponíveis desse parâmetro dificulta um estudo mais completo a cerca desse assunto.

Além disso, conforme mencionado por Biondi et al. (1999) os principais fatores que controlam a circulação termosférica são o fluxo EUV, a localização do ponto sub-solar, a rotação da terra bem como o efeito da dissipação das ondas de gravidade e o arraste iônico. Como a análise apresentada aqui se refere a

um período de atividade solar mínima extrema e como a radiação na faixa do EUV foi 15% inferior em relação ao mínimo anterior (LIU et al., 2012), parece ser razoável considerar que o vento zonal teve grande influência na inversão da deriva zonal de oeste para leste mais cedo do que o previsto. Ademais, quanto mais baixo é o índice F10.7 (ou o fluxo EUV) mais baixa será a pressão atmosférica no ponto subsolar no domínio da ionosfera e também mais baixa será a velocidade do vento zonal decorrente da expansão térmica (*Thermal expansion*). Sendo menor a força que dirige o vento para oeste (devido à força da corrotação da terra para leste) espera-se que a mudança de velocidade para leste ocorra mais cedo. Essas afirmações indicam que o modelo de vento zonal utilizado nos cálculos (HWM93) não está preparado para representar este ano de atividade solar muito baixa. Diante disso, tomou-se a liberdade de ajustar os ventos zonais do modelo HWM93 de modo a atingir o objetivo proposto aqui, ou seja, fazer com que a deriva zonal calculada fosse a mais parecida possível com a deriva zonal observada. Os ajustes foram feitos durante o intervalo em que a atividade magnética foi desprezível, ou seja, entre 16 UT /11 LT e ~ 2330 UT/ 1830 LT. A partir desse horário, observa-se que a forma da deriva zonal calculada (painel g, Figura 4.4) parece estar coerente com a deriva observada, porém com intensidade um pouco superior. Os ajustes feitos nos ventos consistiram basicamente em somar uma determinada parcela ao vento original, de modo que esse vento se invertesse mais cedo para leste. A maior parcela somada foi de ~55 m/s às 21 UT/16 LT, e no horário em que ocorreu a inversão da deriva, somou-se uma parcela de ~ 44 m/s.

A Figura 4.5 mostra a variação do vento zonal inicial e do vento zonal modificado com a latitude e com a hora. Tomando como referência a região equatorial, observa-se que o vento zonal modificado se inverte mais cedo para leste do que o vento zonal inicial. Além disso, nota-se que a intensidade do vento zonal modificado (em módulo) menor do que a do vento inicial contribuiu fortemente para que a deriva zonal se invertesse mais cedo para leste. A modificação nos ventos foi realizada somente ao longo da linha de campo que atinge o ápex em 400 km.

Figura 4.5 - Variação latitudinal e com a hora do vento zonal inicial Uy(i) e modificado Uy(m) obtido pelo modelo HWM93 para a linha de campo com ápex em 400 km, durante os dias 24 e 25 de junho de 2008. As isolinhas em destaque indicam o horário em que ocorreu a mudança de direção do vento.

O resultado final observado na deriva zonal incluindo as modificações nos ventos, conforme mostrado anteriormente, é apresentado na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Do topo até a base apresenta-se o comportamento da atividade auroral (painel a), da razão $\sum_H/\sum_P$ (painel b), do vento zonal inicial Uy(i) e modificado Uy(m) das regiões E e F (painéis c e d), da deriva vertical Vz (painel e) e da deriva zonal Vy observada e calculada (painel f) considerando (VyUy(m)P0) e não considerando a modificação nos ventos (de ventos VyUy(i)P0).

Na Figura 4.6, apresentam-se do topo da figura até a base, a atividade auroral (AE), a razão entre as condutividades Hall e Pedersen, o vento zonal inicial e o modificado das regiões E e F, a deriva vertical, a deriva zonal calculada e a observada. No painel d da Figura 4.6, observa-se que após as 2330 UT, o vento zonal modificado Uy(m) segue a mesma tendência do vento sem considerar os ajustes Uy(i). No painel f, referente à deriva zonal Vy, a curva em azul (Uy(i)P0) / vermelha (Uy(m)P0) representa a deriva zonal calculada sem /com a alteração nos ventos. Verifica-se uma excelente concordância entre o comportamento da deriva zonal observada e a calculada, principalmente no que diz respeito ao horário da inversão da deriva de oeste para leste. Além disso, nota-se que a inversão da deriva zonal ocorre um pouco depois da inversão do vento zonal da região F, tanto no caso da deriva calculada com o vento inicial Uy_F(i) (~45 min) quanto no caso do vento zonal modificado Uy_F(m) (~15 min). Acredita-se que essa diferença de ~30 minutos entre o horário de inversão do vento e da deriva se deva, principalmente, à forte contribuição do termo dependente da deriva vertical Vz. Com relação aos 15 minutos de diferença entre a inversão de Uy (m) e a deriva calculada, acredita-se que esse atraso tenha uma importante contribuição da variação na condutividade Pedersen integrada das regiões E e F nesse horário.

Além da modificação no sistema de ventos para que os resultados de deriva zonal desejados fossem obtidos, outra modificação foi necessária para que a queda da deriva zonal, a qual atingiu 0 m/s às 0010 UT/ 1910 LT, fosse explicada. Este comportamento da deriva não poderia ser explicado em termos de mudanças no vento zonal, já que a atividade auroral havia começado a entrar em ação e assim, não haveria tempo hábil para gerar modificações no sistema de ventos. Considerando que os ventos utilizados após as 2330 UT estejam corretos, e considerando que após esse horário teve início o desenvolvimento de uma tempestade magnética, conforme indicado pelo índice AE no painel a da Figura 4.6, acredita-se que as modificações observadas na deriva tenham sido causadas por um aumento na razão $\sum_H/\sum_P$, o qual foi gerado por um aumento de ionização na região E pela precipitação de partículas energéticas. Os motivos pelos quais se acredita que houve

precipitação de partículas nesse horário são algumas características identificadas nos ionogramas da região de Jicamarca, de Cachoeira Paulista e de Fortaleza e que serão discutidos na seção 4.2.4. Uma vez sabendo que a inclusão de precipitação de partículas nas alturas da região E geraria um aumento na razão $\sum_H/\sum_P$, foi necessário que vários testes com o modelo SUPIM-INPE fossem feitos até que se encontrasse uma deriva zonal cujo resultado fosse coerente com o dado observado. Conforme já mencionado no Capítulo 3, tais testes fundamentaram-se na escolha correta do espectro de energia a ser utilizado.

O resultado da deriva zonal considerando a modificação dos ventos e a inclusão da precipitação de partículas é indicado pela curva vermelha no painel d da Figura 4.7. Observa-se que a excelente concordância entre a deriva zonal observada e a calculada entre 00 UT e 0030 UT foi decorrente de um aumento na razão $\sum_H/\sum_P$ de 1,25 para 1,5 (painel b). Esse aumento na condutividade foi gerado por um fluxo de elétrons variando entre $9{,}4 \times 10^3$ elétrons $cm^{-2}s^{-1}$ e $2{,}4 \times 10^3$ elétrons $cm^{-2}s^{-1}$ para uma faixa de energia entre 2 a 32 keV. Além disso, conforme já mencionado anteriormente, é interessante notar que a queda da deriva zonal observada a partir das 00 UT/19 LT, ocorreu no mesmo instante em que o aumento da deriva vertical Vz estava em pleno desenvolvimento. Desta maneira, acredita-se que a intensificação na deriva vertical observada, a qual foi causada pela penetração de um campo elétrico zonal para leste, tenha gerado um campo elétrico vertical Hall na região E. Esse campo vertical, que decorreu de um aumento de ionização da região E (e, portanto da condutividade Hall) noturna pela precipitação de partículas, se mapeou para a região F e lá causou o decréscimo da deriva zonal para leste.

Figura 4.7 - Do topo até a base apresenta-se o comportamento da atividade auroral (painel a), da razão $\sum_H/\sum_P$ incluindo (P1) ou não (P0) a precipitação de partículas (painel b), da deriva vertical Vz (painel c) e da deriva zonal Vy observada e calculada (painel d) considerando somente a modificação nos ventos (VyUy(m)P0) e a modificação nos ventos + a precipitação de partículas (VyUy(m)P1).

Estudos anteriores também têm mostrado que a precipitação de partículas sobre a região da AMAS pode aumentar significantemente a condutividade Hall na região E. A partir de medidas indiretas do espectro de energia do elétron na faixa de energia inferiores a 200 keV, Lin e Yeh (2005) encontraram um valor da razão $\sum_H/\sum_P$ de ~ 10 para elétrons com uma energia de 50 keV. Esse valor vai de encontro aos resultados obtidos na Figura 4.6. No entanto, é importante ressaltar que, para o caso estudado neste evento de junho de 2008 (e todos os outros que serão discutidos ainda), o espectro de energia utilizado foi para

elétrons com energia variando numa faixa de 2 a 32 keV, portanto muito inferior em comparação aos utilizados por Lin e Yeh (2005).

Por outro lado, Robinson et al. (1987) também apresentaram cálculos relacionados às condutividades Hall e Pedersen produzidas por precipitação de elétrons, porém na região auroral. Os autores encontraram valores da razão entre ~ 0,5 a 3 para um espectro de energia variando de 0,02 keV até 20 keV. Outros pesquisadores ainda estudaram a razão entre essas condutividades para períodos com diferentes níveis de atividade magnética. Nesse sentido, Fuller-Rowell e Evans (1987), por exemplo, encontraram uma razão de ~ 1,43, enquanto que Hardy et al. (1987) encontraram um valor de ~1,92 nos horários após a meia noite. Diante desses valores, conclui-se que o valor de 1,5 encontrado neste estudo é condizente com trabalhos publicados anteriormente.

Conforme já mencionado anteriormente, a velocidade de deriva zonal apresentada neste capítulo foi calculada numericamente para a linha de campo que atingisse o ápex em 400 km. Em baixas latitudes, essa linha de campo intecepta a camada E em ~ -12°. Com o intuito de verificar como as condutividades Hall e Pedersen se alteraram nessa localidade devido à inclusão da precipitação de partículas energéticas, a Figura 4.8 foi construída e mostra os perfis dessas condutividades para diferentes horários. As curvas sólidas representam essas condutividades sem incluir a precipitação (P0), enquanto que as curvas com círculos representam as condutividades considerando a precipitação de partículas (P1). Observa-se que, de acordo com o espectro de precipitação escolhido, a inclusão da precipitação de partículas ficou restrita às alturas da região E e afetou tanto a condutividade Pedersen quanto a condutividade Hall dessa região. No entanto, visto que a condutividade Hall é alta apenas nas camadas inferiores da ionosfera, os efeitos da inclusão da precipitação de partículas após a integração são mais significativos na condutividade Hall.

Figura 4.8 - Comportamento das condutividades Hall (curva vermelha) e Pedersen (curva azul) incluindo (P1) ou não (P0) a precipitação de partículas para a latitude magnética de -12°, durante o dia 24 de junho de 2008. A precipitação de partículas foi incluída somente entre 2345 UT e 0015 UT.

Os resultados apresentados nessa seção mostraram excelente concordância entre a deriva observada e a calculada quando precipitação de partículas foi inserida nos cálculos. Conforme já mencionado no Capítulo 3, o espectro de energia utilizado para a obtenção dos resultados apresentados aqui, tomou como base as medidas feitas pelo satélite *Discoverer 29* em uma passagem sobre a região da AMAS (MANN et al., 1963). Na falta de dados observados do fluxo de elétrons para a região da AMAS durante o evento da tempestade magnética estudado aqui, verificou-se através de medidas indiretas se o

espectro de energia utilizado nos cálculos era ou não coerente com tais medidas. O painel a da Figura 4.9 mostra, por exemplo, umas das formas espectrais para a precipitação de elétrons nas regiões aurorais calculadas por Del Pozo et al. (1997). Utilizando os dados obtidos pelo radar EISCAT, um dos objetivos propostos por esses autores foi determinar qual o espectro de energia dos elétrons nas regiões aurorais responsável por produzir uma determinada ionização entre 70 e 120 km de altura. Observa-se, no painel a da Figura 4.9, que o fluxo responsável por tal ionização variou, consideravelmente em função da energia. O painel b, por sua vez, apresenta uma das formas do espectro de energia utilizado por Brum (2004) para explicar as possíveis respostas da baixa ionosfera de Cachoeira Paulista à precipitação de partículas, tais como as variações da absorção ionosférica do ruído cósmico, a altitude dos picos da absorção e o comportamento da ionização causada por diferentes intensidades de fluxos. Neste mesmo painel, apresenta-se também o espectro de energia utilizado para o evento de junho de 2008 (curva azul). Observa-se que o espectro utilizado apresenta boa coerência com o espectro obtido por Brum (2004). Além disso, observa-se também que os valores de fluxo de elétrons utilizados nesse evento são muito inferiores aos valores de fluxo da região auroral. Esse resultado é esperado, já que o fluxo de partículas deve ser muito mais intenso nas regiões aurorais do que nas regiões sob influência da AMAS. Diante do exposto, acredita-se que espectro usado no cálculo da deriva é satisfatório.

Figura 4.9 - Perfil espectral da precipitação de elétrons na baixa ionosfera para a região auroral e para a região da AMAS. O perfil adotado nas simulações para o evento de junho de 2008 é apresentado pela curva em azul.

Por fim, os resultados apresentados até aqui mostraram que o ano de 2008 foi especial e causou diversos impactos no sistema ionosfera-termosfera. Na seção 4.3, mostrar-se-á que, de acordo com o banco de dados disponíveis, a deriva zonal de Jicamarca para o ano de 2008, durante o mês de junho, apresentou características singulares em relação a outros períodos com níveis mais altos de atividade solar.

4.2.4 Evidências do aumento de ionização na região e registradas nos ionogramas

Uma vez detectada alguma característica anormal no comportamento da deriva zonal que pudesse ser associada à precipitação de partículas, foi de extrema importância verificar se as digissondas instaladas nas regiões de interesse haviam registrado alguma evidência que pudesse ser associada a um aumento

de ionização na região E. Para tanto, os ionogramas de Jicamarca, Fortaleza e Cachoeria Paulista foram avaliados.

O aumento de ionização da região E pode ser evidenciado por diferentes maneiras. De acordo com Abdu et al. (2005), o aumento das frequências das camadas E esporádicas (ftEs e fbEs), verificadas através dos ionogramas sugerem uma fonte de ionização extra nas alturas da região E. Batista e Abdu (1977), por sua vez, investigaram o comportamento das camadas Es sobre a região de Cachoeira Paulista durante alguns eventos de tempestade magnética e observaram que os traços das camadas Es detectadas nos ionogramas, as quais apresentavam um determinado grau de espalhamento, eram muito semelhantes às camadas Es do tipo “a” observadas nas latitudes aurorais. Esses resultados foram interpretados como uma forte evidência de um aumento da ionização da região E gerada por precipitação de partículas na região da AMAS.

A Figura 4.10 mostra os ionogramas de Jicamarca das 2315 UT até às 0040 UT. Não se observa nada que indique a presença de uma camada Es formada por precipitação nas alturas da região E. No entanto, os ionogramas das 2315 e 2320 UT apresentam um atraso no traço da camada F na sua frequência mínima, o qual é representado pelo aspecto encurvado da base da região F. O grau de atraso é um indicador da espessura da camada E e da intensidade da ionização. Esse atraso também é conhecido como “group retardation”. Com o passar do tempo, os ionogramas mostram que essa característica de curvatura na base do traço F não fica mais tão evidente e isso é um fato esperado, já que nesses horários após o pôr do sol a densidade da região E é drasticamente reduzida. Entretanto, observa-se que, no ionograma das 2355 UT, horário em que se verificou a anticorrelação entre as derivas vertical e zonal (ver Figura 4.7), uma nova tendência de curvatura na base da camada F pode ser vista. A partir deste horário, embora não tão evidente, ainda se observa essa tendência de curvatura, a qual se confirma claramente nos ionogramas das 0030 UT e 0035 UT. Além disso, é interessante notar o decréscimo da frequência crítica

da camada F a partir das 2340 UT (setas verticais azuis), foi coincidente com a subida da camada F (Figura 4.7).

Figura 4.10 - Ionogramas de Jicamarca para o dia 24 de junho de 2008 para diferentes horários. As setas em azul indicam redução do parâmetro foF2, enquanto que os círculos pretos indicam o encurvamento do traço da camada F na sua frequência mínima.

Como todos os parâmetros embutidos no cálculo da deriva zonal se referem a fatores integrados ao longo das linhas de campo, o ideal seria verificar o que

aconteceu nas regiões E nos pontos conjugados do tubo de fluxo magnético que passa sobre Jicamarca em torno de 400 km. Como não existem digissondas instaladas sobre essas regiões, utilizaram-se os dados de Cachoeira Paulista para verificar quais características foram registradas por esse equipamento durante o evento da tempestade magnética estudada. É relevante mencionar que Cachoeria Paulista é uma região que está sob forte influência dos efeitos gerados pela AMAS.

A Figura 4.11 apresenta alguns ionogramas da região de Cachoeira Paulista para os dias 24 de junho de 2008. Observa-se, no ionograma das 23 UT/20 LT, que a frequência crítica da região F está bem baixa, em torno de 3 MHz e que uma camada Es com um formato espalhado, típico de camadas formadas por precipitação, está em pleno desenvolvimento. Às 2330 UT/2030 LT, nota-se a mesma curvatura na base da região F, conforme observado em Jicamarca. Além disso, observa-se um decréscimo no parâmetro foF2 conforme indicado pelas setas verticais azuis.

Às 00 UT/21 LT, momento em que a ionosfera estava sob forte influência de um campo elétrico de penetração para leste (verificada pela intensificação da deriva vertical de Jicamarca entre 2330 UT e 0015 UT), observa-se um desaparecimento quase completo do traço F, o qual foi causado pelo bloqueio do sinal pela camada Es, indicando assim que a camada Es que estava em curso se tornou tipo “blanketing”. A partir das 00 UT, a camada Es apresentou o segundo traço (“2nd hop”), confirmando assim o tipo “blanketing” da camada. A transformação da camada Es observada representa um aumento da densidade eletrônica da região E, a qual pode ser causada por uma ionização extra produzida por precipitação de partículas energéticas.

A partir das 00 UT é interessante notar o formato com que a camada esporádica se apresenta em relação aos ionogramas anteriores. Verifica-se a aparente presença de duas camadas Es, sendo que uma delas está localizada em ~110 km, e outra mais densa em ~130 km. Às 0030 UT, observa-se que a camada de ~100 km se interrompe, enquanto que a camada localizada em ~ 130 km prossegue junto com a sua segunda reflexão até 0230 UT. A

intensificação da camada Es em ~130 km, observada no ionograma das 0015 UT/ 2115 LT, é coincidente com o início do decréscimo na deriva para baixo causada pela penetração de um campo elétrico zonal para oeste. Entre 02 UT/23 LT e 0230 UT/2330 LT, detectam-se momentos de intensificação e enfraquecimento da camada Es, até a sua completa interrupção às 0245 UT/ 2345 LT. Além disso, é interessante notar que a interrupção da camada mais inferior, com características de espalhamento em range, às 0030 UT, coincidiu com o fim da deriva vertical causada pelo campo elétrico de penetração para oeste. Essa camada espalhada volta a aparecer em outros horários.

As camadas Es em 130 km discutidas aqui apresentaram características peculiares como, por exemplo, a espessura e a altura em que foram observadas. Embora as camadas esporádicas com um aspecto espalhado, o que evidencia que a sua formação pode estar associada à precipitação de partículas, tenham sido identificadas nos ionogramas iniciais da Figura 4.10, a formação e o comportamento delas nos ionogramas seguintes são características que precisam ser investigadas detalhadamente. Isso porque na altura em que elas foram detectadas, o cisalhamento dos ventos neutros (principal mecanismo gerador de camadas Es em baixas latitudes; WHITEHEAD, 1970; MATHEWS, 1998) e ação de um campo elétrico vertical induzido pela penetração de um campo elétrico zonal (ABDU et al., 2013) não são eficientes para formar uma camada esporádica.

Figura 4.11 - Ionogramas de Cachoeira Paulista para o dia 24 de junho de 2008 para diferentes horários. As setas verticais em azul indicam redução do parâmetro foF2, enquanto horizontais indicam a presença de camadas esporádicas.

Em relação aos ionogramas de Fortaleza, apresentados na Figura 4.12, uma camada Es com características semelhantes àquelas causadas por precipitação de partículas, porém com fraca intensidade, pode ser observada a partir das 2340 UT. Às 00 UT/21 LT, a camada Es intensifica-se e atinge

frequência de topo de ~ 5 MHz. A partir desse horário, a característica de curvatura da base da região F passa a ser razoavelmente perceptível, evidenciando, assim, um aumento de ionização na região E noturna. Os ionogramas seguintes denotam um enfraquecimento da camada Es que, por sua vez, reaparece e se intensifica a partir das 0110 UT e enfraquece novamente no ionograma das 0130 UT. Essa intensificação, seguida pelo enfraquecimento, é coincidente com uma subida da camada F, a qual é quase compatível com a penetração de um campo elétrico do tipo *undershielding*. O comportamento da camada Es observada e discutida aqui é coerente com os trabalhos de Abdu et al. (2013; 2014).

Similar ao que foi observado em Jicamarca e Cachoeira Paulista, observa-se, através dos ionogramas de Fortaleza, uma queda no parâmetro foF2 a partir das 2340 UT (conforme indicado pelas setas verticias em azuis). Essa característica, recorrente nas três regiões estudadas, indicam que o aumento da razão $\sum_H/\sum_P$, responsável pela inversão da deriva zonal para oeste, teve uma contribuição importante da queda da condutividade integrada $\sum_P$. No entanto, os resultados da deriva zonal calculada mostraram que se um pequeno aumento de ionização na região E, causado pela precipitação de partículas energéticas, fosse incluído nos cálculos, resultados mais satisfatórios de deriva zonal poderiam ser encontrados.

Figura 4.12 - Ionogramas de Fortaleza para o dia 24 de junho de 2008 para diferentes horários. As setas verticais em azul indicam redução do parâmetro foF2, enquanto horizontais indicam a presença de camadas esporádicas.

4.3 Variabilidades observadas na deriva zonal do plasma durante atividade solar mínima

Estudos anteriores relacionados à climatologia das derivas zonais de Jicamarca têm mostrado que, enquanto a deriva zonal durante o dia apresenta pouca variação com a sazonalidade, com o ciclo solar e com a atividade magnética (FEJER et al., 1981), a deriva zonal noturna aumenta com a atividade solar e diminui com a atividade magnética (FEJER et al. 1991; 2005). Além disso, Fejer et al. (1981) também mostraram que a deriva zonal apresenta grande variabilidade dia a dia com grandes flutuações numa escala de 5 a 10 minutos.

Em relação a um comportamento médio, Fejer et al. (1985) verificaram que os perfis médios da deriva zonal de Jicamarca apresentam pouca variação com a hora local e não variam muito com a altura, exceto durante a noite quando há um cisalhamento da deriva abaixo do pico da região F. Todos esses estudos foram feitos considerando um banco de dados extenso. Em outro trabalho, Fejer et al. (1991) mostraram que o horário da reversão da deriva ao amanhecer durante o inverno parece aumentar com o fluxo solar. Neste caso, foi observado que para valores de F10.7<120, a reversão da deriva ocorreu às 0630 LT, enquanto que para valores de F10.7>120, a reversão ocorreu praticamente uma hora mais tarde. Com relação à hora de reversão da deriva ao entardecer (~ 1630 LT), não foi observada nenhuma variabilidade considerável nem com a sazonalidade nem com o fluxo solar.

Com o objetivo de investigar se a grande diferença encontrada entre a deriva zonal observada e a calculada conforme apresentada na seção 4.1.2 foi apenas um caso esporádico, ou se a causa desta diferença foi uma característica específica da atividade solar mínima acentuada do ano de 2008, avaliou-se o comportamento da deriva zonal de Jicamarca (de acordo com a disponibilidade do banco de dados do radar) para diferentes anos representativos de atividade solar mínima. A intenção inicial era incluir nesta análise somente os dados referentes ao mínimo de 1996-1997 e 2008-2009 durante o solstício de junho, porém isso não foi possível devido ao número

muito limitado de dados disponíveis. Sendo assim, os dados selecionados para este estudo correspondem a alguns dias magneticamente calmos de abril de 1997, maio de 2007, junho de 2008 e julho de 2010.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.13, duas características foram muito expressivas nesta análise. A barra pontilhada vertical mostra que o horário de reversão da deriva zonal diurna desde o mínimo de 1997 até o mínimo de 2008 vem se modificando e ocorrendo cada vez mais cedo. Enquanto em 1997 a deriva se inverteu por volta das 17 LT, em 2008, a inversão foi registrada antes das 15 LT, portanto praticamente duas horas mais cedo. Essa reversão adiantada parece justificar-se pelo enfraquecimento da deriva zonal diurna registrada em 2008, conforme indica a barra pontilhada horizontal.

Em relação à intensidade da deriva zonal, após uma análise visual, os dados da Figura 4.13 mostram que, em 2008 a deriva às 12 LT atingiu ~- 25 m/s, enquanto em 1997, esse valor foi de ~ -50 m/s. Os dados referentes a julho de 2010, ano em que a atividade solar ainda é baixa, porém já com uma tendência de aumento, os valores de deriva durante o dia oscilaram em torno de -50 m/s.

Figura 4.13 - Comportamento da deriva zonal de Jicamarca para diferentes anos de atividade solar mínima. As barras em vermelho indicam a hora de reversão da deriva zonal ao entardecer e a barra horizontal azul indica a intensidade da deriva zonal durante o dia para o mês de junho de 2008. Os dados de deriva zonal foram obtidos no site http://jro.igp.gob.pe/madrigal/.

Os dados apresentados na Figura 4.13 mostram claramente que, durantes os anos de atividade solar mínima, a hora de reversão da deriva zonal ao entardecer para o ano de 2008 se antecipou consideravelmente. A respeito da intensidade da deriva zonal durante o dia, apenas no ano de 2008 é que se observaram características diferentes em relação aos outros períodos avaliados, fato esse que evidencia o comportamento peculiar da ionosfera durante esse período. No que concerne ao horário da inversão e à intensidade

da deriva em ~12 LT, os resultados apresentados aqui vão de encontro aos resultados publicados por Fejer et al. (1991).

4.4 Tempestade magnética de 10 de abril de 1997

Durante a tempestade magnética de 10 de abril de 1997, observou-se que a deriva zonal da camada F sobre a região de Jicamarca se inverteu para oeste sob forte influência dos distúrbios magnéticos que se iniciaram próximo ao horário em que tal inversão foi observada. O comportamento do índice SYM-H no topo da Figura 4.14 revela que esse evento pode ser classificado como uma tempestade magnética moderada, em que o valor mínimo de SYM-H atingiu ~ -90 nT às 05 UT.

Figura 4.14 - Comportamento dos índices SYM-H/ASY-D, Bz, Ey, AE/AL durante os dias 08 a 11 de abril de 1997. A área hachurada indica o período em que será realizada a análise das derivas zonal e vertical.

Com relação ao comportamento dos índices interplanetários Bz e Ey (Figura 4.14), observam-se pequenas variações até às 12 UT do dia 10 de abril e oscilações mais frequentes nas horas seguintes. Em resposta às flutuações de Bz entre às 12 UT do dia 09 e 00 UT do dia 10, o índice AE apresentou intervalos de intensificação e recuperação e atingiu um valor máximo de ~ 600 nT às 00 UT. Após este horário, nota-se uma recuperação praticamente total da atividade auroral nas próximas 15 horas, até o momento em que uma nova intensificação nesse índice é detectada decorrente de uma inversão de Bz para sul. Observa-se que, durante a manutenção de Bz para sul em torno de ~ -10 nT, o índice AE atingiu valores superiores a 1200 nT às 2240 UT.

As respostas da ionosfera da região peruana a essa tempestade são apresentadas na Figura 4.15. De cima para baixo, exibe-se a variação dos índices SYM-H, Bz e AE, e, nos dois últimos painéis, a variação das derivas vertical e zonal da camada F durante o dia 10 de abril. Observa-se que, em comparação com o padrão de dias calmos (curva cinza), as medidas da deriva zonal (painel e) obtidas pelo radar apresentam um comportamento anômalo próximo às 19 LT e atingiu valores negativos num horário em que se espera uma deriva intensa para leste de ~100 m/s (curva cinza). Além disso, observa-se também uma intensificação na deriva vertical (painel d), a qual apresentou um valor máximo de 50 m/s às 19 LT, enquanto a deriva para um dia calmo atingiu um valor máximo de 12,5 m/s neste mesmo horário.

Figura 4.15 - Efeitos da tempestade magnética de abril de 1997 nas derivas vertical (Vz) e zonal (Vy) medidas pelo radar de Jicamarca. De cima para baixo, apresenta-se o comportamento dos índices SYM-H, Bz, AE (painéis a, b e c). A curva em cinza nos painéis d e e se referem às derivas para um dia calmo e foram obtidas pelo modelo de Sherliess e Fejer (1999) (Vz) e Fejer et al (2005) (Vy), respectivamente. A área hachurada destaca as variações anticorrelacionadas entre Vz e Vy. A linha pontilhada vertical indica o horário em que ocorreu o pôr do sol (~1805 LT).

Em relação ao comportamento da deriva vertical Vz no pôr do sol, é interessante notar que a subida da camada neste horário já é prevista pelo mecanismo gerador do PRE. No entanto, observa-se que para esse dia específico, o início dessa subida foi fortemente associada à condição de Bz

para sul e uma forte intensificação na atividade auroral a partir das 2230 UT/1730 LT. O índice AE (painel c) atingiu valor máximo de ~1200 nT próximo às 23 UT/18 LT e, logo após, apresentou uma recuperação parcial atingindo um nível de ~900 nT por ~1 hora. Nota-se que, ~1 hora após o início da intensificação de Vz, a deriva zonal apresentou uma forte inversão no seu sentido de propagação, a qual atingiu um valor de ~ -50 m/s às 0010 UT/ 1910 LT. Nota-se ainda que, após Vz atingir seu valor máximo às 00 UT/19 LT, Bz se inverteu rapidamente para norte e, praticamente nesse mesmo instante, Vz apresentou um forte decréscimo alcançando valores negativos às 0030 UT/1930 LT, enquanto Vy se inverteu e permaneceu para leste até às 01 UT/20 LT.

Este evento retratou bem a influência direta (indireta) da penetração de campos elétricos na deriva vertical (zonal). Ao entardecer (hora local), observou-se que enquanto um campo elétrico *undershielding (overshielding)* fez com que a deriva vertical se intensificasse (decrescesse), a indução de um campo elétrico Hall vertical para cima (baixo) fez com que a deriva zonal se invertesse para oeste (leste).

4.4.1 Análise comparativa entre os dados experimentais de foF2 e hmF2 e os resultados obtidos pelo modelo SUPIM-INPE

A Figura 4.16 apresenta a comparação dos parâmetros foF2 e hmF2 obtidos com a simulação e aqueles detectados pela digissonda. Nota-se uma excelente concordância entre os dados modelados e os observados até às 00 UT/19 LT. Nos horários seguintes, o forte grau de spread-F observado nos ionogramas fez com que os valores de foF2 e hmF2 reduzidos não fossem confiáveis. Por esse motivo, grandes discrepâncias entre os dados podem ser identificadas principalmente no parâmetro foF2. No entanto, como o intervalo em que as flutuações nas derivas serão discutidas foram observadas antes desse horário, os resultados utilizados nos cálculos da deriva zonal apresentam total confiabilidade.

Figura 4.16 - Comparação entre os parâmetros foF2 e hmF2 obtidos pela digissonda de Fortaleza (curva preta sólida e pontilhada) e pelo modelo SUPIM-INPE.

Conforme já discutido anteriormente, embora tenha sido verificada uma pequena intensificação no índice AE no dia 09 de abril, os resultados da Figura 4.15 mostraram que, neste caso, a atividade auroral não foi capaz de gerar uma perturbação que fosse o suficiente para alcançar as latitudes equatoriais e assim influenciar a eletrodinâmica desta região. Embora a subida do parâmetro hmF2 com máximo em torno das 5LT (identificada pela linha pontilhada na Figura 4.16), não seja de interesse nessa presente análise, é importante mencionar que, de acordo com o modelo de Huang et al. (2005), esta subida da camada F tem o formato típico do efeito dínamo perturbado, uma vez que uma forte intensificação no índice AE foi verificada no início do dia 11 de abril.

4.4.2 Análise comparativa entre a deriva zonal observada e a calculada pelo modelo SUPIM-INPE

A fim de avaliar as possíveis causas da inversão da deriva zonal de Jicamarca para oeste durante a tempestade magnética do dia 10 de abril, a deriva zonal foi primeiramente calculada de acordo com as Equações 2.21 e 4.1 sem levar em conta os efeitos ocasionados por um aumento de ionização na região E. Os resultados desta análise podem ser vistos na Figura 4.17, em que é mostrado o comportamento do índice AE, das condutividades Hall e Pedersen integradas nas regiões E e F, da razão $\sum_H/\sum_P$, do vento zonal das regiões E e F, e das derivas vertical e zonal.

Observa-se que, de uma maneira geral, a deriva zonal, considerando somente a dependência com o vento zonal, e a condutividade Pedersen (painel g) representou bem a deriva durante o dia. Essa característica indica que os ventos utilizados no cálculo estão corretos, e assim, não há a necessidade de se fazer ajustes nesses parâmetros. No entanto, nos horários em que a anticorrelação entre Vy e Vz foi observada (~ 19 LT), nota-se pouca contribuição desse termo. Já para o caso em que Vy foi calculada de acordo com a Equação 2.21 (painel h), observa-se uma melhor coerência entre a deriva zonal calculada e a observada para todo o período avaliado, em especial no horário do PRE. É interessante notar que, entre 12 UT e 2330 UT, a razão $\sum_H/\sum_P$ apresentou um valor aproximadamente constante de ~1, no entanto, a partir das 2330 UT/1830 LT, um aumento significativo pode ser identificado nesta razão. O painel b mostra que tal aumento está fortemente associado a um decréscimo significativo da condutividade Pedersen integrada (curva preta). Além disso, nota-se ainda que, entre 13 UT e 19 UT (área hachurada), a deriva zonal apresentada no painel h concorda melhor com os dados experimentais do que a deriva apresentada no painel (g). Esse resultado se deve basicamente ao valor expressivo da deriva vertical Vz (> 30 m/s) e da razão $\sum_H/\sum_P$ (~1,0) observada nesse intervalo.

Outra particularidade que pode ser visualizada na Figura 4.17 (indicada pela área hachurada), se refere a uma diferença de ~25 m/s entre as derivas zonais

apresentadas no painel h às ~ 2330 UT/1830 LT. Ao verificar a deriva apresentada no painel g nesse mesmo horário, nota-se que esta diferença é de apenas ~10 m/s. Esses valores indicam a importante contribuição do vento zonal e da condutividade Pedersen na definição da deriva nesses horários.

Embora os resultados da simulação no painel (h) da Figura 4.17 já indiquem uma boa concordância com os dados observados em função do aumento da razão $\sum_H/\sum_P$, ainda assim nota-se uma diferença entre esses dados de ~ 38 m/s às 0015 UT/1915 LT. Com o intuito de encontrar uma explicação para tal diferença, incluiu-se, nos cálculos da deriva, a precipitação de partículas como a causadora de um aumento de ionização na região E, já que havia uma tempestade magnética permitindo que tal fenômeno ocorresse nesse horário de interesse.

Figura 4.17 - Do topo até a base apresenta-se o comportamento da atividade auroral (painel a), das condutividades integradas Pedersen e Hall das regiões E e F (painel b), da razão $\sum_H/\sum_P$ (painel c), do vento zonal das regiões E e F (painéis d, e), da deriva vertical Vz (painel f) e da deriva zonal Vy observada e calculada (painéis g e h) sem considerar os efeitos da precipitação de partículas (P0) para diferentes condições. A área hachurada indica alguns intervalos em que o comportamento de Vy foi discutido no texto.

Similar à Figura 4.17, porém sem os gráficos referentes aos ventos zonais das regiões E e F, a Figura 4.18 apresenta a deriva zonal calculada de acordo com as Equações 2.21 e 4.1, considerando a precipitação de partículas. Primeiramente, observa-se, no painel (e), que a precipitação de partículas energéticas apresentou pouca contribuição para a deriva (~5 m/s) às 0015 UT quando se compara este resultado com resultados do painel (g) da Figura 4.17. Como neste caso quem variou foi apenas a condutividade Pedersen integrada das regiões E e F, os resultados apresentados mostram que tal condutividade pouco variou com a inclusão da precipitação. Neste caso, o valor do fluxo de elétrons utilizado foi inferior ao evento de junho de 2008 e variou entre $8{,}6 \times 10^2$ elétrons $cm^{-2}s^{-1}$ e $1{,}9 \times 10^2$ elétrons $cm^{-2}s^{-1}$ para uma faixa de energia variando entre 2 a 32 keV.

Com relação aos resultados do painel (f), observa-se que a inclusão da precipitação de partículas foi fundamental para que uma melhor concordância fosse encontrada entre as derivas calculadas e observadas. Para que isso fosse possível, foi necessário um aumento de ~1,87 para 2,24 na razão $\sum_H/\sum_P$, a qual foi gerada devido a um aumento na condutividade Hall/Pedersen integrada de 11,6/6,2 S/m para 17,23/7,6 S/m. Observa-se que o aumento de $\sum_P$ provocado pela precipitação é considerado pequeno quando comparado ao aumento de $\sum_H$.

Figura 4.18 - Do topo até a base apresenta-se o comportamento da atividade auroral (painel a), das condutividades integradas Pedersen e Hall das regiões E e F (painel b), da razão $\sum_H/\sum_P$ (painel c), da deriva vertical Vz (painel d) e da deriva zonal Vy observada e calculada (painéis e e f) considerando os efeitos da precipitação de partículas (P1) para diferentes condições.

A Figura 4.19 mostra os perfis de condutividade Pedersen e Hall em -12° de latitude para alguns minutos antes, durante e depois da inclusão da precipitação de partículas. Observa-se que, nessa localidade, na qual o tubo de

fluxo com o apéx em 400 km intercepta a camada E, a precipitação de partículas teve contribuição tanto para a condutividade Pedersen quanto para a condutividade Hall. Em 110 km de altura, por exemplo, no horário em que a deriva zonal atingiu seu valor máximo para oeste, σ_H variou de 9,18x10^{-5} S/m para 1,64 x10^{-4} S/m, enquanto que σ_P variou de 7,4x10^{-6} S/m para 1,31x10^{-5} S/m. Nota-se que o aumento de σ_P é mais expressivo quando comparado à condutividade Pedersen integrada ao longo de um tubo de fluxo. A respeito dessa última, observa-se que a curva referente a $\sum_P$ da Figura 4.17 (painel b) pouco se modifica quando a precipitação de partículas é incluída (painel b da Figura 4.18). Isso ocorre porque a integração considera a condutividade Pedersen das regiões E e F. Como durante a noite a condutividade Pedersen da região F é superior à da região E e como o aumento de ionização é incluído somente na região E, os efeitos de tal aumento na condutividade Pedersen integrada são muito pequenos.

Figura 4.19 - Comportamento das condutividades Hall (curva vermelha) e Pedersen (curva azul) incluindo (P1) ou não (P0) a precipitação de partículas para a latitude magnética de -12°, durante o dia 10 de abril de 1997. A precipitação de partículas foi incluída somente entre 0005 UT e 0030 UT.

4.4.4 Evidências do aumento de ionização na região e registradas nos ionogramas

A Figura 4.20 mostra a sequência de ionogramas para a região de Jicamarca durante o dia 10 de abril. Observa-se claramente uma subida da camada a partir do ionograma das 2256 UT em virtude de uma possível penetração de um campo elétrico *undershielding,* conforme já discutido nas seções anteriores. Entre 2232 UT e 2248 UT, nota-se um enfraquecimento da irregularidade da região E (indicado pelas setas em azul) que possivelmente está associado ao

decréscimo da corrente do eletrojato equatorial ao entardecer. A partir das 2330 UT, observa-se o início de um decréscimo na frequência crítica da camada F (indicado pela seta vertical azul), o qual pode ser identificado até o ionograma 00 UT, já que, depois desse horário, os ionogramas apresentam-se espalhados. Esse intervalo corresponde, aproximadamente, ao horário em que se verificou o início da anticorrelação entre Vz e Vy. Além disso, observa-se que no instante em que Vy apresentou um decréscimo na velocidade para leste após as 2330 UT, é possível visualizar o encurvamento no traço da camada F. Posteriormente, mesmo na presença do spread-F, ainda é possível identificar tal encurvamento como, por exemplo, nos ionogramas das 00 UT, 0008 UT e 0016 UT. Tal encurvamento indica um atraso no traço da camada F devido à presença de uma possível intensificação de ionização nas alturas da camada E.

É importante mencionar que as evidências claras de um aumento de ionização nas alturas da camada E certamente seriam vistas na região onde as linhas do tubo de fluxo (que atinge o ápex em 400 km) interceptam a região E. Além disso, deve-se lembrar que todos os cálculos realizados, os quais incluíram um aumento de ionização na região E, foram feitos ao longo desse tubo de fluxo. Assim sendo, o fato dos ionogramas de Jicamarca não mostrarem evidências claras de precipitação de partículas, tal como a formação de uma camada Es, não quer dizer que tal região não tenha sido influenciada por tal fenômeno, uma vez que todos os efeitos são integradas ao longo do tubo de fluxo.

Figura 4.20 - Ionogramas de Jicamarca para o dia 10 de abril de 1997. As setas horizontais indicam um enfraquecimento da camada Es do tipo “q”, enquanto as setas verticais indicam a redução do parâmetro foF2.

No que concerne aos ionogramas de Cachoeira Paulista, apresentados na Figura 4.21, observa-se uma queda abrupta do parâmetro foF2 entre 2130 UT até às 2315 UT. Além disso, entre 2215 UT e 00 UT, observa-se também enfraquecimento e ruptura da camada Es que estava em desenvolvimento, a qual parece ser coincidente com a subida da camada F gerada por um campo elétrico zonal de penetração para leste. Entre 00 UT e 01 UT, nota-se que a camada F começou a descer e, ao mesmo tempo, a frequência crítica desta camada começou a se intensificar.

Nos ionogramas entre 01 UT e 0230 UT, é interessante notar a formação de uma camada Es. Às 0115 UT essa camada se intensifica e bloqueia parte da região F. Neste caso, o parâmetro fbEs apresentou um aumento de 2 para 2,5 MHz. Embora essa evidência clara do aumento de ionização na região E, através de uma camada esporádica, só tenha sido visualizada nos horários posteriores à anticorrelação entre Vy e Vz, é possível que, nesse caso, o fluxo ou a energia das partículas não foram uniformes nas duas regiões. Ademais, é importante relembrar que nos instantes anteriores ao início do decréscimo da deriva zonal de Jicamarca para oeste, a camada Es que estava em curso (Cachoeira Paulista) apresentou um enfraquecimento até se romper completamente. Isso possivelmente foi decorrente de um campo elétrico Hall vertical para cima, induzido pela penetração de um campo elétrico zonal. Assim sendo, o fato de não haver uma camada Es próximo ao horário em que a deriva zonal se inverteu não quer dizer que não houve precipitação de partículas, já que a penetração de um campo elétrico zonal impediu a formação/ intensificação desta camada. A não detecção de uma camada esporádica nesses horários também pode estar associada a uma limitação na digissonda, a qual registra os ecos somente a partir de uma frequência de 1,5 MHz.

Por fim, de acordo com todas as discussões apresentadas sobre os efeitos dessa tempestade magnética na inversão da deriva zonal para oeste, têm-se fortes evidências de que tal inversão teve uma contribuição fundamental da queda da condutividade Pedersen integrada, causada pela penetração de um

campo elétrico zonal. Somado a isso, os resultados aqui expostos mostram que, se uma pequena intensificação na condutividade Hall for incluída no cálculo da deriva, uma melhor concordância entre os dados observados e os simulados pode ser encontrada.

Figura 4.21 - Ionogramas de Cachoeira Paulista para o dia 10 de abril de 1997. As setas horizontais indicam o surgimento da camada Es, e as setas verticais indicam a redução do parâmetro foF2 e o aumento do parâmetro fbEs no ionograma das 0115 UT.

5 ANÁLISE DA DERIVA ZONAL DA BOLHA DE PLASMA SOBRE A REGIÃO BRASILEIRA DURANTE TEMPESTADES MAGNÉTICAS: OBSERVAÇÕES E SIMULAÇÕES

Conforme citado por Sobral et al. (2011), as depleções do plasma em grande escala tem sido amplamente estudadas e caracterizadas por se moverem na maioria das vezes para leste, entretanto alguns casos de movimento para oeste também têm sido detectados. Dentre os motivos que geram a deriva para oeste durante períodos perturbados, destacam-se os ventos perturbados e o campo elétrico vertical Hall induzido pela penetração de um campo elétrico zonal (Abdu et al., 1998). A fim de averiguar qual a importância desses dois parâmetros na definição do movimento zonal para oeste, a deriva zonal da bolha do plasma para a região de São João do Cariri durante as tempestades magnéticas dos dias 23-24 de setembro de 2003 e 08-09 de novembro de 2004 foi investigada e será discutida neste capítulo com base nas simulações da ionosfera feitas pelo modelo SUPIM-INPE.

5.1 Tempestade magnética de 23-24 de setembro de 2003

Os gráficos da Figura 5.1 apresentam os índices interplanetários e geomagnéticos para os dias 21 a 24 de setembro de 2003. O comportamento oscilatório, de longa duração e de grande intensidade desses índices indica que a eletrodinâmica responsável pelo movimento da bolha de plasma para oeste entre os dias 23 e 24 pode ter tido fortes contribuições tanto do vento zonal perturbado, quanto dos efeitos provocados pela precipitação de partículas energéticas. Observa-se que, durante o intervalo de interesse, denotado pela área sombreada da Figura 5.1, o índice SYM-H atingiu um valor mínimo de -60 nT, o campo magnético interplanetário oscilou entre -10 e 10 nT, o campo elétrico Ey apresentou variações rápidas entre -5 e 5 mV/m e a atividade auroral atingiu valores um pouco superiores a 1000 nT.

Figura 5.1 - Comportamento dos índices SYM-H/ASY-D, Bz, Ey e AE/AL durante os dias 21 a 25 de setembro de 2003. A área hachurada indica, aproximadamente, o intervalo em que se observaram variações no movimento zonal da bolha do plasma para leste.

Com o intuito de verificar detalhadamente como ocorreu a inversão da deriva zonal da bolha para oeste durante esta atividade magnética, apresenta-se, na Figura 5.2, o comportamento dos índices Bz e AE, da velocidade zonal da bolha, das derivas vertical e zonal das irregularidades do plasma calculadas pelo software *Drift-Explorer* (DE) a partir dos dados da DPS de Fortaleza, bem como o comportamento do parâmetro fbEs (frequência de Blanketing da camada Es). As linhas pontilhadas em azul nos painéis c, e, obtidas através de uma análise visual, indicam ótima concordância entre a deriva zonal da bolha e a deriva zonal do plasma ambiente (Vy_DE), inclusive no que diz respeito ao horário de inversão para oeste que, neste caso, apresentou uma defasagem de apenas 10 minutos, conforme indicado pelas setas vermelhas. Além disso, nota-se uma clara anticorrelação entre as derivas zonal (Vy_DE) e vertical

(Vz_DE) obtidas pelas digissondas de Fortaleza. A barra horizontal em laranja indica ocorrência do espalhamento do traço da camada F, que, nesse caso, se apresentou forte (indicado pelas linhas densas) até as 0230 UT e depois foi enfraquecendo com o passar do tempo.

Na Figura 5.2, nota-se que o campo magnético interplanetário (painel a) se inverte para sul às ~2310 UT/2010 LT (indicado pela seta vermelha) e pouco tempo depois a atividade auroral (painel b) começa a se intensificar. Às 0030 UT/ 2130 LT Bz inverte-se novamente para sul (indicado pela seta vermelha) e, a partir desse horário, uma tendência de aumento em Vz_DE (painel d) pode ser identificada. Nos minutos que antecedem às 01 UT/23 LT, observa-se que Bz apresenta uma tendência de recuperação, depois sofre uma forte variação para sul e, logo em seguida, inverte-se para norte (indicado pela seta vermelha). Essa inversão de Bz para norte foi acompanhada por uma recuperação parcial do índice AE, o qual, provavelmente, gerou campo elétrico zonal para leste (*overshielding*) nesses horários, conforme indicado pelo ligeiro aumento da deriva vertical. Esse campo elétrico, por sua vez, induziu a geração de um campo elétrico vertical para cima, o qual foi o responsável pelo início da inversão da bolha para oeste quase que simultaneamente à subida de Vz. Por volta de 0250 UT/2355 LT, Bz se inverte para sul e logo depois para norte. Esse comportamento oscilatório em um pequeno intervalo de tempo parece ter produzido uma pequena flutuação no índice AE e a total inversão no sentido de propagação da bolha para oeste.

Figura 5.2 - Comportamento dos índices Bz e AE, da deriva zonal da bolha de São João de Cariri (Vy_Bolha), da deriva vertical (Vz) e zonal (Vy) obtida pela digissonda de Fortaleza através do software Drif-Explorer e do parâmetro fbEs durante os dias 23 e 24 de setembro de 2003. A curva em cinza representa a deriva zonal média das bolhas para períodos calmos, enquanto a barra horizontal laranja representa a intensidade do spread-F observada no intervalo em questão. As linhas pontilhadas em azul, obtidas a partir de uma análise visual, indicam ótima concordância entre a velocidade da bolha e a velocidade do plasma ambiente, e ajudam o leitor a identificar a anticorrelação entre Vy e Vz.

Devido ao histórico de atividade auroral identificada nos horários anteriores ao início das variações na deriva zonal da bolha, existe a possibilidade de que esse efeito tenha sido o resultado também dos efeitos direto e indireto do vento zonal perturbado. O efeito direto se dá através do próprio vento empurrando o plasma para oeste, já que uma atividade auroral intensa foi detectada vários dias antes do início da inversão da velocidade da bolha (conforme mostrado pela Figura 5.1), o que daria tempo suficiente para os ventos perturbados alcançarem a região equatorial. O efeito indireto ocorre por intermédio do campo elétrico do dínamo perturbado, que é gerado em latitudes geomagnéticas média (~45°) estendendo-se quase instantaneamente para baixas latitudes por meio de correntes elétricas Pedersen. Ademais, é interessante observar na Figura 5.1 que, durante todo o período anterior ao horário em que a velocidade da bolha se inverteu para oeste (indicado pela área hachurada), a atividade auroral foi detectada na ausência de uma tempestade magnética significativa, porém com Bz oscilando rapidamente em torno de zero. Esse comportamento oscilatório pode caracterizar esse evento como sendo um HILDCAA (do inglês high-intensity long-duration auroral electrojet activity), e permite que as partículas sejam injetadas na região auroral, aumentando as correntes elétricas dessa região (aumento da intensidade do índice AE), as quais, por sua vez, resultam nos ventos perturbados (para mais detalhes veja Sobral et al. 2006). Distinguir qual mecanismo relacionado aos ventos perturbados foi mais atuante na definição do movimento zonal para oeste é difícil, já que não há medidas de ventos perturbados para validar essas suposições.

Observa-se que a inversão da velocidade das irregularidades do plasma ambiente Vy_DE, verificada minutos antes da inversão da velocidade da bolha, também ocorre com Bz oscilando rapidamente para norte. As setas vermelhas em destaque na figura ajudam o leitor a identificar os pontos discutidos. Observa-se também que o comportamento da velocidade da bolha para este evento se difere bastante do comportamento representativo de dias calmos (indicado pelo traço contínuo de cor cinza). A curva para os dias calmos mostra

claramente que, após as 23 UT/20 LT, a deriva da bolha para leste diminui, no entanto, permanece nesta mesma direção durante todo o período avaliado.

A conexão entre as derivas zonal e vertical durante as horas discutidas aqui é possível caso haja um aumento de ionização nas alturas da região E. Nesse sentido, uma característica muito interessante que pode ser observada na Fig. 5.2 diz respeito à formação de uma camada Es em Fortaleza (indicada pelo parâmetro fbEs no painel f) durante o intervalo em que a bolha se manteve para oeste a partir das 03 UT/ 00 LT. A formação desta camada é um forte indicativo de um aumento de ionização da camada E. Este assunto voltará a ser discutido no decorrer deste capítulo.

5.1.1 Análise comparativa entre os dados experimentais de foF2 E hmF2 E os resultados do modelo SUPIM-INPE

A comparação entre os dados de foF2 e hmF2 obtidos pela digissonda com os obtidos pelo modelo SUPIM-INPE é apresentada na Figura 5.3. Neste caso, a deriva vertical utilizada como entrada no modelo durante o dia foi a calculada através dos dados obtidos pelos magnetômetros de São Luís e Vassouras. No horário do PRE a deriva foi calculada de acordo com a variação da altura da camada pelo tempo e nos horários seguintes foi obtida pelo software *Drift-Explorer*. No que diz respeito à última, ela foi escolhida já que, nos horários de interesse, os ionogramas apresentavam-se com diferentes níveis de espalhamento e, assim, o cálculo feito a partir da variação da altura da camada pelo tempo não poderia ser considerado confiável. Na falta de outra opção para a deriva vertical noturna sobre a região brasileira, utilizou-se a obtida diretamente pela digissonda, já que excelente concordância foi encontrada entre a deriva zonal obtida por ela com aquela calculada para a bolha.

A Figura 5.3 mostra a variação dos parâmetros foF2 e hmF2 entre 12 UT/09 LT do dia 23 de setembro e 12 UT/09 LT do dia seguinte. Como o movimento da bolha de plasma para oeste ocorreu sob forte influência dos ventos perturbados, os primeiros resultados encontrados com a simulação não apresentaram boa concordância com os dados observados (pois os ventos do

modelo não incluem perturbação), conforme mostrado pela curva em cinza, exceto entre 12 UT/09 LT e 16 UT/ 13LT do dia 23.

Como a deriva vertical utilizada no modelo foi considerada confiável, as discrepâncias encontradas nos resultados de hmF2 e foF2 não poderiam, em princípio, ser atribuídas a ela ou ao campo elétrico zonal. Assim sendo, surgiu então a necessidade de alterar os ventos meridionais de modo a obter resultados mais realísticos com o modelo. Para tanto, vários testes foram feitos até que o ajuste do vento meridional gerasse resultados finais compatíveis com os dados observados. A curva em vermelho representa essa situação. Verifica-se que os dados simulados referentes ao parâmetro hmF2 apresentam excelente concordância com o dado experimental (curva preta) entre 12 UT/09LT e 02 UT/23 LT. Em relação à comparação dos resultados referentes ao parâmetro foF2, algumas diferenças ainda podem ser observadas, no entanto, em alguns horários, os resultados são melhores do que os apresentados sem incluir modificação dos ventos.

Figura 5.3 - Comparação entre os parâmetros foF2 e hmF2 obtidos pela digissonda de Fortaleza (curva preta sólida e pontilhada) e pelo modelo SUPIM-INPE considerando os ventos meridionais iniciais obtidos pelo modelo HWM93 (curva zinza) e os ventos meridionais modificados (curva vermelha). A curva pontilhada indica os dados obtidos na presença de spread-F.

Em relação aos horários noturnos, principalmente no intervalo em que o estudo referente ao movimento da bolha está sendo feito, ou seja, entre ~01 UT e 06 UT, a comparação entre os dados modelados e os observados deve ser bem criteriosa, já que os dados da digissonda nesse período foram reduzidos sob forte presença de espalhamento (*spread-F*). Assim sendo, acredita-se que, mesmo diante das diferenças encontradas entre o dado simulado e aquele obtido através dos ionogramas espalhados (curva preta pontilhada), os resultados encontrados são aceitáveis, dado a baixa diferença entre eles e as semelhanças nas formas das curvas.

A Figura 5.4 apresenta uma comparação entre o vento meridional magnético efetivo inicial, o qual resultou no comportamento de hmF2 e foF2, indicado pela

curva cinza na Figura 5.3, e o vento meridional magnético efetivo modificado, responsável pelos resultados indicados pela curva em vermelho na mesma figura. Apenas alguns intervalos são apresentados na Figura 5.4, como por exemplo, às 16 UT, 04 UT e 10 UT. Basicamente, a alteração nos ventos foi feita somando-se ou subtraindo-se uma determinada parcela do vento original.

Figura 5.4 - Distribuição latitudinal e atitudinal do vento meridional efetivo obtido pelo modelo HWM93 para diferentes horários, durante os dias 23 e 24 de setembro de 2003. Os painéis da esquerda apresentam o comportamento do vento meridional inicial, enquanto os painéis da direita se referem aos ventos meridionais modificados.

Tomando como referência a região equatorial na Figura 5.4, observam-se mudanças relevantes no que diz respeito à intensidade e à direção do vento meridional. A respeito disso, Nogueira et al. (2011) calcularam os ventos meridionais termosféricos sobre a região brasileira durante eventos de tempestades magnéticas e encontraram resultados similares aos apresentados na Figura 5.4. Os autores mostraram grande variabilidade no vento meridional

entre 19 LT e 06 LT. Além disso, mudanças drásticas na intensidade do vento associadaa a oscilações na atividade auroral em curtos intervalos de tempo também foram encontradas pelos autores.

Segundo Richmond et al. (2003), durante tempestades magnéticas, a entrada de energia na ionosfera em altas latitudes faz com que essa região se aqueça e assim ventos perturbados termosféricos são gerados e fluem em direção ao equador. Devido à inércia das partículas neutras, algumas horas são necessárias para que o sistema de ventos perturbados se estabeleça. Uma vez que alcançam latitudes geomagnéticas médias, correntes elétricas Pedersen aí formadas pelos ventos neutros perturbados causam o efeito do dínamo perturbado na região equatorial. As variações de foF2 e hmF2 encontradas na Figura 5.3 não foram previstas pelo modelo de ventos utilizado (HWM93), já que esse modelo não considera os efeitos da perturbação.

5.1.2 Deriva zonal considerando a modificação no vento zonal e a inclusão da precipitação de partículas

Os resultados referentes aos efeitos da tempestade magnética entre os dias 23 e 24 de setembro na deriva zonal da bolha sobre a região brasileira são apresentados na Figura 5.5. Do topo até a base, apresentam-se a atividade auroral, a razão entre as conditividades Hall e Pedersen (P1- com precipitação de partículas; P0 – sem incluir a precipitação de partículas), o vento zonal inicial Uy das regiões E e F; a deriva vertical suavizada e a deriva zonal da bolha juntamente com a deriva zonal calculada.

Os primeiros resultados referentes ao cálculo da deriva zonal são apresentados painel f da Figura 5.5. As curvas em azul/vermelha denotam a deriva zonal calculada sem/com a precipitação de partículas. A comparação dessas duas curvas com a deriva observada (painel f, curva preta) mostra claramente que, embora algumas diferenças entre elas sejam identificadas, principalmente em torno das 23 UT/20 LT, somente no caso em que a precipitação de partículas foi considerada, a deriva zonal calculada aproximou-se melhor da deriva zonal (da bolha) observada. Para que isso fosse possível, foi necessário um aumento

inicial na razão entre as condutividades de 0,25 para 2 (conforme mostrado no painel b). Observa-se ainda que a razão $\sum_H/\sum_P$ continuou a aumentar até as 0640 UT/0340 LT, intervalo em que a velocidade da bolha estava em progresso para oeste. É importante notar também que a inversão da deriva para oeste foi simulada somente no caso em que a precipitação foi incluída (curva vermelha), no entanto o horário exato em que isso ocorreu apresenta uma defasagem de alguns minutos em relação ao dado observado.

Diante dos resultados obtidos com a modelagem, duas características tornaram-se evidentes. A primeira delas se refere à intensidade da deriva nos horários em que antecedem o início da inversão da velocidade da bolha. Nota-se que, nesse caso, o valor máximo da deriva calculada (curvas azul e vermelha) ocorreu pouco tempo depois das 23 UT/20 LT e apresentou um valor de ~ 140 m/s, ao passo que a deriva da bolha nesse mesmo horário foi de apenas 80 m/s. A segunda característica diz respeito ao horário da inversão da deriva, que, nesse caso, apresentou um pequeno atraso em relação ao dado observado. Embora a precipitação de partículas tenha sido fundamental para que uma melhor coerência entre os resultados fosse encontrada, ainda assim parece haver um fator adicional que precisa ser investigado, já que uma diferença de 60 m/s entre a deriva do plasma calculada e a deriva da bolha observada foi detectada às 23 UT/20 LT. Essa diferença, a qual também foi identificada no trabalho de Sobral et al. (2009), pode ser parcialmente decorrente da altura em que a velocidade da bolha foi medida (geralmente abaixo do pico da camada F) e a altura de referência do vento, a qual pode ser maior. Devido à incerteza em quantificar com precisão tal diferença, considera-se válido nesta análise a equivalência entre as velocidades da bolha, da deriva do plasma e do vento neutro. A discussão a seguir será baseada nesta premissa.

Figura 5.5 - Do topo até a base apresenta-se o comportamento da atividade auroral (painel a), da razão $\sum_H/\sum_P$ incluindo (P1) ou não (P0) a precipitação de partículas (painel b), do vento zonal inicial Uy(i) das regiões E e F(painéis c e d), da deriva vertical Vz (painel e) e da deriva zonal Vy observada e calculada (painel f) considerando os ventos iniciais (VyUy(i)P0) e os ventos iniciais + a precipitação de partículas (VyUy(i)P1).

Com o intuito de verificar as diferenças encontradas na intensidade das derivas calculadas e observada (da bolha), o comportamento da deriva zonal

Jicamarca foi avaliado para alguns dias do mês de setembro, a saber: os dias 22, 23, 24, 25 e 26. Nessa avaliação, considerou-se que a deriva zonal de Fortaleza é comparável à de Jicamarca. A Figura 5.6 mostra claramente que a deriva zonal de Jicamarca para os dias avaliados apresentou um valor máximo para oeste de ~ -60 m/s, enquanto a deriva máxima para leste oscilou em torno de 100 m/s. A respeito desta última, a análise é um pouco comprometida em função do grau de espalhamento nos dados. No entanto, a deriva do dia 25 de setembro dá uma pista de que ela atingiu um valor próximo a 100 m/s.

Com base nas observações referentes à Figura 5.6, verificou-se que os valores de deriva encontrados e apresentados na Figura 5.5 estavam muito superiores em relação aos observados em Jicamarca. Enquanto a deriva zonal de Jicamarca atingiu um valor máximo ~ de -60 m/s às ~17 UT, a deriva zonal calculada atingiu um valor de -100 m/s. Às 23 UT, o valor máximo atingido pelo dado de Jicamarca foi de ~100 m/s, enquanto o calculado atingiu um valor de ~ 140 m/s. Diante deste cenário, novamente encontram-se motivos para acreditar que o modelo de ventos utilizado não estava coerente com as observações e, assim, um resultado incompatível estava sendo identificado. Embora Jicamarca esteja situada numa região diferente, principalmente quando se trata do alto valor da declinação magnética no setor brasileiro, a análise dessa região foi fundamental para averiguar como a deriva se comportou especialmente durante o dia, já que nesses horários, a velocidade zonal do plasma pode ser aproximadamente a mesma do vento neutro. Além disso, embora a deriva zonal noturna de Jicamarca esteja bastante ruidosa no dia 23/09, é possível identificar uma tendência de inversão para oeste após as 20 LT, similar ao que ocorreu com a bolha de plasma sobre a região brasileira.

Ademais, os resultados de deriva zonal de Jicamarca inferiores à deriva zonal calculada para a região brasileira podem ser justificados pelo campo magnético mais forte sobre a região peruana. Na realidade, o campo magnético atua como um freio do movimento do tubo de fluxo do plasma ionosférico, ou seja, quanto mais intenso é B mais lentamente o plasma se descola, independente da sua direção. Em outras palavras, a velocidade total de um elemento de

volume de plasma é dado por (escalar) V_{total}=E/B, em que E é a intensidade total do campo elétrico e B a intensidade total do campo magnético no elemento de volume considerado. Sabe-se que o campo magnético na região brasileira é mais fraco que na região peruana. Portanto, grosseiramente falando, o denominador B da velocidade (E/B) seria menor na região brasileira e, consequentemente, a velocidade E/B seria maior. Quando cai a intensidade do B no domínio ionosférico, a intensidade de E também cai. Dessa forma vale dizer o efeito da diminuição ou aumento de B é mais forte que o de E. Portanto na região brasileira B é mais fraco resultando numa deriva E/B mais forte.

Figura 5.6 - Variação da deriva zonal de Jicamarca medida pelo radar de espalhamento incoerente. Os dados foram obtidos no site http://jro.igp.gob.pe/madrigal/ para os dias 22 a 26 de setembro de 2003.

A partir das informações sobre o comportamento da deriva zonal de Jicamarca, vários ajustes foram feitos ao modelo de ventos até que se encontrasse um valor adequado para o vento zonal e, consequentemente, para a deriva do plasma. A modificação nos ventos foi realizada multiplicando-se o vento zonal original por um fator de 0,5.

A Figura 5.7 mostra o resultado final da deriva zonal calculada considerando a modificação nos ventos zonais (painel f, curva azul). Apresenta-se também a deriva zonal considerando a modificação nos ventos e a inclusão da precipitação de partículas (painel f, curva vermelha). Observa-se que a modificação do vento zonal, a qual pode ser verificada principalmente pela comparação entre as curvas Uy_F(i) e Uy_F(m) no painel c, foi de extrema importância para que a deriva calculada fosse compatível com a deriva da bolha às 23 UT, já que os resultados iniciais apontaram uma diferença entre as derivas de ~60 m/s nesse horário.

Com relação ao horário de início da inversão da velocidade da bolha (01 UT/21 LT), nota-se que a correção dos valores do vento zonal foi fundamental para que a deriva calculada se ajustasse melhor à deriva observada. No entanto, essa afirmativa não é válida para o horário em que a inversão da deriva para oeste (às 03 UT/00 LT) foi identificada e nem para o intervalo no qual a bolha manteve o seu movimento na direção oeste. A curva em azul, a qual considera somente os ventos modificados, indica que a deriva se aproximou de zero a partir das 03 UT/00 LT, no entanto a sua inversão só é verificada às 0630 UT/0330 LT, cerca de 3,5 horas após o horário em que a bolha se inverte para oeste. A curva em vermelho mostra que, apenas quando a precipitação de partículas é incluída nos cálculos, uma perfeita concordância entre a deriva observada e aquela calculada pode ser visualizada, tanto em relação ao momento em que ocorre a inversão definitiva da bolha para oeste, quanto nos horários seguintes em que a bolha se manteve para oeste. Observa-se que uma intensificação considerável na razão $\sum_H/\sum_P$ foi necessária para que a velocidade da bolha para oeste fosse melhor simulada. A respeito dessa razão, verifica-se um aumento inicial de 0,25 para 2,0 para que a inversão total da

velocidade ocorresse e depois um aumento de 2,0 para 2,5 para que a bolha mantivesse o seu movimento aproximadamente constante para oeste.

Figura 5.7 - Do topo até a base apresenta-se o comportamento da atividade auroral (painel a), da razão $\sum_H/\sum_P$ incluindo (P1) ou não (P0) a precipitação de partículas (painel b), do vento zonal inicial Uy(i) e modificado Uy(m) das regiões E e F(painéis c e d), da deriva vertical Vz (painel e) e da deriva zonal Vy observada e calculada (painel f) considerando os ventos modificados (VyUy(m)P0) e os ventos modificados + a precipitação de partículas (VyUy(m)P1).

A distribuição latitudinal e com a hora do vento zonal na Figura 5.8 mostra como o vento zonal foi alterado a fim de gerar resultados coerentes com os dados. Considerando a região equatorial, observa-se que, no caso do vento zonal inicial, a inversão para oeste ocorreu por volta de 19 UT/16 LT. Depois disso, o vento se intensifica e atinge um valor máximo de ~ 150 m/s às 23 UT/20 LT. A Figura referente à nova versão do vento, por sua vez, mostra que a hora da sua inversão não se modificou, no entanto a nova configuração apresenta valores de vento muito inferiores ao perfil inicial. Nota-se que o valor máximo atingido pelo vento neste caso foi de apenas ~80 m/s às ~ 23 UT/20 LT.

Figura 5.8 - Variação latitudinal e com a hora do vento zonal inicial Uy(i) e modificado Uy(m) obtido pelo modelo HWM93 para a linha de campo com ápex em 400 km, durante os dias 23 e 24 de setembro de 2003. As isolinhas em destaque indicam o horário em que ocorreu a mudança de direção do vento.

A Figura 5.9 apresenta os perfis de condutividade Hall e Pedersen (com e sem precipitação de partículas) para a latitude magnética de -12° durante algumas horas específicas antes, durante e depois da inclusão da precipitação de partículas nos cálculos da deriva. Nota-se que o aumento na razão $\sum_H/\sum_P$ discutido anteriormente foi resultado de um aumento considerável tanto na condutividade Pedersen quanto na condutividade Hall, o qual foi gerado por um fluxo de elétrons variando entre 1,1x10^6 elétrons $cm^{-2}s^{-}1$ e 2,9 x10^5 elétrons $cm^{-2}s^{-}1$, para uma faixa de energia entre 2 a 32 keV. Enquanto os perfis de condutividade Pedersen mostraram um aumento de 10^{-5} S/m para 10^{-4} S/m, a condutividade Hall oscilou de 10^{-4} S/m para 10^{-3} S/m. É importante lembrar que a razão $\sum_H/\sum_P$ é calculada com base nos valores integrados das condutividades das regiões E e F. Enquanto a principal contribuição de $\sum_H$ vem de uma faixa estreita localizada nas alturas da região E, a contribuição para $\sum_P$ vem tanto da região E quanto da região F. Como a inclusão da precipitação de partículas está restrita a região E, isso implica que mesmo que σ_P aumente consideravelmente sobre essa região, o aumento de σ_H prevalece e assim a razão $\sum_H/\sum_P$ aumenta.

Figura 5.9 - Comportamento das condutividades Hall (curva vermelha) e Pedersen (curva azul) incluindo (P1) ou não (P0) a precipitação de partículas para a latitude magnética de -12°, durante os dias 23 e 24 de setembro de 2003. A precipitação de partículas foi incluída somente entre 03 UT e 07 UT

5.1.3 Evidências do aumento de ionização na região e registradas nos ionogramas

Conforme já mencionado e apresentado na Figura 5.2, a presença de uma camada Es em Fortaleza, nos horários em que a bolha se manteve para oeste, pode ser um indicativo da presença de uma ionização extra nas alturas da região E. Na Figura 5.10, observa-se que, às 0350 UT/0050 LT, com Bz para sul, esta camada situa-se acima de 150 km de altura, com uma frequência de topo de ~ 2 MHz. Além disso, observa-se também que, nesse mesmo horário, uma segunda camada Es localizada em ~100 km de altura é detectada pela digissonda, porém se apresenta mais fraca e pode ser vista até o ionograma das 0420 UT/0120 LT.

O formato com que a camada Es mais superior evoluiu nos ionogramas apresentados na Figura 5.10 parece ser bastante interessante. Nota-se que essa camada é mais espessa às 04 UT, com uma frequência de topo > 2,5 MHz e em elevação, e localizada um pouco mais baixa (~147 km) em relação à altura em que foi detectada inicialmente (às 0350 UT). Além disso, uma particularidade muito interessante passa a ser visível nos ionogramas entre 0420 UT e 0440 UT. Verifica-se que, nesse intervalo, a camada Es que estava em pleno desenvolvimento, apresenta um aspecto de uma camada “normal”, ou seja, uma camada fina com frequência crítica parecida com aquelas formadas pela radiação solar. Os ionogramas mostram claramente o traço ordinário (vermelho) e extraordinário (verde) da camada em questão, situada em ~145 km de altura. No entanto, devido à eletrodinâmica complexa envolvida neste evento, este formato de camada se altera rapidamente e o que se vê nos ionogramas seguintes é uma camada Es que se intensifica e atinge valores de ftEs superiores a 7 MHz no ionograma das 0720 UT. Além disso, nota-se uma clara intensificação no parâmetro fbEs entre 0420 UT e 0510 UT. Nos ionogramas a partir das 0610 UT, nota-se nova modificação do formato da camada Es, que neste caso, apresenta um forte grau de espalhamento de acordo com o aumento da frequência. É importante notar que a camada Es apresentou um movimento de descida, a qual atingiu alturas inferiores a 100

km no ionograma das 0720 UT. Esse mesmo comportamento já foi identificado por Abdu et al. (2013), que classificaram essa camada como sendo produzida pelas irregularidades formadas no lado superior da camada.

Figura 5.10 - Ionogramas de Fortaleza para os dias 23 e 24 de setembro de 2003 para diferentes horários. As setas em azul indicam a presença de camadas esporádicas.

A Figura 5.11 apresenta a variação do campo magnético interplanetário Bz entre 21 UT dos dias 23-24 de setembro de 2003 e os ionogramas de Cachoeira Paulista para diferentes horários. Observam-se algumas características similares a Fortaleza no que diz respeito ao comportamento da camada Es. Às 2345 UT/ 2045 LT, nota-se a presença de uma fraca camada em torno de 100 km de altura. Nos dois ionogramas seguintes, a digissonda registra uma camada mais forte e espessa localizada em ~ 150 km.

A análise dos dados referentes ao comportamento de Bz, mostra que a formação e o aparente rompimento dessa camada em 150 km (entre 00 UT e 0015 UT), podem estar associados a uma rápida inversão de Bz para sul às 00 UT e depois para norte às 0015 UT. Esse comportamento de Bz para sul/norte foi acompanhado por um aumento/leve queda no índice AE (conforme indicou a Figura 5.2), a qual pode ter causado um campo elétrico para oeste/leste. As variações de Bz nesses horários citados podem dar origem a um campo elétrico zonal de penetração para oeste/leste que, por sua vez, induz um campo elétrico vertical para baixo/cima, proporcionando, assim, a formação/ rompimento da Es. Em particular, a recuperação gradual da atividade AE, verificada entre 0010 UT e 0200 UT (veja o painel b da Figura 5.2), acompanhada pela variação em Bz, parece ter sido responsável pela ocorrência de uma camada Es intensa em ~100 km, a qual foi observada entre 0045 UT e 0200 UT. Às 0245 UT, tal camada já se apresentava enfraquecida. Uma explicação semelhante também é valida para a evolução da camada Es detectada entre 04 UT e 0630 UT.

Figura 5.11 - Ionogramas de Cachoeira Paulista para os dias 23 e 24 de setembro de 2003 para diferentes horários. As setas em azul indicam a presença de camadas esporádicas.

Às 04 UT/01 LT, uma nova camada pode ser verificada no ionograma, porém, neste caso, possui aspectos diferentes ao que se observou em Fortaleza durante esse mesmo intervalo. Enquanto em Fortaleza a digissonda detectou a formação de uma camada Es em ~145 km de altura, em Cachoeira Paulista registrou-se a formação de uma Es localizada em alturas mais inferiores (~120 km). Conforme discutido anteriormente, em Fortaleza foi detectada uma camada Es com um aspecto de uma camada normal, a qual apresentou um formato encurvado nas frequências superiores tanto em relação ao traço ordinário quanto extraordinário. Em Cachoeira Paulista, essa característica não se repete tão claramente, embora os ionogramas das 04 UT/ 01 LT e 0415 UT/0115 LT apresentem tendência de encurvamento dos traços ordinário e extraordinário.

Observa-se que a camada Es mostrada no ionograma das 0430 UT/ 0130 LT apresenta um espalhamento de ~ 70 km de espessura, desde a sua base em 110 km até o seu topo em ~ 180 km. Às 0445 UT, observa-se a segunda reflexão desta camada em ~ 220 km, característica essa que confirma que esta camada Es é do tipo “blanketing”. Os ionogramas seguintes mostram que essa camada Es se intensifica tanto em frequência quanto em espessura. Por volta de 06 UT/03 LT, a Es começa a se enfraquecer e, no ionograma das 07 UT/04 LT, observa-se praticamente a sua ausência total.

As características dos ionogramas de Fortaleza e, principalmente de Cachoeira Paulista discutidas aqui, apresentam sinais evidentes da influência da precipitação de partículas na formação e dinâmica da camada Es. Além disso, os horários em que essas camadas se manifestaram foram coincidentes com o intervalo no qual a velocidade da bolha se inverteu e manteve o seu movimento para oeste, reforçando assim a ideia de que essa peculiaridade observada na deriva da bolha teve forte influência tanto dos efeitos gerados pelo dínamo perturbado, quanto da precipitação de partículas. Os resultados apresentados neste estudo mostram que, de acordo com a metodologia utilizada, somente a alteração no vento zonal com base no comportamento da deriva zonal do plasma sobre a região de Jicamarca, não foi o suficiente para causar a

inversão do movimento zonal da bolha, evidenciando assim a necessidade de um aumento de ionização na região E para que o dado observacional seja explicado.

A respeito deste mesmo evento estudado aqui, Sobral et al. (2011) modelaram a deriva zonal da bolha, porém sem considerar os efeitos de precipitação de partículas, e concluíram que a inversão para oeste foi causada por uma possível inversão na direção do vento neutro zonal U_y^P de leste para oeste por volta da meia noite local. A comparação entre o horário de inversão da deriva zonal modelada e da deriva zonal da bolha apresentou uma defasagem de ~ 1 hora nos resultados apresentados por eles. Vale ressaltar aqui que a análise realizada por Sobral et al. (2011) se difere do estudado aqui em alguns aspectos, tais como no modelo utilizado para a obtenção de alguns parâmetros da atmosfera ionizada. Enquanto Sobral et al., (2011) utilizaram o modelo IRI (*International Reference Ionosphere*) para obter a densidade eletrônica e a temperatura dos elétrons e o modelo de Scherliess e Fejer (1999) para a obtenção da deriva vertical, o qual é representativo para derivas em períodos calmos, o presente estudo considerou o modelo SUPIM-INPE e os dados obtidos pelas digissondas para obter a deriva vertical. Desse modo, acredita-se que os resultados encontrados nesta tese foram baseados num cenário mais real, no qual a suposição da influência da precipitação de partículas no movimento zonal da bolha para oeste foi justificada pelas diferentes características identificadas nos ionogramas.

Ademais, uma característica muito importante visualizada nos ionogramas, tanto durante a tempestade de setembro de 2003 como na tempestade de junho de 2008 estudada no capítulo anterior, foi em relação à formação de uma camada em altitudes superiores à que geralmente se observa (~100 km). A altura de ocorrência dessas camadas parece corresponder às alturas das chamadas “camadas intermediárias”, cuja ocorrência é detectada frequentemente em médias latitudes. Nessas regiões, uma hipótese para a sua causa é o cisalhamento de ventos devido às marés solares diurnas e semidiurnas. Devido a esse mecanismo de formação, verifica-se que tais

camadas apresentam um movimento descendente em altura, acompanhando assim a decida de fase de marés. No entanto, essa dinâmica das camadas superiores não foi observada nas camadas Es aqui discutidas e assim não se enquadram na categoria das camadas intermediárias. Por outro lado, Abdu et al. (2013) reportou alguns casos de formação de camadas Es associadas a perturbações/tempestades magnéticas, no entanto, as camadas estudadas por eles não se localizavam em altitudes superiores como as que foram identificadas nessa presente pesquisa. Além disso, deve-se ressaltar que na altura em que tais camadas foram observadas, tanto o mecanismo de cisalhamento de ventos, quanto a perturbação nos campos elétricos não é eficiente. Portanto, acredita-se que um estudo mais detalhado precisa ser feito a respeito dessas camadas, já que foram observadas características distintas com relação a outras publicações já realizadas.

Em síntese, os resultados apresentados neste estudo mostraram a importância da precipitação de partículas para que o comportamento da deriva zonal observada fosse explicada. Ao mesmo tempo, os ionogramas mostraram a formação de camadas Es em altitudes superiores. No caso da tempestade de setembro de 2003 ela foi observada em Fortaleza, enquanto a tempestade de junho de 2008 foi observada em Cachoeira Paulista. Diante disso, levanta-se a hipótese de que a formação dessas camadas para a região brasileira pode estar vinculada à precipitação de partículas na região da AMAS durante tempestades magnéticas. No entanto, esta hipótese é apenas especulativa e é preciso estudos mais aprofundados sobre a climatologia dessas camadas para que o mecanismo gerador deste aumento de ionização sobre a região equatorial e de baixas latitudes seja totalmente esclarecido.

5.2 Tempestade magnética de 08-09 de novembro de 2004

Os gráficos da Figura 5.12 apresentam os índices interplanetários e geomagnéticos para os dias 04 a 10 de novembro de 2004. A área hachurada da figura indica o período na qual os fenômenos interessantes para esse estudo ocorreram na ionosfera, tal como a inversão da velocidade da bolha

para oeste, e que serão discutidos no decorrer deste capítulo. Observa-se um comportamento típico de dias calmos até às ~12 UT do dia 07/11. A partir desse horário, o índice AE começa a se intensificar enquanto Bz e Ey apresentam fortes oscilações. O comportamento do índice SYM-H indica que esse evento pode ser classificado como uma tempestade magnética intensa, na qual esse parâmetro atingiu um valor mínimo de -400 nT às 06 UT do dia 08/11.

Figura 5.12 - Comportamento dos índices SYM-H/ASY-D, Bz, Ey e AE/AL durante os dias 04 a 10 de novembro de 2004. A área hachurada indica, aproximadamente, o intervalo em que se observaram variações no movimento zonal da bolha do plasma para leste.

Os dados do imageador all-Sky de São João de Cariri mostraram que, no dia 08 de novembro, a velocidade zonal da bolha de plasma se inverteu totalmente para oeste às ~ 0040 UT/2140 LT e permaneceu nessa mesma direção até o 05 UT/02 LT do dia seguinte (Figura 5.13c). Embora os índices apresentados na Figura 5.12 indiquem que a tempestade magnética já estava na sua fase de recuperação durante esse intervalo, é interessante observar que essa inversão

ocorreu sob influência de uma atividade auroral significativa, a qual atingiu um valor máximo de 1500 nT. A Figura 5.13 mostra em detalhes as condições nas quais a velocidade da bolha se inverteu para oeste.

Figura 5.13 - Comportamento dos índices Bz e AE, da deriva zonal da bolha de São João de Cariri (Vy_Bolha), da deriva vertical (Vz) e zonal (Vy) obtida pela digissonda de Fortaleza através do software Drif-Explorer e do parâmetro fbEs durante os dias 08 e 09 de novembro de 2004. A curva em cinza representa a deriva zonal média das bolhas para períodos calmos, enquanto a barra horizontal laranja representa a intensidade do spread-F observada no intervalo em questão. As linhas pontilhadas em azul, obtidas a partir de uma análise visual, indicam ótima concordância entre a velocidade da bolha e a velocidade do plasma ambiente, e ajudam o leitor a identificar a anticorrelação entre Vy e Vz.

Observa-se que, durante todo o período avaliado, Bz manteve-se para sul e a atividade auroral apresentou momentos de intensificação e recuperação. Conforme indicado pela seta vermelha, nota-se que, a partir das 2330 UT/2030 LT, o índice AE (painel b) apresenta uma tendência de aumento e, nesse mesmo momento, observa-se um decréscimo na velocidade da bolha (painel c) para leste com uma tendência clara de inversão para oeste. Similar ao que ocorreu no evento de setembro de 2003, nota-se uma boa concordância entre a deriva zonal da bolha e a deriva zonal do plasma ambiente (Vy_DE, painel e) sobre a região de Fortaleza. Além disso, constata-se também uma perfeita concordância entre o horário em que ocorreu a inversão total da velocidade da bolha para oeste, que nesse caso foi às 0040 UT/2140 LT. A anticorrelação entre as derivas zonal (Vy_DE, painel e) e vertical (Vz_DE, painel d) obtidas pelas digissondas de Fortaleza também é bem evidente neste caso. O parâmetro fbEs para Fortaleza, apresentado no último painel de cima para baixo, mostra a total ausência de camada Es nos horários anteriores a 01 UT/22 LT. Às 01 UT, nota-se que a atividade auroral se intensifica e, nesse momento, uma camada Es com uma frequência de bloqueio em torno de 1,5 MHz se forma, no entanto, logo nos minutos seguintes é interrompida e só é detectada novamente a partir das 0350 UT/0050 LT.

5.2.1 Análise comparativa entre os dados experimentais de foF2 e hmF2 E os resultados do modelo SUPIM-INPE

A comparação entre os dados de foF2 e hmF2 obtidos pela digissonda e aqueles obtidos pelo modelo SUPIM-INPE é apresentada na Figura 5.14. Como para este evento não foi possível calcular a deriva vertical diurna com os dados de magnetômetros da região brasileira, utilizou-se, como referência, a deriva vertical de Jicamarca. No horário do PRE, a deriva vertical foi calculada com base na variação de altura da camada F pelo tempo e, nos horários seguintes, utilizou-se a deriva obtida pelo software *Drift-Explorer*.

Figura 5.14 - Comparação entre os parâmetros foF2 e hmF2 obtidos pela digissonda de Fortaleza (curva preta sólida e pontilhada) e pelo modelo SUPIM-INPE considerando os ventos iniciais obtidos pelo modelo HWM93 (curva cinza) e os ventos meridionais modificados (curva vermelha). A curva pontilhada indica os dados obtidos na presença de spread-F.

A Figura 5.14 mostra a variação dos parâmetros foF2 e hmF2 de Fortaleza entre 12 UT/09 LT do dia 08 de novembro de 2004 e 12 UT/09 LT do dia seguinte. Entre 14 UT/11 LT e 22 UT/19 LT, observa-se que os primeiros resultados obtidos com o modelo SUPIM-INPE (curva cinza) são razoáveis, em relação ao parâmetro hmF2. Já em relação a foF2, uma diferença de ~4 MHz pode ser verificada em determinados horários. A partir das 22 UT, os resultados simulados diferem muito dos dados observados, embora nesse intervalo o alto grau de espalhamento comprometa a redução dos dados experimentais. Como os resultados encontrados com a simulação não apresentaram boa concordância com os dados observados e como o início da tempestade magnética ocorreu no dia 07 de novembro, têm-se motivos para acreditar que os parâmetros foF2 e hmF2 podem estar sob forte influência dos

ventos perturbados. Assim sendo, modificou-se o modelo de ventos utilizado de modo a obter resultados mais favoráveis.

A modificação dos ventos nesse caso consistiu basicamente em multiplicar o vento meridional magnético do modelo HWM93 por um fator de 0,45 entre 12 UT e 2130 UT e, nos horários seguintes, somou-se uma parcela de 60 m/s ao vento original. O resultado obtido com essas considerações é representado na Figura 5.14 pela curva vermelha. Entre 14 UT/11 LT e 22 UT/19 LT, nota-se uma boa coerência entre o parâmetro hmF2 observado e o simulado. Com relação ao parâmetro foF2, constata-se que os valores obtidos pelo modelo são menores do que os observados por ~ 1MHz, durante o mesmo intervalo. Após as 22 UT/19 LT, os resultados de hmF2 e foF2 considerando a modificação dos ventos, são melhores do que os obtidos anteriormente (curva cinza).

É importante mencionar que a deriva vertical diurna utilizada no modelo foi a de Jicamarca. Sendo assim, a possibilidade dessa deriva não estar correta para a região brasileira não pode ser descartada, já que a região brasileira está sob influência do alto ângulo de declinação magnética. Além disso, no intervalo em que foi utilizada a deriva de Jicamarca, uma forte tempestade magnética foi detectada. Nesse contexto, acredita-se que os resultados obtidos pelo modelo durante esse horário são aceitáveis dentro das limitações acima expostas. No que se refere aos resultados obtidos durante o período noturno, principalmente no intervalo em que a bolha se inverteu para oeste, ou seja, entre ~0040 UT e 05 UT, deve-se lembrar que os dados observados foram reduzidos sob forte presença de espalhamento nos ionogramas. Desse modo, acredita-se que os resultados encontrados são satisfatórios quando se leva em consideração as circunstâncias em que os dados observados foram reduzidos.

5.2.2 Deriva zonal considerando a modificação no vento zonal e a inclusão da precipitação de partículas

Inicialmente, a deriva zonal foi calculada considerando os ventos zonais originais Uy(0) obtidos pelo modelo HWM93. O resultado desse cálculo é representado pela curva azul na Figura 5.15. Similar aos resultados

encontrados para o evento da bolha estudado anteriormente, novamente observa-se que os valores da deriva zonal calculada são superiores aos valores da deriva experimental (curva preta). Como exemplo disso, verifica-se, às 2315 UT/2015 LT, uma diferença de ~ 30 m/s entre os dados simulado e observado. Além disso, nota-se também que inversão da deriva para oeste, considerando esse modelo de ventos, só ocorreu às 0230 UT/2330 LT, portanto ~ 2 horas depois do horário em que o dado experimental mostrou tal inversão.

Figura 5.15 - Deriva zonal calculada de acordo com o vento original obtido pelo modelo HWM93 (curva azul). A curva em preto refere-se a deriva zonal da bolha de plasma de São João do Cariri.

Diante do resultado exposto na Figura 5.15, optou-se por seguir a mesma metodologia empregada para a correção do vento durante o evento de setembro de 2003. Nesse caso, multiplicou-se o vento zonal original (Uy(0)) por um fator de 0,7 de modo a diminuir sua magnitude e, assim, encontrar resultados mais satisfatórios. O vento modificado é indicado como Uy_E(i) e Uy_F(i) na Figura 5.16. A deriva obtida após ser realizado esse procedimento é apresentada no painel f (curva azul). Essa figura mostra também outros parâmetros que serão discutidos no decorrer deste capítulo.

Figura 5.16 - Do topo até a base apresenta-se o comportamento da atividade auroral (painel a), da razão $\sum_H/\sum_P$ incluindo (P1) ou não (P0) a precipitação de partículas (painel b), do vento zonal inicial Uy(i) e modificado Uy(f) das regiões E e F(painéis c e d), da deriva vertical Vz (painel e) e da deriva zonal Vy observada e calculada (painel f) considerando os ventos iniciais (VyUy(i)P0), os ventos iniciais + a precipitação de partículas (VyUy(i)P1) e os ventos modificados + precipitação de partículas (VyUy(f)P1).

Verifica-se que, a deriva zonal representada pela curva azul na Figura 5.16, não mostra boa concordância com a deriva zonal observada. A maior discrepância pode ser identificada, principalmente, no horário de inversão da deriva zonal, que só ocorreu pouco antes das ~03 UT/00 LT. Em relação a razão $\sum_H/\sum_P$ no painel b, verifica-se, através da curva em azul (P0), uma pequena variação entre 21 UT e 23 UT e, no período em que ocorreu a inversão no sentido de propagação da bolha, observa-se um valor praticamente constante de ~ 0,25.

Com o intuito de simular a inversão da bolha para oeste, além da modificação dos ventos utilizada anteriormente, o qual foi denotado na Figura 5.16 como Uy(i), considerou-se também um aumento na razão $\sum_H/\sum_P$ gerado pela precipitação de partículas energéticas. Como esse evento ocorreu sob condições similares ao evento de setembro de 2003 estudado anteriormente, ou seja, sob forte influência de uma atividade magnética iniciada antes do horário de tal inversão, decidiu-se que seria conveniente utilizar o mesmo espectro de energia dos elétrons precipitantes utilizado no primeiro caso e verificar se tal medida seria suficiente para inverter a deriva para oeste como aconteceu no evento de 2003. O resultado dessa análise pode ser identificado pela curva cinza no painel f da Figura 5.16. Observam-se grandes avanços nos resultados obtidos quando se compara a curva cinza, a qual considera a modificação nos ventos e a precipitação de partículas, com a curva azul e a curva preta representativa dos dados observados. Tais avanços só foram obtidos devido ao considerável aumento que a precipitação de partículas gerou na razão $\sum_H/\sum_P$ (de 0,5 para ~2,5).

Embora a precipitação utilizada tenha sido suficiente para que fosse encontrada uma excelente coerência entre os dados observados e os simulados durante o intervalo de 02 UT/23 LT e 05 UT/02 LT, uma diferença de ~ 30 minutos, no que diz respeito ao horário da inversão total da bolha para oeste, ainda pode ser notada. Como, de acordo com o critério adotado, o máximo de precipitação de partículas fora utilizado, a proposta, a partir de agora, para que a inversão da deriva pudesse ser simulada foi com base em

mais uma modificação no vento zonal, a qual está representada na Figura 5.16 pela linha tracejada nos painéis c e d. Nesse caso, o vento foi alterado apenas dentro de um intervalo pré-definido e as modificações nos valores do vento foram feitas subtraindo-se uma parcela do vento original. O resultado da deriva considerando essa modificação é indicado pela curva vermelha. Com relação ao horário de inversão da deriva, nota-se agora uma perfeita coerência em relação aos dados observados.

Em síntese, os resultados apresentados nas Figuras 5.15 e 5.16 mostraram que tanto um aumento na razão $\sum_H/\sum_P$, quanto a modificação no vento zonal tiveram importância fundamental na inversão da deriva zonal da bolha para oeste. Dizer quais dos dois fatores tive mais contribuição é difícil, já que não se têm medidas de ambos para sanar tal dúvida. Abdu et al. (2003) também apresentou um caso em que a velocidade da bolha se inverteu para oeste. Os autores sugeriram que essa inversão foi o resultado de um efeito combinado entre o vento zonal perturbado e um aumento na razão $\sum_H/\sum_P$ causado, possivelmente, pela precipitação de partículas energéticas. O estudo realizado por eles foi apenas qualitativo, já que não foram apresentados quais valores de vento e de precipitação eram responsáveis por tal inversão.

Dentro dos critérios adotados para a análise aqui apresentada, os resultados simulados mostraram que a bolha só se inverteria para oeste às 0040 UT/2140 LT se a razão $\sum_H/\sum_P$ aumentasse de ~0,25 para ~2,25. Além disso, conforme ilustrado na Figura 5.17, o vento zonal da região E deveria decrescer de ~ 57 m/s para ~0 m/s e o vento zonal da região F de ~ 66 m/s para ~ 21 m/s. Embora o vento zonal da região E tenha sido consideravelmente modificado às 0040 UT, observa-se que a deriva zonal é amplamente governada pelo vento zonal da região F. A Figura 5.17 também mostra que a manutenção da velocidade da bolha para a direção oeste, observada a partir das 02 UT, teve papel fundamental do aumento da razão de $\sum_H/\sum_P$, já que os ventos modificados da região F (curva vermelha), durante esse período, apresentaram apenas pequenas variações quando comparados aos ventos originais do modelo HWM93 (curva preta).

Figura 5.17 – Vento original Uy(0) e modificado Uy(f) obtidos pelo modelo HWM93. A linha vertical pontilhada indica o horário em que a bolha se inverteu para oeste.

5.2.3 Evidências do aumento de ionização na região e registradas nos ionogramas

A Figura 5.18 apresenta os ionogramas registrados pela digissonda de Fortaleza durante os dias 08 e 09 de novembro de 2004. Observa-se um alto grau de spread-F em praticamente todos os ionogramas apresentados. Dentre as características mais importantes observadas, destacam-se três delas. A primeira se refere à tendência de encurvamento do traço da região F. Conforme indica o círculo preto, essa particularidade observada principalmente no ionograma das 0020 UT evidencia um aumento de ionização da região E, próximo ao horário em que se detectou a inversão da velocidade da bolha para oeste. A segunda característica refere-se à formação de uma camada Es nos horários em que a bolha manteve seu movimento praticamente constante para oeste. Inicialmente, observa-se a formação de uma nova camada Es em ~110 km às 01 UT, no entanto, nos ionogramas seguintes, nota-se que essa camada se enfraquece até se romper completamente à 0130 UT. Após esse

rompimento, verifica-se, nos ionogramas seguintes, a ausência completa de camada Es, até que, a partir das 0330 UT, uma nova camada se forma e apresenta um formato característico de uma camada Es formada pela precipitação de partículas, ou seja, com um determinado grau de espalhamento. Verifica-se, inclusive, que essa camada bloqueia parte da região F no ionograma das 0410 UT. A terceira característica diz respeito à considerável diminuição da frequência crítica da camada F, indicada pelas setas verticais azuis, às 0150 UT, de ~11 MHz para ~5,5 MHz às 0650 UT. É interessante notar que foi durante essa diminuição de foF2 que a camada Es espalhada se formou e se intensificou.

Entre 06 UT e 0650 UT, é possível identificar a formação e o desenvolvimento de uma outra camada Es localizada em altitudes superiores a observada anteriormente, ou seja, em ~ 130 km. Esse tipo de camada tem sido recorrente em quase todos os eventos aqui estudados, porém, nesse caso, tal camada só foi identificada um pouco mais tarde do que nos outros casos. É interessante notar que, nos ionogramas das 06 UT e 0610 UT, duas camadas Es podem ser identificadas, uma em ~ 130 km e uma outra mais tênue em ~100 km. Enquanto a camada superior se manteve presente até as 0650 UT, a camada em ~100 km logo foi interrompida. Além disso, os ionogramas mostram que nessa camada superior também é possível identificar um traço espalhado, denotando assim uma possível influência da precipitação de partículas na sua formação e desenvolvimento, principalmente às 0620 UT.

Figura 5.18 - Ionogramas de Fortaleza durante os dias 08-09 de novembro de 2004. As setas horizontais indicam formação da camada Es e as setas verticais indicam a redução do parâmetro foF2.

Como durante esta tempestade magnética não havia dados para Cachoeira Paulista, optou-se por utilizar os dados obtidos pela Ionossonda Digital CADI - *Canadian Advanced Digital Ionosonde* - instalada no observatório da UNIVAP (Universidade do Vale do Paraíba) em São José dos Campos (23.2ºS, 45.9ºO) para verificar o que ocorreu em latitudes mais próximas ao centro da AMAS. A Figura 5.19 mostra alguns ionogramas representativos para os horários em que a bolha começou a apresentar um decréscimo na sua velocidade para leste (2330 UT), até o momento em que ocorreu sua total inversão para oeste. Observa-se que, às 2330 UT, já havia a presença de camada Es do tipo blanketing com um formato espalhado em São José dos Campos que perdurou durante todo o intervalo em que a velocidade da bolha estava se invertendo para oeste, ou seja, entre 2330 UT e 0050 UT. Verifica-se que, muito próximo ao horário em que se observou a inversão da velocidade da bolha, a camada Es, às 0035 UT, se intensificou-se ainda mais em relação às Es observadas anteriormente. Entre 0020 UT e 0040 UT, os ionogramas mostram um significativo aumento do parâmetro fbEs, denotando assim uma intensificação ainda maior da ionização da região E. Entre 0040 UT e 0050 UT, a camada Es continuou forte, no entanto o bloqueio do traço da camada F diminuiu.

Figura 5.19 - Ionogramas de São José dos Campos para os dias 08 de novembro de 2004. O eixo x corresponde à frequência em MHz e o eixo y a altura em km.

Os ionogramas expostos na Figura 5.20 mostram que, nos instantes seguintes a total inversão da velocidade da bolha, a camada Es, que estava em pleno desenvolvimento, se enfraqueceu até se romper completamente. Observa-se que a frequência mínima da camada F, que antes atingiu um máximo de ~3,3 MHz (0025 UT, Figura 5.18), normaliza-se em ~1,8 MHz nos ionogramas da Figura 5.20. Embora espalhados, os ionogramas de São José dos Campos não mostraram uma redução drástica no parâmetro foF2 como ocorreu em Fortaleza, característica essa que indica que o aumento de $\sum_H/\sum_P$ na região sob maior influência da AMAS ocorreu basicamente em função de um aumento de $\sum_H$, conforme indicado pela forte camada Es visualizada nos horários de interesse. Em determinados ionogramas, tal camada Es evidencia que sua formação pode estar associada à precipitação de partículas energéticas devido ao espalhamento visto no seu traço.

Figura 5.20 - Ionogramas de São José dos Campos durante os dias 08-09 de novembro de 2004. O eixo x corresponde a frequência em MHz e o eixo y a altura em km.

A Figura 5.21 mostra os ionogramas para a região de Jicamarca. Durante todo o período estudado, a formação de uma camada nas alturas da região E não foi identificada, porém, em vários horários, observa-se o encurvamento do traço da camada F, principalmente às 0045 UT, horário muito próximo ao horário em que a velocidade da bolha se inverteu totalmente para oeste. Além disso, outra característica muito importante é em relação ao decréscimo de foF2 (indicado pelas setas em azul) que se iniciou às 0145 UT e permaneceu durante todo o período mostrado na figura. Os dados de Jicamarca indicam que o aumento de $\sum_H/\sum_P$ nessa região pode estar associado tanto a um aumento da condutividade Hall integrada – evidenciado pelo encurvamento do traço da camada F – como pelo decréscimo rápido da condutividade Pedersen integrada – evidenciado pelo decréscimo do parâmetro foF2.

Em síntese, os ionogramas apresentados para as diferentes regiões apontam que o aumento da $\sum_H/\sum_P$ deve-se tanto a um correspondente aumento em $\sum_H$ como a um corresponde decréscimo em $\sum_P$. Nas regiões mais distantes do centro da AMAS, como Jicamarca e Fortaleza, os ionogramas mostram evidências de um aumento de $\sum_H$ verificado através da presença das camadas Es e de um decréscimo em $\sum_P$, identificado pelo decréscimo de foF2. Já para São José dos Campos, região sob forte influência dos efeitos gerados pela AMAS, a contribuição para o aumento de $\sum_H/\sum_P$ deu-se basicamente em termos de um aumento em $\sum_H$, o qual foi confirmado pelas características das camadas Es vistas durante a inversão da velocidade da bolha para oeste.

Figura 5.21 - Ionogramas de Jicamarca durante os dias 08-09 de novembro de 2004. As setas verticais indicam uma redução do parâmetro foF2. Os círculos pretos denotam o encurvamento do traço da camada F na sua frequência mínima.

5.2.4 Comportamento das derivas zonal e vertical durante o dia 08 de novembro de 2004

Conforme apresentado na Figura 5.12, o índice Dst (SYM-H) no início do dia 08 de novembro apresentou um valor mínimo de -400 nT, com Bz fortemente para sul (~ -20 nT). Com o propósito de verificar o que ocorreu na ionosfera durante esse dia, novamente as regiões de Fortaleza, Jicamarca e São José dos Campos foram estudadas durante esse período.

A Figura 5.22 mostra os índices SYM-H, Bz e AE e as velocidades Vy e Vz de Fortaleza obtidas pelo *Drift-Explorer*. Observa-se uma forte atividade auroral durante todo o intervalo apresentado na figura. Além disso, notam-se vários casos de anticorrelação entre as derivas durante os intervalos denotados pela área sombreada. Às 0435 UT, verifica-se um aumento na deriva vertical Vz, a qual acompanhada pelo acréscimo da atividade auroral nesse mesmo horário e por uma intensificação na velocidade zonal para oeste. Posteriormente, observa-se que, às 0545 UT/0245 LT, Vz apresenta uma subida enquanto a deriva para oeste (Vy) se intensifica. Às 0615 UT, nota-se que Vz apresenta uma forte queda (atingindo -80 m/s) e, praticamente no mesmo instante, uma forte inversão da deriva zonal para leste (até ~80 m/s) pode ser verificada. Nos intervalos seguintes, tanto Vz quando Vy se invertem e atingem um valor de ~0 m/s. Observa-se que esse evento de anticorrelação ocorre próximo às 06 UT e durante um período de decréscimo lento no índice AE, porém superposto a algumas flutuações nesse índice. Acredita-se que as oscilações na atividade auroral durante esse período sejam acompanhadas por um campo elétrico de penetração que pode ter sido o responsável pelas modificações nas derivas vertical e zonal. Próximo às 08 UT, observa-se que as modificações na estrutura da deriva vertical ocorreram na fase ascendente do índice AE, a qual deve ter produzido um campo elétrico de penetração para oeste nessa hora local (05 LT). As linhas pontilhadas em vermelho na Figura 5.22 são apenas ilustrativas e mostram a anticorrelação entre as derivas.

Figura 5.22 - Derivas zonal e vertical de Fortaleza obtidas pelo software *Drift-Explorer* para o dia 08 de novembro de 2004.

Os ionogramas apresentados na Figura 5.23 ilustram o comportamento da ionosfera de Fortaleza durante esse dia. É muito interessante notar que, entre 0530 UT e 0545 UT, a camada F aparenta um movimento de descida, o qual é acompanhado por um decréscimo rápido de foF2 e uma intensificação na camada Es. Durante esse período, identifica-se claramente o formato encurvado nas frequências mínimas da camada F. No que diz respeito à

camada Es, é interessante notar uma peculiaridade no seu desenvolvimento. Entre 0530 UT e 0550 UT, observa-se uma camada Es fraca e espalhada. Nos instantes seguintes, nota-se que essa camada se intensifica com um formato espalhado que se desprende da sua base em 100 km, principalmente entre 0650 UT e 0710 UT. A permanência dessa camada Es é consistente com o baixo valor de foF2. Entre 0740 UT e 0810 UT, verifica-se uma nova configuração de camada Es, a qual se intensifica com a descida da camada F e com o aumento de foF2 devido ao nascer do sol.

Em síntese, as características visualizadas nos ionogramas de Fortaleza mostram que a anticorrelação entre Vy e Vz foi acompanhada por uma intensificação na camada Es. De um modo geral, esse evento se enquadra como um bom exemplo de campo elétrico Hall ocorrendo na presença de um campo elétrico de penetração e baixos valores de foF2. Existem fortes indícios de um aumento de ionização da região E, como indicado pelo atraso no traço da frequência inicial dos ionogramas às 0530 UT e 0540 UT. Além disso, pode-se dizer que o formato espalhado com que a camada Es se apresenta nos ionogramas indica que sua formação pode estar associada fortemente à precipitação de partículas energéticas. Diante disso, é possível que a anticorrelação entre as derivas zonal e vertical, conforme verificado na Figura 5.21, seja decorrente de um aumento da razão $\sum_H/\sum_P$, o qual foi gerado tanto por um aumento em $\sum_H$, provocado pela precipitação de partículas, como por um decréscimo de $\sum_P$, evidenciado pelo decréscimo de foF2.

Figura 5.23 - Ionogramas de Fortaleza para o dia 08 de novembro de 2004. As setas horizontais indicam presença da camada Es e as setas verticais indicam uma redução do parâmetro foF2. Os círculos pretos denotam um encurvamento da base da camada F na sua frequência mínima.

Características similares no comportamento das derivas zonal e vertical também foram identificadas em Jicamarca. Na Figura 5.24, observa-se que, às 0545 UT/0045 LT, a deriva vertical Vz apresenta uma subida sob forte influência de uma atividade auroral em ~ 1000 nT. Nesse mesmo momento, observa-se uma pequena intensificação na velocidade zonal para oeste. Nos instantes seguintes, uma forte descida da camada F pode ser visualizada, a qual foi acompanhada por uma diminuição da velocidade zonal para oeste. Posteriormente, uma nova subida de Vz pode ser identificada, juntamente com uma intensificação na velocidade para oeste. Entre 08 UT e 0830 UT, novamente se constata um caso de anticorrelação entre Vy e Vz. Essa mesma característica também é identificada entre 09 e 10 UT. É importante mencionar que a subida e descida da camada F durante o intervalo discutido pode estar associada a uma penetração de campos elétricos *overshielding* e *undershielding,* respectivamente.

Figura 5.24 - Derivas zonal e vertical de Jicamarca obtidas pelo software *Drift-Explorer* para o dia 08 de novembro de 2004

É interessante observar que tanto em Fortaleza quanto em Jicamarca, a anticorrelação entre Vy e Vz foi identificada em vários horários. Inclusive em alguns intervalos, tal anticorrelação ocorreu simultaneamente nas duas regiões. A Figura 5.25 mostra que, nos intervalos discutidos aqui, também é possível identificar nos ionogramas de Jicamarca a curvatura da camada F, principalmente entre 0545 UT e 0730 UT. Além disso, observa-se também a formação de uma fraca camada Es no ionograma das 0730 UT.

Com relação à forte anticorrelação entre Vz e Vy observada entre 09 UT e 10 UT, é muito interessante notar que a curvatura da camada F, indicando a presença de um aumento de ionização da camada E, não é tão evidente nos ionogramas, porém se observa uma rápida diminuição do parâmetro foF2 durante esse período. Às 09 UT, verifica-se que foF2 estava em torno de 7,5 MHz e, aproximadamente 1 hora depois, esse valor alcançou ~ 4 MHz. Após as 10 UT, esse parâmetro se intensifica devido ao nascer do sol e atinge valores superiores a 7 MHz novamente.

Figura 5.25 - Ionogramas de Jicamarca para os dias 08 e 09 de novembro de 2004. A seta horizontal indica a presença da camada Es e as setas verticais indicam uma redução do parâmetro foF2. Os círculos pretos denotam um encurvamento da base da camada F na sua frequência mínima.

Os ionogramas de São José dos Campos também foram investigados e mostram evidências claras do aumento de ionização na região E devido ao alto grau de atraso na frequência inicial da camada F. Na Figura 5.26, observa-se que, mesmo com o traço da camada F espalhado, o ionograma das 0440 UT já mostra tal atraso antes mesmo do horário em que foi observada a anticorrelação entre as derivas de Fortaleza e as derivas de Jicamarca. Os ionogramas das 05 UT, 0510 UT e 0545 UT evidenciam a formação de uma possível camada E em ~150 km (indicada pelo quadrado). Observa-se que a frequência máxima dessa camada coincide com a frequência mínima do traço extraordinário da camada F. Apesar dos ionogramas da Figura 5.26 não estarem apresentados num intervalo constante de tempo, observa-se uma clara diminuição do parâmetro foF2 a partir das 05 UT. Além disso, durante todos os horários apresentados, visualiza-se claramente a curvatura na base da camada F. É interessante observar que o aumento de ionização da região E noturna, verificada através do atraso da frequência da mínima da camada F, repetiu-se em todas as regiões estudadas, ou seja, em Fortaleza, Jicamarca e São José dos Campos.

O ionograma das 0730 UT mostra uma relevante mudança no formato do traço da camada F, a qual pode ter sido gerada pela penetração de um campo elétrico zonal atuando nesses horários. Próximo às 0755 UT, a deformação no traço da camada F cessa e, nesse instante, observa-se a formação de uma camada Es, a qual parece estar associada a uma forte intensificação na atividade auroral, como pode ser visto na Figura 5.24. Observa-se claramente nesse horário que a camada Es formada bloqueou parte da região F. A seta branca no ionograma das 0755 UT indica um aumento considerável da frequência mínima do traço extraordinário da camada F no mesmo instante em que a camada Es foi formada.

Figura 5.26 - Ionogramas de São José dos Campos para o dia 08 de novembro de 2004. O eixo x corresponde à frequência em MHz e o eixo y a altura em km. O quadrado de bordas brancas denota a presença de uma possível camada E formada pela precipitação de partículas, enquanto o quadrado branco demostra a presença de uma camada Es do tipo blanketing.

A Figura 5.27 apresenta o desenvolvimento da camada Es que se formou inicialmente às 0755 UT, conforme mostrado na Figura anterior. É notável que entre 08 UT e 0830 UT e 0915 UT e 10 UT, intervalos nos quais oocorreram casos de anticorrelação entre Vy e Vz em Jicamarca (Figura 5.24), a camada Es formada bloqueia parte da região F. Além disso, verifica-se também que o parâmetro foF2 apresenta um aumento durante esses intervalos. A característica marcante do atraso na frequência mínima da camada F vista nos ionogramas apresentados anteriormente, já não é mais clara a partir das 08 UT.

Figura 5.27 - Ionogramas de São José dos Campos para o dia 08 de novembro de 2004. O eixo x corresponde à frequência em MHz e o eixo y a altura em km.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conexão entre as derivas vertical e zonal da ionosfera para o setor sul americano, durante tempestades magnéticas, foi aqui investigada com base em comparações entre os dados experimentais e os resultados obtidos com a simulação da ionosfera pelo modelo SUPIM-INPE. O propósito desse trabalho foi avaliar quantitativamente os parâmetros físicos responsáveis pela definição do movimento zonal da ionosfera. A grande motivação para essa pesquisa de doutorado foi decorrente dos poucos trabalhos existentes a respeito das derivas zonais perturbadas, as quais, entre outros efeitos, têm importantes impactos na previsão da ocorrência das irregularidades das bolhas ionosféricas sobre um dado local na região equatorial. Além disso, as explicações das flutuações na deriva zonal eram dadas, até então, apenas em termos qualitativos. Para atingir os objetivos propostos, ou seja, simular as flutuações observadas nas derivas dos setores peruano e brasileiro, foram necessárias algumas modificações no modelo de vento utilizado (HWM93), bem como no modelo de precipitação de partículas energéticas embutido no modelo SUPIM-INPE.

A grande contribuição desta pesquisa de doutorado concentra-se, principalmente, no fato de que a perfeita anticorrelação entre as derivas vertical e zonal da ionosfera de Jicamarca, observadas durante atividade magnética, ocorreu exclusivamente devido ao aumento na razão $\sum_H/\sum_P$. Isso só foi possível porque as oscilações nas derivas foram observadas na fase inicial de uma tempestade magnética e, assim, os efeitos dos ventos perturbados puderam ser excluídos. Ressalta-se que, de acordo com as publicações científicas, foi reportado apenas um caso diurno de anticorrelação entre as derivas de Jicamarca durante períodos perturbados, cuja análise não foi tratada com base quantitativa. Assim sendo, destaca-se que, neste trabalho, pela primeira vez apresentaram-se casos de anticorrelação entre as derivas durante a noite, cuja metodologia quantitativa aqui desenvolvida também deverá valer para os casos diurnos.

Para a região brasileira, mostrou-se quantitativamente que a variação na velocidade zonal das bolhas de plasma apresentou uma clara competição entre os ventos perturbados e o aumento na razão $\sum_H/\sum_P$. Tal aumento foi gerado, principalmente, por um acréscimo na condutividade Hall integrada, decorrente da precipitação de partículas energéticas na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul.

Em síntese, e se referindo ao período observado, seguem abaixo as conclusões do estudo de caso para as regiões peruana e brasileira:

24 de Junho de 2008

- O evento estudado para o dia 24 de junho de 2008 apresentou características peculiares da ionosfera sobre Jicamarca. Um exemplo disso foram os valores de foF2 subestimados pelo modelo SUPIM-INPE e a inversão da deriva zonal para leste aproximadamente duas horas mais cedo do que o calculado por esse modelo e pelo modelo de Fejer et al. (2005). As investigações acerca desse assunto revelaram os modelos de irradiância solar (SOLAR2000) e ventos (HWM93) não representaram corretamente esse período de atividade solar mínima acentuada.

- O atraso de ~ 2 horas na inversão da deriva zonal para leste, verificado entre a deriva zonal calculada pelo modelo SUPIM-INPE e a observada, foi identificado durante o dia e na ausência de qualquer tempestade magnética. Os resultados revelaram que as principais diferenças entre os resultados obtidos estavam basicamente associadas ao termo U_y^P. Como a condutividade Pedersen aparentava estar correta durante esse horário, conforme verificado pela coerência entre o parâmetro foF2, concluiu-se que as variações observadas estariam associadas somente ao vento zonal. Desse modo, uma correção foi feita nos ventos zonais do modelo HWM93, porém somente entre 16 UT e 2330 UT, já que após esse horário, iniciaria a tempestade e a deriva aparentava ter fortes contribuições de outros parâmetros, além dos ventos. Após essa correção, excelentes resultados

foram encontrados e assim o horário de inversão da deriva zonal para leste foi previsto pelo modelo.

- Em relação à anticorrelação observada entre as derivas zonal e vertical, associada ao início de uma tempestade magnética ao entardecer do dia 24 de junho, o cálculo da deriva zonal considerando somente o termo U_y^P mostrou claramente que as flutuações na deriva zonal não poderiam ser explicadas somente em termos de ventos. Assim sendo, verificou-se a importante contribuição do termo referente à parcela $\sum_H/\sum_P$ para tal cálculo. A comparação entre os resultados simulados, considerando a correção nos ventos até as 2330 UT, e os observados mostra uma boa concordância durante todo o período avaliado, porém nos instantes em que se observou a anticorrelação entre as derivas experimentais, às ~0010 UT, uma diferença de ~20 m/s foi identificada.

- Uma vez considerando que os ventos utilizados após às 2330 UT estavam corretos e considerando que, após esse horário teve início o desenvolvimento de uma tempestade magnética, as modificações observadas na deriva às 0010 UT foram então atribuídas a um aumento na razão $\sum_H/\sum_P$, gerado por um aumento da ionização na região E pela precipitação de partículas. O resultado final da deriva zonal calculada considerando tal aumento apresentou perfeita coerência com os dados observados.

- A comprovação de que as flutuações da deriva zonal ao entardecer foram decorrentes da precipitação de partículas nesse horário foram identificadas através de algumas características dos ionogramas da região de Jicamarca, Cachoeira Paulista e de Fortaleza. Especificamente, os ionogramas de Cachoeira Paulista mostraram a formação de uma forte camada Es em altitudes superiores ao que geralmente se observa.

- A análise dos ionogramas das três regiões mostrou que, próximo ao horário em que se verificou a tendência de inversão da velocidade zonal de Jicamarca de leste para oeste, uma clara diminuição no parâmetro foF2

também foi identificada. Essa característica, recorrente nas três regiões estudadas, indica que a tendência de inversão da velocidade zonal para oeste, devido a um aumento da razão $\sum_H/\sum_P$, teve também contribuição fundamental da queda da condutividade integrada $\sum_P$. No entanto, os resultados da deriva zonal calculada mostraram que, se um pequeno aumento de ionização na região E, causado pela precipitação de partículas energéticas, fosse incluído nos cálculos, encontrar-se-iam resultados mais satisfatórios.

- Estrategicamente, a inclusão da precipitação de partículas ficou restrita às alturas da região E, entretanto os seus efeitos afetaram tanto a condutividade Pedersen quanto a condutividade Hall. Porém, o efeito da integração ao longo das linhas de campo foi mais significativo para a condutividade Hall.

- A comparação entre o espectro de energia dos elétrons precipitantes responsável por gerar o aumento de $\sum_H/\sum_P$ e o calculado por Brum (2004) apresentou resultados similares para a faixa de energia entre 2 e 32 keV. Além disso, observou-se também que os valores de fluxo de elétrons utilizados nesse evento são muito inferiores aos valores de fluxo para uma região auroral. Esse resultado é esperado e coerente, uma vez que o fluxo de partículas deve ser muito mais intenso na região auroral do que nas regiões sob influência da AMAS. Sendo assim, acredita-se que o espectro usado no cálculo da deriva foi satisfatório.

- A análise do banco de dados de deriva zonal de Jicamarca para períodos com diferentes níveis de atividade solar mínima mostraram claramente que, durante o ano de 2008, a hora de inversão da deriva zonal ao entardecer (para leste) foi antecipada consideravelmente em relação aos outros anos de atividade solar mínima. A respeito da intensidade da deriva zonal durante o dia, apenas no ano de 2008 é que se verificaram características diferentes em relação aos outros períodos avaliados, evidenciando assim um comportamento peculiar da ionosfera durante esse período de atividade solar mínima prolongada.

10 de Abril de 1997

- A deriva vertical e zonal para esse dia mostrou-se fortemente influenciada pela ação de campos elétricos perturbados. Enquanto um campo elétrico *undershielding/overshielding* ao entardecer fez com que a deriva vertical se intensificasse/decrescesse, a indução de um campo elétrico vertical para cima/baixo fez com que a deriva zonal se invertesse para oeste/leste.

- A comparação dos parâmetros foF2 e hmF2 obtidos com a simulação e aqueles detectados pela digissonda para esse evento mostraram boa concordância até às 00 UT/19 LT. Nos horários seguintes, o forte grau de spread-F observado nos ionogramas fez com que os valores de foF2 e hmF2 reduzidos não fossem confiáveis. No entanto, como as flutuações das derivas foi observada antes desse horário, os resultados utilizados nos cálculos da deriva zonal apresentaram total confiabilidade.

- Observou-se que, de uma maneira geral, a deriva zonal calculada considerando somente o termo U_y^P, representou bem a deriva durante o dia, nos horários em que se constatou ausência de atividade auroral. No entanto, em alguns intervalos, verifica-se que a inclusão do termo $\frac{\Sigma_H}{\Sigma_P}\left(V_Z - U_Z^H\right)$ no cálculo da deriva zonal faz com que resultados mais satisfatórios sejam encontrados. Essa característica foi devido ao considerável valor que a deriva vertical atingiu durante esses intervalos (>25 m/s), e a razão $\sum_H/\sum_P$ que, nesse caso, atingiu um valor de ~1.

- A deriva zonal calculada para esse evento, o qual também corresponde a um período de atividade solar mínima, mostrou que os ventos utilizados no cálculo estavam corretos e, assim, não houve a necessidade de se fazer ajuste nesse parâmetro como ocorreu no evento de junho de 2008.

- O evento de abril de 1997 mostrou uma interessante queda na condutividade integrada Pedersen. Esse comportamento fez com que a razão $\sum_H/\sum_P$ apresentasse um considerável aumento de ~0,5 para 2,8 entre 23 UT e 0030

UT. Por esse motivo, o resultado da deriva zonal calculada para esse caso já foi bom, porém algumas diferenças entre os dados simulado e observado ainda foram encontradas. Com o intuito de encontrar uma explicação para tal diferença, incluiu-se, nos cálculos da deriva, a precipitação de partículas como a causadora de um aumento de ionização na região E, já que havia uma tempestade magnética permitindo que tal fenômeno ocorresse nos horários de interesse. Após essa inclusão, verificou-se que um aumento de ~1,87 para 2,24 na razão $\sum_H/\sum_P$ foi fundamental para que uma boa coerência fosse encontrada entre os dados e o modelo.

- Os ionogramas das regiões de Jicamarca e Cachoeria Paulista evidenciaram que a inversão da deriva zonal para oeste teve uma forte contribuição da queda da condutividade Pedersen integrada, a qual foi possivelmente causada pela penetração de um campo elétrico zonal. Somado a isso, os resultados simulados mostraram que, se uma pequena intensificação na condutividade Hall for incluída no cálculo da deriva, uma melhor concordância entre os dados observados e os simulados pode ser encontrada.

- Os ionogramas de Cachoeira Paulista para este dia mostraram a formação de uma camada Es entre 01 UT e 0230 UT. Embora essa evidência clara de aumento de ionização na região E, através de uma camada esporádica, só tenha sido visualizado nos horários posteriores à anticorrelação entre Vy e Vz, é possível que, nesse caso, a precipitação de partículas nessa localidade especificamente não tenha sido suficiente para gerar uma camada Es ou não tenha ocorrido na altura que propicia a formação de tal camada. Além disso, mesmo nos ionogramas em que uma tendência de encurvamento na frequência mínima do traço da camada F foi identificada, a não detecção de camada esporádica nesses horários pode estar associada a uma limitação na digissonda, a qual registra os ecos somente a partir de uma frequência de 1,5 MHz. Lembra-se aqui que o ideal seria avaliar os ionogramas de uma região localizada em ~-12° de latitude magnética, já que é nessa região que um dos pés da linha de campo magnético, utilizada no

cálculo da deriva zonal, intercepta a região E. Como não há equipamento instalado nessa localidade, não há como comprovar se de fato houve ou não um aumento de ionização devido à precipitação de partículas energéticas.

23-24 de Setembro de 2003

- O evento de 23 a 24 de setembro de 2003 retratou a inversão da deriva zonal da bolha de plasma para a região brasileira, durante a fase principal de uma tempestade magnética. Diferente dos eventos estudados para a região de Jicamarca, essa inversão ocorreu sob forte influência de uma atividade magnética nos horários que antecederam tal inversão.

- Boa concordância foi encontrada entre as derivas zonal obtida pelo imagedor de São João do Cariri e a deriva zonal obtida pela digissonda de Fortaleza. Além disso, uma perfeita anticorrelação entre a deriva zonal e vertical da digissonda também foi observada.

- Como o fenômeno da bolha de plasma se movendo para oeste ocorreu sob forte influência dos ventos perturbados, os primeiros resultados de foF2 e hmF2 encontrados com a simulação não apresentaram boa concordância com os dados observados. Assim sendo, foi necessário realizar modificações nos ventos ao longo do meridiano magnético, de modo a obter resultados mais realistas.

- Os primeiros resultados referentes ao cálculo da deriva zonal mostraram claras diferenças entre a deriva zonal observada e a calculada, principalmente em torno de ~23 UT. Além disso, a inversão da bolha para oeste só foi simulada ~3,5 horas após ao horário em que isso realmente aconteceu. A inclusão da precipitação de partículas foi então adicionada aos cálculos na tentativa de reverter essa situação, porém, apesar de uma melhora nos resultados, um aumento inicial na razão $\sum_H/\sum_P$ de 0,25 para 2 ainda não foi o suficiente para encontrar total coerência com os dados observados.

- Com o intuito de encontrar explicações entre as diferenças encontradas na intensidade das derivas calculada e observada, o comportamento da deriva zonal Jicamarca foi avaliado para alguns dias do mês de setembro. Verificou-se que a deriva zonal de Jicamarca para os dias avaliados apresentou um valor máximo para oeste de ~ 60 m/s, enquanto a deriva máxima para leste oscilou em torno de 100 m/s. Com base nessas informações, concluiu-se que os valores de deriva encontrados para a região brasileira estavam muito superiores em relação aos dados observados de Jicamarca. Nesse contexto, encontraram-se motivos para acreditar que o modelo de ventos utilizado não estava coerente com as observações e, por isso, resultados incompatíveis estavam sendo encontrados.

- Após realizar as modificações no vento zonal, encontraram-se resultados satisfatórios no que diz respeito aos valores da deriva para leste, porém a inversão da velocidade da bolha para oeste só foi representada pela deriva calculada após um considerável aumento na razão $\sum_H/\sum_P$. A respeito dessa razão, foi necessário um aumento inicial de 0,25 para 2,0 para que a bolha se invertesse totalmente para oeste, e um aumento de 2,0 para 2,5 para que a bolha mantivesse o seu movimento aproximadamente constante para oeste.

- Com relação às condutividades locais observadas para uma latitude magnética de -12°, observou-se que a inclusão da precipitação de partículas alterou significantemente as condutividades Pedersen e Hall. No entanto, quando se considera um efeito integrado, o aumento na condutividade Hall acaba sendo mais significativo para o aumento da razão $\sum_H/\sum_P$. Enquanto a principal contribuição de $\sum_H$ vem de uma faixa estreita localizada nas alturas da região E, a contribuição para $\sum_P$ vem tanto da região E quanto da região F. Como a inclusão da precipitação de partículas está restrita à região E, isso implica que, mesmo que σ_P aumente consideravelmente sobre essa região, o aumento de σ_H prevalece e assim a razão $\sum_H/\sum_P$ aumenta.

- Nos dias 23 e 24 de setembro, a digissonda de Fortaleza registrou uma dinâmica complexa no comportamento das camadas esporádicas. O ionograma das 0350 UT mostrou a formação de uma camada Es, acima de 150 km de altura virtual, pouco tempo depois da inversão total da bolha. Além disso, nesse mesmo horário, identificou-se também uma segunda camada Es localizada em ~100 km de altura que se manteve presente até o ionograma das 0420 UT/0120 LT.

- As características identificadas nos ionogramas de Fortaleza e Cachoeira Paulista apresentaram sinais evidentes de um aumento na razão $\sum_H/\sum_P$ através da formação e da dinâmica da camada Es. Além disso, os horários em que essas camadas se manifestaram foram coincidentes com o intervalo no qual a bolha inverteu e manteve o seu movimento para oeste, reforçando assim a ideia de que essa peculiaridade observada na deriva da bolha teve forte influência tanto dos efeitos gerados pelo vento perturbado, quanto da precipitação de partículas.

- O formato com que a camada Es, localizada em altitudes superiores à que geralmente se observa, foi encontrada no ionograma a partir das 04 UT/01 LT foi bastante interessante. A digissonda fez o registro de uma camada mais espessa, com a frequência de topo em elevação localizada em ~147 km. Acredita-se que a sua formação não possa estar vinculada ao campo elétrico vertical para baixo associado a Bz para sul, pois este mecanismo enfraquece nas alturas superiores a 105 km.

- Uma particularidade muito interessante foi identificada nos ionogramas de Fortaleza entre 0420 UT/0120 LT e 0440 UT/0140 LT. Observou-se que, nesse intervalo, a camada Es, que estava em pleno desenvolvimento, apresentou o aspecto de uma camada “normal”, ou seja, com características semelhantes àquelas formadas pela radiação solar. Os registros feitos pela digissonda em ~145 km mostraram claramente o traço ordinário e extraordinário da camada em questão. Esse mesmo aspecto também foi identificado em Cachoeria Paulista, porém não tão claramente como ocorreu em Fortaleza.

- Os resultados apresentados neste estudo mostraram uma competição evidente entre o vento zonal e o aumento de $\sum_H/\sum_P$ na definição da inversão da deriva zonal para oeste. De acordo com a metodologia adotada, somente a alteração no vento zonal não foi suficiente para causar a inversão da bolha, evidenciando assim a necessidade de um aumento de ionização na região E para que o dado observacional fosse explicado.

08-09 de Novembro 2004

- Similar ao caso de setembro de 2003, o evento de novembro de 2004 mostrou a inversão da velocidade zonal da bolha para oeste, porém durante a fase de recuperação de uma tempestade magnética. Verificou-se que essa inversão ocorreu sob influência de forte atividade auroral, a qual atingiu um valor máximo de 1500 nT.

- Observou-se que o início de um decréscimo na velocidade da bolha para leste e sua posterior inversão para oeste, ocorreu a partir das 2330 UT/2030 LT, durante uma fase ascendente da atividade auroral e durante uma subida da deriva vertical.

- Excelente concordância foi encontrada entre a deriva zonal da bolha e a deriva zonal das irregularidades do plasma obtida pela digissonda de Fortaleza, principalmente no horário em que ocorreu a inversão definitiva da velocidade da bolha para oeste.

- Similar ao evento de 2003, os primeiros resultados de foF2 obtidos pelo modelo SUPIM-INPE mostraram-se extremamente inferiores aos dados observados. Sendo assim, foi necessário realizar modificações nos ventos meridionais magnéticos de modo a obter valores comparáveis aos dados experimentais. Diferentemente do evento de junho de 2008, neste caso não se justifica o ajuste da radiação solar ionizante, pois logo após o amanhecer do dia os valores calculados de foF2 concordaram com os dados.

- A exemplo do que ocorreu na tempestade de setembro de 2003, novamente a deriva zonal calculada apresentou valores superiores à deriva

experimental. Além disso, observou-se também que inversão da deriva para oeste ocorreu ~ 2 horas depois do horário em que os dados experimentais mostraram tal inversão. Esse resultado mostrou que os ventos zonais obtidos pelo modelo HWM93 não estavam corretos para realizar tal cálculo e precisavam ser diminuídos para que resultados satisfatórios fossem encontrados.

- De um modo geral, as modificações nos ventos zonais fizeram com que a deriva zonal calculada apresentasse boa concordância com o dado experimental, porém no horário em que a inversão da deriva zonal para oeste foi detectada algumas discrepâncias ainda foram observadas.

- Com o intuito de simular a inversão da bolha para oeste, além da modificação dos ventos, foi necessário considerar um aumento na razão $\sum_H/\sum_P$ gerado pela precipitação de partículas energéticas. Para tanto, empregou-se o mesmo espectro de energia dos elétrons precipitantes utilizados no evento da bolha de setembro de 2003. Embora grande melhora tenha sido encontrada nos resultados após a inclusão de um aumento em $\sum_H/\sum_P$, tal medida ainda não foi suficiente para inverter a deriva para oeste que, neste caso, ainda apresentou uma defasagem de ~30 minutos com relação aos dados observados.

- Como, de acordo com o critério adotado, o máximo de precipitação de partículas fora utilizado, a proposta para que o resultado da deriva pudesse ser melhorada foi com base em mais uma modificação no vento zonal. Após essa correção nos ventos, a deriva zonal calculada apresentou uma perfeita concordância com os dados observados.

- Em síntese, os resultados encontrados para o evento de novembro de 2004 mostraram que tanto um aumento na razão $\sum_H/\sum_P$ quanto a modificação no vento zonal tiveram importância fundamental na inversão da deriva zonal da bolha para oeste. Além disso, a manutenção da deriva da bolha nessa direção, observada a partir das 02 UT, teve papel fundamental do aumento da razão de $\sum_H/\sum_P$, já que os ventos modificados da região F, durante esse

período, apresentaram pequenas variações quando comparados aos ventos originais do modelo HWM93.

- Os ionogramas apresentados para as diferentes regiões mostraram que o aumento da $\sum_H/\sum_P$ foi decorrente tanto de um aumento em $\sum_H$ como de um decréscimo em $\sum_P$. Nas regiões mais distantes do centro da AMAS, como Jicamarca e Fortaleza, os ionogramas mostraram evidências do aumento de $\sum_H$ (através das camadas Es) e do decréscimo em $\sum_P$ (decréscimo de foF2). Já para São José dos Campos, região sob forte influência dos efeitos gerados pela AMAS, a contribuição para o aumento de $\sum_H/\sum_P$ se deu basicamente em termos de um aumento em $\sum_H$ confirmado pelas características das camadas Es visualizadas durante a inversão da velocidade da bolha para oeste.

- Durante o dia 08 de novembro de 2004, as derivas zonal e vertical, medidas pelas digissondas, apresentaram-se anticorrelacionadas entre si tanto em Fortaleza como em Jicamarca, durante uma fase de forte atividade auroral, com Bz fortemente para sul (~-20 nT). Esses eventos demostraram que as oscilações na atividade auroral durante esse período tenham sido acompanhadas, possivelmente, por um campo elétrico zonal de penetração, o qual parece ter sido o responsável direto pelas modificações na deriva vertical, e, através da indução do campo elétrico Hall, pelas modificações na deriva zonal.

- Os ionogramas de Fortaleza para o dia 08/11 mostraram que a anticorrelação entre Vy e Vz foi acompanhada pela geração de uma camada Es. De um modo geral, esse evento se enquadra como um bom exemplo de campo elétrico Hall ocorrendo na presença de um campo elétrico de penetração e baixos valores de foF2. Existem fortes indícios de um aumento de ionização da região E, conforme indicado pelo atraso no traço da frequência inicial dos ionogramas. Além disso, pode-se dizer que o formato espalhado com que a camada Es se apresentou nos ionogramas indica que sua formação pode ter sido causada pela precipitação de partículas energéticas. Diante disso, é possível afirmar que a anticorrelação entre as

derivas zonal e vertical tenha ocorrido em função de um aumento da razão $\sum_H/\sum_P$, gerado tanto por um aumento em $\sum_H$ devido à precipitação de partículas, como por um decréscimo de $\sum_P$, evidenciado pelo decréscimo de foF2.

- Os ionogramas de São José dos Campos para esse dia, próximo ao horário em que ocorreu a anticorrelação entre as derivas vertical e zonal, tanto de Fortaleza como de Jicamarca, mostraram fortes evidências do aumento de ionização da região E, verificada pela própria formação de tal camada, e através do forte encurvamento do traço da camada F na sua frequência mínima. Esses resultados confirmam a ocorrência de precipitação de partículas energéticas e os impactos dela nos efeitos eletrodinâmicos da ionosfera em grande extensão longitudinal da América do Sul.

Trabalhos Futuros

Diante do comportamento anômalo das camadas E-esporádicas observadas durantes os eventos estudados, propõe-se, através de um estudo climatológico, fazer um estudo mais detalhado com o intuito de entender melhor os processos físicos e eletrodinâmicos envolvidos na formação dessas camadas localizadas em ~150 km de altura, as quais são também conhecidas como Camadas Intermediárias (CI´s). Embora as camadas aqui estudadas não apresentem o movimento de descida que geralmente se observa nas CI´s, a sua formação nos horários em que a precipitação de partículas foi incluída nos cálculos para explicar as variações na deriva zonal, apresentou evidências de que a sua formação durante períodos perturbados possa estar associada à precipitação de partículas energéticas na região da AMAS.

O caráter anômalo desta camada se deve ao fato que as camadas geradas pelo mecanismo de convergência dos íons, produzida pela precipitação de partículas energéticas e pelo campo elétrico vertical Hall, ocorrem em torno de 100 km, porém a eficiência deste mecanismo decai rapidamente com altura.

Portanto, existe um grande interesse em identificar os possíveis mecanismos de geração dessas camadas (inclusive o papel do cisalhamento de ventos) que ocorrem em alturas maiores, cujas formações dependem da ionização produzida pela precipitação de partículas, durante períodos perturbados. Neste contexto, lista-se a seguir alguns pontos considerados promissores para serem explorados em estudos futuros. São eles:

- Fazer um estudo climatológico e assim examinar os diferentes mecanismos envolvidos na formação das CI´s para as regiões equatoriais e de baixas latitudes;
- Investigar se a formação das CI´s apresenta variabilidade dia a dia, com a hora local, com a atividade solar e magnética e com a sazonalidade;
- Examinar a dependência longitudinal das CI´s. Para isso, pretende-se comparar os dados da região do Brasil com os dados de outros setores longitudinais, como por exemplo, Jicamarca-Peru. Essa análise permitirá avaliar se esta camada sobre a região do Brasil apresenta alguma característica distinta devido às peculiaridades encontradas aqui, tal como a declinação magnética e a presença da AMAS.
- Investigar se há uma conexão entre as camadas intermediárias observadas com os dados de Digissondas e os ecos de 150 km do radar de 30 MHz localizado sobre a região de São Luís;
- Verificar se os movimentos de descida e subida das CI´s serão observados em todos os eventos a serem estudados;
- Verificar se a aparência com que as camadas intermediárias aparecem nos ionogramas para a região brasileira é a mesma observada em outras regiões.
- Estudar com maiores detalhes as conexões entre a ocorrência dessas camadas e a deriva zonal das bolhas ionosféricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, M. A.; ANANTHAKRISHNAN, S.; COUTINHO, E. F.; KRISHNAN, B. A.; REIS, E. M. da S. Azimuthal drift and precipitation of electrons into the South Atlantic Geomagnetic Anomaly during an SC Magnetic storm. **Journal of Geophysical Research**, v. 78, p. 5830-5836, 1973.

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; PIAZZA, L. R.; MASSAMBANI, O. Magnetic storm associated enhanced particle precipitation in the South Atlantic Anomaly evidence fromVLFphase measurements.**Journal of Geophysical Research**,v. 86, p. 7533{7542, set. 1981.

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; WALKER, G. O.; SOBRAL, J. H. A.; TRIVEDI, N. B.; DE PAULA, E. R. Equatorial ionospheric electric fields during magnetospheric disturbances: local time/longitude dependences from recent EITS campaigns. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.57, nº10, p.1065-1083, 1995.

ABDU, M.A; JAYACHANDRAN, P.T.; MACDOUGALL, J.; CECILE, J.F. AND SOBRAL. J.H.A. Equatorial F zonal plasma irregularity drifts under magnetosferic disturbances. **Geophysical Research Letters**, v. 25, n.22, p. 4137-4140, 1998.

ABDU, M. A. Outstanding problems in the equatorial ionosphere – thermosphere electrodynamics relevant to spread F. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, n. 9, p. 869-884, 2001.

ABDU, M.A., BATISTA, I.S., TAKAHASHI; et al. Magnetospheric disturbance induced equatorial plasma bubble development and dynamics: A case study in Brazilian sector. **Journal of Geophysical Research** 108(A12): doi:10.1029/2002JA009721, 2003.

ABDU, M. A. Equatorial ionosphere-thermosphere system: Electrodynamics and irregularities**. Advances in Space Research**, v. 35, n.5, p.771-787, 2005.

ABDU, M. A.; DE SOUZA, J. R.; SOBRAL, J. H. A.; BATISTA, I.S. Magnetic storm associated disturbance dynamo effects in the low and equatorial latitude ionosphere**.** In: TSURUTANI, B. et al. (ed.). **Recurrent magnetic storms:** corotating solar wind streams . Washington, DC: American Geophysical Union, p. 283-304. ISBN 0-87590-432-7, AGU Code GM1674327. Geophysical Monograph Series v. 167, 2006.

ABDU, M. A., T. MARUYAMA, I. S. BATISTA, S. SAITO, AND M. NAKAMURA. Ionospheric responses to the October 2003 superstorm: Longitude/local time effects over equatorial low and middle latitudes, **J. Geophys. Res**., 11 2 , A10306, doi:10.1029/2006JA012228, 2007.

ABDU, M. A., et al, Abnormal evening vertical plasma drift and effects on ESF and EIA over Brazil-South Atlantic sector during the 30 October 2003

superstorm, **J. Geophys. Res**. , 11 3 , A07313, doi:10.1029/2007JA012844, 2008.

ABDU, M.; KHERANI, A. 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, L19103, 5 PP. doi:10.1029/2009GL039919, 2009.

ABDU, M. A., I. S. BATISTA, F. BERTONI, B. W. REINISCH, E. A. KHERANI, AND J. H. A. SOBRAL. Equatorial ionosphere responses to two magnetic storms of moderate intensity from conjugate point observations in Brazil, **J. Geophys. Res.,** 117 , A05321, doi:10.1029/2011JA017174, 2012.

ABDU, M. A.; J. R. SOUZA; I. S. BATISTA; B. G. FEJER; J. H. A. SOBRAL. Sporadic E layer development and disruption at low latitudes by prompt penetration electric fields during magnetic storms, **J. Geophys. Res. Space Physics,** 118, 2639–2647, doi:10.1002/jgra.50271, 2013.

ABDU, M. A., DE SOUZA, J. R., BATISTA, I. S., SANTOS, A. M., SOBRAL, J. H. A., RASTOGI, R. G., AND CHANDRA, H.: The role of electric fields in sporadic E layer formation over low latitudes under quiet and magnetic storm conditions, **J.Atmos. Solar-Terr. Phys.**, 115–116, 95–105, doi:10.1016/j.jastp.2013.12.003, 2014.

AKASOFU, S.; CHAPMAN, S.**Solar terrestrial physics**. Oxford: Oxford University Press, 1972.

ANDERSON, O. N. AND RUSCH, D. W. Composition of the nighttime ionospheric F1 region near the magnetic equator. **Journal of Geophysical Research**, v. 85, n. A2, p. 569-574, 1980.

ANDERSON, D.; ANGHEL, A.; YUMOTO, K.; ISHITSUKA, M.; KUDEKI, E. Estimating daytime vertical ExB drift velocities in the equatorial F-region using groundbased magnetometer observations. **J. Geophys. Res**. v. 29, p. 1596, 2002.

ANDERSON, D.; ANGHEL, A.; CHAU, J.; VELIZ, O. Daytime vertical E × B drift velocities inferred from ground based magnetometer observations at low latitudes, **Space Weather**, 2, S11001, doi:10.1029/2004SW000095, 2004.

ARRUDA, D. C. S. **Estudos das derivas zonais da camada F da ionosfera noturna sobre a região brasileira**. 2005. 202 p. (INPE-14224-TDI/1125). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Disponível em: http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2005/05.25.17.42> Acesso em: 25 mar. 2015.

BATISTA, I.S. AND ABDU, M.A. Magnetic storm associated delayed sporadic E enhancements in the Brazilian Geomagnetic Anomaly. **Journal of Geophysical Research** 82: doi: 10.1029/JA082i029p04777. issn: 0148-0227, 1977.

BATISTA, I. S. **Dínamo da região F equatorial: assimetrias sazonais e longitudinais no setor americano**. 1986. 169 p. (INPE-3760-TDI/206), Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.

BATISTA, IS; DE PAULA, ER; ABDU, MA; TRIVEDI, N.B. Ionospheric effects of the march 13, 1989, magnetic storm at low and equatorial latitudes, Journal of **Geophysical Research-Space Physics**, v96, n. A8, p. 13943-13952, 1991.

BATISTA, I.S.; DE MEDEIROS, R.T.; ABDU, M.A.; DE SOUSA, J.R.; BAILEY, G.J.; DE PAULA, E.R. Equatorial ionosphere vertical plasma drift model over the Brazilian region. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. A5, p. 10887–10892, 1996.

BATISTA, I.S.; ABDU, M.A.; DE SOUSA, J.R.; BERTONI, F; MATSUOKA, M.T.; CAMARGO, P.O.; BAILEY, G.J. Unusual early morning development of the equatorial anomaly in the Brazilian sector during the Halloween magnetic storm. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, A05307, 2006.

BAILEY, G. J.; SELLEK, R. A mathematical model of the Earths plasmasphere and its application in a study of He+ at L=3, **Ann. Geophys**., v. 8, n. 3, p. 171-189, 1990.

BAILEY, G. J.; BALAN, N. Some modelling studies of the equatorial ionosphere using the Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model. **Adv. Space Res**. v. 18, n. 6, p. 59-68, 1996.

BAILEY, G. J.; BALAN, N.; SU, Y. Z. The Sheffield University Ionosphere Plasmasphere Model – A Review. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys**. v. 59, n. 13, p.1541-1552, 1997.

BAKER, D. N. Coupling between the solar wind, Magnetosphere, Ionosphere and Neutral Atmosphere," University of Colorado, Boulder, CO 80309, 2004.

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

BANKS, P.; Kockarts, G. Aeronomy: Part B. New York: Academic Press, 1973.

BERTONI, I.S. BATISTA, M.A. ABDU, B.W. REINISCH, E.A. KHERANI, A comparison of ionospheric vertical drift velocities measured by digisonde and incoherent scatter radar at the magnetic equator. **J. Atmos. Sol.-Terr. Phys**.68,669–678, 2006.

BIONDI, M. A., S. Y. SAZYKIN, B. G. FEJER, J. W. MERIWETHER, AND C. G. FESEN Equatorial and low-latitude thermospheric winds: Measured quiet time

variations with season and solar flux from 1980 to 1990, **J. Geophys. Res.,** 104, 17,091–17,106, doi:10.1029/1999JA900174, 1999.

BITTENCOURT, J. A; ABDU, M. A. Theoretical Comparison between Apparent and Real Vertical Ionization Drift Velocities in the Equatorial F-Region. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. A4, p. 2451-55, 1981.

BLANC, M.; A.D. Richmond. The ionospheric disturbance dynamo, **J. Geophys. Res**., 8, 5, 1669, 1980.

BRUM, C. G. M. **Variabilidade da absorção de ruído cósmico via riômetro e modelagem numérica dos processos associados. 2004. 297 p. (INPE-12330-TDI/993).** Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/08.04.16.30>. Acesso em: 25 mar. 2015.

BULLET, T. **Mid-latitude ionospheric plasma drift**: A comparison of digital ionosonde and incoherent scatter radar measurements at Millstone Hill, Ph.D.thesis, Univ.of Mass., Lowell, 1994.

DAVIES, K. **Ionospheric radio propagation**, Washington, D.C.: National Bureau of Standards Monograph, p. 470, 1965.

DEL POZO, C.F.; HARGREAVES, J.K.; AYLWARD, A.D. Ion composition and effective ion recombination rate in the nighttime auroral lower ionosphere. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.59, n.15, p.1919-1943, 1997.

ECCLES, J. V. A simple model of low latitude electric fields. J**. Geophysical Research**, v. 103, p. 26699-26708, 1998.

FARLEY, D. T.; BONELLI, E.; FEJER, B. G.; LARSEN, M. F. The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere, **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. A12, p. 13723-13728, 1986.

FEJER, B. G., D. T. FARLEY, C. A. GONZALES, R. F. WOODMAN, AND C. CALDERON, F region east-west drifts at Jicamarca, **J. Geophys. Res**., 86, 215, 1981.

FEJER, B. G., E. KUDEKI, AND D. T. FARLEY, Equatorial F region zonal plasma drifts**, J. Geophys. Res.,** 90, 12,249, 1985.

FEJER, B. G.; GONZALEZ, S. A.; WOODMAN, R. F. Average vertical and zonal F-region plasma drifts over Jicamarca, **Journal of Geophysical Research,** v. 96, n. A8, p. 13,901-13,906, 1991.

FEJER, B. G; EMMERT, J.T. Low latitude ionospheric disturbance electric field effects during the recovery phase of the October 19-21, 1998, magnetic storm. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. A12, 1454, 2003.

FEJER, B. G.; J. DE SOUZA; A. S. SANTOS; A. E. C. PEREIRA. Climatology of F region zonal plasma drifts over Jicamarca, **J. Geophys. Res**., 110, A12310, doi:10.1029/2005JA011324, 2005.

FEJER, B. G.; JENSEN, J.W.; SU, S.Y. Seasonal and longitudinal dependence of equatorial disturbance vertical plasma drifts **Geophysical Research Letters**, v. 35, L20106, doi:10.1029/2008GL035584, 2008.

FINLAY, C. C., MAUS, S., BEGGAN; et al. (2010), International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation. **Geophysical Journal International**, 183: 1216–1230. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x, 2010.

FULLER-ROWELL, T. J., D. S. EVANS, Height integrated Pedersen and Hall conductivity patterns inferred from the TIROS-NOAA satellite data, **J. Geophys. Res.**, 92, 7606, 1987.

GALAND, M. Introduction to special section: Proton Precipitation in the Ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, 106(A1): pp. 1–6, 2001.

GALAND, M.; RICHMOND, A. D., Ionospheric Electrical Conductances Produced by Auroral Proton Precipitation, **Journal of Geophysical Research**, 106(A1): pp.117–125, 2001.

GLEDHILL, J. A., “Aeronomic effects of the South Atlantic anomaly. Reviews of Geophysics and Space Physics, v.14: pp. 173–187, 1976.

HAERENDEL, G. Eccles, J. V. and Çakir, S. Theory for Modeling the Equatorial Evening Ionosphere and the Origin of Shear in the Horizontal Plasma Flow. **Journal of Geophysical Research**, v.97, n. A2, p. 1209-1223, 1992.

HARDY, D. A., M. S. GUSSENHOVEN, R. RAISTRICK, W. J. MCNEIL, Statistical and functional representations of the pattern of auroral energy flux, number flux, and conductivity, **J. Geophys. Res**., 92, 12,275–12,294, 1987.

HUANG, C. M., A. D. RICHMOND, AND M. Q. CHEN, Theoretical effects of geomagnetic activity on l ow-latitude ionospheric electric fields, J**. Geophys. Res**. , 11 0, A05312, doi:10.1029/2004JA010994, 2005.

HEDIN, A. E.; Biondi, M. A.; Burnside, R. G.; Hernadez, G.; Johson, R. M.; Killen, T. L.; Mazaudier, C.; Meriwether, J. W.; Salah, J. E.; Sica, R. J.; Smith, R. W.; Spencer, N. W.; Wickwar, V. B.; Virdi, T. S. Revised global model of thermosphere winds using a satellite and ground-based observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, n. A5, p. 7657-7688, 1991.

HEDIN, A.E.; FLEMING, E.L.; MANSON, A.H. et al. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere. **J. Atmos. Terr. Phys**. v. 58, p.1421-1447, 1996.

HEELIS, R. A.; KENDALL, P. C.; MOFFET, R. J.; WINDLE, D. W.; RISHBETH, H. Electrical coupling of the E- and F- region and its effects on the F-region drifts and winds, **Planetary Space Science**, v. 22, n. 5, p. 743-756, 1974.

HEELIS, R.A; Eletrodynamics in the low and middle latitude ionosphere: a tutorial, **Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics**, v. 66,p. 825-838, 2004.

KENDALL, P. C. Geomagnetic control of diffus ion in the F2-region of the ionosphere – I.The form of the diffusion operator. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 24, p. 805-811, 1962.

KELLEY, M.C. **The Earth's ionosphere**. London: Academic Press, 487 p. ISBN (0-12-404012-8), Second Edition, 2008.

KIRCHHOFF, V.W.J.H. Princípios Basicos em Espalhamento Incoerente e sua contribuição para o Estudo da Física da Atmosfera Superior, Revista Brasileira da Física, Vol. 8, N° 1, 1978.

KOUBA, D.; J. BOSKA; I. A. GALKIN; O. SANTOLIK; P. SAULI. Ionospheric drift measurements: Skymap points selection, **Radio Sci.,** 43, RS1S90, doi:10.1029/2007RS003633, 2008.

LIN, C. S., AND H. C. YEH, Satellite observations of electric fields in the South Atlantic anomaly region during the July 2000 magnetic storm, **J. Geophys. Res**., 11 0, A03305, doi:10.1029/2003JA010215, 2005.

LIU, L., J. YANG, H. LE, Y. CHEN, W. WAN, AND C.-C. LEE; Comparative study of the equatorial ionosphere over Jicamarca during recent two solar minima, **J. Geophys. Res.** , 117, A01315, doi:10.1029/2011JA017215, 2012.

LÜHR, H., AND C. XIONG., IRI - 2007 model overestimates electron density during the 23/24 solar minimum, **Geophys. Res. Lett.** , 37, L23101, doi:10.1029/2010GL045430, 2010.

MANN, L. G., S. D. BLOOM, AND H. I. WEST, JR., The electron spectrum from 90 to 1200 kev as observed on Discoverer satellites 29 and 31, **Spac.Res**., 447-482, 1963.

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.

MAUS, S.; S. MACMILLAN; S. MCLEAN et al. **The US/UK World Magnetic Model for 2010-2015**, NOAA Technical Report NESDIS/NGDC, 2010.

MITRA, A.P. A review of D-region processes in non-polar latitudes. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**. v. 30, n. 6, pp. 1065-1114, 1968.

NAKANO, S., G. Ueno, S. Ohtani, and T. Higuchi. Impact of the solar wind dynamic pressure on the Region 2 field-aligned currents, **J. Geophys. Res**., 11 4 , A02221, doi:10.1029/2008JA013674, 2009.

NOGUEIRA, P. A. B., M. A. ABDU, I. S. BATISTA, AND P. M. DE SIQUEIRA , Equatorial ionization anomaly and thermospheric meridional winds during two major storms over Brazilian low latitudes, J**. Atmos. Sol. Terr. Phys**., 73(11 –12), 1535 –1543, doi:10.1016/j.jastp.2011.02.008, 2011.

PICONE J.M.; HEDIN, A.E.; DROB, D.P.; AIKIN, A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. **J. Geophys. Res**. v. 107(A12), p. 1468, 2002. doi:10.1029/2002JA009430.

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

RASTOGI, R. G.; KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric electron content within the equatorial F2 layer anomaly belt. **Journal of Geophysical Research**, v. 95(A11), p. 19045–19052, 1990.

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

REES, M.H. **Physics and chemistry of the upper atmosphere**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 289p.

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

REINISCH, B.W.; SCALI, J.L.; HAINES, D.M. Ionospheric drift measurements with ionosondes, **Annali di Geofisica**, 41, N. 5-6, 695-702, 1998.

REINISCH, B. W.; X. HUANG; I. A. GALKIN; V. PAZNUKHOV; A. KOZLOV. Recent advances in real-time analysis of ionogram and ionospheric drift measurement s with Digisondes, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 67, 1054–1062, 2005.

RICHMOND, A. D; PEYMIRAT C; ROBLE R. G. Long-lasting disturbances in the equatorial ionospheric electric field simulated with a coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere model, **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. A3, 1118, doi:10.1029/20 02JA009758, 2003.

RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. **Introduction to ionospheric physics.** New York; London: Academic Press, ISBN (0125889402), 1969.

RISHBETH, H. The F-layer dynamo. **Planetary and Space Science**, v. 19, n. 2, p.263-267, 1971a.

RISHBETH, H. Polarization fields produced by winds in the equatorial F-region.**Planetary and Space Science**, v. 19, n. 3, p. 357-369, 1971b.

RISHBETH, H. The ionospheric E-layer and F-layer dynamos - a tutorial review. **Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics**, 59(15), 1873-1880, 1997.

ROBINSON, R. M., R. R. VONDRAK, K. MILLER, T. DABBS, AND D. A. HARDY, On calculating ionospheric conductivities from the flux and energy of precipitating electrons, **J**. **Geophys. Res**., 92, 2565, 1987.

SANTANA, D.C**. Estudos da evolução temporal/espacial das derivas das depleções do plasma ionosférico por imagens digitais da aeroluminescência OI 630 nm noturna**. 2001. 131 p. (INPE-8179-TDI/759). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/2001/08.03.12.28>. Acesso em: 25 mar. 2015.

SANTOS, A.M; ABDU, M.A.; SOBRAL, J.H.A.; NOGUEIRA, P.A.B.; CANDIDO, C.M.N. Strong longitudinal difference in ionospheric responses over Fortaleza (Brazil) and Jicamarca (Peru) during the January 2005 magnetic storm, dominated by northward IMF. **Journal of Geophysical Research** , 2012.

SANTOS, A. M.; M. A. ABDU; J. H. A. SOBRAL; M. MASCARENHAS; P. A. B. NOGUEIRA. Equatorial evening prereversal vertical drift dependence on solar EUV flux and F10.7 index during quiet and disturbed periods over Brazil,J**. Geophys. Res. Space Physics**, 118, doi:10.1002/jgra.50438, 2013.

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), SãoJosé dos Campos, 2005.

SASTRI, J. H.; RAO, J. V. S. V.; RAMESH, K. B. Penetration of polar electric field to the nightside dip equator at times of geomagnetic sudden commencements, **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. A10, p. 17517-17523, 1993.

SCHERLIESS, L. A.; FEJER, B.G. Radar and satellite global equatorial F region vertical drift model. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. A4, p. 6829-6842, 1999.

SRIDHARAN, R.: Equatorial and low latitude thermosphere – ionosphere interaction, **Proceedings of Indian National Science Academy**, 64, A, 3, 315–340, 1998.

SINNHUBER, M.; NIEDER, H.; WIETERS, N. Energetic Particle Precipitation and the Chemistry of the Mesosphere/Lower Thermosphere, **Surv. Geophys**., Springer, doi:10.1007/s1071201292013, 2012.

SENIOR C.; BLANC, M. On the control of magnetospheric convection by the special distribution of ionospheric conductivities. **J. Geophys. Res**. vol. 89, n. A1, p. 261-284, 1984.

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI; et al. Effects of intense storms and substorms on the equatorial ionosphere/thermosphere system in the American sector from ground-based and satellite data. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A7, p. 14,305-14,313, 1997.

SOBRAL, J.H.A, M.A. ABDU, C.S. YAMASHITA; et al. Responses of the low-latitude ionosphere to very intense geomagnetic storms, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys**. 63 pp. 965–974, 2001.

SOBRAL J.H.A.; ABDU, M. A.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR; et al. Ionospheric plasma bubble climatology over Brazil based on 22 years (1977-1998) of 630nm airglow observations. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 1214, p. 15171524, 2002.

SOBRAL, J. H. A., ET AL., Equatorial ionospheric responses to high-intensity long-duration auroral electrojet activity (HILDCAA), **J. Geophys. Res**. , 11 1, 07S02, doi:10.1029/2005JA011393, 2006.

SOBRAL, J. H. A., et al. Ionospheric zonal velocities at conjugate points over Brazil during the COPEX campaign: Experimental observations and theoretical validations,**J. Geophys. Res**. , 11 4 , A04309, doi:10.1029/2008JA013896, 2009.

SOBRAL JHA, DE CASTILHO VM, ABDU MA, TAKAHASHI H, PAULINO I, GASPARELO UAC, ARRUDA DCS, MASCARENHAS M, ZAMLUTTI CJ, DENARDINI CM, KOGA D, MEDEIROS AF & BURITI RA. Midnight reversal of ionospheric plasma bubble eastward velocity to westward velocity during geomagnetically quiettime: Climatology and itsmodel validation. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,**73: 1520–1528, ISSN 1364–6826, DOI: 10.1016/j.jastp.2010.11.031, 2011.

SOUZA, J. R. **Modelagem ionosférica em baixas latitudes no Brasil**. 1997. 182 p. (INPE-6395-TDI/611). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São Jose dos Campos, 1997. Disponível em: <http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3r59YCT/GUnSj>. Acesso em: 10 mar. 2015.

SPIRO, R. W. , R. A. WOLF, AND B. G. FEJER. Penetration of high latitude electric field effects to low latitudes during SUNDI AL 19 84, **Ann. Geophys**., 6, 39 – 50, 1988.

SRIDHARAN, R. **Equatorial and low latitude thermosphere-ionosphere interaction**, PINSA, vol.64, n. 3, p.315-340, 1998.

SUBBARAO, K. S. V.; KRISHNAMURTHY, B. V. F-region vertical velocity and its fluctuations at the magnetic equator. **Indian Journal of Radio and Space Physics**, v.12, p. 94-96, 1983.

TITHERIDGE, J. E. Winds in the ionosphere – A review. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics,** v. 57, n. 14, p. 1681-1714, 1995.

TOBISKA, W. K.; WOODS, T.; EPARVIER, F.; et al. The SOLAR2000 empirical solar irradiance model and forecast tool. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 62, p. 1233-1250, 2000.

TORR, M.R.; TORR, D.G. The role of metastable species in the thermosphere. Reviews of Geophysics and Space Physics. v. 20, p. 91-144, 1982.

TSURUTANI, B. T. W. D. GONZALEZ. The interplanetary causes of magnetic storms: A review. In: TSURUTNI, B. T. et al. (eds). **Magnetic storms**. Washington DE: AGU Monograph, 1997.

TSURUTANI, B.T. O.P. VERKHOGLYADOVA, A.J. MANNUCCI et al. Prompt penetration electric fields (PPEFs) and their ionospheric effects during the great magnetic storm of October 30-31, 2003, **J. Geophys. Res**. 113, A5, A05311, 2008.

WHITEHEAD, J. Production and prediction of sporadic E.**Reviews of geophysics and space physics**, v. 8, n. 1, p. 80, 1970.

WOODMAN, R. F.; J. L. CHAU; R. R. ILMA. Comparison of ionosonde and incoherent scatter drift measurements at the magnetic equator, **Geophys. Res. Lett.,** 33, L01103,doi:10.1029/2005GL023692, 2006.