



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DA REGIÃO E IONOSFÉRICA BASEADO EM DADOS DE SONDADORES DIGITAIS E MODELAGEM NUMÉRICA PARA APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO E PREVISÃO DO CLIMA ESPACIAL

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

(PIBIC/CNPq/INPE)

Thainá de Oliveira Bertolotto (Unitau, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: thaina.bertolotto@inpe.br

Dr. Clezio Marcos De Nardin (DAE/CEA/INPE, Orientador)

E-mail: clezio.denardin@inpe.br

COLABORADOR

Dra. Láysa Cristina Araujo Resende Chagas (DAE/INPE)

Julho de 2017

ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DA REGIÃO E IONOSFÉRICA BASEADA EM DADOS DE SONDADORES DIGITAIS E MODELAGEM NUMÉRICA PARA APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO E PREVISÃO DO CLIMA ESPACIAL

Thainá de Oliveira Bertolotto

Iniciação Científica em
Geofísica Espacial, orientada
pelo Dr. Clezio Marcos De
Nardin e Coorientada pela
Dra. Laysa C. A. Resende
Chagas.

INPE

São José dos Campos

2017

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Bolsista:

Thainá de Oliveira Bertolotto

Curso: Engenharia Elétrica e Eletrônica

UNITAU – Universidade de Taubaté

Orientador:

Dr. Clezio Marcos De Nardin

Divisão de Aeronomia - DAE/CEA/INPE – MCT

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

São José dos Campos – SP

Colaborador:

Dra. Laysa Cristina Araújo Resende - DAE/CEA/INPE – MCT

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

São José dos Campos – SP

Local de Trabalho/Execução do Projeto:

O projeto foi desenvolvido na Divisão de Aeronomia (DAE) da Área de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), sob a orientação do Dr. Clezio Marcos De Nardin, pesquisador da divisão e co-orientação da Dra. Láysa Cristina Araujo Resende Chagas.

ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DA REGIÃO E IONOSFÉRICA BASEADA EM DADOS DE SONDADORES DIGITAIS E MODELAGEM NUMÉRICA PARA APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO E PREVISÃO DO CLIMA ESPACIAL

Thainá de Oliveira Bertolotto

Iniciação Científica em
Geofísica Espacial, orientada
pelo Dr. Clezio Marcos De
Nardin e Coorientada pela
Dra. Laysa C. A. Resende
Chagas.

INPE

São José dos Campos

2017

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro.

A Deus, pela vida.

Ao meu orientador Dr. Clezio Marcos De Nardin e minha Co-orientadora Dra Laysa C. A. Resende Chagas, por todo o apoio, dedicação, conselhos e compreensão a fim de realizar um bom trabalho.

A minha família, pelo carinho e presença de todos os dias.

Aos meus amigos de trabalho que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

“Inutilia Truncat”
António Dinis e Silva

RESUMO

As camadas E-esporádicas (Es) ocorrem nas alturas da região E ionosférica, entre 90 e 130 km, e são caracterizadas por serem adensamentos do plasma. Elas são classificadas em tipos distintos de acordo com os seus diferentes mecanismos de formação e a sua morfologia no ionograma. Estes tipos de camadas Es são designados por letras minúsculas (“l”, “f”, “c”, “h” e “q”) dependendo da altitude e a latitude de onde são observadas. Adicionalmente, a sua ocorrência nos ionogramas podem ser afetadas por diversos fenômenos, como sazonalidade, tempestade magnética e fluxo solar. Portanto, pode-se considerar que a camada Es no setor brasileiro é um importante parâmetro em termos de Clima Espacial. Nesse contexto, este trabalho analisou a relação de ocorrência de flares solares, associados ou não a tempestades magnéticas, com o aparecimento das camadas Es nos ionogramas. Os flares solares são filamentos que se desprendem do Sol em direção a Terra carregados de partículas de Raios-X. Eles são detectados através do satélite GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellites*) e são divididos em níveis de intensidade A, B, C, M e X. Os resultados mostraram que quando ocorrem os flares de alta intensidade no fluxo de Raios-X (classes M ou X), os sinais de rádio das camadas Es e das regiões E e F podem ser absorvidos. Esse fenômeno é denominado de “blackouts” de rádio, pois ao absorver as ondas de rádio com comprimento de onda na faixa do HF inibe o acesso dos sondadores ionosférico às camadas superiores e, em certa medida, prejudica o estudo ionosférico utilizando ionogramas. Nesse contexto, este trabalho apresenta um estudo climatológico bem como um estudo de caso dos “blackouts” de rádio para as regiões de São Luís – MA (2° 31’ S, 44° 16’ O), Cachoeira Paulista – SP (22° 39’ S, 45° 00’ O) e Boa Vista – RR (02° 49’ N, 60° 40’ O) entre o período de 2015 e 2016. A fim de complementar este estudo, será mostrado uma climatologia dos tipos de camadas Es para setor brasileiro entre 2006 e 2007. Finalmente, todos os resultados deste trabalho são apresentados e discutidos em termos das diferentes estações do ano.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Mecanismo de formação do Eletrojato Equatorial.....	11
Figura 1.2: Demonstração de um espectro de alta amplitude e finos, característico da Irregularidade do Tipo 1 obtidos por radares de espalhamento coerente em 50 MHz.....	12
Figura 1.3: Demonstração de um espectro de menor amplitude e mais largo, característico da Irregularidade do Tipo 2 obtidos por radares de espalhamento coerente em 50 MHz.....	13
Figura 1.4: Mecanismos da Irregularidade do Tipo 2 ou Deriva de Gradiente..	14
Figura 1.5: Perfil de uma camada do tipo “q”, visualizada pela a digissonda instalada na estação de São Luis – MA no dia 10 de dezembro de 2010 às 14:00.	15
Figura 1.6: Componente H do EEJ e parâmetro $fbEs$ para dias calmos (linha azul) e perturbado (linha vermelha).....	16
Figura 1.7: Camada Es_q (setas pretas) e da camada Es_c (setas vermelhas) durante um evento de CEJ.....	17
Figura 1.8: Presença da Camada Es_a detectada pela a estação de São Luís - MA.	18
Figura 1.9: Evidências de marés semidiurnas e diurnas na formação das camadas Es.	20
Figura 1.10: Mecanismo de formação das camadas Es pela teoria do cisalhamento dos ventos.	21
Figura 1.11: Tipos de camadas Es mais comuns em baixas e médias latitudes vistas pela a estação de Cachoeira Paulista – SP.....	22
Figura 2.1: Fotos da digissonda do tipo DPS onde (a) é a antena transmissora, (b) é a antena receptora e (c) é o sistema de controle, pré-processamento e transmissão de dados.	24
Figura 2.2: Ionograma do dia 10 de Abril de 2007 à 00:15 (UT) para a estação de Cachoeira Paulista que mostra o perfil das componentes ordinárias e extraordinárias.	25
Figura 2.3: Ionograma da estação de São Luís – MA do dia 29 de outubro de 2003, às 09 h 45 min que mostra a região E, subdividida em camada E e camada Es , e a região F	26
Figura 2.4: Interface do programa SAO-X e algumas das ferramentas que o programa fornece para visualização e monitoramento da Ionosfera.	27

Figura 3.1: Distribuição dos tipos de camadas Es para São Luís dividido em períodos noturno e diurno.....	29
Figura 3.2: Distribuição dos tipos de camadas Es para Cachoeira Paulista dividido em períodos noturno e diurno.	31
Figura 3.3: Efeito de uma explosão solar de alta intensidade na ionosfera.....	33
Figura 3.4: Análise da influência dos aumentos súbitos de Raios-X de Classe M nas camadas Es e Região F.....	35
Figura 3.5: Análise da influência dos aumentos súbitos de Raios-X de Classe X nas camadas Es e Região F.....	37
Figura 3.6: Parâmetros do vento solar, pressão e densidade, campo magnético da Terra e índice Dst para o dia 22 de junho de 2015	38
Figura 3.7: Fluxo de Raios-X para o dia 22 de junho de 2015.....	39
Figura 3.8: Ionograma para a região de Boa Vista em 22 de junho de 2015.	40
Figura 3.9: Ionograma para a região de São Luís em 22 de junho de 2015.	41
Figura 3.10: Ionograma para a região de Cachoeira Paulista em 22 de junho de 2015.	42
Figura 3.11: Parâmetro $fbEs$ para as três regiões de estudo em 22 de Junho de 2015.	43
Figura 3.12: Parâmetro $f_{min}F$ para as três regiões de estudo em 22 de Junho de 2015.	44

Sumário

INTRODUÇÃO	9
CAPÍTULO 1 – REVISÃO TEÓRICA.....	10
1.1 O Eletrojato Equatorial (EEJ).....	10
1.2 Irregularidades no Eletrojato Equatorial.....	11
1.2.1 Ecos do Tipo 1 ou Instabilidade de Dois-Feixes (<i>two-stream</i>).....	11
1.2.2 Ecos do Tipo 2 ou Deriva de Gradiente (<i>gradient drift</i>)	12
1.3 Eletrojato Equatorial (EEJ) e as Camadas e Esporádicas (Es)	14
1.4 Camadas Es e o Contra Eletrojato (CEJ).....	15
1.5 Ventos de Marés	19
1.6 Mecanismo dos Ventos de Marés na Formação das Camadas Es	19
CAPÍTULO 2 - INSTRUMENTAÇÃO	23
2.1. Digissonda	23
2.2 Características da digissonda.....	23
2.3 Funcionamento da digissonda	24
2.4 Dados da digissonda	25
CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
3.1 Resultados I – Climatologia das Camadas Es para o setor brasileiro.....	28
3.2 Resultados II – Influência dos Flares Solares de Classes M e X na Ionosfera do Setor Brasileiro	31
a) Classe M	33
b) Classe X.....	35
3.3 Resultados III – Estudo de caso do dia 22 de Junho de 2015.....	37
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES	45
BIBLIOGRAFIA.....	47

INTRODUÇÃO

Neste trabalho serão apresentados os estudos realizados nos meses de agosto de 2016 até julho de 2017. Neste período foram realizados um estudo teórico a fim de iniciar o desenvolvimento da pesquisa referente ao mecanismo de formação das camadas Es. Além disso, foi realizado um trabalho dando ênfase ao equipamento de estudo, a digissonda. A partir disso, foram iniciados os trabalhos referentes aos dados observacionais. Nesse contexto, este trabalho analisou a relação de ocorrência de flares solares, associados ou não a tempestades magnéticas, com o aparecimento das camadas Es nos ionogramas. Foi realizado um estudo climatológico bem como um estudo de caso dos “blackouts” de rádio para as regiões de São Luís – MA (2° 31’ S, 44° 16’ O), Cachoeira Paulista – SP (22° 39’ S, 45° 00’ O) e Boa Vista – RR (02° 49’ N, 60° 40’ O) entre o período de 2015 e 2016. Adicionalmente, foi realizada uma climatologia dos tipos de camadas Es para setor brasileiro entre 2006 e 2007. Os resultados deste trabalho são apresentados e discutidos em termos das diferentes estações do ano. Os resultados mostraram ser importantes no ponto de vista ionosférico e foi submetido à apresentação do SICINPE 2017 – Seminário de Iniciação Científica do INPE.

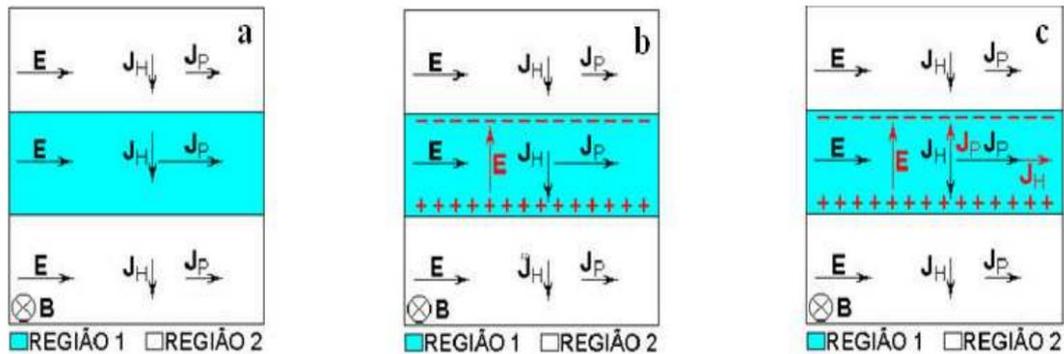
Assim, é apresentado no capítulo 1 a parte teórica sobre a formação das camadas Es. No capítulo 2, o trabalho realizado sobre a parte instrumental. No capítulo 3 os resultados obtidos nesse trabalho bem como as suas discussões. Por fim, as conclusões são apresentadas no capítulo 4.

CAPÍTULO 1 – REVISÃO TEÓRICA

1.1 O Eletrojato Equatorial (EEJ)

O Eletrojato Equatorial (EEJ) é uma corrente que vai de leste (dia) e oeste (noite) e que se localiza no equador magnético na região E da ionosfera. O EEJ possui uma extensão de 600 km na direção norte-sul e possui aproximadamente 90 a 120 km de altitude. Ele é controlado por um sistema global de campos elétricos produzidos pelo o dínamo atmosférico (Denardini, 1999). Um campo elétrico (\mathbf{E}) surge devido ao sistema de correntes presentes na região E polarizar positivamente o terminadouro do lado do amanhecer e negativamente do lado do anoitecer. Esse campo elétrico \mathbf{E} é aplicado à ionosfera equatorial na direção leste. Devida a essa polarização, o campo elétrico \mathbf{E} , tende forçar a formação da corrente de Pedersen (\mathbf{J}_P) com o mesmo sentido. Contudo, tende a aparecer também uma corrente perpendicular a essas e ao campo magnético, chamado de corrente de Hall (\mathbf{J}_H) com o seu sentido para baixo, como mostrado no quadro (a) da figura 1.1. No entanto, a região 1 tem condutividade maior que a região 2 fazendo com que surja correntes mais intensas. Adicionalmente, a corrente \mathbf{J}_H não flui livremente na região 1, acumulando cargas nas fronteiras entre essas regiões como mostrado no quadro (b) da figura 1.1. Para manter a neutralidade de cargas, surge um campo elétrico na direção vertical para cima. Associado a este campo elétrico, há uma corrente em sua direção paralela (\mathbf{J}_P) e perpendicular a este campo elétrico e campo magnético (\mathbf{J}_H). Assim a \mathbf{J}_P tende a anular o efeito da \mathbf{J}_H do campo elétrico inicial. Já a \mathbf{J}_H intensifica a \mathbf{J}_P do campo elétrico inicial fazendo com que exista uma forte corrente para leste, que denominamos de EEJ como mostra o quadro (c) da figura 1.1 (Denardini, 1999; Resende, 2010). Todavia, o mecanismo do EEJ apresenta algumas irregularidades na densidade eletrônica (Bowles et al., 1960) que favorecem o aparecimento das camadas E esporádicas, especialmente as do tipo q, que será abordada na próxima sessão.

Figura 1.1: Mecanismo de formação do Eletrojato Equatorial



Fonte: Denardini, 1999.

1.2 Irregularidades no Eletrojato Equatorial

As irregularidades no EEJ são variações na densidade eletrônica local que são fortemente ligadas ao campo geomagnético e aparecem dia e noite (Denardini, 1999).

Através de radares *Very high frequency* (VHF), foram observados espalhamentos anômalos próximos ao equador magnético (Moro, 2015).

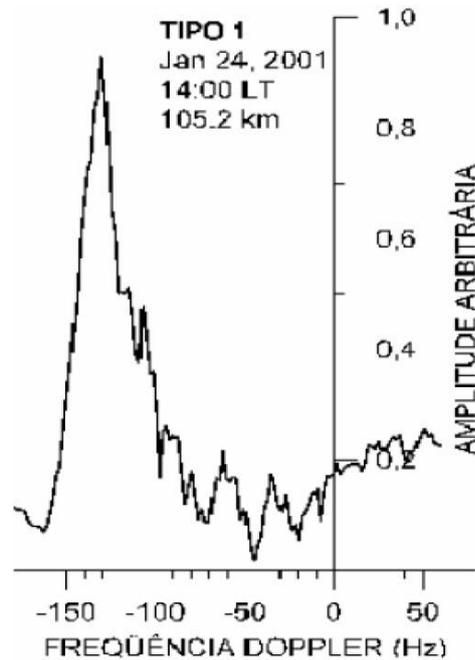
Um experimento de Bowles e Cohen (1962) mostra que as irregularidades no EEJ se movem na direção perpendicular às linhas de campo geomagnético e isso ocorre devido à alta mobilidade dos elétrons ao longo das linhas de campos. Contudo, Bowles e Cohen (1962) ainda observaram que as irregularidades poderiam ser também ondas de plasmas longitudinais, onde a presença de um intenso mecanismo de excitação é uma condição suficiente para a formação dessas ondas (Moro, 2015).

Dentro deste contexto, foram nomeadas algumas irregularidades como Ecos do Tipo 1 ou Instabilidade de Dois-Feixes Modificada (*two-stream*) e Ecos do Tipo 2 ou Deriva de Gradiente (*gradient drift*).

1.2.1 Ecos do Tipo 1 ou Instabilidade de Dois-Feixes (*two-stream*)

As irregularidades do Tipo 1 estão associadas a instabilidades do plasma de Dois-Feixes ou Instabilidade *two-stream* e são esperadas em horários entre as 10 e 13 horas local (Forbes, 1981). São caracterizadas por possuir um espectro fino de alta amplitude e são encontrados predominantemente na parte mais alta do EEJ (figura 1.2).

Figura 1.2: Demonstração de um espectro de alta amplitude e finos, característico da Irregularidade do Tipo 1 obtidos por radares de espalhamento coerente em 50 MHz.



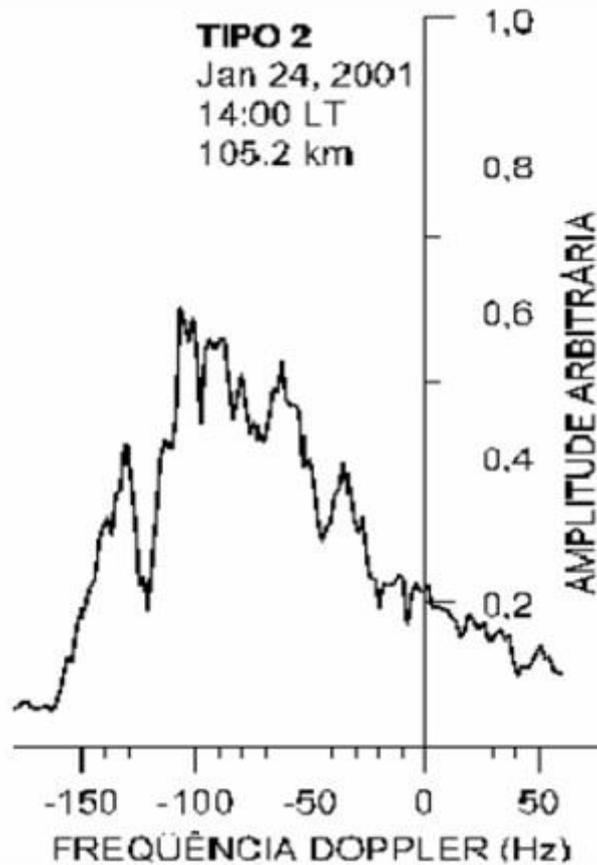
Fonte: Denardini, 2003.

Os Ecos do Tipo 1 são formados quando a força inercial dos íons associada a uma perturbação da densidade, excede a força do gradiente de pressão. Assim, essa perturbação tende a ser destruída, causando difusão através das linhas de campo magnético. Para que isso ocorra é necessária que a velocidade de deslocamento dos elétrons e íons ultrapasse a velocidade íon acústica (Denardini, 1999).

1.2.2 Ecos do Tipo 2 ou Deriva de Gradiente (*gradient drift*)

As irregularidades do Tipo 2 são associadas a instabilidades de plasma chamadas de Deriva de Gradiente ou *gradient drift* (Denardini, 2003). Esses ecos têm como característica um espectro mais largo e de amplitude inferior às irregularidades do Tipo 1 (figura 1.3) (Resende, 2010). Elas podem aparecer desde os primeiros horários da manhã até o pôr-do-sol (Denardini, 1999) e são as principais responsáveis pela formação das camadas E esporádica do tipo “q” no setor brasileiro.

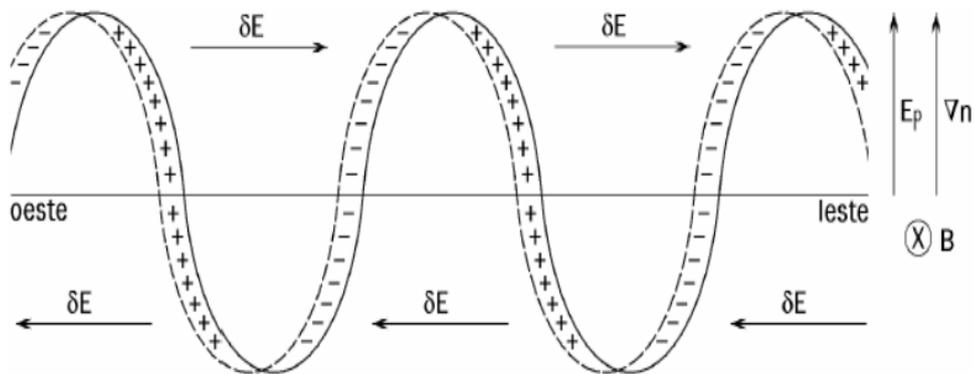
Figura 1.3: Demonstração de um espectro de menor amplitude e mais largo, característico da Irregularidade do Tipo 2 obtidos por radares de espalhamento coerente em 50 MHz.



Fonte: Denardini, 2003.

Os Ecos do Tipo 2 ocorre em plasmas não homogêneos onde os campos elétricos de polarização (\mathbf{E}_p) possuem uma componente muito acentuada na direção paralela ao gradiente de densidade. Devido a existência do campo magnético (\mathbf{B}), o campo elétrico \mathbf{E}_p produz uma força $\mathbf{E}_p \times \mathbf{B}$, que pode ser ascendente ou descendente dependendo da distribuição da densidade da região perturbada. Devido à colisão com os nêutrons, a deriva de íons é menor que a deriva de Hall dos elétrons. Assim são criados, como resultado, os campos de polarização secundários ($\delta\mathbf{E}$). As derivas verticais resultantes movem as regiões mais densas para baixo e as menos densas para cima, portanto a amplitude das perturbações de densidade parece crescer em relação à densidade de fundo (figura 1.4) (Aveiro, 2009).

Figura 1.4: Mecanismos da Irregularidade do Tipo 2 ou Deriva de Gradiente

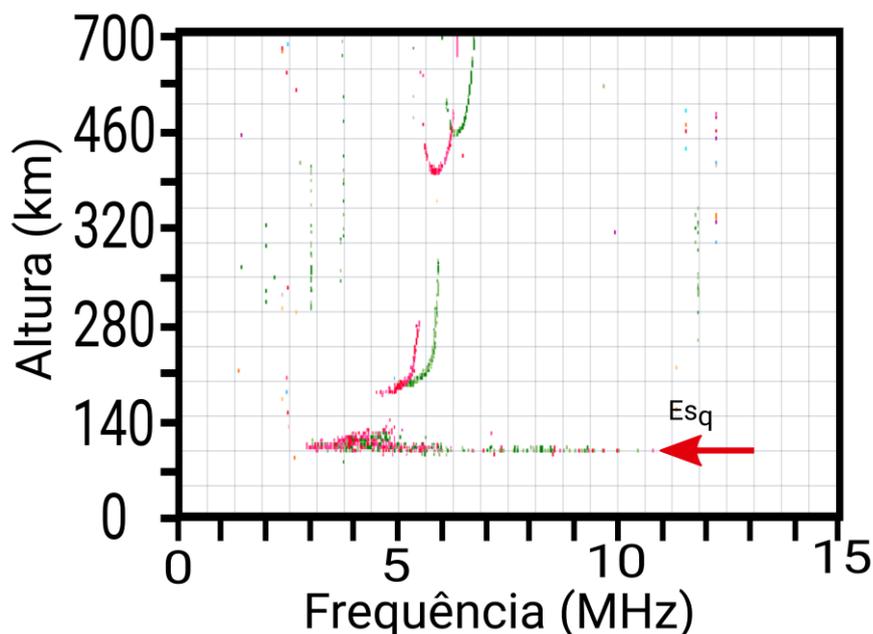


Fonte: Fejer B. G. and Kelley (1980).

1.3 Eletrojato Equatorial (EEJ) e as Camadas e Esporádicas (Es)

No Brasil, na região equatorial magnética, é encontrado principalmente a irregularidade do Tipo 2, responsável pela formação das camadas Es do tipo q nesse setor (Es_q). Um estudo espectral com radares feito por Balsley et al (1976) em Jicamarca ($11,95^\circ$ S, $76,87^\circ$ O) mostrou que as Es_q possuem características similares as irregularidades do Tipo 2. Devido aos processos de formação da irregularidade do Tipo 2, as Es_q duram entre as primeiras horas do dia até o pôr-do-sol e tem como característica não bloquear as camadas superiores. A figura 1.5 é um exemplo da irregularidade do Tipo 2, no qual é mostrado um ionograma com o perfil de uma camada Es_q . Estas camadas são caracterizadas por traços difusos observados a uma altura de 100 km e com frequência máxima de 13 MHz detectadas por uma digissonda DGS em São Luís – MA ($2^\circ 31'$ S, $44^\circ 16'$ O).

Figura 1.5: Perfil de uma camada do tipo “q”, visualizada pela digissonda instalada na estação de São Luis – MA no dia 10 de dezembro de 2010 às 14:00.



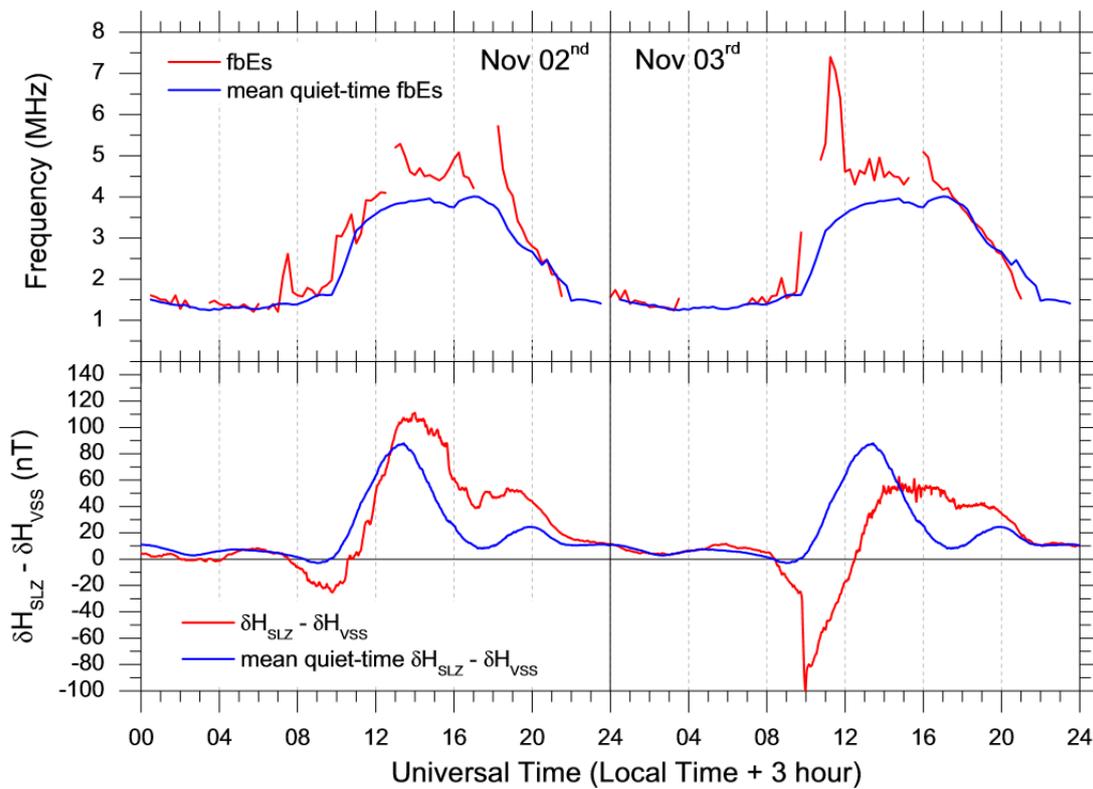
1.4 Camadas Es e o Contra Eletrojato (CEJ)

O Contra Eletrojato (CEJ) é uma inversão do campo elétrico de polarização e no gradiente de densidade eletrônica, podendo causar a inversão nas derivas de irregularidades presentes na região ionosférica (Resende, 2012).

O CEJ pode estar associado à ocorrência de uma tempestade magnética que altera os ventos do dínamo da região E ionosférica, mudando a configuração do campo magnético da Terra. O CEJ apresenta um perfil negativo quando analisado através da componente **H** do campo magnético nos dados de magnetômetros. Rastogi (1971) verificou-se que o evento de CEJ nos horários diurnos pode fazer com que as camadas Es_q desapareçam nos ionogramas. Um exemplo pode ser observado no estudo feito por Denardini et al, 2016. A figura 1.6 mostra o comportamento da componente **H** (parte inferior da imagem) e parâmetro *frequency blanketing Es* ($fbEs$ - parte superior do gráfico) durante os três dias mais calmos obtidos através dos índices *Dst – disturbed storm time*. A componente **H** faz parte das coordenadas geomagnéticas que são usadas para medir a variação da intensidade do campo magnético ao longo do tempo. O cálculo da variação da componente **H** é dado pela a diferença entre as estações de São Luís (equador magnético) e Vassouras (22° 24' S, 43° 39' W) (baixa latitude). Nesse contexto, a diferença faz com que desapareça a influência do dínamo da região E, obtendo apenas o perfil da corrente do EEJ. Ainda na figura é observado o parâmetro $fbEs$ para os dias

02 e 03 de novembro de 2003, fase de recuperação de uma tempestade magnética(linha vermelha). É possível observar um decréscimo da componente H , durante o dia, caracterizando um evento de CEJ. Conseqüentemente há um aumento na frequência de bloqueio da camada Es, ou seja, a camada Es nessa região passou a bloquear camadas superiores. Este último fato não é comum para regiões de equador magnético, confirmando que o CEJ causou um desaparecimento das camadas Es_q , concordando com o estudo de Rastogi (1971).

Figura 1.6: Componente H do EEJ e parâmetro $fbEs$ para dias calmos (linha azul) e perturbado (linha vermelha).

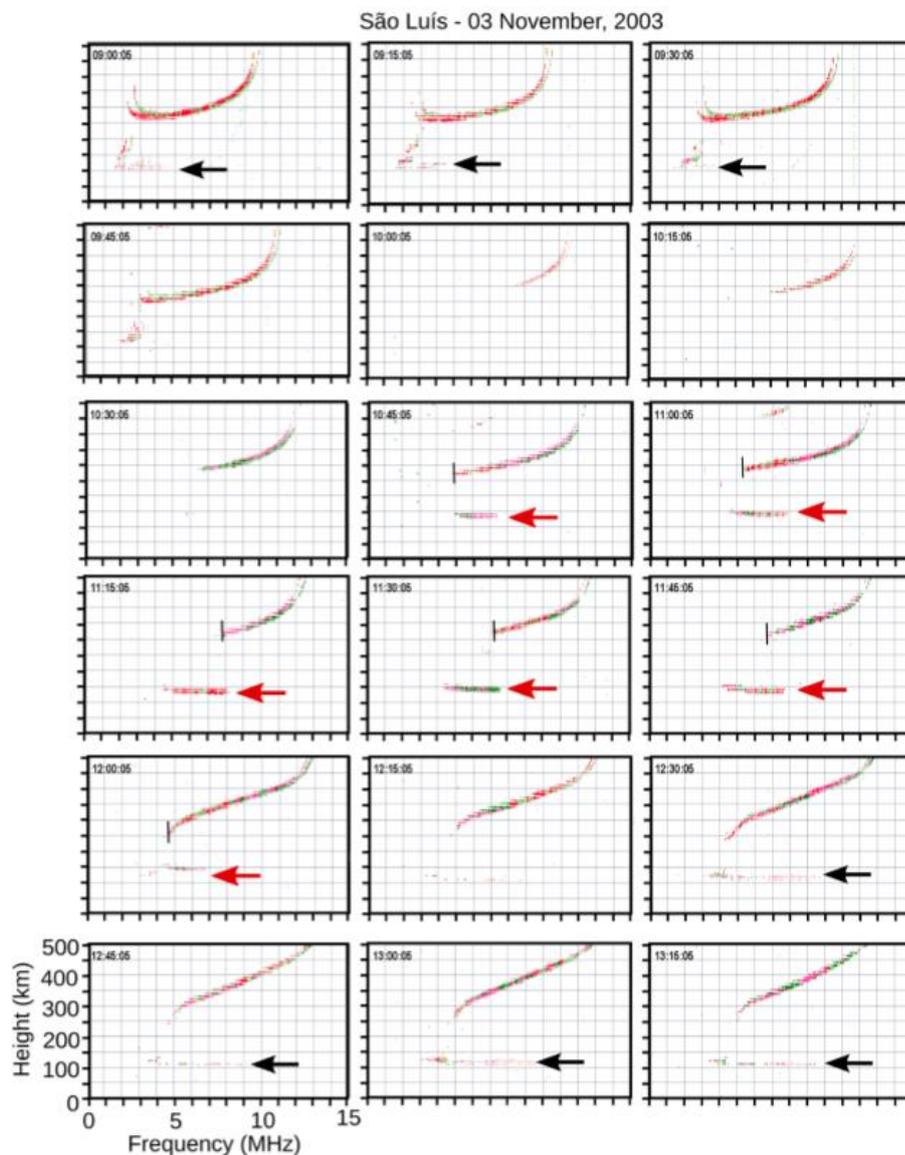


Fonte: Denardini et al, 2016

Como mostra a parte superior da figura 1.6 observa-se um aumento no parâmetro de frequência de bloqueio da camada Es $fbEs$. Uma vez que a camada Es_q não bloqueia os ionogramas, o parâmetro $fbEs$ pode ser obtido como o $fminF$, ou seja, o início da região F. Portanto, durante o fenômeno de CEJ, os ventos de cisalhamento podem ser efetivos na formação de camadas Es em regiões equatoriais como São Luís. Denardini et al. (2012) observaram que nos horários em que ocorreu este evento de CEJ, camadas do tipo c foram vistas em São Luís (figura 1.7). No caso, São Luís é uma região de transição devido ao afastamento anual do equador magnético. Assim, os ventos de

cisalhamento podem ser efetivos quando as irregularidades são enfraquecidas. Na figura 1.7 é observado as 0900 UT a existência das camadas Es_q . Após às 0930 UT, as camadas Es_q desaparecem. Esse fato foi atribuído ao aumento da densidade eletrônica na região D ionosférica devido a flares solares, no qual absorveu o sinal de rádio propagação da digissonda. As 1045 UT foram observadas camadas do tipo c. Assim, verificou-se que durante a observação de camadas Es_c houve um aumento do parâmetro $fbEs$.

Figura 1.7: Camada Es_q (setas pretas) e da camada Es_c (setas vermelhas) durante um evento de CEJ.



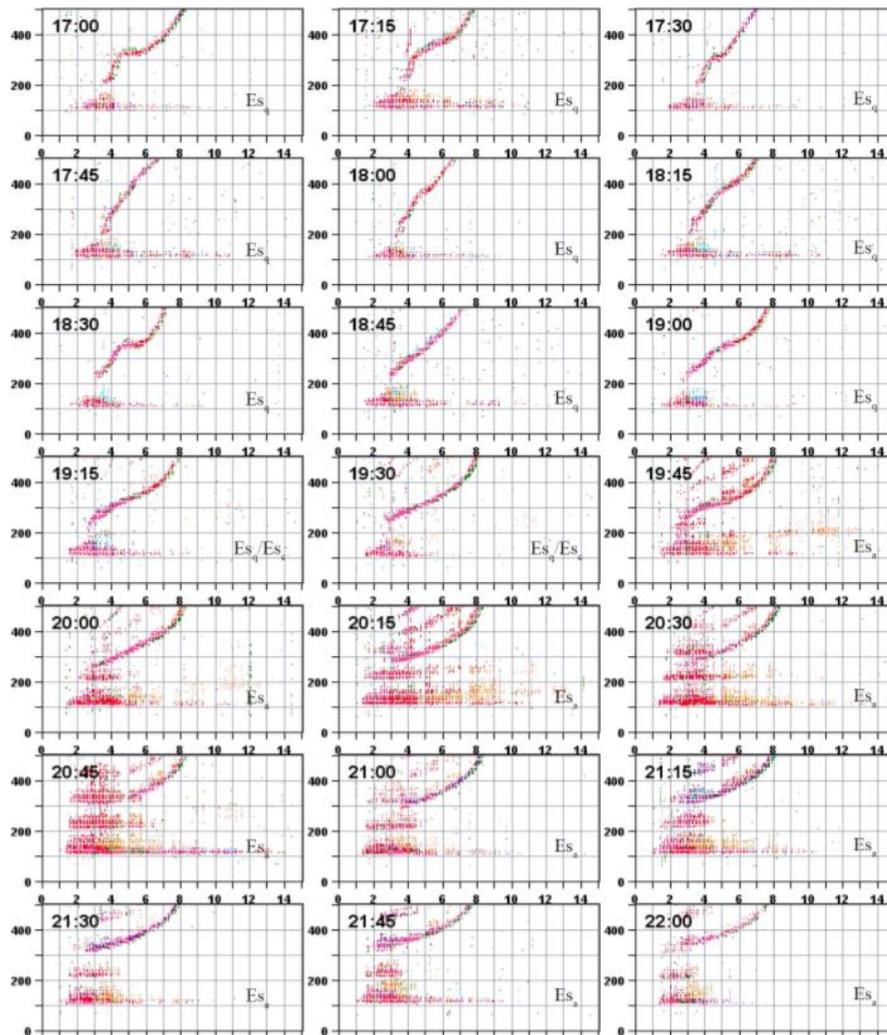
Fonte: Denardini, 2016.

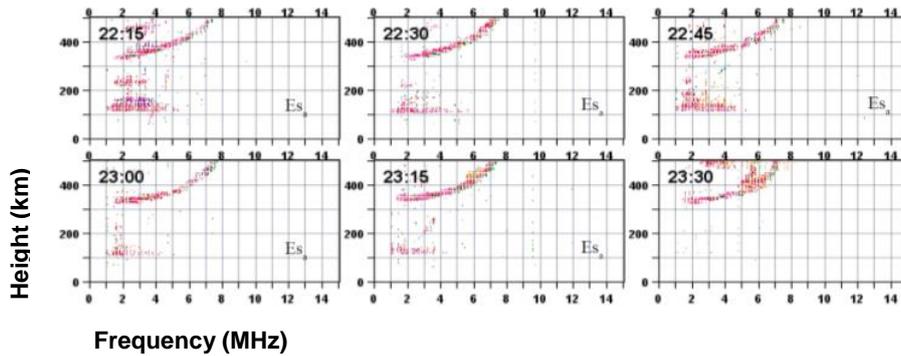
Outro evento do efeito do CEJ nas camadas Es foi observado em São Luís - MA no dia 15 de Dezembro de 2006 (Resende et al, 2012). Nesse caso, a camada Es_q

desapareceu e camadas do tipo a foram observadas (Es_a) (figura 1.8). As camadas do tipo a são comuns para regiões de altas latitudes. Nesses horários, foram observadas camadas Es_a no mesmo horário em que ocorreu o evento de CEJ. A explicação da ocorrência de camadas aurorais em uma região equatorial ainda está em aberto.

Contudo, de acordo com os autores Crochet et al. (1979) e Denardini et al. (2009) tende-se a atribuir que a camada Es_a pode ocorrer em regiões equatoriais devido aos mecanismos de cisalhamento de ventos sobreposto a instabilidade de Deriva de Gradiente. Outra explicação também é dada pelos autores Reddy e Devasia (1981) e Devasia et al. (2006), onde acredita-se que o surgimento dessa camada é dado pela redução drástica do campo elétrico do EEJ que se associam aos ventos neutros aderidos a condições do dínamo perturbado.

Figura 1.8: Presença da Camada Es_a detectada pela a estação de São Luís - MA.





Fonte: Resende, 2012

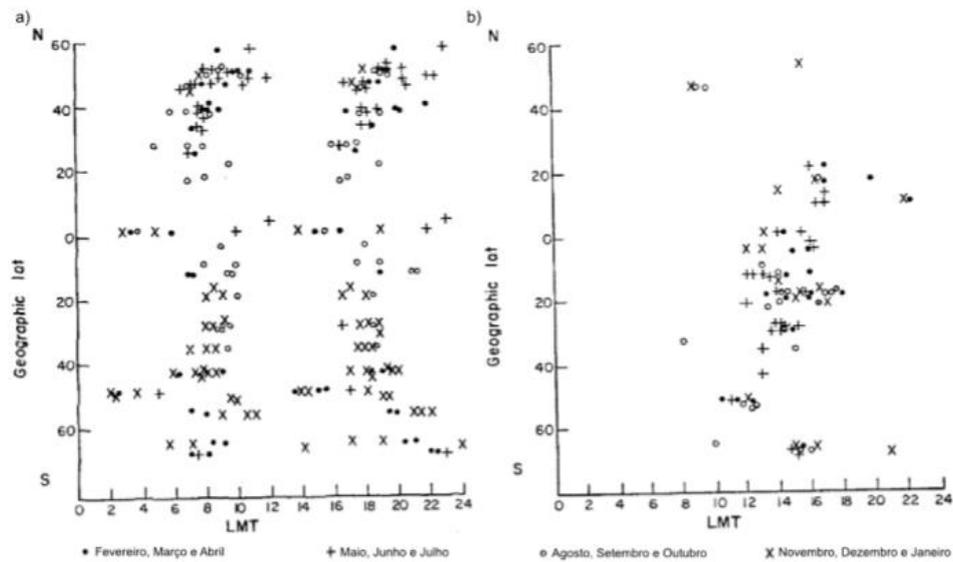
1.5 Ventos de Marés

Os ventos de marés são formados através de oscilações de marés da atmosfera, resultado da absorção da radiação solar da estratosfera e troposfera. As marés são consideradas as mais fortes oscilações dentro da dinâmica da baixa termosfera podendo causar fortes cisalhamentos de ventos. Eles podem ser classificados entre diurno (período de 24 horas) e semidiurno (12 horas), terdiurno (8 horas) e quarterdiurno (4 horas). A amplitude destes ventos está associada a cada uma dessas classificações e varia com a latitude de acordo com as funções de Hough (Forbes, 1981; Tarpley, 1970), podendo atingir valores maiores que 40 m/s (Manson et al, 2002; Jacobi et al, 2009). As marés também podem promover o cisalhamento negativo ou estar em direções opostas que são condições suficientes para a produção das camadas Es.

1.6 Mecanismo dos Ventos de Marés na Formação das Camadas Es

A formação das camadas Es em baixas e médias latitudes estão associadas ao mecanismo de cisalhamento de ventos. Os ventos atuantes neste processo são os ventos de marés onde variabilidade e os movimentos das camadas Es podem ser descritas, principalmente, pelas marés semidiurna e diurna (Arras, 2009). A figura 1.9 mostra evidência das marés semidiurna e diurna na formação das camadas Es ao redor do globo. Nesse estudo foram computados a ocorrência de camadas Es dividida por estações do ano ao longo de um dia inteiro. Foi possível observar a influência da maré semidiurna (figura 1.9 a) e da maré diurna (figura 1.9 b).

Figura 1.9: Evidências de marés semidiurnas e diurnas na formação das camadas Es.



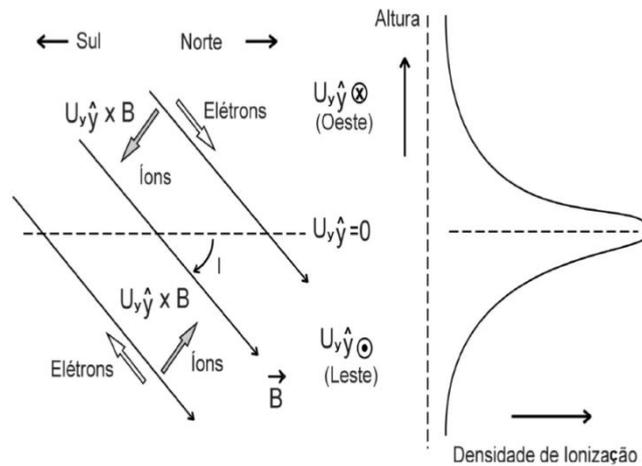
Fonte: Modificada de MacDougall, 1974.

O mecanismo do cisalhamento de ventos é, basicamente, um mecanismo de convergência de cargas pelos os ventos zonais de cisalhamento representado na figura 1.10 pelo vetor $U_y \hat{y}$. É válido lembrar que esse mecanismo só ocorre na presença da componente vertical do campo magnético da Terra representado na figura 1.10 como \mathbf{B} . O mecanismo se sucede da seguinte forma, respectivamente:

- Os íons presentes na região E são arrastados pelo movimento do ar neutro.
- Com a presença do campo \mathbf{B} , estes íons estão sujeitos a uma força na direção $U_y \hat{y} \times \mathbf{B}$.
- A força $U_y \hat{y} \times \mathbf{B}$ será para cima nas altitudes em que o vento for para leste, e para baixo onde o vento for para oeste, provocando um acúmulo de cargas na altitude onde a direção do vento inverte o sentido de propagação ($U_y \hat{y} = 0$).

No entanto, os elétrons não acompanham os íons no movimento perpendicular de $U_y \hat{y} \times \mathbf{B}$. Sendo assim, a neutralidade de cargas elétricas, será mantida mediante o movimento dos elétrons ao longo das linhas de \mathbf{B} , permitindo a formação de uma nova camada

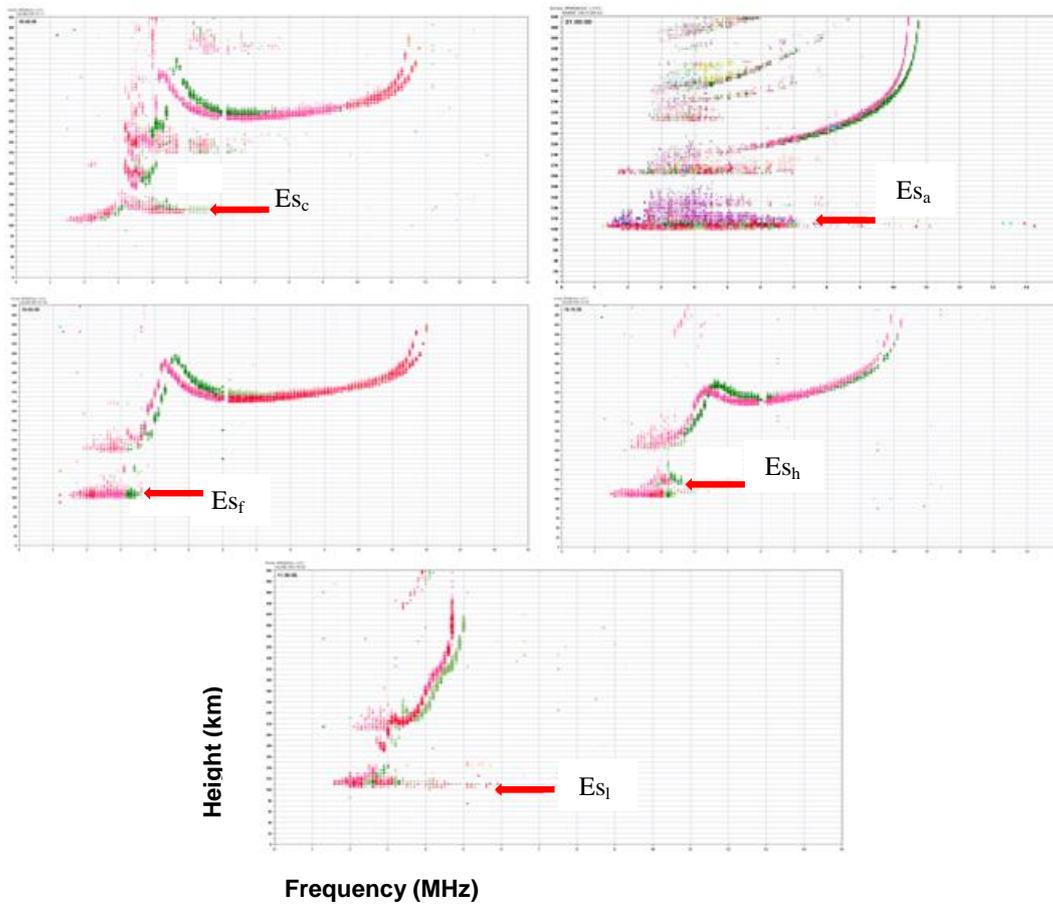
Figura 1.10: Mecanismo de formação das camadas Es pela teoria do cisalhamento dos ventos.



Fonte: Modificado de Carrasco, 2005.

Como o cisalhamento de ventos de marés são os responsáveis pela a formação de vários tipos de camadas Es, elas são classificadas como: do tipo *flat* “f” (predominante no período noturno); tipo *cusp* “c”; tipo *high* “h”; tipo *low* “l” (predominante no período diurno) e tipo *auroral* “a”, onde nos ionogramas (figura 1.11), cada uma possui o seu formato e perfil, e tem como característica em comum bloquear a camada acima. Devido a isso, essas camadas são conhecidas também como tipo “b” ou blanketing (ES_b).

Figura 1.11: Tipos de camadas Es mais comuns em baixas e médias latitudes vistas pela a estação de Cachoeira Paulista – SP.



CAPÍTULO 2 - INSTRUMENTAÇÃO

2.1. Digissonda

É um radar de superfície usado para sondagens ionosféricas e fornece atualmente cerca de 49 parâmetros ionosféricos. Foi desenvolvido durante as décadas de 1920-1930 primeiramente como Ionossonda, onde todo o processo era feito manualmente. Com o passar do tempo, a técnica utilizada no aparelho foi se desenvolvendo até chegar no meio digital e assim o seu nome ser mudado pra digissonda. Esses equipamentos emitem pulsos de rádio frequência (RF), que variam de 1 até 30 MHz e potência de pico de 600W (Almeida, 2006), através de uma antena transmissora. A digissonda recebe este mesmo pulso através de um conjunto de antenas receptoras. Esses pulsos alcançam alturas que vão de 100 até 1360 km, onde o seu principal objetivo é fornecer dados do comportamento da densidade dos elétrons das camadas E e F.

2.2 Características da Digissonda

A digissonda é composta por:

- Antena transmissora, usada para emitir curtos pulsos de rádio (figura 2.1 a);
- Antenas receptoras, usada para receber os pulsos de rádio transmitido (Figura 2.1 b);

Essas antenas são do tipo Delta com cargas resistivas de 600 Ohms (Almeida, 2006).

- Computadores, usado para o processamento dos dados obtidos (figura 2.1 c);
- Periféricos, que são placas de expansão usadas para enviar ou receber informações do computador;
- Chave de antenas, usado para combinar e separar o sinal da antena terrestre; e
- Receptor e Transmissor de pulsos de RF.

Figura 2.1: Fotos da digissonda do tipo DPS onde (a) é a antena transmissora, (b) é a antena receptora e (c) é o sistema de controle, pré-processamento e transmissão de dados.



Fonte: Cortesia Sra. Maria Goreti.

2.3 Funcionamento da digissonda

Os curtos pulsos de rádio frequência emitidos pelo o equipamento direcionados a ionosfera tem o seu tempo de eco medido, ou seja, o tempo em que a onda encontra o plasma da ionosfera e reflete. Esse fenômeno é possível, pois o índice de refração do plasma da ionosfera depende dos elétrons livre, e por isso diz-se que ele é inversamente proporcional à frequência do plasma. Caso não haja essas condições do meio, o pulso atravessa o plasma e não há eco. O tempo de recepção do eco (t) pode nos dar a informação da altura (h') em que a camada se encontra, supondo que o pulso adquira uma velocidade igual à velocidade da luz no vácuo (c). Através disso temos a equação:

$$h' = \frac{1}{2}ct$$

Contudo, a altura fornecida por essa equação é virtual devido ao meio de propagação da onda na ionosfera ter índices de refração diferente dos meios como o vácuo e o ar, fazendo com que a velocidade de propagação seja menor que a velocidade da luz adotada. Sendo assim, é necessário com que se faça uma correção para obter as alturas reais.

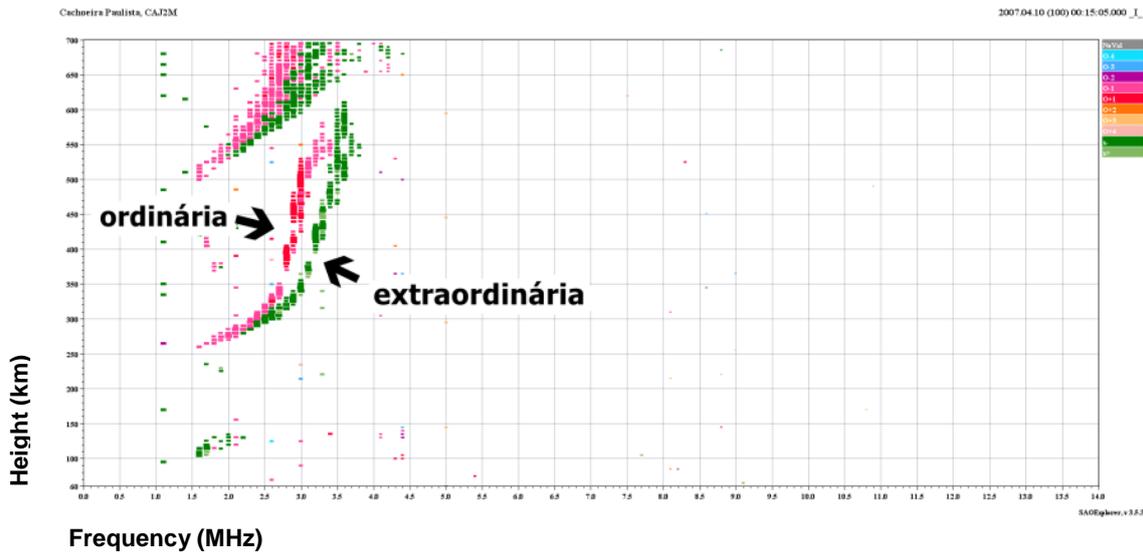
Além disso, a digissonda pode medir as quantidades ionosféricas como (Mitra, 1952):

- A intensidade do sinal refletido; e
- O estado de polarização do sinal recebido.

O estado de polarização do sinal recebido podem corresponder as componentes ordinárias (polarização linear) e as componentes extraordinárias (polarização não-linear)

no ionograma, que é um resultado do campo magnético fazendo com que a onda seja bi-refringente (figura 2.2) (Jesus, 2008).

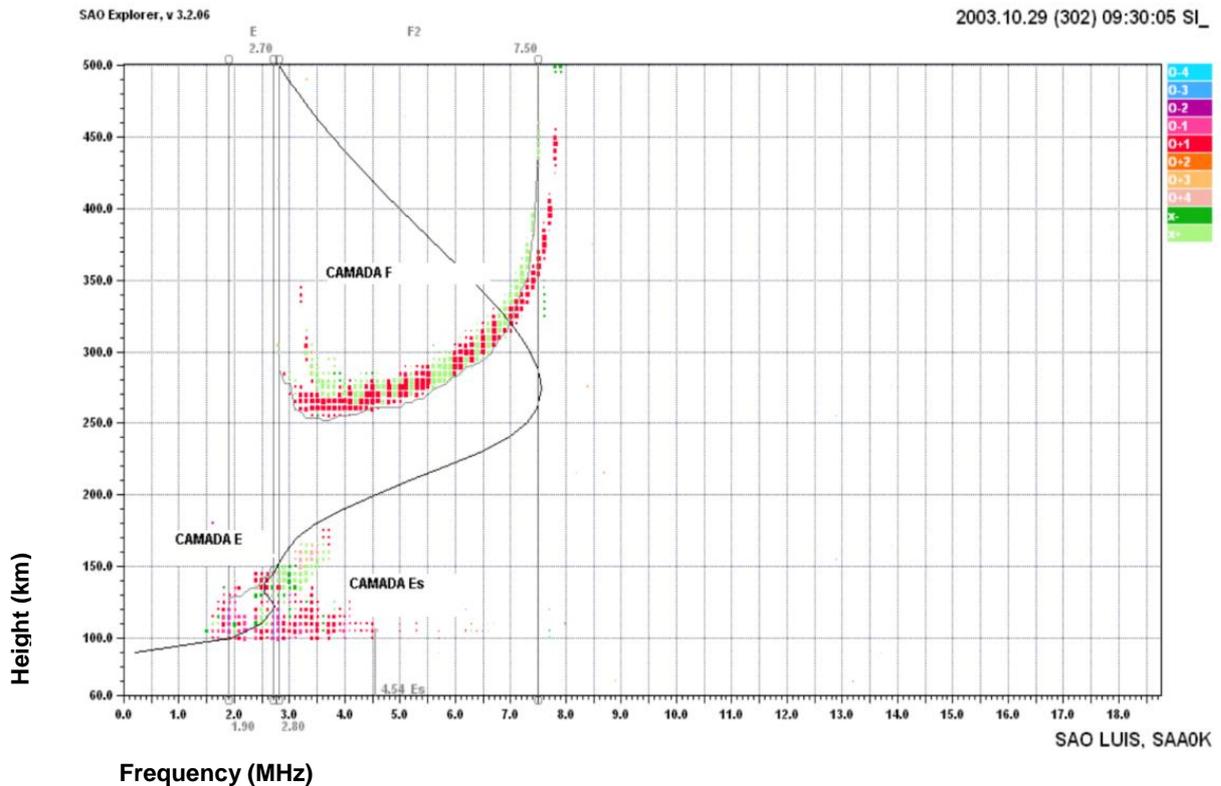
Figura 2.2: Ionograma do dia 10 de Abril de 2007 à 0015 (UT) para a estação de Cachoeira Paulista que mostra o perfil das componentes ordinárias e extraordinárias.



2.4 Dados da digissonda

A digissonda gera como dados os ionogramas. Os ionogramas são traços adequadamente organizados a partir dos ecos refletidos pelas camadas ionosféricas. Esses dados são armazenados em gráficos de altura virtual de reflexão por frequência do sinal emitido. Através desses traços, torna-se possível perceber um perfil para a região F e para a região E, assim como mostra o ionograma da figura 2.3.

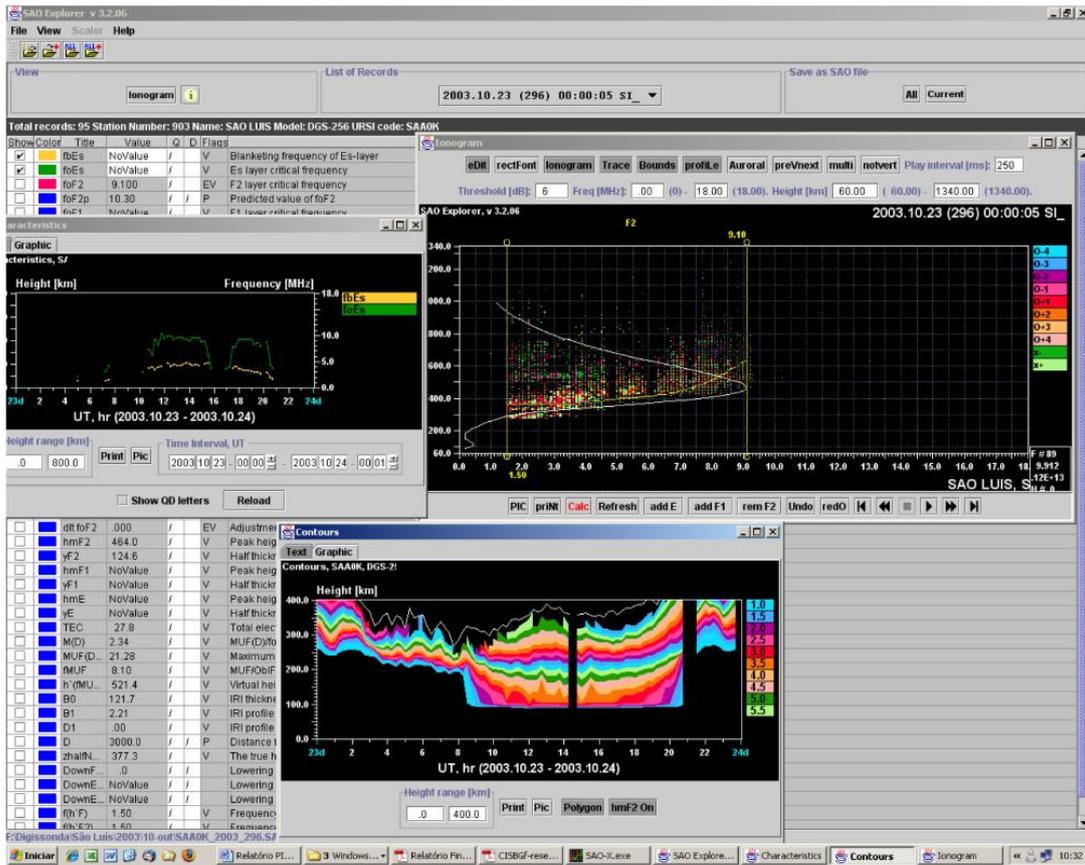
Figura 2.3: Ionograma da estação de São Luís – MA do dia 29 de outubro de 2003, às 09 h 45 min que mostra a região E, subdividida em camada E e camada Es, e a região F.



Fonte: Resende, 2008.

Esses dados brutos são coletados de acordo com o intervalo de tempo pré estabelecido pelo operador e a princípio eram encriptados em um formato denominado TAP, atualmente eles se encontram nos formatos denominados GRM, RSF, MMM. Esses formatos possibilitou com que as interpretações automáticas fossem gravadas separadamente dos dados brutos. Contudo, o responsável por essas interpretações é o *Automatic Real-Time Ionogram Scaler with Truehigh (Artist)* que através de uma coleção de programas, agrega aos dados alguns parâmetros ionosféricos em relação à altura como por exemplo o $hmF2$, $h'F$, $h'E$, $h'Es$, etc, em relação a frequências como o $foF2$, $foF1$, $foEs$, etc, em relação a fatores de propagação oblíqua como o MUF, M3000 e bem como a curva $h'(f)$ de altura virtual versus frequência (Bertoni, 2004). Para realizar a leitura e análise desses gráficos, utiliza-se o programa SAO – *Explorer* (SAO-X) onde nele também é possível manusear os parâmetros ionosféricos. O programa oferece várias ferramentas de visualização e análise da ionosfera, a figura 2.4 mostra algumas delas (Resende, 2008).

Figura 2.4: Interface do programa SAO-X e algumas das ferramentas que o programa fornece para visualização e monitoramento da Ionosfera.



Fonte: Resende, 2008.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão abordados os resultados obtidos no ano referente a agosto de 2016 a julho de 2017. Os resultados estão separados em três grupos diferentes, são eles: climatologia das Camadas Es para o setor brasileiro, influência dos flares solares de classes M e X na ionosfera do setor brasileiro e, por fim, um estudo de caso.

3.1 Resultados I – Climatologia das Camadas Es para o setor brasileiro

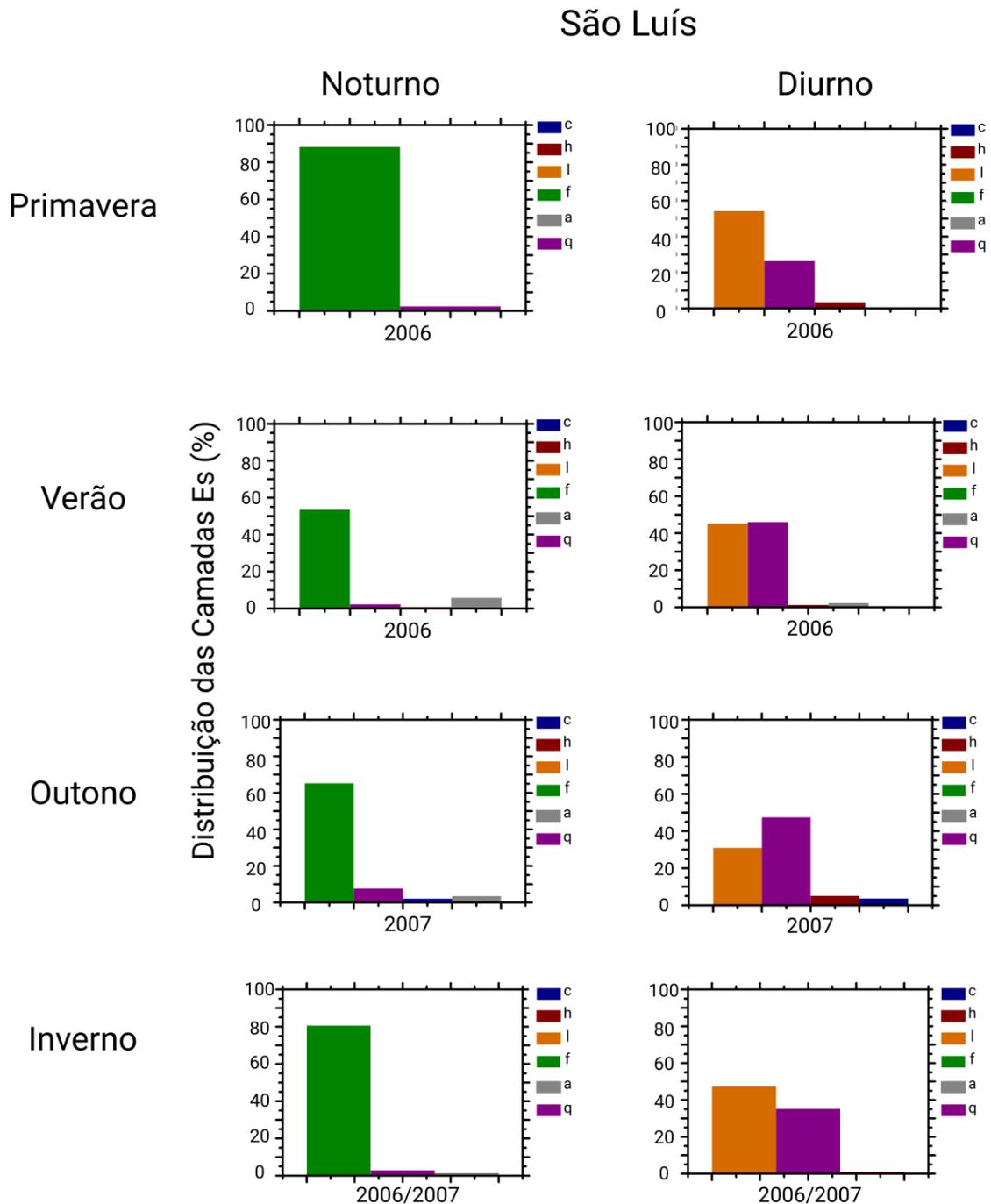
Como já mencionado anteriormente, as camadas Es são classificadas em tipos distintos de acordo com seu aparecimento nos ionogramas. Esses diferentes tipos dependem da sua latitude e longitude e, principalmente, do seu mecanismo de formação. Nas regiões equatoriais, a digissonda detecta um traço difuso e transparente aos sinais de rádio que cobre uma alta escala de frequência. Essas camadas são classificadas como tipo “q” e são devidas as irregularidades do EEJ, já discutido no capítulo 1. Em baixas latitudes, o mecanismo predominante é o cisalhamento de ventos e são observadas as camadas dos tipos “l”, “f”, “c” e “h”. Os exemplos de como os tipos das camadas Es aparecem nos ionogramas também foram mostrados no capítulo 1. Os resultados abaixo são referentes a estes diferentes tipos observados em São Luís, uma região equatorial e Cachoeira Paulista, uma região de baixa latitude.

A figura 3.1 mostra um histograma contendo a distribuição das camadas Es em São Luís durante os anos de mínimo solar, 2006 e 2007. Os resultados são divididos de acordo com as estações do ano e período do dia. O período diurno refere-se às horas entre 0900 UT e 2100 UT (Tempo Universal) enquanto que o período noturno é dividido entre 0000 UT e 0600 UT e 2115 UT e 2345 UT. É possível notar na figura que a camada Es_q (cor roxa) é predominante em todos os períodos diurnos para São Luís. Este comportamento ocorre porque a influência da corrente do EEJ nesse período é significativa. Além disso, mesmo com a Es_q presente, outras camadas Es podem aparecer no mesmo ionograma. Isso pode ocorrer, porque São Luís é uma região de transição, ou seja, o equador magnético se move a uma razão de 16 km/ano. Portanto, além das irregularidades do EEJ formarem a camada Es_q , o mecanismo de ventos pode ser efetivo em algumas horas. Isso explica porque a camada $Es_{f/l}$ (cores verde/laranja) são observadas tão frequentemente (Resende, 2010).

No período noturno, a camada Es_q não é presente uma vez que nesses horários a corrente da EEJ se reverte para oeste e, assim, as irregularidades não podem ser

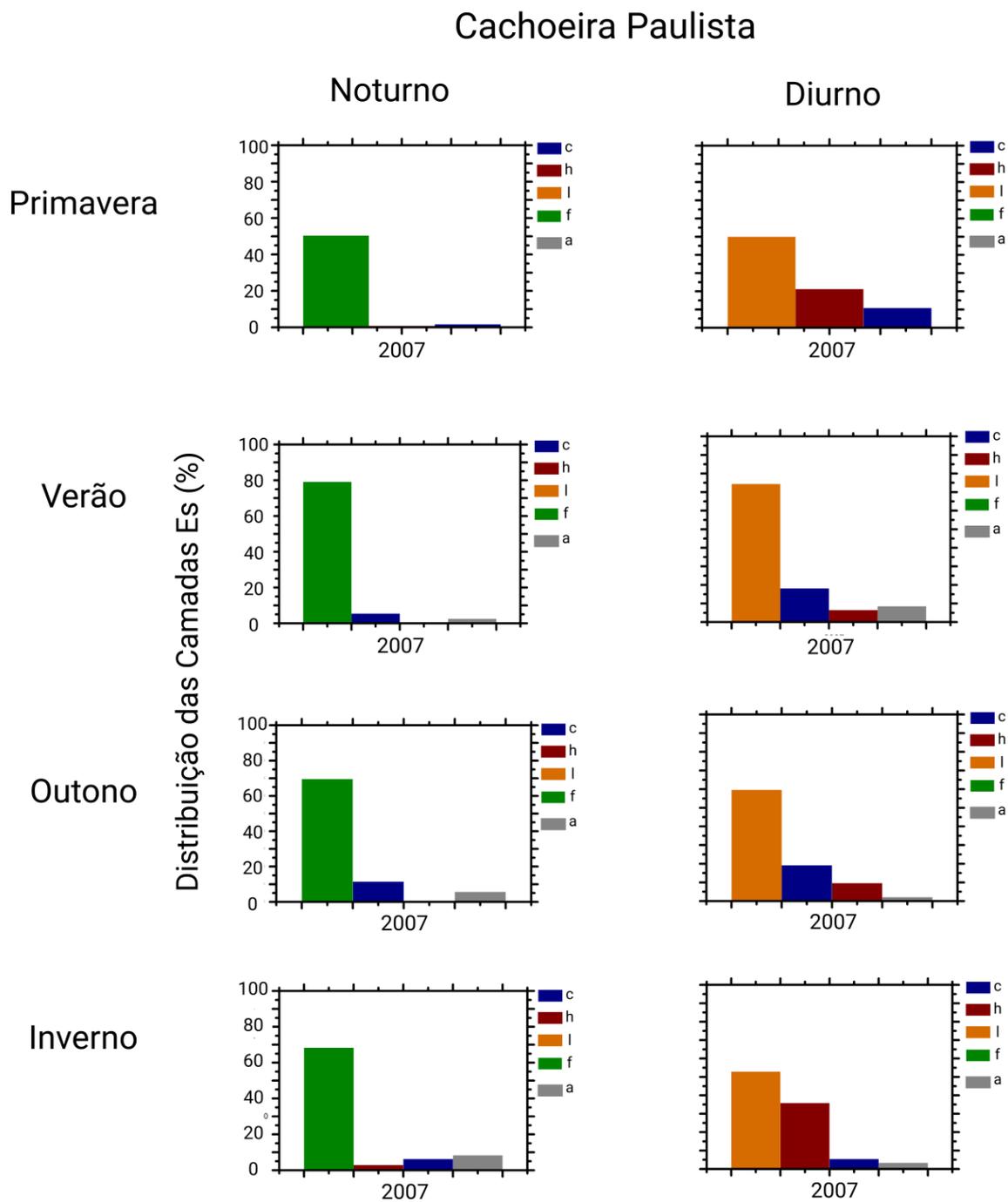
formadas. Outro ponto significativo nesse estudo é o fato das camadas Es_q ocorrerem com maior frequência no verão. Esse fato é explicado pela entrada de íons metálicos que existem na atmosfera ser mais significativa no verão. Uma vez que os principais elementos para a formação das camadas Es são os íons metálicos, as camadas Es tendem ser mais fortes no verão do que no inverno (Haldoupis, 2011).

Figura 3.1: Distribuição dos tipos de camadas Es para São Luís dividido em períodos noturno e diurno.



Na figura 3.2 é mostrado um histograma da distribuição das camadas Es em Cachoeira Paulista para o ano de 2007. Os resultados são divididos em estações do ano e período diurno e noturno como feito para São Luís na figura 3.1. No caso de Cachoeira Paulista foi possível observar três tipos comuns de camadas Es: “a” (cor cinza), “l/f” e a “c”. As camadas “l/f” e “c” (cor azul) são predominantes devido à presença do vento zonal, principalmente a maré diurna (Resende et al., 2017). Já a camada do tipo “a” ocorre devido à precipitação de partículas devido à presença da Anomalia Magnética da América Sul sobre a região de Cachoeira Paulista. Nesse caso, o campo magnético dessa região é fraco e as partículas que entram na atmosfera podem se precipitar nessa região, fazendo com que as camadas do tipo “a” sejam observadas em ionogramas. Adicionalmente, a camada do tipo “h” (cor vermelha) é pouco observada, mostrando que nesse ano o vento meridional responsável pela criação destas camadas Es foi fraco. Não foram observadas diferenças significativas entre os períodos noturno e diurno para Cachoeira Paulista desde que as camadas “l” e “f” são as mesmas.

Figura 3.2: Distribuição dos tipos de camadas Es para Cachoeira Paulista dividido em períodos noturno e diurno.



3.2 Resultados II – Influência dos Flares Solares de Classes M e X na Ionosfera do Setor Brasileiro

Explosões solares (*solar flares*) são perturbações transientes que ocorrem na atmosfera solar e liberam grandes quantidades de energia emitidas na forma de radiação

eletromagnética e corpuscular, como partículas energéticas. As explosões solares emitem radiação em uma grande faixa do espectro eletromagnético.

Na ionosfera os efeitos são causados geralmente na região D uma vez que a radiação é nas proximidades da banda do extremo ultravioleta (EUV) e dos Raios-X. O fenômeno mais conhecido é o Distúrbio Ionosférico Súbito (SID). O resultado do SID é um rápido aumento na absorção das ondas de rádio, que é mais intenso na faixa das Altas Frequências (HF) (Sahai et al., 2007, Resende, 2010)

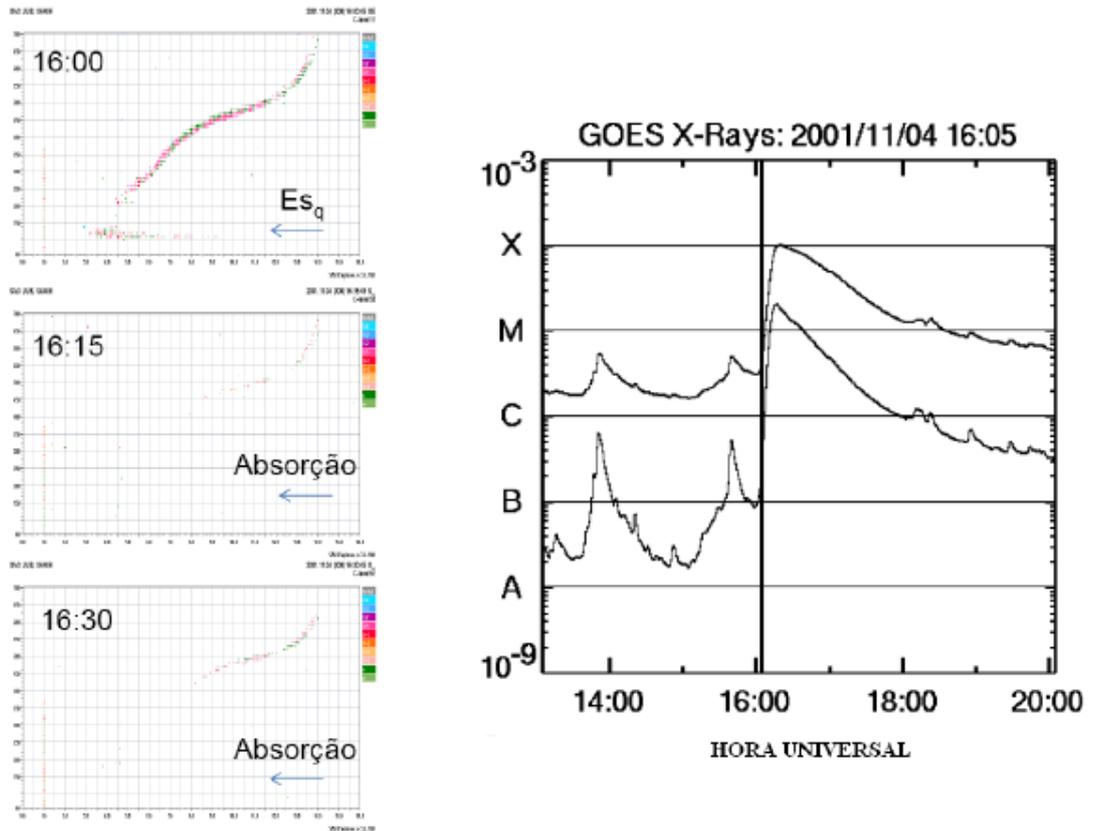
As explosões solares são classificadas de acordo com suas intensidades observadas nos espectros medidos provindos do satélite GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) operado pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). As categorias utilizadas são:

- As explosões da classe X, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade a partir de 10^{-4} W/m²;
- As explosões da classe M, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre 10^{-5} e 10^{-4} W/m²;
- As explosões da classe C, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre 10^{-6} e 10^{-5} W/m²;
- As explosões da classe B, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre 10^{-7} e 10^{-6} W/m²; e
- As explosões da classe A, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre 10^{-9} e 10^{-7} W/m².

A influência dos picos no fluxo de classes M e X dos Raios-X foram analisados para três regiões brasileiras distintas, Boa Vista, São Luís e Cachoeira Paulista. Em um estudo preliminar feito por Resende (2010) constatou que a maioria dos picos dos Raios-X causou a absorção das ondas de rádio na faixa de frequência da região E, camadas Es e baixa região F, provocando o desaparecimento dessas regiões. Um exemplo é mostrado na figura 3.3 para o dia 04 de novembro de 2001 em São Luís. Às 1600 UT há a presença da camada Es_q, observada no ionograma superior do lado esquerdo. O gráfico do lado direito mostra que às 1605 UT ocorreu uma explosão solar de classe X. Às 1615 UT, o próximo horário do ionograma, houve uma completa absorção das ondas de rádio. Este acontecimento também é visto no horário das 1630 UT. Essa absorção aconteceu pelo fenômeno denominado SID, descrito na que absorveu

as ondas de rádio na região D e prejudicou a observação da camada Es e parte da região F ionosférica.

Figura 3.3: Efeito de uma explosão solar de alta intensidade na ionosfera.



Fonte: Resende (2010)

Nesse contexto, foram analisados o período de 2014 e 2015 divididos nas estações do ano para as regiões mencionadas acima. Abaixo, são apresentados os resultados das influências dos flares de Classes M e X para as regiões ionosféricas mencionadas acima.

a) Classe M

A figura 3.4 apresenta uma análise sazonal da absorção que os Raios-X de classe M provocaram nas camadas Es (barra azul) e na região F (barra laranja) para as regiões de Boa Vista, São Luís e Cachoeira Paulista. Já mencionado acima os resultados são referentes aos anos de 2014 e 2015, sendo que em alguns períodos não se encontram dados disponíveis. Isso ocorre para Boa Vista e Cachoeira Paulista na primavera.

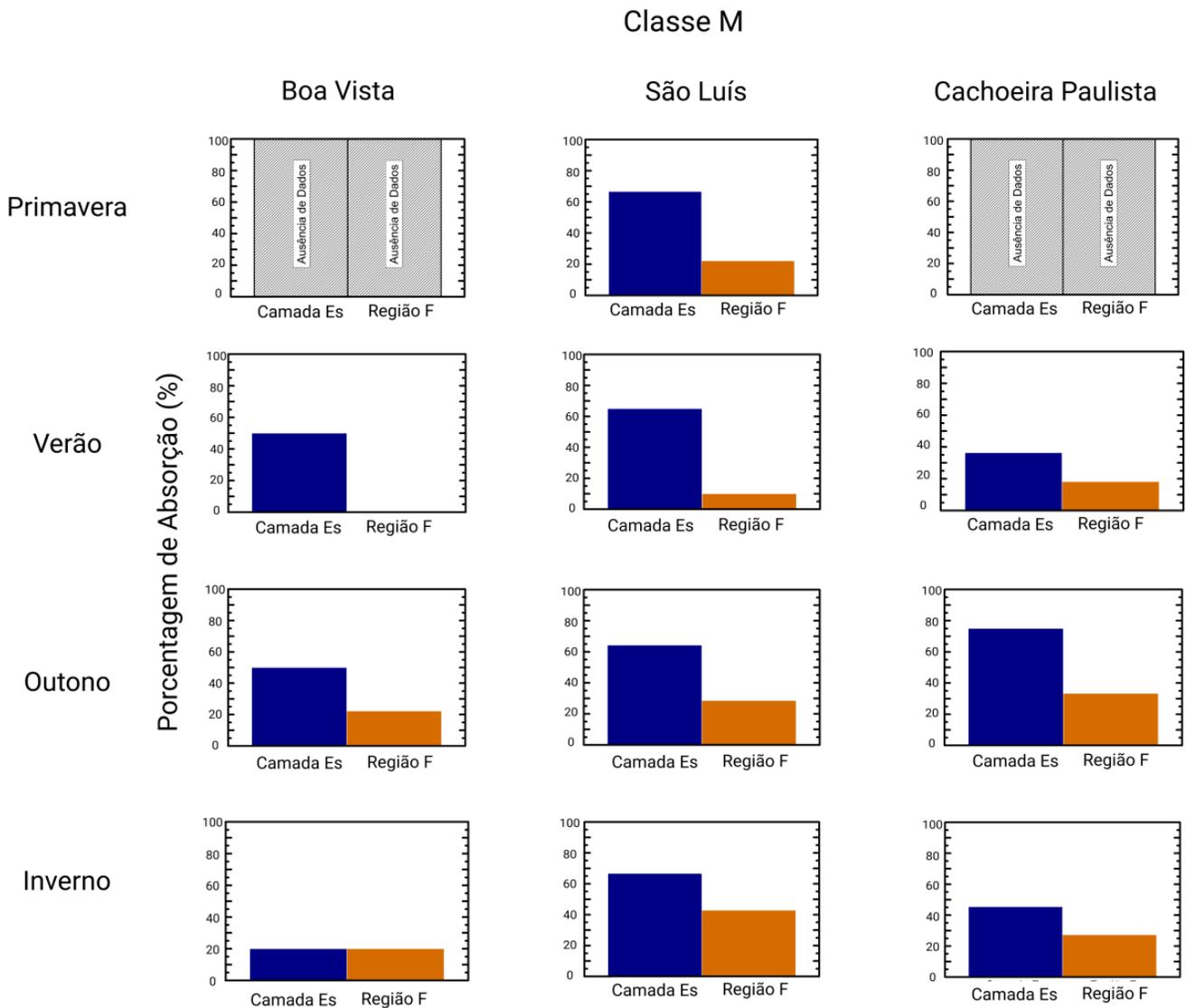
É possível observar nos resultados que a absorção na camada Es é bem mais significativa que a região F para todas as regiões em todas as estações. Isso acontece, pois quando

ocorre um flare solar a região D ionosférica é altamente ionizada. Assim, o sinal da digissonda é absorvido em frequências mais baixas o que resulta no desaparecimento da camada Es. Vale ressaltar que se a camada Es foi absorvida a região E também não é visível nos ionogramas.

Em relação às regiões estudadas são notáveis que os flares solares tiveram uma influência maior em São Luís. Nota-se que a absorção da camada Es atingiu em torno dos 70% em São Luís em todas as estações, enquanto em Cachoeira Paulista esse limite só foi atingido no outono. Em Boa Vista, a maior absorção ocorreu no outono e no verão, atingindo 50% de absorção das camadas Es. Já para a região F, São Luís também se mostrou com maior influência da absorção dos flares de Classe M. De fato, no inverno a região F foi absorvida em 40% dos casos enquanto no verão esse número não passou de 20%. Em Cachoeira Paulista destacou-se o outono (35%) e Boa Vista não foi observado nada expressivo.

Analisando os resultados para as diferentes estações do ano, foi observado que para Boa Vista e Cachoeira Paulista o outono foi o mais expressivo em relação à absorção enquanto que o menos expressivo foi durante o verão. Já para São Luís referente à absorção das camadas Es não foram observadas mudanças significativas. Contudo, para a região F a absorção ocorreu com maior intensidade no inverno, sendo superior a 40%.

Figura 3.4: Análise da influência dos aumentos súbitos de Raios-X de Classe M nas camadas Es e Região F.



b) Classe X

A figura 3.5, assim como a figura 3.4, também apresenta uma análise sazonal da absorção que os Raios-X, porém esta para os flares de Classe X. Como já mencionado, a barra azul refere-se a absorção nas camadas Es e a barra laranja refere-se à região F para as regiões de Boa Vista, São Luís e Cachoeira Paulista. Esta análise também foi realizada para os anos de 2014 e 2015, cujo alguns períodos apresentam ausência de dados.

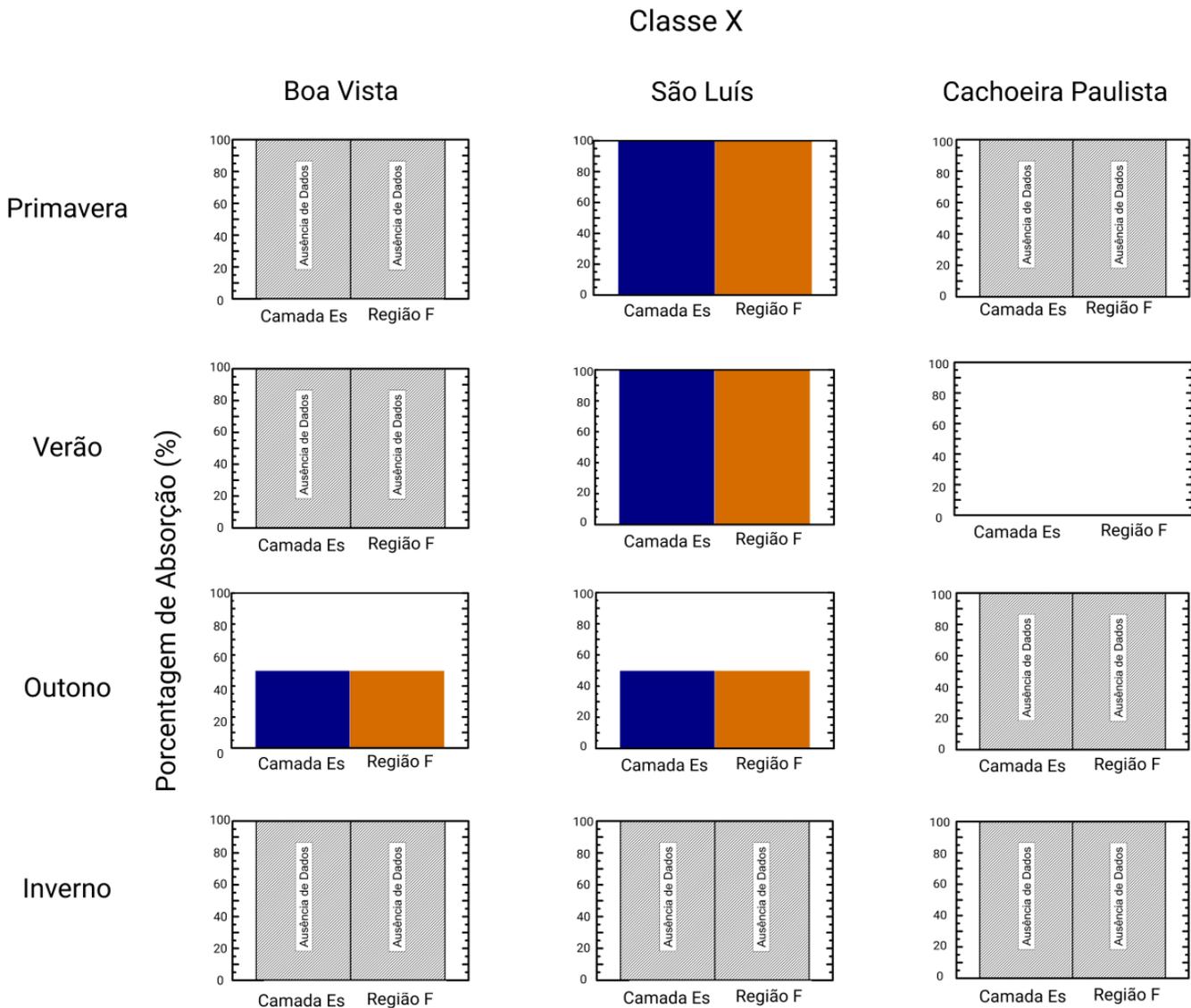
A principal característica observada foi que para todos os casos, tanto a camada Es e a região F são absorvidas na mesma proporção, causando o que chamamos de *blackouts* total nos ionogramas.

Durante a primavera, há ausência de dados para as regiões de Boa Vista e Cachoeira Paulista. Observa-se que para a região de São Luís, houve influência em 100% dos casos na camada Es e na região F, no qual podemos concluir que todos os flares solares de Classe X teve influência na ionosfera na primavera.

No verão, tem-se ausência de dados em Boa Vista. A região de São Luís também atinge 100% de influência para as camadas Es e para região F. Contudo, na região de Cachoeira Paulista nota-se que nem todas as ocorrências desses flares tiveram alguma influência nas regiões estudadas.

Para o outono, há ausência de dados para a região de Cachoeira Paulista. Já nas regiões de Boa Vista e São Luís percebe-se que há apenas 50% de influência dos flares solares em ambas as regiões (camada Es e região F), ou seja, metade do número de casos ocorridos não teve influência na ionosfera. No inverno, tem-se a ausência de dados para todas as regiões.

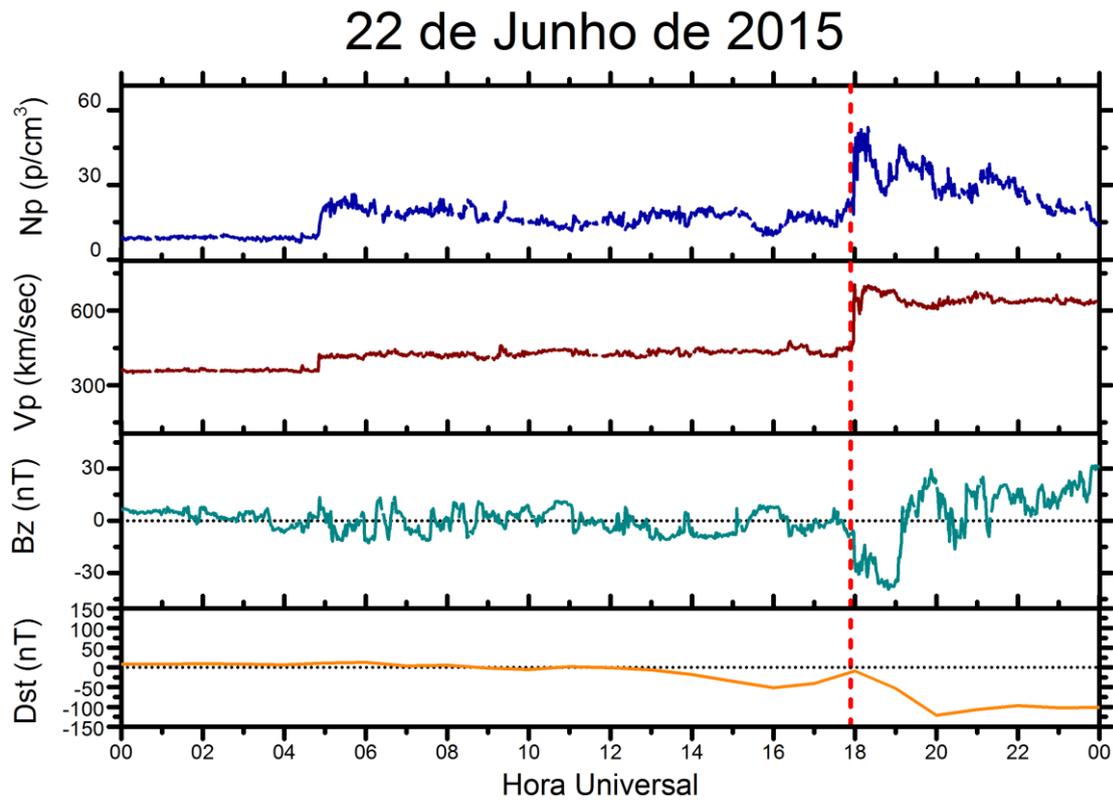
Figura 3.5: Análise da influência dos aumentos súbitos de Raios-X de Classe X nas camadas Es e Região F.



3.3 Resultados III – Estudo de caso do dia 22 de Junho de 2015

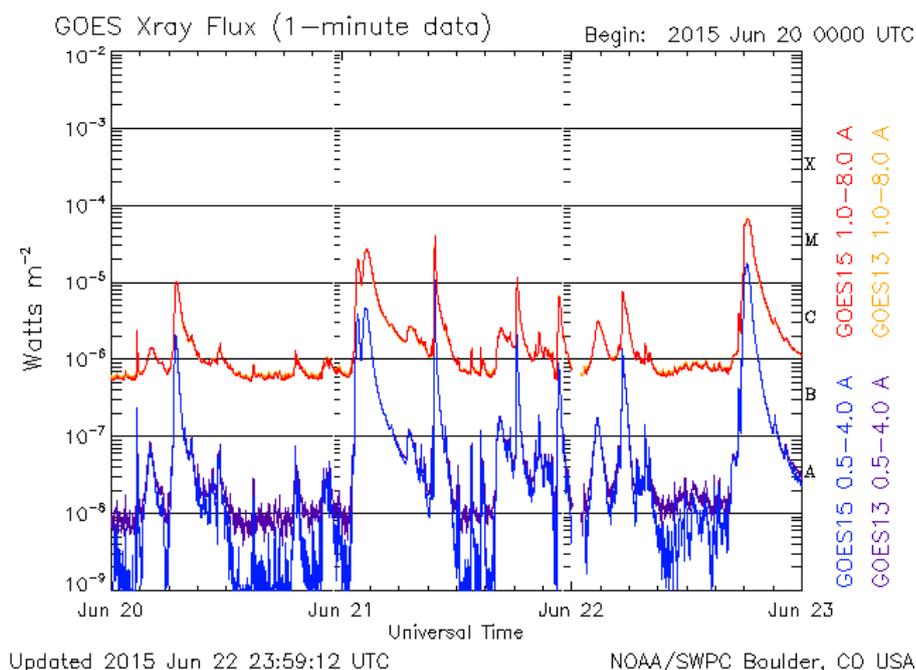
Neste estudo foi considerada uma forte tempestade magnética que se iniciou no dia 22 de junho de 2015 em torno das 1800 UT. A figura 3.6 apresenta a pressão do vento solar no topo (N_p) (linha azul), abaixo a velocidade do vento solar (V_p) (linha bordô), em seguida a componente vertical do campo magnético terrestre (B_z) (linha verde) e na parte inferior o índice magnético Dst (linha laranja). O traço pontilhado vermelho mostra o início dessa tempestade, no qual todos esses parâmetros do meio interplanetário sofreram influências. O aumento brusco observado nos parâmetros do N_p e V_p indicam a chegada de uma Ejeção de Massa Coronal (CME) na terra. Esse fato é confirmado com a inversão do parâmetro B_z e do índice Dst. Esse último alcançou quase -150 nT.

Figura 3.6: Parâmetros do vento solar, pressão e densidade, campo magnético da Terra e índice Dst para o dia 22 de junho de 2015.



Para confirmar se houve algum flare solar associado a essa CME, foi observado a variação da intensidade dos Raios X para o período estudado mostrado na figura 3.7. Neste gráfico é observado que no dia 22 de junho em torno das 1800 UT está identificado um aumento na intensidade de radiação em Raios-X associado a um flare de classe M com magnitude de 6.5 watts m^{-2} . Outros aumentos são vistos nos gráficos, mas não serão discutidos neste trabalho. Portanto, a CME que atingiu a terra nesse dia está associada com um flare solar.

Figura 3.7: Fluxo de Raios-X para o dia 22 de junho de 2015.

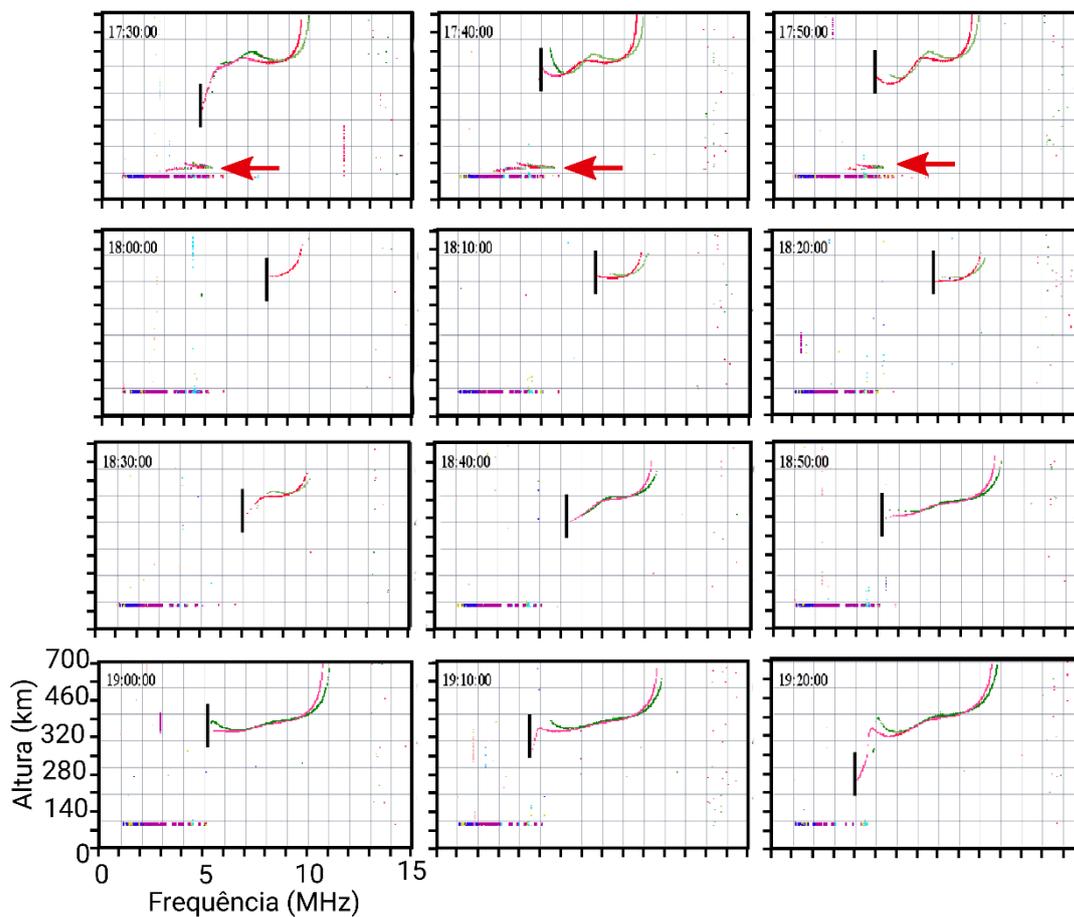


Após essa constatação, foram analisados os ionogramas nos mesmos horários para as regiões de Boa Vista, São Luís e Cachoeira Paulista. Assim, foi possível averiguar a influência desse flare solar de classe M na ionosfera do setor brasileiro.

Na figura 3.8 apresenta-se o ionograma para Boa Vista entre 1730 UT e 1920 UT. Observa-se a presença da camada do tipo “c” nos horários entre 1730 UT e 1750 UT, indicada pela seta vermelha. No mesmo período observa-se que o traço da região F está visível às 1730 UT e é bloqueado nos horários seguintes pela camada Es. Portanto, nesses casos os parâmetros de frequência das camadas Es, $fbEs$, que sinaliza seu bloqueio e o $f_{min}F$, a mínima frequência que a região F é observada, são praticamente coincidentes. Às 1800 UT, horário do flare solar, é notado que a camada Es não é mais observada no ionograma. Este fato é observado durante um longo período, indicando que o sinal das ondas de rádio foi absorvido pela alta ionização da região D causado pelo flare solar. A região F também foi absorvida parcialmente até as 1840 UT quando o seu traço começa a reaparecer em frequências mais baixas (vide traço preto).

Figura 3.8: Ionograma para a região de Boa Vista em 22 de junho de 2015.

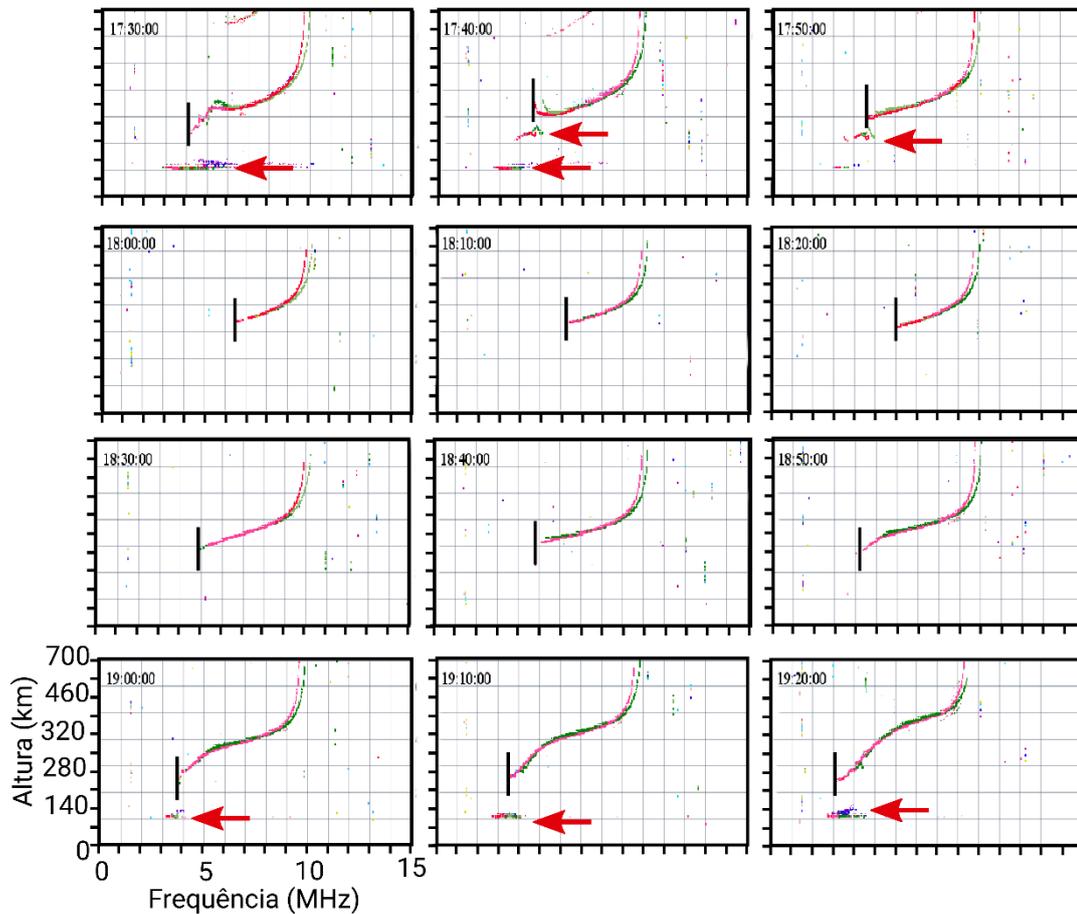
Boa Vista- 22 - 06 - 2015



O mesmo fato é observado em São Luís como mostrado na figura 3.9. Nesse caso, observa-se a formação de mais de uma camada Es até 1750 UT (seta vermelha) que bloqueia a região F (traço preto). Contudo, a partir das 1800 UT nenhuma camada Es é observada e a região F também se mostra parcialmente absorvida. Essa absorção dura até 1850 UT quando a camada Es é observada novamente nos ionogramas bem como o traço da região F em frequências mais baixas.

Figura 3.9: Ionograma para a região de São Luís em 22 de junho de 2015.

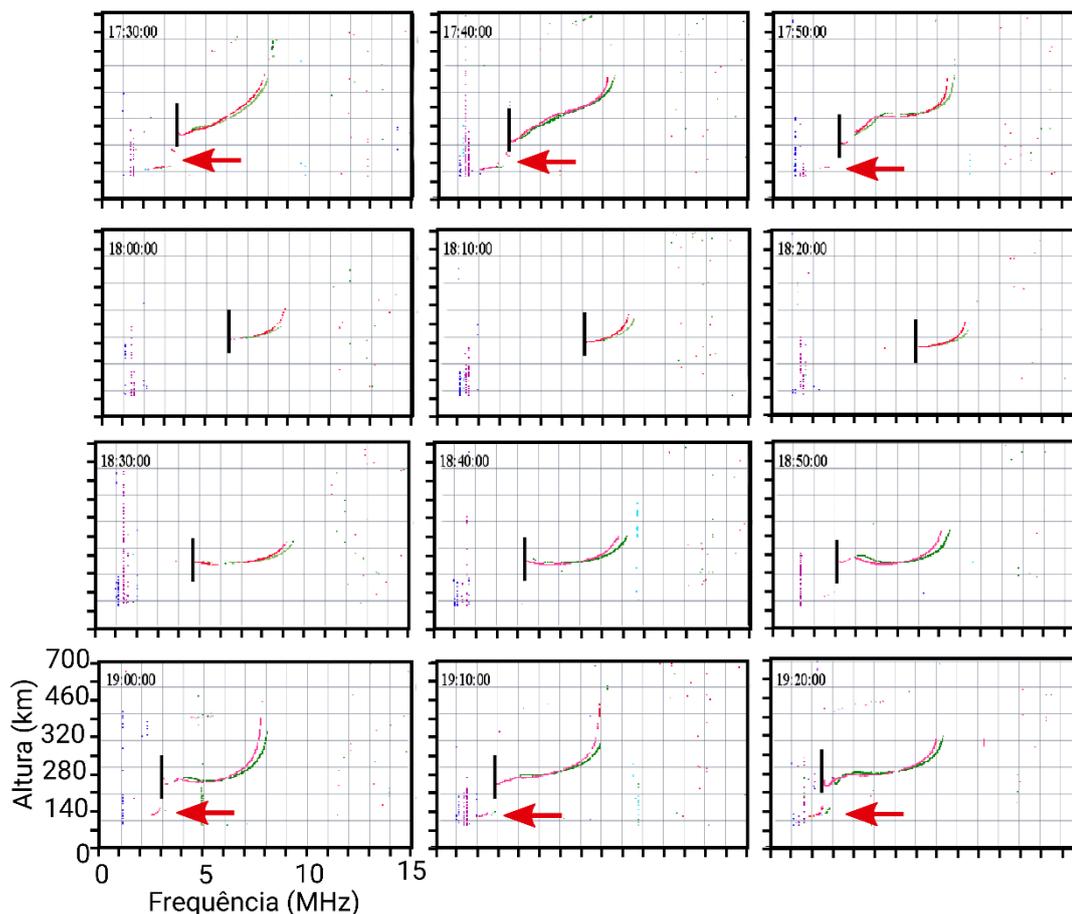
São Luís- 22 - 06 - 2015



Em Cachoeira Paulista uma camada do tipo “h” é observada entre 1730 UT e 1750 UT, seta vermelha da figura 3.10. Nesse caso, a região F é claramente observada inteira uma vez que a camada Es não é forte suficiente para bloqueá-la. Mas, é notado que a absorção tanto na camada Es e na região F ocorre também entre 1800 UT e 1850 UT. Após este horário é observada uma fraca Es com a região F nos ionogramas de Cachoeira Paulista.

Figura 3.10: Ionograma para a região de Cachoeira Paulista em 22 de junho de 2015.

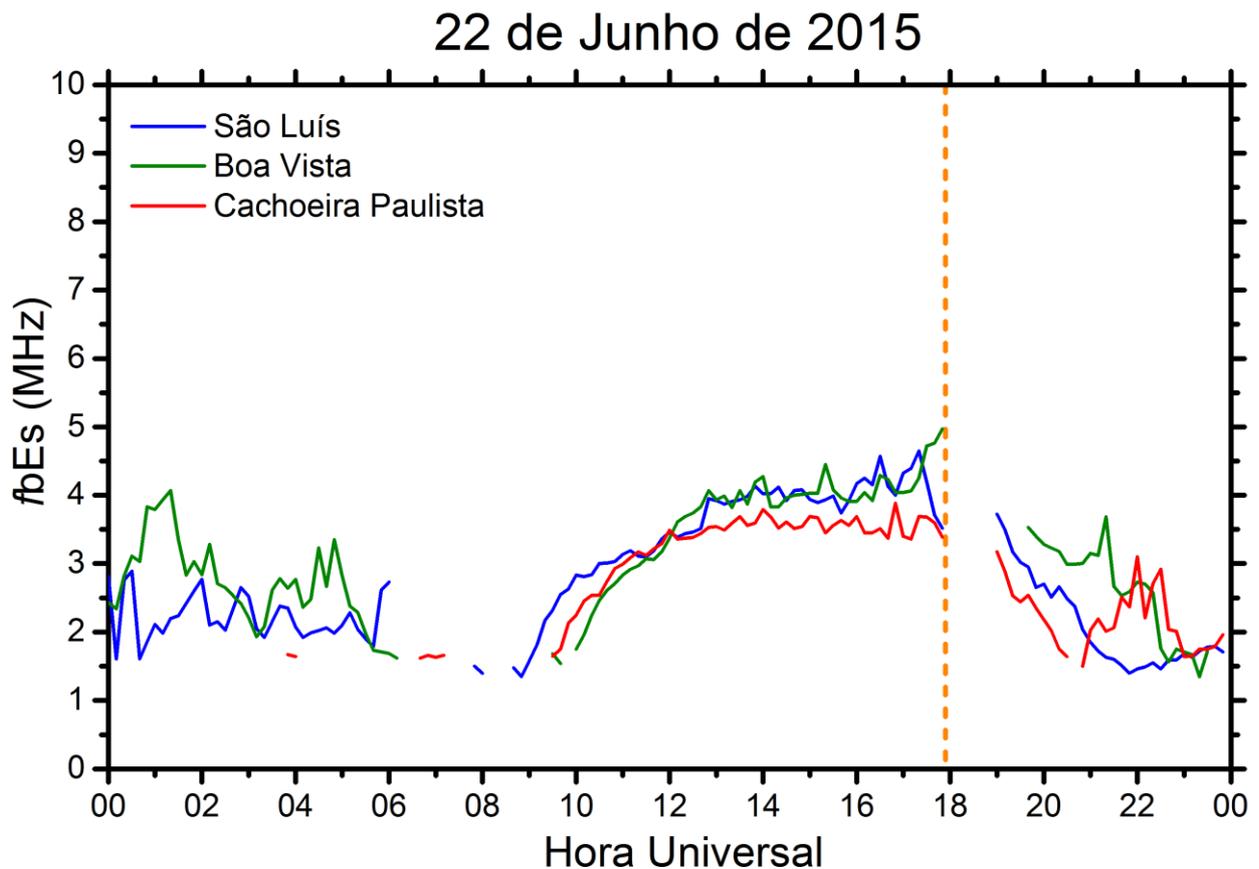
Cachoeira Paulista- 22 - 06 - 2015



Para melhor analisar os resultados dos ionogramas, o parâmetro $fbEs$, referente a camadas Es, e o parâmetro $f_{min}F$, o mínimo da região F ionosférica, são mostrados na figura 3.11 e 3.12, respectivamente. Nesta figura foram consideradas as três regiões de estudo, Boa Vista (linha verde), São Luís (linha azul) e Cachoeira Paulista (linha vermelha). Nota-se que ambos os parâmetros têm o mesmo comportamento senoidal e são coincidentes na maioria dos horários. Esse comportamento é típico e caracterizado por valores baixos durante a noite (2 MHz) e um aumento a partir das 0600 UT que dura até 1800 UT, alcançando 4,5 MHz. Após este horário, os valores de ambos os parâmetros voltam a decrescer. Contudo, alguns horários durante amanhã o $fbEs$ não está visível, referindo-se que a camada Es não estava presente nesses horários. Além disso, nos horários entre 0600 UT e 0900 UT o parâmetro $f_{min}F$ não é observado, significando que a região F também não apareceu. Este fato geralmente ocorre por falhas no equipamento.

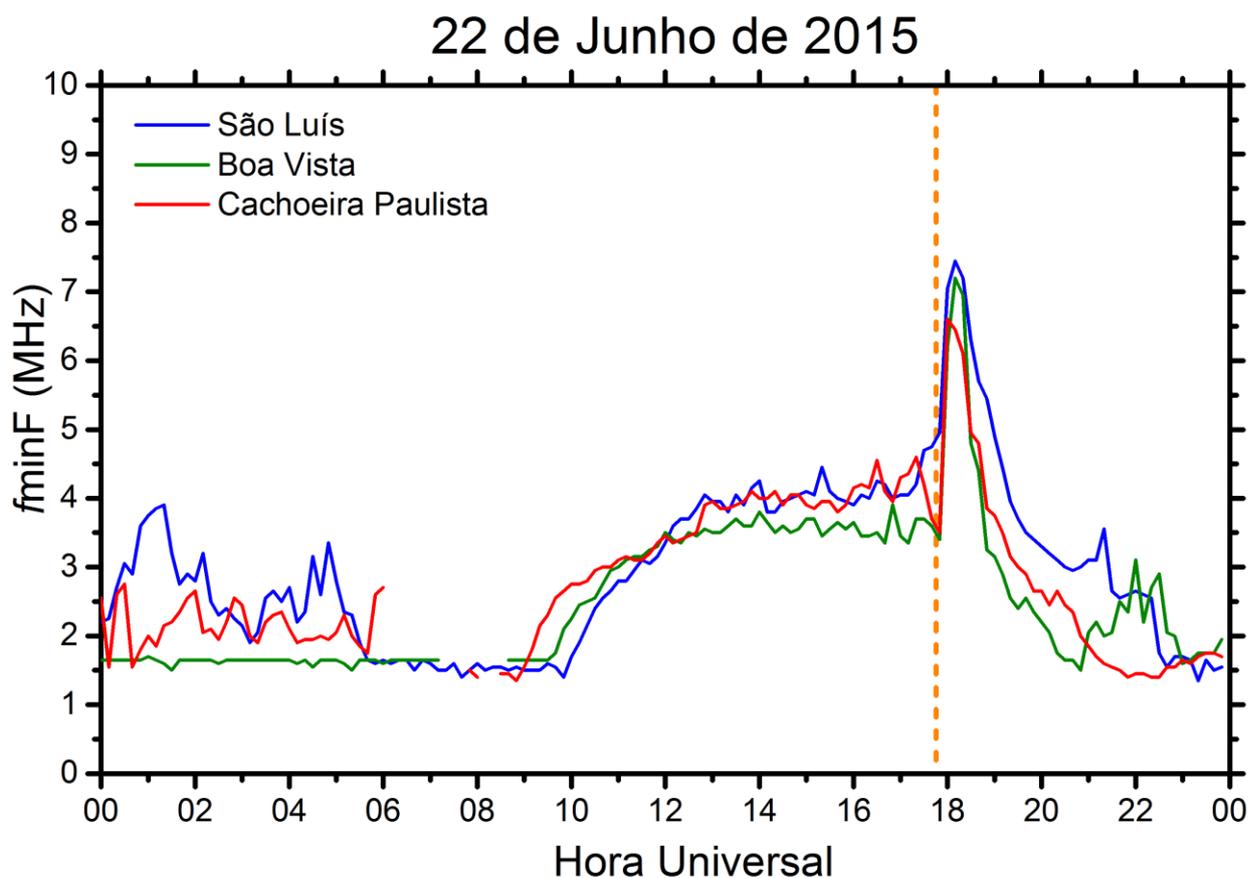
Nos horários em que ocorreu o pico de Raio-X (1800 UT) observa-se que o parâmetro $fbEs$ não é observado no gráfico da figura 3.11. Isso mostra que realmente a camada Es foi absorvida nos ionogramas devido a influência do flare de classe M. Como dito anteriormente, a energia de um flare solar influencia diretamente a região D ionosférica. Assim, os sinais da digisonda são absorvidos nessa região e a camada Es não pode ser visualizada.

Figura 3.11: Parâmetro $fbEs$ para as três regiões de estudo em 22 de Junho de 2015.



Em contraste, como se observa na figura 3.12, o parâmetro $f_{min}Es$ teve um pico significativo nas três regiões, e portanto, a região F foi parcialmente absorvida. Em São Luís este pico é mais expressivo, alcançando 7,5 MHz. Já os dados analisados de Boa Vista apresentam um pico em torno dos 6 MHz, enquanto os mesmos dados referentes a Cachoeira revelam um pico de 7 MHz no $f_{min}Es$. Acredita-se que por estes resultados, a região equatorial pode ser mais influenciada que as regiões de baixas latitudes.

Figura 3.12: Parâmetro $f_{min}F$ para as três regiões de estudo em 22 de Junho de 2015.



Por fim, é notável que os Raios-X provindos dos flares solares causaram uma absorção total nas camadas Es e parcial na região F ionosférica. Esse fenômeno é conhecido como *blackout* de HF e tem impactos significativos no ambiente do clima espacial. Para conclusões mais significativas serão analisados mais estudos de caso em trabalhos futuro.

CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES

No período de bolsa, o estudo concentrou-se na realização de trabalhos referentes ao assunto proposto, processamento e análise de dados. O método utilizado para o processamento de dados foi a redução dos dados da digissonda. Além disso, foi feito um estudo da literatura específica.

Primeiramente, em relação à análise de dados, foi feita um estudo dos ionogramas de 2006 e 2007 a fim de se verificar o comportamento da região E e das camadas Es tendo como resultado uma climatologia para as estações de São Luís e Cachoeira Paulista. Isso possibilitou o entendimento do comportamento dessas regiões ionosféricas, no qual verificou-se que a região de São Luís é considerada uma região de transição. Este fato foi comprovado pela presença de outros tipos de camadas Es, formadas devido ao processo de cisalhamentos de ventos, que não a Es_q.

Em Cachoeira Paulista, notou-se que as camadas Es predominante nesta região são as do tipo “l/f” e “c” que são características do vento zonal, principalmente a maré diurna. A camada Es do tipo “a” ocorre e é devido à precipitação de partículas uma vez que nessa região se tem a presença da Anomalia Magnética da América do Sul.

Adicionalmente, foi realizada uma análise dos ionogramas disponíveis no site do EMBRACE e dados provindos do satélite GOES dos anos de 2014 e 2015 para as regiões de Boa Vista, São Luís e Cachoeira Paulista. O objetivo foi verificar o efeito dos flares solares nas camadas Es e na região F. Em geral, os resultados obtidos permitiram concluir que dentre as várias classificações dos flares, os de classes M e X são os que mais afetaram a ionosfera. Os flares de classe M atingiram em maior proporção a região E e as camadas Es devido a alta ionização da região D ionosférica fazendo com que o sinal da digissonda seja absorvido em frequências mais baixas causando o desaparecimento parcial ou total da camada Es. Alguns casos de flares classe M também interferiram na região F, e esta região foi parcialmente absorvida. Já os flares de classe X, atingiram em proporções equivalentes a região E, as camadas Es e a região F causando blackout total dos ionogramas. Porém, no verão em Cachoeira Paulista nenhuma das regiões ionosféricas foram influenciadas pelos flares de classe X.

A fim de estudar mais a relação entre os flares solares e a ionosfera, foi feita uma análise de caso para o dia 22 de Junho de 2015, quando houve um flare de classe M seguido de uma forte tempestade magnética para as três regiões brasileiras, Boa Vista, São Luís e Cachoeira Paulista. Os resultados mostraram que durante este evento, tanto a

camada Es e a região F foram afetadas para as três estações brasileiras. Os ionogramas mostraram que a camada Es e parte da região F foram absorvidas. Isso foi observado através dos parâmetros $f_{min}F$ e f_bEs , onde ocorre um pico do $f_{min}F$ e ausência do f_bEs para as três regiões ao mesmo tempo. Porém, as regiões equatoriais (Boa Vista e São Luís) apresentam um pico do $f_{min}F$ maior em relação a região de baixa latitude (Cachoeira Paulista), podendo-se assim chegar a conclusão de que as regiões equatoriais são as que mais sofrem interferência. Em relação à ausência do parâmetro f_bEs para as três regiões, podemos concluir que a energia de um flare solar influencia diretamente a região D ionosférica, ionizando-a e absorvendo o sinal das ondas de rádio. Portanto, a camada Es não é observada nos ionogramas.

Finalmente, com as atividades teóricas e técnicas realizadas nesse período de bolsa, o cronograma do projeto foi cumprido. O estudo dos efeitos dos flares solares na ionosfera foi importante para a pesquisa no Clima Espacial e, pretende-se, dar continuidade a este projeto.

BIBLIOGRAFIA

Almeida, P. D. S. C. Estudos comparativos de simulações numéricas e análises de dados de perfis de densidades eletrônicas para a região brasileira. Dissertação (Iniciação Científica – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos – SP, 2006.

Arras, C. Semidiurnal tidal signature in sporadic E occurrence rates derived from GPS radio occultation measurements at higher midlatitudes, **Journal of Annales Geophysicae**, v.27, p. 2555-2556.

Aveiro, H. Electric and Magnetic Field Signatures of Gravity Waves and 2-Day Planetary Waves in The Equatorial E-region. Dissertação (Mestrado - Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2009.

Balsley, B. B.; Rey, A.; Woodman, R. F. On the plasma instability mechanisms responsible for eq. **Journal of Geophysical Research**, v. 81, n. 7, p. 1391–1396, 1976

Bertoni, F. C. P. Derivas Ionosféricas em latitudes equatoriais: observações e modelagem. Tese (Doutorado – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos – SP, 2004.

Bowles, K. L.; Cohen, R.; Ochs, G. R.; Balsley, B. B. Radio echoes from field-aligned ionization above the magnetic equator and their resemblance to auroral echoes. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n. A6, p. 1853–1855, 1960.

Bowles, K. L.; Cohen, R. A Study of Radio Wave Scattering from Sporadic E near The Magnetic Equator. p. 51, 1962.

Carrasco, A. J. O Pico Pré-Inversão na Deriva Vertical de Plasma e a Camada E Esporádica, Dissertação (Doutorado – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005.

Crochet, M., P. Broche, and C. Hanuise, HF radar Studies of 2-stream instability during an equatorial counter-electrojet, *J. Geophys. Res.*, 84, 203–204, 1979.

Cohen, R.; Bowles, K. L. Ionospheric vhf scattering near the magnetic equator during the international geophysical year. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v. 67D, p. 459–480, 1963

Devasia, C. V., V. Sreeja, and S. Ravindran, Solar cycle dependent characteristics of the equatorial blanketing Es layers and associated irregularities, *Ann. Geophys.*, 24, 2931–2947, 2006

Denardini, C. M. Desenvolvimento de um Sistema de Correção de Fase para o Radar Ionosférico de São Luís do Maranhão, Dissertação (Mestrado – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1999.

Denardini, C. M. Estudo da Eletrodinâmica da Ionosfera Equatorial Durante o Período de Máxima Atividade Solar (1999-2002). Tese (Doutorado – Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003.

Dernardini, C. M. Occurrence of the blanketing sporadic E layer during the recovery phase of the October 2003 superstorm. *Earth, Planets and Space*, p. 2 – 9, 2016.

Forbes, J. M. The Equatorial Electrojet. **Reviews of Geophysics**, v. 19, n. 3, p. 469–504, 1981.

Haldoupis, C., A tutorial review on Sporadic E layers, *Aeronomy of the Earth's Atmosphere – Ionosphere. IAGA Book Ser.* 29 (2), 381-394, 2011.

Jacobi, C., Arras, C., Kurschner, D., Singer, W., Hoffmann, P., and Keuer, D.: Comparison of mesopause region meteor radar winds, medium frequency radar winds and low frequency drifts over Germany, **Adv. Space Res.**, 43, 247–252, 2009.

Jesus, R. Estudo de eventos do tempo espacial (“space weather”) e a ocorrência de bolhas de plasma ionosféricos no setor brasileiro e japonês usando sondagem ionosférica. Dissertação (Mestrado – Física e Astronomia) – Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), São José dos Campos – SP, 2008.

Manson, A. H., Luo, Y., and Meek, C.: Global distributions of diurnal and semi-diurnal tides: observations from HRDI-UARS of the MLT region, *Ann. Geophys.*, 20, 1877–1890, 2002

Moro, J. Variações Longitudinais dos Campos Elétricos do Eletrojato Equatorial no Setor Americano, Dissertação (Doutorado – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015.

Mitra, S. K. **The upper atmosphere. Institute of Radio Physics and Electronics.** Calcutta: University College of Science, 1952.

Rastogi, R. Equatorial sporadic e and cross-field instability. *Annales Geophysicae*, v. 28, n. 4, p. 717–727, 1971

Reddy, C. A.; Devasia, C. V. Formation of blanketing sporadic e-layers at the magnetic equator due to horizontal wind shears. **Planetary and Space Science**, v. 21, n. 5, p. 811–812, 1973.

Resende, L. C. A.; Batista, I. S.; Denardini, C. M.; Batista, P. P.; Carrasco, A. J.; Andrioli, V. F.; Moro, J. Simulations of blanketing sporadic E-layer over the Brazilian sector driven by tidal winds. **Journal of Atmospheric and Solar – Terrestrial Physics**, v. 154, p. 104-114, 2017

Resende, L. C. A. Ocorrência de camadas E esporádicas em condições de eletrojato equatorial e contra eletrojato: teorias e observações. Dissertação (Exame de Qualificação – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.

Resende, L. C. A. Estudo dos efeitos do clima espacial no ambiente ionosférico brasileiro, com ênfase em médias e baixas latitudes, que possibilitem o desenvolvimento de ferramentas de previsão do clima espacial local. Dissertação (Iniciação Científica – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos – SP, 2008.

Resende, L. C. A. Estudo do Comportamento dos Parâmetros de Frequência das Camadas E-Esporádicas na Região Equatorial Durante Períodos Perturbados ($DST \leq -100$ NT), Dissertação (Mestrado – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2010.

Sahai, Y.; Becker-Guedes, F.; Fagundes, P. R.; Lima, W. L. C.; Abreu, A. J.; Guarnieri, F.; Candido, C. M. N.; Pillat, V. G. Unusual ionospheric effects observed during the intense 28 October 2003 solar flare in the Brazilian sector. **Annals Geophysicae**, v. 25, n. 15, p. 2497 – 2502, 2007.

Tarpley, J. D. The Ionospheric Wind Dynamo-II-Solar Tides. **Planetary and Space Science**, v. 18, n. 7, p. 1091-1103, 1970.