

UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA  
INSTITUTO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E ASTRONOMIA

PÂMELA RITA PEREIRA MEIBACH ROSA

**OBSERVAÇÕES SIMULTÂNEAS DE IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS COM  
DIFERENTES TAMANHOS DE ESCALA DURANTE O MÍNIMO ENTRE OS  
CICLOS SOLARES 23 E 24**

São José dos Campos  
2018

PÂMELA RITA PEREIRA MEIBACH ROSA

OBSERVAÇÕES SIMULTÂNEAS DE IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS COM  
DIFERENTES TAMANHOS DE ESCALA DURANTE O MÍNIMO ENTRE OS CICLOS  
SOLARES 23 E 24

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em Física e  
Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba.

Orientadores:  
Prof. Dr. Marcio Tadeu de Assis Honorato Muella  
Profa. Dra. Virginia Klausner de Oliveira

São José dos Campos  
2018

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA**

**Ficha catalográfica**

Rosa, Pâmela Rita Pereira Meibach  
Observações simultâneas de irregularidades ionosféricas com diferentes tamanhos de escala durante o mínimo entre os ciclos solares 23 e 24 / Pâmela Rita Pereira Meibach Rosa; orientador, Prof. Dr. Marcio Tadeu de Assis Honorato Muella; co-orientadora Profa. Dra. Virginia Klausner de Oliveira. - São José dos Campos, SP, 2018.

1 CD-ROM, 135 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

1. Física e Astronomia. 2. Ionosfera. 3. Sistema de posicionamento global. 4. Receptores. 5. Imagerdores. I. Muella, Prof. Dr. Marcio Tadeu de Assis Honorato, orient. II. Oliveira, Profa. Dra. Virginia Klausner de, co-orient. III. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. IV. Título.

Eu, Pâmela Rita Pereira Meibach Rosa, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 22 de Maio de 2018.



Autor(a) da Obra

---

**PÂMELA RITA PEREIRA MEIBACH ROSA**

**“OBSERVAÇÕES SIMULTÂNEAS DE IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS COM DIFERENTES TAMANHOS DE ESCALA DURANTE O MÍNIMO ENTRE OS CICLOS SOLARES 23 E 24”.**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

PROF. DR. ARIAN OJEDA GONZÁLEZ

PROF. DR. MARCIO TADEU DE ASSIS HONORATO MUJELA

PROF.<sup>a</sup> DR.<sup>a</sup> VIRGINIA KLAUSNER DE OLIVEIRA

PROF. DR. VALDIR GIL PILLAT

PROF. DR. ALEXANDRE ALVARES PIMENTA – INPE

Prof. Dr. Leandro José Raniero

Diretor do IP&D – Univap

São José dos Campos, 28 de Fevereiro de 2018.

Pela fé compreendemos que o Universo foi criado por intermédio da Palavra de Deus e que aquilo que pode ser visto foi produzido a partir daquilo que não se vê.

Hebreus 11:3

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço imensamente aos meus orientadores Prof. Dr. Marcio Muella e Profa. Dra. Virgínia Klausner por toda genialidade, profissionalismo e amizade ao longo dos últimos anos.

A todos os professores e colegas do departamento de Física e Astronomia cujo convívio construtivo e amigável forneceu inestimável apoio e profundo crescimento pessoal.

À Fundação Vale Paraibana de Ensino pelo apoio intencional à pesquisa científica através de sua infraestrutura material, humana e organizacional.

À CAPES pelo financiamento do curso sem o qual não seria possível a concretização do mesmo.

Aos meus pais Lincoln e Judite pelo amor incondicional, paciência e incentivo constante.

## RESUMO

Irregularidades ionosféricas são consideradas um dos mais relevantes fenômenos da atmosfera superior nas regiões equatorial e de baixa latitude e têm sido amplamente estudadas, pois denotam as não-homogeneidades observadas na densidade do plasma. As irregularidades podem causar flutuações nas ondas de rádio que interagem com o plasma da ionosfera, interferindo nos sinais de telecomunicações, tanto ionosféricos quanto transionosféricos. O mecanismo mais aceito para explicar a formação das irregularidades é o processo de instabilidade Rayleigh-Taylor, que inicia na base da camada F da ionosfera e aumenta de tamanho à medida que evolui para alturas maiores. As estruturas de irregularidades quando desenvolvidas tendem a derivar para leste acompanhando o movimento natural do plasma, e se estendem ao longo das linhas do campo geomagnético em direção a latitudes mais afastadas do equador. As irregularidades ionosféricas de grande escala (denominadas bolhas de plasma) podem se estender até a região da Anomalia na Ionização Equatorial (EIA) em torno de  $15^{\circ}$ - $20^{\circ}$  de latitude magnética, onde intersectam uma região de altos níveis de densidade eletrônica. Durante o processo de formação e desenvolvimento das bolhas de plasma, irregularidades com tamanhos de escala menores gerados por mecanismos secundários de instabilidade podem coexistir com as estruturas de maiores escalas. Irregularidades com diferentes tamanhos de escala horizontais, desde pouco centímetros até centenas de quilômetros, podem ser estudados por meio de diferentes técnicas de observação. Neste estudo foi analisado dados obtidos entre 2008-2010 nas estações de monitoramento ionosférico de São José dos Campos ( $23,2^{\circ}$ S;  $45,9^{\circ}$ O) e Palmas ( $10,2^{\circ}$ S;  $48,2^{\circ}$ O), visando verificar assinaturas de irregularidades ionosféricas nos registros simultâneos de diferentes instrumentos de observação (imageador óptico, ionossonda e receptores GPS). Durante os anos de 2008-2010 ocorreu o período de extremo mínimo na atividade solar entre os ciclos 23 e 24, quando a ionosfera global se tornou menos escura e apresentou níveis reduzidos de densidade eletrônica. Consequentemente, a geração e evolução das irregularidades na ionosfera tropical foram significativamente afetadas. Para monitorar as estruturas de irregularidades de maiores escalas foram analisados dados de emissão de luminescência do OI 6300 registrados por imageadores all-sky, e dados de espalhamentos nos traços da região F em ionogramas gravados por ionossondas digitais. Os espalhamentos nos ionogramas foram classificados quanto ao tipo e intensidade. O monitoramento de estruturas de escalas intermediárias foi realizado a partir de medidas de cintilações na amplitude dos sinais recebidos dos satélites GPS, e a partir das flutuações observadas nas estimativas do conteúdo eletrônico total. Na estação de São José dos Campos foram encontrados 05 eventos de irregularidades com registros simultâneos nas quatro diferentes técnicas de medição, enquanto que em Palmas foram registrados 10 eventos em três técnicas disponíveis. Para cada um dos eventos foram analisadas medidas simultâneas dos parâmetros de altura da base ( $h'F$ ) e do pico ( $h_pF2$ ) da camada F, da frequência crítica da camada F2 ( $f_oF2$ ), da deriva aparente da ionosfera ( $dh'F/dt$ ) e do conteúdo eletrônico total vertical (VTEC). Adicionalmente, para os eventos observados em São José dos Campos foram estimados os gradientes horizontais na densidade eletrônica. Os mecanismos físicos envolvidos na geração e evolução das irregularidades durante um período em que as condições ionosféricas foram desfavoráveis, serão discutidos com base nas observações coletadas pelos diferentes instrumentos e técnicas, constituindo a principal contribuição deste trabalho.

Palavras-chave: Irregularidades ionosféricas. Ionosfera de baixa-latitude. Camada F. Luminescência atmosférica. VTEC.

Simultaneous Observations Of ionospheric irregularities with different scale sizes during the solar minimum cycle 23 and 24

**ABSTRACT**

Ionospheric irregularities are one of the most relevant phenomena of the upper atmosphere at equatorial and low latitude regions. The irregularities denote the non-homogeneities in the plasma density and the topic has been widely studied in ionospheric physics. The irregularities can provoke fluctuations in the radio waves that interact with the ionosphere, interfering in both the ionospheric and transionospheric communications. The most accepted mechanism to explain the formation of the irregularities is the Rayleigh-Taylor plasma instability, which starts at the base of the ionospheric F layer. The well-developed irregularity structures evolve to the topside ionosphere and tend to drift eastward following the natural movement of the plasma, then extending along the geomagnetic field lines toward off-equatorial latitudes. The large-scale ionospheric plasma density irregularities (or plasma bubbles) can expand until latitudes of the Equatorial Ionization Anomaly (EIA) at around  $15^{\circ}$ - $20^{\circ}$  of dip latitude. At the EIA the plasma bubbles intersect a region of increased electron density. During the formation and growing of the plasma bubbles, ionospheric irregularities with smaller scale sizes are generated due to the action of secondary instability mechanisms. The irregularities with scale sizes ranging from few centimeters to hundreds of kilometers can be investigated using different techniques of observation. In this study, the data obtained between 2008-2010 at the observatories of São José dos Campos ( $23.2^{\circ}$ S;  $45.9^{\circ}$  W) and Palmas ( $10.2^{\circ}$ S;  $48.2^{\circ}$ W) were analyzed to investigate simultaneous measurements of ionospheric irregularities collected by three different instruments (optical imager, digital ionosonde and GPS receivers). During the years of 2008-2010 occurred the extreme solar minimum period between cycles 23 and 24. Throughout the deep minimum, the global ionosphere became thinner and the electron density reduced to very low levels. Consequently, the generation and evolution of the irregularities in the tropical ionosphere have been significantly affected. The monitoring of large-scale irregularity structures were obtained from airglow emissions of the OI 6300 recorded by all-sky imagers, and by the spread-F traces registered in the ionograms recorded by digital ionosondes. The intermediary structures have been analyzed from amplitude scintillation data and from fluctuations in the total electron content, both obtained from GPS observations. In the station of São José dos Campos 05 simultaneous events of ionospheric irregularities were observed by the four different techniques, whereas in Palmas were registered 10 events in three techniques available at the station. For each one of the events it has also been analyzed the simultaneous measurements of F layer base ( $h'F$ ) and peak ( $h_pF_2$ ) height parameters, the F2-layer critical frequency ( $f_oF_2$ ), the ionospheric apparent drift velocities ( $dh'F/dt$ ) and the vertical total electron content (VTEC). In addition, for the events at São José dos Campos the ionospheric horizontal density gradients have also been estimated. The physical mechanisms during the period when the ionospheric conditions were unfavorable to the generation and evolution of the irregularities, are discussed using as base the parameters measured by the different instruments and techniques, constituting the main contribution of this work.

Keywords: Ionospheric irregularities. Low-latitude ionosphere. F Layer. Airglow. VTEC.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil de temperatura da atmosfera e sua variação com a atividade solar.....	20
Figura 2 – Composição química presente nas diferentes regiões da atmosfera. ....	23
Figura 3 – Perfil da ionização e regiões da ionosfera.....	25
Figura 4 – Representação da direção do movimento de cargas na ionosfera. ....	32
Figura 5 – Diagrama esquemático do dínamo da região E da ionosfera. ....	33
Figura 6 – Representação de região de acúmulo de carga. ....	34
Figura 7 - Contribuição do vento meridional para a deriva vertical.....	35
Figura 8 - Representação esquemática do dínamo da região F equatorial. ....	36
Figura 9 – (a) Deriva vertical iônica medida em Jicamarca; e (b) Deriva vertical iônica medida em Fortaleza onde nota-se o efeito fonte equatorial. ....	37
Figura 10 – Figura ilustrativa de um plasma sob o efeito da instabilidade gravitacional Rayleigh-Taylor. ....	39
Figura 11 – Figura esquemática do mecanismo de instabilidade GR-T sem a presença de perturbações. ....	40
Figura 12 – Figura esquemática do mecanismo de instabilidade GR-T com a presença de campos elétricos de polarização na região das perturbações.....	41
Figura 13 – Figura esquemática do mecanismo de instabilidade GR-T em que a perturbação está sob ação de uma deriva eletrodinâmica. ....	42
Figura 14 – Alinhamento do terminador com o meridiano magnético, (a) alinhado e (b) em ângulo. .	44
Figura 15 – Número de manchas solares entre os anos de 2000 e 2017. ....	48
Figura 16 – (a) Média global da densidade da atmosfera para uma altura de 400 km entre os ciclos solares 20-23; (b) fluxo de radiação solar em 10.7 cm; (c) média corrida de 81 dias do gráfico (a); (d) média corrida de 81 dias do gráfico (b).....	48
Figura 17 – Diagrama das bandas de emissão do oxigênio atômico.....	51
Figura 18 – Incidência das ondas de rádio na ionosfera.....	53
Figura 19 – Trajetória do sinal do satélite do GPS até o receptor GNSS instalado em solo.....	61
Figura 20 - Processamento e seleção das imagens pelo software UASDA.....	64
Figura 21 – Tela de visualização e redução de dados pelo programa UDIDA. ....	65
Figura 22 – Modelos padrão de tipos e subtipos dos traços de espalhamentos RSF, FSF e MSF conforme manual da U.R.S.I.....	66
Figura 23 – Exemplos de ionogramas com os tipos e subtipos de espalhamentos conforme manual da U.R.S.I.....	66
Figura 24 – Intensidade dos espalhamentos em altura. ....	67
Figura 25 – Valores do conteúdo eletrônico total vertical (VTEC) calculados para todos os satélites GPS visíveis sobre a estação de PAL no dia 01-01-2008. ....	68
Figura 26 – Janela do programa UTECDA com os observatórios cadastrados para cálculo do TEC...	69
Figura 27– Janela do programa UTECDA para cálculo do TEC e posterior cálculo do ROT.....	70
Figura 28 - Observações em Palmas do evento de 02-03 de janeiro de 2008: (a) imagens captadas da emissão no OI 6300; (b) mesma sequência de imagens linearizadas; (c) intensidades (W, M e S) e tipos (RSF, FSF e MSF e A, B, C) dos espalhamentos; (d) taxa de variação do TEC (ROT) calculado dos PRNs 21, 24, 29 e 30; (e-h) registros dos parâmetros $h'F$ , $foF2$ , $hpF2$ e dos valores calculados de $dh'F/dt$ na noite do evento (linha preta) e para os dias de referência (linha vermelha); (i) TEC vertical no dia do evento (linha preta) e para os dias de referência (linha azul). ....	81

Figura 29 - Observação em Palmas do evento de 11-12 de janeiro de 2008: Os painéis (a-b) e (d-j) são assim como na Fig. 28, O painel (c) denota a variação da intensidade de luminescência atmosférica do OI 6300.....	85
Figura 30 - Observações em Palmas do evento de 31 de outubro – 01 de novembro de 2008 de janeiro de 2008. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 28.....	88
Figura 31 - Observações em Palmas do evento de 02-03 de novembro 2008. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 28.....	91
Figura 32- Observações em Palmas do evento de 03-04 de novembro de 2008. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 28.....	94
Figura 33 - Observações em Palmas do evento de 03-04 de dezembro de 2008. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 28.....	97
Figura 34 - Observações em Palmas no dia de 05-06 de dezembro de 2008. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 28.....	100
Figura 35 - Observações em Palmas do evento de 17-18 de novembro de 2009. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 28.....	103
Figura 36 - Observações em Palmas do evento de 04-05 de fevereiro de 2009. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 28.....	106
Figura 37- Observações em Palmas do evento de 15-16 de julho de 2010. Os painéis (a-h) são assim como na Figura 28.....	109
Figura 38 - Observações em SJC do evento de 23-24/10/2009: (a) imagens não linearizadas da emissão no OI 6300; (b) intensidades (W, M e S) e tipos (RSF, FSF e MSF e A, B, C) dos espalhamentos; (c) taxa de variação do TEC (ROT); (d) índice S4 de cintilação em amplitude; (e) gradiente latitudinal de densidade eletrônica; (f-i) parâmetros $h'F$ , $foF2$ , $hpF2$ e valores calculados de $dh'F/dt$ ; (j) TEC vertical no dia do evento (linha preta) e para os dias de referência (linha azul). ....	116
Figura 39 - Observações em SJC do evento de 14-15 de novembro de 2009. Os painéis (a-j) são assim como na Figura 38.....	119
Figura 40- Observações em SJC do evento de 09-10 de março de 2010. Os painéis (a-j) são assim como na Figura 38.....	122
Figura 41 - Observações em SJC do evento de 10-11 de março de 2010. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 38.....	125
Figura 42 - Observações em SJC do evento de 11-12 de março de 2010. Os painéis (a-j) são assim como na Figura 38.....	128

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da homosfera.....	22
Tabela 2 – Formação e remoção dos constituintes atmosféricos. ....	22
Tabela 3 – Principais processos de perda de ionização e elétrons ocorridos na ionosfera.....	26
Tabela 4 – Principais reações fotoquímicas que ocorrem nas regiões E e F. ....	27
Tabela 5 – Nomenclatura das faixas de frequência das ondas de rádio desde o ULF até o EHF.....	53
Tabela 6 – Eventos de bolhas de plasma selecionados a partir das imagens de luminescência atmosférica noturna em OI 630,0 nm para a estação de Palmas entre os anos de 2008 e 2010.....	72
Tabela 7 – Datas com observações simultâneas de irregularidades pelo imageador e espalhamento nos ionogramas para a estação de Palmas. ....	73
Tabela 8 - Eventos de irregularidades ocorridos em Palmas.....	75
Tabela 9 – Eventos de bolhas de plasma selecionados a partir das imagens de luminescência atmosférica noturna em OI 630,0 nm para a estação de São José dos Campos. ....	110
Tabela 10 – Datas com observações simultâneas de irregularidades pelo imageador e espalhamento nos ionogramas para a estação de São José dos Campos.....	111
Tabela 11 - Eventos de irregularidades ocorridos em São José dos Campos.....	112

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
2	A ATMOSFERA TERRESTRE .....	20
3	A IONOSFERA .....	24
3.1	DINÂMICA FUNDAMENTAL DO PLASMA IONOSFÉRICO .....	27
3.2	TEORIA DO DÍNAMO DAS REGIÕES E E F.....	32
3.3	AS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS .....	38
3.3.1	Teoria Linear da Instabilidade Gravitacional Rayleigh-Taylor.....	39
3.3.2	Teoria Generalizada da Instabilidade Rayleigh-Taylor.....	42
3.4	ALINHAMENTO ENTRE O TERMINADOR E O MERIDIANO MAGNÉTICO .....	43
4	MÍNIMO SOLAR ENTRE OS ANOS DE 2008-2010 .....	45
5	INSTRUMENTAÇÃO.....	49
5.1	AEROLUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA E IMAGEADOR ÓPTICO.....	49
5.2	PROPAGAÇÃO IONOSFÉRICA E A ANÁLISE DOS DADOS DA IONOSSONDA DIGITAL .....	52
5.3	PROPAGAÇÃO TRANSIONOSFÉRICA E O PROCESSAMENTO DOS DADOS DOS RECEPTORES GNSS .....	57
6	METODOLOGIA .....	63
6.1	ANÁLISE DOS DADOS DO IMAGEADOR ÓPTICO .....	63
6.2	ANÁLISE DOS DADOS DA IONOSSONDA DIGITAL.....	64
6.3	PROCESSAMENTO DOS DADOS DO RECEPTORES GNSS .....	67
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS EVENTOS DE PALMAS .....	72
7.1	EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 02-03/01/2008 .....	75
7.2	EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 11-12/01/2008 .....	82
7.3	EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 31/10/2008 - 01/11/2008 .....	86
7.4	EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 02-03/11/2008 .....	89
7.5	EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 03-04/11/2008 .....	92
7.6	EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 03-04/12/2008 .....	95
7.7	Evento em Palmas da noite do dia 05-06/12/2008.....	98
7.8	EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 17-18/11/2009 .....	101
7.9	EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 04-05/02/2010 .....	104
7.10	EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 15-16/07/2010 .....	107

8	RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS EVENTOS DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	110
8.1	EVENTO EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS DA NOITE DO DIA 23-24/10/2009 .....	113
8.2	EVENTO EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS DA NOITE DO DIA 14-15/11/2009 .....	117
8.3	EVENTO EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS DA NOITE DO DIA 09-10/03/2010 .....	120
8.4	EVENTO EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS DA NOITE DO DIA 10-11/03/2010 .....	123
8.5	EVENTO EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS DA NOITE DO DIA 11-12/03/2010 .....	126
9	CONCLUSÕES .....	129
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	134

## 1 INTRODUÇÃO

As irregularidades ionosféricas surgem devido a uma cadeia de fenômenos que ocorrem no plasma ambiente da ionosfera equatorial. As irregularidades de maior interesse são aquelas tipicamente noturnas e que ocorrem na região superior da ionosfera em latitudes tropicais. Essas irregularidades são as que causam as maiores interferências nas comunicações via satélite. Como a região de maior densidade eletrônica da ionosfera localiza-se entre a base e o topo da camada, denominada região F, para explicar a formação das irregularidades considera-se uma analogia na qual se representa dois fluidos de diferentes densidades em interação. Um fluido de maior densidade fica posicionado acima em direção ao topo e o de menor densidade na parte inferior da camada. A interface entre estes dois fluidos está em constante instabilidade e na ocorrência de uma perturbação, o fluido mais denso, devido a força de gravidade, tenderá a ocupar o lugar do fluido menos denso. Após iniciada, a perturbação pode evoluir na forma de estruturas de plasma rarefeito, ou seja, irregularidades ionosféricas. O nome deste mecanismo amplamente aceito na literatura para explicar a formação das irregularidades na região F da ionosfera é denominado por Instabilidade Gravitacional Rayleigh-Taylor (GRT) (DUNGEY, 1956 apud KELLEY, 1989).

As irregularidades formadas na base da região F da ionosfera equatorial, como consequência da instabilidade GRT, tendem a evoluir em direção a alturas maiores devido à ação de forças eletrodinâmicas. Geralmente, estas estruturas de irregularidades à medida que vão se elevando na região F em direção à altura do pico de densidade eletrônica, tendem também a se tornarem cada vez maiores. Com isso, estruturas de plasma rarefeito com dimensões da ordem de dezenas a centenas de quilômetros começam a se formar e a se deslocarem em direção a alturas cada vez maiores acima do pico da camada F2. A estas estruturas de irregularidades de grande escala (dimensões horizontais  $> 10$  km) é geralmente empregado o termo bolhas de plasma. As bolhas de plasma podem atingir alturas superiores a 1200 km sobre o equador magnético (HARGREAVES, 1992; ABDU et al., 1998; WOODMAN; LA HOZ, 1976). Em condições magneticamente calmas as bolhas de plasma tendem a acompanhar o plasma ionosférico e a derivarem no sentido oeste-leste. Uma vez que as bolhas ionosféricas surgem sobre o equador magnético, vão se expandindo e se estendendo ao longo das linhas do campo magnético em direção à ionosfera em regiões de baixas latitudes. Quanto mais alto as bolhas subirem sobre o equador, maiores serão as latitudes na qual podem se estender.

Outro aspecto interessante é que as irregularidades de grande escala deixam um rastro de irregularidades secundárias menores atrás de si enquanto evoluem e se movem. Segundo o trabalho de Woodman e La Hoz (1976), podem ser observadas irregularidades de várias dimensões em toda extensão da região F, independente da direção vertical do movimento da estrutura de depleção. As teorias apontam que condições de fortes gradientes de ionização favorecem processos de instabilidade no plasma, onde estruturas de menores escalas podem ser geradas a partir de estruturas de maiores escalas por ação de mecanismos secundários. Segundo Kuo, Chou e Shan (1998), as bolhas ionosféricas com movimento ascendente que atravessam a camada F2 podem gerar estruturas menores devido à ação de processos de instabilidade não-lineares. Haerendel (1974) aponta o processo em cascata das bolhas de grande escala como fonte de outras irregularidades com dimensões menores. Embora os processos físicos secundários mais efetivos ainda não estejam muito bem esclarecidos, pode-se citar como possíveis mecanismos: a instabilidade “cross-field” (TSUDA; SATO; MATSUSHITA, 1969); a instabilidade de deriva de dois passos (HUDSON et al., 1973; 1974); a instabilidade de modo de deriva colisional (HUDSON; KENNEL, 1975); a instabilidade de deriva de onda não-colisional (COSTA; KELLEY, 1978) e a instabilidade do plasma de deriva híbrida inferior (HUBA, 1981). Observações de foguete sobre Natal (5,9°S, 35,2°W) e Alcântara (2,31°S, 44,4°W), no setor brasileiro, revelaram que, na ionosfera superior, onde o gradiente de densidade eletrônica é descendente, o plasma pode se tornar especialmente instável devido ao mecanismo de instabilidade “cross-field”, causando a geração de irregularidades de menor escala (MURALIKRISHNA; VIEIRA, 2007). Odriozola et al. (2017) observaram irregularidades de média escala entre 100 e 300 km de altura sobre Alcântara utilizando dados de foguete e, de acordo com os autores, o perfil de densidade eletrônica vertical obtido apresentou padrões de onda de pequena e média escala característicos de irregularidades com diferentes tamanhos de escala. Além disso, quando as estruturas de grande escala (bolhas) se estendem até a região da Anomalia na Ionização Equatorial (EIA), onde a densidade ambiente é maior do que a densidade no interior das bolhas, os fortes gradientes de densidade atuando nas bordas das estruturas podem criar condições favoráveis para a geração de irregularidades de menores escalas (KESKINEN; OSSAKOW; FEJER, 2003; MUELLA et al., 2013).

Em virtude da larga faixa de dimensões que as irregularidades na ionosfera tropical podem assumir, sua detecção pode ser obtida a partir de diferentes técnicas. As assinaturas das irregularidades nos registros dos diferentes instrumentos são nomeadas de formas distintas, como por exemplo, aquelas com dimensões intermediárias de centenas de metros até

poucos quilômetros que produzem as chamadas cintilações nos sinais transmitidos por satélites em UHF e VHF. As irregularidades da ordem de dezenas a centenas de quilômetros dão origem aos traços espalhados (spread-F) observados nos ionogramas e as estruturas de depleção observadas nas imagens de luminescência atmosférica. O emprego simultâneo de instrumentos que adotam diferentes técnicas de observação fornece dados relevantes para os estudos de geração, evolução e decaimento de irregularidades ionosféricas com diferentes tamanhos de escala. Por exemplo, o trabalho de Valladares et al. (1996) investigou a dinâmica diária de irregularidades de média escala (com dimensões de 25 m à 1 km) sobre a América do Sul empregando vários instrumentos ópticos e de rádio. Rodrigues et al. (2004) empregaram dados de medidas simultâneas de plumas nos registros de radar VHF, cintilações em amplitude na frequência L1 do GPS e spread-F em ionogramas para estudarem sobre o setor brasileiro a evolução espacial e temporal das irregularidades com diferentes tamanhos de escala. Cueva (2013) também estudou plumas utilizando radar VHF e radar de espalhamento incoerente em três estações equatoriais e obteve resultados que mostraram a variabilidade da ocorrência de irregularidades com a sazonalidade e o fluxo solar. Lee et al. (2005) investigaram sobre Jicamarca, no Peru, os mecanismos que atuam sobre a formação das irregularidades. Neste caso, empregaram observações simultâneas de dados de ionossonda e dados do satélite ROCSAT-1. Chen et al. (2006) compararam os dados obtidos com receptores GPS e dados de ionossonda coletados de observatórios localizados na costa oeste da América do Sul, e reportaram fortes flutuações de fase nos sinais da banda L do GPS associadas as bolhas de plasma localizadas no topo da camada. Dashora, Taori e Patra et al. (2012) realizaram observações coordenadas de Conteúdo Eletrônico Total (TEC), medidas de radar, ionossonda e fotômetro imageador para estudarem a evolução espaço-temporal das irregularidades da região F na zona de baixa latitude sobre o setor indiano. Mais recentemente, Wang et al. (2015) relataram observações simultâneas de bolhas de plasma registradas a partir de uma ionossonda digital, com medidas in-situ de densidade de ionização obtida a partir do satélite ROCSAT-1 e de cintilações nos sinais recebidos dos satélites GPS.

As irregularidades ionosféricas caracterizam-se por ser um dos mais relevantes fenômenos da ionosfera tropical em diferentes setores longitudinais. A ionosfera tropical no setor brasileiro apresenta algumas peculiaridades que compõem um cenário propício para a geração de irregularidades. O estudo observacional das irregularidades é considerado importante devido às sérias alterações que estas estruturas do plasma ionosférico podem causar nos sinais de telecomunicação, bem como nos sistemas de navegação e posicionamento por satélites. Portanto, a cada dia tem crescido a necessidade de se compreender a física por

trás da geração e evolução dessas irregularidades e as suas características morfológicas (LEE et al. 2017; PANAGOPOULOS, 2017; MYER, 2017; PARK, 2017). Várias áreas da ciência e aplicações tecnológicas atuam baseadas nos sistemas Globais de Navegação por Satélites (GNSS), tais como, aviação civil (pouso e decolagem de aeronaves), indústria petrolífera (posicionamento geodésico para estabilização das plataformas de petróleo), agricultura de precisão (controle e mapeamento preciso do sistema de produção agrícola para aplicação de insumos e fitossanitários), dentre outros. Em comum a todas estas aplicações está cada vez mais a necessidade do uso de modelos para correção e predição das irregularidades que causam as flutuações (cintilações) nos seus sinais, e que conseqüentemente acaba afetando as informações de navegação e posicionamento.

Na realização deste estudo foram empregados os dados dos instrumentos disponíveis nos observatórios da UNIVAP durante os anos de 2008 e 2010. Uma investigação simultânea das irregularidades empregando todas as técnicas de observação da rede da UNIVAP constitui uma contribuição original deste trabalho, uma vez que foi aproveitado todo o potencial instrumental de monitoramento ionosférico disponível. Além disso, um outro aspecto importante a ser considerado neste estudo é o fato do último período de mínimo solar (entre os anos de 2008-2010) ter sido prolongado, em que a atmosfera superior da Terra (termosfera) tornou-se mais fria, menos espessa e atingiu níveis de densidade da atmosfera inferior a 10-30%, se comparado às médias históricas (EMMERT; LEAN; PICONE, 2010). Uma vez que parte da ionosfera está imersa na região da termosfera terrestre, espera-se que mudanças na atmosfera neutra também sejam acompanhadas de mudanças na distribuição vertical da ionização ionosférica. Conseqüentemente, a formação, evolução e duração das irregularidades também podem ser severamente afetadas durante períodos intensificados de baixa atividade solar. Muitos trabalhos foram publicados relacionando o período do ciclo de atividade solar com a ocorrência das irregularidades na ionosfera. Por exemplo, Lee et al. (2005) observaram uma elevada ocorrência de bolhas de plasma na ionosfera equatorial num período de máximo solar, e Heelis et al. (2009) estudaram o comportamento da emissão solar de rádio em 10,7 cm (índice F10.7) durante o período de mínimo solar ocorrido em 2008. Outros estudos como o de Muella et al. (2017), Dashora, Taori e Patra (2012) e Chen et al. (2006) também enfatizaram a influência da atividade solar sobre os mecanismos responsáveis pela formação das irregularidades no plasma. Estes estudos evidenciaram a importância desta correlação, já que o fluxo solar influencia diretamente na densidade eletrônica da ionosfera. Além disso, atua no mecanismo de formação das irregularidades, uma vez que este depende dos gradientes de densidade no terminador do anoitecer e da velocidade de deriva vertical da ionosfera

durante os horários do pico pré-reversão (STONEBACK et al., 2011). De acordo Fejer, Scherliess e Paula (1999) a velocidade de deriva vertical para geração de fortes irregularidades no início da noite aumenta linearmente com o fluxo solar. Portanto, em períodos de baixa atividade solar como a ionosfera torna-se menos densa, e o gradiente de densidade e a velocidade de deriva vertical também diminuem, tem-se um ambiente menos favorável para a formação e evolução das irregularidades (FEJER; SCHERLIESS, 2001). Os casos estudados em períodos de baixa atividade solar podem ajudar a entender quais fatores favorecem sua formação e quais as diferenças encontradas no ambiente ionosférico que caracterizam a evolução das bolhas e seu decaimento para estruturas de irregularidades de escalas menores.

O foco principal do presente estudo é a análise das observações simultâneas das irregularidades ionosféricas, realizadas na região brasileira a partir dos instrumentos de monitoramento ionosférico disponíveis da rede gerenciada pelo grupo de Física e Astronomia da UNIVAP: ionossondas digitais, fotômetros imageadores do tipo “all-sky” e os receptores do Sistema de Posicionamento Global (GPS). Dentre as propostas desta pesquisa uma delas é investigar a coexistência das irregularidades com diferentes tamanhos de escala que ocorrem sobre duas estações de baixa latitude, Palmas (10,2°S; 48,3°O, latitude dip 6,6°S) e São José dos Campos (23,2°S, 45,9°O, latitude dip 18,9°S). A principal contribuição científica do trabalho é melhorar nossa compreensão dos processos físicos que levam à evolução das estruturas presentes no plasma ionosférico em estações de baixa-latitude durante um período de extremo mínimo na atividade solar.

Os objetivos específicos do estudo foram os seguintes:

- Compreender os mecanismos que controlam a variabilidade diária das irregularidades ionosféricas com diferentes tamanhos de escala detectados pelos diferentes instrumentos de monitoramento, tais como: flutuações nos sinais recebidos dos satélites do GPS, espalhamentos nos sinais das ionossondas e depleções nas imagens de luminescência atmosférica;
- Investigar os possíveis efeitos que agem na geração, evolução e dissipação das irregularidades com diferentes tamanhos de escala;
- Empregar os parâmetros ionosféricos que permitem avaliar durante a ocorrência das irregularidades as condições da altura da base e da altura do pico da camada F, da frequência crítica da camada F2, da velocidade de deriva vertical aparente da região F,

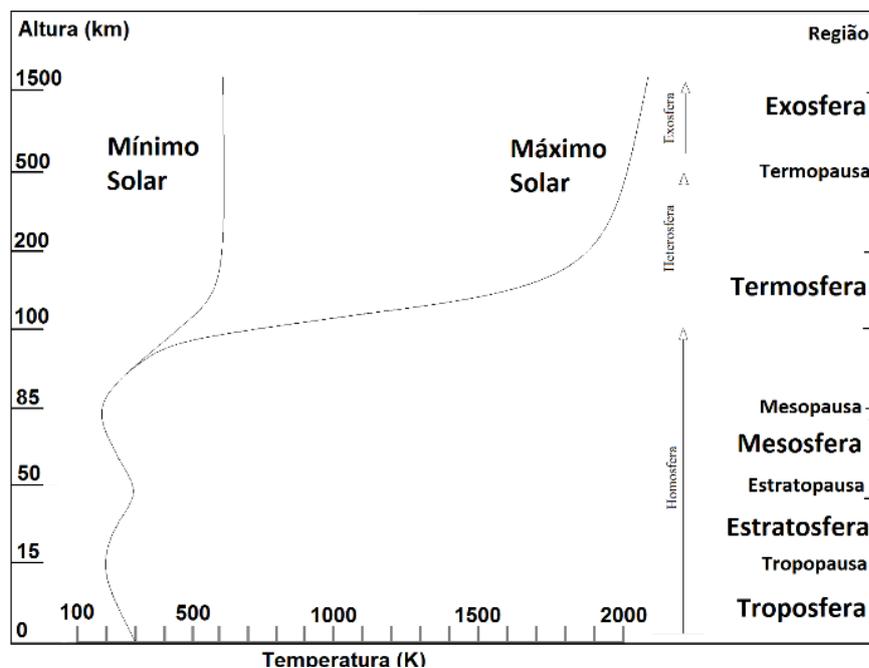
dos gradientes latitudinais da densidade eletrônica no pico F2 e do conteúdo eletrônico total da ionosfera.

## 2 A ATMOSFERA TERRESTRE

A descrição da atmosfera terrestre nos traz informações importantes das características e dos parâmetros geofísicos que variam com a altura. Por isso, inicialmente será revisado brevemente alguns dos principais aspectos do meio no qual os fenômenos que aqui serão estudados se desenvolvem. As classificações e as subdivisões da atmosfera terrestre auxiliam no entendimento de suas variações e serão introduzidos neste capítulo. Algumas das principais equações que descrevem seu comportamento também serão apresentadas.

Devido à complexidade dos fenômenos presentes na atmosfera se torna conveniente seccioná-la em subdivisões de mais fácil compreensão, com características específicas contidas dentro de uma determinada faixa de altura. Diferentes classificações e nomenclaturas serão citadas de acordo com o parâmetro ou processo escolhido. A classificação mais comum foi desenvolvida por S. Chapman (1950 apud KELLEY 1989), e é baseada no perfil vertical de temperatura. Nessa classificação cada região apresenta uma nomenclatura que contém o sufixo “esfera” e as regiões de fronteira apresentam o sufixo “pausa”. Na Figura 1 é representado o perfil de temperatura da atmosfera nos períodos de mínimo e de máxima na atividade do ciclo solar, bem como a altura de cada região correspondente.

Figura 1 – Perfil de temperatura da atmosfera e sua variação com a atividade solar.



Fonte: Modificado de Banks e Kockarts (1973)

A troposfera tem início no solo e se estende até a tropopausa com uma altura de aproximadamente 10 km na região dos pólos terrestre e 15 km nos trópicos. Essa primeira camada de gás é aquecida devido à absorção direta da radiação solar pela superfície da Terra e sofre decréscimo de temperatura à taxa de 10 K/km. A superfície terrestre ganha também aquecimento adicional devido ao efeito estufa, de forma que os raios são reabsorvidos principalmente pelo vapor de água. O gradiente negativo característico da troposfera é ocasionado pelo processo de resfriamento radioativo que tende a aumentar com a altura. A tropopausa marca o início da estratosfera, região caracterizada por um aumento de temperatura devido à absorção da radiação ultravioleta (UV). A fronteira superior da estratosfera é a estratopausa e ocorre em aproximadamente 50 km de altura, onde a temperatura atinge o seu valor máximo (KELLEY, 1989; PRÖLSS, 2004; BANKS; KOCKARTS, 1973).

Acima da estratopausa se inicia a mesosfera, onde ocorre um decréscimo gradual da temperatura devido ao resfriamento radioativo atingindo valor mínimo de temperatura de 160 K na mesopausa, em torno de 80-90 km. A região da mesosfera é a mais complexa devido aos processos de penetração da radiação ultravioleta que causam a dissociação das moléculas poliatômicas (principalmente H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> e NO). Além disso, ocorrem reações químicas que resultam em processos de luminescência atmosférica e a formação de uma série de gases em menores concentrações. Estes constituintes minoritários são importantes para o balanço térmico e o estado de ionização desta região.

Aproximadamente até 100 km de altura, a taxa de mistura dos gases atmosféricos é suficientemente rápida para produzir uma homogeneidade da composição dos constituintes majoritários (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, e CO<sub>2</sub>, conforme Tabela 1) (HARGREAVES, 1979). Alternativamente, quando a composição química é tomada como parâmetro pode-se classificar a atmosfera em duas regiões: Homosfera e Heterosfera. O termo homosfera foi cunhado para expressar a homogeneidade da massa molar média que é característica da baixa e média atmosfera, incluindo as três primeiras regiões descritas anteriormente: troposfera, estratosfera e mesosfera. Essa região também é chamada de turbosfera devido a mistura turbulenta de gases que torna a composição química quase homogênea. A constituição não é completamente uniforme devido a constantes perdas e formações pelas reações químicas e influência da radiação solar.

Na Tabela 2 apresenta-se resumidamente as reações mais comuns de formação e remoção dos constituintes atmosféricos. A alta atmosfera, acima de aproximadamente 100

km, ganha o termo heterosfera, pois os processos de mistura devido aos ventos e a dissipação turbulenta já não afetam a distribuição vertical dos gases constituintes.

Tabela 1 – Composição química da homosfera.

Molécula	Porcentagem do volume
<b>N<sub>2</sub></b>	78,1
<b>O<sub>2</sub></b>	20,9
<b>Ar</b>	0,9
<b>CO<sub>2</sub></b>	0,03
<b>Ne</b>	0,002
<b>He</b>	0,0005
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Variável

Fonte: Hargreaves (1979)

Tabela 2 – Formação e remoção dos constituintes atmosféricos.

Processo	Motivo	Reação	Produto	Altitude de máxima ocorrência
Dissociação do O <sub>2</sub>	Absorção da radiação 1027 – 1750 Å	$O_2 + hv \rightarrow O + O$	O	~90 km
Formação de O <sub>3</sub>	Reação com 3º corpo	$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$	O <sub>3</sub>	~30 km
Dissociação de O <sub>3</sub>	Absorção de radiação 2100 – 3100 Å	$O_3 + O \rightarrow O_2 + O$	O <sub>2</sub> e O	15 - 35 km
Destruição do O <sub>3</sub>	-----	$O_3 + O \rightarrow O_2 + O_2$	O <sub>2</sub>	15 - 35 km
Formação de NO e O	-----	$N + O_2 \rightarrow NO + O$	NO + O	~85 km
Remoção de NO	-----	$NO + N \rightarrow N_2 + O$	N <sub>2</sub> + O	~85 km

Fonte: Hargreaves (1979)

O nitrogênio molecular é o constituinte dominante abaixo de 180 km, sendo que acima desta altura até 700 km é o oxigênio atômico que se torna constituinte majoritário. Deste ponto até ~1700 km de altura, hidrogênio atômico e hélio aumentam em concentração até ultrapassar a concentração dominante do oxigênio atômico. Nestas alturas onde a frequência de colisão é mínima devido à baixa concentração de gases, os gases podem escapar para a exosfera (PRÖLSS, 2004; HARGREAVES, 1979; BANKS; KOCKARTS, 1973). A Figura 2

a seguir mostra as regiões e componentes químicos presentes na atmosfera terrestre de acordo com a altura.

Figura 2 – Composição química presente nas diferentes regiões da atmosfera.

Altura (km)	Constituintes	Região
1500	escape H He	EXOSFERA
500	O > N <sub>2</sub> > O <sub>2</sub>	Termopausa
200		
100	Difusão ↑ O O <sub>2</sub> ↓	TERMOSEFERA
85		Mesopausa
	H OH NO	MESOSFERA
50		Estratosfera
	O <sub>3</sub> =O Camada de ozônio O <sub>3</sub> >O	ESTRATOSFERA
15		Tropopausa
0	N <sub>2</sub> 78% O <sub>2</sub> 21% Ar 1% O <sub>3</sub> CH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> He NO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O	TROPOSEFERA

Fonte: Modificado de Banks e Kockarts (1973)

### 3 A IONOSFERA

Segundo Moldwin (2008), os estudos de propagação de ondas de rádio através da ionosfera terrestre foram intensificados após Marconi enviar a primeira mensagem de rádio pelo Atlântico em dezembro de 1901, o que gerou grande repercussão na comunidade científica na época. O feito de Marconi chamou a atenção de grandes nomes da ciência que passaram a se envolver com o tema, tais como os físicos Lord Rayleigh, A. Sommerfeld, G. N. Watson, entre outros. No ano seguinte, os físicos Heaviside e Kennelly propuseram a existência de uma camada ionizada na atmosfera para explicar a reflexão das ondas de rádio. A nomenclatura utilizada até hoje como ionosfera foi definida por R. Watson-Watt em 1926. A teoria matemática de rádio propagação ionosférica na presença do campo eletromagnético foi desenvolvida por Appleton e seus colaboradores nos anos 1920 (DAVIES, 1990). Uma abordagem histórica mais detalhada pode ser encontrada no artigo de Gillmor (1982).

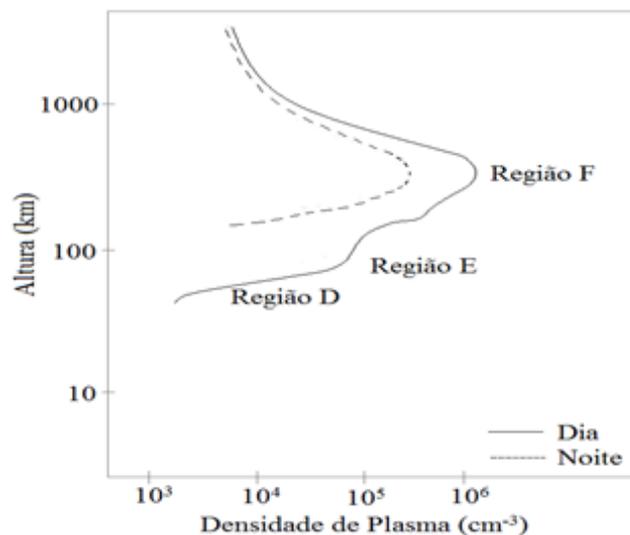
A ionosfera é amplamente definida como sendo a região da atmosfera superior formada por um plasma fracamente ionizado, ou um gás composto por íons e elétrons. O intervalo de ionização da atmosfera terrestre não é muito bem definido em altura, todavia abaixo de 60 km e acima de 1200 km a densidade eletrônica torna-se praticamente desprezível (MONTEIRO, 2012). A ionosfera terrestre e seus parâmetros de altura e densidade apresentam elevada variação com a altura, a latitude, a longitude, a hora local, o período sazonal, o ciclo de manchas solares e as perturbações geomagnéticas associadas à atividade solar (MONTEIRO, 2012). Estas variações influenciam o acoplamento da ionosfera, com as regiões da atmosfera na qual ela está inserida, ou seja, com a termosfera, bem como as suas regiões vizinhas, tais como a mesosfera e a magnetosfera (SCHUNK; NAGY, 2000).

Ao se estudar a ionosfera é importante também analisar a composição química e as reações fotoquímicas mais importantes, bem como caracterizar qual gás será ionizado para mensurar a radiação disponível e calcular as taxas de produção e perda de ionização (HARGREAVES, 1979). Conforme mencionado anteriormente, até aproximadamente 100 km de altura a atmosfera terrestre consiste, principalmente, de nitrogênio ( $N_2$ ) e oxigênio molecular ( $O_2$ ). A partir de suas dissociações pela radiação solar ultravioleta (UV) incidente e devido ao impacto com partículas energéticas, produzem os átomos de N e O. Acima destas alturas as espécies atômicas, tais como o oxigênio, hélio e hidrogênio atômico se tornam dominantes (REES, 1989; MONTEIRO, 2012). Essas espécies podem ser ionizadas através da absorção de radiação solar. O principal processo de produção de íons e elétrons em baixas e médias latitudes se estabelece na absorção das radiações compreendidas pelos raios-X e o

Extremo Ultra Violeta (EUV). Fótons com energia superior a 12 eV podem ionizar os constituintes majoritários da atmosfera ( $N_2$ ,  $O_2$  e  $CO_2$ ), num processo chamado de fotoionização. A presença de partículas ionizadas na termosfera, tais como o  $N_2^+$ ,  $O_2^+$ ,  $N^+$ ,  $O^+$  e  $NO^+$ , compõem a região da ionosfera e atinge seu valor máximo de densidade em torno de aproximadamente 300 km (MUELLA, 2004).

Para descrever os níveis de estratificação da ionosfera costuma-se dividi-la em camadas ou regiões. A região D é parte mais inferior da ionosfera e localiza-se entre aproximadamente 60 e 90 km de altura. Acima desta vem a região E, que se estende de 90 km até ~150 km. Depois da região E se localiza a região F, que se divide basicamente em duas camadas durante o período diurno, designadas por camada F1 e camada F2. A camada F1 estende-se de 150 a 200 km de altura, enquanto que a camada F2 estende-se acima dos 200 km até cerca de 1200 km. No período noturno, a produção de pares elétrons-íons é abruptamente reduzida e as camadas que dependem da absorção solar (D, E, F1) praticamente se dissipam. Na camada F2, cujo pico de ionização localiza-se em cerca de aproximadamente 300-350 km de altura, o equilíbrio de ionização é fortemente afetado pelo movimento dos elétrons, que resulta de forças eletromagnéticas, mudanças de temperatura e difusão. Como a atmosfera neutra é rarefeita nestas alturas, a recombinação dos íons ocorre vagarosamente depois do pôr-do-Sol, então a camada de ionização perdurará durante o período da noite (KELLEY, 2009; SHUNK; NAGY, 2000). A Figura 3 ilustra as regiões da ionosfera de acordo com o seu perfil vertical de ionização durante o dia e a noite.

Figura 3 – Perfil da ionização e regiões da ionosfera.



Fonte: Kelley (2009)

A produção de pares íons-elétrons  $q$  na ionosfera é definida a partir da função da Chapman (DAVIES, 1990):

$$q = q_m \exp \left[ 1 + \left( \frac{h_m - h}{H_n} \right) - \exp \left( \frac{h_m - h}{H_n} \right) \right] \quad (1)$$

onde  $q_m$  é a taxa de produção no pico da ionosfera,  $H_n$  é a altura de escala atmosférica assumida como sendo constante,  $h_m$  denota a altura do pico da ionosfera e  $h$  pode ser entendido como sendo uma altura de equilíbrio.

A Tabela 3 a seguir lista os principais mecanismos de perda de ionização ou de elétrons na ionosfera:

Tabela 3 – Principais processos de perda de ionização e elétrons ocorridos na ionosfera.

Processo		Ente perdido	Reação
Recombinação íon-íon		Íon	$X^+ + Y^- \rightarrow X + Y$
Recombinação elétron íon	Recombinação de três corpos	Íon	$X^+ + e + M \rightarrow X + M$
	Recombinação radiativa	Íon	$X^+ + e \rightarrow X + h\nu$
	Recombinação dissociativa	Íon	$XY^+ + e \rightarrow X^* + Y^*$
Troca íon átomo			$X^* + YZ \rightarrow XY^+ + Z$
Junção Eletrônica	Junção radiativa	Elétron	$X + e \rightarrow X^- + h\nu$
	Junção de três corpos	Elétron	$X + e + M \rightarrow X^- + Y$
	Junção dissociativa	Elétron	$e + XY \rightarrow X^- + Y$
Colisão	Separação colisional	Íon	$X^- + M \rightarrow X + e + M$
	Separação associativa	Íon	$X^- + Y \rightarrow XY + e$
	Separação dissociativa	Elétron	$XY + e \rightarrow X^- + Y$
Fotodissociação		Íon	$X^- + h\nu \rightarrow X + e$

Fonte: Monteiro (2012)

As principais reações fotoquímicas que ocorrem nas regiões E e F da ionosfera são sumarizadas adiante na Tabela 4.

Tabela 4 – Principais reações fotoquímicas que ocorrem nas regiões E e F.

<b>Fotoionização</b>	$O + h\nu \rightarrow O^+ + e$
	$N_2 + h\nu \rightarrow N_2^+ + e$
	$O_2 + h\nu \rightarrow O_2^+ + e$
<b>Troca de carga</b>	$O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$
	$O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N$
	$N_2^+ + O \rightarrow NO^+ + N$
	$N_2^+ + O \rightarrow O^+ + N_2$
	$N_2^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N_2$
<b>Recombinação dissociativa</b>	$O_2^+ + e \rightarrow O^* + O^{**}$
	$NO^+ + e \rightarrow N^* + N^{**}$
	$N_2^+ + e \rightarrow N^* + N^{**}$

Nota: Com a indicação \*\* caracterizando o estado excitado a<sup>1</sup>Δg e o símbolo \* o estado <sup>1</sup>D.  
Fonte: Monteiro (2012)

### 3.1 DINÂMICA FUNDAMENTAL DO PLASMA IONOSFÉRICO

A atmosfera neutra desempenha um papel fundamental na formação e na dinâmica da ionosfera e, por isso, torna-se importante o entendimento de seu comportamento. O domínio inferior da alta atmosfera é tipicamente turbulento, de forma que as espécies moleculares são completamente misturadas. Com a altura, os processos de transporte e colisão que geram a turbulência diminuem sua importância, ao passo que a difusão molecular atua mais fortemente gerando camadas em que as moléculas se distribuem segundo seu peso molecular. Entre 110 e 500 km a difusão é o processo predominante. Em alturas superiores as colisões de livre caminho médio se tornam mais longas e as partículas seguem basicamente trajetória balística (SCHUNK; NAGY, 2000).

A principal diferença entre a dinâmica do plasma ionosférico e a dinâmica do gás neutro da termosfera é o efeito das forças eletromagnéticas. Várias forças atuam nas partículas carregadas gerando correntes elétricas, que por sua vez, geram campos elétricos que modificam a dinâmica do plasma. A condutividade elétrica do meio desempenha um papel importante nestes processos. Em médias e baixas latitudes o campo elétrico é gerado pelos ventos neutros. Segundo Kelley (1989) e Pillat (2006) a distribuição espaço-temporal da densidade na ionosfera é descrita pelas equações da conservação de massa, movimento e energia, que serão brevemente discutidas neste capítulo.

$$\iiint \partial\rho/\partial t \, dv = - \iint \rho\mathbf{U} \, da. \quad (2)$$

A equação (2) relaciona a variação da densidade de massa pelo tempo no volume e a velocidade do fluido  $\mathbf{U}$  (KELLEY, 2009). O fluxo de um material dentro ou fora de um volume através de sua superfície é igual à taxa de crescimento ou decrescimento de massa dentro do volume. Sendo este volume macroscopicamente pequeno apesar de microscopicamente conter muitas partículas colidindo de modo aleatório.

$$\partial\rho/\partial t = - \nabla \cdot (\rho\mathbf{U}). \quad (3)$$

Do lado esquerdo da equação é mostrada a integração da variação temporal de densidade pelo volume e do lado direito à densidade que sai da superfície, sendo  $\mathbf{a}$  normal à superfície. Desta, obtêm-se a equação (3) da conservação de massa, ou da continuidade, para a atmosfera neutra com densidade de massa  $\rho$  e velocidade  $\mathbf{U}$ .

$$\partial\rho_j/\partial t + \nabla \cdot (\rho_j\mathbf{V}_j) = (P_j - L_j)M_j. \quad (4)$$

Para um meio parcialmente ionizado, pares de íons e elétrons podem ser produzidos mediante a ação de fótons, partículas energéticas e a perda acontece pela recombinação, na forma da equação (4). Neste caso a equação de conservação traz que  $P_j$  é a taxa de produção de íons/elétrons ( $j$ ) em metro cúbico por segundo,  $L_j$  a taxa de perda,  $M_j$  é a massa de cada espécie e  $\mathbf{V}_j$  é a velocidade das partículas carregadas (KELLEY, 1989, 2009).

$$P = L. \quad (5)$$

E desta forma, a equação pode ser simplificada segundo os processos físicos que ocorrem em cada região. Abaixo de 200 km de altura, durante o dia nas regiões D, E e camada  $F_1$ , a equação de continuidade é simplificada. O termo de transporte torna-se desprezível e a produção ( $P$ ) de carga é igual a perda ( $L$ ).

$$\partial\rho_j/\partial t + \nabla \cdot (\rho_j\mathbf{V}_j) = 0. \quad (6)$$

Já na camada F<sub>2</sub> em torno de 250 e 350 km de altura, o termo de transporte é dominante e a produção de ionização torna-se como na equação (6).

$$p_j = \rho_j k_B T_j / M_j = n_j k_B T_j. \quad (7)$$

Não menos importante, temos a equação (7) de conservação de estado para um gás ideal, que relaciona densidade de massa e pressão  $p_j$  (sendo  $k_B$  a constante de Boltzmann).

$$\iiint \frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{U}) dv = \iiint (-\nabla p) dv + \iiint \mathbf{F} dv - \iint \boldsymbol{\pi}_m \cdot da - \iint \boldsymbol{\pi}_w \cdot da. \quad (8)$$

À semelhança da equação de conservação de massa, temos a equação (8) que descreve a taxa de variação do momentum dentro de um volume (KELLEY, 1989). Sobre a equação de conservação de movimento, ou de momentum, pode-se dizer resumidamente que esta faz a relação da velocidade do fluido com as forças que atuam sobre o próprio fluido. Nesta equação derivada do princípio de conservação de momentum, a mudança de momento por unidade de tempo dentro de um volume é igual à força do gradiente de pressão e da força externa total  $\mathbf{F}$  agindo sobre a matéria dentro do volume, somado ao fluxo de momento transportado através da superfície do volume. Na qual  $\mathbf{F}$  é a força externa,  $p$  é a pressão,  $\boldsymbol{\pi}_m$  é o tensor da densidade de fluxo de momentum devido a movimento da matéria e  $\boldsymbol{\pi}_w$  é o tensor da densidade de fluxo de momentum devido a onda no meio. Desta obtêm-se a equação (9) de conservação de momentum (KELLEY, 1989 apud CANDIDO, 2008):

$$\partial(\rho \mathbf{U})/\partial t = -\nabla p + \mathbf{F} - \nabla \cdot \boldsymbol{\pi}_m - \nabla \cdot \boldsymbol{\pi}_w. \quad (9)$$

Considerando também as componentes de  $\mathbf{F}$ , as forças atuantes no meio são:

$p\mathbf{g}$  termo da componente gravitacional;

$\rho v_{ni}(\mathbf{U} - \mathbf{V}_i)$  termo do arraste iônico onde  $v_{ni}$  é frequência de colisão ion-neutro e  $\mathbf{V}_i$  velocidade do íon;

$\eta \nabla^2 \mathbf{U}$  componente relacionada à viscosidade;

$2\rho(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{U})$  referente à velocidade angular  $\boldsymbol{\Omega}$ .

Por fim, a equação completa dá-se da seguinte forma (KELLEY, 1989):

$$d\mathbf{U}/dt = -\nabla p + p\mathbf{g} + \eta\nabla^2\mathbf{U} - \nabla \cdot \boldsymbol{\pi}_w - 2\rho(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{U}) - \rho v_{ni}(\mathbf{U} - \mathbf{V}_i). \quad (10)$$

Adicionalmente pode-se inserir outras duas equações que se referem ao comportamento dinâmico da ionosfera derivadas das leis de Maxwell da eletrodinâmica.

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi, \quad (11)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 = \nabla \cdot \mathbf{B}. \quad (12)$$

A Equação (11) nos fornece informações sobre o comportamento do campo magnético, onde  $\phi$  denota a função do potencial e  $\mathbf{E}$  o campo elétrico. Na Equação (12),  $\mathbf{J}$  é a densidade de corrente e  $\mathbf{B}$  o campo magnético.

Os campos elétricos atuantes na ionosfera são importantes na compreensão dos processos físicos que envolvem carga, campo elétrico e campo magnético. Primeiramente, conceitua-se campo elétrico como força por unidade de carga e na ionosfera, segundo Kirchhoff (1981), as regiões E e F são regidas por processos físicos distintos. Na região E, o campo elétrico ( $\mathbf{E}$ ) está ligado à condutividade e corrente elétrica através da equação de Ohm generalizada, alterando o estado de repouso ou movimento das cargas.

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{F} \times \mathbf{B}}{qB^2}. \quad (13)$$

A velocidade de deriva ( $\mathbf{V}$ ) é dada na Equação (13) sobre a influência de forças externas e do campo magnético, em que a força  $\mathbf{F}$  é regida segundo o campo elétrico e a curvatura do campo magnético, altura da camada e da força da gravidade. Os ventos neutros movem a camada através do campo magnético e causam a separação de cargas que geram os campos elétricos. Como a condutividade varia com a altura, em 110 km tem-se uma camada altamente condutora que atua como um gerador de corrente. Com isso, torna-se possível a partir daqui introduzir o efeito dínamo, cujo nome se remete ao conceito básico onde energia de movimento gera energia elétrica. Nesta região ocorre o dínamo da região E.

$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}). \quad (14)$$

A densidade de corrente ( $\mathbf{J}$ ) na região E é dada segundo a lei de Ohm não-generalizada na Equação (14), sendo  $\sigma$  o tensor condutividade e  $\mathbf{U}$  a velocidade das partículas.

Por outro lado na região F os campos elétricos são importantes à noite e estão relacionados com a deriva das cargas através de  $\mathbf{V} = (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) / \mathbf{B}^2$ . As correntes na região F são formadas pelos ventos termosféricos e formam (ou não) um sistema de curto-circuito com a camada E. Quando não fecham o circuito devido à recombinação da camada E, as cargas polarizadas geram campos elétricos de polarização, opondo-se a passagem da corrente do tipo Hall. Os dínamos da região E e F serão detalhados mais adiante na seção 3.2. As equações a seguir se referem a esses processos que ocorrem na região F e usando um sistema de coordenadas tal que: eixo x é para leste do campo geomagnético, y aponta para o norte geomagnético e Z é a altura na ionosfera.

$$\mathbf{V}_x = -\mathbf{U}_y \frac{\nu}{\omega} \sin I, \quad \mathbf{V}_y = -\mathbf{U}_x \frac{\nu}{\omega}. \quad (15)$$

Velocidade de deriva dos íons pode ser obtida pela Equação (15), onde I é a inclinação de  $\mathbf{B}$ ,  $\omega$  é a girofrequência das cargas e  $\nu$  denota a frequência de colisão entre íons e partículas neutras (KIRCHHOFF, 1981). E as correntes associadas são descritas pelas Equações (16):

$$\mathbf{J}_x = Nq\mathbf{U}_y \frac{\nu}{\omega} \sin I, \quad \mathbf{J}_y = Nq \frac{\nu}{\omega} \mathbf{U}_x. \quad (16)$$

Se essas correntes não fecham o circuito, geram os campos de polarização segundo as Equações (17) (KIRCHHOFF, 1981):

$$\mathbf{E}_x = \mathbf{U}_y \mathbf{B} \sin I \frac{\nu}{\omega}, \quad \mathbf{J}_y = \mathbf{U} \times \mathbf{B}, \quad (17)$$

onde a deriva pode ser determinada pela Equação (18):

$$\mathbf{V}_x = \mathbf{U}_x, \quad \mathbf{V}_y = \mathbf{U}_y \sin I, \quad (18)$$

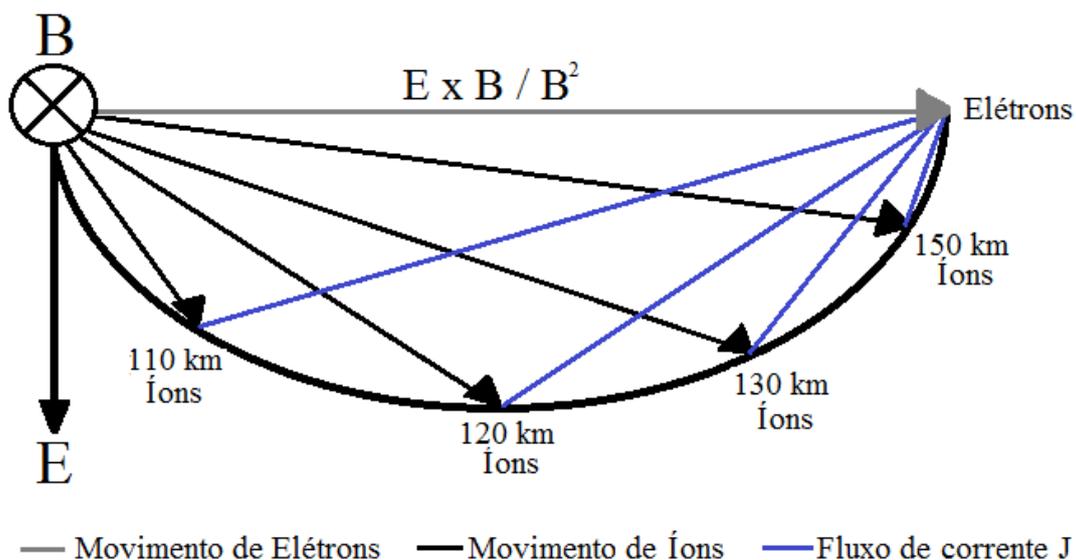
sendo  $\mathbf{V}$  a velocidade de deriva da mesma ordem de grandeza e direção segundo os ventos termosféricos (KIRCHHOFF, 1981).

### 3.2 TEORIA DO DÍNAMO DAS REGIÕES E E F

A teoria do dínamo é de fundamental importância na compreensão do comportamento da ionosfera e a interação entre o campo magnético, campo elétrico e ventos neutros. Rishbeth (1974) simplifica a teoria do dínamo definindo que este opera sobre o movimento diferencial entre íons e elétrons e, em ambas regiões E e F, o dínamo é acionado pelos ventos. Na região E, os ventos neutros são gerados pela maré atmosférica, variação diurna das forças termais e gravitacionais do sol e da lua que causam oscilação de pressão atmosférica. Os ventos movimentam a camada ionizada e, como já mencionado, a movimentação dos íons e dos elétrons tomam direções diferentes devido as forças que atuam sobre as partículas.

A Figura 4 esquematiza o sentido do movimento das partículas carregadas de acordo com a altura na atmosfera onde os elétrons se movem perpendicularmente ao campo elétrico, e os íons se movem com um certo ângulo à força aplicada ( $F_a$ ) sobre a partícula. Neste caso,  $F_a = qE + n\nu V$ , sendo  $n$  o número de partículas carregadas e  $\nu$  a girofrequência. Nesta figura,  $B$  indica o vetor campo magnético apontando para o norte,  $E$  é a componente do campo elétrico vertical para baixo, a seta cinza representa o movimento dos elétrons, e as setas pretas o movimento dos íons. Existem alturas da atmosfera em que este ângulo colapsa porque a força de colisão ou a força de Lorentz torna-se desprezível.

Figura 4 – Representação da direção do movimento de cargas na ionosfera.



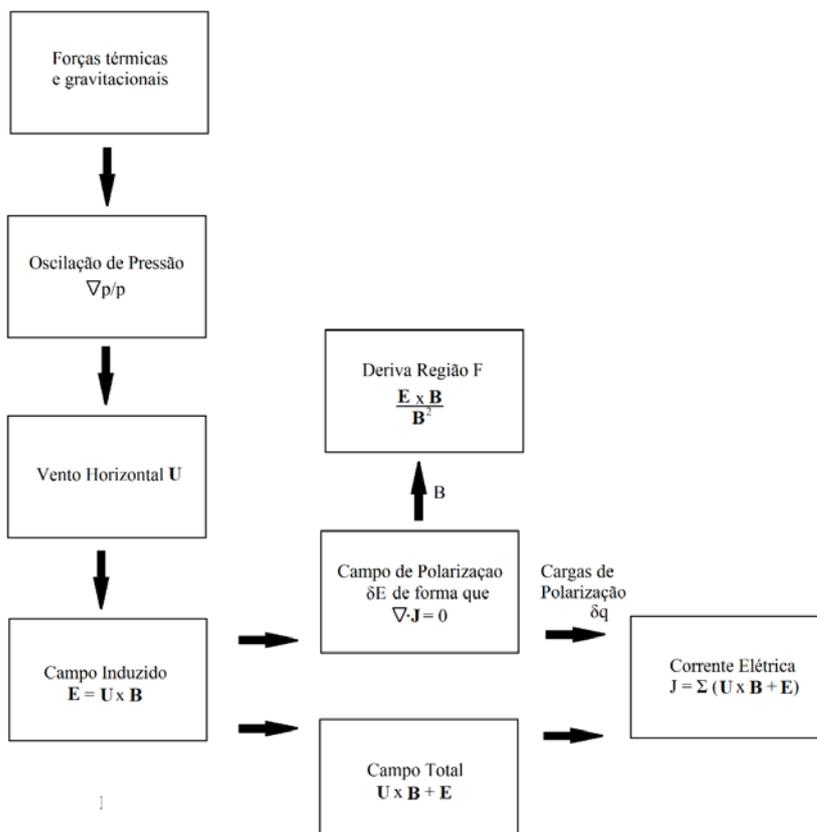
Fonte: Modificado de Rishbeth (1971)

Nesta figura o movimento dos elétrons segue ortogonal à ambos os campos magnético e elétrico, enquanto que o movimento dos íons forma diferentes ângulos, dependendo da altura em que estão, da força aplicada e também do ângulo em relação aos elétrons. A condutividade da ionosfera é anisotrópica em consequência da configuração do campo magnético. De acordo com Rishbeth (1981), o movimento dos íons e dos elétrons, em resposta a um campo elétrico ou vento neutro, também pode ser explicado em função da razão entre a girofrequência e frequência de colisão, de acordo com a Equação (19).

$$\left(\frac{\omega}{\nu}\right)_e \cong 10^3 \left(\frac{\omega}{\nu}\right)_i. \quad (19)$$

Esse movimento diferencial de íons e elétrons gera uma diferença de densidade eletrônica na ionosfera com um acúmulo de carga nas fronteiras. A condição de divergência não nula devido ao acúmulo de cargas também torna a ionosfera polarizada. Os campos de polarização  $\delta \mathbf{E}$  são mapeados da região E para a região F pelas linhas de campo geomagnético, ocasionando assim a deriva do plasma  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ , conforme esquematizado na Figura 5.

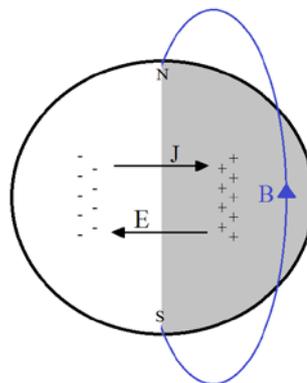
Figura 5 – Diagrama esquemático do dínamo da região E da ionosfera.



Fonte: Modificado de Rishbeth (1971)

O surgimento das irregularidades ionosféricas na região do terminador do anoitecer é influenciado pela rápida deriva vertical do plasma. Essa deriva está relacionada às condições de fronteira da ionosfera. As regiões de fronteiras atendem as condições de acúmulo de carga e é onde se formam  $\mathbf{E}$ , como, por exemplo, regiões entre camadas, região do topo e da base da ionosfera e os próprios terminadores do amanhecer e do anoitecer. A Figura 6 esquematiza o acúmulo de cargas nas linhas do terminador.

Figura 6 – Representação de região de acúmulo de carga.

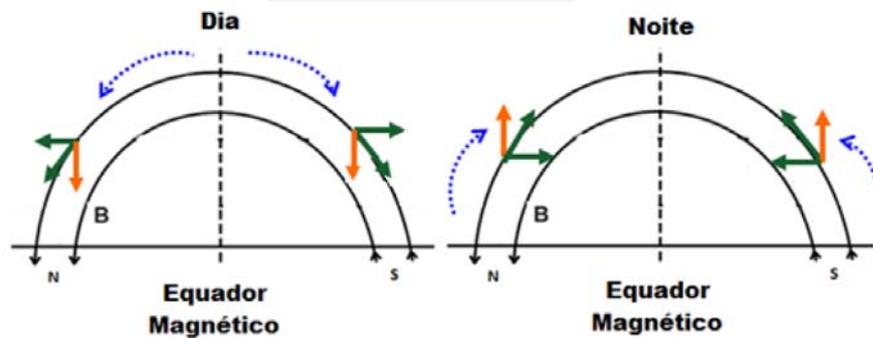


Fonte: Autora.

Na região F os ventos termosféricos são responsáveis pelo dínamo e estes são gerados pelo aquecimento desigual da atmosfera superior e o gradiente de pressão. Os ventos termosféricos e os ventos neutros pertencem a um mesmo sistema, porém, os dínamos das regiões E e F têm características elétricas suficientemente diferentes para serem sistemas separados (porém acoplados). No período diurno, a densidade de corrente que flui acima de 150 km é apenas a parte superior do sistema de correntes da região E, porém, depois do anoitecer, ganha importância devido à diminuição de densidade eletrônica pelos processos de recombinação.

Na Figura 7 as setas pontilhadas indicam a direção dos ventos e as setas laranja indicam como o vento pode influenciar no movimento vertical da camada F no hemisfério norte e no hemisfério sul.

Figura 7 - Contribuição do vento meridional para a deriva vertical.



Fonte: Modificado de Valentin (2015).

O estudo de Rishbeth (1970) detalha a atuação dos ventos sobre as partículas carregadas em interação com o campo magnético. O vento  $U$  que gera movimento sobre as partículas carregadas tem componentes  $U$  perpendicular e  $U_{//}$  paralela ao campo magnético. Apenas a componente perpendicular ao campo magnético gera uma velocidade de deriva nas cargas que é influenciada pela girofrequência. Tanto íons quanto elétrons se movem em ângulo ao vento, porém não possuem a mesma girofrequência. Como demonstrado na Equação (19), elétrons tem  $\omega/v$  muito menor que os íons, de forma que participam do movimento paralelo ao campo magnético. O fluxo de elétrons então segue a direção do campo magnético, enquanto os íons seguem uma direção segundo certa inclinação à este campo magnético, gerando uma corrente carregada de íons.

A maior fonte da corrente na região F é atribuída a ação do dínamo. Este sistema de corrente (Equações 16) depende da condutividade Pedersen ( $\sigma_i$ ), e referem-se às correntes geradas por esta condutividade que é carregada de íons.

$$\sigma_i = N_e \frac{v_i}{\omega_i} = \frac{N m_i v_i}{B}. \quad (20)$$

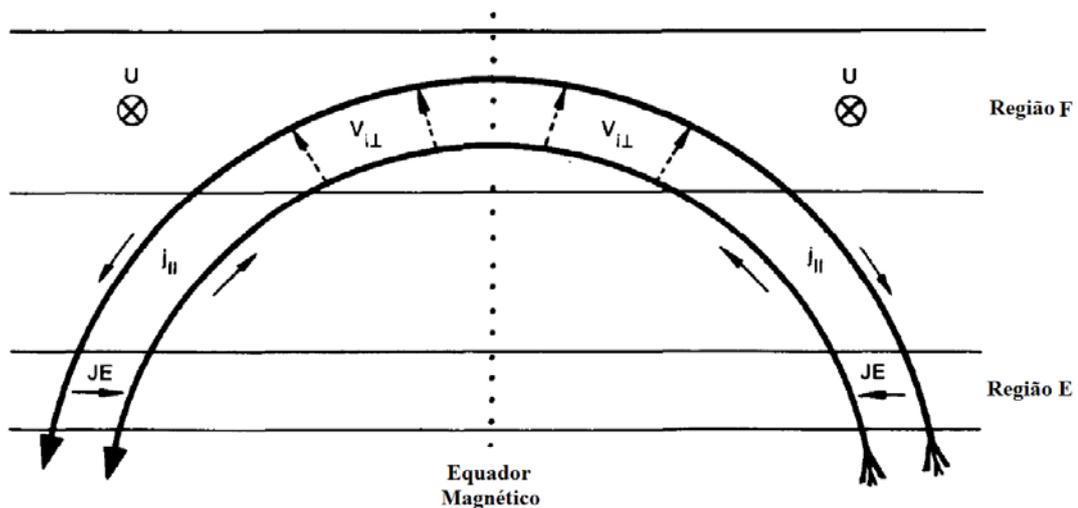
A Equação (20) é válida quando na região F  $\omega_i$  muito menor que  $v_i$ , onde  $m_i$  e  $v_i$  representam, respectivamente, massa e frequência de colisão dos íons. Assim, a densidade de corrente expressa em termos de componente horizontal é dada por:

$$J = \frac{B \times \nabla p}{B^2 \sin I}. \quad (21)$$

A componente vertical do  $\nabla p$  é balanceada com a gravidade pois, o ar neutro está em equilíbrio hidrostático, onde a Equação (21) não é válida para a região do equador. A corrente Pedersen é carregada de íons e, desde que a deriva meridional tenha uma componente vertical, é necessário um fluxo de elétrons para evitar a formação de campos de polarização.

Quando a corrente  $\mathbf{J}$  é impedida de fluir livremente, devido a uma fronteira de distribuição de cargas assim como ocorre nos terminadores do amanhecer e do anoitecer, ou pela geometria do campo magnético como no equador, esses campos de polarização tendem a evoluir em função da continuidade de corrente. Campos de polarização surgem para manter a continuidade dessa corrente. Portanto, durante o dia ou enquanto a região E for condutiva o suficiente, haverá um fluxo de corrente paralelo ao campo magnético entre as regiões E e F agindo como curto-circuito. A Figura 8 representa o vento  $\mathbf{U}$  perpendicular ao plano e apontando para leste, as setas tracejadas indicam a deriva iônica perpendicular ao campo magnético ( $V_{i\perp} = Uv/\omega$ ) e  $J_{\parallel}$  é a corrente que fecha o curto-circuito com a região E.

Figura 8 - Representação esquemática do dínamo da região F equatorial.

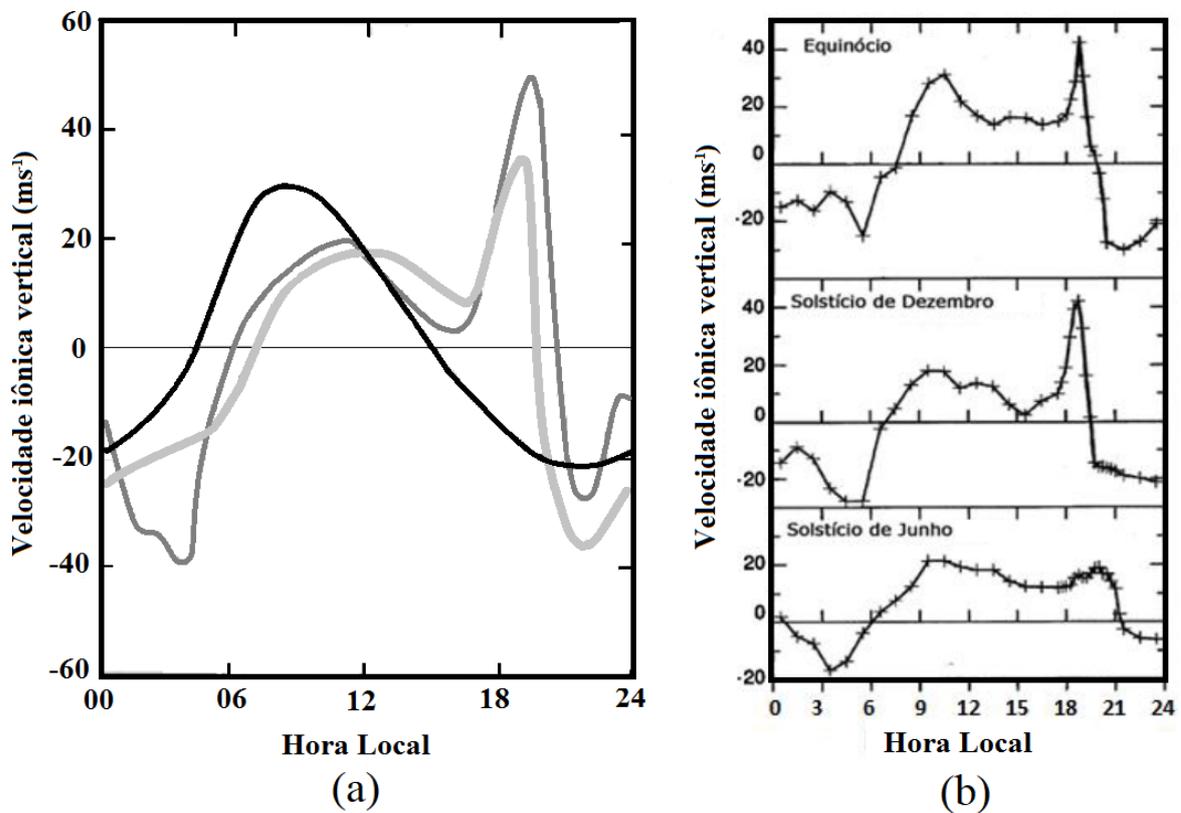


Fonte: Adaptada de Rishbeth (1971)

Porém, quando a condutividade da camada E diminui drasticamente depois do anoitecer, a corrente diminui e cancela o curto-circuito. Desta forma o campo elétrico de polarização volta a crescer. Na região F equatorial noturna esses campos elétricos ganham uma importância ainda maior, pois há um forte gradiente de densidade do plasma e a geometria favorece o seu crescimento. A polarização vertical explica os ventos neutros noturnos, e perto dos terminadores existe uma componente leste-oeste que é influenciada pela rápida mudança de densidade eletrônica da camada E. Essa componente gera uma deriva vertical, que

sobreposta à deriva padrão diária no plasma (para cima de dia e para baixo de noite) caracteriza o chamado “efeito fonte”. Esse aumento da deriva se dá em ambos os terminadores, fraca e para baixo ao amanhecer devido à baixa densidade iônica do plasma, e forte e para cima ao anoitecer devido à alta densidade (RISHBETH, 1971). A Figura 9 traz duas representações da variação diária da deriva iônica vertical apresentadas por Heelis et al. (1974) e Batista et al. (1996).

Figura 9 – (a) Deriva vertical iônica medida em Jicamarca; e (b) Deriva vertical iônica medida em Fortaleza onde nota-se o efeito fonte equatorial.



Fonte: (A) Modificado de Heelis et al. (1974) e (B) de Batista et al. (1996)

Em (a), a linha preta inclui a velocidade de deriva gerada pelo dínamo da região E, a linha cinza-escuro inclui a velocidade de deriva do dínamo da região F sobreposta à velocidade de deriva do dínamo da região E, e a linha cinza-claro ilustra as velocidades de deriva experimentais medidas pelo radar que opera em Jicamarca, Peru. Em (b) os gráficos de velocidade de deriva medidos experimentalmente trazem a comparação de três períodos sazonais, onde pode-se destacar a variação abrupta da velocidade de deriva nos horários do pico-pré-reversão (após às 18 LT) durante os meses do solstício de dezembro e dos equinócios.

### 3.3 AS IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS

O conceito de irregularidades ionosféricas usado em Aeronomia, estudo da física e química da alta atmosfera neutra e ionizada, se refere às não homogeneidades ou às depleções existentes na densidade do plasma causada por processos de instabilidade. Neste trabalho, o termo irregularidades é atribuído a todas as estruturas que apresentam diferentes tamanhos de escala, e que inclui desde as bolhas de plasma que são as estruturas de larga escala até as estruturas menores, da ordem de centenas de metros. As irregularidades ionosféricas podem ser observadas em qualquer região de latitude e, geralmente, ocorrem desde a base da camada F até bem acima do pico de ionização. Diversos equipamentos são utilizados no monitoramento das irregularidades e suas assinaturas nos registros destes instrumentos apresentam distintas nomenclaturas. Por exemplo, as irregularidades com dimensões da ordem de centenas de metros até poucos quilômetros causam as cintilações ou flutuações na amplitude e fase dos sinais de rádio em UHF (300-3000 MHz) e VHF (30-300 MHz) transmitidos dos satélites geoestacionário, ou dos sinais da banda L (1,2 e 1,5 GHz) transmitidos dos satélites do Sistema de Posicionamento Global (GPS). Empregando-se as ionossondas são detectadas estruturas na faixa de dezenas a centenas de quilômetros. Segundo Kelley (1989), a ionossonda foi o equipamento precursor dos registros de irregularidades, quando em 1938 verificou-se nos ionogramas traços espalhados na altura da região F. Por isso, o primeiro termo empregado para designar irregularidades foi “spread-F” equatorial. E ainda, conforme descrito mais adiante na seção de instrumentação, o fotômetro imageador “all-sky” registra, a partir das emissões de luminescência atmosférica, as estruturas de larga escala ou de depleção do plasma ionosférico (bolhas de plasma).

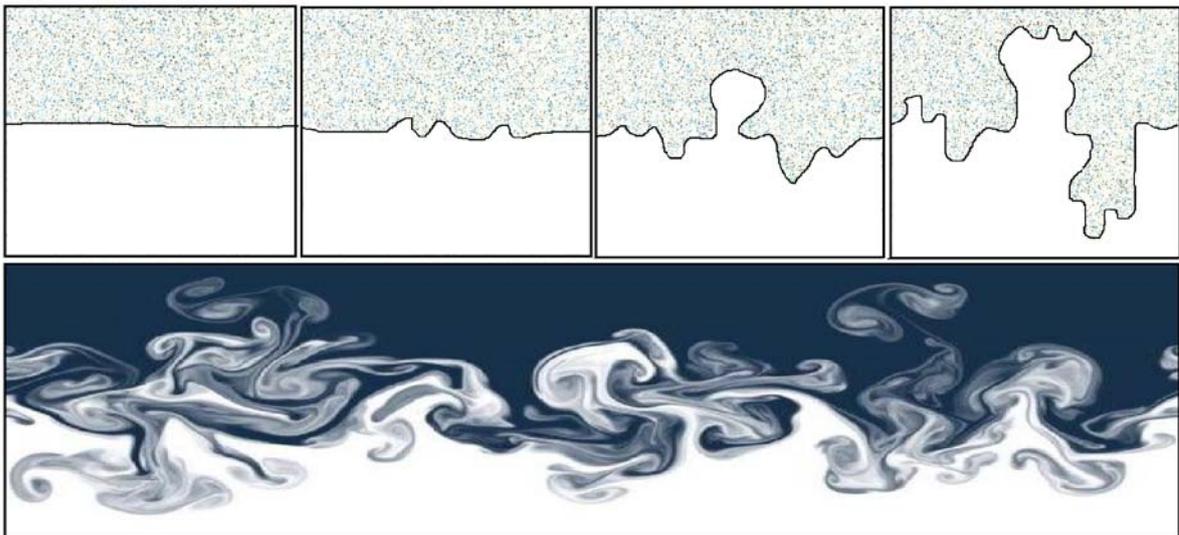
Os processos eletrodinâmicos já conhecidos e que são responsáveis por desencadear a formação dessas irregularidades na ionosfera tropical vem sendo estudados nas últimas décadas. As teorias que explicam o surgimento e evolução dos mecanismos de instabilidade mais aceitas pela comunidade científica são encontrados em Kelley (1989) e servem de base para a maioria dos trabalhos que explicam os fenômenos desta natureza. De acordo com a teoria, estas estruturas de rarefação do plasma são geradas por uma perturbação externa que se desenvolveu (KELLEY, 1989; HARGREAVES, 1992 apud MUELLA, 2008). O meio primeiramente torna-se perturbado e outros aspectos inerentes podem contribuir tanto para sua expansão, quanto para o seu amortecimento. De uma maneira geral as irregularidades surgem

do acoplamento das regiões E e F e se apoiam nas teorias linear e generalizada da instabilidade Rayleigh-Taylor, que serão apresentadas nas próximas subseções.

### 3.3.1 Teoria Linear da Instabilidade Gravitacional Rayleigh-Taylor

A teoria linear da instabilidade gravitacional Rayleigh-Taylor (GR-T) citada na seção anterior é derivada da hidrodinâmica, comportamento com que um fluido mais leve interage com um fluido mais pesado sob a ação da força da gravidade. De maneira genérica, esta instabilidade pode ser aplicada para fluidos de densidades diferentes que interagem mediante um estímulo ou forçante. A evolução da instabilidade GR-T é representada de forma simples na Figura 10, onde o fluido de cima é mais denso que o de baixo, então a força da gravidade para baixo é antiparalela ao gradiente de densidade.

Figura 10 – Figura ilustrativa de um plasma sob o efeito da instabilidade gravitacional Rayleigh-Taylor.

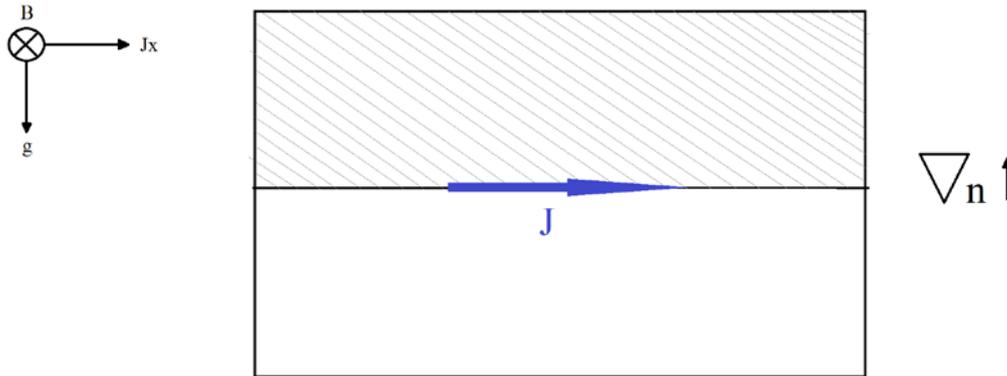


Fonte: Modificado de Singh (2014)

De maneira semelhante, o plasma ionosférico na base da região F, logo após o pôr-do-sol, configura essas mesmas condições de equilíbrio instável gerado pelo gradiente de densidade e se comporta como um fluido que responde de forma análoga à uma forçante (KELLEY, 1989). A Figura 11 representa o ambiente em que as irregularidades nascem, onde o plasma está sob a influência do campo geomagnético  $\mathbf{B}$  (perpendicular saindo do plano  $xy$ ), um campo elétrico  $\mathbf{E}$  (perpendicular ao campo magnético), ventos termosféricos  $\mathbf{U}$  (no sentido de oeste para leste), e da aceleração da gravidade  $\mathbf{g}$  antiparalela ao gradiente de densidade  $\nabla n$ . Depois da linha do terminador do anoitecer, logo após o pôr-do-sol, a camada E praticamente

some devido aos processos de recombinação, e a camada F sofre a forte deriva para cima do pico-pré-reversão que atua com um gradiente de densidade acentuado na base da camada.

Figura 11 – Figura esquemática do mecanismo de instabilidade GR-T sem a presença de perturbações.



Fonte: Autora

Adiante é mostrado o desenvolvimento das equações da instabilidade GR-T baseado em Kelley (1989). Inicialmente, uma corrente elétrica flui perpendicularmente a  $\mathbf{g}$  e a  $\mathbf{B}$  na interface entre os dois fluídos com magnitude proporcional à densidade eletrônica  $n$ , segundo a Equação (22):

$$J_x = nMg/B. \quad (22)$$

A teoria conta com um agente externo aos componentes deste cenário, que contribui como um mecanismo de disparo. Surge com isso uma perturbação senoidal na interface que movimenta as partículas carregadas.

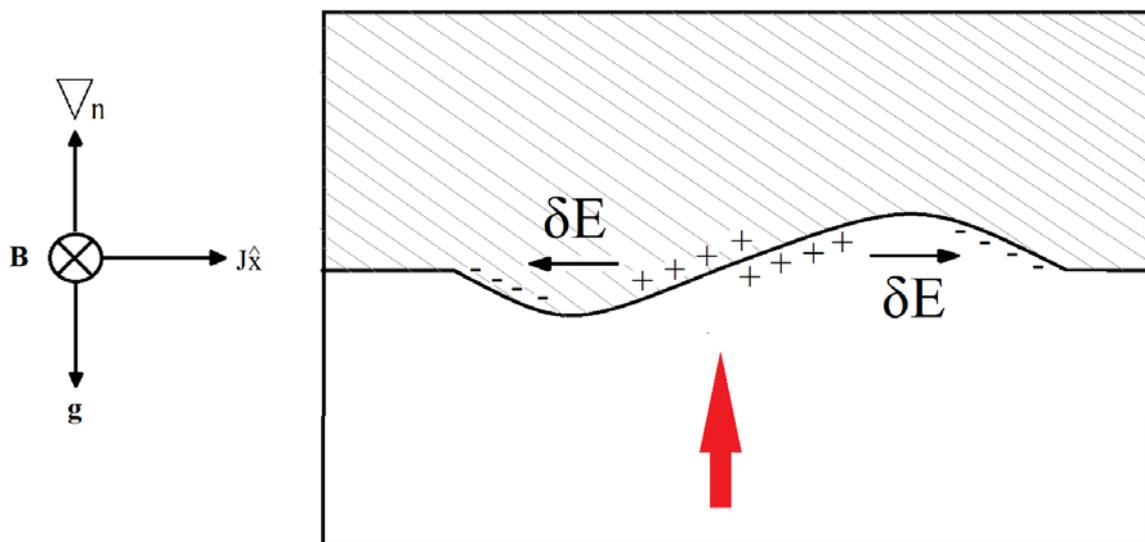
$$V_t = \frac{1}{B^2} \left[ \mathbf{E} - \left( \frac{K}{T} \right) \frac{\nabla n}{n} + \frac{Mg}{q} \right] \times \mathbf{B}. \quad (23)$$

A Equação (23) fornece a velocidade de uma partícula carregada na ionosfera que é gerada a partir da somatória das forças que atuam sobre a partícula, onde  $K$  é a constante de Boltzman,  $q$  denota carga elétrica,  $M$  é a massa molecular da partícula,  $T$  significa temperatura e  $\mathbf{E}$  representa o campo elétrico. O plasma deve ser eletricamente neutro por definição. Porém íons e elétrons não se movem da mesma maneira causando variação de carga e, portanto, variação de corrente:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} \neq 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (24)$$

Não atendendo a condição de divergência nula ( $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ ), há acúmulo de cargas nas fronteiras da região de perturbação e, conseqüentemente, cria-se um campo elétrico de polarização ( $\delta \mathbf{E}$ ) de forma que a corrente total seja nula (Figura 12). A seta vermelha da figura indica o sentido da atuação de um mecanismo de disparo na interface entre as regiões de densidades eletrônicas diferentes.

Figura 12 – Figura esquemática do mecanismo de instabilidade GR-T com a presença de campos elétricos de polarização na região das perturbações.



Fonte: Autora

Com o campo elétrico de polarização, íons e elétrons se movem com a velocidade de deriva dada na Equação (25), deslocando a região de maior densidade para baixo e a de menor densidade para cima, de forma que a perturbação é ampliada, como é representado na Figura 13.

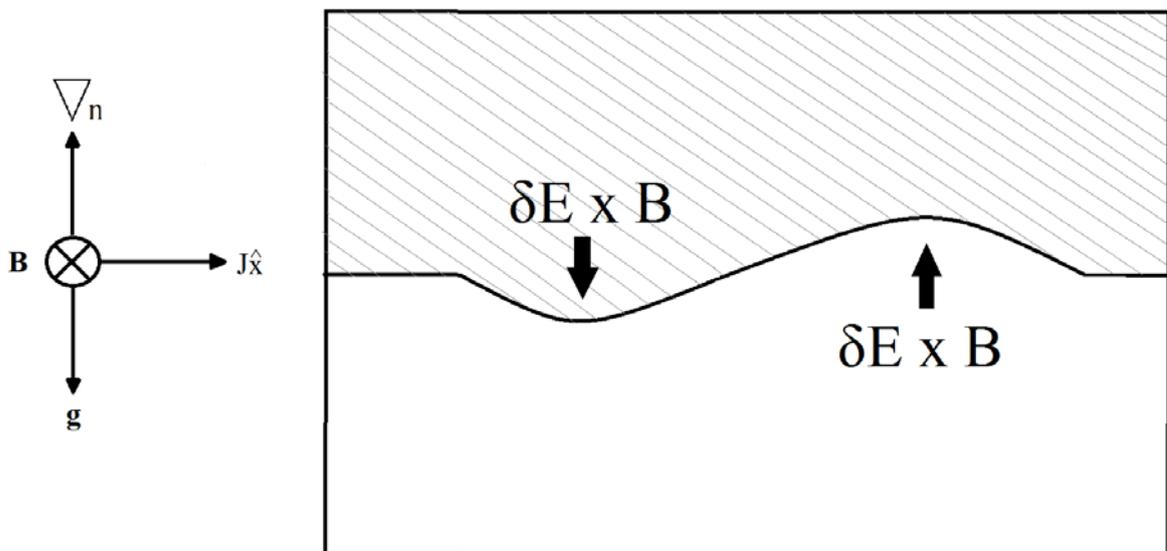
$$V_d = \frac{\delta \mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}. \quad (25)$$

A Equação (26) apresenta a taxa de crescimento linear para a instabilidade gravitacional GR-T na região equatorial, determinada a partir das equações da continuidade e de momentum (KELLEY, 1989):

$$\gamma_{RT} = \left(\frac{g}{v_{in}}\right) \left[\frac{1}{n_o} \frac{\partial n_o}{\partial h}\right], \quad (26)$$

onde  $\gamma_{RT}$  é a taxa de crescimento da instabilidade,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $v_{in}$  é a frequência de colisão dos íons com as partículas neutras,  $n_o$  é a densidade do plasma e  $\partial n_o / \partial h$  é o gradiente vertical de densidade do plasma. Acima do pico de ionização, o gradiente de densidade eletrônica se inverte, isto é, se torna positivo.

Figura 13 – Figura esquemática do mecanismo de instabilidade GR-T em que a perturbação está sob ação de uma deriva eletrodinâmica.



Fonte: Autora

### 3.3.2 Teoria Generalizada da Instabilidade Rayleigh-Taylor

Na teoria generalizada, considera-se além da gravidade outros fatores que agem para desestabilizar a ionosfera, tais como, ventos neutros ( $\mathbf{U}$ ), campos elétricos ambientes ( $\mathbf{E}$ ) e a recombinação química ( $\beta$ ). Outros parâmetros geofísicos são considerados no sistema, pois também contribuem para as condições iniciais que levam a geração das irregularidades. Na região equatorial, a distribuição do plasma tem fortes gradientes latitudinais de densidade atribuídos à ressurgência do efeito fonte após o entardecer, e a consequente intensificação da anomalia na ionização equatorial. Por isso, a equação que melhor descreve a taxa de crescimento das instabilidades é aquela que leva em conta a integração dos parâmetros ao

longo nas linhas de campo magnético ou tubo de fluxo. A Equação (27) traz uma expressão generalizada para a taxa de crescimento ( $\gamma_{TF}$ ) da instabilidade GR-T, de forma mais realista, das condições iniciais e dos parâmetros geofísicos integrados ao longo do tubo de fluxo magnético (SULTAN, 1996):

$$\gamma_{TF} = \frac{\sum_P^F}{\sum_P^E + \sum_P^F} \left( \frac{E_\phi L^3}{B_0} - U_L^P - \frac{g_e}{V_{eff}^F} \right) \frac{1}{R_E L^3 N_0^F} \frac{\partial}{\partial L} (L^3 N_0^F) - \beta_{TF}, \quad (27)$$

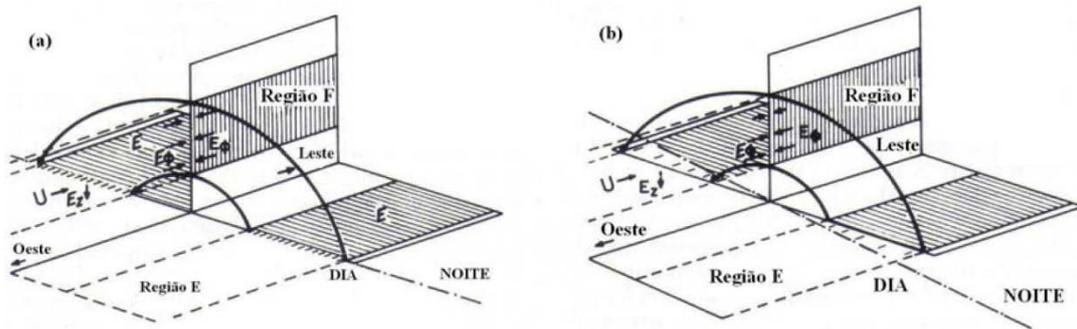
onde  $\sum_P^{F,E}$  é a condutividade Pedersen integrada ao longo do tubo de fluxo para as regiões E e F,  $E_\phi$  é o campo elétrico na direção leste-oeste, L é o parâmetro de MacIlwain (distância geocêntrica medida em unidades de raio terrestre),  $R_E$  é o raio da Terra,  $B_0$  é a intensidade do campo magnético na superfície da Terra ( $L=1$ ),  $U_L^P$  é o vento neutro ponderado pela condutividade Pedersen,  $g_e = g_0/L^2$ , onde  $g_0$  é a gravidade na superfície da Terra,  $V_{eff}^F$  é a frequência de colisão efetiva na região F ponderada pela densidade ao longo do tubo de fluxo,  $N_0^F$  é a densidade eletrônica total do plasma ambiente integrada ao longo do tubo de fluxo e  $\beta_{TF}$  denota a perda eletrônica total ao longo do tubo de fluxo de plasma devida a recombinação.

### 3.4 ALINHAMENTO ENTRE O TERMINADOR E O MERIDIANO MAGNÉTICO

Como já descrito no Capítulo 3, um dos principais fatores que influencia na geração das irregularidades é a velocidade de deriva vertical do pico pré-reversão. A magnitude desse fator influenciador é determinada dentre outros fatores pelo alinhamento do terminador do anoitecer com o meridiano magnético. Quando o terminador está perfeitamente alinhado com o meridiano magnético, o pôr-do-sol ocorre simultaneamente nas duas regiões E magneticamente conjugadas e o circuito que liga as duas regiões é interrompido também simultaneamente. Isso favorece campos elétricos de polarização com magnitudes maiores e velocidade de deriva vertical do pico pré-reversão maior. Quando desalinhados, o terminador e o meridiano magnético, o pôr-do-sol não ocorre simultaneamente, e enquanto uma das regiões E permanecer iluminada pelo sol haverá condutividade e o fluxo de carga não será interrompido daquele lado. Neste caso, a velocidade vertical de deriva do pico pré-reversão é menor e mais longa atuando diretamente a diminuir a taxa da instabilidade GR-T. A declinação magnética é elevada no setor longitudinal brasileiro, portanto, durante os meses do solstício de verão o terminador do anoitecer está proximoamente alinhado ao meridiano

magnético gerando um aumento na ocorrência das irregularidades da região F. A Figura 14 traz uma representação esquemática do dínamo da região F, em (a) o pôr-do-sol é simultâneo e em (b) mostra o fluxo eletrônico contínuo do lado diurno (ABDU et al., 1992).

Figura 14 – Alinhamento do terminador com o meridiano magnético, (a) alinhado e (b) em ângulo.



Fonte: Adaptada de Abdu et al. (1992)

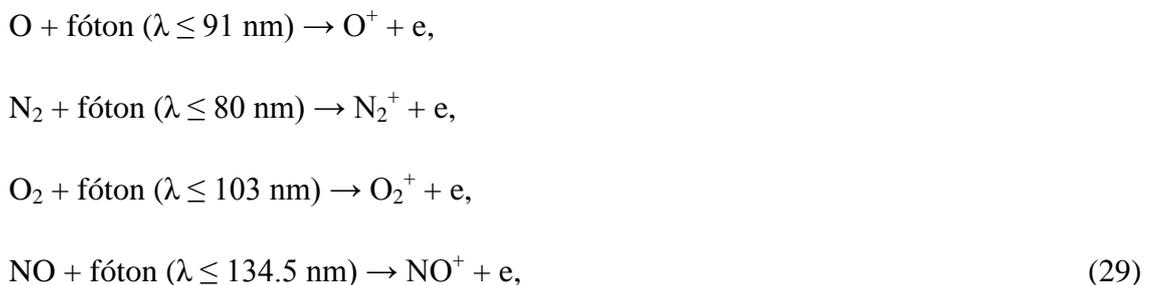
#### 4 MÍNIMO SOLAR ENTRE OS ANOS DE 2008-2010

A radiação solar interage com o gás na alta atmosfera de duas formas segundo Prölss (2004), ela pode ser reemitida ou absorvida. Há aumento da radiação quando é reemitida e há atenuação quando é absorvida. A radiação é absorvida através de processos químicos de fotodissociação, fotoionização e, quando ambos acontecem, fotoionização dissociativa.

A fotodissociação é o mais importante processo fotoquímico da atmosfera, pois desencadeia outros processos. A reação a seguir representa um dos mais importantes processos fotoquímicos da alta atmosfera acima de 120 km, a fotodissociação da molécula de oxigênio.



A fotoionização ocorre quando um fóton é absorvido por uma molécula e tem energia suficiente para remover elétrons da camada de valência. As principais reações de fotoionização que ocorrem acima de 90 km de altura são:



A reação de fotoionização dissociativa com comprimento de onda  $\lambda \leq 72 \text{ nm}$ , é a combinação das anteriores.



Através desses processos fotoquímicos, o conteúdo eletrônico da ionosfera está diretamente relacionado ao índice de radiação solar. Quanto maior o índice de radiação, maior a densidade eletrônica. A densidade da termosfera é altamente sensível às variações da irradiação solar em comprimentos de onda do extremo ultravioleta (EUV) (10-120 nm). Os fótons de EUV e ultravioleta longo (FUV) são a principal fonte de calor da termosfera que se expande e se contrai em resposta a mudanças de temperatura. Regiões ativas do sol são conhecidas por se caracterizar como regiões com fortes centros de emissão de EUV, raios-X e

faixas de rádio. A emissão dessas radiações são um dos parâmetros que variam segundo o ciclo de atividade solar.

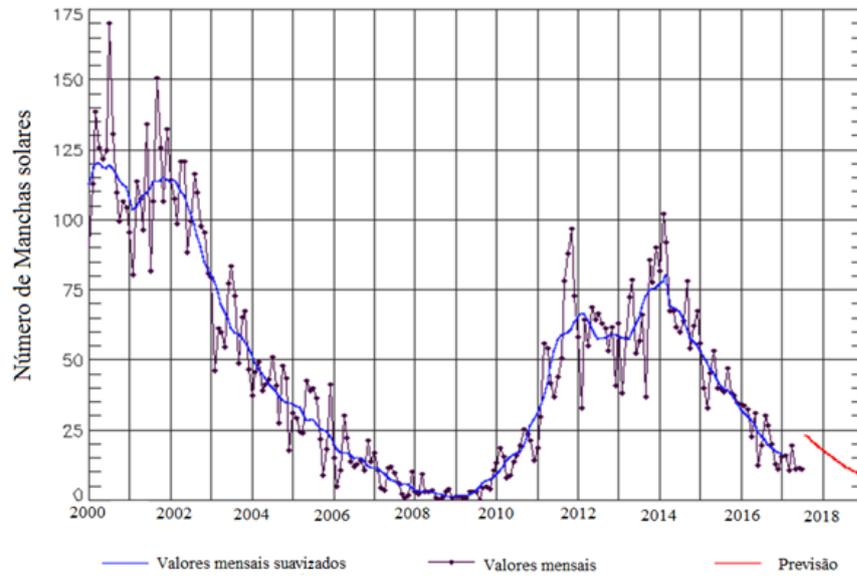
Scherer (2005) fez uma revisão sobre o tema, o ciclo solar magnético de 22 anos, também conhecido como ciclo Hale, e que marca os ciclos de inversão contínua dos pólos magnéticos do sol. Num ciclo Hale, em virtude da torção das linhas de campo magnético, há um máximo no número de manchas solares. Assim, é mais utilizado o ciclo de atividade solar de 11 anos, marcado pela variação do número de manchas.

Emmert, Lean e Picone (2010), Heelis et al. (2009) e Salomon et al. (2013) escreveram sobre o período de mínimo na atividade solar que ocorreu entre os ciclos 23 e 24. Foi um período de extremo mínimo na atividade solar e, como consequência disso, a atmosfera superior da Terra tornou-se mais fria, menos espessa e atingiu níveis de densidade menores do que 10-30%, quando comparado com as médias históricas. Foi reportada uma redução de 10-20 km na base da camada F entre os anos de 2008 e 2009, revelando que neste período a ionosfera contraiu-se como um todo. Os autores defendem que a causa principal para as baixas densidades termosféricas observadas ocorreu por conta dos baixos níveis de radiação na faixa do extremo ultravioleta (EUV) com comprimentos de onda entre ~10-120 nm, cuja redução foi de cerca de 15%. A Figura 15 mostra o número de manchas solares entre janeiro de 2000 até julho de 2017, na qual é possível identificar o período de extremo mínimo entre os anos de 2008-2009.

A Figura 16, baseada no trabalho de Emmert, Lean e Picone (2010), mostra os resultados obtidos a partir da análise de quatro décadas de dados do fluxo de irradiação solar no comprimento de onda de 10.7 cm (F10.17) como um “proxy” da irradiação no comprimento do EUV. Figura 16 (a) apresenta a média global de densidade diária da atmosfera obtida para uma altura de 400 km, a linha pontilhada indica densidade mínima obtida. Figura 16 (b) apresenta o fluxo de radiação solar diário de 10.7 cm (F10.7) normalizado a 1 UA, em unidade de fluxo solar (sfu equivale a  $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ). A Figura 16 (c) é o gráfico (a) com a média corrida de 81 pontos, ou seja, representa a média de densidade em log de 81 dias corridos, sendo que a linha verde pontilhada mostra a tendência de densidade do mínimo solar. E a Figura 16 (d) também traz os valores do gráfico (b) com média móvel de 81 pontos, ou seja, representa o log de 81 dias corridos da média diária do fluxo de irradiação solar em (F10.7). A linha pontilhada em (c) e (d) mostra a diferença entre os mínimos dos ciclos 23/24 em comparação com as observações durante o mínimo na transição dos ciclos 22/23.

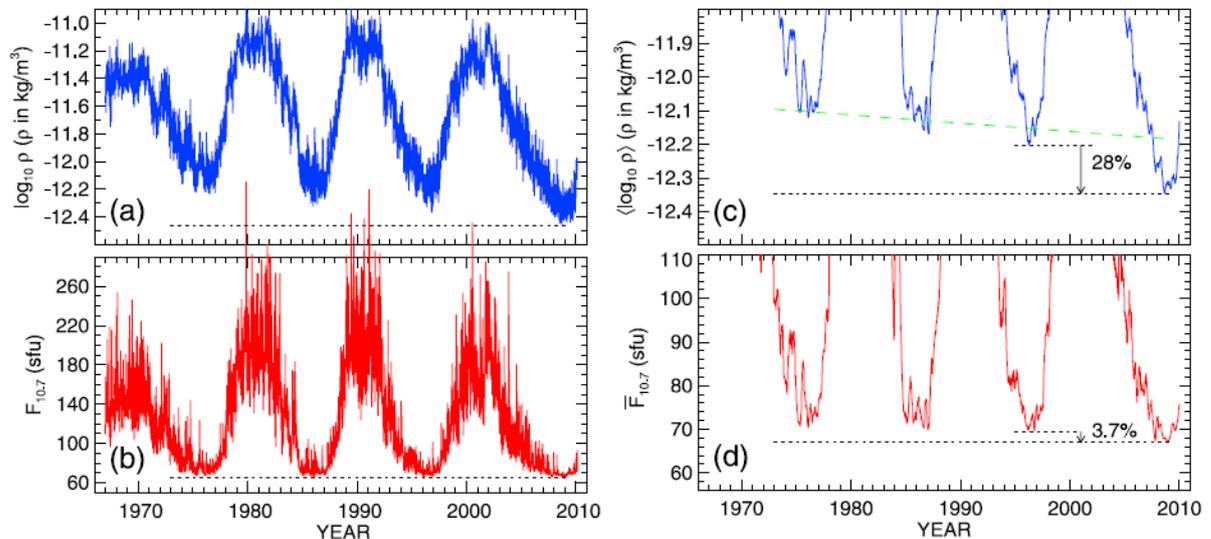


Figura 15 – Número de manchas solares entre os anos de 2000 e 2017.



Fonte: SWPC/NOAA (2017)

Figura 16 – (a) Média global da densidade da atmosfera para uma altura de 400 km entre os ciclos solares 20-23; (b) fluxo de radiação solar em 10.7 cm; (c) média corrida de 81 dias do gráfico (a); (d) média corrida de 81 dias do gráfico (b).



Fonte: Emmert, Lean e Picone (2010).

Os gráficos apresentados como resultado do trabalho de Emmert, Lean e Picone (2010) demonstram características ímpares de baixa atividade solar neste período e que, segundo Salomon (2013), foi o período mais longo e calmo já mensurado, e provavelmente o mais longo em um século.

## 5 INSTRUMENTAÇÃO

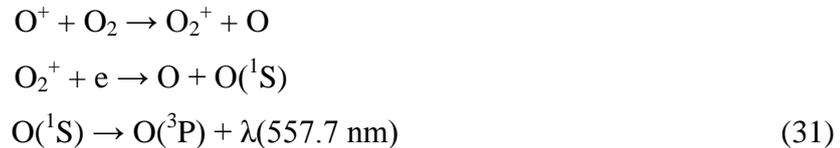
Neste capítulo serão apresentados os instrumentos utilizados para obtenção dos dados com observações das irregularidades. Foram utilizados três tipos de instrumentos de monitoramento ionosférico: o instrumento óptico imageador all-sky, o instrumento de rádio frequência do tipo ionossonda digital e receptores de sinais do GNSS.

### 5.1 AEROLUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA E IMAGEADOR ÓPTICO

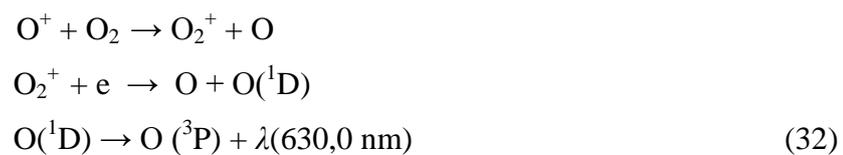
Registros de brilho noturno celeste foram primeiramente atribuídos às auroras. Notas feitas por Campbell (1895) relatam a descoberta de certa luminescência noturna quando esta causou interferência em estudo sobre nebulosas. Posteriormente, outro estudo já utilizando fotômetro concluiu que “A luz noturna celeste é composta por duas partes, uma nos alcança direto das estrelas, a outra resulta de processos fotoquímicos na atmosfera” (YNTEMA, 1909). Há dois tipos de emissão atmosférica na atmosfera superior, uma delas é denominada aurora, são emissões devido ao impacto de partículas energéticas e que ocorrem tipicamente em mais altas latitudes. A outra emissão é denominada de luminescência atmosférica ou aeroluminescência, emissão mais fraca causada por reações químicas dos constituintes atmosféricos (PIMENTA, 2003). Na atmosfera átomos e moléculas são excitados acima de seus níveis estáveis de energia devido a processos físico-químicos e, ao retornarem aos seus estados fundamentais, liberam o excesso de energia na forma de fótons. A luminescência atmosférica é emitida em faixas de altura localizadas em intervalos específicos provenientes de átomos/moléculas que residem nestas alturas. Estes intervalos são denominados de camadas de luminescência atmosférica (MONTEIRO, 2012).

As camadas de emissão atuam como medidores naturais da dinâmica da ionosfera, de forma que as variações espaço-temporais das taxas de emissão volumétrica detectadas por equipamentos ópticos-eletrônicos, como os imageadores, fornecem estas informações (MONTEIRO, 2012). A unidade de medida formalmente usada para a intensidade da radiação da aeroluminescência é o Rayleighs, em homenagem ao pioneiro pesquisador da área nos anos de 1920. Um Rayleigh corresponde a uma taxa de emissão de  $10^6$  fótons por segundo emitido por uma coluna atmosférica com uma base de  $1 \text{ cm}^2$  de área (WRASSE, 2004). Quando a emissão é proveniente de um único átomo a mesma é representada por linhas espectrais, e quando for decorrente de uma molécula será composta por um conjunto de linhas espectrais ou bandas.

A emissão da linha verde do oxigênio atômico (557,7 nm) é uma das mais importantes no espectro na faixa do visível, e atinge seu máximo na faixa de altura entre 95 e 100 km pela recombinação do oxigênio atômico. Também há emissão do OI 557,7 nm na região F em ~250 km de altura. A equação (31) traz a cadeia de reações para o OI 557,7 nm.

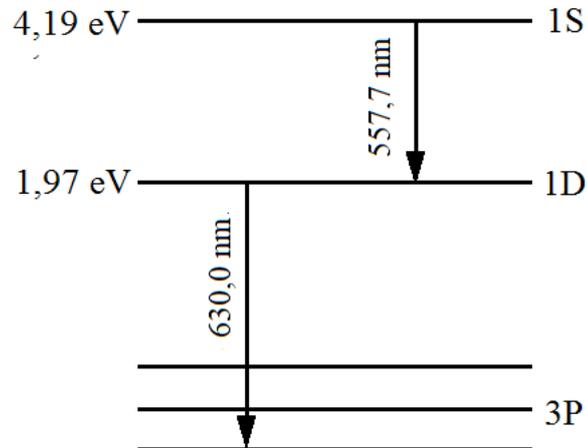


O tempo de vida de  $\text{O}({}^1\text{S})$  é de ~ 0,7 s, nesse intervalo se não houver desativação, ocorre a emissão da linha 557,7 nm (PETERSON; STEIGER, 1966 apud PIMENTA et al, 2003). Outra linha de emissão dominante é a linha vermelha do oxigênio atômico 630,0 nm (denominada OI-6300). No estudo das irregularidades ionosféricas, esse é o comprimento de onda mais importante, pois sua emissão ocorre em aproximadamente 250 km de altura. Nas equações (32) são apresentadas as reações químicas simplificadas do processo de formação do oxigênio e liberação do fóton, conforme Schunk e Nagy (2000). Primeiramente, a principal reação formadora do  $\text{O}_2^+$  é proveniente da troca íon-átomo. Durante a noite, a principal reação que resulta na emissão do OI-6300 é a recombinação dissociativa seguido do processo radioativo, quando ocorre uma transição espontânea do estado excitado do oxigênio atômico  ${}^1\text{D}$  para seu estado fundamental  ${}^3\text{P}$ .



O diagrama da Figura 17 representa as bandas de emissão do oxigênio atômico. O instrumento óptico de monitoramento, chamado de imageador, consiste basicamente na captação dos fótons provenientes das emissões de luminescência noturna, principalmente de origem atmosférica. O uso de filmes fotográficos de maior sensibilidade para detecção da luminescência noturna só começou a ser empregado na década de 70, como no estudo de Peterson e Kieffabel (1973 apud JANET et al., 2013), Sahai et al. (1981, 1994), onde notaram estruturas se movendo e evoluindo através da detecção da emissão do comprimento de onda do OH.

Figura 17 – Diagrama das bandas de emissão do oxigênio atômico.



Fonte: Modificado de Krassovsky, Shefov e Yarin (1962).

Segundo levantamento histórico (JANET et al., 2013) a família de imageadores automáticos digitais tem sido desenvolvida ao longo das últimas três décadas. Esses sensores terrestres evoluíram desde meados da década de 1990, sendo desenvolvido por vários grupos de pesquisa para uma variedade de aplicações, tendo como principal característica adquirir imagens digitais do topo do céu até o horizonte em várias bandas de emissão. O grande avanço nessa aplicação foi o desenvolvimento do sistema moderno usado hoje de imageamento consistindo na versão desses instrumentos pioneiros, porém acoplados a uma câmera CCD (Coupled Charge Device).

O imageador óptico é composto basicamente por cinco partes principais: lente olho de peixe, sistema ótico telescópico, roda de filtros de interferência automática, colimador, e câmera CCD. Neste equipamento a imagem é capturada de horizonte a horizonte pela lente olho-de-peixe ou lente all-sky, com campo de visão dependente da emissão que está sendo captada, em que a área de cobertura para OI 663,3 nm é de aproximadamente 1800 km<sup>2</sup> (CANDIDO, 2008). As emissões capturadas passam primeiramente por um sistema telescópico de lentes onde os raios divergentes são colimados. Depois disso, passam pelo filtro de interferência que elimina os comprimentos de onda indesejáveis. A luz incidente é convertida em fotoelétrons e armazenada em imagens. O chip CCD possui uma área coletora de uma lente telescópica de varredura do céu completo, a qual é capaz de obter uma alta relação sinal-ruído (20:1). Apresenta uma alta eficiência quântica (80% no visível), baixa corrente escura (0,5 elétrons/pixel/s), baixo ruído de leitura (15 elétrons rms) e alta linearidade (0,05%). O imageador também é equipado com um sistema de refrigeração que minimiza o ruído térmico, e um computador com softwares que controlam todo o funcionamento do sistema. Observações de emissões ópticas requerem boas condições de

tempo, ou seja, céu limpo. Também exige baixa luminosidade de fundo de forma que o instrumento reside em região afastada o suficiente das luzes da cidade. O brilho da lua também interfere, restringindo o período de coleta de dados durante a lua nova (MEDEIROS, 2001; CÂNDIDO, 2008; LÁZARO, 2010). O sistema de imagem utilizado para registrar as variações da noite-noite no espaço-tempo, no presente estudo, possui uma grande área de CCD com alta resolução e um conjunto iluminado traseiro de  $1024 \times 1024$  com uma profundidade de pixel de 14. As imagens foram binadas no chip até uma resolução de  $512 \times 512$ .

Neste trabalho foi usado o filtro mais apropriado para o estudo das irregularidades ionosféricas, a linha vermelha do oxigênio atômico (denominada OI-6300), com o objetivo de capturar as emissões que ocorrem na parte inferior da região F da ionosfera em torno de 250-280 km de altura. Nessa faixa de altura, as irregularidades no plasma ionosférico começam a se desenvolver e evoluírem na forma de bolhas. As observações da intensidade dessa emissão revelam várias irregularidades, e são interpretadas como variações espaciais e temporais na densidade do oxigênio atômico e estão atribuídas ao movimento atmosférico (MENDILLO; BAUMGARDNER, 1982; MENDILLO et al., 1997).

O sistema de imageamento descrito fornece imagens monocromáticas que são armazenadas na forma de arquivos digitais e nada mais são que uma matriz bidimensional de pixels. Essas imagens não estão prontas para análise espectral ou para a extração de parâmetros físicos, pois a lente do imageador introduz efeitos de compressão e curvatura nas imagens e também se faz necessário uma reorientação geográfica.

## 5.2 PROPAGAÇÃO IONOSFÉRICA E A ANÁLISE DOS DADOS DA IONOSSONDA DIGITAL

Nesta seção será apresentada a metodologia de sondagem ionosférica utilizada pela ionossonda, que se baseia na leitura da reflexão de ondas eletromagnéticas pela ionosfera. Será brevemente descrito alguns pontos fundamentais como a questão do comportamento de uma onda eletromagnética na ionosfera. A Tabela 5 apresenta a nomenclatura das frequências de onda usadas nas telecomunicações, conforme definido pela ITU (International Telecommunications Union) e sua resolução de 2015 (ITU, 2015). A faixa do espectro eletromagnético utilizada para investigar a ionosfera vai desde VLF até a UHF (HUNSUCKER, 1991).

Tabela 5 – Nomenclatura das faixas de frequência das ondas de rádio desde o ULF até o EHF.

<b>Banda</b>	<b>Frequência</b>	<b>Faixa de Frequência</b>
Ultra Low Frequency	ULF	300-3 000 Hz
Very Low Frequency	VLF	3-30 kHz
Low Frequency	LF	30-300 kHz
Medium Frequency	MF	300-3 000 kHz
High Frequency	HF	3-30 MHz
Very High Frequency	VHF	30-300 MHz
Ultra High Frequency	UHF	300-3 000 MHz
Super High Frequency	SHF	3-30 GHz
Extremely High Frequency	EHF	30-300 GHz

Fonte: ITU (2015).

Para descrever o comportamento de ondas de rádio HF se propagando verticalmente na ionosfera, primeiramente deve-se considerar o plasma ionosférico como um meio não magnetizado, sem colisão de partículas e elétrons. Este comportamento é analisado segundo a Teoria Magneto-iônica desenvolvida em meados dos anos de 1930 por Appleton e outros cientistas.

A girofrequência ou frequência natural de giro de um elétron ou íon em função do campo magnético é equivalente à frequência das ondas de rádio. A girofrequência é expressa por:

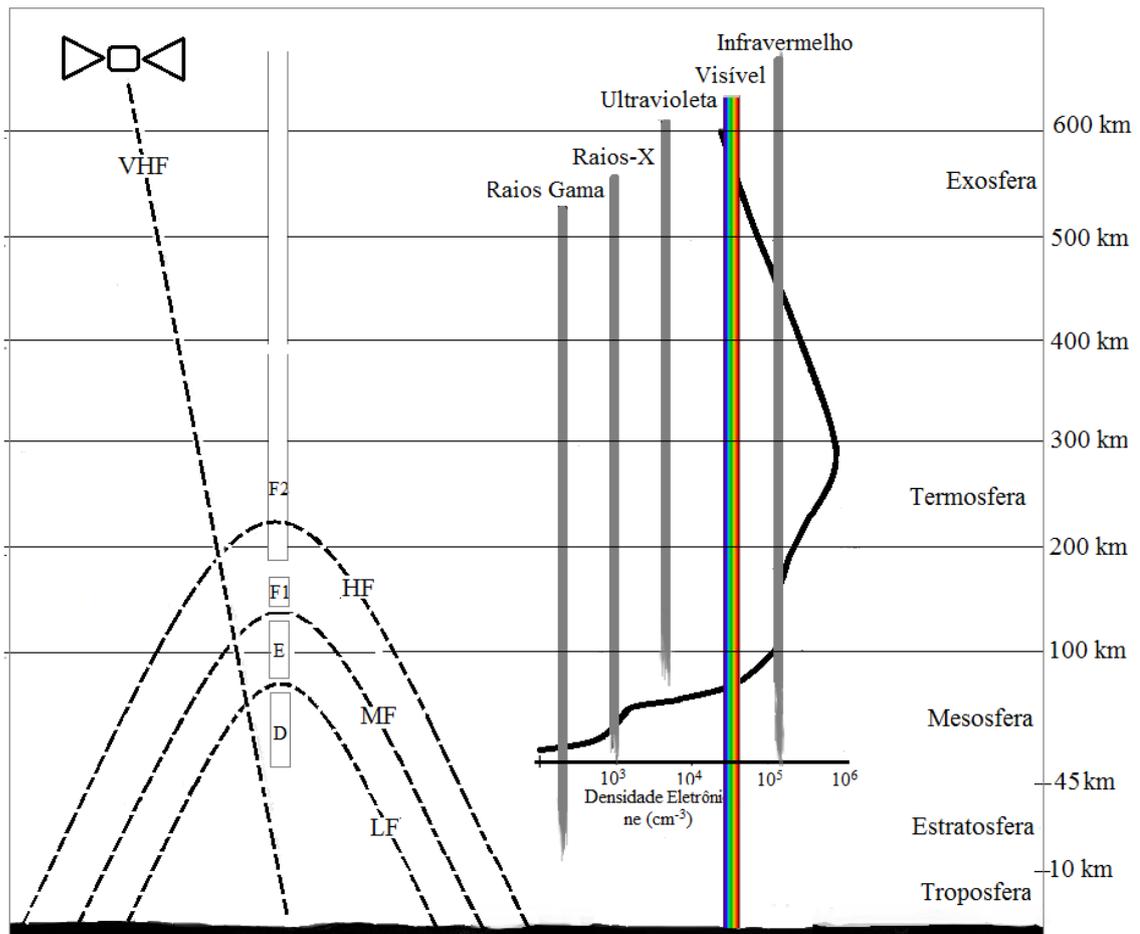
$$f_H = \frac{|e|\hbar}{2\pi m_e} B_0, \quad (33)$$

e a girofrequência angular:

$$\omega_H = \frac{|e|\hbar}{m} B_0. \quad (34)$$

A Figura 18, baseada em Hunsucker (1991), representa a forma com a qual as ondas de rádio emitidas por um equipamento de sondagem penetram nas camadas da ionosfera.

Figura 18 – Incidência das ondas de rádio na ionosfera.



Fonte: Modificado de Hunsucker, (1991).

O sinal de rádio ao incidir na ionosfera propaga-se através da camada até atingir uma altura em que a frequência da onda se iguala a frequência do plasma ambiente. Essa frequência, também designada por frequência crítica do plasma, é definida como sendo a frequência máxima abaixo da qual haverá reflexão total de uma onda de rádio com incidência vertical. As partículas carregadas podem remover a energia das ondas eletromagnéticas atenuando seu sinal ou até mesmo absorvendo-as completamente. A onda eletromagnética penetra na ionosfera transferindo parte de sua energia para os elétrons que passam a oscilar com a mesma frequência da onda. Se os elétrons não perdem essa energia colidindo com partículas neutras, essa energia é transferida novamente para a onda que é restaurada. Outra forma de interação possível é a refração, quando a densidade eletrônica não é constante e a direção da onda é mudada podendo ocorrer até reflexão total (HUNSICKER, 1991; CÂNDIDO, 2008; MONTEIRO, 2012).

Na Equação 35,  $v$  é a velocidade da onda,  $c$  é a velocidade da luz ( $c = 2,99798 \cdot 10^8$  m/s.) e  $n$  é o índice de refração. Portanto,  $n = 1$  quando a onda se propaga no vácuo,

$$n = \frac{c}{v}. \quad (35)$$

A propagação é expressa em termos de velocidade de grupo  $V_g$ , pois toda informação contida no sinal de rádio está relacionada com esta velocidade, que se dá qualitativamente conforme a equação:

$$V_g = c \cdot n. \quad (36)$$

A velocidade da onda sofre desaceleração devido ao conteúdo eletrônico presente na ionosfera. A densidade eletrônica aumenta com a altura desde a base da ionosfera até o pico de ionização. O pulso de rádio penetra na ionosfera desacelerando-se, e será refletido quando a velocidade for igual a zero. O índice de refração ( $\mu$ ) da ionosfera é dada por:

$$V_g = c \cdot \mu = c \sqrt{1 - \left( \frac{N_e^2}{\pi m_e f^2} \right)}, \quad (37)$$

onde  $N_e$  denota o número de elétrons por unidade de volume,  $m_e$  representa a massa do elétron ( $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg), e  $f$  é a frequência da onda em Hertz. Segundo esta equação pode-se deduzir a expressão da densidade eletrônica  $N_e$  em que a onda de frequência  $f$  em MHz será refletida:

$$N = \frac{m_e \pi f^2}{e^2}. \quad (38)$$

A relação de dispersão para a região F da ionosfera é dada por:

$$n^2 = 1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y_T^2 \pm \sqrt{Y_T^2 + 4Y_L^3(1-X)^2}}. \quad (39)$$

E os valores para X e Y das equações são obtidos fazendo-se  $X = \omega_N^2 / \omega^2$ ,  $Y_L = \omega_l / \omega$ ,  $Y_T = \omega_T / \omega$  e  $Z = v / \omega$ .

sendo:

$\omega$  = frequência de sondagem,

$\omega_N = \sqrt{\frac{N_e^2}{\pi m}} =$  frequência de plasma,

$$\omega_L = \frac{|e|B_0}{m_e} \cos\theta = \text{girofreqüência angular longitudinal, e}$$

$$\omega_T = \frac{|e|B_0}{m_e} \sen\theta = \text{girofreqüência angular transversal.}$$

Com a influência do campo magnético a ionosfera se torna um meio duplamente refrator, onde a reflexão ocorre por meio de duas ondas circularmente polarizadas, chamadas de ondas ordinária e extraordinária. A onda ordinária se comporta como em um meio não magnetizado, onde  $X=1$ , enquanto que uma onda extraordinária será refletida nos seguintes casos:

$$X = 1 - Y \text{ se } Y < 1 \text{ (} f > f_H \text{),}$$

$$X = 1 + Y \text{ se } Y > 1 \text{ (} f < f_H \text{).} \quad (40)$$

A onda se propaga com dois modos de propagação circularmente polarizados, sendo que a onda plano-polarizada que viaja pela ionosfera é a soma dos modos ordinário e extraordinário. A técnica de leitura por rádio-freqüência para o registro das ondas ordinárias e extraordinárias foi desenvolvida, primeiramente, por Appleton e Barnett, transmitindo ondas contínuas a 65-130 km de distância do receptor. Porém, em se tratando de sondagem vertical do tipo pulso-eco, a primeira ionosonda foi desenvolvida em 1925 por Breit e Tuve (HUNSUCKER, 1991; SCHUNK, 2000).

A ionosonda é um instrumento de rádio freqüência usado para monitorar a ionosfera, onde sinais na forma de pulsos de energia eletromagnética de freqüência variável, entre 1 e 24 MHz, são geralmente transmitidos por uma antena do tipo delta ou duplo-delta instalado em solo. Estes pulsos eletromagnéticos ao incidirem verticalmente na ionosfera são refletidos de volta e detectados por outra antena semelhante conectado ao sistema de recepção. A ionosonda estima o tempo de atraso entre o pulso enviado e o pulso refletido, e a altura de reflexão pode ser determinada fazendo-se:

$$h' = \frac{ct_p}{2}, \quad (41)$$

onde  $t_p$  é o tempo total gasto para a propagação do pulso. As ondas de rádio HF ao incidirem na ionosfera dividem-se em duas ondas características (ordinária e extraordinária) que se propagam independentemente, e que são refletidas na freqüência de corte do plasma

ionosférico. O sinal refletido tem suas componentes ordinária e extraordinária decodificadas dentro do sistema de recepção, e os traços dos sinais refletidos são registrados na forma de ionogramas. Portanto, os ionogramas são obtidos a partir do tempo decorrido entre transmissão de sinais e a reflexão pela ionosfera do pulso à uma dada frequência  $f$  (KIRCHHOFF, 1991; HUNSUCKER, 1991; SCHUNK; NAGY, 2000). Este método sonda a ionosfera até o pico de ionização. O perfil de densidade eletrônica acima do pico de ionização pode ser estudado através de modelos computacionais (HYSELL et al., 2015; JAMJAREEGULGARN, et al., 2017).

O termo ionossonda digital surgiu como um resultado do avanço tecnológico sobre as ionossondas convencionais (ou analógicas), o que concedeu às ionossondas digitais uma maior capacidade de monitorar a ionosfera numa determinada localidade, bem como realizar o controle digital sobre o processamento e a armazenagem dos dados (MUELLA, 2004). A “Canadian Advanced Digital Ionossonde” (CADI) é o modelo de ionossonda digital empregado nesta pesquisa.

A CADI é uma ionossonda que possibilita observar vários parâmetros, como o atraso do eco refletido (altitude) versus frequência, ângulo de chegada, polarização do eco, e a fase e amplitude do eco. O sistema da CADI consiste dos seguintes elementos funcionais: (a) placa SDD que gera os sinais de RF; (b) transmissor que amplifica a potência dos sinais de RF; (c) um sistema de antenas duplo delta; (d) placas receptoras que amplificam e demodulam os sinais refletidos; e (e) um microcomputador para processar o programa da CADI e controlar o processo de transmissão/recepção, enquanto armazena os dados de sondagem e exibe os ionogramas na tela.

O transmissor da CADI tem uma placa sintetizadora de frequência (SDD) que possui um oscilador que seleciona a faixa de frequência de transmissão dos sinais. O SDD possui também microcontroladores que são utilizados para realizar a amostragem dos ecos e gerar pulsos codificados. O transmissor é acomodado em um pequeno “chassi” com o tamanho aproximado de um “desktop” padrão. O transmissor da CADI produz sinais de pulsos com períodos de 40  $\mu$ s numa potência que pode atingir 600 W.

### 5.3 PROPAGAÇÃO TRANSIONOSFÉRICA E O PROCESSAMENTO DOS DADOS DOS RECEPTORES GNSS

O uso de satélites artificiais para investigar a ionosfera começou com o lançamento do Sputnik I em outubro de 1957. Após 60 anos desde o Sputnik I, os sinais de rádio transmitidos a bordo de satélites têm provido informações a respeito da morfologia global e do comportamento do plasma ionosférico, incluindo o monitoramento das irregularidades ionosféricas. A amplitude, a fase e o ângulo de chegada de um sinal de rádio que atravessa a ionosfera vão ser distorcidos quando o sinal atravessa uma estrutura de irregularidade. Essas distorções sobre os sinais de rádio quando medidas por receptores em solo possibilitam investigar as propriedades e a dinâmica dessas irregularidades (HUNSUCKER, 1991).

Neste estudo foram analisados os dados obtidos dos receptores GNSS de dupla frequência das redes da UNIVAP e da RBMC/IBGE, e de um receptor de GPS para monitoramento de cintilações ionosféricas gerenciado pelo INPE. A constelação GPS é constituída atualmente de 30 satélites localizados em seis planos de órbita, sendo quatro satélites em cada plano e espaçados de  $60^\circ$ , com uma inclinação de  $55^\circ$  ao plano equatorial. Cada satélite GPS transmite em três ondas portadoras L1, L2 e L5. Os receptores de GPS de uma única frequência recebem apenas os sinais da frequência L1 de 1575,42 MHz e, foram empregados nesta pesquisa para o estudo das cintilações na amplitude dos sinais recebidos. Para esta frequência o comprimento da onda é de 19 cm (SILVA, 2013).

O monitor de cintilação empregado neste estudo foi descrito detalhadamente por Beach (1998). O autor empregou nas análises o modelo de receptor SCINTMON, o mesmo utilizado neste estudo. Para processar e analisar as cintilações o receptor SCINTMON realiza os seguintes procedimentos:

- Primeiramente, um filtro passa baixa com frequência de corte em 0,1 Hz é utilizado para se obter os valores médios locais do canal de potência em banda larga (WBP) e do canal de ruído, na forma:

$$\text{WBP} = \frac{MT_c^2}{2} \left( P + \frac{N_0}{T_c} \right), \quad (42)$$

onde  $M$  denota o número de amostras, sendo no SCINTMON equivalente a 3000 amostras por minuto.  $T_c$  é de aproximadamente 1 ms e equivale ao período de repetição do código C/A recebido do satélite GPS. O código C/A (“coarse/acquisition”) é modulado apenas na portadora L1 e contém informações que permite identificar cada um dos satélites.  $P$  representa a potência do sinal recebido e  $N_0$  representa a densidade espectral de potência de ruído.

- Em seguida, calcula-se a potência média ( $P_M$ ) da intensidade do sinal para cada intervalo de 1 minuto:

$$P_M = \frac{1}{M} \sum_{a=1}^M (\langle P \rangle_a - \langle N \rangle_a), \quad (43)$$

onde  $N$  denota valores de densidade espectral de potência de ruído filtrados e o símbolo  $\langle . \rangle_a$  denota o valor médio dentro do número de amostras ou bit de dados  $a$ .

- Depois se calcula a variância da intensidade do sinal recebido:

$$\sigma_k^2 = \text{WBP}_k^2 - (P_M)_k^2, \quad (44)$$

sendo  $K$  o número de onda horizontal.

- Finalmente, o índice de cintilação  $S_4$  é determinado para cada intervalo de 1 minuto a partir de uma razão entre o desvio padrão, normalizado pela potência média do sinal recebido:

$$S_4 = \frac{\sqrt{\sigma_k^2}}{(P_M)_k}. \quad (45)$$

Considera-se como ocorrência de cintilação para o receptor SCINTMON quando pelo menos um satélite, dentro do intervalo de 1 minuto, assume um valor de índice de cintilação  $S_4$  superior a 0,2. Para  $S_4 < 0,2$  temos um nível de cintilação muito fraco cujo valor do índice  $S_4$  se encontra dentro de um nível de ruído. O índice  $S_4$  pode assumir valores de até 1,4 e, neste caso, as cintilações na amplitude dos sinais recebidos devido à presença das irregularidades na ionosfera são consideradas intensas, ainda que as irregularidades que estejam causando estas assinaturas, da ordem de 370-400 m, sejam bem menores do que aquelas que causam os espalhamentos nos sinais das ionosondas.

Os monitores de cintilação (SCINTMON) armazenam três tipos de arquivos com as seguintes terminações: “.FSL”, “.N”, e “.SUM”. Os arquivos “.FSL” (“Fast Scintmon Log”) são registros em formato binário que armazenam os dados de 50 amostras por segundo da intensidade do sinal medido pelo receptor, para cada satélite visível no céu, e com uma máscara de elevação de 10 graus. Os dados “.N” são arquivos de mensagem de navegação gravados em formato de texto e armazenam informações das efemérides dos satélites, como

parâmetros orbitais, coeficientes para a correlação ionosférica e informações sobre os satélites e seus sinais transmitidos. Ambos os arquivos “.FSL” e “.N” são utilizados para gerar os arquivos “.SUM” (“Summary”). Neste trabalho, os dados foram extraídos das informações contidas nos arquivos “.SUM”.

Os receptores de GNSS de dupla frequência dos observatórios da UNIVAP e da RBMC/IBGE em São José dos Campos e em Palmas, respectivamente, são mais robustos e permitem detectar duas portadoras do GPS, a L1 e também a L2 em 1227,60 MHz. Sobre as portadoras L1 e L2 são formados os códigos PRN (Pseudo Random-Noise) que são modulados pela fase, permitindo realizar medidas de distâncias a partir do tempo de propagação da modulação. Com estes receptores é possível calcular o conteúdo eletrônico total (TEC), definido como uma estimativa de quantos elétrons são percorridos pelos sinais dos satélites em sua trajetória até o receptor instalado em solo. O valor medido do TEC é proporcional ao atraso devido à ionosfera causado nas portadoras de fase dos sinais de rádio transmitidos nas duas frequências L1 e L2 do GPS, sendo por conveniência medida em unidades de TEC (TECU), onde 1 TECU corresponde a uma quantidade de  $1 \times 10^{16}$  elétrons/m<sup>2</sup>. Valores absolutos de TEC são obtidos a partir de uma combinação do TEC calculado das pseudo-distâncias de código nas portadoras L1 e L2 e das observáveis de fase (SILVA, 2013). Portanto, uma expressão para o cálculo de TEC pode ser escrita como sendo (KANTOR et al., 2000):

$$\text{TEC} = S[(\Phi_1 - \Phi_2) - \langle (\Phi_1 - \Phi_2) - (\rho_1 - \rho_2) \rangle - d_\rho - m_\rho - \varepsilon_\varphi], \quad (46)$$

onde  $S$  é um fator de conversão que equivale a  $9,52 \times 10^{16}$ ,  $\Phi_1$  e  $\Phi_2$  são as observáveis de fase para as portadoras L1 e L2, respectivamente, o símbolo  $\langle . \rangle$  denota a média para um arco de fase conectado em que não haja perda de ciclos,  $\rho_1$  e  $\rho_2$  representam as pseudodistâncias de código nas portadoras L1 e L2, respectivamente,  $d_\rho$  é o atraso instrumental (“bias”) do receptor e do satélite para as duas portadoras,  $m_\rho$  denota os efeitos de multi-caminho e  $\varepsilon_\varphi$  é o erro de fase da portadora. Unidade de TEC no SI é TECU que corresponde a  $10^{16}$  elétrons/m<sup>2</sup>.

O valor de TEC calculado da Equação (47) para cada satélite é obtido a partir de medidas das trajetórias oblíquas do sinal entre o satélite e o receptor, sendo geralmente designado por TEC inclinado ou “slant” TEC. Porém, quando se deseja analisar o TEC sobre um determinado local é preciso projetar o TEC inclinado na direção vertical (zenital) e se

calcular o TEC vertical (vTEC). Para isso, faz-se uma multiplicação entre o TEC inclinado e a função de mapeamento geométrica  $\cos(\chi)$ :

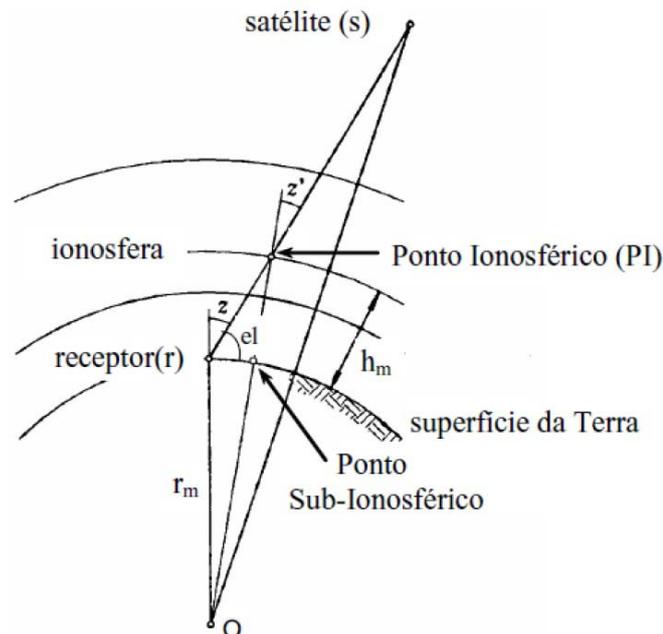
$$vTEC = TEC \cdot \cos(\chi) \quad (47)$$

na qual a função de mapeamento  $\cos(\chi)$  é dada por:

$$\cos(\chi) = \sqrt{1 - \left( \frac{R_T \cos(\alpha)}{R_T + h_{ipp}} \right)^2}, \quad (48)$$

onde  $R_T$  denota o raio da Terra,  $\chi$  é o ângulo de elevação,  $\alpha$  é o ângulo de elevação do satélite e  $h_{ipp}$  é o ponto onde o sinal do satélite perfura a ionosfera numa altura de 400 km acima do local de observação. A Figura 19 ajuda a compreender a geometria utilizada na obtenção do TEC vertical.

Figura 19 – Trajetória do sinal do satélite do GPS até o receptor GNSS instalado em solo.



Fonte: Adaptada de Hofmann-Wellenhof et al. (2001).

Os sinais GPS também fornecem uma outra medida para analisar as cintilações/flutuações de curta escala dos sinais associadas a essas irregularidades na densidade do plasma. Esta medida é também conhecida como a taxa de variação do TEC (ROT), expresso na unidade de TECU/minutos.



## 6 METODOLOGIA

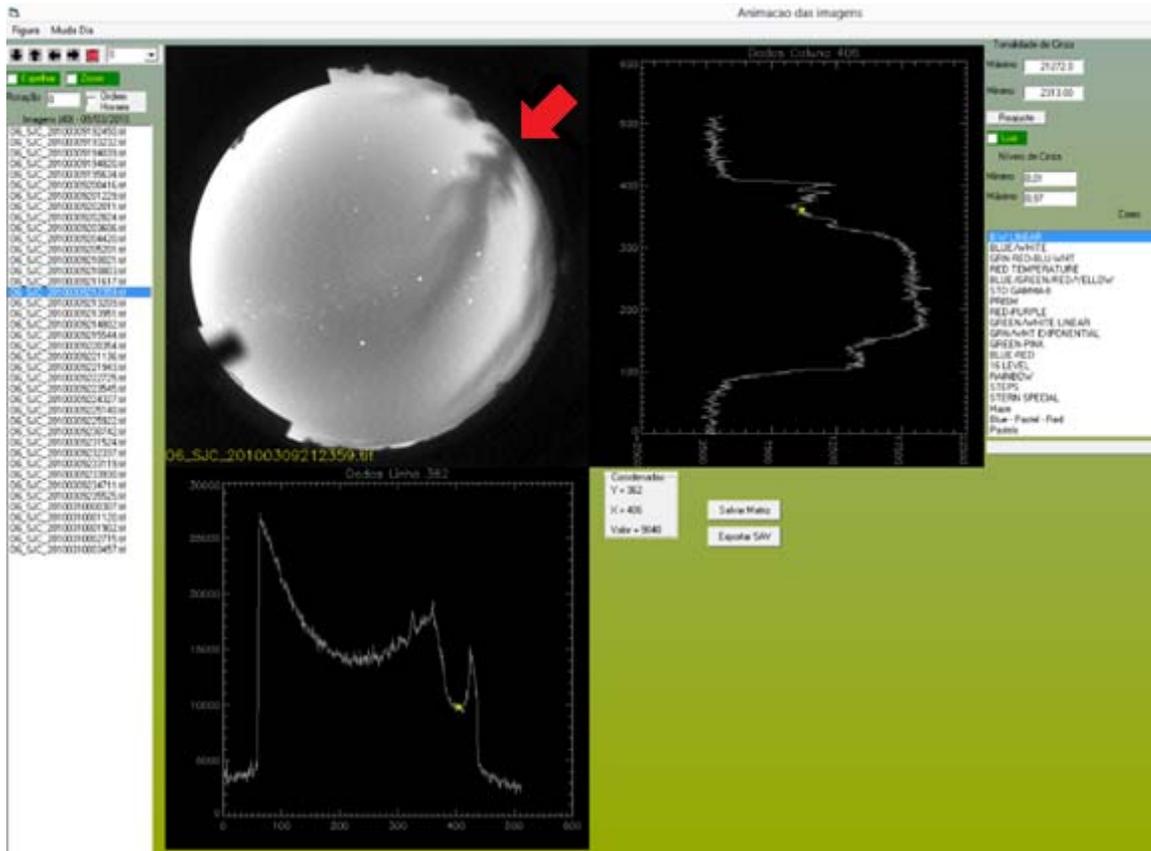
Neste capítulo serão apresentados os softwares empregados para análise e processamento dos dados e os critérios para seleção dos casos com irregularidades em diferentes tamanhos de escala. Também foram analisados todos os dados coletados simultaneamente pelos instrumentos citados no Capítulo 5, no período de 2008 a 2010 nas estações de monitoramento ionosférico situadas em São José dos Campos/SP (23,2° S; 45,9° O) e Palmas/TO (10,16° S; 48,26° O). A partir daqui abrevia-se SJC e PAL para essas duas cidades citadas. Na ausência de dados de GNSS para a estação de SJC, foram empregados dados da estação mais próxima, neste caso, de Cachoeira Paulista, que se encontra a cerca de ~100 km.

Como o propósito do estudo é investigar apenas os casos com assinaturas simultâneas de irregularidades nos registros dos três instrumentos (imageador, ionossonda e receptores do GNSS), o processo de seleção dos eventos partiu inicialmente da análise dos dados de luminescência atmosférica obtidos pelos imageadores all-sky instalados nas estações de PAL e SJC. Todos os dias com assinaturas de bolhas ionosféricas nas imagens de emissão do OI 630 nm foram selecionados. Em seguida, foi verificada a simultaneidade de bolhas ionosféricas nos ionogramas registrados pelas ionossondas de PAL e SJC. Uma vez havendo simultaneidade nos dados do imageador e da ionossonda de PAL, e nos dados do imageador e da ionossonda de SJC, verificou-se a assinatura de irregularidades nos dados do receptor GNSS de dupla frequência instalado em PAL, e nos receptores GNSS de dupla e única frequência instalados em SJC. Somente os eventos com assinaturas de irregularidades em todos os instrumentos foram selecionados, e considerados como casos de coexistência de irregularidades com diferentes tamanhos de escala.

### 6.1 ANÁLISE DOS DADOS DO IMAGEADOR ÓPTICO

Para o processamento das imagens, foi utilizado o software UASDA (“UNIVAP All Sky Data Analysis”), programa computacional desenvolvido por Pillat, Guedes e Fagundes. (2009) que envolve a visualização, calibração e projeção das imagens all-sky, de modo a obter parâmetros de interesses diversos, tais como: altura de ocorrência da emissão, velocidade de deriva zonal das irregularidades e densidade eletrônica da camada. A Figura 20 mostra um exemplo da tela de processamento e seleção das imagens pelo software UASDA.

Figura 20 - Processamento e seleção das imagens pelo software UASDA.



Fonte: Autora

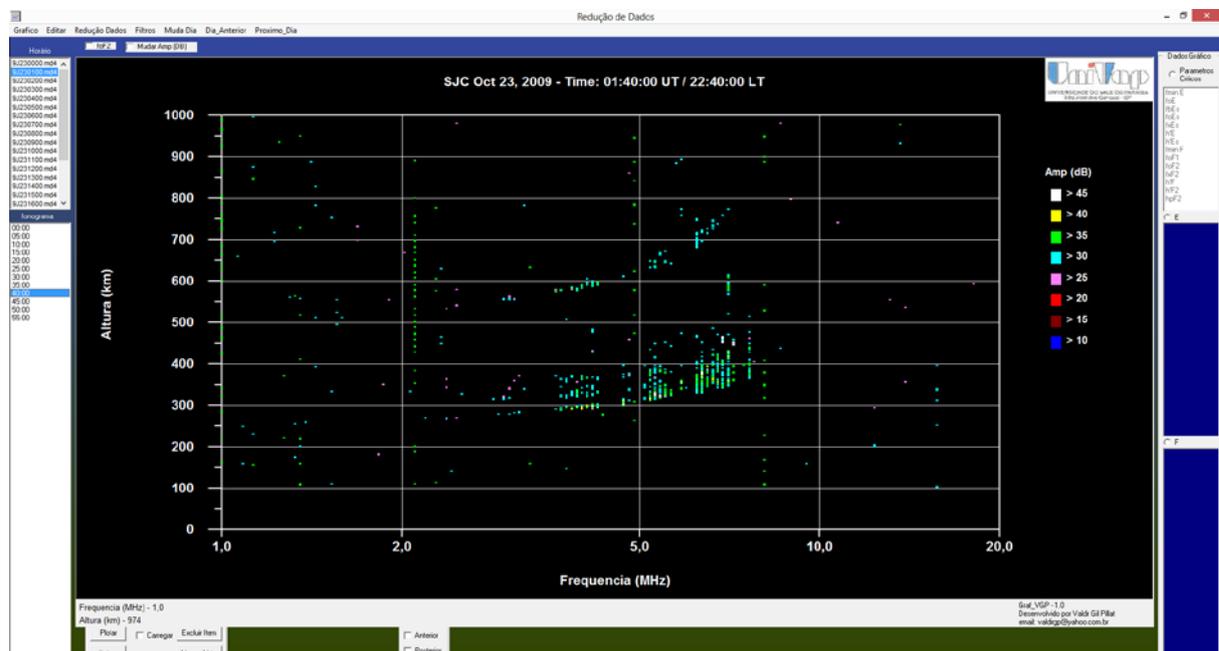
Todas as imagens obtidas pelos imageadores entre 2008-2010 nas estações de PAL e SJC foram avaliadas visualmente. Os casos com registro de irregularidades foram pré-selecionados. Uma vez que as imagens são gravadas apenas durante noites sem lua, com boas condições climáticas e com nuvens escassas, muitas noites com registros de ocorrência de irregularidades foram possivelmente perdidas. A estrutura de depleção está indicada na Figura 20 pela seta vermelha.

## 6.2 ANÁLISE DOS DADOS DA IONOSSONDA DIGITAL

A exibição e armazenagem dos dados de sondagem são feitos pelo programa da CADI, porém o processamento dos dados a ser empregado é feito por um sistema desenvolvido pelo Grupo Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), denominado UDIDA (“Univap Digital Ionosonde Data Analysis”). Com o programa UDIDA é possível processar os ionogramas registrados pela CADI e analisá-lo para extrair os parâmetros ionosféricos de interesse. O uso do programa UDIDA foi para identificar e classificar as

irregularidades segundo o tipo de espalhamento dos traços observados nos ionogramas e as suas intensidades (PILLAT, 2006, 2018; PILLAT; FAGUNDES, 2004). Na sua tela inicial, o sistema UDIDA oferece três opções: busca, redução dos dados e ISO frequência. A opção de busca possibilita fazer toda a transferência de dados, exclusão, cópia de arquivos, e outros, bem como pesquisar por ionogramas em estações e datas específicas. Para a redução dos dados dos ionogramas aparece outra tela (Figura 21) onde todos os ionogramas existentes para uma data selecionada podem ser visualizados.

Figura 21 – Tela de visualização e redução de dados pelo programa UDIDA.

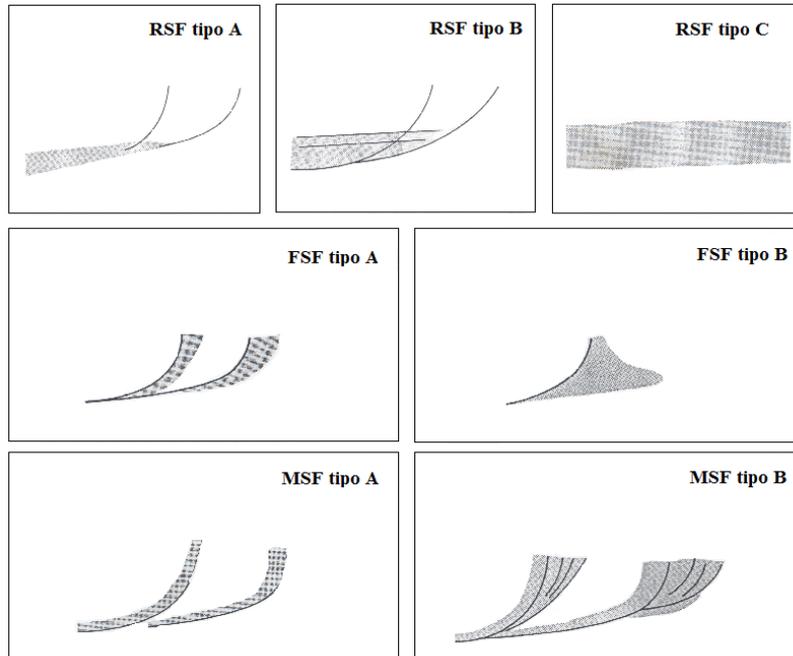


Fonte: Autora.

Os traços de espalhamentos da camada F associados a presença de irregularidades podem ser classificados em altura, frequência, ou uma combinação de ambos, denominados respectivamente de “spread-F em altura ou tipo range”, “spread-F tipo frequência” e “spread-F tipo mista”. Neste trabalho os espalhamentos foram qualificados com base nas recomendações do manual da U.R.S.I. *Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (PIGGOT; RAWER, 1972). Primeiramente, estes foram classificados nos três tipos mencionados acima: (1) espalhamento em frequência (FSF); (2) espalhamento em altura (RSF); e (3) espalhamento Misto (MSF). Secundariamente, cada grupo foi dividido em outros três subtipos, por exemplo, espalhamentos em frequência (FSF) e misto (MSF) podem ser do subtipo A ou do subtipo B, e espalhamentos em altura (RSF) podem ser dos subtipos A, B ou

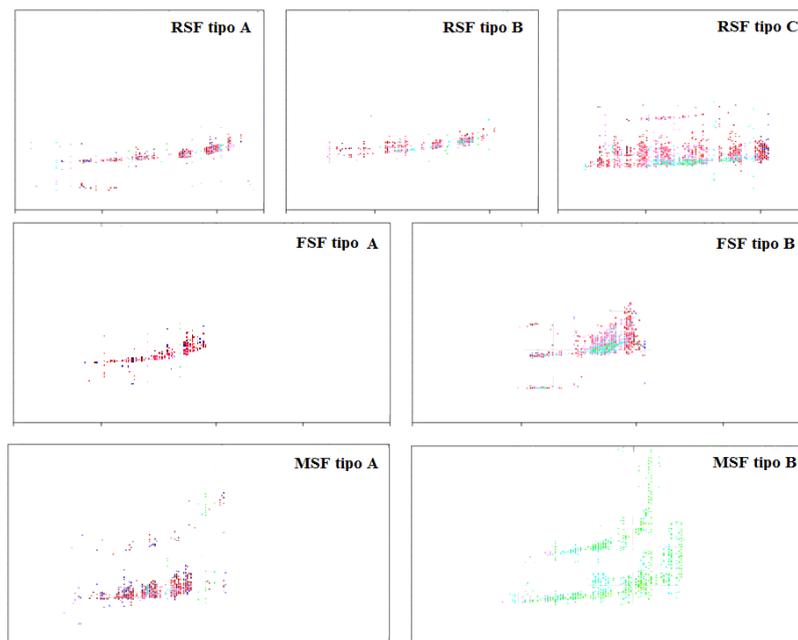
C. A Figura 22 traz espalhamentos ideais segundo o manual da URSI, e a Figura 23 traz exemplos de ionogramas reais correspondentes.

Figura 22 – Modelos padrão de tipos e subtipos dos traços de espalhamentos RSF, FSF e MSF conforme manual da U.R.S.I.



Fonte: Adaptado do manual da U.R.S.I. (PIGGOT; RAWER, 1972)

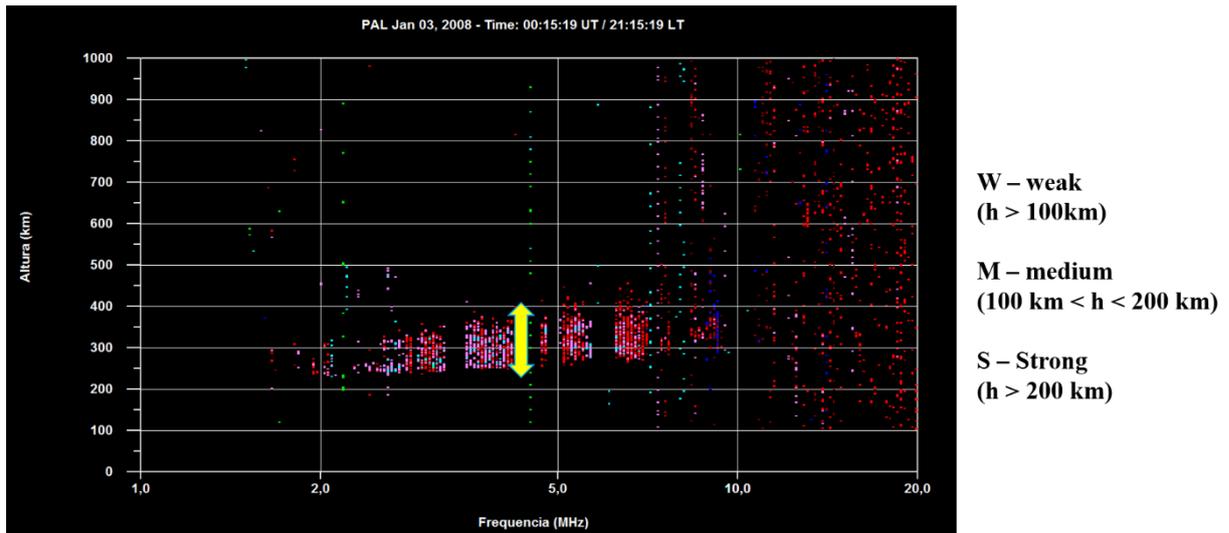
Figura 23 – Exemplos de ionogramas com os tipos e subtipos de espalhamentos conforme manual da U.R.S.I.



Fonte: Autora.

Finalmente, os espalhamentos em altura (RSF) também foram qualificados quanto a intensidade, sendo espalhamento fraco (W) para espalhamento com altura de  $h > 100$  km, espalhamento de intensidade moderada (M) para  $200 \text{ km} > h > 100$  km e espalhamento forte (S) para  $h > 200$  km (RODRIGUES et al., 2004). A Figura 24 é referente a esta qualificação.

Figura 24 – Intensidade dos espalhamentos em altura.

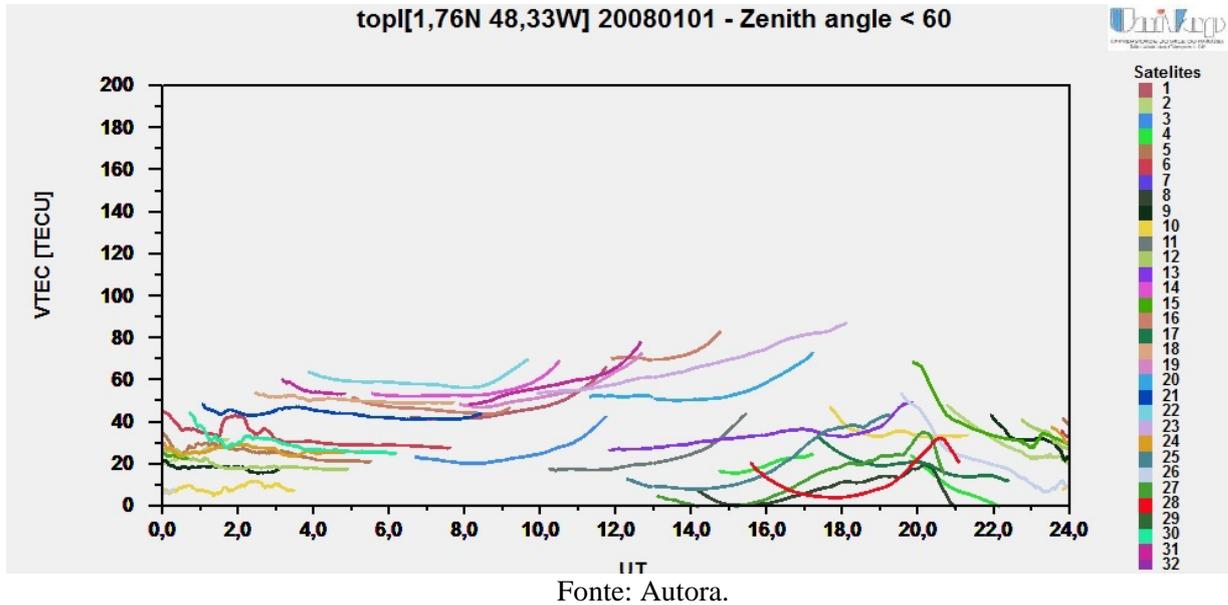


Fonte: Autora

### 6.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS DO RECEPTORES GNSS

Quando há presença de irregularidades na ionosfera na escala de poucos quilômetros, fazendo-se a derivada temporal do TEC (ROT, iniciais do inglês “Rate of TEC Index, ou taxa de variação do TEC), é possível identificar as flutuações na fase dos sinais associados à presença das irregularidades. Neste estudo para os cálculos do TEC e do ROT foi utilizado o programa desenvolvido na própria UNIVAP, denominado UTECDA (“UNIVAP *Total Electron Content Data Analysis*”). Nesta subseção será apresentado como o programa UTECDA deve ser utilizado para o cálculo do TEC e do ROT. Na Figura 25 tem-se inicialmente um exemplo dos resultados de TEC vertical (VTEC) obtidos na estação de monitoramento ionosférico de PAL. O número do PRN do satélite é indicado à direita no gráfico e os traços sólidos indicam os valores de VTEC.

Figura 25 – Valores do conteúdo eletrônico total vertical (VTEC) calculados para todos os satélites GPS visíveis sobre a estação de PAL no dia 01-01-2008.



O software UTECDA faz uso de arquivos gerados pelos receptores GNSS e a rotina empregada para calcular o TEC e gerar os gráficos de ROT faz uso de dois arquivos, como exposto a seguir:

- Arquivos de observação e navegação onde constam as informações dos relógios dos satélites e de cada um dos receptores empregados no estudo. Estes arquivos são disponibilizados num formato padrão denominado “Receiver Independent Exchange” (RINEX). Para a estação de PAL da RBMC/IBGE os arquivos foram obtidos através do endereço <<http://www.ibge.gov.br/>>.
- Arquivos das órbitas precisas no formato SP3 onde ficam registrados os parâmetros de tempo (semana GPS, hora GPS, tempo de origem de clock, etc.), parâmetros dos satélites (precisão de cada satélite, parâmetros de correção do relógio, etc.) e parâmetros das efemérides (semi-eixos das órbitas dos satélites, excentricidade, inclinação da órbita, correções da órbita, etc.) (MONICO, 2000; SILVA, 2013). O acesso aos arquivos de órbitas precisas é feito conhecendo-se inicialmente a semana GPS correspondente ao dia no qual os dados de GPS serão processados. Informações sobre a semana GPS podem ser obtidas na página da “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA), disponível em <<http://www.ngs.noaa.gov/CORS//Gpscal.shtml>> (SILVA, 2013), enquanto que as informações de órbitas precisas dos satélites de GPS podem ser obtidas através da rede global do IGS/JPL (“International GNSS Service/Jet Propulsion Laboratory”), disponível em <[http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/prods\\_cb.html](http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html)>.

As estações para cálculo do ROT devem ser cadastradas com as suas respectivas coordenadas e, uma vez salvo os arquivos das estações, o programa UTECDA conseguirá identificá-los e mostrará numa janela as informações salvas para aquela estação em específico. Na Figura 26 é mostrada como aparece a janela que exhibe os observatórios registrados no programa UTECDA.

Figura 26 – Janela do programa UTECDA com os observatórios cadastrados para cálculo do TEC.

The screenshot shows a window titled "Register of the Observatories" with the following fields and values:

Name:	Belem/BELE	Previous
Path:	\\Servidor\ifa\GPS (F)\NBGE\bele	Next
Latitude:	-1,45	
Longitude:	-48,5	
Altitude:	0	
Local Time:	0	
Ray of the Equator:	6378,14	
Ray of the Polar:	6356,755	
Aproximação X:	4228144	
Aproximação Y:	-4772757	
Aproximação Z:	-155761,8	Index

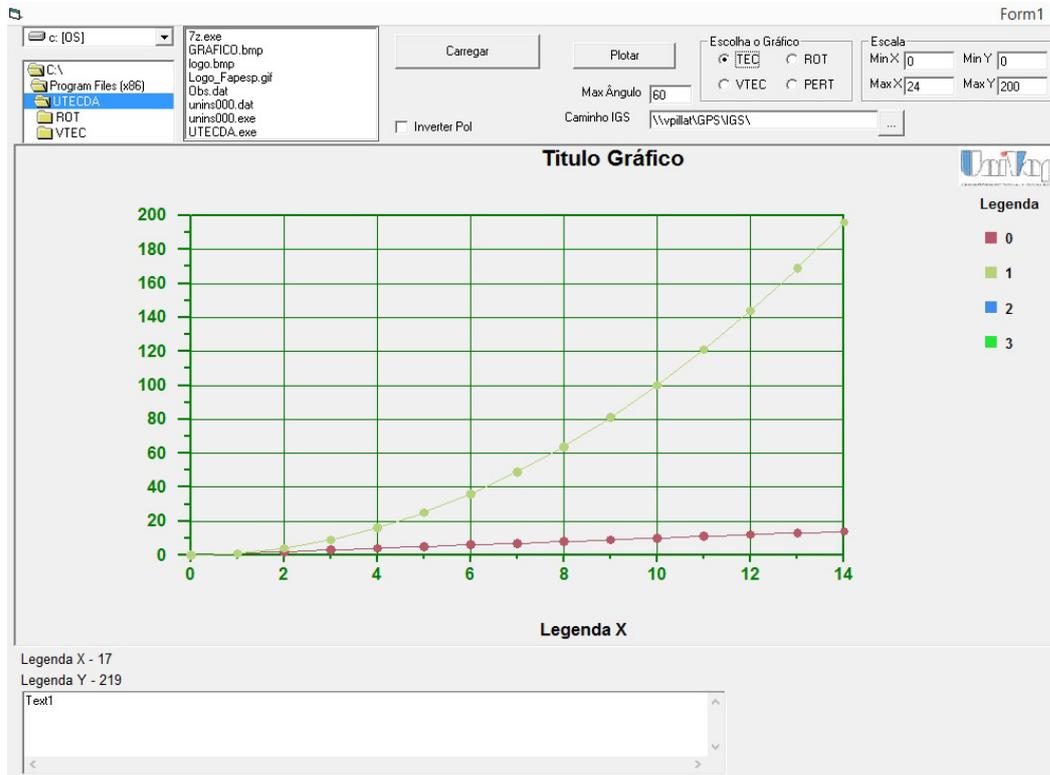
At the bottom of the window, there are buttons for "New", "Alter", "Delete", and "Save". Below the buttons, it displays "1 \ 21 Observatorie (s)".

Fonte: Autora.

Após indicado o caminho conforme a Figura 26 deve-se, no passo seguinte, calcular o TEC e gerar arquivos com o TEC calculado para cada satélite visível sobre a estação de interesse. A Figura 27 mostra a janela que aparece no programa UTECDA após gerado o TEC. No lado superior esquerdo da janela deve-se indicar o caminho dos arquivos RINEX de observação, onde também serão salvos após o processamento os arquivos com o TEC calculado. Na parte superior à direita da janela é possível selecionar o ângulo de elevação dos satélites para cálculo do TEC. Na opção “Caminho IGS” deve ser indicado o caminho onde os arquivos de órbitas precisas dos satélites foram salvos. Para cálculo do TEC, a opção “Escolha Gráfico TEC” deve estar selecionada. Feito estes procedimentos iniciais, deve-se clicar no botão “Carregar” na parte superior. Os arquivos carregados aparecerão no campo em branco localizado na parte inferior da janela e, uma vez exibidos, pode-se clicar no botão “Plotar” para que o programa UTECDA inicie o processamento dos dados. Havendo erros no processamento, devido a incoerências de datas nos arquivos RINEX e SP3, ou mesmo falhas

nos arquivos, uma mensagem de erro aparecerá no campo em branco na parte inferior da janela. Nesta mesma janela é exibido o passo do processamento dos dados.

Figura 27– Janela do programa UTECDA para cálculo do TEC e posterior cálculo do ROT.



Fonte: Autora.

Uma vez concluído o processamento dos dados de TEC, o programa “plota” na sua janela o TEC para cada satélite. No entanto, como é de interesse a taxa de variação do TEC, deve-se em seguida ser selecionada a opção ROT. Uma vez o TEC tenha sido calculado, não é necessário repetir o procedimento anterior de carregamento dos dados. Com isso, clicando-se diretamente em “Plotar ROT”, o programa calcula e exhibe preliminarmente o ROT calculado para cada satélite na sua janela. O programa também gera arquivos de saída do ROT calculado no caminho onde estão os arquivos OBS de observação dos satélites. Esses arquivos foram usados para plotagem dos gráficos usados neste trabalho para melhor apresentação dos resultados. Os arquivos de saída foram utilizados para plotar o ROT, conforme será exibido mais adiante na parte dos resultados. O ROT é calculado através da razão da diferença entre os valores de TEC obtidos entre duas épocas, dividido pelo intervalo de tempo corrido, assim:

$$ROT = \frac{TEC_{t_2} - TEC_{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (49)$$

O ROT também pode ser calculado independentemente do TEC, basta selecionar esta opção na janela da Figura 27. Por fim, as assinaturas das irregularidades nos resultados do ROT revelam a presença de estruturas de escala de no máximo uma dezena de quilômetros que coexistem com as bolhas de plasma. Na estação de SJC, onde foram instalados um receptor GNSS de dupla frequência e um monitor de cintilação em amplitude, as assinaturas simultâneas das irregularidades ionosféricas nos dados dos três instrumentos (quando disponíveis) foram reduzidas para apenas 5 noites. E na estação de PAL, onde apenas um receptor GNSS de duas frequências estava disponível durante o período desta investigação, dos 29 casos de assinaturas simultâneas de bolhas de plasma nas imagens da noite e nos ionogramas, apenas 10 noites de dados GNSS indicaram flutuações no TEC associadas às assinaturas de irregularidades ionosféricas registradas nos valores calculados de ROT.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS EVENTOS DE PALMAS

Na Tabela 6 a seguir tem-se todos os eventos de bolhas de plasma registrados na linha de emissão do OI 630,0 nm pelo imageador instalado em Palmas.

Tabela 6 – Eventos de bolhas de plasma selecionados a partir das imagens de luminescência atmosférica noturna em OI 630,0 nm para a estação de Palmas entre os anos de 2008 e 2010.

<b>Caso</b>	<b>Data (dd/mm/aaaa)</b>	<b>Período LT</b>
1	02/01/2008	00:36:34 - 01:02:45
2	11/01/2008	22:53:24 - 01:48:43
3	08/02/2008	20:47:43 - 04:15:09
4	12/02/2008	22:50:08 - 01:44:56
5	03/03/2008	23:17:13 - 02:30:42
6	04/03/2008	22:06:54 - 03:24:38
7	08/03/2008	20:16:44 - 02:01:21
8	13/03/2008	23:35:08 - 02:21:34
9	31/05/2008	23:36:13 - 02:53:39
10	04/06/2008	23:50:06 - 04:08:12
11	02/09/2008	20:37:08 - 02:05:28
12	03/09/2008	21:37:27 - 02:09:10
13	22/09/2008	23:04:46 - 00:15:32
14	26/09/2008	19:54:33 - 23:16:43
15	06/10/2008	00:00:04 - 04:17:51
16	25/10/2008	21:29:37 - 03:03:47
17	31/10/2008	20:34:06 - 01:51:59
18	02/11/2008	22:15:07 - 03:33:25
19	03/11/2008	23:02:04 - 03:49:03
20	03/12/2008	23:48:35 - 02:33:26
21	5/12/2008	00:05:19 - 02:06:00
22	17/12/2008	20:50:54 - 23:06:35
23	24/12/2008	20:46:44 - 01:18:44
24	27/12/2008	20:26:07 - 03:41:10
25	16/08/2009	21:39:54 - 02:30:10
26	18/08/2009	23:44:21 - 02:45:42
27	19/08/2009	01:12:24 - 02:41:32
28	20/08/2009	00:15:21 - 02:30:23
29	17/11/2009	23:02:30 - 01:48:55
30	04/02/2010	21:06:50 - 23:00:49
31	17/05/2010	22:06:37 - 23:32:53
32	05/06/2010	22:17:33 - 00:19:04
33	11/06/2010	23:22:28 - 01:32:22
34	15/06/2010	21:27:54 - 22:04:34
35	19/06/2010	00:31:02 - 03:08:21
36	12/07/2010	00:17:14 - 03:02:25
37	15/07/2010	23:25:58 - 01:53:55
38	20/07/2010	01:44:52 - 02:36:51
39	13/08/2010	23:09:12 - 02:31:42
40	03/09/2010	23:57:50 - 00:58:16
41	17/08/2010	01:15:42 - 01:50:08

Para melhor análise dos resultados, na primeira coluna da Tabela 6 traz-se a numeração para os casos. Em seguida, verificou-se com o programa UDIDA os ionogramas que apresentavam espalhamentos simultâneos associados a presença de bolhas e irregularidades no plasma ionosférico. Os dias com medidas e registros simultâneos nos dois instrumentos (imageador e ionossonda) são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Datas com observações simultâneas de irregularidades pelo imageador e espalhamento nos ionogramas para a estação de Palmas.

<b>Caso</b>	<b>Data</b>	<b>Imageador</b>	<b>Ionossonda</b>
1	2/1/2008	00:36:34 - 01:02:45	21:00:04 - 05:00:21
2	11/1/2008	22:53:24 - 01:48:43	21:00:04 - 01:40:19
9	31/5/2008	23:36:13 - 02:53:39	22:45:19 - 23:05:19
10	4/6/2008	23:50:06 - 04:08:12	22:30:19 - 03:00:03
11	2/9/2008	20:37:08 - 02:05:28	21:05:03 - 00:45:19
12	3/9/2008	21:37:27 - 02:09:10	21:00:04 - 21:30:19
15	6/10/2008	00:00:04 - 04:17:51	00:15:19 - 02:14:19
16	25/10/2008	21:29:37 - 03:03:47	22:45:19 - 00:30:19
17	31/10/2008	20:34:06 - 01:51:59	22:00:21 - 00:40:19
18	2/11/2008	22:15:07 - 03:33:25	23:00:21 - 04:30:19
19	3/11/2008	23:02:04 - 03:49:03	23:00:21 - 03:10:19
20	3/12/2008	23:48:35 - 02:33:26	21:00:04 - 01:45:19
21	5/12/2008	00:05:19 - 02:06:00	22:00:21 - 00:45:19
26	18/8/2009	23:44:21 - 02:45:42	00:30:00 - 04:00:00
27	19/8/2009	01:12:24 - 02:41:32	01:10:00 - 02:30:00
23	20/8/2009	00:15:21 - 02:30:23	00:25:00 - 02:20:00
29	17/11/2009	23:05:16 - 0:59:31	01:30:00 - 04:05:00
30	4/2/2010	21:06:50 - 23:00:49	22:10:00 - 22:30:00
31	17/5/2010	22:06:37 - 23:32:53	00:00:00 - 03:40:00
32	5/6/2010	22:17:33 - 00:19:04	23:00:00 - 00:20:00
33	11/6/2010	23:22:28 - 01:32:22	23:05:00 - 02:30:00
34	15/6/2010	21:27:54 - 22:04:34	22:00:00 - 02:00:00
35	19/6/2010	00:31:02 - 03:08:21	23:10:00 - 00:10:00
36	12/7/2010	00:17:14 - 03:02:25	21:00:01 - 02:40:00
37	15/7/2010	23:25:58 - 01:53:55	22:50:00 - 02:40:00
38	20/7/2010	01:44:52 - 02:36:51	22:40:00 - 2:35:00
39	13/8/2010	23:09:12 - 02:31:42	00:00:00 - 02:40:00
40	3/9/2010	23:57:50 - 00:58:16	00:25:00 - 04:55:00
41	17/8/2010	01:15:42 - 01:50:08	01:45:00 - 05:00:00

Neste estudo, que busca sincronizar dados gerados por múltiplos instrumentos, deve-se atentar para as datas e os horários (UT e LT) que cada instrumento utiliza e gera seus dados para correta análise de simultaneidade, especialmente por se tratar de fenômenos noturnos que ocorrem próximo à meia-noite na hora local. Por exemplo, o imageador empregado neste trabalho gera imagens em hora local (LT) e as grava com este horário no canto inferior de

cada imagem. Dependendo do modelo e configuração do imageador, o nome do arquivo é gravado com algumas informações, tais como: filtro utilizado, abreviação do observatório, ano, mês, dia, hora, minuto e segundo. Tomando como exemplo a imagem gravada com o nome “O6\_SJC\_20100309193232.tif”, pelo nome do arquivo sabe-se que pelo prefixo “O6” que a mesma foi gerada pela captura do comprimento de onda do oxigênio atômico OI6300, pelo imageador instalado no observatório de SJC no dia 09/03/2010 às 19h32m32s LT. Isso significa que as imagens começaram a ser geradas às 19:00 LT do dia 09 e são captadas até perto do amanhecer, já no dia 10, porém são salvas dentro de uma pasta com a data do dia 09 de março quando foi iniciada a observação. As irregularidades observadas ao longo desta noite foram então registradas nas tabelas anteriores como sendo do caso do dia 09/03/2010, data inicial do começo das observações, mesmo que as irregularidades tenham sido observadas depois da meia-noite local. Este critério foi adotado como procedimento padrão para todos os casos, tanto de SJC quanto de PAL. Portanto, um caso de simultaneidade datado de 09/03/10 traz informações de todo o período noturno do dia 09 até o dia 10 de março.

Na sequência, os dados da ionossonda foram verificados em busca de assinaturas de irregularidades no mesmo período em que foi diagnosticado as imagens obtidas pelo imageador. Os ionogramas foram visualizados utilizando-se o programa UDIDA, que os fornece em horário UT/LT na tela de visualização, como mostra a Figura 21. A análise é feita a partir das 21:00 UT (19:00 LT) do primeiro dia e abre-se o arquivo do próximo dia para visualizar os ionogramas das 00:00 UT (21:00 LT) até 08:00 UT (05:00 LT). Logo, para a análise de um caso de irregularidade datado de 09/03/2010, utiliza-se dois arquivos, onde estão os dados de ionossonda do final do dia 09 e do começo do dia 10. Os espalhamentos foram tabelados com horário de ocorrência em LT. Dados de S4, ROT e VTEC também são gerados em UT, então são gerados dois dias de dados para o período noturno para que seja analisado a simultaneidade nos registros de cada instrumento.

Após tabelado os eventos simultâneos registrados pela ionossonda e o imageador, a etapa seguinte foi empregar o programa UTECDA para calcular o ROT dos casos da Tabela 7 sobre a estação de PAL. Após o processamento dos dados dos receptores de GNSS, o número de eventos com registros simultâneos em todos os instrumentos foi reduzido para 10 casos na estação de PAL, conforme listado na Tabela 8. Nesta tabela a segunda coluna mostra as datas dos eventos escolhidos, na terceira coluna aparecem os horários (em LT) em que as bolhas foram identificadas nas imagens obtidas pelo imageador e na quarta coluna os horários em que espalhamentos (em LT) foram registrados nos ionogramas. A última coluna indica os

máximos valores aproximados de flutuações no ROT com níveis superiores a 0,5 TECU/min, o que caracteriza a presença de irregularidades.

Tabela 8 - Eventos de irregularidades ocorridos em Palmas.

<b>Caso</b>	<b>Data</b>	<b>Horário de Ocorrência (LT) (Imageador)</b>	<b>Horário de Ocorrência (LT) (Ionossonda)</b>	<b>ROT (TECU/min)</b>
1	02/01/2008	00:01 - 01:02	21:00 - 05:00	2,0
2	11/01/2008	22:53 - 01:48	21:00 - 01:40	4,0
17	31/10/2008	20:34 - 01:51	22:00 - 00:40	2,0
18	02/11/2008	22:15 - 03:33	23:00 - 04:30	2,0
19	03/11/2008	23:02 - 03:49	23:00- 03:10	2,0
20	03/12/2008	23:48 - 02:33	21:00 - 01:45	3,0
21	05/12/2008	00:05 - 02:06	22:00 - 00:45	2,5
29	17/11/2009	23:02 - 00:59	01:30 - 04:05	4,0
30	04/02/2010	21:06 - 23:00	22:10 - 22:30	2,0
37	15/07/2010	23:25 - 01:53	22:50 - 01:35	1,5

#### 7.1 EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 02-03/01/2008

Os eventos de observações simultâneas de irregularidades obtidos na estação de PAL e listados na Tabela 8 serão apresentados e discutidos nesta seção. As assinaturas das irregularidades nos registros dos diferentes instrumentos (imageador, ionossonda e receptor GPS) serão analisadas conjuntamente com as observações dos parâmetros ionosféricos que denotam as variações na densidade eletrônica, altura e deriva da camada sobre PAL.

O primeiro caso a ser analisado ocorreu na noite dos dias 02-03 de janeiro de 2008. Nos gráficos da Figura 28 são apresentados os registros obtidos de todos os instrumentos disponíveis no dia do evento. Inicialmente observamos no quadro (a) uma sequência de imagens da linha de emissão do OI 630 nm, e no quadro (b) a mesma sequência linearizada pelo software UASDA (250 km). As imagens apresentadas foram registradas entre 00:01 e 01:02 LT do dia 03 de janeiro em intervalos cadenciados com a roda de filtros. Nas imagens de emissão observam-se as regiões de depleção do plasma (manchas mais escuras), que

denotam a presença na ionosfera de estruturas de irregularidades de larga escala (bolhas). As regiões brancas na parte inferior das imagens não linearizadas indicam a presença de nuvens, todavia as estruturas das bolhas puderam ser vistas.

Nos painéis (c) e (d) da Figura 28 são mostrados, respectivamente, os tipos e intensidades dos espalhamentos observados nos ionogramas e os valores da taxa de variação do TEC (ROT) calculados a partir das observações com o receptor GPS. A análise dos ionogramas foi feita empregando o programa UDIDA e as classificações dos espalhamentos, quanto aos tipos e as intensidades, seguiram os critérios descritos na Seção 6.2. No painel da Figura 28(c) as colunas sobre o eixo do tempo (em LT) indicam o horário de ocorrência dos tipos de espalhamento (FSF, RSF e MSF) e as intensidades destes espalhamentos (W, M, S). Conforme legenda da figura, os tipos de espalhamentos foram feitos com colunas em cores distintas, sendo espalhamento misto (MSF) em cinza escuro, espalhamento em frequência (FSF) em um tom de cinza mais claro e espalhamento em altura (RSF) com as barras em preto. Quanto às intensidades, no eixo y do painel da Figura 28(c), na parte inferior são registrados os horários em que os espalhamentos assumiram níveis fracos (W), na parte central os horários de níveis moderados (M) e na parte superior os instantes de níveis fortes de espalhamento (S). As letras sobre as barras indicam as subclassificações dos tipos de espalhamentos (A, B e C), conforme também descritas anteriormente na Seção 6.2. Nas barras que não existem letras significa que os tipos de espalhamentos são os mesmos que a anterior. A figura mostra que na noite de 02-03 de janeiro os espalhamentos foram na sua maioria do tipo RSF-C, o que caracteriza assinaturas típicas de bolhas de plasma. Os primeiros registros iniciaram às 21:00 LT do dia 02 de janeiro e duraram até aproximadamente 05:00 LT do dia 03 de janeiro. Entre aproximadamente 21:00 LT e 01:30 LT a intensidade dos espalhamentos em altura variou entre fraco a moderado ( $100 \text{ km} < \lambda < 300 \text{ km}$ ), quando então se manteve em nível moderado até próximo ao amanhecer ( $200 \text{ km} < \lambda < 300 \text{ km}$ ).

Simultaneamente às observações dos espalhamentos na ionossonda de Palmas, no painel da Figura 28(d) são mostrados os valores de ROT calculados para os satélites PRN 21, 24, 29 e 30. Os gráficos registram as flutuações nos sinais destes satélites devido a presença das irregularidades. Os resultados mostram que as flutuações mais intensas chegaram a  $\sim 2$  TECU/min e ocorreram entre 20:30 e 00:15 LT, coincidindo com os horários em que os espalhamentos RSF-C sobre Palmas sofreram variações fracas e moderadas na sua intensidade. Após às 00:15 LT não foram mais registradas flutuações ROT nos sinais de qualquer satélite do GPS. As assinaturas de irregularidades mostradas nos gráficos de (a-d) revelam a ocorrência de estruturas que abrangem uma escala espacial que se estende desde

alguns quilômetros até centenas de quilômetros. Irregularidades com escala de comprimento de poucos quilômetros podem causar, por exemplo, as flutuações observadas nos dados de TEC e que são geralmente representadas pelos valores de ROT (painel d). As flutuações no TEC estão associadas às flutuações na densidade eletrônica, uma vez que o plasma ionosférico e a estrutura de irregularidade está se movendo através do feixe do sinal do satélite. Por outro lado, as imagens de luminescência e os espalhamentos registrados nos ionogramas indicam que nesta noite estruturas de irregularidades da ordem de centenas de quilômetros se estenderam desde o equador até a latitude de PAL.

As simultaneidades dos dados dos três instrumentos revelam que estruturas com diferentes tamanhos de escala estão coexistindo na ionosfera sobre PAL. As bolhas foram geradas no equador como resultado de mecanismos de instabilidade, tal qual a instabilidade GR-T, e a medida que foram evoluindo para alturas maiores se estenderam até as latitudes mais afastadas. Em contrapartida, as estruturas menores que causam as flutuações observadas no ROT podem ter sido geradas localmente, ou podem ser resultado do decaimento das estruturas de larga escala. O decaimento das bolhas está geralmente associado a processos de difusão do plasma da região F da ionosfera, em que elétrons fluem através das linhas de campo magnético. Como consequência da intensificação da difusão, os campos elétricos de polarização que surgem nas bordas das estruturas das bolhas, tornam-se mais fracos, inibindo a ação dos processos de instabilidade secundários que agem para sustentar as irregularidades ou formar outras com dimensões menores. De acordo com Vickrey e Kelley (1982) um aumento da condutividade Pedersen integrada ao longo das linhas de campo seria o principal fator que atua na intensificação dos processos de difusão de plasma e, conseqüentemente, o decaimento das estruturas de irregularidades. Por outro lado, desde a sua formação no equador, à medida que as bolhas vão evoluindo em direção ao pico da camada F2 a ação dos mecanismos secundários de instabilidade inicia um processo de cascata dessas estruturas de larga escala (KUO; CHOU; SHAN et al., 1998). Estes mecanismos dão origem a irregularidades com tamanhos de escala que se estendem desde poucos centímetros até dezenas de quilômetros.

Mesmo com a extensão das bolhas para latitudes mais afastadas do equador, estes processos secundários (não-lineares) de instabilidade continuam a acontecer nas bordas das estruturas que estão derivando para leste. Portanto, irregularidades com estruturas menores (1-10 km), tais como aquelas que causam as flutuações no ROT, podem ter sido geradas durante o processo de evolução das bolhas por estes processos secundários. Ainda não está bem estabelecido pela comunidade científica quais os mecanismos secundários que atuam

efetivamente na geração das irregularidades de menores escalas. Os principais mecanismos que foram propostos até o momento, e que aparecem descritos na literatura são: (a) instabilidade “cross-field” (TSUDA; SATO; MATSUSHITA, 1969); (b) instabilidade de deriva de dois passos (HUDSON et al., 1973; 1974); (c) modo de deriva colisional (HUDSON; KENNEL, 1975); (d) instabilidade de onda de deriva sem colisões (COSTA; KELLEY, 1978); (e) e a instabilidade de deriva híbrida-inferior (HUBA, 1981). Destes mecanismos citados, o de instabilidade “cross-field” foi evidenciado por Muralikrishna e Vieira (2007), a partir de observações de foguetes lançados sobre Natal-RN e Alcântara-MA entre os anos de 1985 e 1995. Na ocasião as observações ocorreram durante eventos de bolhas de plasma. Os autores concluíram que como a densidade eletrônica tem um gradiente para baixo no topo da ionosfera, o mecanismo de instabilidade “cross-field” era o provável responsável por desestabilizar o plasma na altura das bolhas e gerar as estruturas de menores escalas.

Nos painéis (e-h) da Figura 28 são mostrados os parâmetros ionosféricos reduzidos dos ionogramas registrados em PAL. As duas linhas verticais pontilhadas que atravessam os painéis (e-h) indicam os horários do anoitecer e amanhecer, 18:00 e 06:00 LT, respectivamente, com o objetivo de identificar o período noturno. No painel da Figura 28(e) é mostrado o resultado da variação temporal da altura virtual da base da camada F ( $h'F$ ) observado ao longo dos dias 02-03 de janeiro de 2008. No painel da Figura 28(f) é mostrado o resultado da variação temporal da frequência crítica (em MHz) da camada F2 ( $foF2$ ) da ionosfera e, mais abaixo no painel (g), é mostrado a variação da altura do pico da camada F2 ( $hpF2$ ) sobre Palmas. A fim de representar a velocidade de deriva vertical da base da região F sobre a estação de Palmas durante os dias de observação do evento, no painel da Figura 28(h) é mostrado a derivada  $dh'F/dt$ . Nos painéis (e-h) as curvas com as linhas sólidas em vermelho denotam os valores dos parâmetros registrados entre os dias 02-03 de janeiro, enquanto que as linhas sólidas em preto representam os valores médios destes parâmetros obtidos durante 05 dias de referência. Para este caso foram considerados os dias 3, 4, 9, 11 e 17 de janeiro como os dias de referência. Foram considerados dias de referência aqueles geomagneticamente mais calmos (soma diária do  $K_p < 24$ ) da estação e quando foram observados espalhamentos não associados às irregularidades. A ausência de dados observada nas curvas de  $foF2$  e  $hpF2$  (linhas em vermelho e preto) está relacionada a presença de espalhamentos em frequência nos ionogramas, o que impossibilitou a redução destes parâmetros, ou mesmo devido a ocorrência de ruídos nos ionogramas.

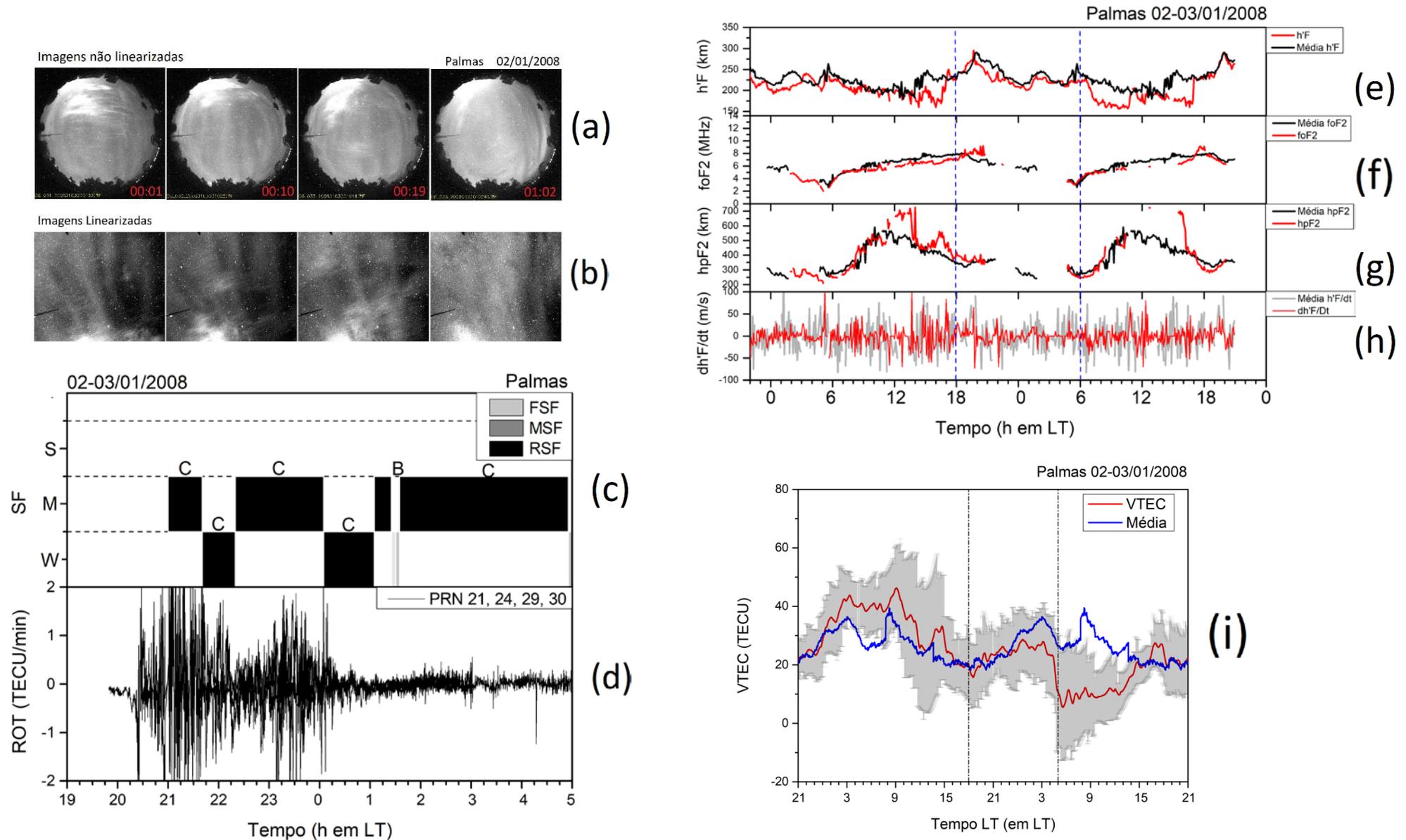
Finalmente no gráfico da Figura 28(i) são mostrados os valores médios do TEC vertical (VTEC) calculados ao longo dos dias 02-03 de janeiro (linha em vermelho) para todos os satélites visíveis. A região sombreada em cinza em torno dos valores de VTEC médio denota o desvio padrão. Os resultados são comparados com os valores médios do VTEC obtidos para os dias de referência (linha em azul). Os resultados mostram que na noite de 02-03 de janeiro os valores de VTEC atingiram níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência.

Os parâmetros ionosféricos mostrados nos gráficos (e-h) e os resultados de VTEC (painel i) podem ajudar a explicar a formação das irregularidades neste dia e os fatores que contribuíram para a sua manutenção até pouco antes do amanhecer. Ainda que as bolhas tenham sido geradas no equador, as condições ionosféricas na latitude de PAL devem ter sido favoráveis para que as irregularidades, principalmente as de menores escalas, tenham ocorrido. Por volta das 18:00 LT do dia 2 de janeiro, próximo aos horários de ocorrência do pico pré-reversão sobre o equador, o valor da altura da base da camada se assemelhou ao dos dias de referência. A altura  $h'F$  atingiu  $\sim 300$  km antes das 20:00 LT, o que pode ter ajudado a desestabilizar a ionosfera e dar origem aos mecanismos secundários que atuam na geração das irregularidades menores. Ainda se compararmos com os valores médios, para o dia do evento  $h'F$  parece estar um pouco mais baixo entre 20:00 – 00:00 LT, mas ainda assim dentro das barras de desvio. Os valores de  $foF2$  e VTEC apontam para densidade do conteúdo eletrônico, portanto, poderiam ajudar a entender as flutuações vistas no ROT até por volta da meia-noite, uma vez que a formação de irregularidade menores tende a ser favorecida em condições em que a densidade eletrônica do plasma ambiente é maior. No entanto, os resultados mostram que estes parâmetros não diferiram dos dias de referência, pelo menos durante as primeiras horas da noite para  $foF2$  e ao longo de toda a noite para VTEC. A deriva vertical média da ionosfera sobre PAL obtida de  $dh'F/dt$  assumiu um valor máximo de 12 m/s entre 18:00 – 20:00 LT do dia 2 de janeiro, cerca de 19 m/s acima daquele obtido para os dias de referência. Ainda que as bolhas não tenham sido geradas sobre PAL, esta subida brusca da ionosfera possivelmente foi o principal fator que contribuiu para desestabilizar o plasma e acionar os mecanismos de instabilidade secundários.

A presença de bolhas para este evento até próximo ao amanhecer do dia 3 de janeiro, conforme revelado pelos espalhamentos nos ionogramas, significa que as bolhas foram geradas na ionosfera equatorial em longitudes à oeste de PAL. Estas bolhas de plasma derivaram para leste, transitando na ionosfera sobre PAL ao longo de toda a noite até  $\sim 05:00$  LT, quando finalmente cessaram como um todo. Mesmo que espalhamentos RSF-C de

intensidades moderadas tenham sido observados em PAL após 01:00 LT, as flutuações no ROT cessaram mais cedo por volta da meia-noite. Isso deve-se essencialmente à aceleração da taxa de recombinação e a queda na densidade eletrônica da ionosfera, conforme sugerido pelo gráfico de VTEC após a meia-noite, que juntamente com o processo de difusão do plasma na região F causa o decaimento mais rápido das estruturas menores de irregularidades.

Figura 28 - Observações em Palmas do evento de 02-03 de janeiro de 2008: (a) imagens captadas da emissão no OI 6300; (b) mesma seqüência de imagens linearizadas; (c) intensidades (W, M e S) e tipos (RSF, FSF e MSF e A, B, C) dos espalhamentos; (d) taxa de variação do TEC (ROT) calculado dos PRNs 21, 24, 29 e 30; (e-h) registros dos parâmetros  $h'F$ ,  $foF2$ ,  $hpF2$  e dos valores calculados de  $dh'F/dt$  na noite do evento (linha preta) e para os dias de referência (linha vermelha); (i) TEC vertical no dia do evento (linha preta) e para os dias de referência (linha azul).



## 7.2 EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 11-12/01/2008

O próximo caso de simultaneidade listado na Tabela 8 ocorreu na noite dos dias 11-12 de janeiro de 2008. Assim como foram apresentados os resultados de monitoramento ionosférico na seção 7.1, nos gráficos da Figura 29 são apresentados os registros obtidos de todos os instrumentos disponíveis no dia do evento. Assim, no quadro (a) selecionamos algumas das imagens (00:03 – 01:39 LT) que foram registradas pelo imageador entre 23:36 - 01:48 LT, e no quadro (b) a mesma sequência linearizada. As imagens da Figura 29(a-b) são evidências de que nesta noite as bolhas de plasma geradas no equador se estenderam até a latitude de PAL.

No painel (c) da Figura 29, tem-se o gráfico da variação da intensidade da luminescência. O perfil da curva descreve a variação do valor do pixel central da sequência das imagens obtidas pelo imageador. As imagens com nuvens não foram inseridas na sequência para melhor acurácia dos resultados. A linha em azul foi obtida a partir das imagens originais, a linha em preto das imagens linearizadas e, por fim, a linha em vermelho das imagens linearizadas e com um filtro aplicado (Gaussiano). Os picos e vales mostram a passagem da estrutura de depleção de plasma sobre a estação de PAL entre 00:00 - 02:00 LT.

Nos painéis (d) e (e) da Figura 29 são mostrados, respectivamente, os tipos e intensidades dos espalhamentos observados nos ionogramas e os valores da taxa de variação do TEC (ROT). No painel da Figura 29(d) pode-se observar que na noite de 11-12 de janeiro os espalhamentos foram na sua maioria do tipo RSF-C, o que caracteriza assinaturas típicas de bolhas de plasma. Os primeiros registros de espalhamentos moderados ( $100 \text{ km} < \lambda < 200 \text{ km}$ ) iniciaram às 20:00 LT do dia 11 de janeiro e duraram até aproximadamente 22:45 LT. Entre aproximadamente 23:00 LT e 01:30 LT do dia 12 de janeiro a intensidade dos espalhamentos se enfraqueceu, quando então tornou-se espalhamento em frequência FSF-B desde às 02:00 LT até pouco depois das 04:00 LT. As melhores imagens de luminescência em PAL foram observadas entre 00:00 – 02:00 LT coincidindo com o espalhamentos RSF-C fracos.

Simultaneamente às observações dos espalhamentos na ionossonda de PAL, no painel da Figura 29(e) são mostrados os valores de ROT calculados para os satélites PRN 6, 9, 18 e 29. Os resultados mostram que as flutuações mais intensas entre 3 e 4 TECU/min ocorreram das 20:15 LT até 22:15 LT, coincidindo com os horários dos espalhamentos RSF-C de intensidade moderada no painel (d). As flutuações observadas no ROT revelam que nestes horários estão coexistindo com as bolhas estruturas de irregularidades de menores escalas.

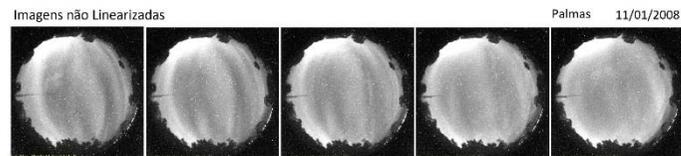
Nestes horários não foi observado simultaneidade com as imagens de luminescência devido a presença de nuvens. Após às 22:15 LT os valores de ROT diminuem até que, aproximadamente às 00:30 LT não foram mais registradas flutuações ROT nos sinais de qualquer satélite do GPS.

Em seguida, nos painéis (f-i) da Figura 29 são mostrados os parâmetros ionosféricos reduzidos dos ionogramas registrados em Palmas, respectivamente  $h'F$ ,  $foF2$ ,  $hpF2$  e  $dh'F/dt$ . Para este evento foram considerados os mesmos dias de referência utilizados para o caso anterior, de 02-03/01/2008, pois ambos pertencem a mesma estação e ocorreram no mesmo mês. O gráfico de  $h'F$  mostra que entre 15:00-18:00 LT a base da camada F esteve abaixo da média dos dias de referência em cerca de  $\sim 45$  km, atingindo um mínimo de 175 km. No entanto, o gráfico de  $hpF2$  nos mostra que nestes mesmos horários a altura do pico da ionosfera teve um comportamento distinto dos dias de referência, apresentando alturas comparativamente maiores de cerca de 135 km. Antes do anoitecer a altura  $hpF2$  chegou a atingir  $\sim 550$  km. Este comportamento sugere que a ionosfera sobre PAL durante o entardecer ficou mais espessa. No entanto, por volta das 18:00 LT observa-se que  $h'F$  subiu bruscamente de  $\sim 190$  km até acima dos 250 km. Esta subida brusca da base da região F pode ter ocorrido como efeito da deriva eletrodinâmica associada ao pico pré-reversão, uma vez que campos elétricos gerados sobre o equador podem ter sido mapeados ao longo das linhas de campo magnético até a latitude de PAL. Logo, esta deriva abrupta de  $h'F$  em PAL pode estar indicando a ocorrência de uma forte deriva da ionosfera sobre o equador, o que possivelmente contribui para desestabilizar a base da região F criando condições favoráveis para o crescimento do mecanismo de instabilidade R-T. Após as 18:00 LT a altura  $h'F$  continuou a aumentar até atingir uma altura de  $\sim 290$  km, enquanto que o pico da camada F2 caiu para  $\sim 400$  km. Embora a camada F tenha ficado menos espessa a sua base tornou-se mais elevada durante os primeiros horários da noite, o que, portanto, pode ter favorecido o processo de evolução das bolhas até a região de PAL. Associada a esta subida da base da camada é possível que na ionosfera local sobre PAL mecanismos secundários de instabilidade podem ter atuado para gerar as irregularidades de menores escalas, que por exemplo causam as flutuações ROT observadas pelo GPS. O gráfico de  $foF2$  mostra que a frequência da ionosfera se comportou de forma análoga ao observado nos dias de referência, o que revela que a densidade eletrônica no pico da camada F2 não diferiu. O gráfico de  $dh'F/dt$  não mostra claramente uma assinatura da deriva da camada durante os horários do pico pré-reversão. Isso se deve em parte ao fato de que, como PAL está localizado numa latitude mais afastada do equador magnético (latitude dip  $7,7^\circ$ ), o movimento de deriva da região F está sob o efeito

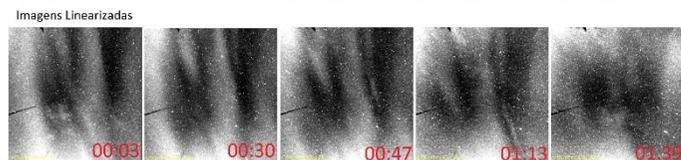
dos ventos neutros termosféricos, da difusão do plasma e da deriva aparente associada à recombinação. Se há ventos termosféricos atuando sobre a deriva vertical da ionosfera, os resultados de  $h_p F_2$  por volta do entardecer sugerem que ventos neutros meridionais estão soprando do equador em direção a PAL, deslocando o plasma ao longo das linhas de campo magnético para alturas menores. Nos horários de ocorrência do pico pré-reversão (18:30 – 19:30 LT) os valores médios de deriva foram da ordem de  $\sim 7,5$  m/s para o dia 11 de novembro e 18 m/s para a média dos dias de referência.

Finalmente no gráfico da Figura 29(j) são mostrados os valores médios do TEC vertical (VTEC). Os resultados mostram que, assim como na noite 02-03 do caso anterior, ao longo da noite de 11-12 de janeiro os valores de VTEC atingiram níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência. O aspecto mais marcante, assim como no evento anterior, está relacionado com os valores de VTEC maiores do que os dos dias de referência. Por exemplo, neste evento durante o período diurno foram registrados valores de VTEC que variaram entre 30-70 TECU. Um pico secundário no VTEC foi observado na noite de 11-12 de janeiro com valores médios da ordem de 30 TECU por volta das 00:00 LT. Este pico secundário pode estar associado a ressurgência/retração da crista da anomalia.

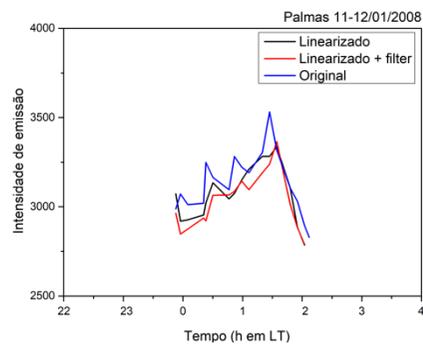
Figura 29 - Observação em Palmas do evento de 11-12 de janeiro de 2008: Os painéis (a-b) e (d-j) são assim como na Fig. 28, O painel (c) denota a variação da intensidade de luminescência atmosférica do OI 6300



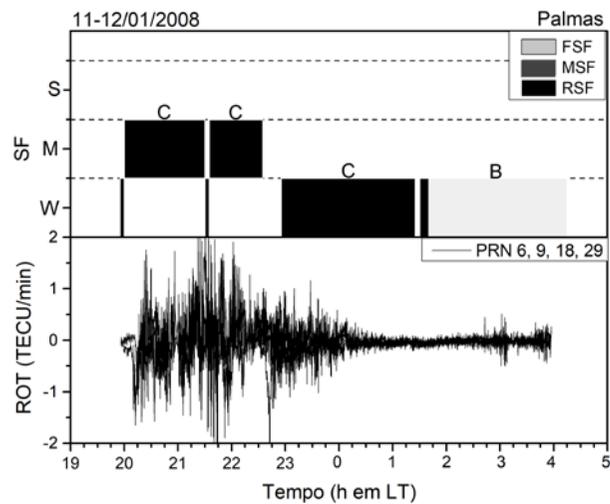
(a)



(b)

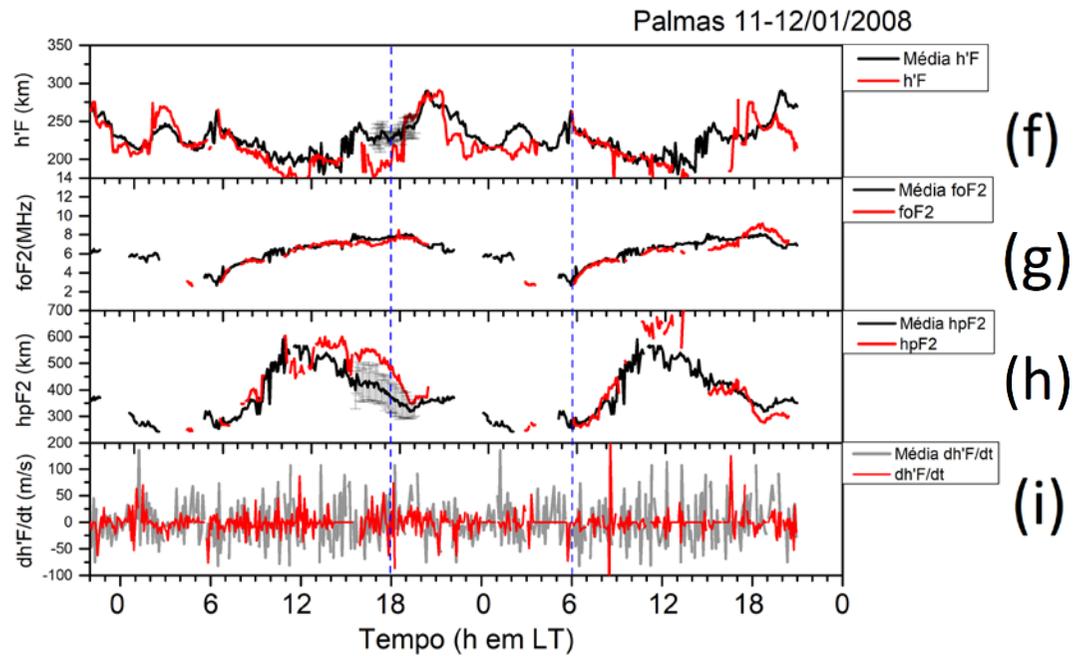


(c)



(d)

(e)

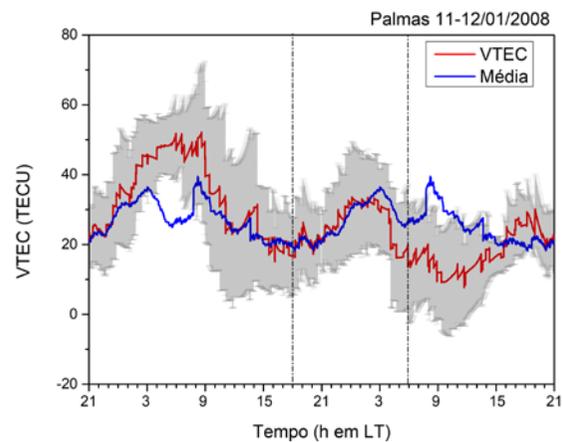


(f)

(g)

(h)

(i)



(j)

### 7.3 EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 31/10/2008 - 01/11/2008

O próximo caso listado na Tabela 8 ocorreu na noite entre os meses de outubro e novembro de 2008. Assim como nas seções anteriores, na Figura 30 são apresentados os gráficos gerados a partir dos dados obtidos na noite do evento. Assim, no quadro (a) observamos uma sequência (00:00 – 00:56 LT) formada das melhores imagens registradas de 22:53 - 01:48 LT da linha de emissão do OI 630 nm, e no quadro (b) a mesma sequência linearizada. O gráfico de variação da luminescência pelo tempo, gerado pela captura do pixel central da sequência de imagens, não foi adicionado na Figura 30, pois as imagens deste dia foram salvas com um aspecto granuloso, o que impossibilitou a leitura adequada dos dados.

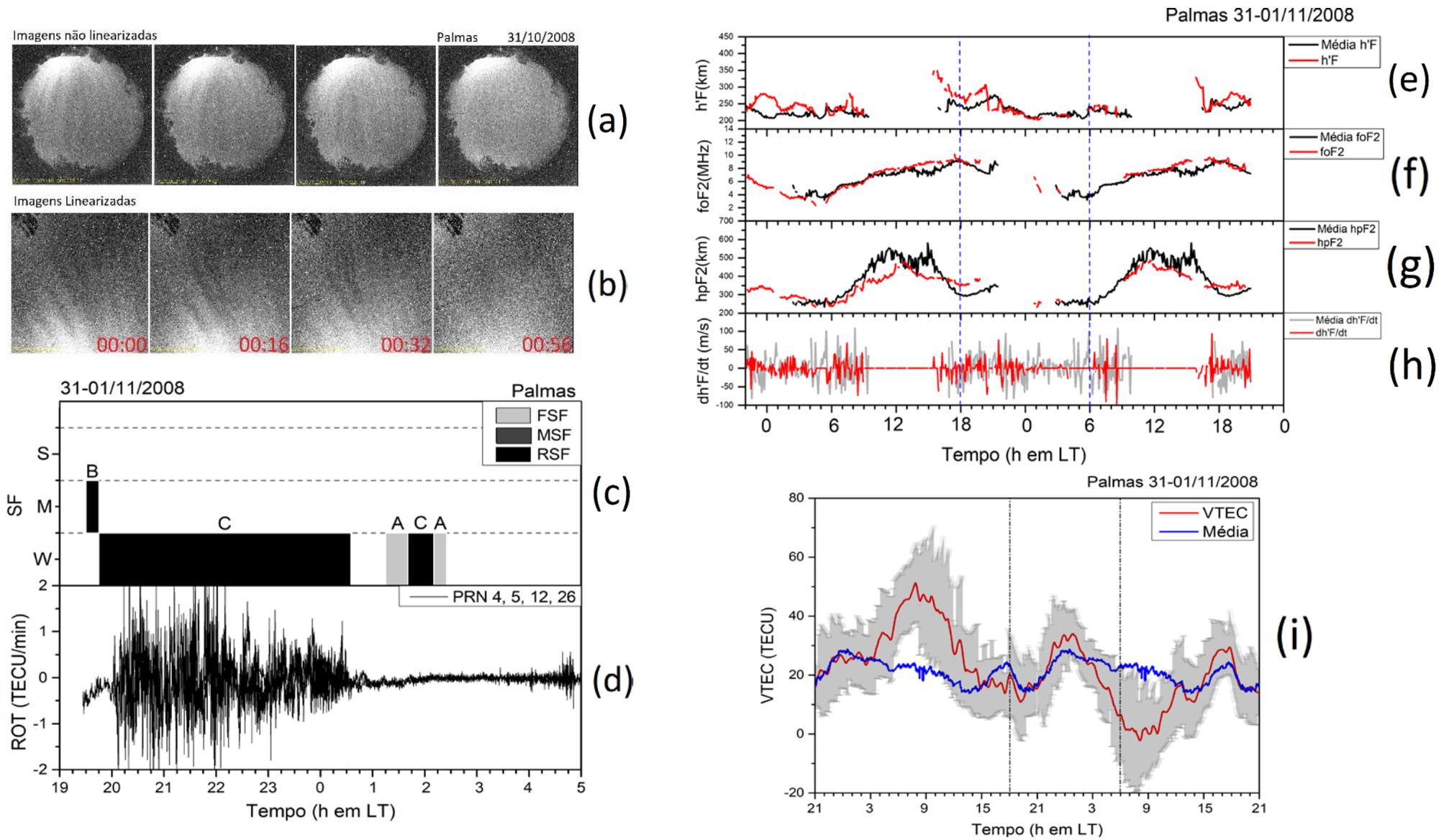
Nos painéis (c) e (d) da Figura 30 são mostrados, respectivamente, os tipos e intensidades dos espalhamentos observados nos ionogramas e os valores da taxa de variação do ROT. No painel (c) pode-se observar que os espalhamentos foram na sua maioria do tipo RSF-C fracos, o que caracteriza assinaturas típicas de bolhas de plasma. Os primeiros registros de um RSF-B iniciaram com intensidade moderada às 19:30 do dia 31 de outubro e tiveram curta duração. Em seguida, os espalhamentos mudaram para o tipo C e apresentaram intensidades fracas desde às 19:45 até ~00:45 LT do dia 01 de novembro. Depois da 01:00 LT os espalhamentos em frequência apareceram antes e depois do último espalhamento em altura, que ocorreu por volta das 02:00 LT. Os valores de ROT calculados para os satélites PRN 4, 5, 12 e 26 no painel (d), revelam uma forte flutuação de ~2 TECU/min das 20:00 às 22:15 LT, enfraquecendo em seguida para ~1 TECU/min até por volta das 00:30 LT. Nota-se claramente do gráfico que as flutuações no ROT ocorreram simultaneamente aos espalhamentos RSF-C, e também coincidiram na maior parte com os horários de observação de bolhas pelo imageador.

Em seguida, nos painéis (e-h) da Figura 30 são mostrados os parâmetros ionosféricos reduzidos dos ionogramas registrados em Palmas. Os dias de referência foram 02, 04, 15, 29 de novembro e 22 de dezembro. No painel da Figura 30(e) observa-se que entre ~15:00 e 18:00 LT, a altura da base da camada F do dia 31 de outubro apresenta valores superiores a média dos dias de referência. Aproximadamente às 16:00 LT a diferença de altura chega a níveis de até ~110 km, enquanto que próximo das 18:00 LT esta diferença caiu para ~30 km enquanto a base da camada F estava acima de 270 km. Observa-se do gráfico (e) uma variação de até 50 km na altura  $h'F$  nas primeiras horas da noite sobre Palmas, o que pode ter favorecido a formação de irregularidades menores, uma vez que a geração de estruturas de plasma pode estar relacionada com variações na altura da camada (RAY; RAUL; DASGUPTA, 2006). O painel (f) que apresenta a variação temporal da frequência crítica

(foF2), mostra que os valores do caso estudado não diferem dos valores médios de comparação. Já no painel (g), a variação da altura do pico da camada F2 (hpF2) entre 13:00 e 16:00 LT apresenta uma queda em relação aos valores dos dias de referência, porém às 18:00 LT encontrava-se em 350 km, acima dos valores observados para os dias de referência. No painel (h) é mostrado a derivada  $dh'F/dt$ , a média da deriva entre 18:30 – 19:30 LT foi de 9,00 m/s para o caso e de 18 m/s para a média dos dias de referência.

Finalmente no gráfico da Figura 30(j) os valores médios do TEC vertical (VTEC) mostram que na noite de 31 de outubro a 01 de novembro os valores de VTEC atingiram níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência. Importante ressaltar que neste evento, assim como os anteriores, os valores de conteúdo eletrônico foram elevados durante o dia se comparados aos dias de referência. Por exemplo, um máximo de ~70 TECU foi registrado por volta das 09:00 LT sobre PAL. Durante a noite os máximos valores de VTEC variaram entre 27-44 TECU durante os horários de recorrência da anomalia, o que pode ter contribuído para a manutenção das irregularidades menores que causam as flutuações ROT observadas nos sinais do GPS. Note que apesar dos valores médios de VTEC durante a noite terem sido equivalentes aos observados no caso do evento anterior (11-12 de janeiro de 2008), o pico secundário ocorreu mais cedo entre 22:00-22:30 LT, contribuindo para flutuações mais fortes do TEC (~2 TECU/min).

Figura 30 - Observações em Palmas do evento de 31 de outubro – 01 de novembro de 2008 de janeiro de 2008. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 28.



#### 7.4 EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 02-03/11/2008

Nos gráficos da Figura 31 são apresentados os dados gerados para o caso da noite do dia 02 para o dia 03 de novembro de 2008. O primeiro instrumento empregado para investigação de irregularidades ionosféricas foi o imageador, cujas melhores imagens com depleção do caso estão sequenciadas no quadro (a), e no quadro (b) a mesma sequência linearizada. As imagens selecionadas ocorreram entre 23:42 – 00:26 LT. O gráfico de variação da luminescência pelo tempo não foi adicionado na Figura 31 pelos mesmos motivos do caso anterior.

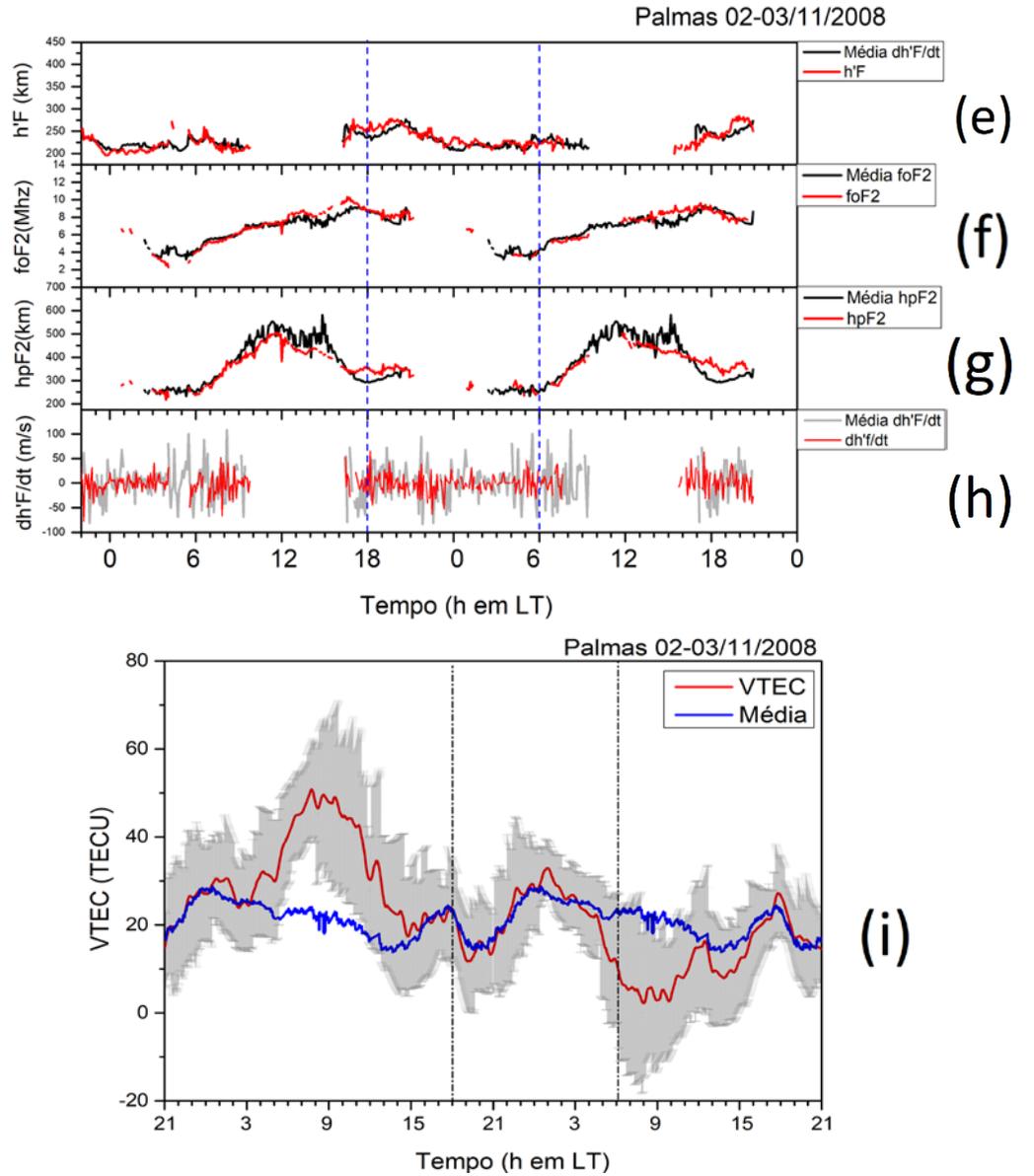
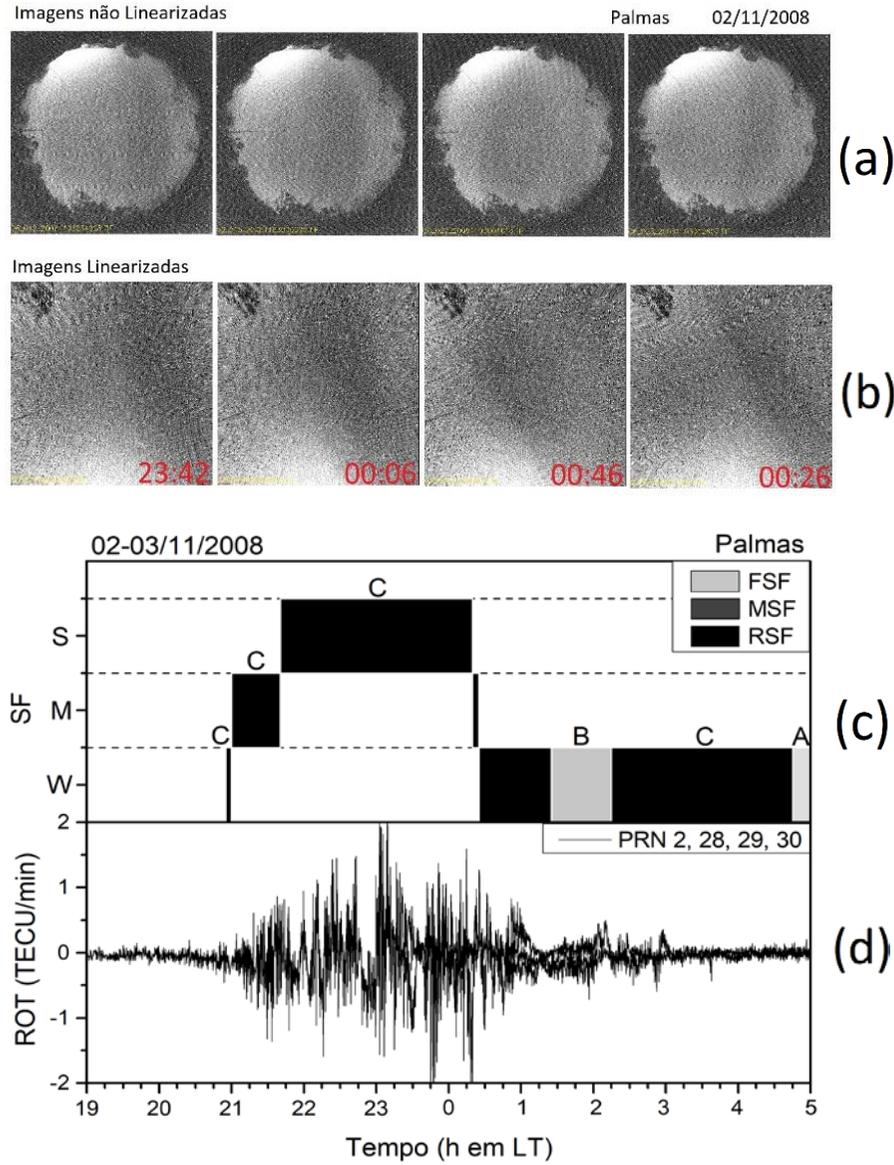
Nos painéis (c) e (d) da Figura 31 são mostrados os tipos e intensidades dos espalhamentos observados nos ionogramas e os valores da taxa de variação do TEC (ROT). No painel (c) pode-se observar que na noite de 02-03 de novembro os espalhamentos foram na sua maioria do tipo RSF-C. Os primeiros registros iniciaram com intensidade fraca às 21:00 LT, e aumentou sua intensidade após 21:30 LT chegando a espalhamentos em altura de até 300 km. Nestes horários o gráfico revela que estruturas de larga escala estão ocorrendo simultaneamente com as bolhas registradas pelo imageador. Apenas depois das 00:15 LT os espalhamentos decaem para intensidades fracas. Por um período o espalhamento em altura dá lugar a espalhamento em frequência (FSF-B), mas volta ao tipo anterior e permanece até perto do amanhecer. Simultaneamente às observações dos espalhamentos na ionossonda de PAL, no painel (d) da Figura 31 são apresentados os valores de ROT calculados para os satélites PRN 2, 28, 29 e 30. Os resultados mostram que as flutuações mais intensas ocorreram entre 21:00 e 01:00 LT, coincidindo com os horários dos espalhamentos RSF-C de intensidades moderada-forte no painel (c). O gráfico da Fig. 29(c) mostra que as bolhas permaneceram até pouco antes do amanhecer, mas as irregularidades menores que causaram as flutuações no ROT cessaram aparentemente antes de 01:00 LT.

Em seguida, nos painéis (e-h) da Figura 31 são mostrados os parâmetros ionosféricos reduzidos dos ionogramas registrados em PAL. No painel (e) pode-se observar que a altura virtual da base da camada F do dia estudado, entre 17:00 e 20:00 LT permaneceu bem próximo dos valores para os dias de referência, sendo que a diferença de altura ~18:00 LT chegou a ser mais elevado em ~40 km. No painel (f) a variação temporal da frequência crítica (em MHz) da camada F2 (foF2) ao longo dos dias 02-03 de novembro também não diferiu significativamente dos dias de referência. Assim como observado para os parâmetros anteriores, o comportamento do pico da camada F2 (hpF2) descrito no painel (g) também não diferiu significativamente daquele observado para os dias de referência. O gráfico mostra que

no entardecer o pico da camada F2 sofreu uma deriva para baixo (queda na altura) similar ao comportamento dos dias de referência. Neste evento foram considerados os mesmos dias de referência utilizados para o caso anterior.

Finalmente, no gráfico da Figura 31 (i) são mostrados os valores médios do TEC vertical (VTEC). Os resultados mostram que na noite 02-03 de novembro em Palmas, os valores de VTEC atingiram níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência.

Figura 31 - Observações em Palmas do evento de 02-03 de novembro 2008. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 28.



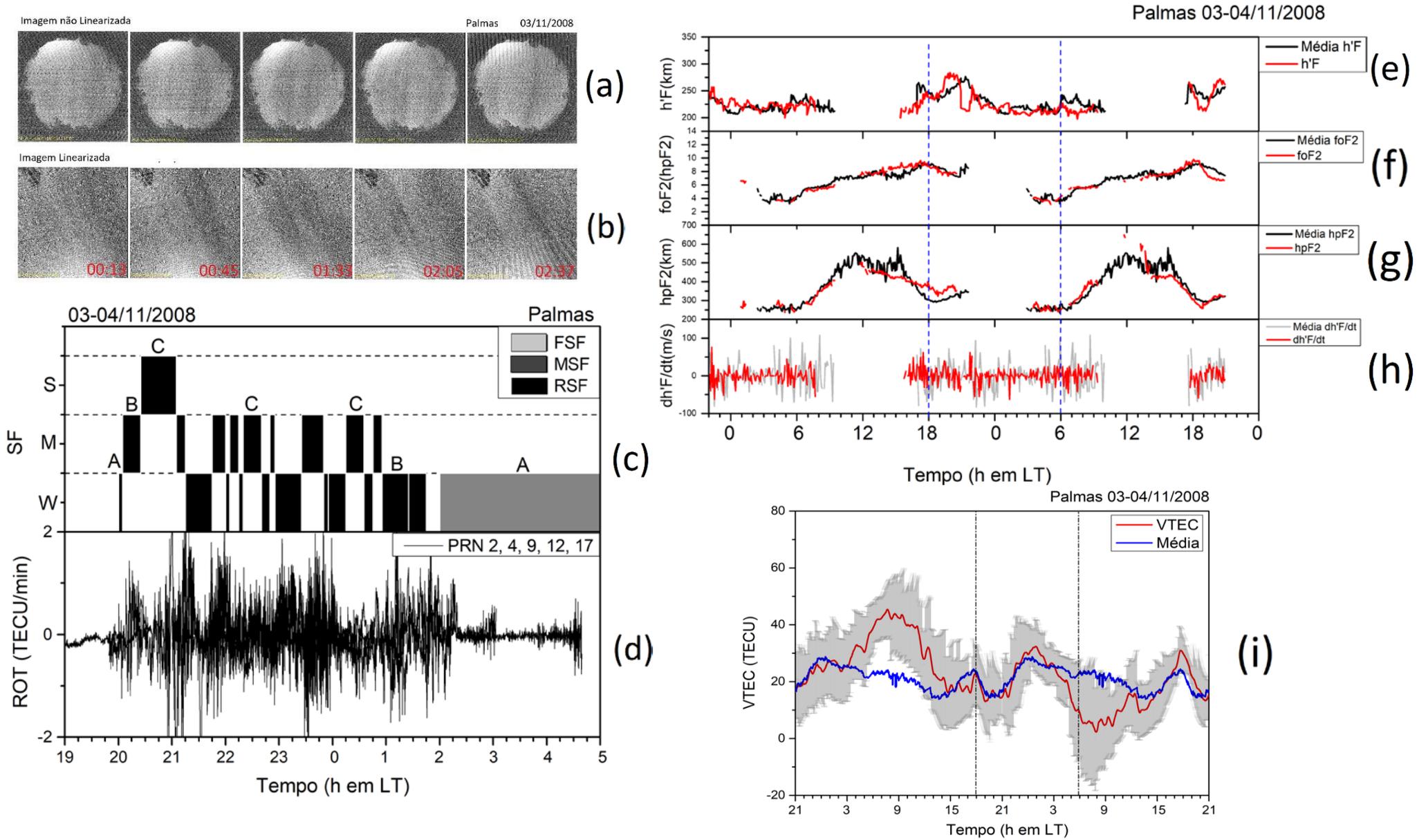
## 7.5 EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 03-04/11/2008

Nos gráficos da Figura 32 são apresentados os dados gerados para o caso da noite do dia 03 para o dia 04 de novembro de 2008. De acordo com a Tabela 8 foram notadas assinaturas de depleção no plasma nas imagens obtidas entre 23:02 – 03:49 LT. As melhores imagens foram captadas entre 00:13 – 02:37 LT e estão sequenciadas nos painéis (a) e (b) da Figura 32. Como no caso anterior, o gráfico de variação da luminescência pelo tempo não pode ser adicionado.

Nos painéis (c) e (d) da Figura 32 são mostrados os tipos e intensidades dos espalhamentos observados nos ionogramas e os valores da taxa de variação do TEC (ROT). No painel (c) pode-se observar que entre 20:00 e 01:45 LT houveram espalhamentos em altura RSF do tipo A, B e C, e de diversas intensidades entre fraco e forte ( $100 \text{ km} > \lambda > 300 \text{ km}$ ). Depois, das 02:00 LT em diante observou-se espalhamento misto MSF-A até o amanhecer. Simultaneamente às observações dos espalhamentos, no painel (d) são apresentados os valores de ROT calculados para os satélites PRN 2, 4, 9, 12, 17. Os resultados mostram que as flutuações mais intensas ocorreram entre 20:00 - 00:00 e 01:00 - 02:15 LT, coincidindo com os horários dos espalhamentos RSF no painel (c). Em seguida, nos painéis (e-h) da Figura 32 são mostrados os parâmetros ionosféricos reduzidos dos ionogramas registrados em Palmas. No painel (e) observa-se que, próximo às 18:00 LT, o  $h'F$  da noite estudada e da média dos dias de referência não se diferiram significativamente. Entretanto, a partir das 18:30 do dia 03 de novembro, houve uma elevação brusca da altura da base da camada F de cerca de  $\sim 50 \text{ km}$  no intervalo de  $\sim 1,5$  horas. Já para os valores médios dos dias de referência, a partir de  $\sim 19:00$  demorou-se  $\sim 2,6$  horas para se elevar  $\sim 42 \text{ km}$ . Isto é, a deriva vertical da camada F sobre PAL no dia estudado teve a velocidade de  $\sim 33 \text{ m/s}$ , duas vezes mais rápida que a deriva dos dias de referência do mês de novembro, que foi de  $\sim 16 \text{ m/s}$ . Esta deriva brusca, mesmo que ocorrida sobre PAL e após o horário do pico pré-reversão, implica em uma contribuição positiva para o desenvolvimento de estruturas de irregularidades. Os gráficos dos painéis (f) e (g) mostram um comportamento semelhante aos gráficos de foF2 e hpF2 do caso anterior. Neste evento foram considerados os mesmos dias de referência utilizados para o caso anterior. Finalmente, no gráfico da Figura 32(i) são mostrados os valores médios do TEC vertical (VTEC). Os resultados mostram que na noite 03-04 de novembro em Palmas, os valores de VTEC atingiram níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência. O comportamento do gráfico de

VTEC foi muito semelhante ao caso anterior, com um pico secundário por volta de 01:00 do dia 04 com um valor de ~30 TECU.

Figura 32- Observações em Palmas do evento de 03-04 de novembro de 2008. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 28.



## 7.6 EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 03-04/12/2008

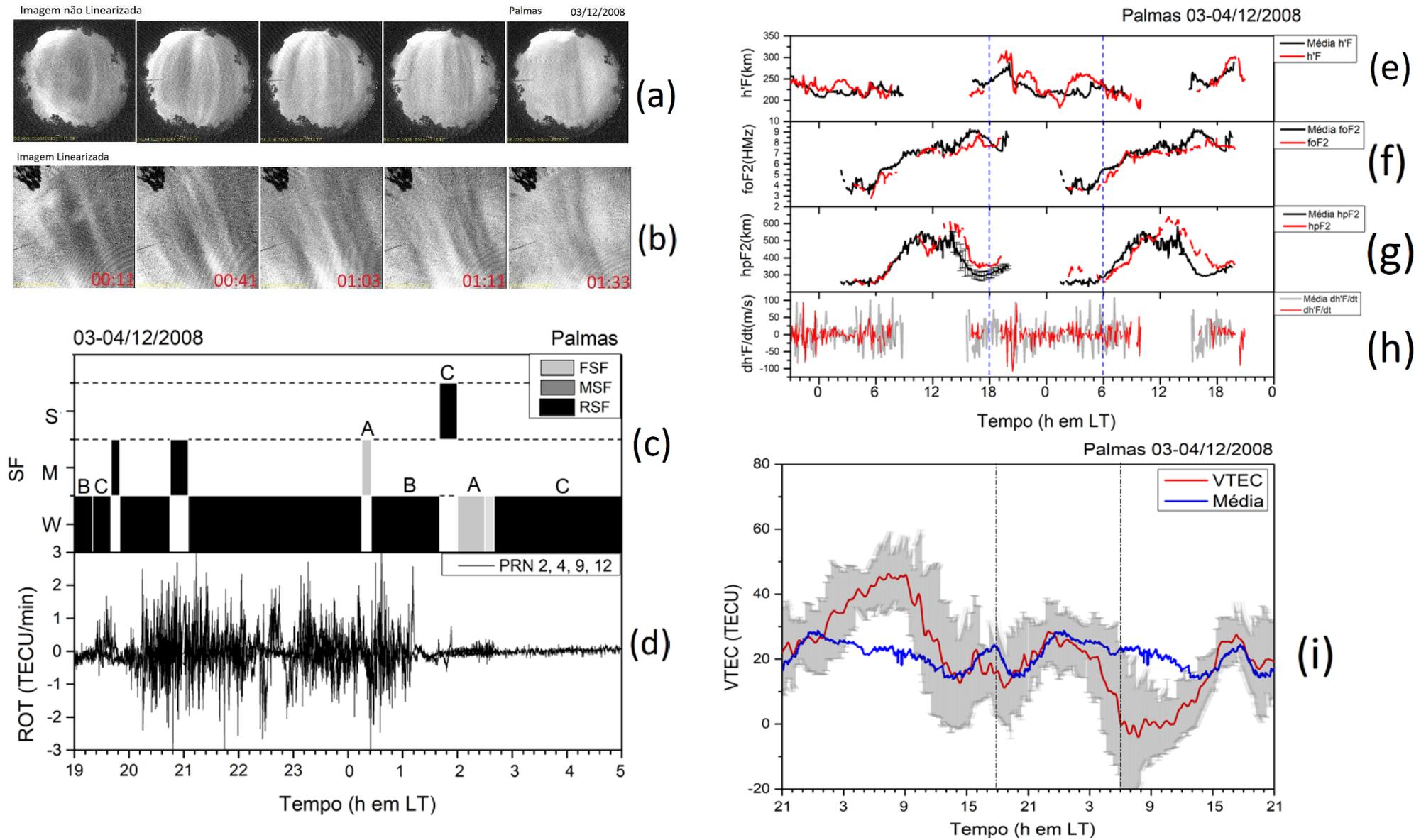
Nos gráficos da Figura 33 são apresentados os dados gerados para o caso da noite do dia 03 para o dia 04 de dezembro de 2008. De acordo com a Tabela 8, observou-se assinaturas de depleção nas imagens geradas pelo imageador entre 23:48 – 02:33 LT. As imagens captadas entre 00:11 – 01:33 com melhor visualização das estruturas estão no painel (a), e linearizadas no painel (b). No painel (c) são mostrados os tipos e intensidades dos espalhamentos observados nos ionogramas e no painel (d) os valores da taxa de variação do TEC (ROT). Pode-se observar no painel (c) que espalhamentos fracos ( $\lambda < 100$  km) do tipo RSF-C predominaram durante toda a noite. Espalhamentos deste mesmo tipo com intensidade moderada ( $200 > \lambda > 100$  km) foram observados entre 19:30 – 19:45 LT e 20:45 – 21:00 LT, e de intensidade forte de 01:45 – 02:00 LT. Houve também espalhamentos RSF do tipo B entre 19:00 – 19:15 e 00:30 – 01:45 LT. As imagens mostram que foram observadas algumas exceções de espalhamentos misto, MSF-A entre 00:15 – 00:30 LT e 02:00 – 02:30 LT que decaiu para FSF das 02:30 – 02:45 LT. Os valores simultâneos de ROT calculados para os satélites PRN 2, 4, 9, 12 são expostos no painel (d), chegando a  $\sim 2,5$  TECU/min entre 20:15 – 01:15 LT. Os resultados mostram que as flutuações mais intensas de até  $\sim 3,0$  TECU/min ocorreram entre 20:15 e 01:15 LT, coincidindo com os horários dos espalhamentos no painel (c).

Em seguida, nos painéis (e-h) da Figura 33 são mostrados os parâmetros ionosféricos reduzidos dos ionogramas registrados em Palmas. Foram considerados os mesmos dias de referência usados para o caso anterior. No painel (e) é mostrado o gráfico da variação temporal da altura virtual da base da camada F ( $h'F$ ), e podemos observar que no período do entardecer sobre Palmas, entre 17:00 – 19:00 LT os valores do dia 03 de dezembro descrevem um pico, que varia  $\sim 93$  km em um intervalo de tempo de  $\sim 2,4$  horas. Já os valores médios de  $h'F$  calculados para os dias de referência varia  $\sim 45$  km em 2,7 horas. Isso implica que a ionosfera derivou verticalmente a uma velocidade de  $\sim 40$  m/s no dia estudado, enquanto que nos dias de referência a deriva média foi de  $\sim 20$  m/s. Como descrito no caso anterior, sugere-se que esta deriva abrupta pode ter influenciado na propagação das estruturas de rarefação no plasma. O painel (f) apresenta o mesmo padrão da variação temporal da frequência crítica (em MHz) da camada F2 ( $foF2$ ) observado no caso anterior. Já a variação da altura do pico da camada F2 ( $hpF2$ ) no painel (g) mostra um comportamento diferente, pois se manteve mais elevada que a média da altura dos dias de referência. Essa diferença atingiu  $\sim 160$  km por volta das 15:00 e  $\sim 70$  km às 19:00 LT. Isto implica que o pico da camada F no dia 03 de dezembro

esteve elevado, o que pode ter favorecido a evolução das irregularidades mesmo em um período de mínimo solar. Comportamento semelhante foi observado no caso do dia 11 de janeiro de 2008 sobre PAL. Finalmente, no painel (h) a média da derivada  $dh'F/dt$  entre 18:00 – 19:00 LT foi de  $\sim 3,4$  m/s no dia do caso estudado e de  $\sim 10,13$  m/s para a média dos dias de referência.

Finalmente, o gráfico da Figura 33 (i) mostra os valores médios do TEC vertical (VTEC) da noite 03-04 de dezembro em Palmas. Os resultados mostram um comportamento semelhante aos casos anteriores, visto que durante a noite os valores atingiram níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência. O gráfico mostra que o TEC também exibe um pico durante o período diurno de  $\sim 45$  TECU às 08:00 LT e um pico secundário de  $\sim 22,5$  TECU às 16:00 LT. Durante a noite, a média dos valores de VTEC dos satélites visíveis volta a crescer, chegando a  $\sim 27$  TECU às 23:00 LT.

Figura 33 - Observações em Palmas do evento de 03-04 de dezembro de 2008. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 28.



### 7.7 Evento em Palmas da noite do dia 05-06/12/2008

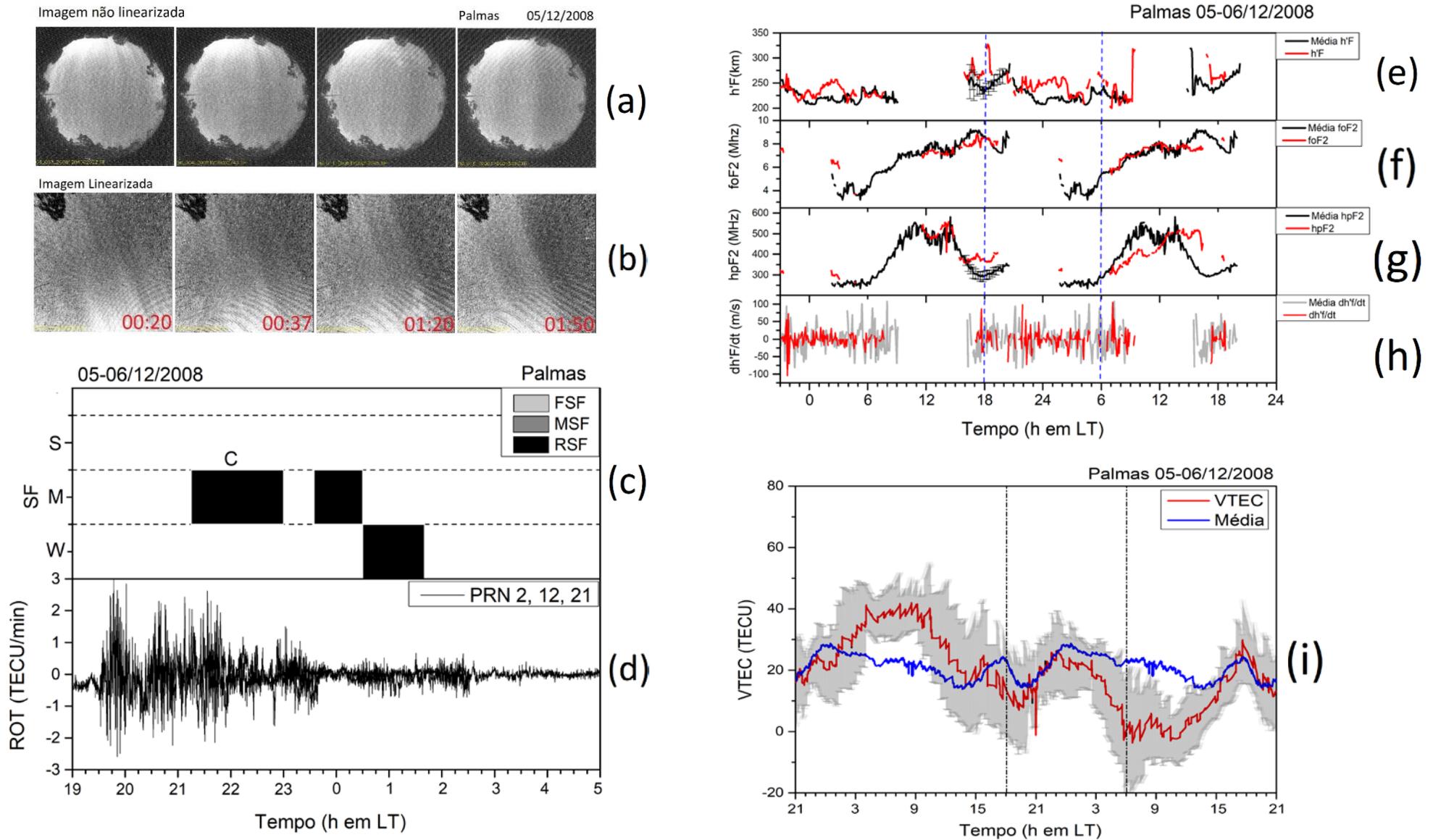
Nos gráficos da Figura 34 são apresentados os dados gerados para o caso da noite do dia 04 para o dia 05 de dezembro de 2008. Observou-se depleção nos dados do imageador entre 00:05 - 02:06 LT. Nos painéis (a) e (b) estão sequenciadas as melhores imagens com depleção do caso achadas entre 00:20 – 01:50 LT. Antes da meia noite não foi possível observar a assinatura de irregularidades pois não houve coleta de dados. Nos painéis (c) e (d) da Figura 34 são mostrados os tipos e intensidades dos espalhamentos observados nos ionogramas e os valores da taxa de variação do TEC (ROT). No painel (c) espalhamentos do tipo RSF-C de intensidade moderada foram observados entre 21:15 – 23:00 e 23:45 – 00:30 e com intensidade fraca das 00:30 – 01:45 LT. No painel (d) onde são apresentados os valores de ROT calculados para os satélites PRN 2, 12 e 21, observa-se a ocorrência de flutuações mais intensas na ordem de  $\sim 2,5$  TECU/min entre 19:30 – 22:00 e flutuações menores na ordem de  $\sim 1,2$  TECU/min entre 22:00 – 23:45 LT. Os gráficos de (a-d) mostram que entre 19:30 – 21:15 LT as flutuações no ROT não coincidiram com a assinatura de bolhas dos ionogramas. Isso ocorreu, pois, os sinais dos satélites usados para calcular o ROT estavam perfurando a ionosfera a norte ou a leste da estação. Portanto, os resultados sugerem que os sinais dos satélites cruzaram as bolhas de plasma quando estas tinham evoluído até latitudes mais ao norte de PAL. Somente após as 21:15 LT foi possível observar estruturas de irregularidades com diferentes tamanhos de escala. As imagens de luminescência para a noite de 05-06 de dezembro mostradas nos painéis (a) e (b) possivelmente estão associadas a estruturas que derivaram zonalmente até a região de PAL.

Em seguida, nos painéis (e-h) da Figura 34 são mostrados os parâmetros ionosféricos reduzidos dos ionogramas registrados em PAL. Foram considerados os mesmos dias de referência utilizados para o caso anterior. No painel (e) onde é mostrado o gráfico da variação temporal da altura virtual da base da camada F ( $h'F$ ), observa-se que no dia 05 que um pouco antes das 18:00 LT a altura estava  $\sim 30$  km mais alta que a média dos dias de referência. No entanto, uma subida brusca da camada é observada após às 18:00 LT, onde  $h'F$  elevou-se até  $\sim 326$  km de altura. Essa subida brusca da camada é uma assinatura típica dos efeitos de campo elétrico de dínamo durante os horários do pico pré-reversão. Estes campos elétricos mapeados até a latitude de PAL possivelmente atuaram para esta subida da região F, favorecidos pela condição sazonal visto que este evento ocorreu próximo ao solstício de dezembro. O painel (f) mostra que a variação temporal da frequência crítica apresentou um comportamento semelhante ao caso anterior, cujos valores foram equivalentes aos observados

nos dias de referência, principalmente próximo ao entardecer. A variação da altura do pico da camada F2 (hpF2) no painel (g) mostra que às 18:00 LT os valores estavam ~80 km mais alto que os valores de referência. A altura do pico chegou a atingir ~400 km às 17:15 LT e, por volta do horário em que houve a subida brusca da base, hpF2 estava em ~375 km. Nota-se que a ionosfera estava mais alta nesta noite, o que favorece a evolução e longevidade das irregularidades e a ação de mecanismos de instabilidade secundários que favorecem o surgimento de estruturas de menores escalas. Ainda que não esteja nítido no gráfico de  $dh'F/dt$  (painel h), no horário de subida brusca da base da camada a deriva vertical foi de ~43 m/s.

Finalmente, no gráfico da Figura 34 (i) são mostrados os valores médios do TEC vertical (VTEC). Os resultados mostram que entre 10:00 LT do dia 05 e 06:00 LT do dia 06 de dezembro, os valores de VTEC atingiram níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência. Durante o período matutino do dia 05, um pico de densidade eletrônica atingiu ~39 TECU às 07:00 LT. Observou-se nesta noite um comportamento semelhante a maioria dos casos ocorridos em PAL.

Figura 34 - Observações em Palmas no dia de 05-06 de dezembro de 2008. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 28.



## 7.8 EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 17-18/11/2009

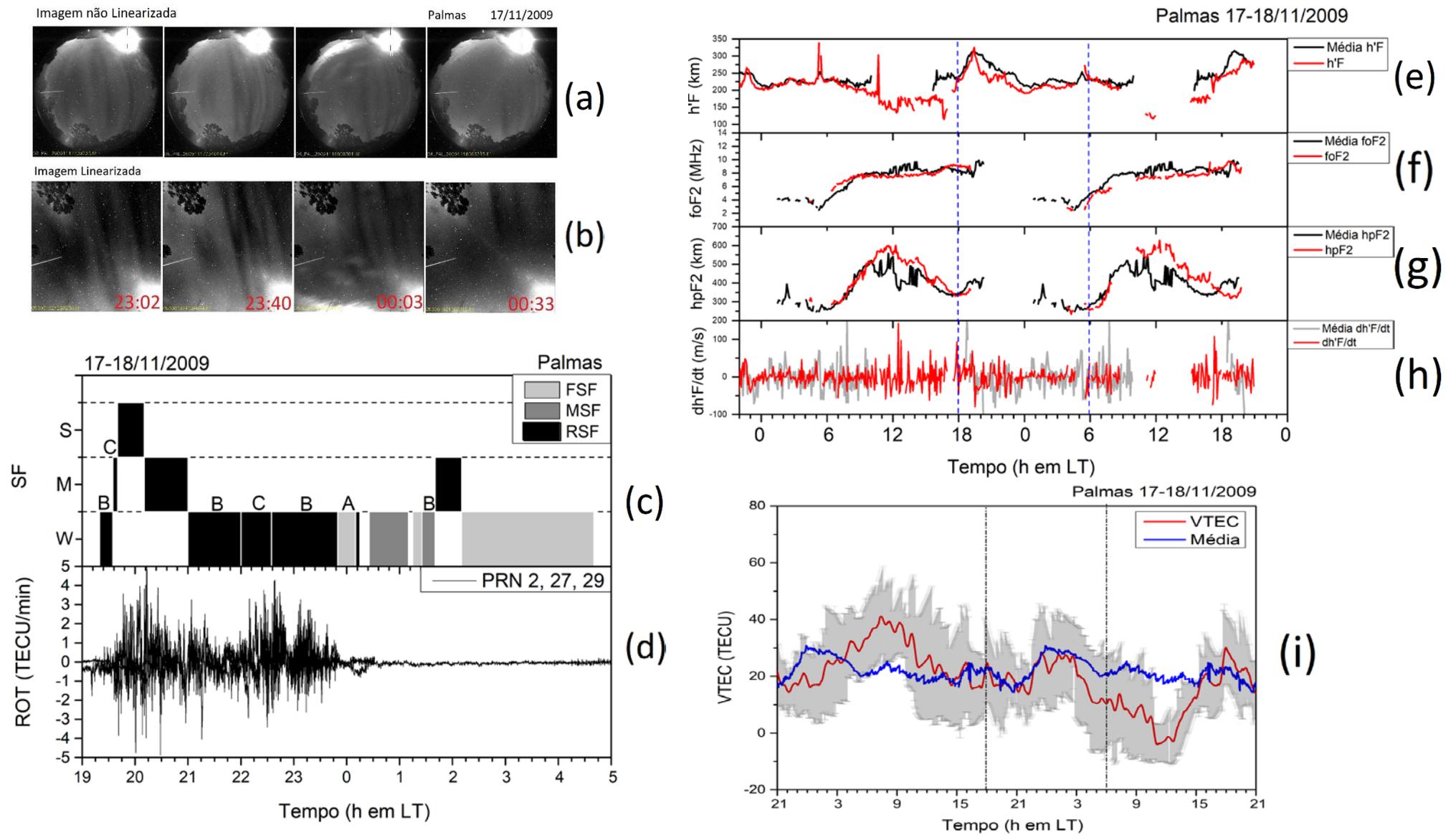
Nos gráficos da Figura 35 são apresentados os dados gerados para o caso da noite do dia 17 para o dia 18 de novembro de 2009. Nos painéis (a) e (b) estão sequenciadas as melhores imagens com assinatura de depleção no plasma obtidas entre 23:02 – 00:33 LT. Nesta noite não houve imagens registradas pelo imageador antes das 23:00 LT. As estruturas de irregularidades, de acordo com a Tabela 8, puderam ser observadas até às 00:59 LT. Nos painéis (c) e (d) da Figura 35 são mostrados os tipos e intensidades dos espalhamentos observados nos ionogramas e os valores da taxa de variação do TEC (ROT). No painel (c) os primeiros espalhamentos do tipo RSF foram observados às 19:15 LT com intensidade fraca ( $\lambda < 100$  km). Às 19:30 LT os espalhamentos ganharam intensidade moderada e às 19:45 LT intensidade forte, ambas do tipo C. Entre 20:15 - 21:00 LT os espalhamentos (RSF-C) voltam a ser moderados, passando a ser fracos das 21:00 – 23:45 LT e variando entre os tipos RSF-B e RSF-C. Espalhamentos do tipo MSF foram observados entre 00:30 – 01:15 LT e 01:30 – 01:45 LT. Espalhamentos do tipo FSF também foram observados entre 23:45 – 00:05 LT, 01:15 – 01:30 LT e 02:15 – 04:45 LT. O gráfico do painel (d) mostra os valores de ROT que foram calculados para os satélites PRN 2, 27 e 29. Observa-se a ocorrência de flutuações intensas das 19:30 até perto da meia-noite LT, coincidindo com todos os espalhamentos em altura (RSF) observados do painel (c). Os valores máximos de flutuação no ROT chegaram a  $\sim 4$  TECU/min entre 21:15 e 23:30 LT. Os gráficos de (a) a (d) mostram que na noite de 17-18 de novembro de 2009 irregularidades de larga escala e irregularidades quilométricas ocorreram simultaneamente sobre a estação de PAL.

Em seguida, nos painéis (e-h) da Figura 35 são mostrados os parâmetros ionosféricos reduzidos dos ionogramas registrados em PAL. No painel (e) é mostrado que entre 16:30 – 19:30 LT a base da camada F se deslocou verticalmente de  $\sim 117$  km a  $\sim 320$  km de altura. No mesmo período o deslocamento vertical médio nos dias de referência foi de  $\sim 233$  a  $\sim 313$  km. Portanto, os valores observados sugerem que houve sobre o equador uma deriva mais acentuada no dia estudado, o que, possivelmente, contribuiu para a evolução das irregularidades até a latitude de PAL. O gráfico da variação temporal da frequência crítica (em MHz) da camada F2 ( $f_oF2$ ), no painel (f), mostra um comportamento semelhante ao caso anterior. Os valores de frequência não diferiram muito dos dias de referência e estava em  $\sim 9,0$  MHz por volta do anoitecer. A variação da altura do pico da camada F2 ( $h_pF2$ ) para o dia estudado, como mostra o painel (g), esteve mais elevado em relação aos dias de referência durante a maior parte do dia e se equiparou por volta do anoitecer. Nesta noite, assim como

para os dias de referência, não foi possível reduzir o parâmetro  $f_oF2$  e, conseqüentemente estimar  $h_pF2$ , devido a presença de fortes espalhamentos em frequência. No painel (h), a velocidade de deriva vertical da camada ( $dh'F/dt$ ) foi de cerca de  $\sim 21$  m/s entre 16:30 LT e 19:30 LT, decaindo para  $\sim 15$  m/s entre 18:00 – 19:00 LT. Neste evento foram considerados os dias 16 de novembro, 10 e 22 de dezembro, 17 de janeiro e 14 de fevereiro como os dias de referência.

Finalmente, o gráfico de VTEC no painel (i) mostra comportamentos similares aos observados nos casos anteriores. Os resultados mostram que na noite 17-18 de novembro em PAL, os valores de VTEC atingiram níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência. Assim como nos casos anteriores VTEC apresenta um pico diurno, antes das 08:00 LT, onde o valor médio para todos os satélites atingiu  $\sim 40$  TECU. Não fica nítido neste evento uma intensificação da densidade eletrônica sobre PAL, associada aos efeitos de ressurgência da anomalia equatorial após o entardecer.

Figura 35 - Observações em Palmas do evento de 17-18 de novembro de 2009. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 28.



## 7.9 EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 04-05/02/2010

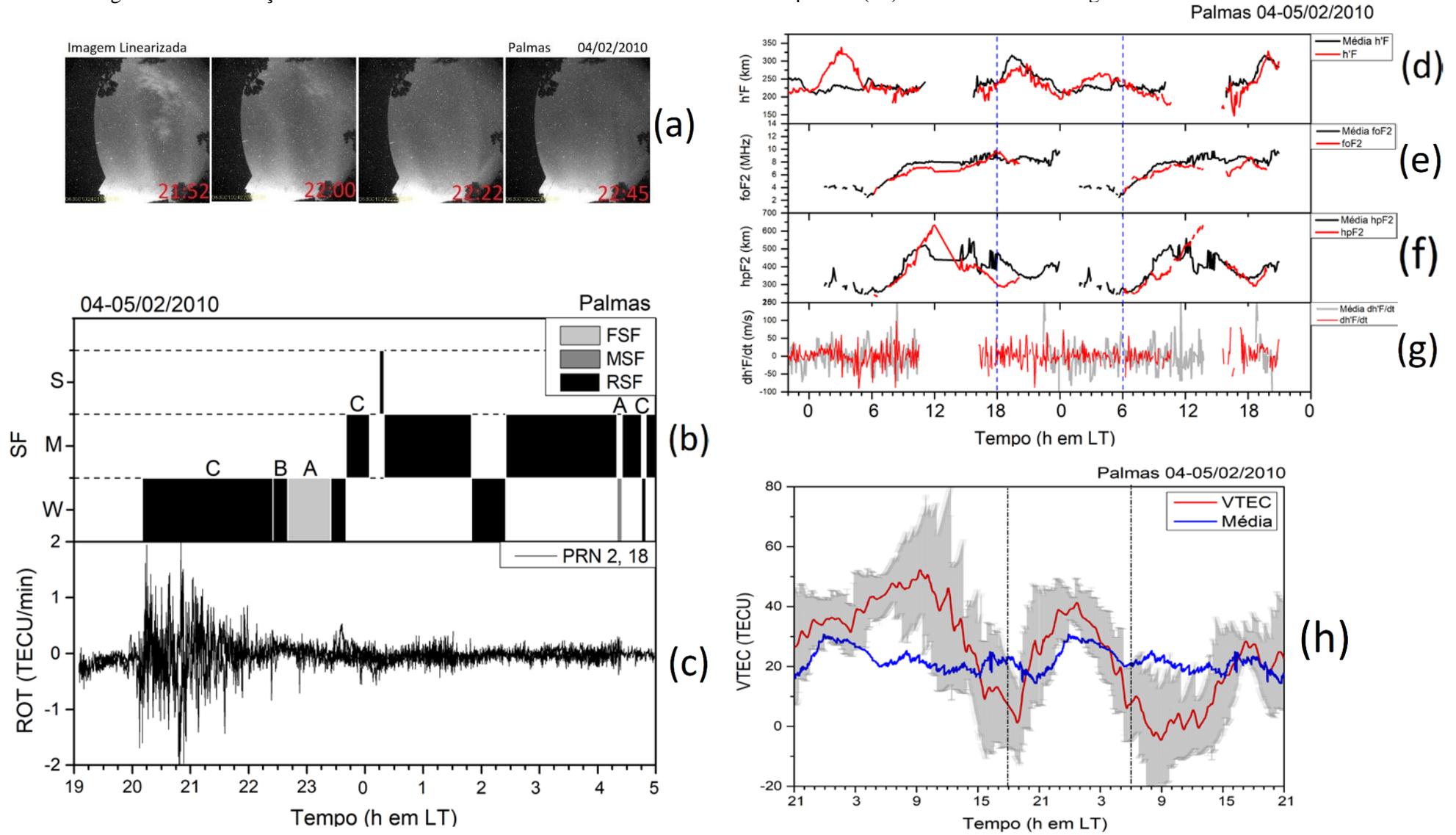
Nos gráficos da Figura 36 são apresentados os dados gerados para o caso da noite do dia 04 para o dia 05 de fevereiro de 2010. No painel (a) estão sequenciadas as imagens com assinatura de depleção entre 21:52 – 22:45 LT. As imagens não linearizadas mostram nuvens, árvores e a comporta do equipamento encobrindo parte das bordas nas imagens, mesmo assim pode-se observar a evolução de estruturas de larga escala sobre PAL. Nos painéis (b) e (c) da Figura 36 são mostrados os tipos e intensidades dos espalhamentos observados nos ionogramas e os valores da taxa de variação do TEC (ROT). À partir das 20:15 LT até 22:45 LT foram observados espalhamentos fracos do tipo RSF-C/B e entre 22:45 – 23:30 LT ocorreram espalhamentos tipo FSF. Das 23:30 às 05:00 LT observou-se predominantemente espalhamentos tipo RSF-C de intensidade moderada. No painel (c) são apresentados os valores de ROT calculados para os satélites PRN 2 e 18. Os resultados mostram que entre 20:00 - 22:00 LT ocorreram flutuações de até  $\sim 2$  TECU/min. Neste evento as flutuações de ROT não foram tão intensas, o que sugere que nas primeiras horas da noite a densidade eletrônica do plasma ambiente onde as bolhas estão imersas não aumentou significativamente. Na literatura tem se observado que um aumento das flutuações de densidade eletrônica ( $\Delta N_e$ ) associadas ao fortalecimento/ressurgimento da anomalia após o entardecer, contribuem para a intensificação das flutuações dos sinais dos satélites quando há irregularidades presentes na ionosfera.

Em seguida, nos painéis (d-g) da Figura 36 são mostrados os parâmetros ionosféricos reduzidos dos ionogramas registrados em Palmas. Para esta análise foram considerados os dias de referência usados no caso anterior. A altura virtual da base da camada F ( $h'F$ ) no painel (e) mostra que os valores reduzidos do dia 04 foram próximos aos valores médios dos dias de referência. Assim como no painel (f), onde a frequência crítica (em MHz) da camada F2 ( $foF2$ ) do dia estudado também alcançou valores próximos aos dias de referência. A variação da altura do pico da camada F2 ( $hpF2$ ) no painel (g) mostra que no dia 04 de janeiro às 18:00 LT os valores estavam cerca de 100 km mais baixo que a média dos dias de referência. Apesar das bolhas de plasma terem sido geradas no equador e evoluído até a latitude de PAL, as baixas alturas do pico da ionosfera observado em  $hpF2$  ajudam a compreender em parte as baixas flutuações no TEC observadas entre 20:00 – 22:00 LT. No painel (g) a derivada  $dh'F/dt$  entre 18:00 – 19:00 LT do dia estudado foi de cerca de  $\sim 7$  m/s.

Finalmente, no gráfico da Figura 36 (h) nota-se que na noite de 04-05 de fevereiro em Palmas os valores de VTEC atingiram níveis que se compararam com os valores dos dias de

referência. Por volta das 09:30 LT do dia 17, os valores médios de VTEC apresentam um pico de ~51,5 TECU (linha vermelha) para todos os satélites.

Figura 36 - Observações em Palmas do evento de 04-05 de fevereiro de 2009. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 28



## 7.10 EVENTO EM PALMAS DA NOITE DO DIA 15-16/07/2010

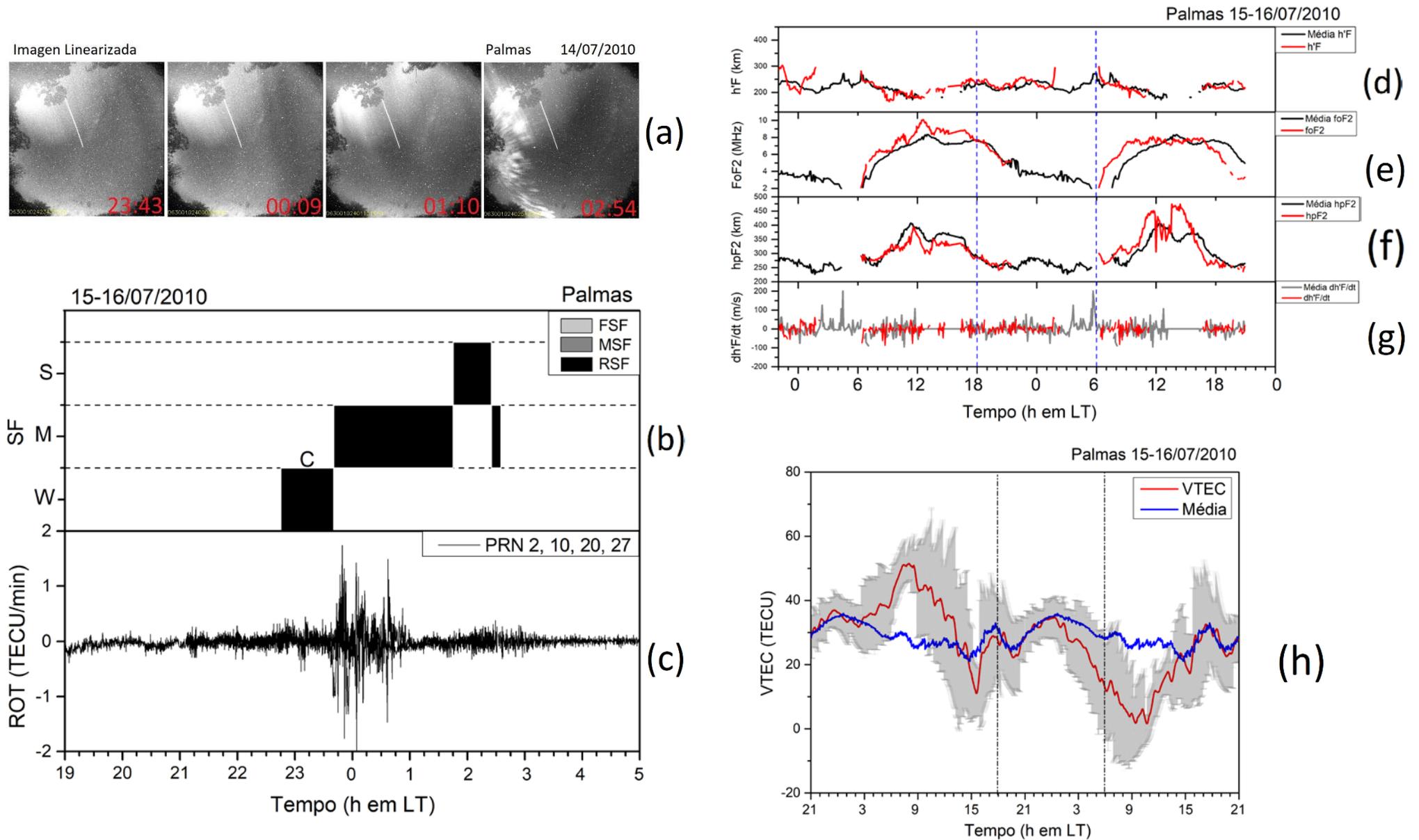
Nos gráficos da Figura 37 são apresentados os dados gerados para o caso da noite do dia 15 para o dia 16 de julho de 2010. Este evento destaca-se por ter ocorrido próximo ao solstício de inverno (junho). No painel (a) estão sequenciadas imagens entre 23:43 – 02:54 LT onde podem ser observadas à leste da estação, canto superior direito, assinaturas de depleção no plasma sobre PAL. Nos painéis (b) e (c) da Figura 37 são mostrados os tipos e intensidades dos espalhamentos observados nos ionogramas e os valores da taxa de variação do TEC (ROT). Pode-se observar no painel (b) espalhamentos do tipo RSF-C a partir das 22:45 LT com intensidade fraca ( $\lambda < 100$  km). Os espalhamentos intensificam-se ( $100 < \lambda < 200$  km) das 23:45 – 01:45 LT e atingem níveis fortes ( $\lambda > 200$  km) das 01:45 – 02:15 LT. Sua intensidade diminui para moderado novamente e cessam às 02:30 LT. No painel (c) são apresentados os valores de ROT calculados para os satélites PRN 2, 10, 20, 27. Os resultados mostram que as flutuações de  $\sim 1,5$  TECU/min ocorreram entre 23:45 e 00:45 LT, coincidindo parcialmente com os horários dos espalhamentos RSF-C no painel (b). Neste caso as assinaturas das bolhas nos dados do imageador e ionossonda foram observadas durante 04 horas, ou seja, por um período bem menor do que nos casos anteriores. Como este evento ocorreu durante um mês de inverno a deriva associada ao pico pré-reversão é comparativamente mais fraca, a densidade eletrônica do plasma é menor e as irregularidades geradas tendem a decair mais rapidamente. De forma semelhante, os valores de ROT tendem a ser menores, visto que  $\Delta N_e$  diminuem durante os meses de inverno (FEJER et al. 1979, FEJER; SCHERLISS; PAULA, 1999).

Em seguida, nos painéis (d-g) da Figura 37 são mostrados os parâmetros ionosféricos reduzidos dos ionogramas registrados em PAL, para os quais foram considerados os dias 07, 13, 20, 26 e 30 de julho de 2010 como dias de referência para gerar os dados de referência. No painel (d) onde é mostrado o gráfico de  $h'F$  pode-se observar que os valores reduzidos se aproximam aos valores médios dos dias de referência. Para os valores de foF2 contidos no painel (e) pode-se observar que até próximo às 18:00 LT os valores reduzidos para o dia estudado estavam um pouco mais altos que os de referência, cerca de  $\sim 1,3$  MHz às 16:45 LT. Depois do anoitecer os valores do caso estudado e da referência seguem em magnitudes semelhantes e vão decaindo rapidamente devido a aceleração dos processos de recombinação. Os valores no painel (f) de altura do pico da camada F2 obtidos para os dias 15-16 de julho se mantiveram cerca de  $\sim 35$  km menores que os valores dos dias de referência até próximo às 17:00 LT, assumindo em seguida valores próximos aos dias de referência. No painel (g) a

derivada  $dh'F/dt$  se mostra com traços de variação menores que nos casos anteriores, como esperado por ser mês de inverno. Os valores observados do painel (g) durante os horários de ocorrência do pico pré-reversão foram de aproximadamente -2,18 m/s para o dia do evento, enquanto que para os dias de referência foi de cerca de -16,4 m/s. Este resultado sugere que nesta noite a deriva no equador foi maior que nos dias de referência, contribuindo assim para a formação de irregularidades.

Finalmente, no gráfico da Figura 37 (h) são mostrados os valores médios do TEC vertical (VTEC). Os resultados mostram que na noite 15-16 de julho em Palmas, os valores de VTEC atingiram níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência. Nota-se claramente do gráfico que na noite deste caso os valores de VTEC (~35 TECU) foram bem menores do que aqueles visualizados nos casos anteriores, em virtude do período sazonal. Neste caso, observa-se também que durante o período diurno os valores de VTEC foram bem maiores do que aqueles encontrados para os dias de referência, atingindo uma diferença na média de no máximo 33 TECU por volta de 08:00 LT.

Figura 37- Observações em Palmas do evento de 15-16 de julho de 2010. Os painéis (a-h) são assim como na Figura 28.



## 8 RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS EVENTOS DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

Assim como foi feito para Palmas, todas as imagens obtidas durante o período de 2008 a 2010 pelo imageador de São José dos Campos foram analisadas através do programa UASDA. A Tabela 9 contém todas as datas com assinatura de bolhas de plasma nas imagens de luminescência da linha do OI 6300.

Tabela 9 – Eventos de bolhas de plasma selecionados a partir das imagens de luminescência atmosférica noturna em OI 630,0 nm para a estação de São José dos Campos.

<b>Caso</b>	<b>Data (dd/mm/aaaa)</b>	<b>Período LT</b>
1	03/03/2008	23:32:15 - 01:06:50
2	04/03/2008	22:20:16 - 01:45:18
3	01/04/2008	23:05:19 - 18:47:17
4	03/06/2008	23:38:16 - 00:49:01
5	03/09/2008	00:22:58 - 03:07:48
6	02/10/2008	21:56:57 - 04:49:33
7	24/10/2008	19:35:08 - 02:01:37
8	19/02/2009	20:42:02 - 23:57:54
9	16/08/2009	00:38:22 - 02:56:47
10	29/8/2009	01:45:25 - 04:18:22
11	14/10/2009	19:56:45 - 01:36:41
12	23/10/2009	00:06:37 - 00:30:32
13	14/11/2009	20:54:35 - 23:32:38
14	20/12/2009	21:55:56 - 02:09:25
15	21/12/2009	22:25:50 - 02:08:08
16	22/12/2009	22:55:50 - 03:33:12
17	05/02/2010	20:17:25 - 23:18:57
18	07/02/2010	20:49:02 - 00:14:27
19	08/02/2010	20:41:19 - 01:04:17
20	08/03/2010	20:14:07 - 00:34:45
21	09/03/2010	20:31:06 - 23:58:06
22	10/03/2010	20:27:25 - 00:58:45
23	11/03/2010	19:22:50 - 02:16:33
24	12/03/2010	20:57:09 - 01:51:16
25	09/08/2010	01:03:54 - 04:27:02
26	03/09/2010	23:30:38 - 02:16:52
27	11/09/2010	21:02:14 - 01:57:44
28	06/10/2010	20:28:06 - 00:18:47
29	08/10/2010	19:39:40 - 23:12:22
30	28/10/2010	19:29:43 - 23:39:18
31	29/10/2010	19:48:11 - 00:25:09
32	08/11/2010	21:02:17 - 01:20:49
33	28/11/2010	20:13:08 - 00:31:43

Em seguida, verificou-se as datas da Tabela 9 com o programa UDIDA, os ionogramas que apresentavam espalhamentos simultâneos associados a presença de bolhas e irregularidades no plasma ionosférico foram listados na Tabela 10.

Tabela 10 – Datas com observações simultâneas de irregularidades pelo imageador e espalhamento nos ionogramas para a estação de São José dos Campos.

<b>Caso</b>	<b>Data</b>	<b>Imageador</b>	<b>Ionossonda</b>
3	01/04/2008	23:05:19 - 18:47:17	21:00:00 – 01:30:00
4	03/06/2008	23:38:16 - 00:49:01	21:05:00 - 04:00:00
5	03/09/2008	00:22:58 - 03:07:48	22:45:00 – 05:25:00
6	02/10/2008	21:56:57 - 04:49:33	22:45:00 – 05:30:00
7	24/10/2008	19:35:08 - 02:01:37	22:45:00 - 05:20:00
8	19/02/2009	20:42:02 - 23:57:54	22:55:00 – 02:35:00
9	16/08/2009	00:38:22 - 02:56:47	01:30:00 - 04:00:00
10	29/08/2009	01:45:25 - 04:18:22	21:45:00 - 22:25:00
11	14/10/2009	19:56:45 - 01:36:41	22:05:00 - 00:55:00
12	23/10/2009	00:06:37 - 00:30:32	00:40:00 – 04:15:00
13	14/11/2009	20:54:35 - 23:32:38	21:30:00 - 00:25:00
14	20/12/2009	21:55:56 - 02:09:25	21:55:00 – 23:00:00
15	21/12/2009	22:25:50 - 02:08:08	23:45:00 - 02:15:00
17	05/02/2010	20:17:25 - 23:18:57	22:30:00 – 05:25:00
18	07/02/2010	20:44:02 - 00:09:27	00:45:00 - 01:50:00
21	09/03/2010	20:31:06 - 23:58:06	21:40:00 - 03:30:00
22	10/03/2010	20:27:25 - 00:58:45	00:55:00 – 05:00:00
23	11/03/2010	19:49:26 - 00:04:08	22:20:00 – 05:25:00
24	12/03/2010	20:57:09 - 01:51:16	00:25:00 – 05:30:00
25	09/08/2010	01:03:54 - 04:27:02	22:55:00 - 00:10:00
28	06/10/2010	20:28:06 - 00:18:47	00:20:00 – 05:00:00
29	08/10/2010	19:39:40 - 23:12:22	22:15:00 – 01:20:00

Empregou-se o programa UTECDA para calcular o ROT sobre a estação de São José dos Campos, e, adicionalmente, para a estação de São José dos Campos, foram analisados os dados do monitor de cintilação gerenciado pelo INPE para verificar registros simultâneos de cintilação. Assim como para Palmas, após o processamento dos dados dos receptores de GNSS e das cintilações nos sinais recebidos dos satélites do GPS, reduziu-se para 5 o número de eventos com simultaneidade observados pelas quatro técnicas de medições. Estes eventos estão sumarizados na Tabela 11.

Na segunda coluna da Tabela 11 aparecem os dias do evento. Na terceira coluna os horários em que as estruturas de irregularidades foram identificadas nas imagens obtidas pelo imageador. Na quarta coluna os horários em que foram registrados espalhamentos nos ionogramas, na quinta coluna os valores aproximados das máximas flutuações observadas no

ROT e na última coluna indica o nível das cintilações observadas em S4. As cintilações pelo índice S4 foram classificadas da seguinte forma: (i) Fraco ( $0,2 \leq S4 < 0,4$ ); (ii) Moderado ( $0,4 \leq S4 < 0,6$ ); e (iii) Forte ( $0,6 \leq S4 \leq 1,0$ ).

Tabela 11 - Eventos de irregularidades ocorridos em São José dos Campos.

<b>Caso</b>	<b>Data</b>	<b>Horário de Ocorrência (LT) (Imageador)</b>	<b>Horário de Ocorrência (LT) (Ionossonda)</b>	<b>ROT (TECU/min)</b>	<b>S4</b>
12	23/10/2009	00:06 - 00:30	23:30 - 00:40	4,0	Fraco
13	14/11/2009	20:54 - 23:32	21:30 - 00:25	8,0	Moderado
21	09/03/2010	20:31 - 23:58	21:40 - 03:30	5,0	Forte
22	10/03/2010	20:27 - 00:58	00:55 - 02:00	6,0	Fraco
23	11/03/2010	19:49 - 00:04	22:20 - 03:25	10,0	Forte

Os eventos de observações simultâneas de irregularidades obtidos na estação de São José dos Campos e listados na Tabela 11 serão apresentados e discutidos a partir desta seção. Os mesmos tipos de instrumentos utilizados para investigar as assinaturas das irregularidades em PAL foram empregados no observatório de SJC, porém como mencionado antes, em SJC foi analisado adicionalmente dados de um monitor de cintilação (SCINTMON). A partir dos monitores de cintilação foram analisados o índice S4 de flutuação na amplitude do sinal da frequência L1 do GPS.

Observações de parâmetros ionosféricos que denotam as variações na densidade eletrônica, altura e deriva da camada foram feitas simultaneamente às observações das irregularidades. Além das observações de  $h'F$ ,  $hpF2$ ,  $foF2$ , VTEC e  $dh'F/dt$ , em SJC foi estimado a partir das observações da frequência crítica da camada F2 ( $foF2$ ) valores dos gradientes latitudinais na densidade eletrônica. Para isso, calculou-se primeiramente a partir dos dados do parâmetro  $foF2$  (em MHz) registrados em PAL e SJC o valor da densidade eletrônica no pico da camada F2 ( $NmF2$ ), onde  $NmF2$  (elétrons/m<sup>3</sup>) =  $1,24 \times 10^{10}$  ( $foF2$ )<sup>2</sup>. O gradiente latitudinal da densidade eletrônica ( $dNm/dLat$ ) entre SJC e PAL foi calculado empregando a mesma metodologia apresentada por Muella et al. (2010), em que:

$$dN_m/dL_{Lat} = (N_mF2_{SJC} - N_mF2_{PAL}) / (Geog.Lat_{SJC} - Geog.Lat_{PAL}), \quad (50)$$

onde na equação acima utilizou-se os valores aproximados de  $23,2^\circ$  e  $10,2^\circ$  para as latitudes de SJC e PAL, respectivamente.

### 8.1 EVENTO EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS DA NOITE DO DIA 23-24/10/2009

O primeiro caso de irregularidade listado na Tabela 11 data do ano de 2009. Em SJC não se achou nenhum caso de irregularidade ionosférica registrada simultaneamente em todos os instrumentos operando no ano de 2008. Isso devido ao critério de seleção utilizado nesta pesquisa, onde primou-se por investigar somente os casos de irregularidade com diferentes tamanhos de escala observados pelos três instrumentos e quatro técnicas de monitoramento. Levando-se em consideração que o ano de 2008 foi um período de atividade solar muito baixa, outro fator possível é que as irregularidades geradas na região do equador magnético não alcançaram nestas latitudes uma altura suficiente para que as bolhas de plasma pudessem se estender ao longo das linhas de campo magnético até a região de latitude de SJC. Este fator também ajuda a explicar o número de casos observados neste trabalho em SJC ter sido metade do número de casos encontrados em PAL.

Nesta seção iniciaremos pela análise do evento da noite de 23-24 de outubro de 2009. Na Figura 38(a) são mostradas as imagens não linearizadas da linha de emissão do OI 6300 nm registradas nas primeiras horas da noite do dia 24 de outubro entre 00:14 LT e 00:30 LT. Nas três imagens obtidas pelo imageador é possível notar que a região de depleção se desloca zonalmente. Nesta noite obteve-se um número reduzido de imagens devido a presença de nuvens sobre a estação. Estas imagens não foram linearizadas pois a assinatura da estrutura se tornaria ainda menos visível e, com isso, não foi possível gerar bons resultados da intensidade da emissão de luminescência.

Em seguida nos painéis (b-d) da Figura 38 são mostrados, respectivamente, os registros de ocorrência de espalhamentos nos ionogramas, os valores estimados de ROT e do índice de cintilação S4. O gráfico 36(b) mostra que espalhamentos fracos ( $100 \text{ km} < \lambda < 200 \text{ km}$ ) do tipo ESF-A e ESF-B ocorreram em São José dos Campos durante cerca de aproximadamente uma hora após às 23:00 LT do dia 23 de outubro e antes de 01:00 LT do dia 24 de outubro. Após isso os espalhamentos cessaram e foram observados novamente somente a partir das 03:30 LT até cerca de 04:30 LT. Nesta última aparição espalhamentos fracos do tipo MSF-A/B perduraram por pouco tempo e se transformaram em espalhamentos do tipo ESF-A/B até cessarem totalmente.

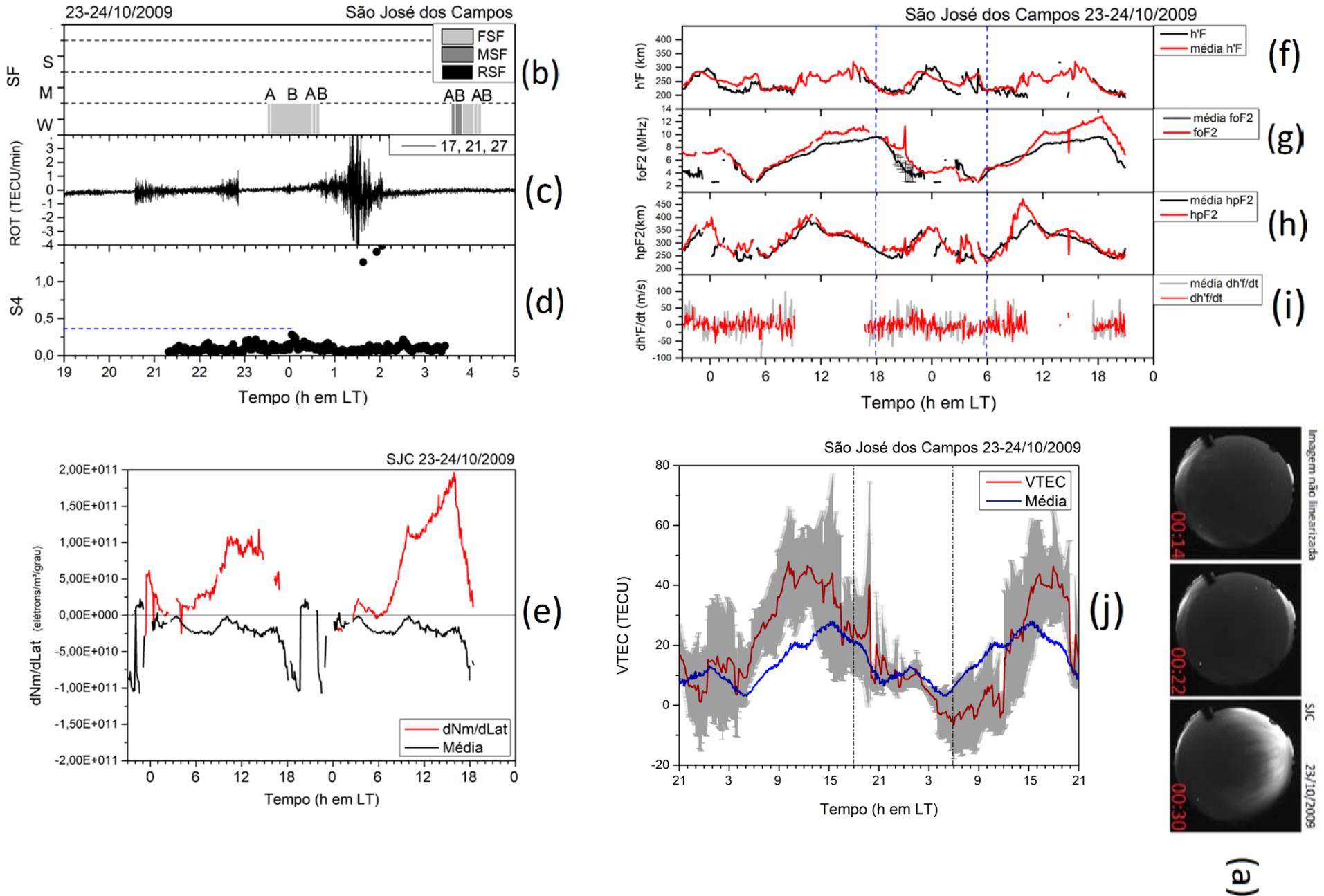
No painel da Figura 38(c) é mostrada a flutuação do TEC (ROT) calculada para os satélites PRN 17, 21 e 27. É possível notar no gráfico flutuações de curta duração e bem fracas de  $\sim 2,0$  TECU/min acontecendo entre 20:30-21:00 LT e entre 22:30-23:00 LT do dia 23 de outubro. Os valores de ROT começaram a aumentar novamente após às 00:30 LT do dia 24 de outubro quando atingiram níveis que superaram  $\sim 4,0$  TECU/min por volta de 01:30 LT. Enquanto isso no painel seguinte da Figura 38(d) observa-se que cintilações fracas com índice S4 da ordem de  $\sim 0,35$  foram observadas na maior parte da noite, exceto por flutuações extremamente rápidas e curtas na amplitude do sinal que produziram valores elevados de S4  $\sim 1,2$  em torno das 02:00 LT. Esse aumento no S4 coincide com o horário de maior flutuação do TEC (ROT).

Em seguida no gráfico da Figura 38(e) é mostrado os resultados do gradiente latitudinal da densidade eletrônica ( $dNm/dLat$ ), empregado aqui como uma medida da intensidade de ionização da região da anomalia equatorial calculados para os dias 23-24 de outubro (linha sólida vermelha). Os resultados são comparados com os valores médios de referência (linha sólida preta), em que foram considerados os 5 dias geomagneticamente mais calmos e com menor ocorrência de espalhamentos associadas às bolhas nos dados da ionossonda digital de SJC. Para este caso foram considerados os dias 2, 9, 13, 20, 28 de outubro como sendo os dias de referência. Os valores do caso descrevem uma curva notoriamente mais elevada do que para os dias de referência, em que durante o período do diurno atingiu um máximo  $1,1 \times 10^{11}$  elétrons.m<sup>-3</sup>/grau. No entanto, durante o período noturno não foi possível estimar os gradientes devido à falta de dados de NmF2 em PAL.

Em seguida nos painéis (f-i) da Figura 38 são mostrados, de cima para baixo, os resultados dos parâmetros  $h'F$ ,  $foF2$ ,  $hpF2$  e  $dh'F/dt$  obtidos para os dias 23 e 24 de outubro (linha vermelha) e para os dias de referência (linha preta). As linhas pontilhadas traçadas verticalmente ao longo dos painéis indicam o período noturno das 18h às 6h LT. Em comparação com a média dos dias de referência, os valores de  $h'F$  no painel (f) acompanham o pico descrito pelos valores dos dias de referência com um atraso e à meia-noite LT desenha um pico mais elevado. O painel (g) traz o gráfico dos valores de  $foF2$  e os resultados mostram que a curva da frequência crítica do dia estudado se mantém mais elevada que a média dos dias de referência, principalmente entre 18:00 e 24:00 LT, onde também descreve um pico por volta das 21:00 LT. Os resultados de altura do pico da camada no painel (h) mostram que os valores de  $hpF2$  do caso estudado apresentam níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência. No painel da Figura 38(h) é mostrado a derivada  $dh'F/dt$ , cujos resultados se comparam com os dias de referência.

No painel (j) da Figura 38 observa-se os valores obtidos de VTEC médio para todos os satélites visíveis entre os dias 23-24 de outubro e sua comparação com os valores médios de VTEC calculados para os dias de referência. Também se indica o período noturno com linhas verticais pontilhadas. Os resultados mostram que os valores de VTEC atingiram níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência, exceto por um pico às 20:00 LT.

Figura 38 - Observações em SJC do evento de 23-24/10/2009: (a) imagens não linearizadas da emissão no OI 6300; (b) intensidades (W, M e S) e tipos (RSF, FSF e MSF e A, B, C) dos espalhamentos; (c) taxa de variação do TEC (ROT); (d) índice S4 de cintilação em amplitude; (e) gradiente latitudinal de densidade eletrônica; (f-i) parâmetros  $h'F$ ,  $foF2$ ,  $hpF2$  e valores calculados de  $dh'F/dt$ ; (j) TEC vertical no dia do evento (linha preta) e para os dias de referência (linha azul).



## 8.2 EVENTO EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS DA NOITE DO DIA 14-15/11/2009

O próximo caso listado na Tabela 11 ocorreu na noite do dia 14 para o dia 15 de novembro de 2009. O painel (a) no canto direito inferior da figura apresenta as imagens não linearizadas captadas entre 21:41 – 22:13 LT e no painel (b) as imagens linearizadas. Em seguida nos painéis (c-e) da Figura 39 são mostrados, respectivamente, os registros de ocorrência de espalhamentos nos ionogramas, os valores estimados de ROT e do índice de cintilação S4. O painel (c) mostra que fortes espalhamentos do tipo RSF-C ( $\lambda > 200$  km) se iniciaram às 21:30 LT. Em seguida, diminuíram sua intensidade para níveis moderados ( $\lambda < 200$  km) e fracos ( $\lambda < 100$  km) e cessaram às 00:30 LT do dia 15 de novembro. No painel (d) é mostrada a flutuação do TEC (ROT) calculada para os satélites PRN 4, 17, 27 e 28. Nesta noite flutuações de curta duração e bem fortes de  $\sim 8,0$  TECU/min aconteceram por volta das 22:15 LT. Após isso a flutuação diminuiu sua intensidade para  $\sim 1,0$  TECU/min e se estendeu até às 23:30 LT. No painel (e) observa-se que cintilações fracas da ordem de  $S_4 \sim 0,3$  foram observadas nos instantes em que os espalhamentos nos ionogramas tornaram-se mais fracos.

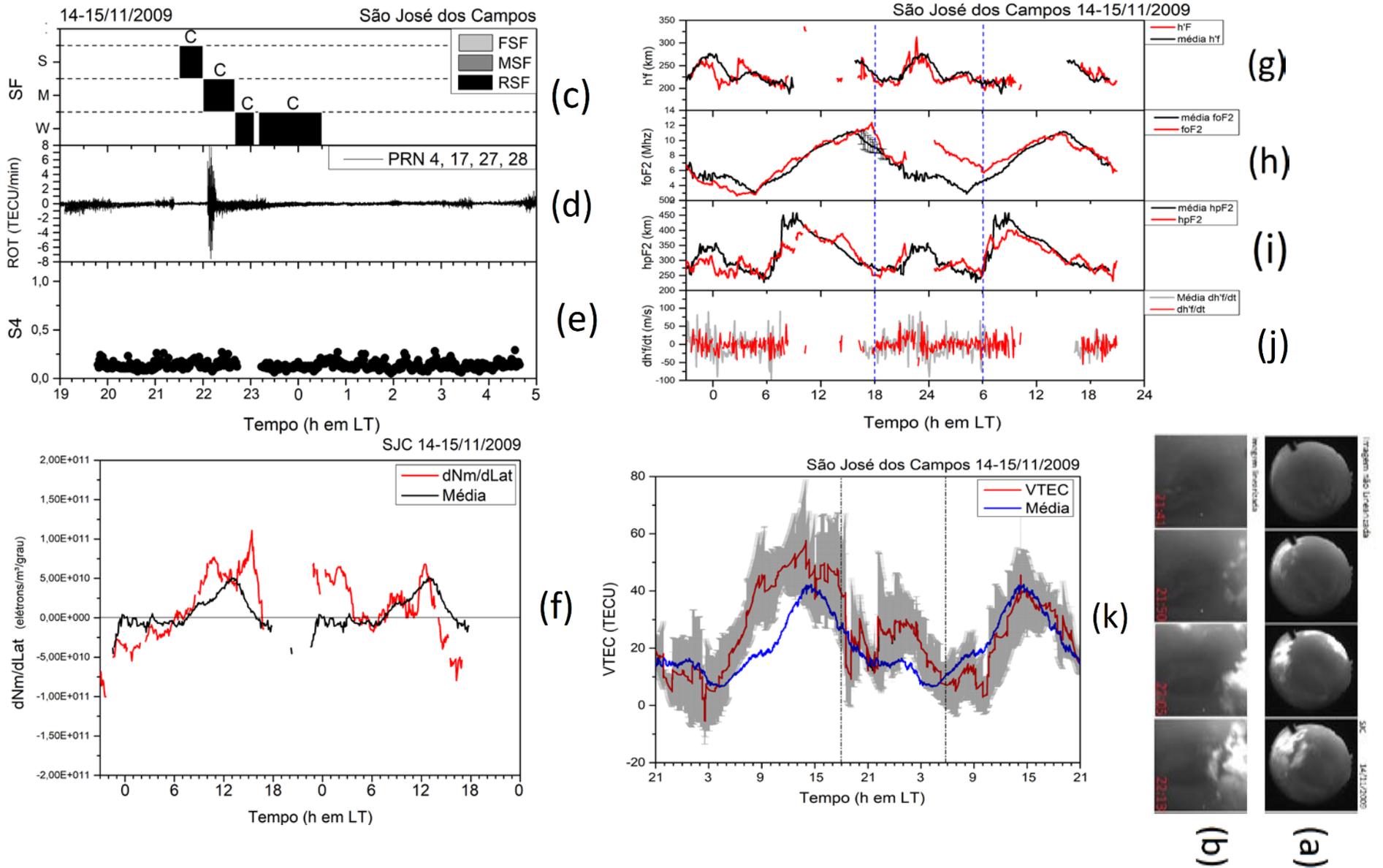
No painel (f) é mostrado os resultados do gradiente latitudinal da densidade eletrônica ( $dNm/dLat$ ) calculados para os dias 14-15 de novembro. Para este caso foram considerados os dias 5, 10, 19, 28 e 30 de novembro como sendo os dias de referência. Nas primeiras horas da noite não foi possível estimar os gradientes devido a falta de dados, porém, fortes gradientes de densidade para o equador da ordem de  $6,5 \times 10^{10}$  elétrons.m<sup>-3</sup>/grau foram observados entre 23:00 – 02:00 LT. Estes fortes gradientes do plasma coincidiram com os instantes em que foram observados as flutuações de cerca de 1,0 TECU/min no ROT.

Em seguida nos painéis (g-j) da Figura 39 são mostrados os resultados dos parâmetros h'F, foF2, hpF2 e dh'F/dt obtidos para os dias 14 e 15 de novembro. Em comparação com a média dos dias de referência, os valores de h'F no painel (g) acompanham o pico descrito pelos valores dos dias de referência. O painel (h) traz o gráfico dos valores de foF2 onde pode-se observar que pouco antes das 18:00 LT os valores alcançaram  $\sim 12,26$  MHz, cerca de 3 MHz acima da média dos dias de referência. Logo em seguida, por volta das 00:30 LT o gráfico do painel (h) mostra que o valor de foF2 atingiu  $\sim 10$  MHz, nitidamente bem acima da média dos dias de referência. Ainda que não tenha sido possível reduzir foF2 entre 21:30 - 00:30 LT, os resultados sugerem que houve uma intensificação nestes horários. Como foF2 é proporcional a densidade eletrônica no pico da ionosfera, valores elevados de densidade nestes horários possivelmente favoreceram o surgimento das irregularidades que causaram as

flutuações no TEC vistos pelo parâmetro ROT. Os resultados de altura do pico da camada no painel (i) e da derivada  $dh'F/dt$  no painel da Figura 39 (j) mostram que os valores de  $h_pF2$  e da deriva acompanharam os valores de referência.

No gráfico da Figura 39 (k) observa-se os valores obtidos de VTEC médio para todos os satélites visíveis entre os dias 14-15 de novembro e sua comparação com os valores médios de VTEC calculados para os dias de referência. Os resultados mostram que no período noturno os valores de VTEC atingiram níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência. No entanto, é possível notar nas primeiras horas da noite de 14 de novembro, depleções no VTEC associadas a presença das bolhas. Em seguida, após às 22:00 LT e até cerca de 03:00 LT fica claro que houve uma intensificação nos valores de VTEC, o que concorda com os horários em que houve um aumento de  $f_oF2$ . Portanto, os valores elevados de densidade eletrônica nestes horários, se comparados com os dias de referência, possivelmente estão contribuindo para o surgimento de irregularidades de menores escala.

Figura 39 - Observações em SJC do evento de 14-15 de novembro de 2009. Os painéis (a-j) são assim como na Figura 38.



### 8.3 EVENTO EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS DA NOITE DO DIA 09-10/03/2010

A Figura 40 traz os dados gerados para o caso que ocorreu na noite do dia 09 para o dia 10 de março de 2010. No painel (a) são mostradas as imagens não linearizadas onde é possível ver pela sequência de imagens a estrutura de larga escala se movendo e expandindo das 21:08 – 23:47 LT. Em seguida nos painéis (b-d) da Figura 40 são mostrados, respectivamente, os registros de ocorrência de espalhamentos nos ionogramas, os valores estimados de ROT e do índice de cintilação S4. No painel (b) pode-se observar espalhamentos tipo RSF-C/B entre 22:00 – 23:00 LT intensificando e enfraquecendo de intensidade. Mais tarde, às 23:45 LT observa-se novamente espalhamentos RSF-C com forte intensidade. Em seguida, entre 00:15 – 02:30 LT se mantêm em uma intensidade intermediária. Apenas às 03:00 – 03:30 voltam a surgir com intensidade fraca e moderada. Também foram observados espalhamentos do tipo MSF-B entre 21:30 – 21:45 LT e 23:00 – 23:45 LT. Outros espalhamentos menos importantes do tipo FSF-B podem ser observados entre 02:30 – 02:45 LT. No painel (c) é mostrado os valores de ROT calculados para os satélites PRN 6, 21. É possível notar no gráfico flutuações fortes de até  $\sim 5,0$  TECU/min entre 23:15 à 02:15. No painel (d), os resultados mostram que o valor do índice S4 entre 23:45 - 00:45 LT intensificou-se até atingir níveis moderados de cerca de 0,5, enquanto que um pico de curta duração de  $\sim 1,2$  foi observado por volta das 00:30 LT. Os gráficos (b-d) mostram que nesta noite irregularidades de escalas intermediárias (ROT e S4) coexistiram com as estruturas de larga escala (imageador e ionossonda).

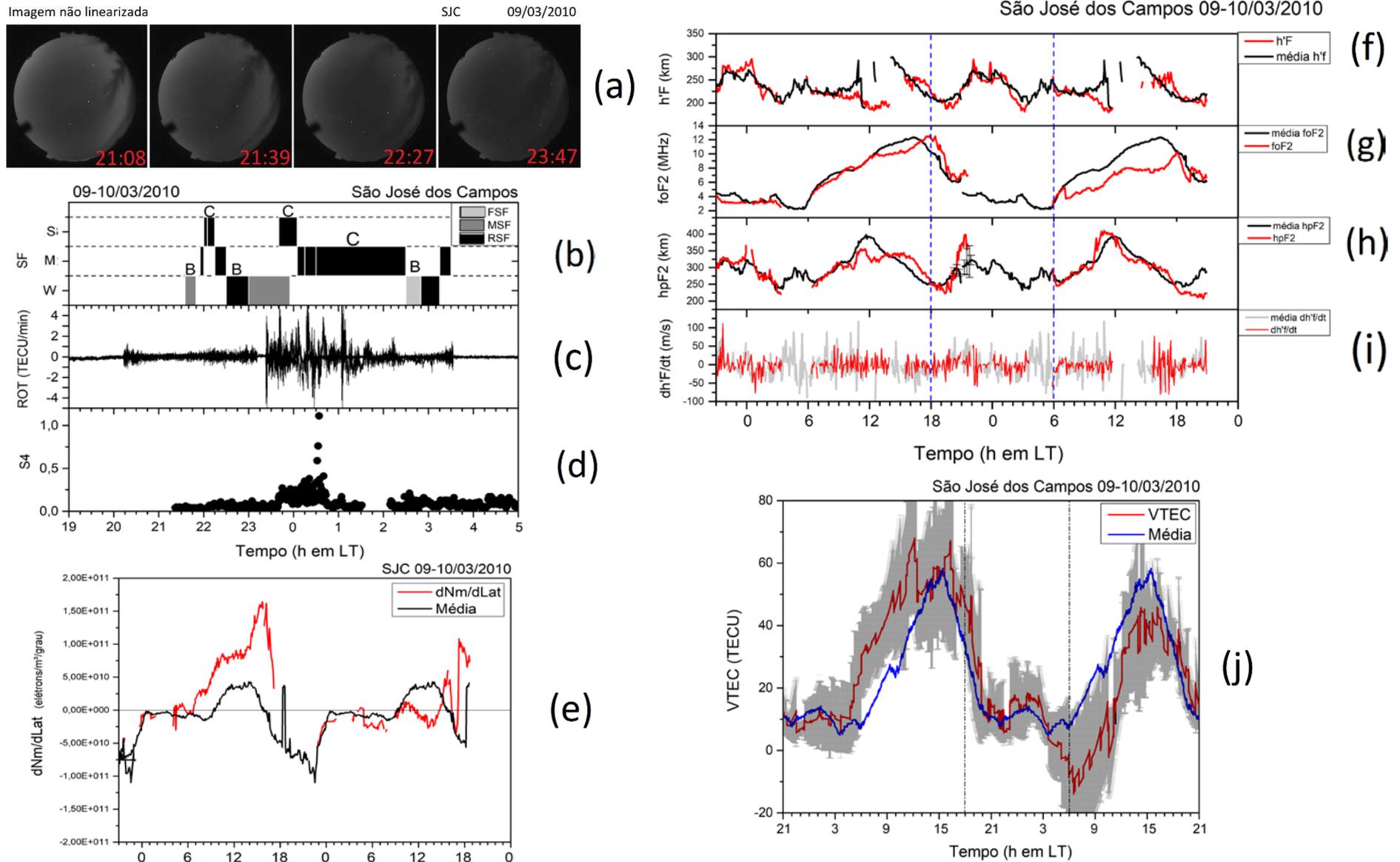
No painel (e) é mostrado os resultados do gradiente latitudinal da densidade eletrônica ( $dNm/dLat$ ) calculados para este caso, no qual foram considerados os dias 06, 14, 19, 22 e 26 de março como sendo os dias de referência. Os valores do caso descrevem uma curva notoriamente mais elevada do que para os dias de referência. Observa-se um pico nos valores de gradiente próximos das 16:00 LT que chegam a  $\sim 1,6 \times 10^{11}$  elétrons.m<sup>-3</sup>/grau, enquanto que os valores de referência estavam em torno de  $\sim 2,7 \times 10^9$  elétrons.m<sup>-3</sup>/grau. Durante o período noturno não foi possível estimar os gradientes até por volta das 23:00 LT, porém após este horário os gradientes estavam em direção aos pólos e começam a reduzir como consequência da contração da anomalia na ionização equatorial. Todavia, os valores de gradiente se assemelham aqueles observados para os dias de referência.

Em seguida nos painéis (f-i) da Figura 40 são mostrados os resultados dos parâmetros h'F, foF2, hpF2 e dh'F/dt obtidos para os dias 09 e 10 de março. Os valores de h'F no painel

(f) acompanham o pico descrito pelos valores dos dias de referência. Os painéis (g) e (h) mostram que os valores reduzidos de foF2 e hpF2, respectivamente, se mantiveram um pouco mais elevados em comparação com a média dos dias de referência até próximo das 18:00 LT. Uma ligeira subida em h'F até cerca de ~295 km foi notado por volta das 22:00 LT, enquanto que um pouco antes por volta das 21:30 LT a altura do pico hpF2 atingiu quase 400 km. Os gráficos (f) e (h) mostram que a ionosfera nestes horários apresentou uma deriva para cima, que de acordo com o gráfico da Figura 40 (i) variou entre 8-11 m/s. Este horários coincidem com aqueles em que espalhamentos de diferentes tipos e intensidades estavam sobre SJC, o que pode ter contribuído para desestabilizar o plasma ainda mais, visto que a região F foi deslocada para alturas maiores e a ação dos mecanismos de instabilidade provavelmente foram favorecidos. Este resultado corrobora com o início das flutuações no TEC e das cintilações em amplitude observadas um pouco mais tarde logo após às 23:00 LT. Os resultados da Figura 40 (j) mostram que os valores de VTEC atingiram níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência.

Figura 40- Observações em SJC do evento de 09-10 de março de 2010. Os painéis (a-j) são assim como na Figura 38.

Figura



#### 8.4 EVENTO EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS DA NOITE DO DIA 10-11/03/2010

A Figura 41 traz os dados gerados para o caso que ocorreu na noite do dia 10 para o dia 11 de março de 2010. No painel (a) são mostradas as imagens não linearizadas onde é possível ver pela sequência de imagens a estrutura de larga escala se movendo no canto superior direito, à leste da estação. Em seguida nos painéis (b-d) da Figura 41 são mostrados, respectivamente, os registros de ocorrência de espalhamentos nos ionogramas, os valores estimados de ROT e do índice de cintilação S4. O painel (b) mostra espalhamentos do tipo RSF iniciando com intensidade fraca às 01:15 LT, e logo depois às 01:30 LT aumenta sua intensidade para moderado. Espalhamentos RSF-B são observados em seguida entre 02:14 – 02:45 LT. Também puderam ser observados espalhamentos em frequência FSF nas faixas de horário entre 23:15 – 01:15 LT, e depois entre 03:30 – 05:00 LT. Infelizmente, nesta faixa de horário as imagens estavam encobertas por nuvens e por isso não constam no painel (a). No painel (c) é mostrado os valores de ROT calculados para os satélites PRN 3, 6, 21, 22. Flutuações fortes entre 2,5 - 6 TECU/min ocorreram entre 23:30 à 00:15 LT, coincidindo com os horários dos espalhamentos FSF. Este evento é um caso particular em que as flutuações no TEC vistas pelo ROT não ocorreram simultaneamente com as bolhas de plasma associadas aos espalhamentos do tipo RSF. Portanto, é possível que os espalhamentos em frequência e as flutuações tenham sido causadas por estruturas fósseis de irregularidades. No painel (d) observou-se flutuações de  $\sim 0,3$  no índice S4, sugerindo que não houve irregularidades de menores escala simultaneamente com as estruturas que causaram espalhamentos nos sinais da ionosonda e nas flutuações ROT.

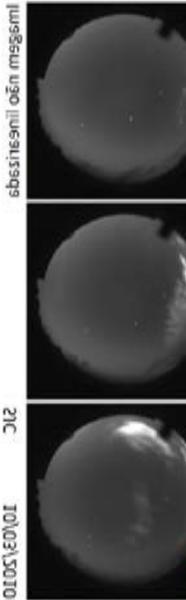
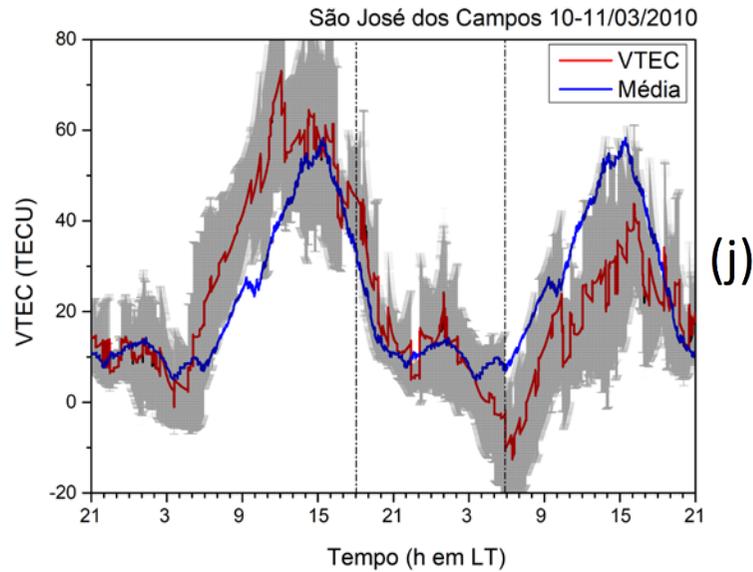
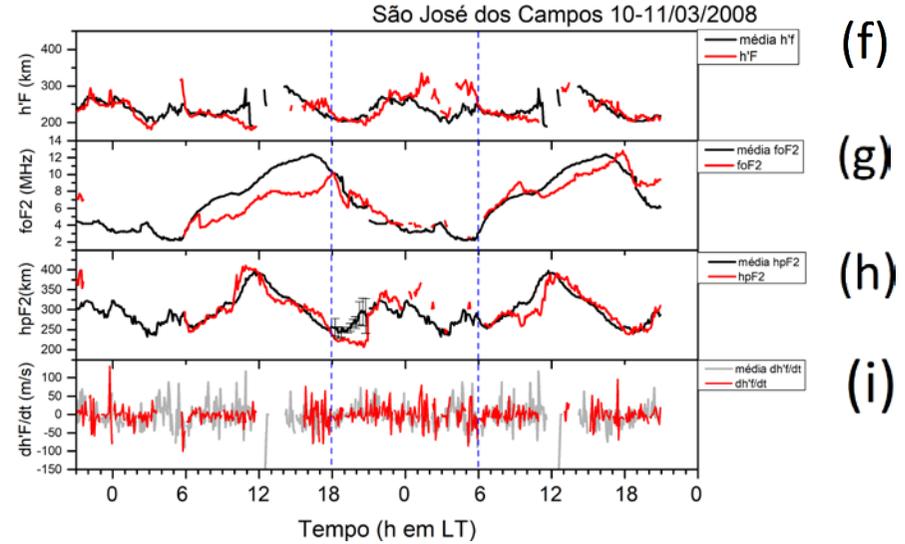
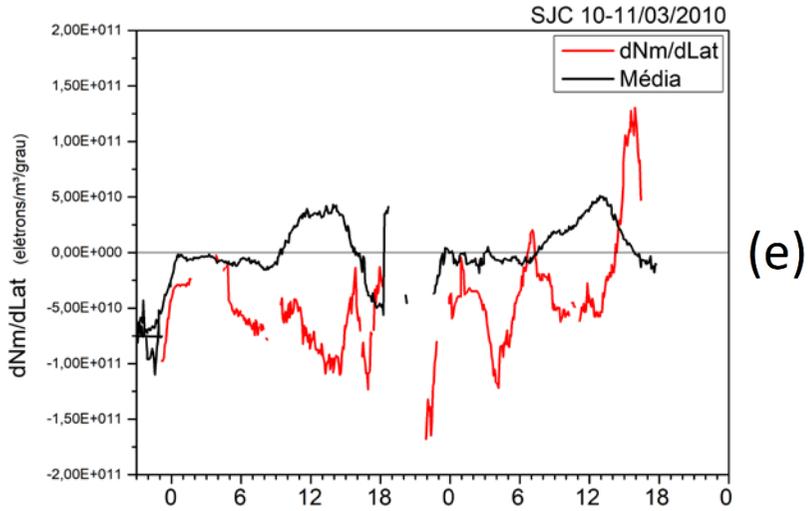
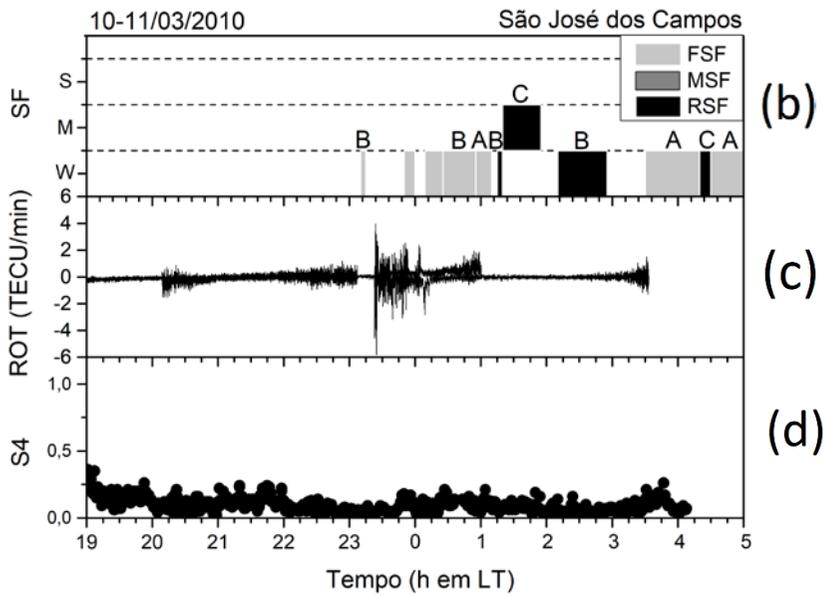
No painel (e) é mostrado os resultados do gradiente latitudinal da densidade eletrônica ( $dNm/dLat$ ) calculados para este caso. Foram utilizados os mesmos dias de referência do caso anterior. Os valores de gradiente para a noite de 10-11 de março revelam que a anomalia se desenvolveu em direção aos polos, atingindo valores de aproximadamente  $-1,7 \times 10^{11}$  elétrons.m<sup>-3</sup>/grau por volta das 22:00 LT. De acordo com Muella et al. (2010), estes fortes gradientes para os polos tendem a conduzir a geração de irregularidades. Coincidentemente, após às 23:15 LT espalhamentos RSF-C/B foram observados na ionosfera sobre SJC, cuja geração na região equatorial pode ter sido favorecida em virtude da intensificação da anomalia horas antes.

Em seguida nos painéis (f-i) da Figura 41 são mostrados os resultados dos parâmetros h'F, foF2, hpF2 e dh'F/dt obtidos para os dias 10 e 11 de março. Durante o período noturno

ambos os parâmetros  $h'F$  e  $foF2$  se assemelharam aos valores encontrados para os dias de referência, exceto  $hpF2$  que baixou para  $\sim 210$  km às 20:00 LT, cerca de 80 km mais baixo do que aquele observado na linha sólida preta para a média dos dias de referência. Esta queda na altura do pico certamente contribuiu para a inibição das cintilações na noite de 10 de março. Os valores de  $dh'F/dt$  também não diferiram significativamente daqueles observados para os dias de referência durante os primeiros horários da noite.

No gráfico da Figura 41 (j) observa-se os valores obtidos de VTEC médio para todos os satélites visíveis entre os dias 10-11 de março e sua comparação com os valores médios de VTEC calculados para os dias de referência. Os resultados mostram que os valores de VTEC atingiram níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência, e nenhuma intensificação que possa explicar o surgimento das flutuações ocorridas entre 23:30 – 00:15 LT foi observado.

Figura 41 - Observações em SJC do evento de 10-11 de março de 2010. Os painéis (a-i) são assim como na Figura 38.



(a)

## 8.5 EVENTO EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS DA NOITE DO DIA 11-12/03/2010

A Figura 42 traz os dados gerados para o caso que ocorreu na noite do dia 11 para o dia 12 de março de 2010. No painel (a) são mostradas as imagens linearizadas, onde é possível ver pela sequência de imagens a estrutura de larga escala evoluindo das 20:42 até às 23:45 LT. Em seguida nos painéis (b-d) da Figura 42 são mostrados, respectivamente, os registros de ocorrência de espalhamentos nos ionogramas, os valores estimados de ROT e do índice de cintilação S4. O painel (b) mostra que durante esta noite diferentes tipos e intensidades de espalhamentos foram observados das ~22:15 LT até aproximadamente 05:00 LT. Espalhamentos fracos do tipo FSF-B evoluíram para RSF-A/B/C de intensidade moderada por volta das 22:45 LT. Estes espalhamentos moderados coincidiram com as imagens de luminescência. Às 00:15 LT do dia 12 de março os espalhamentos decaíram novamente para intensidades fracas do tipo FSF-B. Em seguida os espalhamentos se intensificaram rapidamente para estruturas de bolhas (RSF-C) de níveis mais fortes até ~02:15 LT. Em seguida, retornam a enfraquecer e flutuam entre os diferentes tipos de espalhamentos (FSF, MSF e RSF; A, B e C) até cerca de 04:00 LT. Um aspecto marcante observado nesta noite foram os espalhamentos fortes do tipo RSF-C registrados pouco antes do amanhecer entre 04:00 – 05:00 LT. Assinaturas de bolhas até próximo do amanhecer podem representar estruturas fósseis que foram geradas sobre o equador à oeste de São José dos Campos, e que derivaram para leste até próximo do amanhecer (NARAYANAN et al., 2016). No painel (c) é mostrado os valores de ROT calculados para os satélites PRN 6, 20, 21 e 32, onde é possível notar no gráfico flutuações fortes de ~8,0 TECU/min entre 21:45 e 23:30 LT, notoriamente coincidindo com os espalhamentos RSF-A/B/C moderados observados no painel (b). Outro aspecto marcante observado nas medições com o GPS (painel d) foi a intensificação das flutuações na amplitude do sinal a partir das 21:45 LT, atingindo valores máximos do índice S4 (~0,75) entre 23:15 – 00:30 LT. Estas assinaturas coincidentes observadas pelo imageador, pela ionosonda e pelo GPS (ROT e S4) indicam a presença na ionosfera sobre SJC de irregularidades com dimensões desde centenas de metros (~370-400 m) até centenas de quilômetros. Nota-se ainda do gráfico de ROT que por volta de 01:00 LT valores significativamente elevados de flutuações no TEC da ordem de 10,0 TECU/min, coincidiram com os espalhamentos RSF-C fortes registrados nos ionogramas. Enquanto que no gráfico de S4 a ausência de dados entre 00:30 e 02:00 LT significa que entre estes horários ocorreu perda de sinal devido às intensas flutuações na amplitude do sinal. Quando as cintilações em

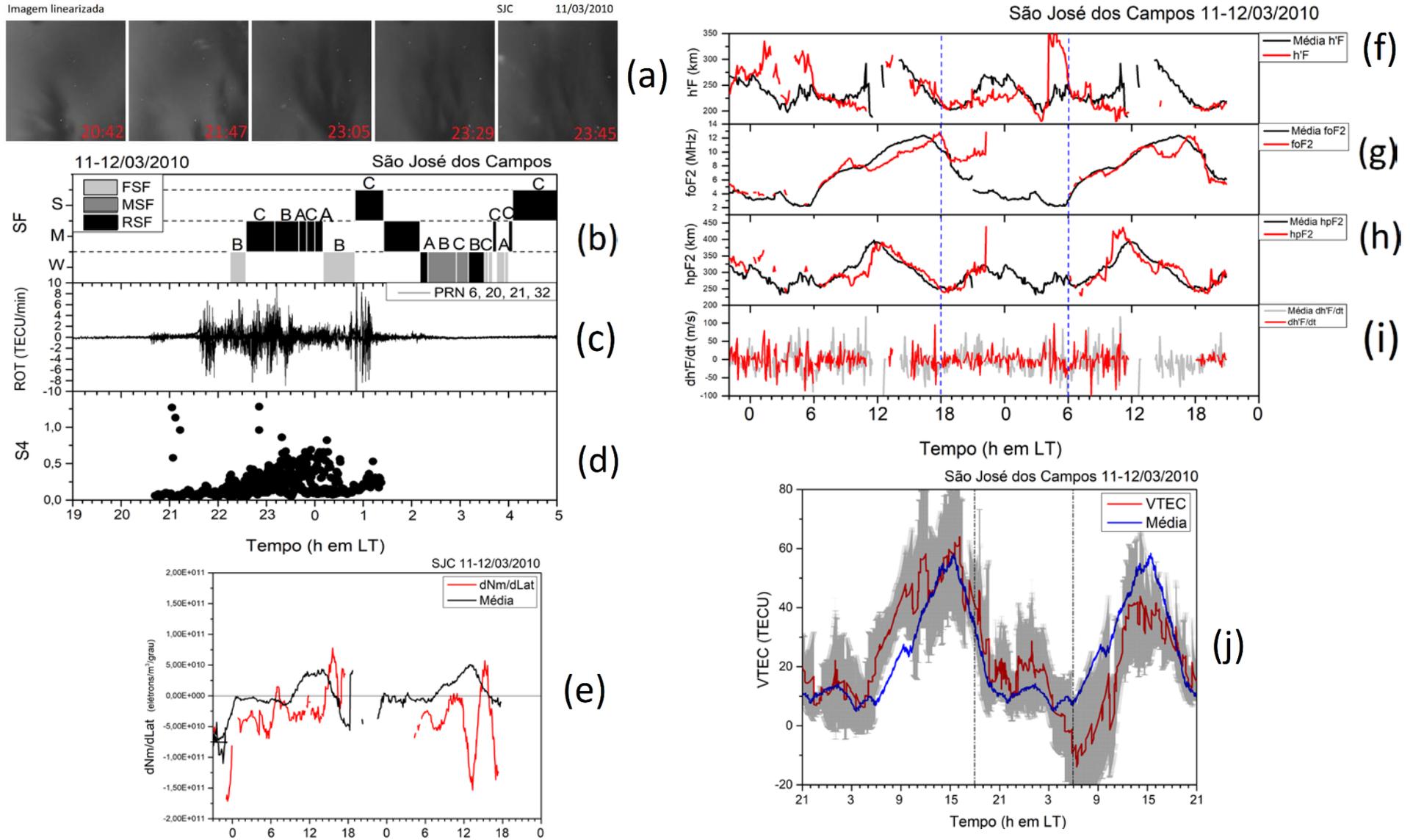
amplitude atingem níveis saturados, geralmente com  $S4 > 1,4$ , o receptor de GPS não consegue rastrear os sinais dos satélites, provocando perdas de sinais como o que foi observado neste caso. Na prática isso acontece quando a relação sinal-ruído nos canais do receptor atinge valores de cerca de 26-30 dB-Hz (KINTNER et al., 2007).

No painel (e) é mostrado os resultados do gradiente latitudinal da densidade eletrônica ( $dNm/dLat$ ) calculados para este caso, sendo que foram utilizados os mesmos dias de referência do gráfico do caso anterior. Os resultados mostram que durante o dia os gradientes foram predominantes para os polos, como esperado, em virtude do efeito fonte. Os gradientes chegaram a atingir valores inferiores aos dias de referência em cerca de  $\sim 8,0 \times 10^{11}$  elétrons. $m^{-3}$ /grau entre 12:00 – 14:00 LT, o que sugere um forte desenvolvimento da anomalia durante a tarde do dia 11 de março. Durante a noite não foi possível estimar os gradientes devido a impossibilidade de reduzir dos ionogramas o parâmetro foF2, o que infelizmente permitiria verificarmos como a anomalia na ionização equatorial desenvolveu-se nesta noite após o pico pré-reversão. Quando as bolhas ionosféricas se estendem para latitudes maiores e interceptam a região da anomalia na ionização equatorial, onde a densidade eletrônica ambiente é maior, intensos gradientes de densidade ocorrem nas fronteiras das estruturas das bolhas. Estes gradientes quanto mais intensos criam condições favoráveis para o acionamento dos mecanismos que geram irregularidades intermediárias ( $100 \text{ m} < \lambda < 1 \text{ km}$ ), tais como aquelas que estão causando as cintilações em amplitude nos sinais do GPS (MUELLA et al., 2010).

Em seguida nos painéis (f-i) da Figura 42 são mostrados os resultados dos parâmetros  $h'F$ , foF2, hpF2 e  $dh'F/dt$  obtidos para os dias 10 e 11 de março. Em comparação com a média dos dias de referência, os valores de  $h'F$  no painel (f) descrevem um pico à 01:00 LT do dia 11 de março de  $\sim 100$  km mais alto que o pico dos dias de referência que ocorre às 22:00 LT. O painel (g) traz o gráfico dos valores de foF2. Os resultados de altura do pico da camada hpF2 estão no painel (h) e no painel da (i) é mostrado a derivada  $dh'F/dt$ .

No gráfico da Figura 42 (j) observa-se os valores obtidos de VTEC médio para todos os satélites visíveis entre os dias 11-12 de março e sua comparação com os valores médios de VTEC calculados para os dias de referência. Os resultados mostram que os valores de VTEC atingiram níveis que se compararam com aqueles observados durante os valores dos dias de referência.

Figura 42 - Observações em SJC do evento de 11-12 de março de 2010. Os painéis (a-j) são assim como na Figura 38.



## 9 CONCLUSÕES

Neste trabalho o objetivo foi estudar eventos simultâneos de irregularidades ionosféricas observados através de diferentes técnicas de monitoramento, e através da análise dos parâmetros de altura e densidade eletrônica da região F, avaliar o comportamento da ionosfera e os possíveis mecanismos envolvidos na geração, desenvolvimento e evolução de estruturas de irregularidades com diferentes tamanhos de escala. O estudo foi conduzido empregando dados de duas estações de baixa latitude localizadas no setor brasileiro. Os dados foram coletados durante o período de mínimo na atividade solar ocorrida entre os anos de 2008 e 2010.

O principal mecanismo responsável pelo surgimento das irregularidades no plasma ionosférico foi descrito na Seção 3, e relaciona alguns dos principais fatores que se tornam importantes num ambiente onde as irregularidades estão presentes, como por exemplo, a altura da base e do pico da região F da ionosfera, a velocidade de deriva vertical da ionosfera, o gradiente latitudinal na densidade eletrônica ( $\Delta N$ ), o desenvolvimento da anomalia na ionização equatorial. Além disso, o efeito dos ventos neutros e a eficiência da conexão magnética entre as regiões E – F também afetam o ambiente ionosférico e, por conseguinte, a formação das irregularidades.

Neste trabalho, todas as imagens coletadas pelos imageadores all-sky de PAL e SJC registradas ao longo dos anos de 2008, 2009 e 2010 foram analisadas. Conjuntamente com todos os registros de bolhas de plasma identificados nas imagens de luminescência atmosférica buscou-se as assinaturas de bolhas nos dados de ionossondas. Os efeitos das irregularidades de menores dimensões que coexistem com as estruturas de bolhas foram analisados a partir dos dados dos receptores de GPS de dupla frequência (frequências L1 e L2), e das medidas de um monitor de cintilação (frequência L1). Também foram extraídos para cada caso analisado em PAL e SJC os parâmetros ionosféricos de: variação temporal da altura virtual da base da camada F ( $h'F$ ), variação temporal da frequência crítica (em MHz) da camada F2 ( $foF2$ ), variação da altura do pico da camada F2 ( $hpF2$ ), a velocidade de deriva vertical da base da região F ( $dh'F/dt$ ) e os valores de VTEC. Adicionalmente, o gradiente latitudinal da densidade eletrônica ( $dNm/dLat$ ) entre SJC e PAL foi analisado para os casos de ocorrência de irregularidades em SJC.

A seguir, resumimos as principais conclusões obtidas a partir da análise simultânea das irregularidades com diferentes tamanhos de escala, observadas durante o período de mínimo entre os ciclos solares 23/24 (2008-2010):

- A redução da densidade eletrônica do plasma ambiente durante o período de mínimo solar tende a provocar uma diminuição significativa da atividade e da ocorrência das irregularidades na ionosfera. Além da ionização reduzida, uma condição básica para o início das irregularidades está na deriva  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ . Com o fluxo solar reduzido, o efeito-fonte torna-se mais fraco e a região da anomalia na ionização equatorial também torna-se menos desenvolvida;

- Depois que as irregularidades são geradas na região equatorial, elas podem expandir em direção as regiões de baixas latitudes, constituindo assim uma irregularidade de grande escala. Todavia, se as irregularidades ionosféricas não apresentarem uma rápida evolução, o que se espera durante períodos de mínimo na atividade solar, as mesmas tendem a ficar confinadas mais próximas à região equatorial e se estendendo no máximo a latitudes como a da estação de PAL. Isso é uma possível explicação para as não-simultaneidades encontradas num mesmo dia para os casos PAL e SJC;

- As irregularidades observadas em baixas latitudes em horários próximos a meia-noite, geralmente, estão associadas à passagem das regiões de depleção (bolhas de plasma) que estão alongadas ao norte e ao sul do equador magnético e que estão derivando para leste na ionosfera, mas que foram geradas mais à oeste na região equatorial (MUELLA et al., 2014). Na literatura estes tipos de irregularidades são às vezes classificados como “fósseis”, em alusão àquelas estruturas que não foram geradas localmente. Esta possibilidade foi observada nos casos descritos nas seções 8.4 e 8.5. No caso de SJC ocorrido na noite de 10-11/03/2010, estruturas fósseis foram associadas as flutuações no TEC vistas pelo ROT que não ocorreram simultaneamente com as bolhas de plasma associadas aos espalhamentos do tipo RSF. Em contrapartida, no caso do dia 11-12/03/2010, foram os espalhamentos fortes do tipo RSF-C registrados pouco antes do amanhecer que podem representar estruturas fósseis que foram geradas sobre o equador à oeste de São José dos Campos, e que derivaram para leste;

- As irregularidades que surgem após o entardecer são mais comuns nos horários que antecedem a meia-noite local, podendo ser observadas até 03:00 LT dependendo da latitude magnética. Porém, neste estudo, dos 15 casos de SJC e PAL, houve 11 casos observados com irregularidades ocorrendo até depois da meia-noite local. Este resultado concorda com os apresentados por Dashora et al. (2012), que estudaram irregularidades da região F no setor indiano durante o solstício de 2008 e 2009. Dashora et al. (2012) analisaram dados de TEC e índice S4 de cintilação obtidos de receptores GNSS, com dados de radar, ionossonda e fotômetro imageador. Porém, não exigindo que sinais de irregularidades fossem notados

simultaneamente em todos os instrumentos, obtiveram um maior número de eventos analisados quando comparado com o presente trabalho. Dashora et al. (2012) sugerem uma possível causa para a ocorrência de bolha de plasma nos horários após a meia-noite local, como sendo devido a estruturas fósseis levadas pelo movimento de deriva até as regiões de baixa latitude. Em outro trabalho de Huang et al. (2011) também foram mostradas observações de grandes depleções de plasma no setor equatorial após a meia-noite local no período de mínimo solar, mas os autores não atribuíram esses resultados a evolução e formações de estruturas fósseis. Huang et al. (2011) estudaram apenas três casos e sugeriram que essas estruturas têm origem no setor noturno por volta das 20h00 local, e que devido a velocidade de deriva no interior da bolha para cima, essas estruturas continuam evoluindo por mais 3,3 h para depois entrarem em lento decaimento, o que as possibilita tornarem totalmente desenvolvidas;

- Como consequência do efeito-fonte, na região do equador magnético a densidade eletrônica ambiente é reduzida e, com isso, níveis mais fracos das cintilações podem ser observadas. Como relatado na seção 7.9 do caso ocorrido sobre PAL na noite do dia 04-05/02/2010, as cintilações tendem a ser mais fracas na região do equador magnético devido principalmente a presença de baixa flutuação na densidade eletrônica do plasma ( $\Delta N$ );

- Características da ionosfera durante o mês de inverno, como observado no caso descrito na seção 7.10 ocorrido em julho de 2010, quando o pico pré-reversão se tornou mais fraco e a densidade eletrônica do plasma diminuiu significativamente, as irregularidades decaíram mais rapidamente. De forma semelhante, os valores de ROT tendem a ser menores, visto que  $\Delta N_e$  diminuem durante os meses de inverno;

- A intensificação dos gradientes de densidade nas “paredes” das estruturas das bolhas durante a sua fase de desenvolvimento, possivelmente faz com que estas se tornem instáveis devido a processos de instabilidade secundários, favorecendo o surgimento de irregularidades menores (MUELLA, 2008). No caso 7.1 sugere-se este mecanismo como sendo o responsável pela coexistência de irregularidades sobre PAL;

- A presença de irregularidades no plasma ionosférico provoca cintilações/flutuações na amplitude e fase dos sinais de rádio e causam degradação no desempenho e na confiabilidade dos instrumentos que utilizam os sinais transmitidos pelos satélites do sistema de navegação global (GNSS);

- Os mecanismos de decaimento descritos na seção 7.1 podem também explicar parte dos mecanismos atuantes na coexistência das irregularidades de diferentes tamanhos de escala

em um período de mínimo solar. Desde a sua formação no equador até alcançarem o pico da camada F2 os mecanismos secundários atuam nas bordas das estruturas maiores, iniciando um processo de cascata e formando estruturas menores. Enquanto as bolhas estão derivando para leste, estes mecanismos secundários atuam formando localmente estruturas de menores escalas. A formação de estruturas menores pode ocorrer tanto localmente devido a processos de instabilidade secundários, ou como resultado do decaimento das estruturas maiores pelo processo de difusão;

- Os gráficos de VTEC em PAL e SJC apresentaram um pico que se formou durante o dia, associado ao desenvolvimento da anomalia equatorial, e um pico secundário recorrentemente observado no período noturno que está associado a ressurgência/retração da crista da anomalia;

- Constatou-se que as condições ionosféricas nas latitudes de PAL e SJC, contribuíram para a manutenção das irregularidades, principalmente as de maiores escalas, até pouco antes do amanhecer. Valores altos de  $h'F$  representam um fator positivo para desestabilizar a ionosfera e contribuir na formação das irregularidades, mesmo as de menores escalas (RAY; RAUL; DASGUPTA, 2006). Em diversos casos também foi observado uma deriva brusca de  $h'F$  próximo ao horário do pico pré-reversão, uma assinatura típica dos efeitos dos campos elétricos de dínamo mapeados para baixas latitudes. Valores altos de  $h_pF2$  também aparecem favorecer a evolução das irregularidades, como nos casos de 11-12/01/2008 e 03-04/12/2008 sobre PAL. Uma ionosfera elevada favorece a evolução e a longevidade das irregularidades e a ação de mecanismos de instabilidade secundários que contribuem para o surgimento de estruturas menores. Dados de  $f_oF2$  e VTEC também ajudam a compreender a formação das irregularidades de menor escala, uma vez que seu surgimento deve ser favorecido em ambiente de maior densidade eletrônica;

- Os processos de perda por recombinação eletrônica, aliado ao processo de difusão do plasma ao longo das linhas do campo magnético, atuam para que as irregularidades decaiam mais rapidamente, principalmente as de menores escalas. Isso explica as várias assinaturas de flutuação no ROT e cintilações cessarem mais cedo do que os espalhamentos nos ionogramas;

- O estudo de alguns casos também sugere a influência dos ventos neutros termosféricos meridionais sobre a velocidade da deriva do plasma e, em consequência, da altura da camada ao longo da noite;

- Os valores do gradiente latitudinal da densidade eletrônica ( $dNm/dLat$ ) entre PAL e SJC foi empregado como uma medida da intensidade de ionização da anomalia equatorial.

Valores positivos representam gradientes de densidade para o equador e valores negativos para os polos. Fortes gradientes para os polos tendem a conduzir a geração de irregularidades menores, pois representam um maior desenvolvimento da anomalia.

Neste trabalho a falta de dados, seja devido a nuvens que impediu os registros das imagens pelo imageador, perda da qualidade do sinal e presença de ruídos nos registros de ionossonda, ou outro fator, certamente ocasionou a perda de possíveis outros casos de simultaneidade na ocorrência de irregularidades. A análise visual e individual dos dados de cada instrumento obtidos ao longo de três anos demandou tempo, assim como expressar os resultados de forma gráfica com os detalhes necessários. Desta forma, espera-se que esta dissertação possa servir como fonte de informação e com potencial para futuras pesquisas. A maioria dos fatores discutidos neste estudo que trata da formação das irregularidades ionosféricas está bem estabelecida pela comunidade científica, porém nunca haviam sido investigados para um período atípico de extremo mínimo na atividade solar. Todavia, entende-se que apenas com o emprego de um modelo que descreva fielmente o comportamento da ionosfera para a região tropical brasileira, será possível avaliar mais detalhadamente diversos aspectos tratados nesta pesquisa, principalmente no que concerne aos mecanismos secundários de instabilidades que, efetivamente, atuam na geração das irregularidades de menores tamanhos de escala.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDU, M. A. et al. A new aspect of magnetic declination control of equatorial spread F and F region dynamo. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, p. 14897-14904, 1992.
- ABDU, M. A. et al. Equatorial spread F occurrence statistics in the American longitudes: Diurnal, seasonal and solar cycle variations. **Advances in Space Research**, v. 22, n. 6, p. 851–854, 1998.
- BANKS, P. M.; KOCKARTS, G. **Aeronomy**. 1 ed. San Diego, CA: Academic press, 1973.
- BATISTA, I. S. et al. Equatorial ionosphere vertical plasma drift model over the Brazilian region. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. A5, p.10887–10892, 1996.
- BEACH, T. L. **Global positioning system studies of equatorial scintillations**. 1998. 335 p. Tese (Ph.D in Electrical and Computer Engennering) Cornell University, 1998.
- CAMPBELL, W. W. Note on the Spectrum of the Aurora Borealis. **Astrophysical Journal**, v. 2, p.162. 1895.
- CANDIDO, C. M. N. **Estudos de irregularidades no plasma da camada ionosférica F equatorial e de baixas latitudes no setor longitudinal brasileiro**. 2008. Tese (Doutorado em Física Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espacial, São José dos Campos, 2008.
- CHAPMAN, S. Upper atmospheric nomenclature. **Journal of Geophysical Research**, v.55, n.4, p. 395–399, 1950.
- CHEN, W. S. et al. Digisonde spread F and GPS phase fluctuations in the equatorial ionosphere during solar maximum. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, p. A12305, 2006. doi:10.1029/2006JA01168.
- COSTA, E.; KELLEY, M. C. Linear theory for the collisionless drift wave instability with wavelengths near the ion gyroradius. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 83, n. A9, p. 4365–4368, 1978.
- CUEVA, R. Y. C. **Eletrodinâmica das irregularidades ionosféricas em baixas latitudes e caracterização das plumas em três setores de longitude**. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.
- DASHORA, N.; TAORI, A.; PATRA, A. K. Multi-instrument observations of winter solstice F-region irregularities during the low solar activity. **Indian Journal of Radio & Space Physics**, v. 41, p 220-232, Apr. 2012.
- DAVIES, K. **Ionospheric Radio**. Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom. 1990.
- EMMERT, J. T.; LEAN, J. L.; PICONE, J. Record-low thermospheric density during the 2008 solar minimum. **Geophysical Research Letters**, v. 37, p. L12102, 2010. doi:10.1029/2010GL043671.
- FEJER, B. G.; SCHERLISS, L. On the variability of equatorial F-region vertical plasma drifts. **Journal of Atmospheric Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, n. 9, p. 893-897, 2001.

FEJER, B. G.; SCHERLIESS, L.; PAULA E. R. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. a9, p 19,859-19,869, 1999.

GILLMOR, C. S. Wilhelm Altar, Edward Appleton, and the Magneto-Ionic Theory. **Proceedings of the American Philosophical Society**, v. 126, n. 5, p. 395-440, 1982.

HAERENDEL, G. **Theory of equatorial spread F**. Garching, Germany: ,Max Planck Institut für Physik und Astrophysik, 1974. (Report of Max Planck Institut für Physik und Astrophysik).

HARGREAVES, J. K. **The upper atmosphere and solar-terrestrial relations - An introduction to the aerospace environment**. 1 ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1979. v.1.

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

HEELIS, R. A. et al. Electrical coupling of the E- and F-regions and its effect on F-region drifts and winds. **Planetary Space Science**, v. 22, p. 743-756, 1974.

HOFMANN-WELLENHOF, B. et al. **GPS: theory and practice**. Wien: Springer-Verlag, 1994. 355 p.

HUANG C. S. et al. Bubbles and depletions - Evolution of equatorial ionospheric plasma bubbles and formation of broad plasma depletions measured by the C/NOFS satellite during deep solar minimum. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n.A03309, 2011.

HUDA, J. D. Physical mechanism of the lower-hybrid drift instability in a collisional plasma. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 43, p. 775-778, 1981.  
<[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(81\)90053-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(81)90053-2)>.

HUDSON M. K.; KENNEL C. F.; KAW P. K. A two-step drift mode theory of equatorial spread-F. **Eos Trans. of AGU**, v. 55, p. 381, 1974.

HUDSON, M. K. **Equatorial spread F: Low frequency modes in a collisional plasma**. 1974. Thesis (Ph.D) California University, Los Angeles, 1974.

HUDSON, M. K.; KAW, P. K.; KENNEL, G. F. 2-Step drift mode theory of equatorial spread-F. **Transactions-American Geophysical Union**, v.54, n.11, p. 1147-1147, 1973.

HUDSON, M. K.; KENNEL, C. F. Linear theory of equatorial spread-F. **Journal of Geophysical Research**, v. 80, p. 4581, 1975.

HUNSUCKER, R. D. **Radio Techniques for Probing the Terrestrial Ionosphere**. Berlin: Springer-Verlag, 1991.

HYSELL, D. L. et al. Topside equatorial ionospheric density, temperature, and composition under equinox, low solar flux conditions. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 120, p. 3899–3912, 2015. doi:10.1002/2015JA021168.

ITU. **Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications.**

Geneva: ITU, 2015. (Recommendation ITU-R V.431-8). Disponível em:

<[http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-8-201508-I!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-8-201508-I!!PDF-E.pdf)>.

JANET, E. S. et al. Day/night whole sky imagers for 24-h cloud and sky assessment: history and overview. **Applied Optics**, v. 52, n. 8, p. 1605-1616, 2013.

<https://doi.org/10.1364/AO.52.001605>

KANTOR, I. J. et al. Total ionospheric electron content from GPS measurements over the Brazilian region. **Geofísica Internacional**, v. 39, n. 1, p. 81-85, 2000.

KELLEY, M. C. **The Earth's Ionosphere: Plasma and electrodynamics.** 1 ed., Itaca, CA: Academic Press, 1989. (International geophysics series; v. 42)

KELLEY, M. C. **The earth's ionosphere: Plasma physics and electrodynamics.** 2 ed. Amsterdam: Elsevier, 2009. (International geophysics series; v. 96)

KESKINEN, M. J.; OSSAKOW, S. L.; FEJER, B. G. Three-dimensional nonlinear evolution of equatorial ionospheric spread-F bubbles. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 16, p.1855. doi:10.1029/2003GL017418. 2003

KIRCHHOFF, V. W. J. H. Campos Elétricos na Região Ionizada da Atmosfera. **Revista Brasileira de Física**, v.11, n.3, p. 711-725, 1981.

KRASOVSKY, V. I.; SHEFOV, N. N.; YARIN, V. I. Atlas of the Airglow Spectrum 3000-12,400 Å, **Planetary and Space Science**, v. 9, n. 12, p 883-915, 1962.

KUO, F. S.; CHOU, S. Y.; SHAN, S. J. Comparison of topside and bottomside irregularities in equatorial F region ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. A2, p.2193-2199, 1998.

LÁZARO, M. A. **Características das ondas de gravidade observadas na região central do Brasil.** 2010. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia). Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2010.

LEE, J. et al. Monitoring and Mitigation of Ionospheric Anomalies for GNSS-Based Safety Critical Systems: A review of up-to-date signal processing techniques. **IEEE Signal Processing Magazine**, v.. 34, n.5, p. 96-110, Sept. 2017.

MENDILLO, J. et al. Investigations of thermospheric-ionospheric dynamics with 6300Å images from the Arecibo Observatory. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. A4, p. 7331-7343, 1997.

MENDILLO, M.; BAUMGARDNER, J. Airglow characteristics of equatorial plasma depletions. **Journal Geophysics Research**, v. 87, p. 7641-7652, 1982.  
doi:10.1029/JA087iA09p07641

MOLDWIN, M. **An introduction to Space Weather.** New York: Cambridge University Press, 2008.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo Navstar: GPS: descrição, fundamentos e aplicações.** São Paulo: Editora UNESP, 2000. 287 p.

MONTEIRO, A. A. **Estudo do acoplamento mesosfera-ionosfera por meio de ondas de gravidade**. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, 2012.

MUELLA, M. T. A. H. et al. GPS L1-frequency observations of equatorial scintillations and irregularity zonal velocities. **Surveys in Geophysics**, v. 35, p. 335-357, 2014.

MUELLA, M. T. A. H. **Morfologia e Dinâmicas das Irregularidades Ionosféricas de Pequena Escala e Imageamento Ionosféricos por GPS**. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, 2008.

MUELLA, M. T. A. H. **Ventos Termosféricos Meridionais Inferidos por Meio de Sondagens Ionosféricas**. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, 2004.

MUELLA, M. T. A. H., et al. Scintillation-producing Fresnel-scale irregularities associated with the regions of steepest TEC gradients adjacent to the equatorial ionization anomaly. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. A03301, 2010. doi:10.1029/2009JA014788.

MURALIKRISHNA, P., VIEIRA, L. P. Equatorial F-region irregularities generated by the Rayleigh-Taylor instability mechanism - rocket observations from Brazil. **Rev. Bras. Geof.**, v. 25, n. 2, p. 135-149, 2007. doi: 10.1590/S0102-261X2007000600016.

MYER, G. T. **Ionospheric Scintillation Effects on GPS Measurements and Algorithms to Improve Positioning Solution Accuracy**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 2017.

ODRIOZOLA S. S. et al. Rocket in situ observation of equatorial plasma irregularities in the region between E and F layers over Brazil. **Annales Geophysicae**, v. 35, p. 413-422, 2017.

PANAGOPOULOS, A. D. Propagation Phenomena and Modeling for Fixed Satellite Systems: Evaluation of Fade Mitigation Techniques. In: KANATAS, A. G.; PANAGOPOULOS, A. D. **Radio Wave Propagation and Channel Modeling for Earth-Space Systems**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.

PARK, J. et al. Mitigation of Ionospheric Effects on GNSS Positioning at Low Latitudes. **Journal of the Institute of Navigation**, v. 64, n. 1, p. 67-74, 2017.

PIGGOT, W. R.; RAWER, K. **U.R.S.I. Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction**. 2 ed. Warsaw, Poland: World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, 1972. (Report UAG, n. 23A).

PILLAT, V. G. **Estudo da ionosfera em baixas latitudes através do modelo computacional lion e comparação com parâmetros ionosféricos observados**. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Universidade Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2006.

PILLAT, V. G. et al. A computational tool for ionosonde CADI's ionogram analysis. **Computers & Geosciences**, v. 52, p. 372-378, 2013. 10.1016/j.cageo.2012.11.009.

PILLAT, V. G.; FAGUNDES, P. R. Uvida Univap Digital Ionosonde Data Analysis. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 7., ENCONTRO DE

PÓS-GRADUAÇÃO, 4., São José dos Campos, 2004. **Anais...** São José dos Campos: Univap, 2004. p. 1178-1183.

PILLAT, V. G.; GUEDES, J. R. A.; FAGUNDES, P. R. Programa para análise de imagens dos fotômetros imageadores: UASDA – Univap All Sky Data Analysis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMORO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 1691-1698.

PIMENTA, A. A. **Estudo da deriva zonal e dinâmica das bolhas de plasma na região tropical**. 2003. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 2003.

PRÖLSS, G. W. **Physics of the Earth's Space Environment**. 1. ed. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.

JAMJAREEGULGARN, Punyawit et al. A new expression for computing the bottomside thickness parameter and comparisons with the NeQuick and IRI-2012 models during declining phase of solar cycle 23 at equatorial latitude station, Chumphon, Thailand. **Advances in Space Research**, v. 60, n. 2, p. 329-346, 2017.

RAY, S., PAUL, A., DASGUPTA, A. Equatorial scintillations in relation to the development of ionization anomaly. **Annales Geophysicae**, v. 24, p. 1429-1442. doi:10.5194/angeo-24-1429-2006, 2006.

REES, M. H. **Physics and chemistry of the upper atmosphere**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

RISHBETH, H. Apresentação: **The Global E-Region Dynamo**. AGU Conference on Magnetosphere-Ionosphere Coupling in the Solar System. Yosemite National Park, California. February 6-8. 1974. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=qu14eR\\_bu-U](https://www.youtube.com/watch?v=qu14eR_bu-U)>

RISHBETH, H. Polarization fields produced by winds in the equatorial F-region. **Planetary Space Science**, v. 19, p. 357-369, 1971.

RISHBETH, H. The F-Region Dynamo. **Journal of Atmospheric Terrestrial Physics**, v. 43, n. 5/6, p. 387-392, 1981.

RISHBETH, H. The Ionospheric E-layer and F-layer dynamos – a tutorial review. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 59. n. 15, p. 1873-1880, 1997.

RODRIGUES, F. S. Equatorial spread-F irregularity characteristics over São Luís, Brazil, using VHF radar and GPS Scintillation Techniques. **Radio Science**, v. 39, p. RS1S31, 2004. doi:10.1029/2002rs002826.

RODRIGUES, F. S. et al. Equatorial spread F irregularity characteristics over São Luís, Brazil, using VHF radar and GPS scintillation techniques. **Radio Science**, v. 39, n. RS1S31, 2004. doi:10.1029/2002RS002826.

SAHAI, Y. et al. OI 630 nm imaging observations of equatorial plasma depletions at 16° S dip latitude. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 56, p. 1461-1475, 1994.

SAHAI, Y. et al. Plasma irregularities in the tropical F-region detected by OI 7774 Å and 6300 Å nightglow measurements, **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. A5, p. 3496–3500, 1981. doi:10.1029/JA086iA05p03496.

SCHERER, K. et al, **Space Weather: the physics behind a slogan**. Berlin: Springer, 2005. (Lecture Notes Physics, n.656). DOI: 10.1007/b100037.

SCHUNK, R. W.; NAGY, A. F. **Ionospheres - physics, plasma physics, and chemistry**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

SHIELDS, J. E. et al. Day/night whole sky imagers for 24-h cloud and sky assessment: history and overview. **Optical Society of America**, v. 52, no. 8, p., 2013

SILVA, M. H. D. **Estudo da espessura equivalente ionosférica durante um ano de baixa atividade solar**. 2013. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Universidade do Vale do Paraíba, 2013.

SPACE WEATHER PREDICTION CENTER (SWPC)/National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). **Solar Cycle Progression**, 2017. Disponível em: <<http://legacy-www.swpc.noaa.gov/SolarCycle/>>.

STONEBACK, R. A. et al. Observations of quiet time vertical ion drift in the equatorial ionosphere during the solar minimum period of 2009. **Journal of Geophysical Research**, v.116, p. A12327, 2011. doi:10.1029/2011JA016712.

SULTAN, P. J. Linear theory and modeling of the Rayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread F. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, p. 26 875-26 891, 1996.

TSUDA, T.; SATO, T.; MATSUSHITA, S. Ionospheric irregularities and the cross-field plasma instability. **Journal of Geophysical Research**, v. 74, n. 11, p. 2923-2932, 1969.

VALENTIM, A. M. S. **Campos Elétricos e Derivas do Plasma na Ionosfera Equatorial do setor Americano durante Tempestades Magnéticas**. Tese (Doutorado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

VALLADARES, C. E. et al. The multi-instrumented studies of equatorial thermosphere aeronomy scintillation system: Climatology of zonal drifts. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 101, p. 26,839–26,850, 1996. doi:10.1029/96JA00183.

VICKRY, J.F., KELLEY, M.C. The effects of a conducting E layer on classical F region cross-field plasma diffusion. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, p. 4461-4468, 1982.

WANG, G. J. et al. Ionospheric plasma bubbles observed concurrently by multi-instruments over low-latitude station Hainan. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 120, n. 3, p 2288-2298, 2005. Doi <https://doi.org/10.1002/2014JA020245>

WOODMAN, R. F.; LA HOZ, C. Radar observations of f region equatorial irregularities. **Journal of Geophysical Research**, v. 81, p. 5447–5466, 1976.

WRASSE, C. M. **Estudos de geração e propagação de ondas de gravidade atmosféricas**. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

YNTEMA, L. On the brightness of the sky and total amount of starlight. **Astronomical Laboratory at Groningen**, v.22, p.1-55, 1909. (Harvard smithsonian Center for Astrophysics) Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1909PGro...22....1Y>>. Acesso em: 21 maio 2018.

#### REFERENCIAS CONSULTADAS

PILLAT, V. G.; GUIMARAES, L. N. F. Identificação do perfil da ionosfera utilizando lógica nebulosa: parte I. **TEMA (São Carlos)**, São Carlos, v. 15, n. 1, p. 47-57, Abril 2014, doi:10.5540/tema.2014.015.01.0047.

PETERSON, V.L. E VANZANDT, T.E., O(1 D) Quenching in ionospheric F-region. *Planetary and Space Science*, v.17, no.10, p.1725, 1969.

RODITI, I. **Dicionário Houaiss de Física**. Rio de Janeiro: Editora Objetiva, 2005, p. 166.