

Universidade do Vale do Paraíba  
IP&D Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento

**ESTUDO DE MÚLTIPLAS ESTRATIFICAÇÕES DA CAMADA-F  
IONOSFÉRICA EM REGIÕES DE BAIXA LATITUDE E  
EQUATORIAL**

ALEXANDRE TARDELLI

São José dos Campos, SP

2016

ALEXANDRE TARDELLI

**ESTUDO DE MÚLTIPLAS ESTRATIFICAÇÕES DA CAMADA-F  
IONOSFÉRICA EM REGIÕES DE BAIXA LATITUDE E  
EQUATORIAL**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Doutor em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes

São José dos Campos, SP

2016

## Ficha Catalográfica

--

Autorizo para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, por processos fotocopiadores ou transmissão eletrônica, desde que citada a fonte.

Assinatura da Aluno:

Data da defesa: 25/ 02/ 2016.

ALEXANDRE TARDELLI

**ESTUDO DE MÚLTIPLAS ESTRATIFICAÇÕES DA CAMADA-F  
IONOSFÉRICA EM REGIÕES DE BAIXA LATITUDE E  
EQUATORIAL**

Tese de Doutorado \_\_\_\_\_ como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Física e Astronomia, 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:

Banca examinadora

São José dos Campos, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2016.

*“La pensée ne doit jamais se soumettre, ni à un dogme, ni à un parti, ni à une passion, ni à un intérêt, ni à une idée préconçue, ni à quoi que ce soit, si ce n’est aux faits eux-mêmes; parce que, pour elle se soumettre, ce serait cesser d’exister.”*

**Henri Poincaré**



## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em especial à minha esposa Flávia, que sempre esteve ao meu lado durante toda a trajetória percorrida, dos momentos mais agradáveis aos mais adversos, é sim uma grande e admirável mulher.

Aos meus filhos Ana Flávia, Bianca e Alexandre.

À minha querida mãe Zilda Simões Tardelli (*in memoriam*) e meu querido pai Euripes Tardelli (*in memoriam*).

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes, pela atenção dedicada e completo comprometimento com todo o trabalho feito.

À Universidade do Vale do Paraíba e à FVE pela bolsa de estudos concedida durante esses 4 anos.

Aos membros da banca examinadora, pela contribuição feita através dos comentários e sugestões, que ajudaram a enriquecer este texto.

Aos demais professores do Instituto de Pesquisas e Desenvolvimento IP&D, pela dedicação, atenção e comprometimento que sempre demonstraram, em especial aos Professores Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes (Guga) e Dr. José Ricardo Abalde. Gostaria também de agradecer ao Prof. Dr. Maurício Bolzan (UFG), pelo constante incentivo.

À todos os colegas do IP&D que também participaram dessa conquista.

Aos meus familiares, minha esposa Flávia, meus filhos Ana Flávia, Bianca e Alexandre, minhas irmãs Kátia e Cristiane, meus sogros Antônio e Ivone Coelho, pessoas especiais.

# ESTUDO DE MÚLTIPLAS ESTRATIFICAÇÕES DA CAMADA-F IONOSFÉRICA EM REGIÕES DE BAIXA LATITUDE E EQUATORIAL

## Resumo

O mecanismo para explicar a formação de camada F3 leva em conta a combinação dos efeitos da deriva vertical do plasma  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  e a interação do vento meridional, que flui a partir do hemisfério em verão para o hemisfério em inverno. Além disso, ondas de gravidade, com comprimento de onda vertical maior do que a extensão vertical da região F, podem criar condições favoráveis para a formação de camada F3. Recentemente, foi proposto que durante condições geomagneticamente calmas e perturbadas, um campo elétrico zonal não-uniforme no equador geomagnético, podem estratificar a camada F2, formando uma camada F3 e até mesmo uma camada F4, na parte superior do perfil de densidade de elétrons. Recentemente foram observados eventos de quádrupla estratificação (camada StF-4) da região F da ionosfera sobre Palmas TO (PAL), região próxima ao equador magnético, no setor brasileiro. Neste trabalho, apresenta-se pela primeira vez um estudo da variação sazonal da camada StF-4, em função do ciclo solar, em duas regiões, PAL, e São José dos Campos SP (SJC), região de baixa latitude. Apresenta-se também resultados do comportamento da camada F3 para ambas as localidades estudadas (PAL e SJC). Os resultados foram obtidos através de ionossondas digitais do tipo CADI, pertencentes à rede de ionossondas da UNIVAP. Dentre os principais resultados obtidos, pode-se destacar que, em PAL, a frequência de ocorrência de camada StF-4, é maior durante os períodos de inverno. Além disso, é de notar que, a formação de camada StF-4 é maior em HSA do que durante LSA. Em SJC, não percebe-se correlação da formação de camada StF-4 com o período de atividade solar.

**Palavras-chave:** camada F3, quarta estratificação StF-4, Ionosfera equatorial e de baixa latitude.

# STUDY OF IONOSPHERIC F-LAYER MULTIPLE STRATIFICATION IN LOW LATITUDE AND NEAR EQUATORIAL REGION

## Abstract

The mechanism to explain the formation of F3-layer takes into account the combination of effects of vertical  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  drift and meridional wind flowing from the summer hemisphere to the winter hemisphere. Also, gravity waves with vertical wavelength larger than the F-layer vertical extension create favorable conditions for F3-layer formation. In addition, recently, it was proposed that during geomagnetic quiet and disturbed condition, a non-uniform in height zonal electric field at the geomagnetic equator, can form additional peaks (F3 layer and F4 layer) in the upper part of the electron density profile. Recently it was observed the F-layer quadruple-stratification (StF-4 layer) in Palmas TO (PAL), a near equatorial region, in Brazilian sector. This paper presents for the first time the seasonal variation of StF-4 layer, depending on the solar cycle, in both regions, PAL, and São José dos Campos SP (SJC), low-latitude region. It is presented also the results of the F3 layer behavior for both locations studied (PAL and SJC). The results were obtained through the digital ionosondes type CADI, belonging to ionosondes network UNIVAP. Among the main results obtained, it can be noted that, in PAL, the frequency of occurrence of StF-4 layer, is greater during the winter time. Furthermore, it is noted that the formation of StF-4 layer is higher for HSA than LSA. In SJC, does not see a correlation of the formation of StF-4 layer with the period of solar activity.

**Keywords:** F3 layer, quadruple-stratification StF-4, equatorial and low latitude ionosphere.

## Lista de Figuras

### Páginas

- Figura 1 – Mapa indicando a localização geográfica dos observatórios e ionossondas das duas regiões estudadas: Palmas - TO e São José dos Campos – SP..... 30
- Figura 2 – Distribuição vertical da temperatura na homosfera e heterosfera. A termosfera é verificada em dois perfis, um representando um período de baixa atividade solar (LSA – *Low Solar Activity*), e outro um período de alta atividade solar (HSA – *High Solar Activity*). ..... 34
- Figura 3 – Distribuição diurna da composição atmosférica e ionosférica, baseada em medições de espectrômetros de massa. A distribuição neutra e de íons abaixo de 250 km de altitude foram obtidas através de medições de foguetes, sobre White Sands, Novo México (USA). A distribuição de hélio é baseada em medições noturnas. A distribuição verificada acima de 250 km de altitude são medições de satélites. .... 37
- Figura 4 – Composição iônica diurna sobre White Sands, Novo México (32°N, 106°O). Os constituintes são mostrados detalhadamente na lateral esquerda inferior da figura. A curva indicando Total, informa a soma de todas as concentrações de íons. A curva pontilhada ( $N_e$ ) é o perfil de concentração de elétrons, determinada a partir de um ionograma..... 40
- Figura 5 – Distribuição eletrônica média com os principais íons nas respectivas camadas da ionosfera..... 42
- Figura 6 – (A) Efeito fonte: padrão de desvio de plasma em baixas latitudes devido à ação combinada da deriva  $E \times B$  (próximo do equador magnético) e uma difusão para baixo ao longo das linhas de campo geomagnético. (B) Anomalia de ionização equatorial (EIA): linhas de contorno de densidade eletrônica calculada ( $\log_{10} n_e$ ) como função da altitude e do dip latitude, sob condições do solstício de dezembro. 48

Figura 7 – Modelo numérico do perfil de densidade eletrônica, considerando a presença de deriva ExB e vento, na região do equador magnético. Os perfis apresentados são em intervalos de 1h e início às 08:00LT até às 12:00LT (A), e intervalos de 2h e início às 14:00LT até às 22:00LT (B).....	52
Figura 8 – Perfis de densidade eletrônica ao longo do caminho do satélite IK-19 em 04 de julho de 1979, derivadas de ionogramas IK-19 (linhas grossas sólidas), e dados teóricos obtidos através do GSM TIP (linhas finas sólidas) em diferentes horários UT. As linhas tracejadas e pontilhadas mostram os perfis de densidade eletrônica simulados pelo modelo GSM TIP às 19:45 e 22:00 UT.....	53
Figura 9 – Representação de ionograma indicando a presença das componentes: ordinária (linha contínua) e extraordinária (linha tracejada). A linha pontilhada indica o possível perfil de frequência de plasma e a altura real ( $h_m F2$ ).....	57
Figura 10 – Representação esquemática de um sistema de ionossonda. O sinal transmitido é representado pela sigla Tx, e o sinal recebido é representado pela sigla Rx. ....	62
Figura 11 – Ionograma apresentando a posição dos parâmetros de frequência crítica e altura virtual mínima das respectivas camadas (PAL – 18 de agosto de 2002). Os traços verticais na cor vermelha, indicam as frequências críticas das respectivas estratificações; os traços horizontais, na cor azul, indicam as alturas virtuais mínimas das respectivas estratificações.....	62
Figura 12 – Sistema de transmissão e recepção da Ionossonda digital do tipo CADI instalado na Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP, em São José dos Campos SP.....	64
Figura 13 – Antenas de transmissão (imagem da esquerda “a”) e recepção (imagem da direita “b”) da Ionossonda digital do tipo CADI instalado na Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP, em São José dos Campos SP.....	64
Figura 14 – Exemplo de um ionograma gerado diretamente no sistema da CADI, referente ao primeiro modo de operação, onde é possível se obter ionogramas através da digitalização de até 180 frequências, num range de frequência entre 1 e 20 MHz. ....	66

Figura 15 – Exemplo de um ionograma gerado diretamente no sistema da CADI, referente ao segundo modo de operação, onde é possível se obter ionogramas rápidos (a cada 100 s), nas frequências 3,1, 4,1, 5,1, 6,3, 7,1 e 8,1 MHz.....	66
Figura 16 – Tela inicial do software UDIDA. ....	67
Figura 17 – Exemplo de ionograma obtido pela Ionossonda do tipo CADI instalada em São José dos Campos SP no dia 20 de Novembro de 2003, e analisada pela interface gráfica do software UDIDA para a leitura de dados de ionogramas.....	68
Figura 18 – Exemplo da interface gráfica mostrando as linhas de iso-freqüência utilizando ionogramas obtidos em Palmas no dia 03 de Junho de 2002. ....	68
Figura 19 – (a) mostra as camadas F1, F2 e F3 da região F. (b) Mostra as múltiplas estratificações StF-1, StF-2, StF-3 e StF-4 da região F. Em ambos os casos as linhas azuis (horizontal) delimita as respectivas estratificações. ....	70
Figura 20 – Variações dos índices $F_{10,7}$ , Dst, e Kp durante o período de junho, julho e agosto de 2002 (HSA). ....	72
Figura 21 – Ionogramas obtidos em PAL em 03 de junho de 2002, mostrando exemplos da evolução temporal dos ionogramas com a presença das multiplas estratificações da região F - StF-1, StF-2, StF-3, e StF-4. ....	74
Figura 22 – Ionogramas obtidos em PAL em 09 de julho de 2002, mostrando exemplos da evolução temporal dos ionogramas com a presença das multiplas estratificações da região F - StF-1, StF-2, StF-3, e StF-4. ....	75
Figura 23 – Ionogramas obtidos em PAL em 18 de agosto de 2002, mostrando exemplos da evolução temporal dos ionogramas com a presença das multiplas estratificações da região F - StF-1, StF-2, StF-3, e StF-4. ....	76
Figura 24 – Variação diária da altura virtual para as frequências: 6,3 (preto), 7,1 (verde), e 8,1 (laranja) MHz em 18 de agosto de 2002. A linha horizontal em azul representa a formação de camada F3, a linha horizontal em vermelho representa a formação de camada StF-4. O painel inferior da figura mostra as isofrequências no período das 06:00 LT às 18:00 LT. O painel superior mostra uma ampliação do período das 11:40 às 12:40 LT.....	78

Figura 25 – Variação diária da altura virtual da região F observada nas frequências 6,3, 7,1, e 8,1 MHz em 03 de Junho de 2002. As linhas horizontais cheias em azul e vermelho indicam a ocorrência de camada F3 e da quarta estratificação StF-4, respectivamente.....	79
Figura 26 – Variação diária da altura virtual da região F observada nas frequências 6,3, 7,1, e 8,1 MHz em 09 de Julho de 2002. As linhas horizontais cheias em azul e vermelho indicam a ocorrência de camada F3 e da quarta estratificação StF-4, respectivamente.....	80
Figura 27 – Variação diária da altura virtual da região F observada nas frequências 6,3, 7,1, e 8,1 MHz para os dias 03 de Junho, 09 de Julho, 18 de Agosto e 19 de Agosto de 2002. As linhas horizontais cheias em azul e vermelho indicam a ocorrência de camada F3 e da quarta estratificação StF-4, respectivamente. ....	81
Figura 28 – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F para os meses de Junho, Julho e Agosto de 2002. As linhas em azul, vermelho e cinza indicam a ocorrência das camadas F3 e StF-4, e períodos sem dados, respectivamente.....	82
Figura 29 – Variações dos índices $F_{10,7}$ , Dst, e Kp durante o período de 2002 a 2006. ....	84
Figura 30 – Sequência de ionogramas obtidos no sítio de Palmas (PAL) durante os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006. A sequência de três ionogramas tem uma resolução temporal de 5 min. Os ionogramas apresentados no topo da figura são referentes ao dia 09 de Julho de 2002, abaixo, referentes ao dia 30 de Junho de 2003, 02 de Janeiro de 2004, 12 de Maio de 2005, e 07 de Setembro de 2006, respectivamente.....	86
Figura 31 – Sequência de ionogramas obtidos no sítio de São José dos Campos (SJC) durante os anos de 2003 e 2004, períodos em que foram identificadas a formação de StF-4. A sequência de três ionogramas tem uma resolução temporal de 5 min. Os ionogramas apresentados no topo da figura são referentes ao dia 20 de Novembro de 2003, abaixo, referentes ao dia 22 de Novembro de 2003, 28 de Novembro de 2004, e 05 de Dezembro de 2004, respectivamente.....	87

- Figura 32 – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2002, analisadas em Palmas. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados. .... 91
- Figura 33 – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2003, analisadas em Palmas. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados. .... 92
- Figura 34 – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2004, analisadas em Palmas. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados. .... 93
- Figura 35 – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2005, analisadas em Palmas. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados. .... 94
- Figura 36 – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2006, analisadas em Palmas. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados. .... 95
- Figura 37 – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2002, analisada em São José dos Campos. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados. .... 99
- Figura 38 – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2003, analisada em São José dos Campos. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados. .... 100
- Figura 39 – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2004, analisada em São José dos Campos. As

barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados. ....	101
Figura 40 – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2005, analisada em São José dos Campos. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados. ....	102
Figura 41 – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2006, analisada em São José dos Campos. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados. ....	103
Figura 42 – Tempo acumulado de observação mensal da camada F3 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, analisadas em Palmas. As barras em azul indicam o tempo total de duração da observação da camada F3, as barras em cinza indicam o percentual do período sem dados no respectivo mês.....	106
Figura 43 – Tempo acumulado de observação mensal da camada F3 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, analisadas em São José dos Campos. As barras em azul indicam o tempo total de duração da observação da camada F3, as barras em cinza indicam o percentual do período sem dados no respectivo mês.....	107
Figura 44 – Tempo acumulado de observação da StF-4 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, analisadas em Palmas. As barras em vermelho indicam o tempo total de duração da observação da StF-4, as barras em cinza indicam o percentual do período sem dados no respectivo mês.....	110
Figura 45 – Tempo acumulado de observação da StF-4 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, analisadas em São José dos Campos. As barras em vermelho indicam o tempo total de duração da observação da StF-4, as barras em cinza indicam o percentual do período sem dados no respectivo mês.....	111
Figura 46 – Visão geral mensal das ocorrências das camadas F3 e StF-4 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, analisadas em Palmas. O gráfico informa também a estatística de dias com camadas F3 e StF-4, calculadas em relação ao período com dados úteis (em cinza). ....	114

Figura 47 – Visão geral mensal das ocorrências das camadas F3 e StF-4 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, analisadas em São José dos Campos. O gráfico informa também a estatística de dias com camadas F3 e StF-4, calculadas em relação ao período com dados úteis (em cinza).....	115
Figura 48 – O painel (a) mostra a variação da média mensal do índice F10,7 para o período de 2002 a 2006. O painel (b) mostra a ocorrência mensal (em número de dias) das camadas F3 e StF-4 para o período de 2002 a 2006, analisadas em PAL; as barras em cinza indicam o número de dias no mês com dados, e as barras em azul e vermelho indicam o número de dias no mês em que ocorreram a formação das camadas F3 e StF-4, respectivamente.....	116
Figura 49 – O painel (a) mostra a variação da média mensal do índice F10,7 para o período de 2002 a 2006. O painel (b) mostra a ocorrência mensal (em número de dias) das camadas F3 e StF-4 para o período de 2002 a 2006, analisadas em SJC; as barras em cinza indicam o número de dias no mês com dados, e as barras em azul e vermelho indicam o número de dias no mês em que ocorreram a formação das camadas F3 e StF-4, respectivamente.....	117
Figura 50 – Média mensal de ocorrências de camadas F3 e StF-4, para o período de 2002 a 2006, analisadas em Palmas. As barras em azul representam a média de ocorrências de camada F3, e as barras em vermelho representam a média de ocorrências de camada StF-4, para os respectivos meses.....	118
Figura 51 – Média mensal de ocorrências de camadas F3 e StF-4, para o período de 2002 a 2006, analisadas em São José dos Campos. As barras em azul representam a média de ocorrências de camada F3, e as barras em vermelho representam a média de ocorrências de camada StF-4, para os respectivos meses. ....	119
Figura 52 – Relação entre os argumentos de comprimentos, $ds$ (representando o argumento do fluxo de radiação penetrando a atmosfera) e $dz$ (argumento zenith), num plano estratificado da atmosfera terrestre. ....	131

## Lista de Tabelas

### Páginas

Tabela 1 – Limiar de ionização de átomos e moléculas, para comprimentos de onda $\lambda \leq 1028\text{Å}$ . .....	41
Tabela 2 – Dados das alturas virtuais h'F2, h'F3 e h'StF-4, referentes às camadas F2, F3 e a quarta estratificação StF-4, respectivamente, para os dias 03 de Junho, 09 de Julho e 18 de Agosto do ano de 2002. ....	73
Tabela 3 – Média mensal do índice F10,7 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006. ....	84

## Lista de abreviaturas e siglas

CADI	Canadian Advanced Digital Ionosonde
Dst	Disturbance storm time index
EIA	Equatorial Ionization Anomaly
EUV	Extremo ultravioleta
GSM TIP	Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere, and Protonosphere
HF	High Frequency
HSA	High Solar Activity
kp	Planetary index
LT	Local Time
LSA	Low Solar Activity
MSTID	Medium-Scale Travelling Ionospheric Disturbance
PAL	Cidade de Palmas, no estado de Tocantins (TO)
SJC	Cidade de São José dos Campos, no estado de São Paulo (SP)
StF-1	Primeira estratificação da região F da ionosfera
StF-2	Segunda estratificação da região F da ionosfera
StF-3	Terceira estratificação da região F da ionosfera
StF-4	Quarta estratificação da região F da ionosfera
SUPIM	Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model
TID	Travelling Ionospheric Disturbance
UNIVAP	Universidade do Vale do Paraíba
UT	Universal Time
UV	Ultravioleta

## Lista de Símbolos

<b>B</b>	Fluxo de densidade magnética ou indução magnética
<b>E</b>	Vetor campo elétrico
$f$	Frequência de onda
$f_H$	Frequência de giro ou girofrequência
$f_p$	Frequência do plasma
$f_oE$	Frequência crítica ordinária da camada E da ionosfera
$f_oF$	Frequência crítica ordinária da camada F da ionosfera
$f_xE$	Frequência crítica extraordinária da camada E da ionosfera
$f_xF$	Frequência crítica extraordinária da camada F da ionosfera
$f_oStF - 4$	Frequência crítica ordinária da camada StF-4 da ionosfera
<b>g</b>	Aceleração gravitacional
<b>H</b>	Escala de altura atmosférica
$h_mF$	Altura real da camada F da ionosfera
$h_r$	Altura da ionosfera onde a onda de rádio frequência é refletida
$h'$	Altura virtual mínima de uma camada ionosférica
$h'F$	Altura virtual mínima da camada F da ionosfera
$h' StF - 4$	Altura virtual mínima da camada StF-4 da ionosfera
n, N	Concentração de espécies (usados para íons e elétrons)
$N_e$	Densidade eletrônica
$p$	Pressão de constituintes
$q, Q$	Taxa de produção de íons
<b>T</b>	Temperatura absoluta
$\mathbf{u}_E$	Deriva eletromagnética do plasma
$u_g$	Velocidade de grupo da onda

$u_p$	Velocidade de fase da onda
$v$	Velocidade de deriva do plasma
$X, Y, Z$	Parâmetros da teoria magneto-iônica

### Símbolos gregos

$\alpha$	Constante do coeficiente de perda quadrática
$\beta$	Constante do coeficiente de perda linear
$\Gamma$	Tempo total de viagem de um pulso de onda eletromagnética (em rádio frequência) refletindo na ionosfera
$\lambda$	Comprimento de onda
$\mu$	Índice de refração
$\mu'$	Índice de refração de grupo
$\sigma$	Seção cruzada (ou seção de choque)
$\tau$	Profundidade óptica
$\varphi$	Fluxo de radiação
$\chi$	Ângulo zenital
$\omega$	Frequência angular

### Constantes físicas

$c$	Velocidade da luz no espaço livre	$[c = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}]$
$e$	Módulo da carga do elétron	$[e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}]$
$\varepsilon_0$	Permissividade do espaço livre	$[\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2]$
$k$	Constante de Boltzmann	$[k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}]$
$m_e$	Massa de repouso do elétron	$[m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}]$
$m_p$	Massa de repouso do próton	$[m_p = 1,672 \times 10^{-27} \text{ kg}]$

## Símbolos matemáticos especiais

$\nabla$	Operador nabla
$\partial$	Operador da derivada parcial
$d$	Operador da derivada total
$\Sigma$	Operador somatório

## Sumário

Lista de Figuras .....	11
Lista de Tabelas.....	18
Lista de abreviaturas e siglas.....	19
Lista de Símbolos .....	20
1 INTRODUÇÃO .....	26
1.1 Objetivos .....	28
2 ATMOSFERA NEUTRA E IONIZADA .....	31
2.2 Atmosfera ionizada.....	34
2.2.1 Processos de transporte na ionosfera.....	37
2.2.2 Formação da Ionosfera .....	39
2.2.3 Regiões da Ionosfera .....	41
2.2.3.1 Região D .....	42
2.2.3.2 Região E .....	44
2.2.3.3 Região F.....	45
2.2.4 Efeito fonte equatorial e a Anomalia de ionização equatorial.....	46
2.2.5 Camada F3 da ionosfera.....	49
3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA.....	54
3.1 Conceitos da Teoria Magneto-iônica.....	54
3.1.1 Conceitos de frequência crítica e altura virtual.....	59
3.2 Ionossondas utilizadas neste trabalho .....	63

3.3	Interface gráfica para análise dos ionogramas.....	67
3.4	Redução de dados .....	69
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>70</b>
4.1	Padronização das informações nos ionogramas.....	70
4.2	Observações da quarta estratificação StF-4 em Palmas .....	71
4.3	Análise da variação sazonal e dependência do ciclo solar das camadas F3 e StF-4 em PAL e SJC.....	83
5	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>120</b>
5.1	Conclusões .....	120
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	123
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>125</b>
	<b>APÊNDICE – A PROCESSO DE FOTOIONIZAÇÃO NA IONOSFERA .....</b>	<b>131</b>
	<b>APÊNDICE – B ARTIGO .....</b>	<b>139</b>



# 1 INTRODUÇÃO

O estudo da estratificação das camadas ionosféricas tem os registros iniciais em meados dos anos 1920, em estudos apresentados por E. V. Appleton (1927); Bailey D. K. (1948) em um estudo sobre o comportamento geomagnético da camada F2, verificou que a região F da ionosfera durante o período diurno, tem a tendência de ser subdividida em duas camadas, e as vezes, verificou a existência de múltiplas estratificações da camada F2. No ano de 1949, um pesquisador chamado Hon Yung Sen, apresentou uma análise da estratificação da região F da ionosfera, em uma região próxima ao equador magnético, neste estudo, Sen nomeou as estratificações encontradas como: F1, F'2 F"2 e F2. Como percebe-se, a investigação de múltiplas estratificações é uma área de pesquisa bem antiga, e um dos aspectos interessantes da variabilidade dia-a-dia da eletrodinâmica da ionosfera. Os estudos mostram que a formação de estratificações são relacionadas à eletrodinâmica da região F com o acoplamento termosfera-ionosfera (SEN, 1949; SKINNER et al., 1954; HEISLER, 1962). Recentemente essas investigações relacionadas com múltiplas estratificações na região F, mais precisamente ao estudo do comportamento da camada F3 tornaram-se uma área de pesquisa ativa novamente (BALAN e BAILEY, 1995; BALAN et al., 1997, 1998, 2000, 2008; JENKINS et al., 1997; LYNN et al., 2000; DEPUEV e PULINETS, 2001; PULINETS, 2001; PULINETS et al., 2002; BATISTA et al, 2002, 2003.; UEMOTO et al., 2006; FAGUNDES et al, 2007, 2011; PAZNUKHOV et al., 2007; ZAIN et al., 2008; SREEJA et al., 2009a, 2009b, 2010, ZHAO et al., 2009; KLIMENKO e KLIMENKO, 2011; KLIMENKO et al., 2012a, 2012b, 2012c; KARPACHEV et al., 2012, 2013.; KOTOVA et al., 2015; MRIDULA e PANT, 2015).

Nos setores brasileiro (região equatorial) e indiano, é relatado que a ocorrência da camada F3 é maior durante os meses de verão e nos períodos de baixa atividade solar (LSA) (BATISTA et al., 2002 e RAMA RAO et al., 2005). Por outro lado, na região próxima à crista sul (verificado no Brasil) da anomalia de ionização equatorial (EIA - *Equatorial Ionospheric Anomaly*), a ocorrência da camada F3, durante o período de alta atividade solar (HSA), é relatado ser 11 vezes maior do que durante a baixa atividade solar (LSA) (Fagundes et al., 2011).

A investigação de múltiplas estratificações da região F, usando observações terrestres feitas através de equipamentos de ionossondas, esteve por muito tempo restringida à tripla-estratificação dessa camada ionosférica (F1, F2 e F3). Após o primeiro relato de observação de quádrupla estratificação da região F (Sen, 1949) sobre Cingapura, é notado que a área de pesquisa da quádrupla estratificação (StF-4) foi negligenciada. A ocorrência de camada StF-4, vista no lado inferior do perfil eletrônico da ionosfera através de ionossondas, não tem sido relatada desde Sen (1949). No entanto, a observação terrestre de camada F3 durante os períodos geomagnéticos calmo e perturbado, tem aumentado significativamente nos últimos anos. A falta de observação de camada StF-4 pode estar relacionada ao seu curto tempo de vida e / ou que os pesquisadores não inspecionaram com cuidado os ionogramas disponíveis. Como mencionado, devido ao curto tempo de vida da camada StF-4, a capacidade de identificar essa quarta estratificação no ionograma depende também da experiência pessoal do pesquisador.

A ionosfera equatorial e de baixa latitude possui particularidades que a torna complexa; o campo magnético norte-sul quase paralelo à superfície terrestre, associado ao campo elétrico (no sentido leste) diurno, produz uma deriva do plasma, nomeada como deriva  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ , que empurra o plasma local para altitudes superiores.

Após, o plasma então difunde para baixo ao longo das linhas de campo magnético devido a ação gravitacional e a gradientes de pressão, sendo distribuído em regiões de baixas latitudes, causando uma maior concentração da densidade eletrônica em torno de  $\pm 17^\circ$  de latitude, formando a EIA. Um mecanismo para explicar a formação de camada F3 foi proposto por Balan e Bailey (1995) e Jenkins et al. (1997). Esse mecanismo leva em conta a combinação de efeitos da deriva vertical do plasma  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  no sentido para cima, que ocorre durante o dia, como dito anteriormente, e a ação de vento neutro meridional, que flui a partir do hemisfério em verão para o hemisfério em inverno, atuando no aumento da concentração de plasma, difundido, no hemisfério em inverno, gerando regiões assimétricas na EIA. É consenso que o comportamento da ionosfera, e com principal foco a região F, é afetado não somente pela ação da deriva  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  e de ventos neutros, mas também de outros processos dinâmicos existentes, como ondas planetárias, TIDs e ondas de gravidade. Neste contexto, Fagundes et al. (2007) propõem que as ondas de gravidade, com comprimento de onda vertical, maior do que a extensão vertical da região F podem criar condições favoráveis para a formação de camada F3. Recentemente, Klimenko et al. (2012c) propõem que durante as tempestades geomagnéticas, a não uniformidade no campo elétrico em regiões próximas ao equador geomagnético, podem formar picos adicionais (camada F3 e camada F4).

## 1.1 Objetivos

Este trabalho inicialmente, tinha como objetivo principal, estudar a formação e a evolução da camada F3 em regiões equatorial e de baixa latitude, Palmas TO e São José dos Campos SP, respectivamente. Porém, com o decorrer das primeiras

análises feitas através da ionossonda instalada em Palmas (10,28°S, 48,33°O; dip latitude 5,5°), verificamos um comportamento diferenciado do perfil eletrônico da camada F2. Identificamos além da ocorrência de camada F3, uma quádrupla estratificação da região F, a qual a nomeamos como camada StF-4, uma referência ao termo em inglês *quadruple-Stratification of F-layer*. É a primeira vez que é relatada a ocorrência de camada StF-4 no continente americano (TARDELLI e FAGUNDES, 2015). A Figura 1 apresenta a localização geográfica dos sítios estudados, PAL e SJC.

Como base objetiva para o estudo das camadas F3 e StF-4, podemos citar os principais temas pesquisados:

- i. Estudar o comportamento da camada F3 e da quarta estratificação StF-4 nas regiões equatorial (Palmas TO - 10,28°S, 48,33°O; dip latitude 5,5°S; doravante designada como PAL) e de baixa latitude (São José dos Campos SP - 23,21°S, 45,97°O; dip latitude 17,6°S; doravante designada como SJC), no setor brasileiro;
- ii. Estudar a correlação da formação da camada StF-4 com a camada F3 em ambas as regiões (PAL e SJC);
- iii. Variação sazonal das camadas F3 e StF-4 em ambas as regiões (PAL e SJC);
- iv. Estudar o comportamento das camadas F3 e StF-4 em função do ciclo solar 23 (período de 2002 a 2006).

**Figura 1** – Mapa indicando a localização geográfica dos observatórios e ionossondas das duas regiões estudadas: Palmas - TO e São José dos Campos – SP.



Fonte: Google Maps, Inav/Geosistemas SRL, 2014.

## 2 ATMOSFERA NEUTRA E IONIZADA

### 2.1 Atmosfera neutra

A descrição da atmosfera terrestre é relacionada com sua composição química, temperatura e, com os processos físicos que dominam o ambiente em estudo. Chapman (1950) desenvolveu um sistema de nomenclaturas para descrever as diferentes partes da atmosfera, este sistema é baseado na variação temperatura com a altitude. As estratificações da atmosfera são então nomeadas como: troposfera, estratosfera, mesosfera e a termosfera (RISHBETH e GARRIOTT, 1969).

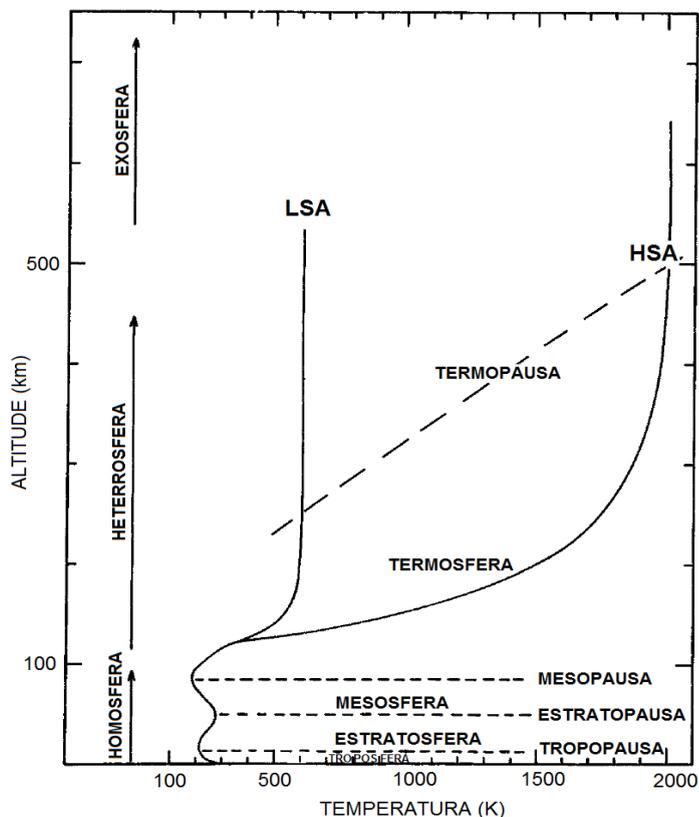
A troposfera é a região que está situada entre a superfície terrestre até aproximadamente 15 km de altitude. Na troposfera, a variação vertical da temperatura é inversamente proporcional com o acréscimo da altitude, a temperatura da atmosfera diminui numa taxa média de 6 K/km, essa tendência sofre uma inversão na região chamada tropopausa, e é caracterizada como o ponto de separação entre a troposfera e a próxima camada, a estratosfera. A localização vertical da tropopausa pode variar com a latitude, e portanto é verificada em um valor máximo de aproximadamente 18 km de altitude, no equador, e a 8 km de altitude nas regiões polares, aproximadamente. A estratosfera está situada entre o fim da tropopausa até aproximadamente 50 km de altitude, e se caracteriza pelo aumento da temperatura com a altitude, que ocorre devido à absorção de UV pelo O<sub>3</sub> (ozônio) e também por vapores de água. Quando foi descoberta, cerca de 1900 por deBort, a estratosfera era considerada uma região calma e sujeita a difusão molecular, atualmente sabe-se da existência de fenômenos turbulentos nesta região. Em aproximadamente 50 km de altitude situa-se a estratopausa, região que separa a

estratosfera da próxima camada, a mesosfera. Verificamos até este ponto então duas regiões que tem características inversas. A troposfera possui um gradiente negativo de temperatura e a estratosfera, se caracteriza pelo gradiente positivo de temperatura. A próxima camada é chamada de mesosfera, uma região de decréscimo da temperatura com a altitude com comportamento análogo ao da troposfera. O perfil de temperatura da mesosfera decai até aproximadamente 85 km de altitude, onde são observados os valores mínimos de temperatura desta camada. Do ponto de vista dos processos químicos que ocorrem na mesosfera, é considerada uma camada mais complexa se comparada à estratosfera ou à troposfera, isso devido a processos de oxidação e de penetração de Ultravioleta (UV), que, por processo dissociativo, formam moléculas mais complexas (BANKS e KOCKARTS, 1973; RISHBETH e GARRIOTT, 1969).

As camadas mais baixas da atmosfera terrestre, citadas acima, dividem a mesma característica hidrodinâmica, e constituem a região chamada de homosfera, região da qual observa-se que a média da massa molecular não se altera significativamente. O ponto que separa a mesosfera da próxima camada, a termosfera, é chamado mesopausa. A próxima camada acima da mesopausa é a termosfera, que está situada entre 100 e 500 km de altitude. Nesta camada o gradiente de temperatura torna a ser positivo, cujas temperaturas são superiores a 1000 K em períodos de baixa atividade solar, isto devido a absorção de energia na faixa do espectro eletromagnético do Extremo Ultravioleta (EUV) e a baixa taxa de emissão térmica da região. Devido a dependência do gradiente de temperatura na termosfera à absorção de radiação UV, o comportamento da termosfera sofre grande influência da energia solar (BANKS e KOCKARTS, 1973; RISHBETH e GARRIOTT, 1969).

Com relação à combinação química, a atmosfera terrestre pode ser dividida nas seguintes regiões: homosfera e heterosfera. A homosfera é basicamente composta pelos gases:  $N_2$  (78%),  $O_2$  (21%), Ar (1%),  $CO_2$  (0,03%) – composição por volume, há também a presença de vapores de água. A aplicação do termo homosfera é utilizado às regiões de mais baixa altitude onde a taxa de mistura dos gases da atmosfera é suficientemente rápida para garantir uma composição homogênea para os principais constituintes. Acima da homosfera está a heterosfera, que é a região da atmosfera superior onde ocorrem a mistura dos constituintes através de ventos e processos difusivos, e esses por sua vez, não afetam significativamente a distribuição vertical individual dos gases desta região. No topo da heterosfera, há a predominância de gases leves (hidrogênio – H). A frequência de colisão ainda é grande o suficiente para garantir a existência de uma distribuição de velocidades do tipo maxwelliana. O caminho livre médio para colisões entre as partículas varia inversamente com a concentração de partículas. Esta por sua vez, irá diminuir exponencialmente com a altitude. Portanto, temos que o caminho livre médio irá aumentar exponencialmente à medida que aumenta a altitude. A frequência de colisões irá diminuir e, a distribuição de velocidades não será mais maxwelliana, isto ocorre numa altura dita “crítica”, e é a partir deste ponto que se inicia a exosfera. Na exosfera a ação do campo gravitacional terrestre é bem inferior comparada à ação do campo em altitudes menores, e por isso, partículas que entram nesta região com energia suficiente, podem escapar da atmosfera com grande facilidade. Neste ponto da atmosfera superior, a predominância de concentração é de hidrogênio e hélio. A Figura 2 apresenta o perfil vertical de temperatura típico para a homosfera e heterosfera (BANKS e KOCKARTS, 1973; RISHBETH e GARRIOTT, 1969).

**Figura 2** – Distribuição vertical da temperatura na homosfera e heterosfera. A termosfera é verificada em dois perfis, um representando um período de baixa atividade solar (LSA – *Low Solar Activity*), e outro um período de alta atividade solar (HSA – *High Solar Activity*).



Fonte: Adaptado de **Banks e Kockarts (1973)**.

## 2.2 Atmosfera ionizada

A ionosfera é a região da termosfera em que aproximadamente 1% da atmosfera está ionizada. Esta região se estende entre 60 a 1000 km de altitude, aproximadamente. A existência de uma região condutora e capaz de interferir em ondas eletromagnéticas, foi objeto de diversas especulações no meio científico. Carl F. Gauss, no ano de 1839, e mais tarde Lorde Kelvin, em 1860, ao estudarem o comportamento de flutuações do campo geomagnético da Terra, indicaram que tais flutuações eram produzidas por correntes atmosféricas, originadas na atmosfera

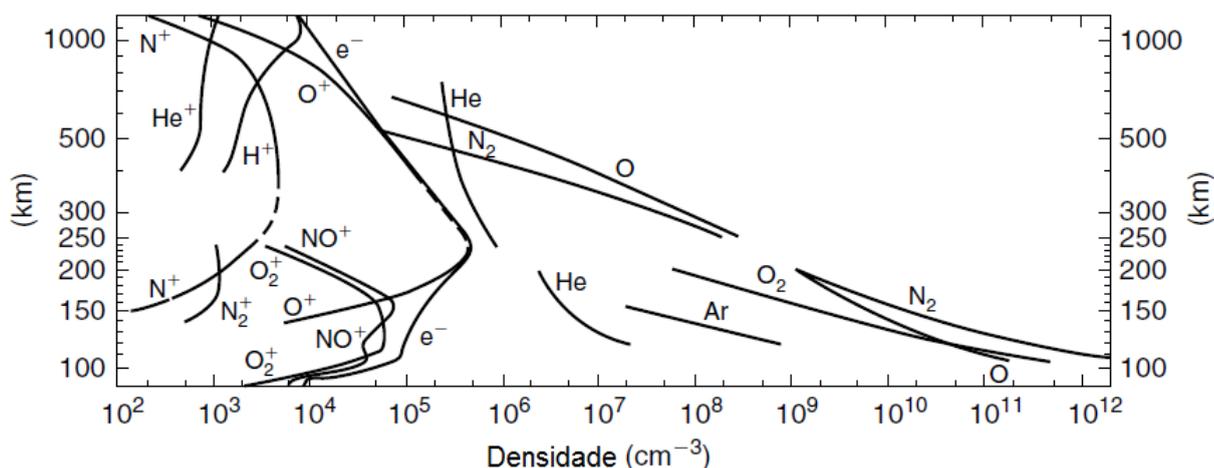
superior. Esta hipótese foi elaborada por Balfour Stewart, em 1882, onde atribuiu que as variações diárias regulares do campo geomagnético são sensíveis às correntes de dínamo, causadas por ventos de maré, que surgem devido à influência gravitacional do Sol e da Lua. A existência então de uma região composta por elétrons livres não fora aceita até por volta de 1900. O conceito de condutividade elétrica ainda era muito recente, pois em 1897 houve a descoberta do elétron, e da existência de íons, por volta de 1900. O experimento realizado por Marconi no ano de 1901, no qual promoveu a transmissão com sucesso de ondas de rádio entre a Inglaterra e Newfoundland (no Canadá), colaborou no entendimento desta região condutora. Em 1902, Kennelly e Heaviside, publicaram independentemente, hipóteses da existência de uma camada condutora na alta atmosfera e que ondas eletromagnéticas poderiam sofrer reflexão nesta camada. O processo de reflexão de ondas eletromagnéticas foi amplamente utilizado desde então, nas transmissões de sinais de rádio para comunicação e transferência de informações. Apenas duas décadas depois é que foi estabelecida a altura desta região condutora.

Na década de 1920, Appleton e Barnett, realizaram dois experimentos em que variavam o comprimento de onda transmitida, o primeiro experimento foi realizado em 11 de dezembro de 1924 e o segundo em 17 de fevereiro de 1925. Como resultado destes experimentos, foram obtidas evidências de uma sequência de máximos e mínimos na intensidade do sinal recebido (interpretado como sinal refletido). A altura estimada dessa reflexão foi em cerca de 90 km acima da superfície terrestre. Outros experimentos foram realizados por Appleton, agora alterando o ângulo de incidência das ondas transmitidas, e os resultados foram similares aos obtidos anteriormente. As observações realizadas até então, indicaram a existência de uma camada onde uma onda eletromagnética, em determinado

comprimento de onda, é refletida (camada de Kennelly-Heaviside). Posteriormente, a essa camada foi dado o nome de camada E, ou camada Appleton. No período de inverno de 1926-1927, Appleton verificou que, antes do amanhecer, a ionização da camada E sofria redução devido ao processo de recombinação. O sinal transmitido então indicou reflexão em uma altitude superior a 90 km, sugerindo a existência de uma próxima camada condutora, mais rica em ionização, que Appleton nomeou como camada F.

Como os átomos e moléculas na atmosfera estão sujeitos a ionização, o termo ionosfera é usado quando são estudados o comportamento de partículas ionizadas. A Figura 3 apresenta a distribuição da atmosfera neutra *versus* a atmosfera ionizada (ionosfera), sob condições de baixa atividade solar (LSA). Na Figura 3 pode-se distinguir parte da concentração de íons (ionosfera) da parte neutra, neste contexto, a máxima densidade iônica ( $O^+$ ) e eletrônica ( $e^-$ ) é observada próxima de  $10^6$  partículas. $cm^{-3}$  e altitude aproximadamente em 240 km (RISHBETH e GARRIOTT, 1969; WHITTEN e POPPOFF, 1971).

**Figura 3** – Distribuição diurna da composição atmosférica e ionosférica, baseada em medições de espectrômetros de massa. A distribuição neutra e de íons abaixo de 250 km de altitude foram obtidas através de medições de foguetes, sobre White Sands, Novo México (USA). A distribuição de hélio é baseada em medições noturnas. A distribuição verificada acima de 250 km de altitude são medições de satélites.



Fonte: adaptado de **Keley (2009)**.

### 2.2.1 Processos de transporte na ionosfera

O comportamento ionosférico é controlado por processos físicos que são expressados em termos das equações de conservação da massa, momentum e energia. Os perfis de concentração de íons são determinados pela concorrência entre os processos químicos e de transporte que ocorrem na ionosfera. A equação que expressa os processos de transporte na ionosfera é a equação da continuidade.

A dinâmica do plasma ionosférico pode ser afetada por ventos neutros, campos elétricos e magnéticos, gradientes de pressão, e efeitos da força gravitacional. Os ventos neutros são formados por movimentos de maré atmosférica, e surgem através de gradientes de pressão causados pelo aquecimento solar. Os campos elétricos podem ser produzidos por ventos neutros de marés, que por sua

vez, formam o dínamo da região E. O dínamo da região F é formado pelos ventos termosféricos.

Quando partículas carregadas estão sob a ação de campos elétrico e magnético, sofrem a ação destes através de um movimento perpendicular ao campo magnético, a deriva eletromagnética  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ . Devido ao fato que, na região onde as colisões com a atmosfera neutra são baixas, o movimento de íons e elétrons é controlado pelo campo magnético, a difusão imposta ao plasma pela força gravitacional e gradientes de pressão, se dará ao longo das linhas de campo geomagnético, e não na direção vertical. A equação da continuidade para a densidade de elétrons e íons (ou concentração)  $n$ , pode ser expressa como:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = q - L - \nabla \cdot (n\mathbf{v})$$

onde  $q$  representa a taxa de produção,  $L$  representa o processo de perda, que pode ser quadrático (característico das regiões D e E) ou linear (característico da região F), e  $\mathbf{v}$  é a velocidade de deriva do plasma. O termo de transporte pode ser expandido através da identidade vetorial:

$$\nabla \cdot (n\mathbf{v}) = n\nabla \cdot \mathbf{v} + \mathbf{v}\nabla n$$

o que mostra que, o efeito da deriva da densidade de elétrons depende em parte de um divergente de velocidade, e em parte, de um termo de advecção (movimento), referente a um gradiente pré-existente de densidade de elétrons. Na ionosfera equatorial existem frequentes gradientes horizontais de densidade de elétrons, e os movimentos horizontais de plasma também desempenham um papel importante na modelação da ionosfera (Rishbeth, 2000). Os ventos termosféricos meridionais, podem auxiliar no processo de deriva vertical do plasma, assim como a deriva

eletromagnética  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ . Porém, na região equatorial, devido à natureza das linhas de campo geomagnético, que são quase paralelas à superfície terrestre, a contribuição dos ventos meridionais para a deriva vertical do plasma, é anulada, restando apenas a ação da deriva eletromagnética  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ . Fora das regiões equatoriais, o movimento do plasma ionosférico pode sofrer a ação tanto da interação de campo elétrico com o campo geomagnético (deriva  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ), como dos ventos meridionais.

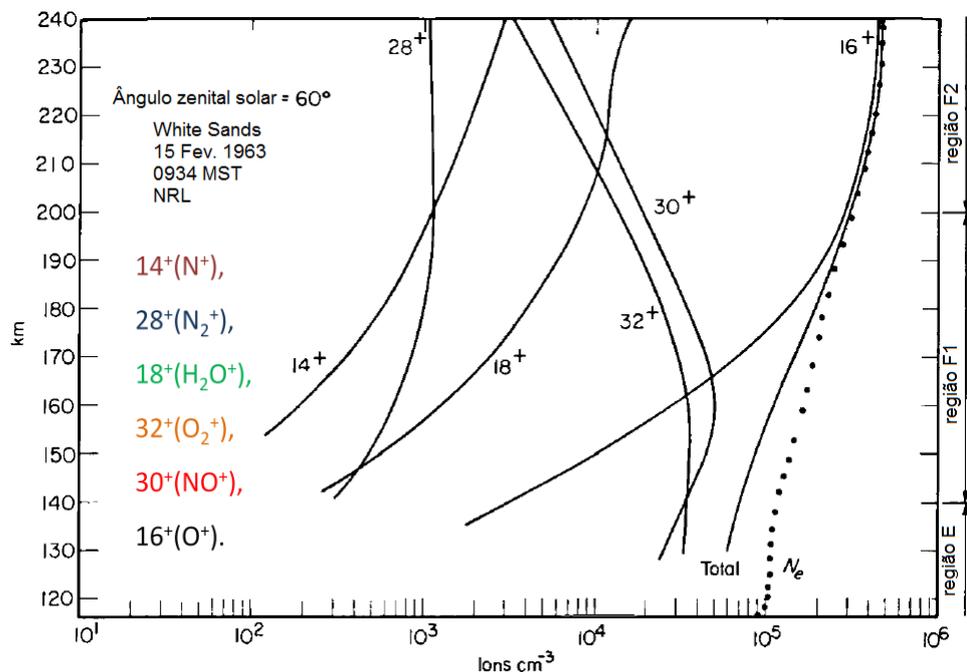
### 2.2.2 Formação da Ionosfera

Os constituintes que compoem a ionosfera surgem do processo de ionização; as fontes de ionização são, basicamente, fótons e precipitação de partículas de alta energia. O processo de ionização através da interação de fótons com constituintes neutros da atmosfera, é chamado de fotoionização, que ocorre em decorrência da absorção da radiação solar em ultravioleta. Esta radiação ioniza os constituintes O, O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>; esses íons então formados, possuem um papel inicial, num processo que levará a reações secundárias, que ocorrem entre íons e gases neutros.

A Figura 4 mostra um perfil típico de composição de íons na ionosfera num range de 120 km de altitude, abrangendo verticalmente parte da ionosfera. Durante o período diurno, os íons O<sub>2</sub><sup>+</sup> e o NO<sup>+</sup> predominam abaixo de 165 km de altura, e acima desta altura, predomina o íon O<sup>+</sup> (aproximadamente). Essa transição entre a dominância de íon molecular e atômico é consistente com a teoria das perdas lineares e quadráticas, que são peculiares a cada região ionosférica. Nas regiões D e E, são verificados processos de perda iônica quadrática; na camada F1 se verifica a transição do processo de perda iônica quadrática para a perda iônica linear. No

período da noite, a transição de dominância de íon molecular e atômico ocorre aproximadamente em 220 km de altura.

**Figura 4** – Composição iônica diurna sobre White Sands, Novo México (32°N, 106°O). Os constituintes são mostrados detalhadamente na lateral esquerda inferior da figura. A curva indicando Total, informa a soma de todas as concentrações de íons. A curva pontilhada ( $N_e$ ) é o perfil de concentração de elétrons, determinada a partir de um ionograma.



Fonte: adaptado de Rishbeth e Garriott (1969).

A Tabela 1 apresenta a relação dos principais constituintes atmosféricos que são ionizados em comprimentos de onda menores que 1028 angstrom ( $\lambda \leq 1028\text{\AA}$ ), sendo de grande importância na formação da ionosfera.

**Tabela 1** – Limiar de ionização de átomos e moléculas, para comprimentos de onda  $\lambda \leq 1028\text{\AA}$ .

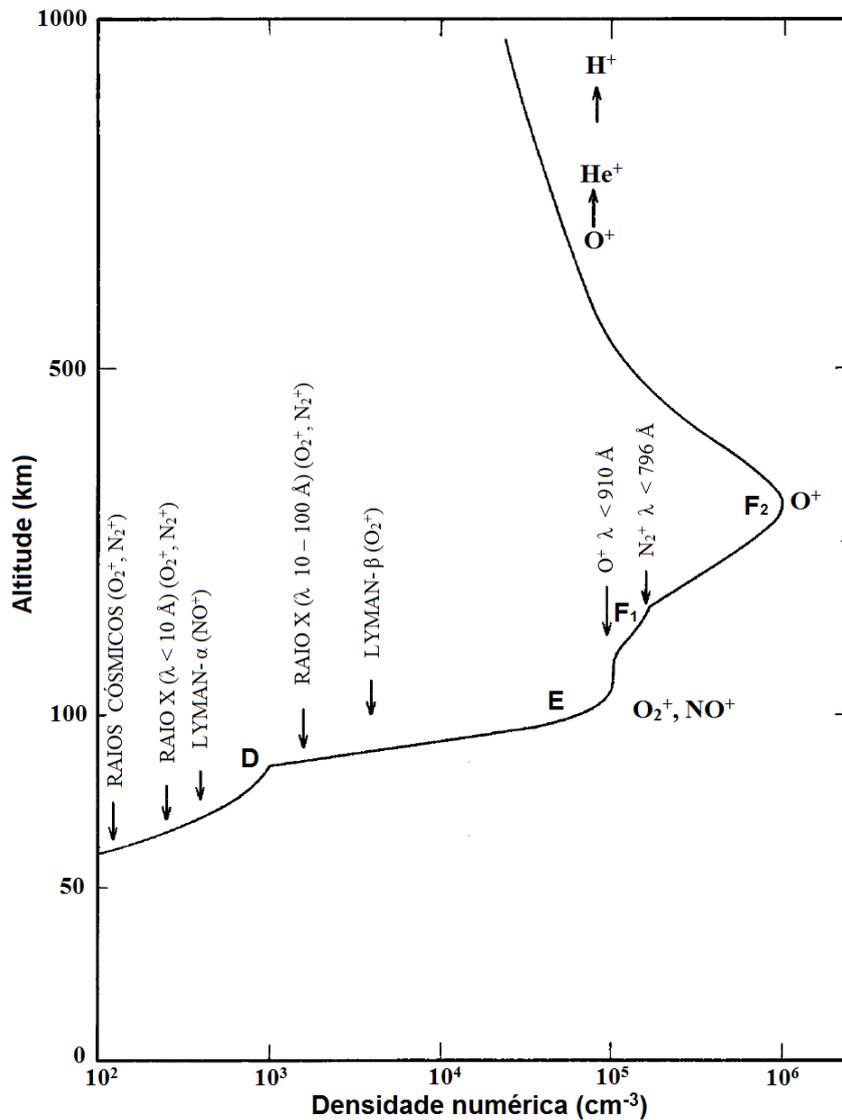
Constituinte	$\lambda$ (Å)	Constituinte	$\lambda$ (Å)	Constituinte	$\lambda$ (Å)	Constituinte	$\lambda$ (Å)
O <sub>2</sub>	1028	N <sub>2</sub> O	961	O	910	N <sub>2</sub>	796
NO <sub>2</sub>	1008	CH <sub>4</sub>	954	CO <sub>2</sub>	899	Ar	787
H <sub>2</sub> O	985	OH	940	CO	885	Ne	575
O <sub>3</sub>	969	H	911	N	852	He	504

A radiação em comprimentos de onda ( $\lambda$ ) mais longos, podem ter importância na ionização de componentes minoritário. Por exemplo, o óxido nítrico (NO), pela linha Lyman  $\alpha$  solar em  $\lambda=1216\text{\AA}$ , tem importante contribuição na formação da região ionosférica D. No Apêndice A, é apresentado o processo básico de absorção de radiação para a formação da ionosfera, através da fotoionização.

### 2.2.3 Regiões da Ionosfera

A ionosfera terrestre é normalmente dividida em regiões; esse comportamento é verificado em todas as latitudes. Os processos físicos dominantes nas diferentes latitudes possuem, em alguns casos, distinções. Porém a distribuição vertical de densidade eletrônica exibe similaridades nas diferentes latitudes. As diferentes camadas da ionosfera são normalmente divididas conforme o pico máximo de densidade, verificado numa certa altitude. Este padrão de máximos de ionização verificados delimita as regiões da ionosfera e, atualmente, são nomeadas como D, E e F. Nas regiões E e F, normalmente utiliza-se o termo “camada”, referenciando-se à subdivisão dentro de uma região. A Figura 5 mostra uma distribuição eletrônica média (comportamento diurno) com os principais íons (com as respectivas fontes ionizantes) nas várias camadas da ionosfera.

**Figura 5** – Distribuição eletrônica média com os principais íons nas respectivas camadas da ionosfera.



Fonte: adaptado de **Banks e Kockarts (1973)**.

### 2.2.3.1 Região D

A região D localiza-se entre o limite inferior da ionosfera (aproximadamente 60 km de altura) até cerca de 90 km acima da superfície terrestre. A densidade de elétrons é a mais baixa em comparação com as das demais regiões ionosféricas,

extinguindo-se durante a noite, sendo fracamente ionizada e não considerada como um plasma. A densidade neutra é bastante significativa sendo que, para qualquer estudo dessa região, torna-se essencial levar em consideração as colisões entre três corpos: íons, elétrons e partículas neutras.

Algumas características adicionais dessa região:

- alta taxa de recombinação;
- os íons predominantes são  $\text{NO}^+$  e  $\text{O}_2^+$ ;
- predominância das reações químicas mais importantes envolvendo os seguintes elementos O,  $\text{O}_3$ , NO,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ;
- presença dos metais alcalinos Na, K, Li;
- presença de íons negativos em proporções relevantes;
- presença de íons complexos que resultam da aglutinação de íons às moléculas de água.

Um processo dominante de perda iônica é o processo de perda quadrática  $L(n^+) = \alpha n_e^2$ , em que  $\alpha$  é um coeficiente de recombinação (RISHBETH e GARRIOTT, 1969; BANKS e KOCKARTS, 1973).

Radiações ionizantes dominantes – processo de produção:

- Raio X ( $\lambda < 10\text{\AA}$ ), que produz  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ;
- Radiação em Lyman- $\alpha$  ( $\lambda = 1216\text{\AA}$ ), que produz  $\text{NO}^+$ ;
- Raios cósmicos, que ionizam principalmente em alturas inferiores da região D, que produz  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ;
- Processos corpusculares - elétrons  $> 30$  keV e prótons  $> 1$  MeV.

### 2.2.3.2 Região E

A região E situa-se logo acima da região D, entre 90 e 150 km de altura aproximadamente. A região E tem predominância de formação no período diurno. Nos anos trinta uma forma especial da camada E foi detectada e mais tarde nomeada como “E esporádica”, ou Es. Esta camada apresenta alta densidade de elétrons com um pico, muitas vezes acima do pico da região E normal. A camada Es normalmente tem espessuras de alguns quilômetros, e ocorre entre 90 e 120 km de altura aproximadamente. São comumente detectadas em todas as latitudes, sendo que os motivos de sua formação não podem ser generalizados para todas as latitudes. Essa região é considerada a de máxima condutividade elétrica da ionosfera. Os íons predominantes são  $\text{NO}^+$  e  $\text{O}_2^+$ , e  $\text{N}_2^+$  com menor relevância.

Radiações ionizantes dominantes – processo de produção :

- Raios X ( $\lambda \sim 10 \text{ \AA} - 100 \text{ \AA}$ ) - produzem  $\text{O}_2^+$  e  $\text{N}_2^+$ ;
- Radiação em Lyman- $\beta$  ( $\lambda \sim 1026 \text{ \AA}$ ) – produz  $\text{O}_2^+$ ;
- Radiação em UV na linha de Lyman *continuum* ( $\lambda < 910 \text{ \AA}$ ) – produz  $\text{O}_2^+$ .

Processos dominantes de perda iônica:

- Recombinação eletrônica dissociativa:  $\text{XY}^+ + e \xrightarrow{\alpha_D} \text{X} + \text{Y}$ ;
- Troca de carga:  $\text{X}^+ + \text{YZ} \xrightarrow{\alpha} \text{XY}^+ + \text{Z}$ ;
- Processo de perda quadrática:  $L(n^+) = \alpha n_e^2$ .

### 2.2.3.3 Região F

A região F situa-se entre 150 e 1500 km de altura, aproximadamente. Como descrito no capítulo introdutório, a região F sofre estratificações em camadas, e normalmente são verificadas as camadas F1, F2 e de maneira esporádica surge uma camada F3. A camada F1 tem ocorrência diurna, desaparecendo ao anoitecer. Sua principal fonte de ionização é a radiação UV, sendo definida através de uma inflexão que estende-se de 150 a 200 km de altura (aproximadamente). Na camada F1 ocorre a transição entre os processos de perda iônica quadrática e linear. Os processos de perda iônica quadrática e linear e seus respectivos coeficientes,  $\alpha$  e  $\beta$ , têm características distintas: o coeficiente  $\alpha$  é dependente da temperatura e independente da altura; o coeficiente  $\beta$  sofre variação em função da concentração molecular, e decresce rapidamente com a altura (Processo de perda linear:  $L(n^+) = \beta n_e$ ).

A camada F2 tem comportamento diurno e noturno, sendo a única a permanecer durante a noite. É verificada a partir de 200 km de altura. A principal fonte de ionização é a radiação EUV e também comprimentos de onda do Raio-X. Os principais constituintes que são inicialmente ionizados na camada F2 são o O e N<sub>2</sub>. Devido à baixa densidade atmosférica em altas altitudes, a camada F2 se mantém durante à noite, principalmente pela baixa eficiência do processo de recombinação iônica.

A camada F3 foi proposta por Balan e Bailey (1995), e Jenkins et al. (1997); ela foi inicialmente chamada de camada G. É normalmente verificada em regiões próximas ao equador magnético e de baixas latitudes, tendo comportamento diurno.

Na próxima seção, são apresentados alguns processos que podem contribuir para a formação de camada F3, e uma breve discussão sobre o tema.

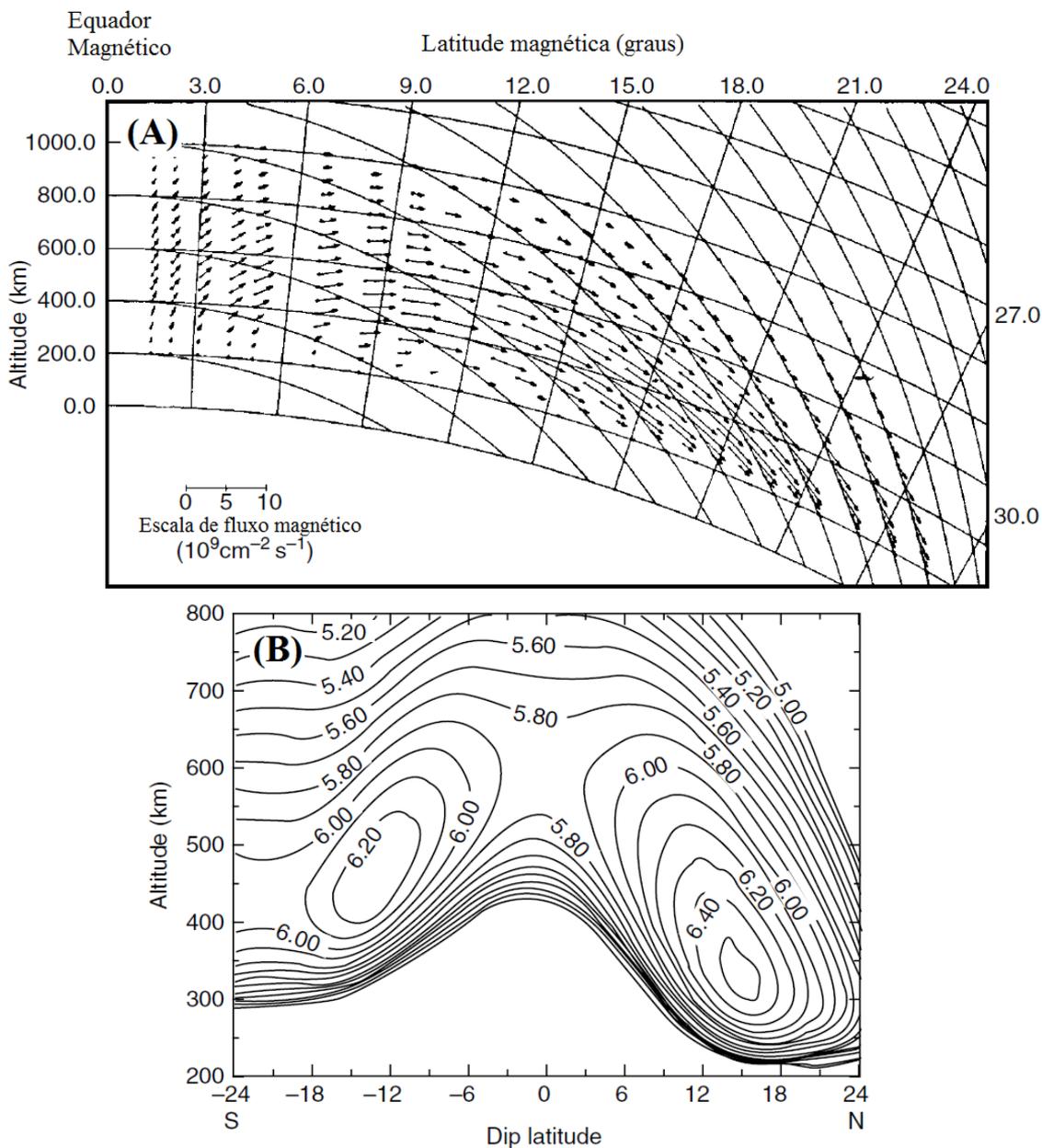
#### 2.2.4 Efeito fonte equatorial e a Anomalia de ionização equatorial

A ionosfera equatorial possui características importantes e peculiares. Nessa região, a configuração das linhas de campo geomagnético são quase paralelas à superfície terrestre. Essa geometria particular cria condições para a formação de irregularidades de vários tipos, tais como a formação de bolhas de plasma, efeito fonte equatorial (fonte de plasma equatorial) e a formação de regiões chamadas de EIA. O efeito da radiação solar (principal fonte de radiação) durante o período diurno faz com que seja produzida a máxima ionização na região equatorial. O plasma então produzido nessa região sofre a ação do campo elétrico zonal que é produzido na região E por ventos termosféricos e transmitido ao longo das linhas de campo geomagnético a altitudes da região F. No período diurno, o campo elétrico zonal é direcionado em sentido a oeste-leste. À noite, o campo elétrico zonal se inverte, indo sentido leste-oeste. Este campo elétrico, associado ao campo geomagnético (que é direcionado no sentido norte geográfico), gera uma força resultante perpendicular a ambos os campos. Essa força resultante faz com que o plasma ambiente derive (deriva eletromagnética  $\mathbf{u}_{E} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$ ) verticalmente para cima durante o dia. Essa deriva faz com que aumente a densidade de plasma em altas altitudes. Por consequência, este plasma é difundido para altitudes mais baixas, devido à ação da força gravitacional e gradientes de pressão. O plasma então se difunde ao longo das linhas de campo geomagnético, e é depositado em regiões diferentes de onde foi gerado, em aproximadamente  $\pm 17^\circ$  ( $\pm 2$ ) de latitude magnética com isso, são

formados dois pontos de picos de ionização, um de cada lado do equador magnético. Esses fenômenos combinados da deriva eletromagnética e difusão produzem um padrão de “fonte” ao movimento do plasma, que é normalmente nomeado como “efeito fonte”, ou “fonte de plasma equatorial”. Essas regiões onde são verificados os picos de ionização, são chamadas de EIA, também é conhecida como “anomalia Appleton”. A EIA varia durante o dia, com um máximo de ionização por volta das 14:00 LT.

As latitudes onde ocorrem os picos de densidade eletrônica são distribuídas de forma assimétrica pelas linhas de campo magnético; essa distribuição se dá em função da interação do plasma local com os ventos neutros meridionais, que sopram do hemisfério em verão para o hemisfério em inverno. Esses ventos atuam para transportar o plasma para cima (obliquamente seguindo os contornos das linhas de campo geomagnético) pelas linhas de campo no hemisfério em verão, e para baixo pelas linhas de campo no hemisfério em inverno. Essa interação auxilia na distribuição do plasma que está se difundindo pelas linhas de campo, até regiões de baixas latitudes. A Figura 6(A) mostra um padrão de desvio de plasma em baixas latitudes devido à ação combinada da deriva  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ , próximo do equador magnético e uma difusão para baixo ao longo das linhas de campo geomagnético, para demonstrar como atua o efeito fonte. A Figura 6(B) mostra linhas de contorno simbolizando a densidade eletrônica calculada, como função da altitude e do dip latitude. A distribuição apresentada pelas linhas de contorno da Figura 6(B) indica as regiões anômalas (EIA) de depósito de plasma, advindo da região equatorial, como também a assimetria na densidade eletrônica entre os hemisférios.

**Figura 6 – (A)** Efeito fonte: padrão de desvio de plasma em baixas latitudes devido à ação combinada da deriva  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  (próximo do equador magnético) e uma difusão para baixo ao longo das linhas de campo geomagnético. **(B)** Anomalia de ionização equatorial (EIA): linhas de contorno de densidade eletrônica calculada ( $\log_{10} n_e$ ) como função da altitude e do dip latitude, sob condições do solstício de dezembro.



Fonte: Adaptado de Schunk e Nagy (2009).

## 2.2.5 Camada F3 da ionosfera

Um dos aspectos interessantes da variabilidade dia-a-dia da eletrodinâmica ionosférica é a estratificação da região F da ionosfera. O estudo de múltiplas estratificações da região F normalmente é relacionado à formação de camada F3 em regiões próximas ao equador magnético e de baixas latitudes. Neste sentido, diversos trabalhos foram feitos para compreender melhor o comportamento e os mecanismos que favorecem a formação de camada F3, desde o trabalho apresentado por Bailey (1948), onde mostra evidências experimentais da tendência da camada F2 em subsidir-se, até os trabalhos de Balan et al. (2000), (2008); Batista et al. (2002), (2003); Depuev e Pulinets, (2001); Pulinets et al. (2002); Uemoto et al. (2006); Fagundes et al. (2007), (2011); Paznukhov et al. (2007); Zain et al. (2008); Sreeja et al. (2009a), (2009b), (2010), Zhao et al. (2009); Klimenko et al. (2011); Karpachev et al. (2012); Klimenko et al. (2012a), (2012b); Karpachev et al. (2013); Kotova et al. (2015); Mridula and Pant, (2015).

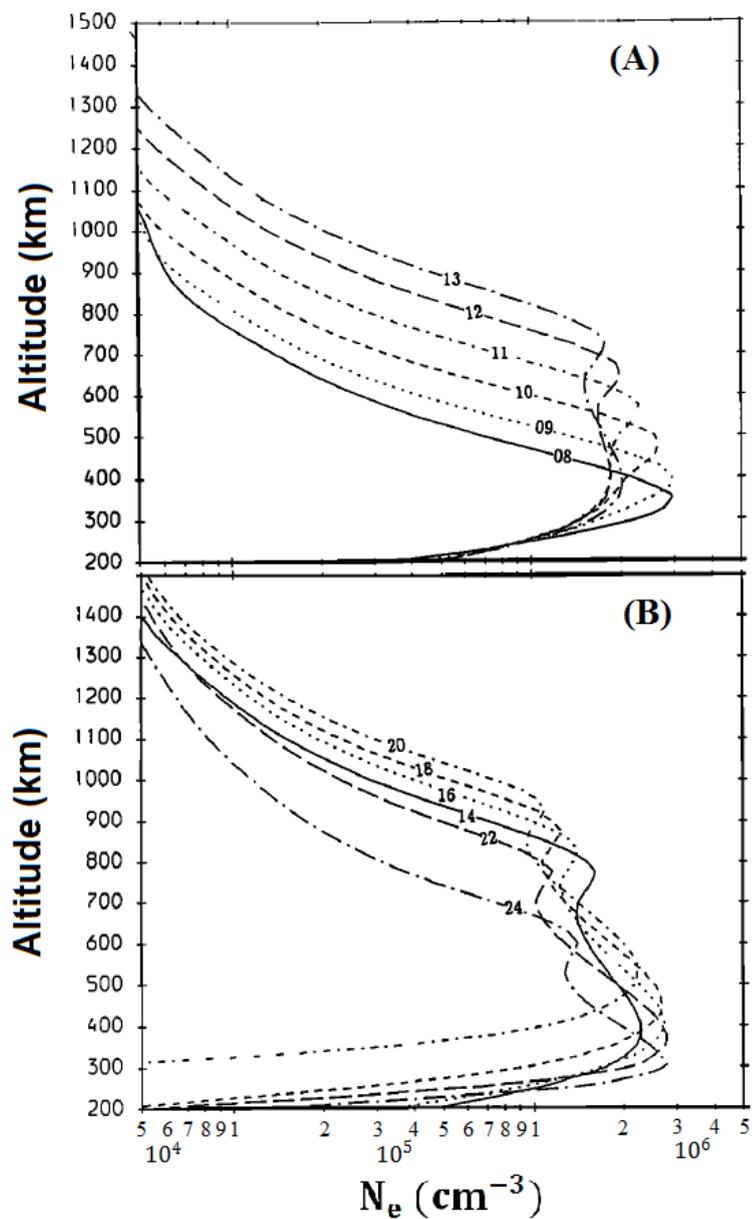
A formação da camada F3 na região equatorial pode ser explicada pela combinação da deriva vertical  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  da região F e dos ventos meridionais, soprando do hemisfério de verão para o de inverno. A combinação desses dois fatores atua de maneira a elevar a camada F2 e, assim, criar condições favoráveis à geração da camada F3 em regiões próximas ao equador magnético, durante o dia (BALAN et al., 1997; JENKINS et al., 1997). Porém, a máxima ocorrência da camada F3 ocorre entre o equador magnético e o pico da anomalia ionosférica equatorial. Entretanto, a formação da camada F3 na região próxima ao pico da EIA (em baixas latitudes), ainda é motivo de controvérsias. Rama Rao et al., (2005) e Fagundes et al., (2007), (2011) investigaram a formação da camada F3, próxima ao pico da anomalia

ionosférica equatorial, nos setores indiano e brasileiro, respectivamente. As suas investigações mostraram que, no setor indiano, não há registros da formação de camada F3, enquanto, no setor brasileiro, a camada F3 aparece frequentemente no verão e nos períodos de máxima atividade solar. Existem fortes indicações de que os distúrbios ionosféricos propagantes de média escala (MSTID), com amplitudes grandes, em baixas latitudes, no setor brasileiro, sejam as responsáveis pela geração da camada F3.

Além das técnicas experimentais utilizadas para o estudo da camada F3, tais como o uso de ionossondas e satélites, que estudam o perfil ionosférico de maneiras diferentes (*bottomside* e *topside*, respectivamente), diversos pesquisadores utilizam modelos numéricos que buscam simular as condições favoráveis para a formação de camada F3. Por exemplo, no trabalho de Balan e Bailey (1995), onde apresentam um estudo do efeito fonte equatorial e seus possíveis efeitos, os autores utilizam o SUPIM (*Sheffield University plasmasphere-ionosphere model*). A Figura 7 ilustra a formação e a manutenção da camada F3 (antes chamada de camada G) no equador magnético. O modelo apresentado na Figura 7 considera a presença de deriva  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  e vento neutro, e indica que o início da formação de camada F3 se dá no período da manhã, quando a deriva de plasma para cima aumenta, elevando o pico de ionização da camada (Figura 7a). No trabalho de Balan et al. (1997), sobre os efeitos do efeito fonte equatorial sobre três localidades (Jicamarca, 77°O; Trivandrum, 77°L; Fortaleza, 38°O). Foi utilizado o modelo SUPIM para simular condições geomagneticamente calmas, equinócio, e alta atividade solar. Neste trabalho, Balan et al. (1997) apresentam resultados teóricos da formação e manutenção da camada F3 como também resultados experimentais, através de ionogramas obtidos em 15 de Janeiro de 1995, sobre Fortaleza, Brasil, mostrando o desenvolvimento da camada

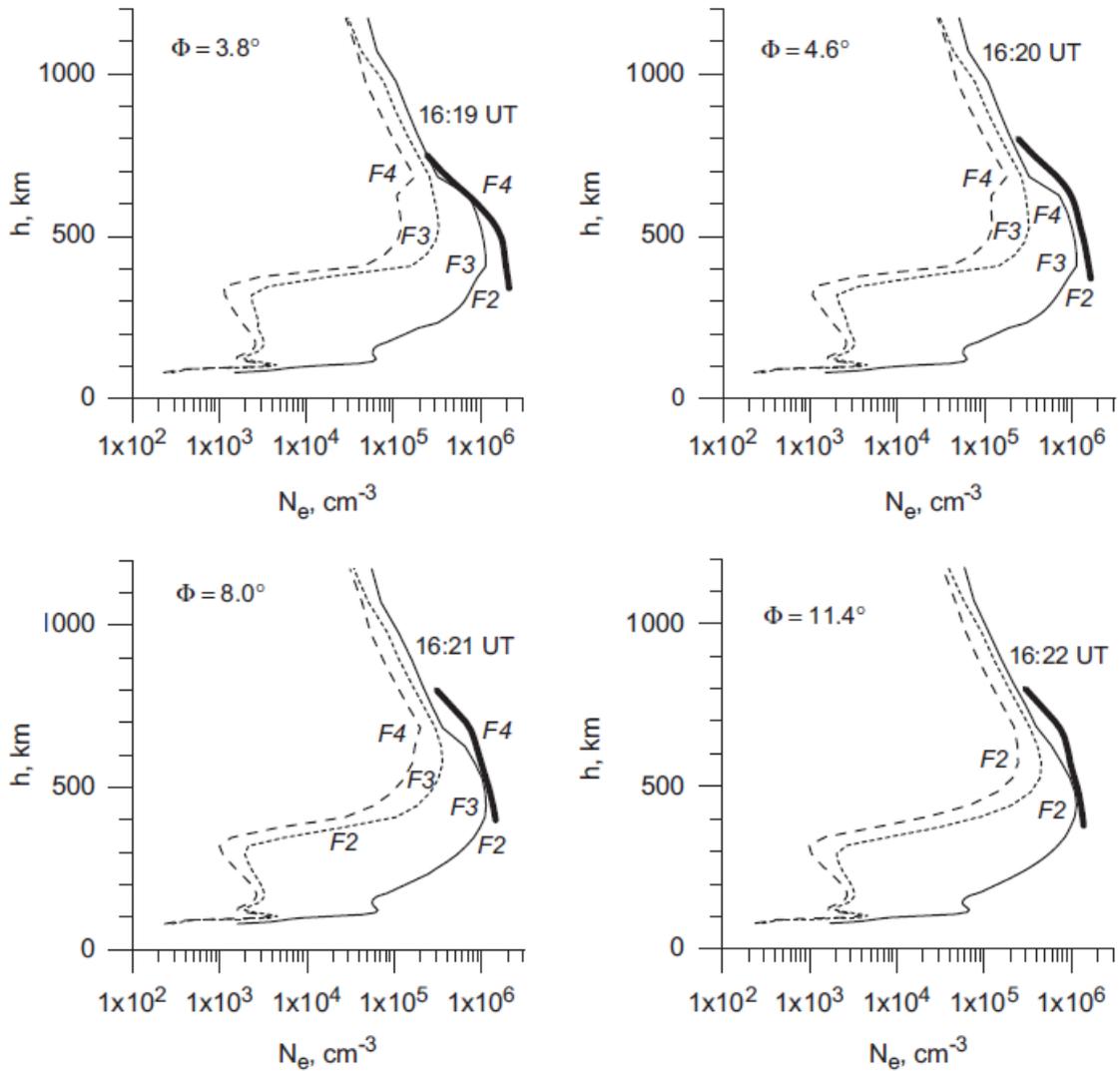
F3 no período diurno (das 08:50 às 12:30 LT). Klimenko e Klimenko (2011), utilizando o GSM TIP (*Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere, and Protonosphere*), apresentam um trabalho de modelagem numérica, para o estudo da estratificação da camada F2 e surgimento das camadas F3 e G, na ionosfera equatorial. Klimenko et al. (2012c), utilizando do GSM TIP, fazem um comparativo dos resultados obtidos pela modelagem computacional com resultados obtidos pelo satélite IK-19, em 04 de Julho de 1979, sobre Jicamarca, Peru. Neste trabalho, Klimenko et al. (2012c) plotaram os perfis verticais do conteúdo eletrônico obtidos pelo GSM TIP, ao longo do mesmo caminho em que o satélite IK-19 obteve os ionogramas de 04 de Julho de 1979 (16:12 - 16:30 UT). A Figura 8 apresenta os resultados do comparativo dos dados experimentais (satélite IK-19) com os modelados pelo GSM TIP. Os resultados indicam a formação de camadas adicionais à camada F2 (camadas F3 e F4) tanto para os dados observacionais como para os modelados numericamente.

**Figura 7** – Modelo numérico do perfil de densidade eletrônica, considerando a presença de deriva ExB e vento, na região do equador magnético. Os perfis apresentados são em intervalos de 1h e início às 08:00LT até às 12:00LT **(A)**, e intervalos de 2h e início às 14:00LT até às 22:00LT **(B)**.



Fonte: Adaptado de **Balan e Bailey (1995)**.

**Figura 8** – Perfis de densidade eletrônica ao longo do caminho do satélite IK-19 em 04 de julho de 1979, derivadas de ionogramas IK-19 (linhas grossas sólidas), e dados teóricos obtidos através do GSM TIP (linhas finas sólidas) em diferentes horários UT. As linhas tracejadas e pontilhadas mostram os perfis de densidade eletrônica simulados pelo modelo GSM TIP às 19:45 e 22:00 UT.



Fonte: **Klimenko et al. (2012c)**.

### 3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

#### 3.1 Conceitos da Teoria Magneto-iônica

Este estudo é por completo, baseado em informações extraídas através de análises de ionogramas. Um ionograma é o registro gráfico obtido com um equipamento de sondagem ionosférica, que possibilita a obtenção de alguns parâmetros ionosféricos, como a altura virtual mínima ( $h'$ ) em que uma onda eletromagnética é refletida, em função de uma determinada frequência da onda transmitida.

Muito do que precede o desenvolvimento da teoria de propagação de ondas eletromagnéticas num plasma pode ser aplicado diretamente à propagação de ondas de rádio na ionosfera. A equação de Appleton pode ser utilizada para investigar o comportamento de ondas de rádio de alta frequência (HF) na ionosfera (WHITTEN e POPPOF, 1971). Em sua forma mais completa, a expressão apresentada por Appleton utiliza quantidades adimensionais X, Y, e Z, que representam a taxa entre a frequência de onda e a frequência característica do meio (Hunsucker e Hargreaves 2003). Expressamos as duas frequências particulares ao problema como:

- Frequência de plasma

$$f_P = \frac{\omega_N}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{N_e e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (1)$$

- Freqüência de giro ou girofrequência

$$f_H = \frac{\omega_H}{2\pi} = \frac{Be}{2\pi m_e} \quad (2)$$

onde  $N_e$  é a concentração de elétrons livres,  $m_e$  a massa do elétron,  $e$  a carga do elétron,  $\epsilon_0$  a permissividade elétrica no espaço livre,  $B$  é um fluxo de densidade magnética (ou indução magnética) no meio,  $f$  é a frequência de onda, e  $\omega$  é a frequência angular. Definimos frequência de plasma como sendo a expressão da frequência natural quando de perturbações quase-eletrostáticas num meio plasma. A girofrequência é a expressão da frequência em que uma partícula (elétron ou próton) gira em torno de um fluxo de densidade magnética  $B$ . Uma outra frequência também relevante é a chamada frequência de colisão  $\nu$ , que expressa a taxa de colisão entre um dado elétron e outras partículas. Temos então os parâmetros magnetoionônicos definidos como sendo:

$$X = \frac{\omega_N^2}{\omega^2}$$

$$Y = \frac{\omega_H}{\omega}$$

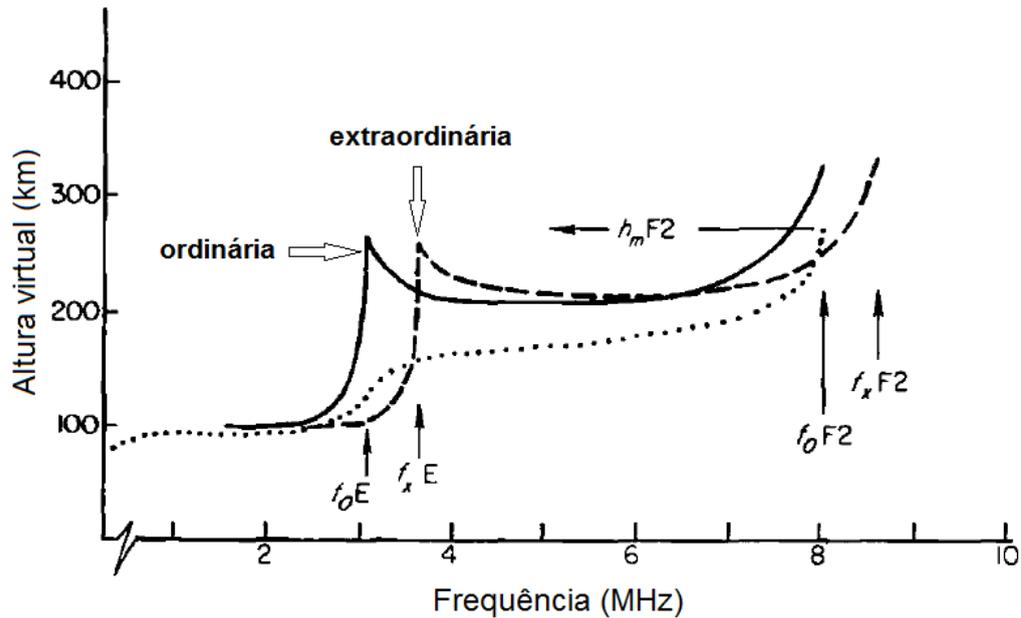
$$Z = \frac{\nu}{\omega}$$

Considerando um ângulo  $\theta$  entre a direção de propagação de uma onda normal e o campo magnético, temos as componentens  $Y_L = Y \cos \theta$ ,  $Y_T = Y \sin \theta$ , longitudinal e transversal, respectivamente (referindo-se aos subíndices L e T).

Uma onda eletromagnética em rádio frequência quando transmitida verticalmente, ao encontrar uma região da ionosfera onde a frequência do plasma seja a mesma do sinal transmitido (no lado inferior da ionosfera – *bottomside*), sofrerá reflexão ( $\mu^2 = 0$ ), ou seja, terá a condição de reflexão satisfeita quando

$\omega = \omega_N$ . Para transmissão oblíqua, a condição de reflexão é satisfeita quando  $\omega = \frac{\omega_N}{\cos i_o}$ , onde  $i_o \equiv$  ângulo de incidência da onda. Na presença de um campo magnético, o meio (ionosfera) pode fazer com que essa onda, a princípio, seja dividida em dois modos de propagação diferentes, que são independentemente refletidas na ionosfera. Essas ondas são chamadas de componentes magneto-iônicas, ou componentes de ondas magnetoelétrônicas. Esse resultado se dá devido à interação da ionosfera com o campo magnético terrestre. Por analogia à dupla refração óptica, uma onda é nomeada componente ordinária, e a outra componente extraordinária. Como as condições de reflexão das componentes ordinária e extraordinária são diferentes, cada onda produz seu próprio traço (perfil ionosférico) característico. A Figura 9 mostra a representação de um ionograma com as duas componentes distintas, ordinária (linha contínua) e extraordinária (linha tracejada). Em certas circunstâncias, podem ser registrados um terceiro modo de reflexão, que é conhecido como modo Z, ou terceira componente magneto-iônica. Este modo Z tem como característica, uma frequência crítica baixa, se comparada às componentes ordinária e extraordinária (PIGGOTT e RAWER, 1972).

**Figura 9** – Representação de ionograma indicando a presença das componentes: ordinária (linha contínua) e extraordinária (linha tracejada). A linha pontilhada indica o possível perfil de frequência de plasma e a altura real ( $h_m F2$ ).



Fonte: Adaptado de **Rishbeth e Garriot (1969)**.

A equação do índice de refração de Appleton-Hartree para uma onda eletromagnética num meio ionizado com densidade de elétrons  $N_e$  permeado por uma densidade de fluxo magnético  $B$  considerando processos colisionais entre elétrons e moléculas neutras é uma equação complexa, com os termos *Real* e *Imaginário* ( $\mu = R + jI$ ), e pode ser expressa da seguinte forma:

$$\mu^2 = 1 - \frac{X(1 - X - jZ)}{(1 - jZ)(1 - X - jZ) - \frac{1}{2}Y_T^2 \pm \frac{1}{2}Y_T^4 + (1 - X - jZ)^2 Y_L^2} \quad (3)$$

Considerando que a frequência de colisão entre elétrons e moléculas neutras é baixa quando comparada à frequência angular da onda  $\omega$ , ou seja ( $Z \ll 1$ ), o termo imaginário da Equação (3) pode ser negligenciado; dessa forma a equação fundamental do índice de refração de Appleton-Hartree (APPLETON, 1932) pode ser reescrita como:

$$\mu^2 = 1 - \frac{X(1-X)}{(1-X) - \frac{1}{2}Y_T^2 \pm \left[\frac{1}{2}Y_T^4 + (1-X)^2Y_L^2\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

onde os sinais ( $\pm$ ) indicam, para o sinal (+) a ação da onda ordinária, e para o sinal (-) a ação da onda extraordinária.

Uma onda eletromagnética em rádio frequência incidente verticalmente na ionosfera, como mencionado, será refletida em duas componentes. A componente ordinária sofrerá reflexão quando  $X = 1$ , ou seja, quando a frequência da onda transmitida for igual à frequência do plasma ( $\frac{\omega_N^2}{\omega^2} = 1$ ). A componente extraordinária sofrerá reflexão quando  $X = 1 - Y$ , se  $Y < 1$  ( $f > f_H$ ) e quando  $X = 1 + Y$  se  $Y > 1$  ( $f < f_H$ ).

Quando uma onda eletromagnética é paralela ao campo geomagnético, portanto  $\theta = 0$ ,  $Y_L = Y$  e  $Y_T = 0$ . Se considerarmos um ângulo  $\theta \sim 0$ , uma boa aproximação para o índice de refração  $\mu$  pode ser obtida tomando  $Y_T = 0$ , essa aproximação é conhecida como “quase-longitudinal” e é geralmente válida para ondas de alta frequência na ionosfera. A condição geral para essa solução é que o valor de  $X$  não seja próximo a 1 e que o ângulo  $\theta$  não seja próximo de  $90^\circ$ . Dessa forma, o índice de refração de Appleton-Hartree pode ser reduzido para:

$$\mu^2 = \frac{1-X}{(1 \pm Y_L)} \quad (5)$$

De maneira análoga, considerando  $\theta \sim 90^\circ$  (o ângulo  $\theta$  não deve ser próximo de zero) e  $Y_L = 0$ , e  $Y_T \sim Y$ , a equação para o índice de refração para a onda ordinária pode ser reduzida para:

$$\mu^2 = 1 - X \quad (6)$$

e para a onda extraordinária:

$$\mu^2 = 1 - \frac{X(1-X)}{1-X-Y^2} \quad (7)$$

Devido as duas componentes (ordinária e extraordinária) terem velocidades de fase diferentes, verifica-se que o plano de polarização rotaciona continuamente ao longo do caminho da onda incidida, esse fenômeno se assemelha ao efeito de Faraday (rotação de Faraday). Para uma abordagem mais completa da teoria Magneto-iônica, ver Ratcliffe (1962).

### 3.1.1 Conceitos de frequência crítica e altura virtual

No pico de ionização de uma camada ionosférica, onde a densidade eletrônica  $N_e$  é relativamente grande, podemos aplicar as condições  $X = 1$  e  $X = 1 - Y$  para obter as frequências críticas das componentes ordinária ( $f_o$ ) e extraordinária ( $f_x$ ),

$$f_o = [f_x^2 - f_x f_H]^{1/2} \cong f_x - \frac{1}{2} f_H \quad (8)$$

essa é uma boa aproximação para a condição onde a frequência crítica  $f_o$  é bem maior que a girofrequência  $f_H$ , que é geralmente o caso para a região F da ionosfera (Rishbeth e Garriot 1969). Dessa forma, podemos reescrever a Equação 8 como segue:

$$f_x - f_o = \frac{f_H}{2} \quad (9)$$

Para se compreender o processo de reflexão na ionosfera de uma onda eletromagnética, supomos que um pulso de onda com frequência ( $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ) entra em

uma camada da Ionosfera na qual a densidade eletrônica  $N_e$  cresce com a altitude. Numa incidência vertical a partir da superfície terrestre, este pulso percorrerá o trajeto com velocidade de grupo de uma onda ( $u_g$ ), que pode ser expressa da seguinte forma  $u_g = \frac{c}{\mu'}$ , sendo  $\mu'$  o índice de refração de grupo e  $c$  a velocidade da luz no espaço livre ( $c = 2,998 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ ). A velocidade de grupo  $u_g$ , decresce com o acréscimo da densidade de elétrons, e torna-se mínima no nível onde é refletida ( $h_r$ ). Então, na incidência de um pulso vertical, a velocidade de grupo atinge o valor zero no ponto de reflexão. O comportamento do pulso de onda de rádio frequência no tocante à sua velocidade é considerado o mesmo tanto na subida (pulso emitido antes da reflexão) como na descida (pulso refletido) (HUNSUCKER, 1991; PIGGOTT, 1972). A velocidade de fase de uma onda pode ser representada como sendo  $u_p = \frac{c}{\mu}$ , ou da seguinte forma  $u_p = \lambda f$ .

O tempo total de viagem do pulso de onda de rádio frequência  $\Gamma$ , considerando uma incidência vertical, é duas vezes o tempo necessário para o sinal viajar da antena de transmissão até o nível de reflexão na Ionosfera, e  $\Gamma$  é dado por:

$$\Gamma = 2 \int_0^{h_r} \frac{1}{u_g} dh \quad (10)$$

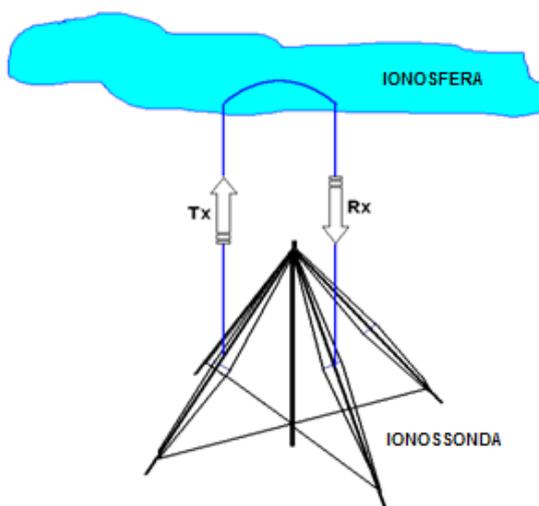
Para uma aproximação do índice de refração de fase  $\mu$ , onde são negligenciados a frequência de colisão e o campo magnético do meio, obtém-se uma relação para o índice de refração de grupo, da seguinte forma  $\mu' = 1/\mu$ . A reflexão para a onda ordinária se dará quando  $X = 1$  e, para a onda extraordinária, quando  $X = 1 \pm Y$ , sendo  $X = 1 - Y$  (para  $Y < 1$ ; e de outra forma para  $X = 1 + Y$ ).

A informação retransmitida (ou refletida) do pulso de onda de rádio frequência é interpretada como uma “altura virtual” ( $h'$ ) da camada ionosférica numa determinada frequência de transmissão. A altura virtual  $h'$  é chamada assim, pois não representa o parâmetro da altura real onde o pulso de onda de rádio frequência foi realmente refletido, num ponto da ionosfera. Basicamente, essa característica se dá porque a velocidade de propagação do pulso transmitido é menor que a velocidade da luz ( $c$ ), no meio ionosférico. Portanto, como o pulso viaja sempre mais lento na camada ionosférica que num espaço livre (vácuo), a informação de altura virtual é sempre maior que a altura real. A altura virtual  $h'$  pode ser expressa como:

$$h' = \int_0^{h_r} \frac{c}{u_g} dh = \int_0^{h_r} \mu' dh \quad (11)$$

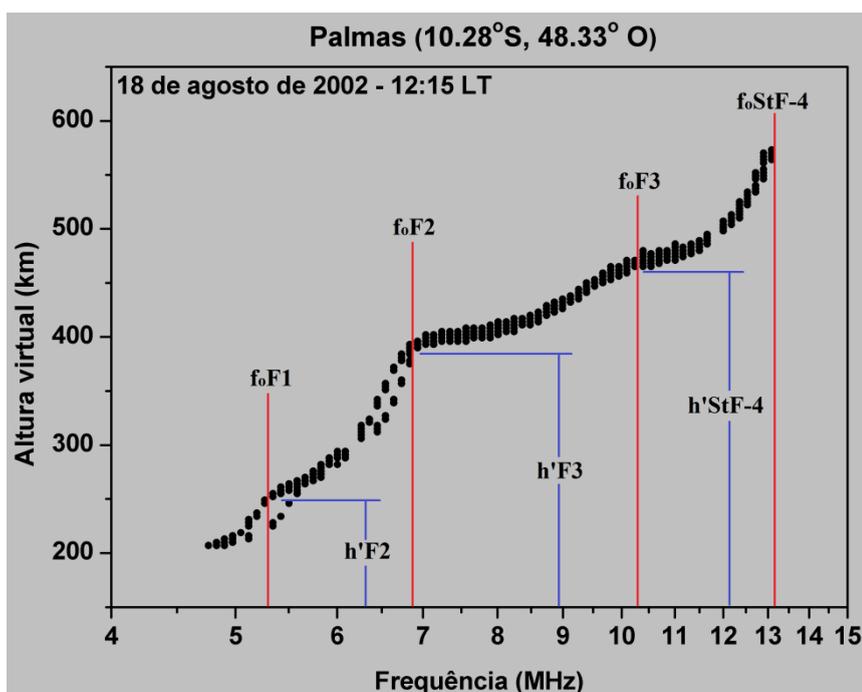
A representação de um sistema sondagem da ionosférica através de ionossonda é mostrada na Figura 10, onde um pulso de rádio frequência é transmitido (Tx) e propaga-se verticalmente para cima. Após refletido na ionosfera, o pulso é recebido na antena de recepção dessa ionossonda. A Figura 11 mostra os parâmetros ionosféricos relevantes ao trabalho, frequência crítica e altura virtual mínima, ambos aplicados a um ionograma obtido sobre a cidade de Palmas TO. Neste exemplo, são indicados no ionograma além da posição dos parâmetros da camada F2, a posição dos parâmetros da camada F3 e de uma quarta-estratificação, aqui nomeada como StF-4, que é parte principal deste estudo.

**Figura 10** – Representação esquemática de um sistema de ionossonda. O sinal transmitido é representado pela sigla Tx, e o sinal recebido é representado pela sigla Rx.



Fonte: Adaptado de **Radtel Network (2006)**.

**Figura 11** – Ionograma apresentando a posição dos parâmetros de frequência crítica e altura virtual mínima das respectivas camadas (PAL – 18 de agosto de 2002). Os traços verticais na cor vermelha, indicam as frequências críticas das respectivas estratificações; os traços horizontais, na cor azul, indicam as alturas virtuais mínimas das respectivas estratificações.



### 3.2 Ionossondas utilizadas neste trabalho

A obtenção dos parâmetros ionosféricos utilizados neste trabalho, foi feita através de sondagens ionosféricas realizadas em Palmas TO (10,28° S, 48,33° O; dip latitude 5,5° S, próximo a região equatorial – PAL), e São José dos Campos SP (23,21°S, 45,97°O; dip latitude 17,6°S, região de baixa latitude – SJC), no setor brasileiro.

O equipamento de sondagem utilizado em ambos os observatórios, é uma ionossonda digital do tipo CADI (*Canadian Advanced Digital Ionosonde*), ver Figura 12. A potência do transmissor é de 600 W, e duração do pulso é de 20  $\mu$ s, que oferece uma resolução de 6 km de altura. A antena de transmissão da ionossonda está disposta em um dipolo em delta simples, suportada por uma torre de 20 m de altura. A antena de recepção é formada através de um sistema de quatro dipolos. As Figuras 13a e 13b exibem o sistema de antenas de transmissão e recepção, respectivamente, instalado no sítio da Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP, em São José dos Campos SP.

**Figura 12** – Sistema de transmissão e recepção da Ionossonda digital do tipo CADI instalado na Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP, em São José dos Campos SP.



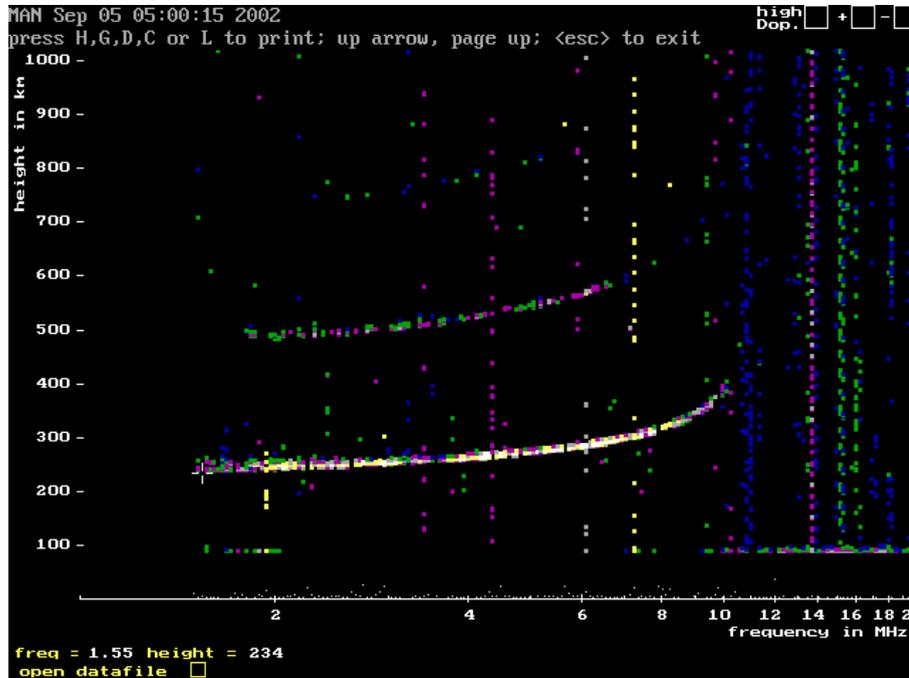
**Figura 13** – Antenas de transmissão (imagem da esquerda “a”) e recepção (imagem da direita “b”) da Ionossonda digital do tipo CADI instalado na Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP, em São José dos Campos SP.



A ionossonda do tipo CADI opera em num range de frequência de 1 a 20 MHz, na incidência vertical e abrange alturas entre 90 a 1024 km (GRANT et al., 1995; MAC-DOUGALL et al., 1997). A ionossonda do tipo CADI funciona em dois modos diferentes de varredura de frequências:

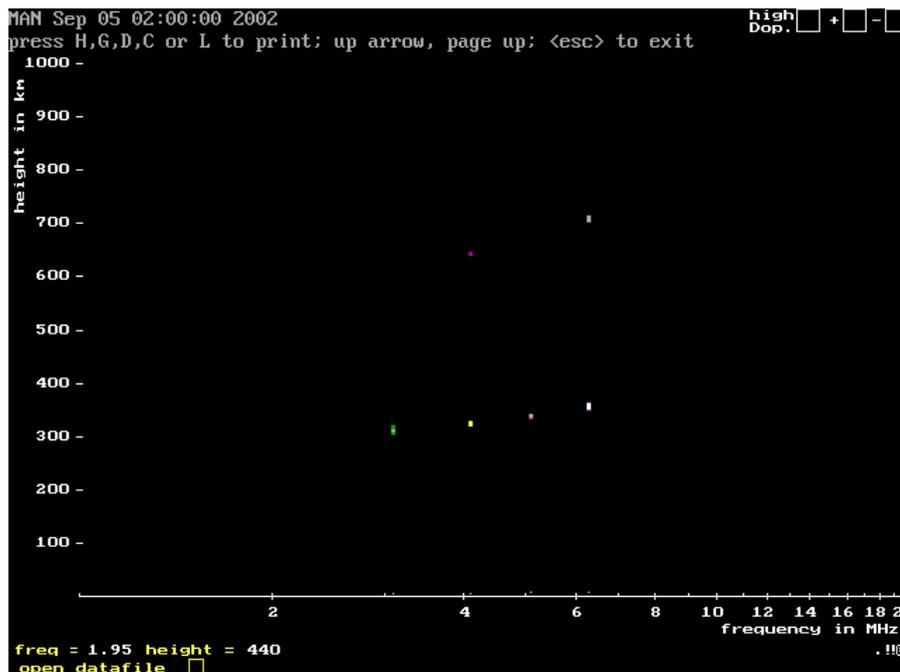
- I. no primeiro modo, opera enviando pulsos a cada 300 segundos (5 min), e os ionogramas são obtidos através da digitalização de sinais recebidos em até 180 frequências (1-20 MHz). Este modo apresenta grande resolução espectral e baixa resolução temporal (ver Figura 14);
- II. no segundo modo, opera enviando pulsos a cada 100 segundos, obtendo ionogramas rápidos, verificando apenas seis frequências 3,1, 4,1, 5,1, 6,3, 7,1 e 8,1 MHz. O segundo modo proporciona alta resolução temporal sendo de grande importância para o estudo de propagação de ondas e para detectar alterações rápidas nas características das camadas ionosféricas. Este modo de operação apresenta grande resolução temporal e baixa resolução espectral (ver Figura 15).

**Figura 14** – Exemplo de um ionograma gerado diretamente no sistema da CADI, referente ao primeiro modo de operação, onde é possível se obter ionogramas através da digitalização de até 180 frequências, num range de frequência entre 1 e 20 MHz.



Fonte: Pillat 2006.

**Figura 15** – Exemplo de um ionograma gerado diretamente no sistema da CADI, referente ao segundo modo de operação, onde é possível se obter ionogramas rápidos (a cada 100 s), nas frequências 3,1, 4,1, 5,1, 6,3, 7,1 e 8,1 MHz.

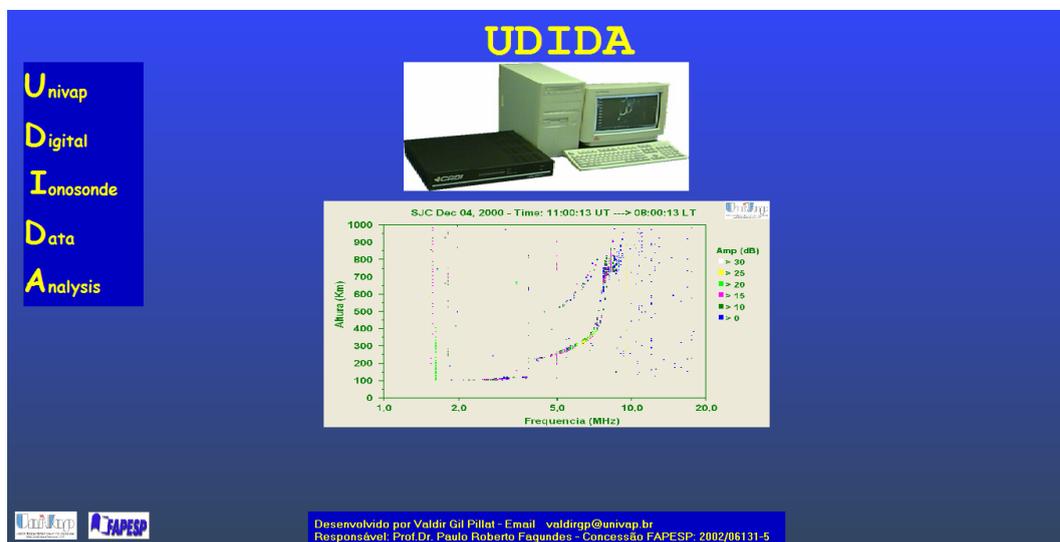


Fonte: Adaptado de Pillat 2006.

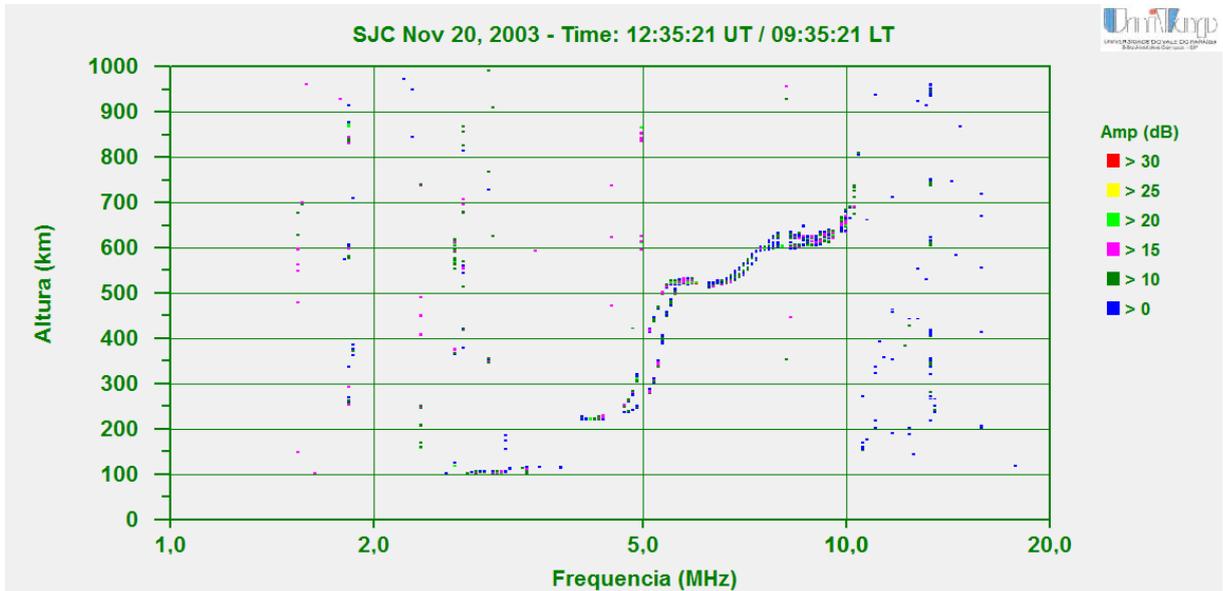
### 3.3 Interface gráfica para análise dos ionogramas

A ferramenta de inface utilizada na análise dos ionogramas obtidos pela ionossonda do tipo CADI é o software chamado UDIDA (UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis), desenvolvido na Universidade do Vale do Paraíba, pelo Dr. Valdir Gil Pillat (Pillat, 2006). O software UDIDA (tela inicial do software apresentada na Figura 16) possui um conjunto de ferramentas computacionais que ajudam na organização dos dados a serem estudados, como por exemplo o cadastro de observatórios que serão utilizados no estudo e a visualização de parâmetros ionosféricos (e. g., dados para o estudo de propagação de ondas planetárias na Ionosfera, propagação de ondas de gravidade na Ionosfera, visualização dos ionogramas, obtendo os parâmetros ionosféricos tais como altura virtual e frequência crítica das camadas, entre outros). Neste estudo, foram utilizados principalmente os parâmetros ionosféricos obtidos através dos ionogramas (ver exemplo de ionograma diurno na Figura 17), e parâmetros para o estudo de propagação de ondas de gravidade (ver exemplo na Figura 18).

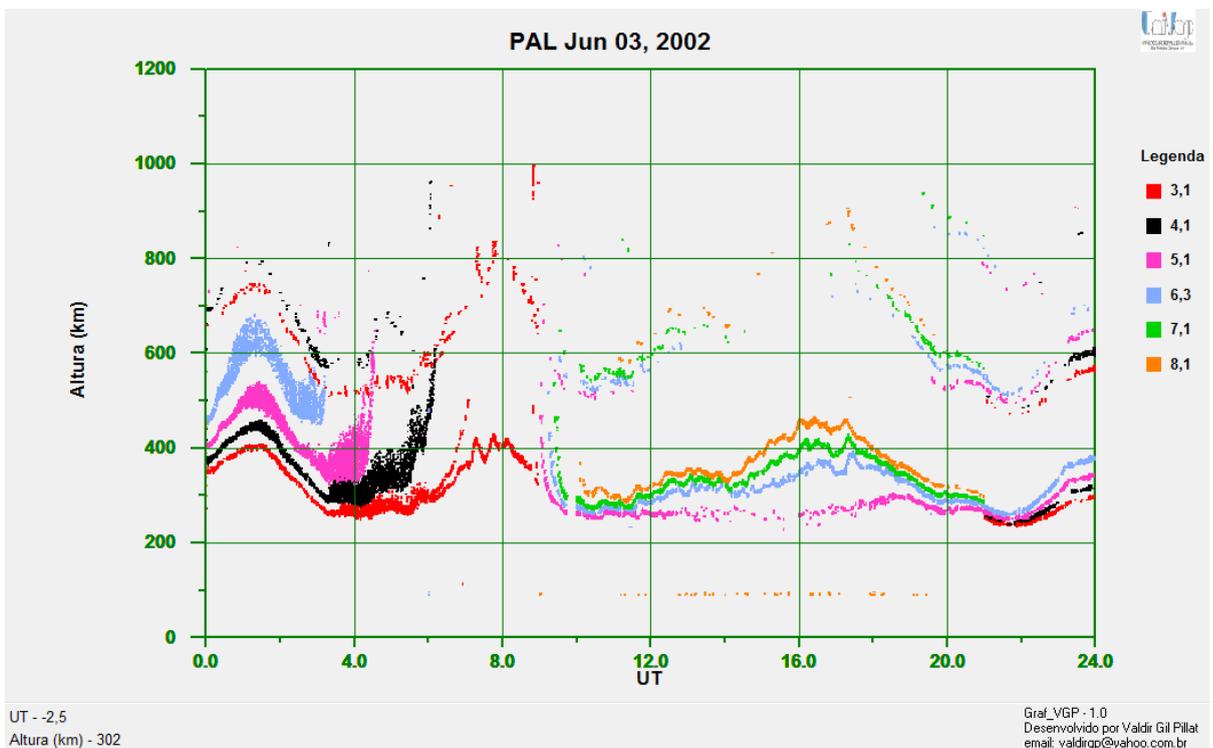
**Figura 16** – Tela inicial do software UDIDA.



**Figura 17** – Exemplo de ionograma obtido pela Ionossonda do tipo CADI instalada em São José dos Campos SP no dia 20 de Novembro de 2003, e analisada pela interface gráfica do software UDIDA para a leitura de dados de ionogramas.



**Figura 18** – Exemplo da interface gráfica mostrando as linhas de iso-freqüência utilizando ionogramas obtidos em Palmas no dia 03 de Junho de 2002.



### 3.4 Redução de dados

O objetivo principal deste trabalho é estudar o comportamento da camada F3 e da quádrupla estratificação (camada StF-4) da região F da Ionosfera terrestre, através de sondagem ionosférica, por ionossondas instaladas em Palmas TO e São José dos Campos SP. Devido às peculiaridades para a detecção de múltiplas estratificações na região F, todo o processo de análise dos dados se deu de maneira manual. E a resolução temporal dos ionogramas obtidos (a cada 5 minutos), favoreceu a análise dos pequenos detalhes entre eles.

Os dados analisados em Palmas TO e São José dos Campos SP são referentes ao período Janeiro de 2002 a Dezembro de 2006. Neste período, foram verificados todos os ionogramas diurnos disponíveis, com resolução temporal de 5 minutos, com início de visualização às 06:00 LT e término por volta das 18:30 LT (há casos onde essa verificação se estendeu até por volta das 19:00 LT, de acordo com o comportamento dos perfis ionosféricos no momento). Foram registrados em planilha os parâmetros ionosféricos relevantes ao estudo:  $h'F_2$ ,  $h'F_3$ ,  $h'StF-4$ ,  $foF_2$ ,  $foF_3$  e  $foStF-4$  (altura virtual mínima e frequência crítica das camadas F2, F3 e StF-4, respectivamente).

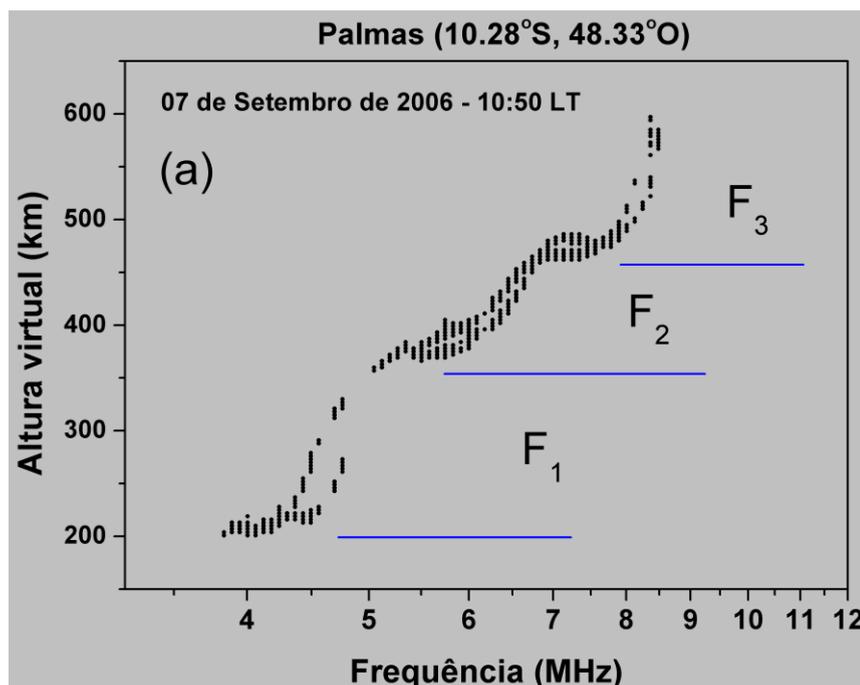
Neste estudo, foi utilizado o índice de fluxo solar (2.800 MHz – faixa em rádio frequência) também conhecido como F10,7 (indicador da atividade solar), o índice Dst (indicador da corrente de anel, com resolução temporal de 1 h), e o índice Kp (indicador de tempestade geomagnética, com resolução temporal de 3 h). Os dados dos índices F10,7 e Kp, foram obtidos através do *website* <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>. Os dados do índice Dst foram obtidos através do *website* <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>.

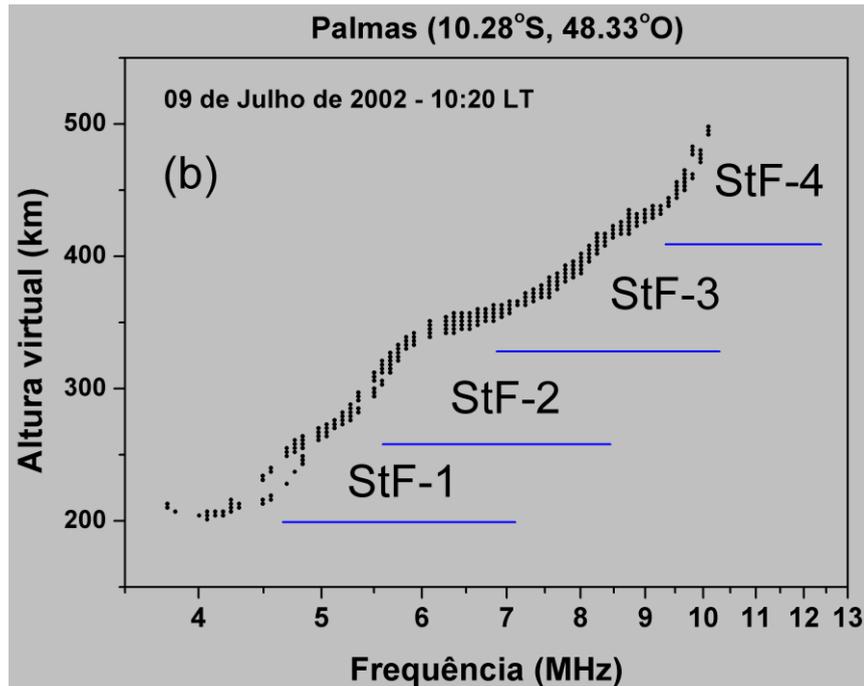
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Padronização das informações nos ionogramas

O estudo das camadas ionosféricas na região F geralmente é relacionado às camadas F1, F2 e F3 (Figura 19A). Porém, recentemente a discussão sobre uma quarta estratificação da região F foi aberta com a publicação de Tardelli e Fagundes 2015 (Figura 19B). Para efeitos didáticos, a classificação das camadas da região F será feita seguindo o seguinte critério. Quando houver uma tripla estratificação da região F, as camadas serão denominadas F1, F2 e F3 (Figura 19A). No entanto, quando houver uma quarta estratificação as camadas serão denominadas StF-1, StF-2, StF-3 e StF-4 (Figura 19B).

**Figura 19 – (a)** mostra as camadas F1, F2 e F3 da região F. **(b)** Mostra as múltiplas estratificações StF-1, StF-2, StF-3 e StF-4 da região F. Em ambos os casos as linhas azuis (horizontal) delimita as respectivas estratificações.

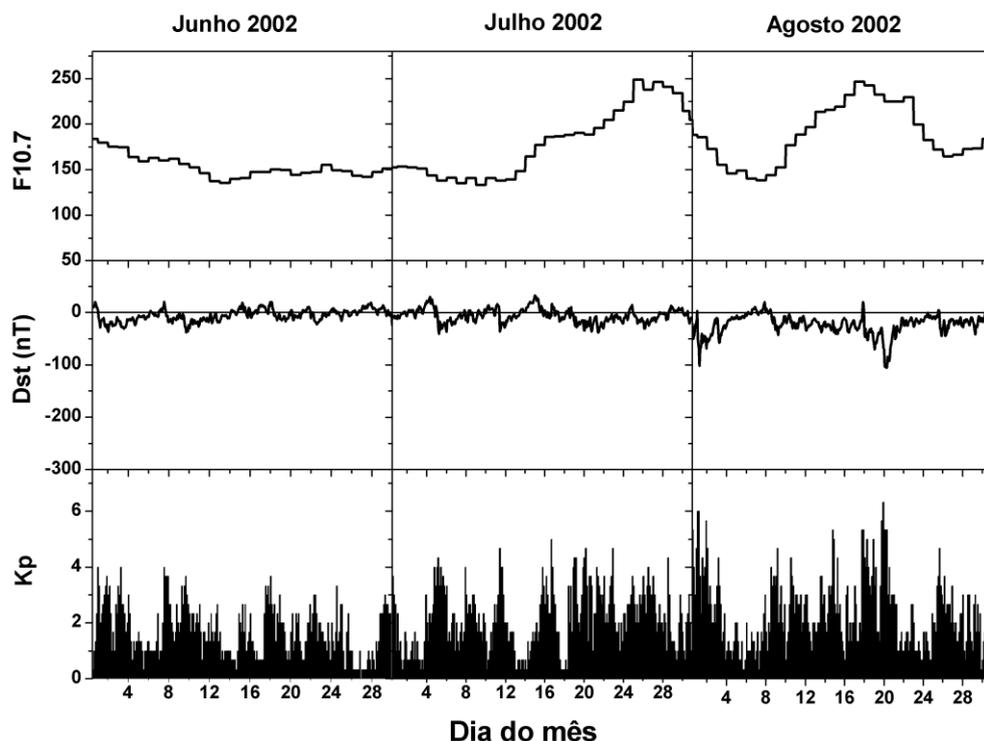




#### 4.2 Observações da quarta estratificação StF-4 em Palmas

A análise dos ionogramas diurnos foi feita mantendo uma padronização entre os horários de início a partir das 06:00 LT e fim às 18:30 LT (há casos onde essa verificação se estendeu até por volta das 19:00 LT, de acordo com o comportamento dos perfis ionosféricos no momento). A resolução temporal dos ionogramas analisados foi de 5 min, perfazendo um total de aproximadamente 150 ionogramas analisados por dia com dados. Como resultado, verificamos que a ocorrência de quarta-estratificação da região F (StF-1, StF-2, StF-3, e StF-4) ocorre durante condições geomagnéticas perturbadas, moderadas e calmas, sugerindo a princípio não haver contribuição direta das condições geomagnéticas à formação de camada StF-4. Essa característica pode ser verificada na Figura 28. Para maiores detalhes sobre as condições geofísicas do período estudado (meses de junho, julho e agosto) consulte a Figura 20.

**Figura 20** – Variações dos índices  $F_{10,7}$ , Dst, e Kp durante o período de junho, julho e agosto de 2002 (HSA).



As Figuras 21, 22 e 23 mostram exemplos de ionogramas onde se nota pela primeira vez a formação de quádrupla estratificação da região F (StF-1, StF-2, StF-3, e StF-4) no continente americano. Todos os ionogramas obtidos pela ionossonda do tipo CADI foram feitos através da resolução temporal de 5 min, que proporcionou o estudo da variação das camadas ionosféricas com boa resolução entre os ionogramas. Essa configuração de resolução temporal se mostrou de grande importância, pois garante a percepção em maiores detalhes das pequenas variações que ocorrem no perfil ionosférico.

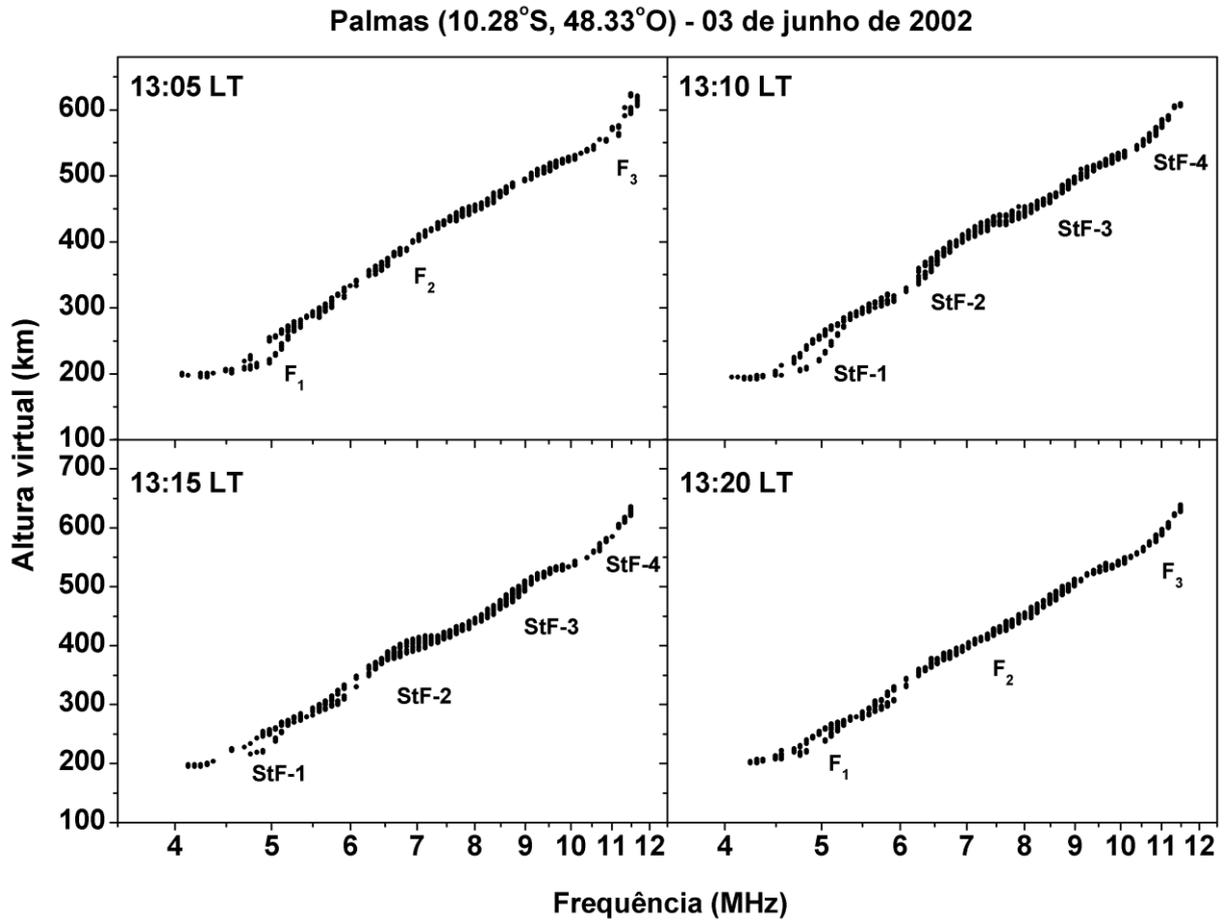
A sequência temporal dos ionogramas registrados de 03 de Junho de 2002 (ver Figura 21), indica às 13:05 LT, a formação das camadas F1, F2 e F3, às 13:10 LT já percebe-se a formação de StF-1, StF-2, StF-3 e StF-4, que são registradas também no ionograma das 13:15 LT; às 13:20 LT percebe-se que a camada StF-4 cessa, ficando as camadas F1, F2 e F3. As sequências temporais registradas nos

dias 09 de Julho e 18 de Agosto também indicam a formação de camada StF-4. Nas Figuras 21 e 22, referentes aos dias 03 de Junho e 09 de Julho de 2002, a camada StF-4 foi observada em dois ionogramas sequenciais (durou menos de 15 min); na Figura 23 referente ao dia 18 de Agosto de 2002, a camada StF-4 foi observada em apenas um ionograma (durou menos de 10 min). A Tabela 2 mostra os registros das alturas virtuais referentes aos ionogramas dos dias 03 de Junho, 09 de Julho e 18 de Agosto de 2002, apresentados nas Figuras 21, 22 e 23, respectivamente.

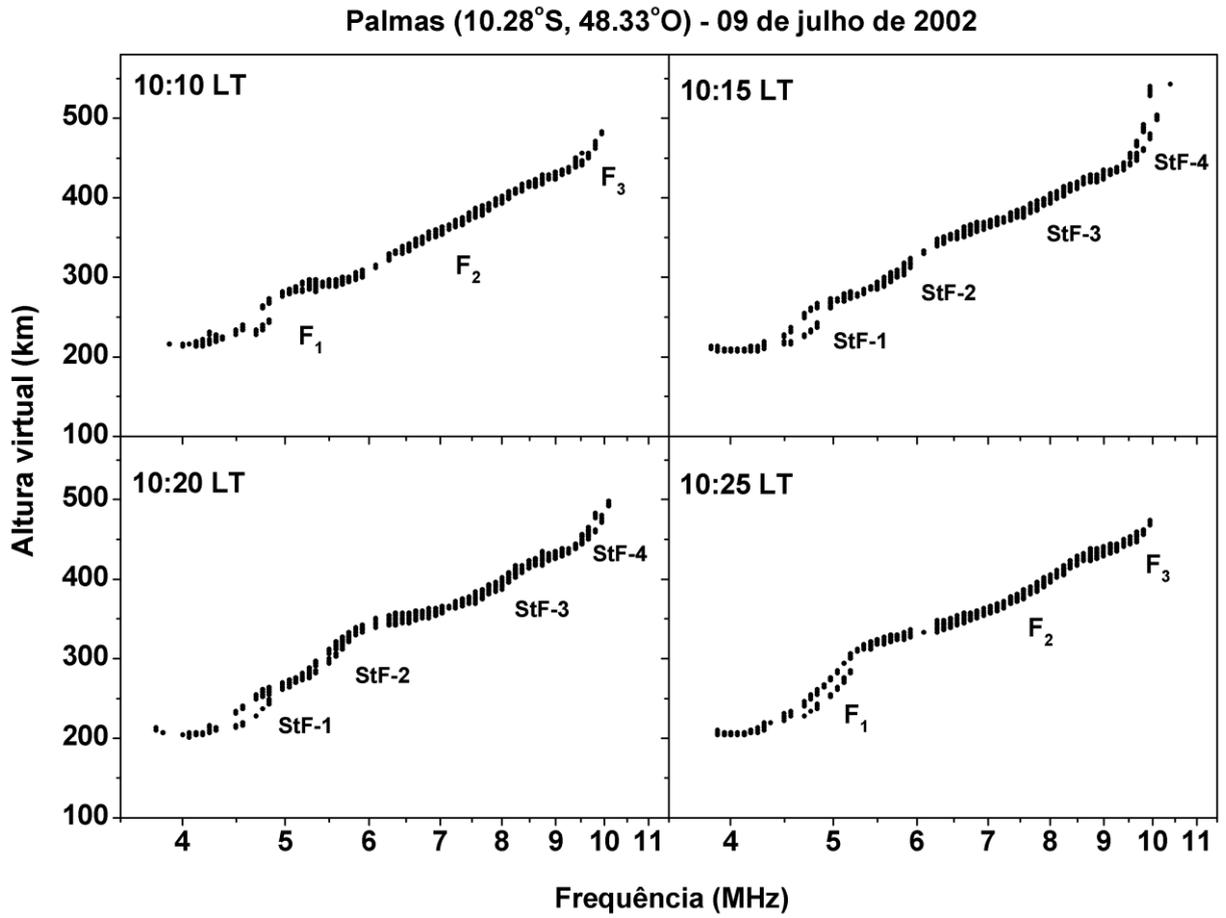
**Tabela 2** – Dados das alturas virtuais h'F2, h'F3 e h'StF-4, referentes às camadas F2, F3 e a quarta estratificação StF-4, respectivamente, para os dias 03 de Junho, 09 de Julho e 18 de Agosto do ano de 2002.

<b>3 junho, 2002</b>	<b>LT</b>	<b>13:05</b>	<b>13:10</b>	<b>13:15</b>	<b>13:20</b>
	<b>h'F2</b>	443 km	280 km	267 km	264 km
	<b>h'F3</b>	528 km	414 km	383 km	527 km
	<b>h'StF-4</b>		518 km	528 km	
<b>9 julho, 2002</b>	<b>LT</b>	<b>10:10</b>	<b>10:15</b>	<b>10:20</b>	<b>10:25</b>
	<b>h'F2</b>	283 km	267 km	258 km	316 km
	<b>h'F3</b>	423 km	346 km	346 km	425 km
	<b>h'StF-4</b>		421 km	423 km	
<b>18 agosto, 2002</b>	<b>LT</b>	<b>12:10</b>	<b>12:15</b>	<b>12:20</b>	<b>12:25</b>
	<b>h'F2</b>	415 km	255 km	367 km	337 km
	<b>h'F3</b>	474 km	395 km	472 km	479 km
	<b>h'StF-4</b>		467 km		

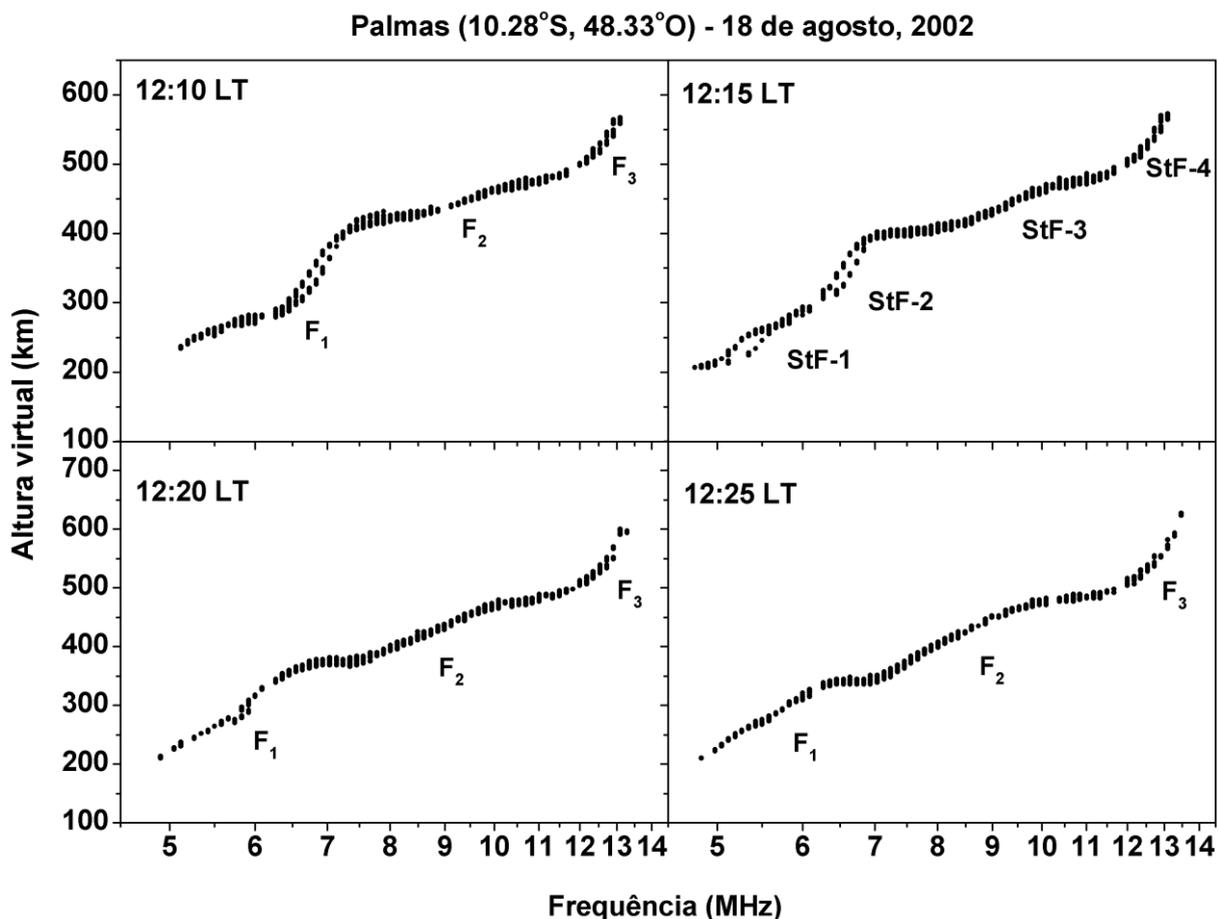
**Figura 21** – Ionogramas obtidos em PAL em 03 de junho de 2002, mostrando exemplos da evolução temporal dos ionogramas com a presença das múltiplas estratificações da região F - StF-1, StF-2, StF-3, e StF-4.



**Figura 22** – Ionogramas obtidos em PAL em 09 de julho de 2002, mostrando exemplos da evolução temporal dos ionogramas com a presença das múltiplas estratificações da região F - StF-1, StF-2, StF-3, e StF-4.



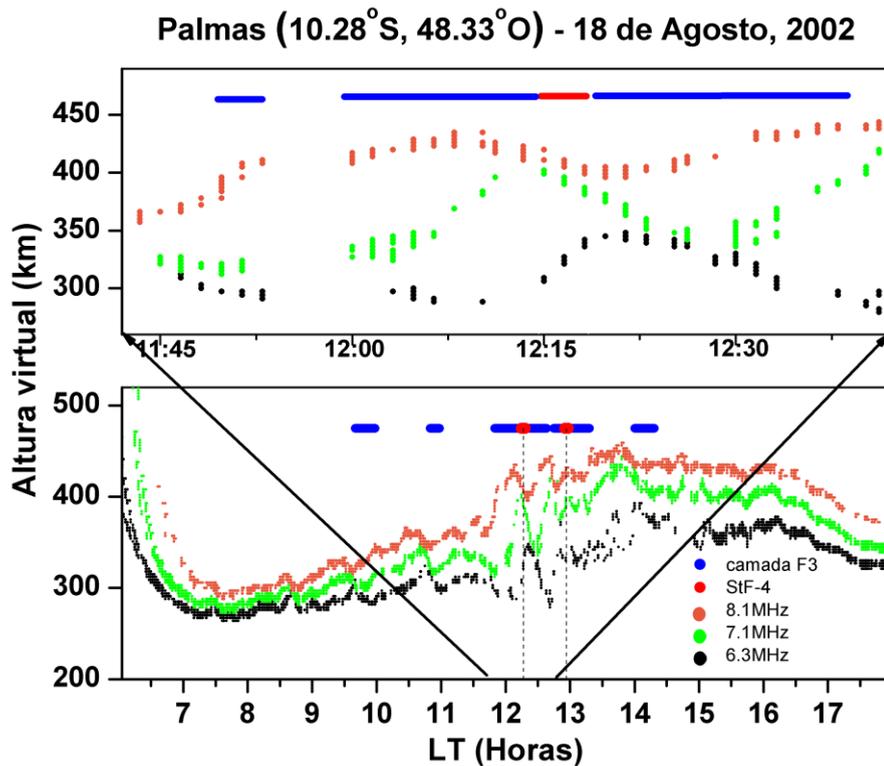
**Figura 23** – Ionogramas obtidos em PAL em 18 de agosto de 2002, mostrando exemplos da evolução temporal dos ionogramas com a presença das múltiplas estratificações da região F - StF-1, StF-2, StF-3, e StF-4.



Com o objetivo de compreender melhor os processos que podem contribuir na formação de StF-4, utilizou-se do modo de resolução temporal de 100 min (disponibilizando isofrequências) disponível pela ionossonda do tipo CADI, onde através das seis frequências obtidas (3,1; 4,1; 5,1; 6,3; 7,1; e 8,1 MHz) podemos estudar a propagação de ondas na ionosfera e também perceber rápidas alterações nas características das camadas ionosféricas. Concomitante à análise das isofrequências, utilizamos também a análise detalhada de ionograma-a-ionograma (um a um), e comparamos os instantes de formação de camada StF-4 e o comportamento apresentado nas variações obtidas nas seis frequências disponíveis.

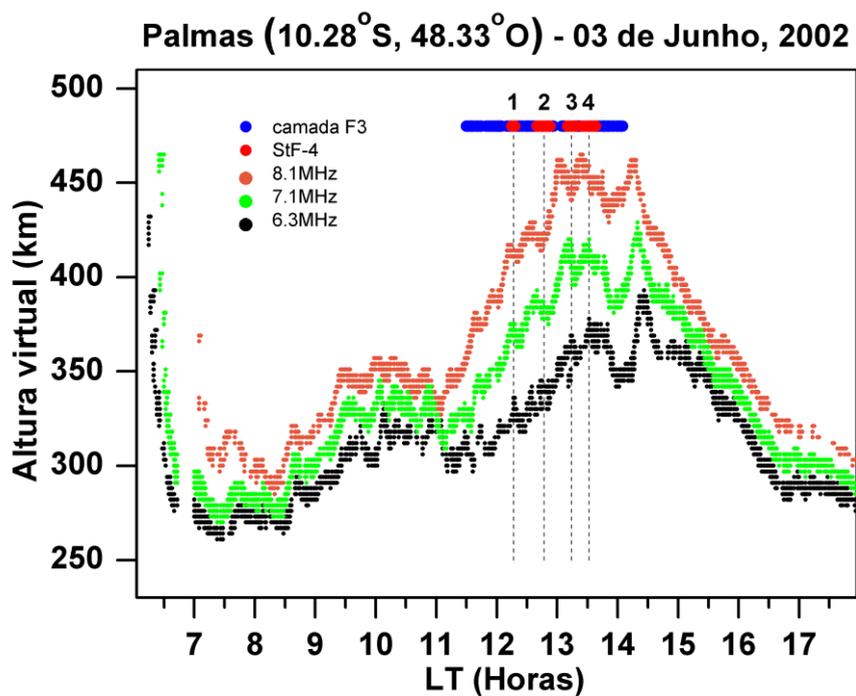
A Figura 24 (painel inferior) mostra variações diurnas de alturas virtuais para as frequências 6,3, 7,1, e 8,1 MHz em 18 de agosto de 2002. Às 07:30 LT, a altura virtual mínima para 8,1 MHz é de aproximadamente 330 km e começa a aumentar, atingindo um valor máximo (aproximadamente em 450 km) às 13:30 LT. Logo após, a altura virtual mínima da camada começa a diminuir. Um comportamento semelhante foi observado para as frequências 6,3 e 7,1 MHz. Este aumento de altura está estreitamente relacionado com a deriva vertical  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ , que é um dos ingredientes eletrodinâmicos mais importantes para gerar a camada F3 (Balan e Bailey, 1995; Jenkins et al. 1997). Em seguida, por volta de 09:30 LT, ocorre a formação de camada F3; as linhas horizontais em azul, vistas na Figura 24 (painéis superior e inferior) mostram os horários de ocorrências da camada F3. No entanto, durante a ocorrência da camada F3, houve dois casos de formação de camada StF-4, que são indicados pelas linhas em vermelho na Figura 24 (painel do lado inferior). Os casos de camada StF-4 ocorreram quando a altura virtual mínima da camada em 8,1 MHz estava acima de 400 km. A Figura 24 (painel superior) mostra também que a altura virtual mínima da região F em 8,1 e 7,1 MHz, foi diminuindo às 12:15 LT, mas a uma taxa diferente. No lado inferior da região F (6.3 MHz), a altura virtual mínima foi aumentando às 12:15 LT. Este comportamento indica a presença de ondas no meio, que podem ser verificadas na região F através das frequências estudadas de 6,3; 7,1 e 8,1 MHz no período de 12:15 as 13:00 LT. A ação de ondas na ionosfera podem gerar um campo elétrico zonal não uniforme. Portanto, a combinação da deriva vertical do plasma  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  para cima e uma não uniformidade zonal de deriva vertical de plasma  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ , podem criar condições favoráveis para a geração de StF-4.

**Figura 24** – Variação diária da altura virtual para as frequências: 6,3 (preto), 7,1 (verde), e 8,1 (laranja) MHz em 18 de agosto de 2002. A linha horizontal em azul representa a formação de camada F3, a linha horizontal em vermelho representa a formação de camada StF-4. O painel inferior da figura mostra as isofrequências no período das 06:00 LT às 18:00 LT. O painel superior mostra uma ampliação do período das 11:40 às 12:40 LT.

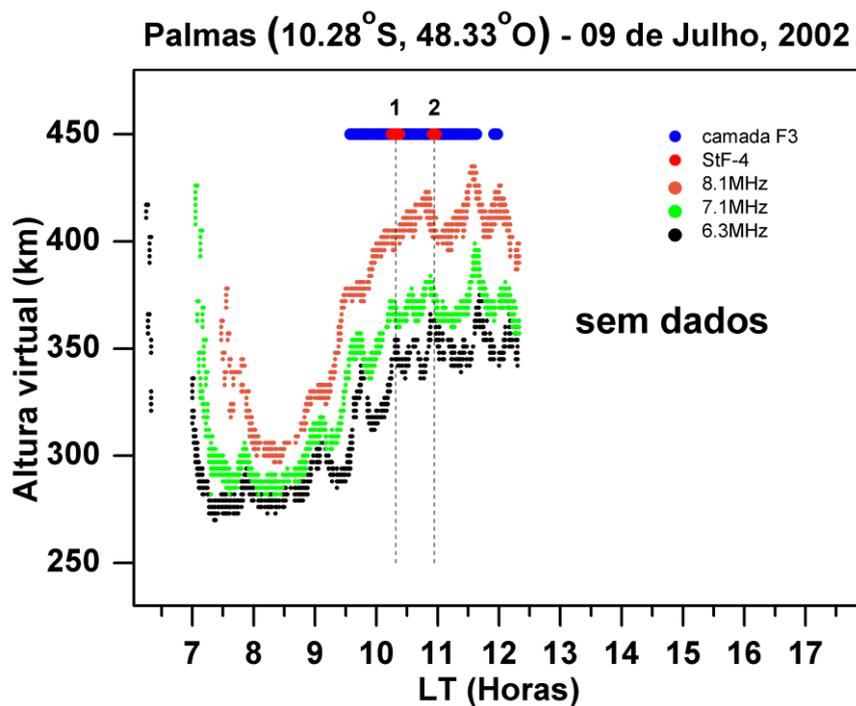


As Figuras 25 e 26, mostram as isofrequências para os dias apresentados 03 de junho e 09 de julho de 2002. Observe que a quarta estratificação StF-4 acontece quando a região F está em elevação, devido à deriva vertical do plasma  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ , e numa altura virtual acima de 400 km em 8,1 MHz. Em todos os três casos discutidos em detalhes (Figuras 24, 25 e 26), a quarta estratificação StF-4 é antecedida e sucedida pela camada F3. A Figura 27 apresenta um resumo das isofrequências já apresentadas nas Figuras 24, 25 e 26, e em adicional as isofrequências para o dia 19 de Agosto de 2002.

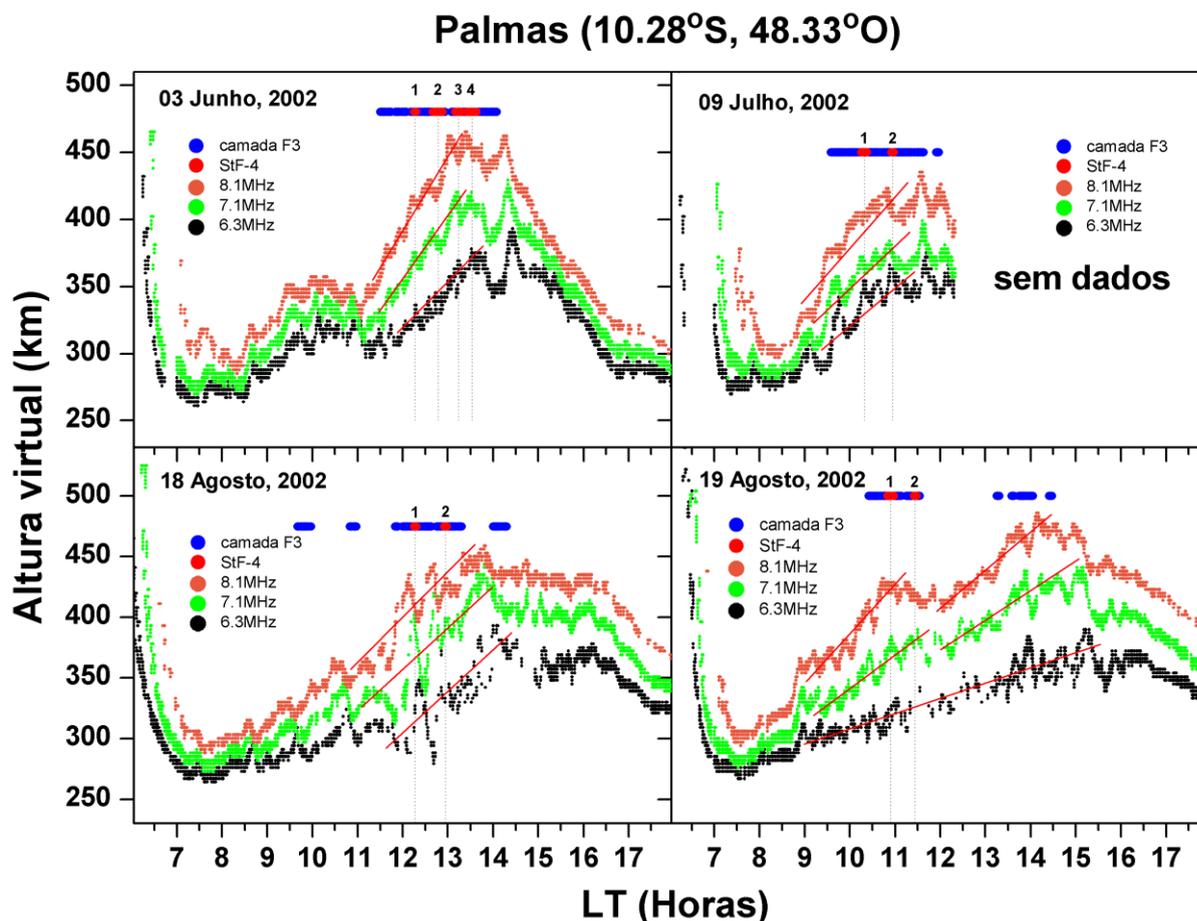
**Figura 25** – Variação diária da altura virtual da região F observada nas frequências 6,3, 7,1, e 8,1 MHz em 03 de Junho de 2002. As linhas horizontais cheias em azul e vermelho indicam a ocorrência de camada F3 e da quarta estratificação StF-4, respectivamente.



**Figura 26** – Variação diária da altura virtual da região F observada nas frequências 6,3, 7,1, e 8,1 MHz em 09 de Julho de 2002. As linhas horizontais cheias em azul e vermelho indicam a ocorrência de camada F3 e da quarta estratificação StF-4, respectivamente.

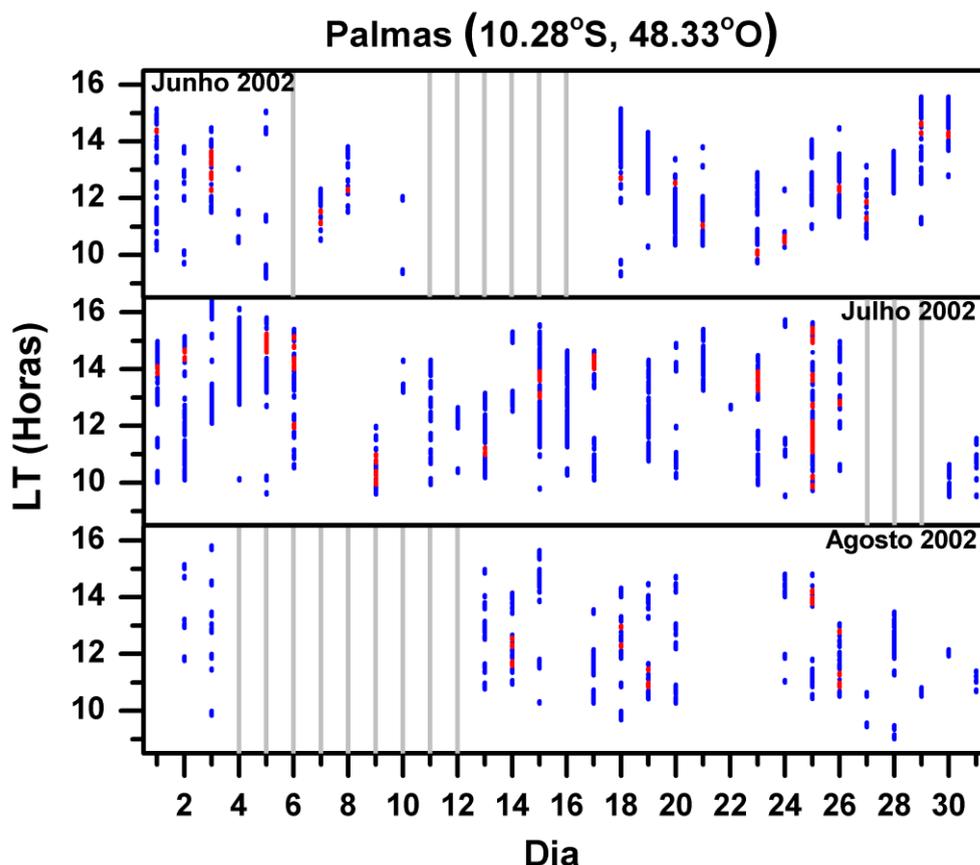


**Figura 27** – Variação diária da altura virtual da região F observada nas frequências 6,3, 7,1, e 8,1 MHz para os dias 03 de Junho, 09 de Julho, 18 de Agosto e 19 de Agosto de 2002. As linhas horizontais cheias em azul e vermelho indicam a ocorrência de camada F3 e da quarta estratificação StF-4, respectivamente.



A Figura 28 mostra a variabilidade dia-a-dia para os meses de Junho a Agosto de 2002 (meses de inverno no hemisfério sul) das camadas F3 e StF-4, no período de alta atividade solar (HSA). As linhas verticais azuis, vermelhas e cinzas indicam o tempo de duração das camadas F3 e StF-4, e períodos sem dados, respectivamente.

**Figura 28** – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F para os meses de Junho, Julho e Agosto de 2002. As linhas em azul, vermelho e cinza indicam a ocorrência das camadas F3 e StF-4, e períodos sem dados, respectivamente.



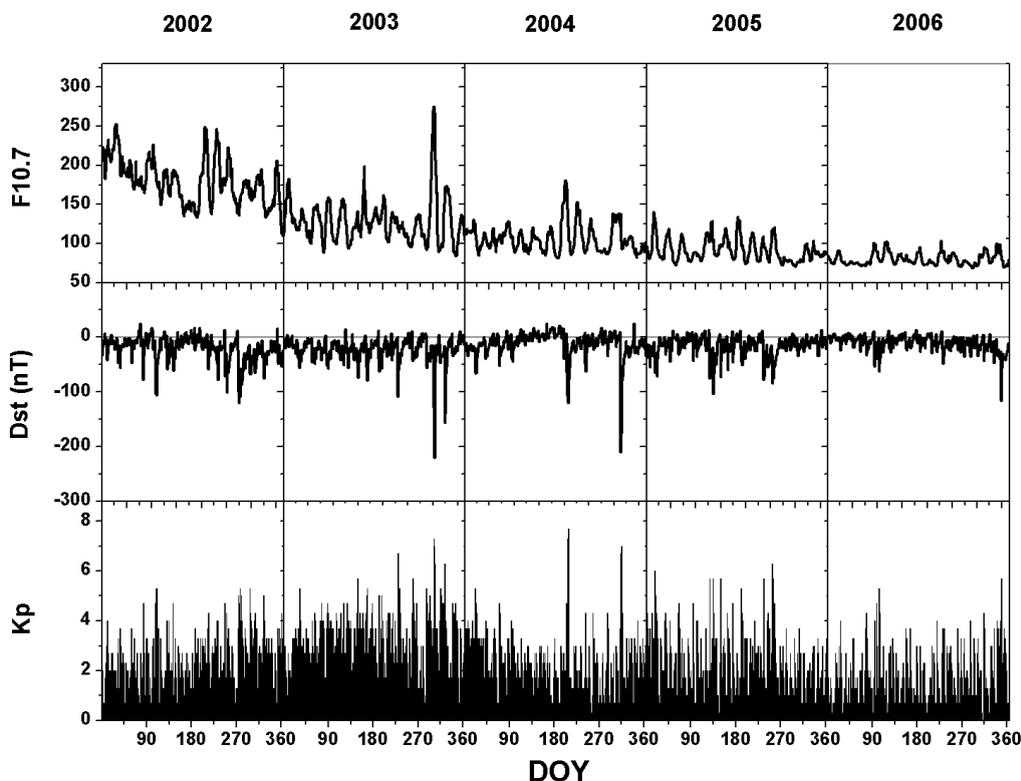
Neste primeiro estudo, foram observados 29 dias com a ocorrência de camada StF-4. Nestes 29 dias verificamos que a camada F3 sempre antecede e sucede a camada StF-4. Isto sugere fortemente que a ocorrência de camada StF-4 é de algum modo relacionada com a formação da camada F3. No entanto, devem ser feitas mais observações e simulações em modelos computacionais, buscando compreender melhor como as camadas F3 e StF-4 estão conectadas. Outro fator relevante verificado, foi que em todos os 29 dias observados, o tempo de duração da camada StF-4 é significativamente menor do que o tempo de duração da camada F3. Além disso, a presente observação concorda com a ideia de que a não-

uniformidade da deriva vertical do plasma  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  local é uma das fontes de estratificação da região F, em regiões próximas ao equador geomagnético (Klimenko et al., 2012). A combinação da deriva vertical do plasma  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  e oscilações provocadas por ondas de gravidade, foi sugerida por Fagundes et al., (2007) como uma possível fonte de formação de camada F3. Um mecanismo semelhante pode estar relacionado com a formação da camada StF-4. No entanto, a possível condição inicial e fontes para a formação da camada StF-4 precisa de uma investigação mais aprofundada, incluindo simulações através de modelos físicos do sistema.

#### **4.3 Análise da variação sazonal e dependência do ciclo solar das camadas F3 e StF-4 em PAL e SJC**

Após a apresentação dos primeiros resultados no continente americano de formação de uma quarta estratificação, que a nomeamos como camada StF-4, foi realizado um estudo do comportamento das camadas F3 e StF-4 nas regiões de Palmas (PAL) e São José dos Campos (SJC). O período estudado abrange os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006. Dessa forma, é possível estudar as camadas em relação à fase descendente do ciclo solar 23, compreendendo os períodos de alta atividade solar (HSA), de decréscimo na atividade solar, e de baixa atividade solar (LSA). A Figura 29 apresenta as condições geofísicas pertinentes ao estudo para o período de 2002 à 2006. A Tabela 3 apresenta as médias mensais do índice F10,7 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006.

**Figura 29** – Variações dos índices  $F_{10,7}$ , Dst, e Kp durante o período de 2002 a 2006.



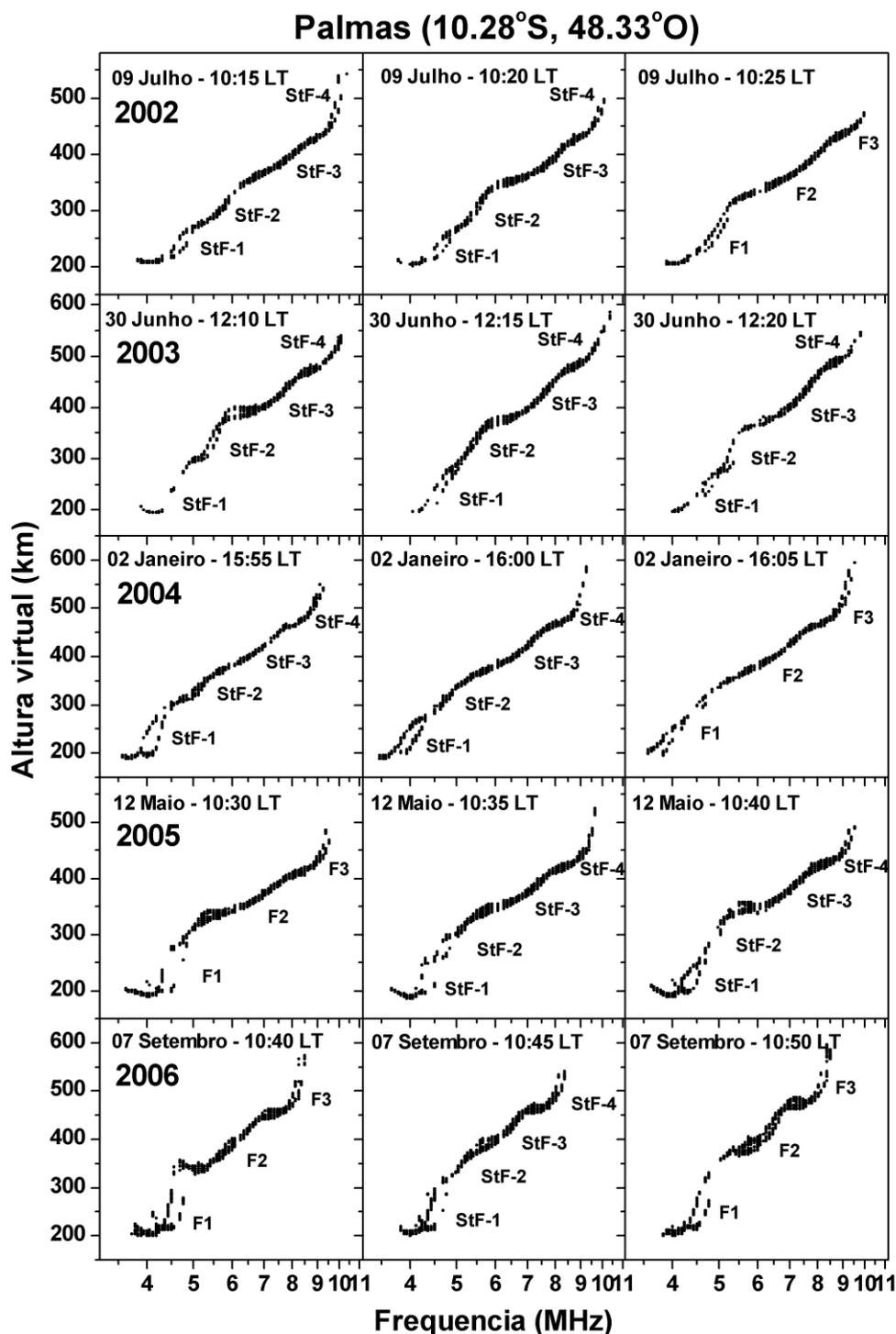
**Tabela 3** – Média mensal do índice  $F_{10,7}$  para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006.

Ano	2002	2003	2004	2005	2006
Mês	F 10,7				
Janeiro	220,05	139,39	110,44	98,98	80,76
Fevereiro	200,08	121,44	104,41	94,86	74,69
Março	178,42	130,83	110,98	89,01	74,71
Abril	191,06	127,15	101,95	86,62	89,64
Mai	182,39	118,75	102,07	101,74	82,68
Junho	153,38	133,44	100,49	96,63	78,96
Julho	179,16	131,87	122,38	99,62	78,29
Agosto	188,13	125,16	112,72	92,79	81,40
Setembro	177,78	113,41	104,12	92,06	78,64
Outubro	165,90	150,07	105,06	76,12	73,81
Novembro	165,10	137,70	111,22	84,35	84,44
Dezembro	152,28	111,43	92,49	87,91	81,88

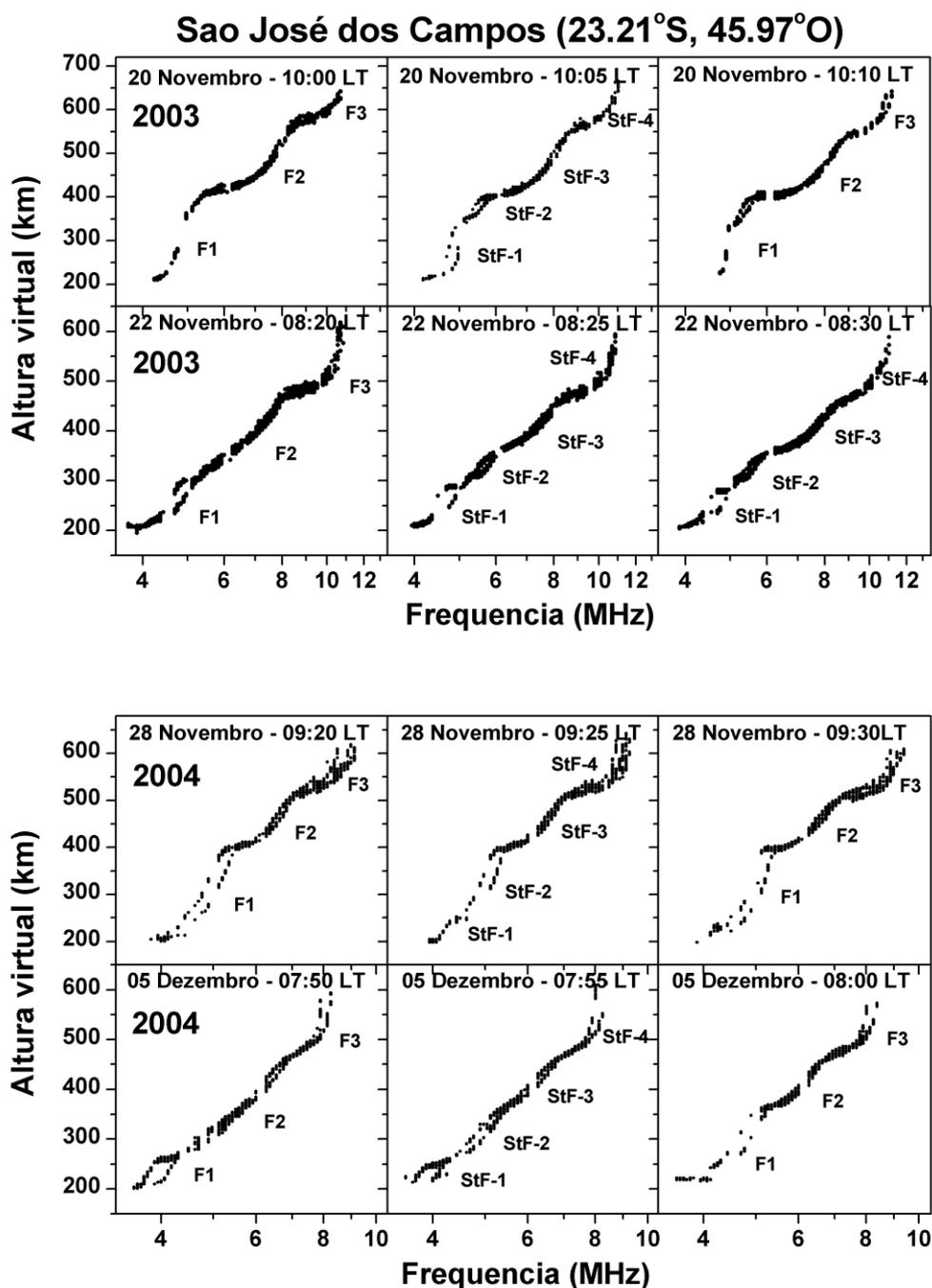
Para caracterizar a formação de uma quarta estratificação (StF-4) da região F e sua relação com a camada F3, apresentamos nas Figuras 30 e 31, uma sequência de ionogramas obtidos através de ionossondas instaladas em Palmas e São José dos Campos, respectivamente. Os ionogramas são apresentados numa sequência temporal de três quadros, com resolução temporal de 5 minutos entre eles. A Figura 30 (Palmas), mostra a ocorrência de camada StF-4 em todos os anos estudados, portanto, de 2002 a 2006. A Figura 31 (São José dos Campos), mostra apenas o período em que foram registradas as ocorrências de StF-4, portanto, 2003 e 2004.

Em ambas as localidades, Palmas (região próxima ao equador magnético) e São José dos Campos (região de baixa latitude), a ocorrência da camada StF-4 é sempre associada à ocorrência da camada F3, sendo antecedida e sucedida pela camada F3, corroborando com os resultados apresentados por Tardelli e Fagundes (2015), como mostrado na seção 4.2 deste capítulo. Outro fator relevante, é que o tempo de vida da camada StF-4 é bem inferior ao da camada F3 (o qual pode chegar a horas), conforme apresentado nos ionogramas das Figuras 30 e 31. Em média o tempo de duração da camada StF-4 é de 5 a 10 minutos.

**Figura 30** – Sequência de ionogramas obtidos no sítio de Palmas (PAL) durante os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006. A sequência de três ionogramas tem uma resolução temporal de 5 min. Os ionogramas apresentados no topo da figura são referentes ao dia 09 de Julho de 2002, abaixo, referentes ao dia 30 de Junho de 2003, 02 de Janeiro de 2004, 12 de Maio de 2005, e 07 de Setembro de 2006, respectivamente.



**Figura 31** – Sequência de ionogramas obtidos no sítio de São José dos Campos (SJC) durante os anos de 2003 e 2004, períodos em que foram identificadas a formação de StF-4. A sequência de três ionogramas tem uma resolução temporal de 5 min. Os ionogramas apresentados no topo da figura são referentes ao dia 20 de Novembro de 2003, abaixo, referentes ao dia 22 de Novembro de 2003, 28 de Novembro de 2004, e 05 de Dezembro de 2004, respectivamente.



As Figuras 32, 33, 34, 35 e 36 mostram a variação dia-a-dia da formação de camadas F3 e StF-4, para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, respectivamente, analisadas em Palmas TO (PAL), região próxima ao equador magnético. As Figuras 37, 38, 39, 40 e 41 mostram a variação dia-a-dia da formação de camadas F3 e StF-4, para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, respectivamente, analisadas em São José dos Campos SP (SJC), região de baixa latitude.

Os dados para o ano de 2002 em PAL apresentados na Figura 32, mostram que, com exceção do mês de abril, neste ano foram registradas ocorrências de camada F3 e StF-4 em todos os meses com dados úteis. A Figura 32 mostra também que a ocorrência de camadas F3 e StF-4 aumentou no período de Junho a Setembro, o mesmo comportamento foi percebido para o tempo de duração de camadas F3 e StF-4, onde indicaram também o aumento de Junho a Setembro. No final do mês de Setembro pode-se verificar que inicia-se um comportamento de decréscimo na ocorrência de camadas F3 e StF-4.

Os dados para o ano de 2003 em PAL apresentados na Figura 33, mostram que ocorreram as camadas F3 e StF-4 em todos os meses com registros de dados úteis. A ocorrência das camadas F3 e StF-4 foi maior nos meses de Agosto, Setembro e Dezembro. Em comparativo ao ano de 2002 em PAL, percebe-se também que no mês de Outubro há uma baixa ocorrência das camadas F3 e StF-4, porém a ocorrência de camada F3 neste mês foi maior que a registrada em 2002.

A análise da variação dia-a-dia da ocorrência de camadas F3 e StF-4 para o ano de 2004 em PAL, mostrada na Figura 34, foi feita apenas para os meses de Janeiro a Maio (dados até o dia 15), devido a ausência de dados para os demais

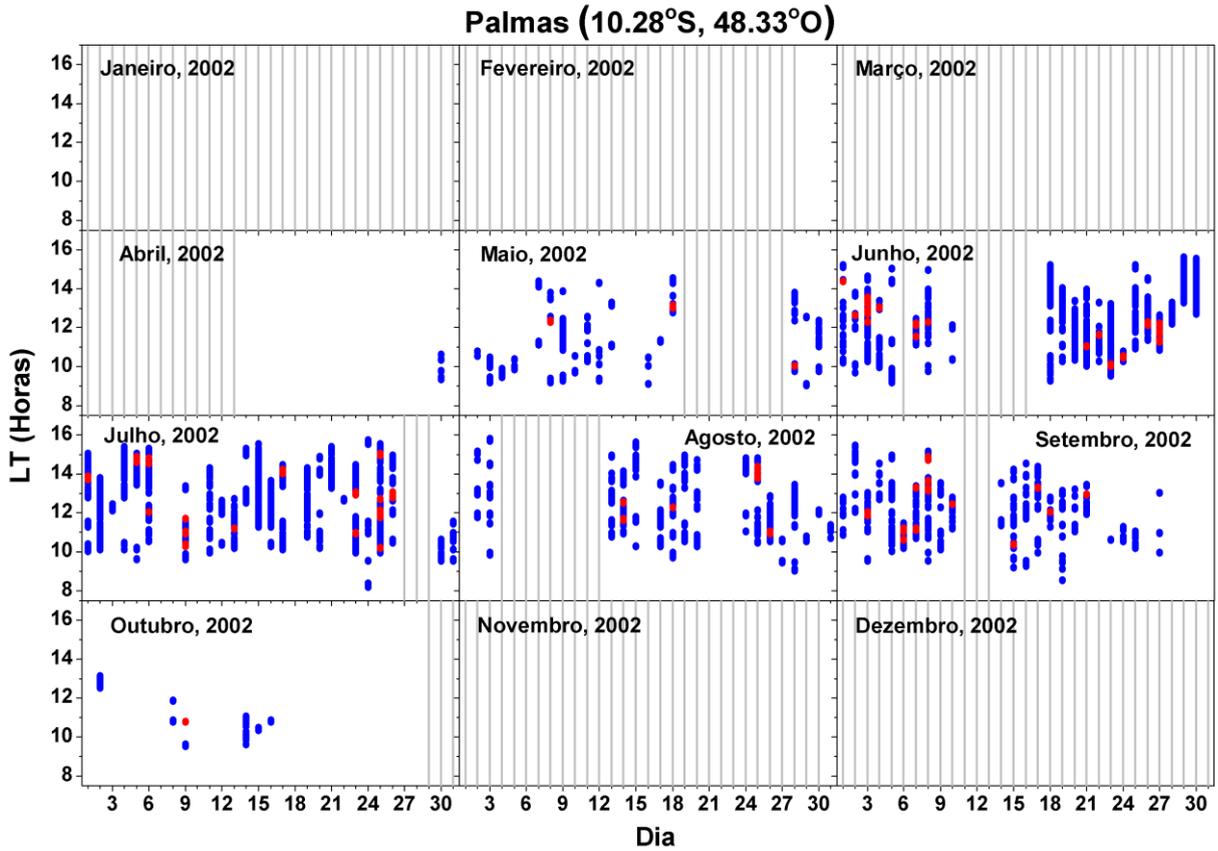
períodos. Então, dos dados observados, pode-se constatar que a ocorrência da camada StF-4 aconteceu apenas no dia 02 de Janeiro, e que a ocorrência da camada F3 foi maior nos meses de Janeiro e Fevereiro. A camada F3, nos meses de Janeiro e Fevereiro, foi observada até por volta das 17:00 LT (em alguns dias) e a camada StF-4 (em Janeiro) até por volta das 16:30 LT. No equinócio de outono (mês de Março) no setor brasileiro em PAL, percebe-se um decréscimo na ocorrência de camada F3, corroborando com os resultados de Batista et al. (2000).

A Figura 35 (PAL 2005) mostra baixa ocorrência de camada F3 no período de Maio a Setembro, no mês de Outubro percebe-se um aumento na ocorrência dessa camada, e este comportamento crescente é percebido até Dezembro, o que sugere que a ocorrência de camada F3 é maior nos meses de verão local. A camada F3, nos meses de Outubro (apenas no dia 29) e Dezembro, foi observada, em geral, até por volta das 17:00 LT. A ocorrência de camada StF-4 foi baixa e registrada apenas nos meses de Maio, Junho e Julho. Com relação aos anos anteriores, com exceção do ano de 2004, onde não houve dados neste período, percebe-se que a ocorrência de camada StF-4 diminuiu, chegando a cessar a partir do mês de Agosto de 2005.

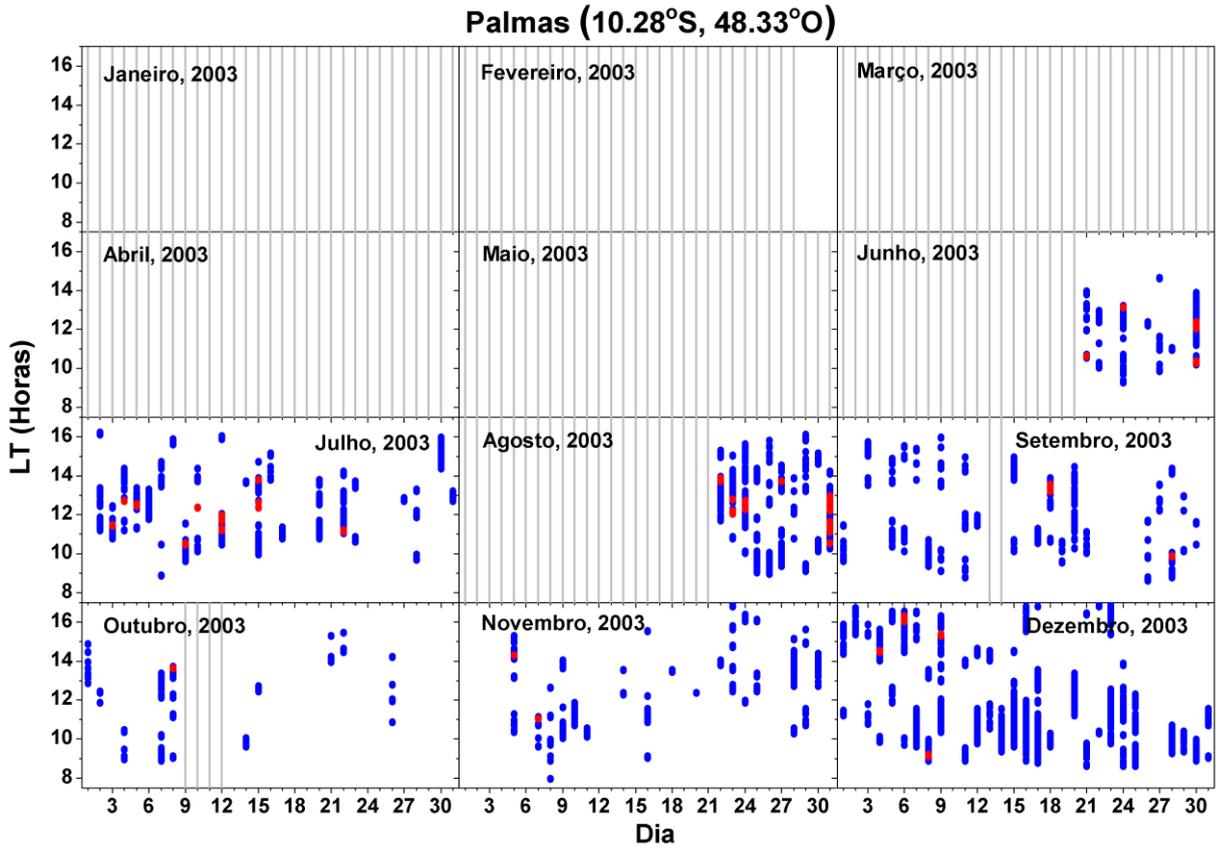
A Figura 36 (PAL 2006), se comparada aos anos anteriores, mostra que a camada F3 se forma mais cedo, por volta das 07:30 LT, tem maior duração, chegando a permanecer até sete horas em alguns dias dos meses de primavera (Outubro) e verão, e permanece até mais tarde, até às 17:00 LT nos meses de primavera (Outubro) e verão. A Figura 36 mostra também que a ocorrência de camada StF-4 foi muito baixa.

Os resultados encontrados na análise dos dados de variação dia-a-dia da ocorrência de camadas F3 e StF-4, para o sítio de Palmas, mostram, de maneira geral, que em períodos de alta atividade solar (HSA) a ocorrência de camada F3 é maior nos meses de verão e inverno. Nos períodos de decréscimo e baixa atividade solar (LSA), a ocorrência de camada F3 é maior nos meses de verão. Como apresentado na Figura 30, a ocorrência de StF-4 mostrou ser sempre antecedida e sucedida pela camada F3. Outro fator bem característico da ocorrência de camada StF-4, é a forte correlação com a atividade solar, onde percebe-se que nos períodos de HSA o número de ocorrências de camada StF-4 é maior que nos períodos de LSA. A Figura 48 expressa claramente este comportamento.

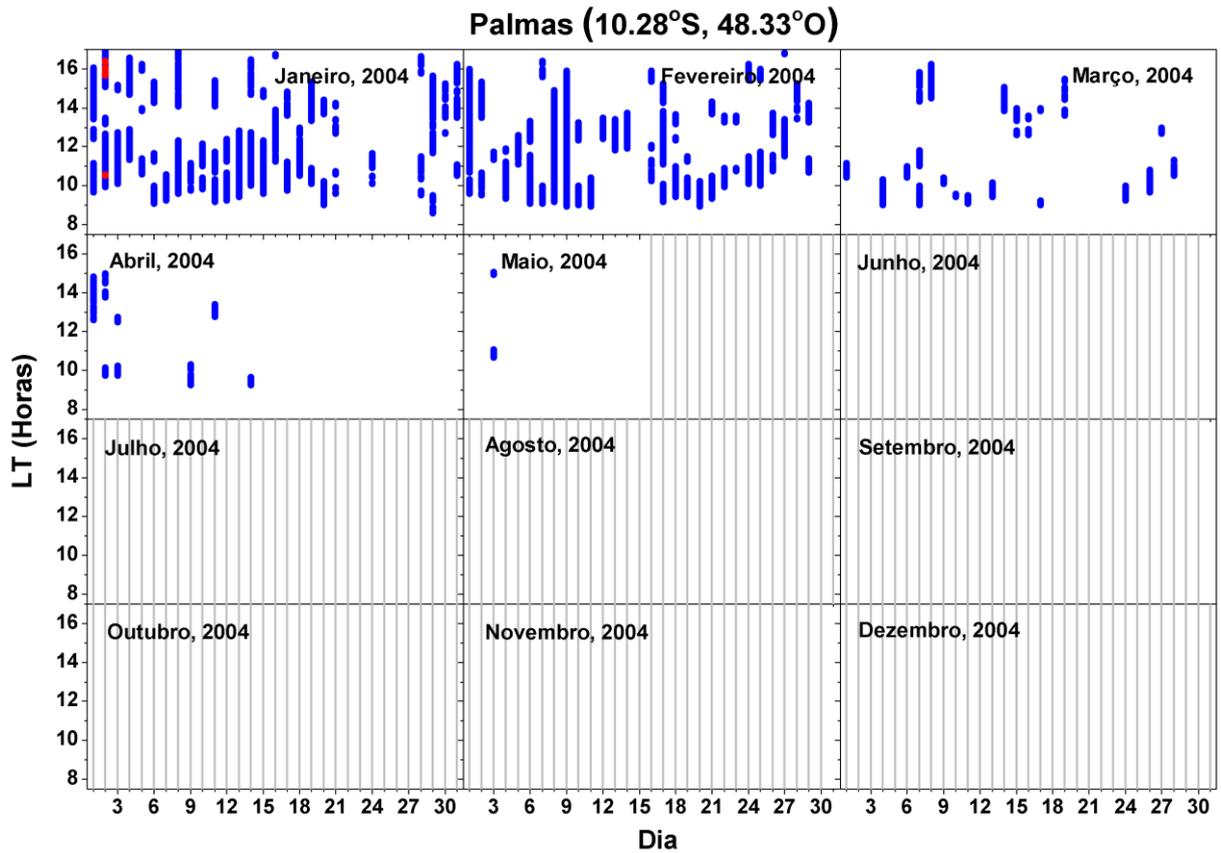
**Figura 32** – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2002, analisadas em Palmas. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados.



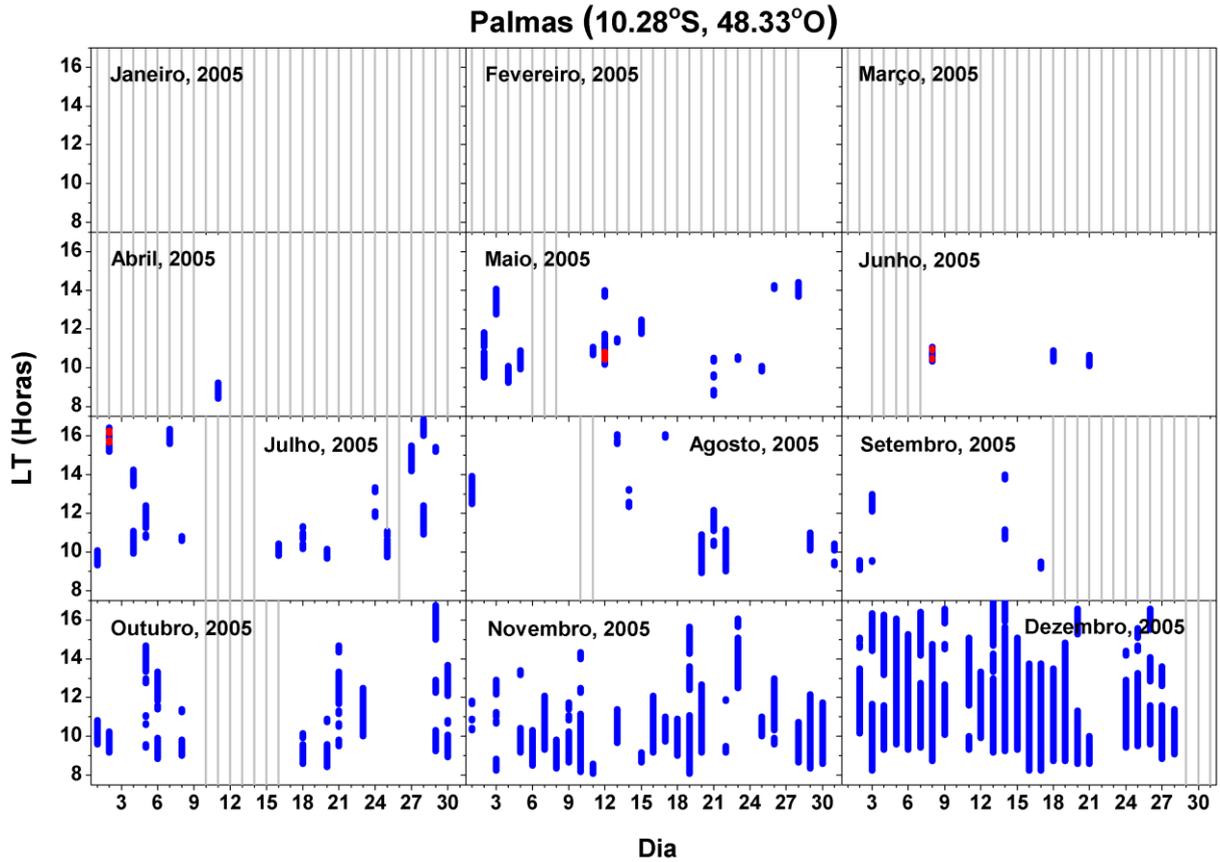
**Figura 33** – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2003, analisadas em Palmas. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados.



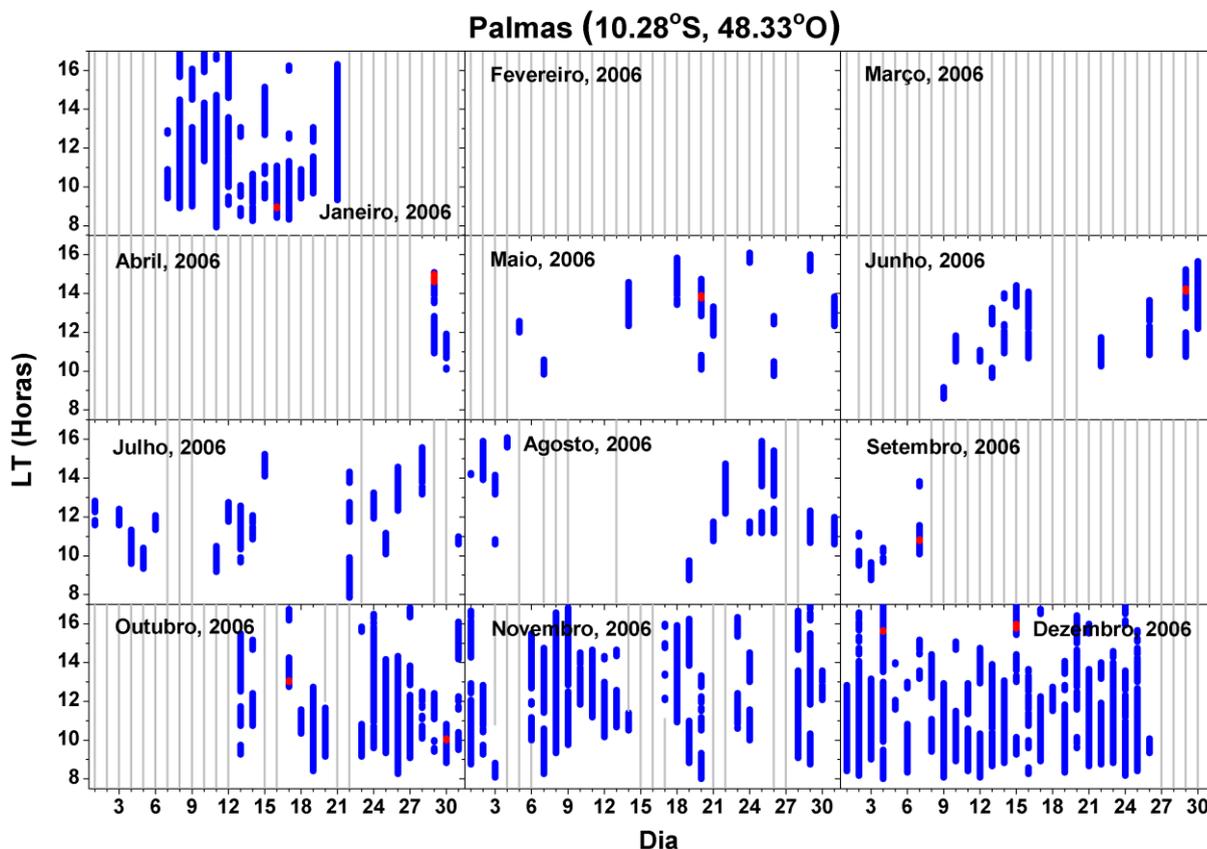
**Figura 34** – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2004, analisadas em Palmas. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados.



**Figura 35** – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2005, analisadas em Palmas. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados.



**Figura 36** – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2006, analisadas em Palmas. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados.



A Figura 37 (SJC) mostra que no ano de 2002, período de alta atividade solar (HSA), a ocorrência de camada F3 foi baixa durante todo o ano (desconsiderando os períodos sem dados úteis). Para o mês de Novembro, percebe-se que o tempo de duração da camada F3 foi superior aos demais meses, este comportamento pode ser constatado, e melhor demonstrado na Figura 43. Não foram registradas ocorrências de camada StF-4 no ano de 2002 no sítio de São José dos Campos.

A Figura 38 (SJC) mostra dados a partir do mês de Junho de 2003, devido a ausência de dados no período de Janeiro a Maio. Percebe-se um comportamento

crescente na ocorrência de camada F3 a partir do mês de Setembro, atingindo um pico no mês de Novembro. Nos meses de Junho e Julho, foram registradas a formação de camada F3 a partir das 10:00 LT até às 15:00 LT. Foi registrada a formação de camada StF-4 apenas no mês de Novembro, em dois dias, e percebe-se também que a formação de camada StF-4 é sempre antecedida e sucedida pela camada F3, conforme os resultados apresentados para PAL.

Os dados apresentados na Figura 39 (SJC 2004), mostram uma maior ocorrência na formação de camada F3 nos meses de Janeiro e Fevereiro, e mostram um padrão de decréscimo no mês de Março. No período de Abril a Setembro, a ocorrência de camada F3 foi muito baixa, chegando a ser zero no mês de Maio. No mês de Outubro (período com dados), a ocorrência de camada F3 aumenta, mantendo este comportamento até o mês de Dezembro. Em média, o horário inicial em que foram registradas a formação de camada F3 foi a partir das 08:30 LT, para o período de Janeiro a Outubro. Nos meses de Novembro e Dezembro, o horário inicial da formação de camada F3 foi a partir das 07:30 LT. O horário final onde foi registrada a formação de camada F3, foi praticamente similar para todo o ano de 2004, até por volta das 13:00 LT. Foi registrada a formação de camada StF-4 apenas nos meses Janeiro, Novembro e Dezembro.

Os dados apresentados na Figura 40 (SJC) para o ano de 2005, mostram uma maior ocorrência na formação da camada F3 nos meses de Janeiro, Fevereiro, Outubro e Novembro, comportamento similar ao ocorrido no ano de 2004 mostrado pela Figura 39. No período de Abril a Setembro, a ocorrência de camada F3 foi muito baixa, chegando a ser zero no mês de Junho. Em média, a formação de camada F3 foi registrada a partir das 08:00 LT, mudando o comportamento no mês de Novembro, onde o horário foi a partir das 07:30 LT, em alguns casos. Nos meses

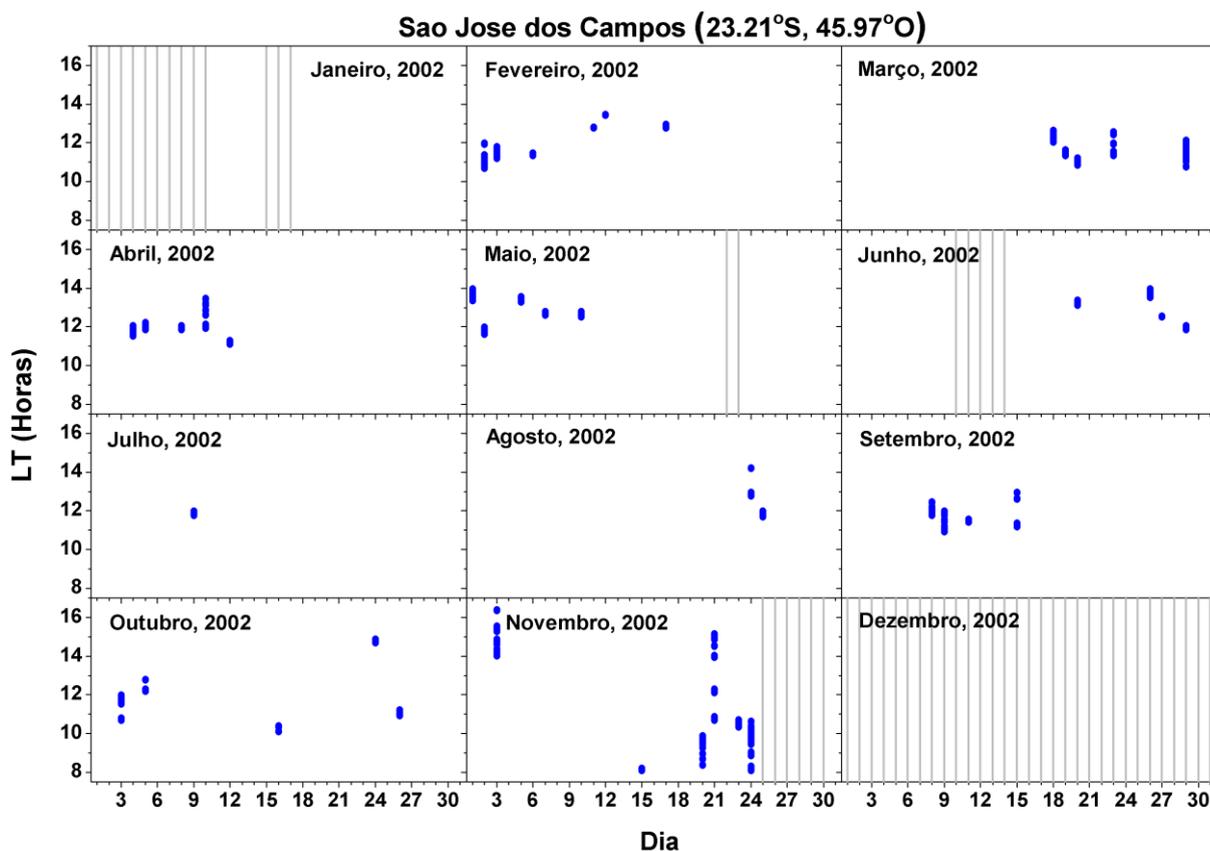
com maior ocorrência de camada F3, o horário final desses registros foi por volta das 13:00 LT. Não foi registrada a ocorrência de camada StF-4 no ano de 2005 em SJC.

Os dados para o ano de 2006 em SJC, apresentados na Figura 41, mostram que a ocorrência de camada F3 para todo o ano foi muito baixa, não sendo registrada a formação de camada StF-4 durante o ano de 2006. Os dados mostram que a camada F3 teve maior ocorrência nos meses de Outubro, Novembro e Dezembro. Não foram registradas ocorrências de camada F3 nos meses de Maio, Junho e Setembro. Nos meses de Novembro e Dezembro, o horário inicial da ocorrência de camada F3, foi em geral, a partir das 08:00 LT, e o horário final até por volta das 13:00 LT. A frequência de ocorrências de camada F3, apresentada na Figura 41, diverge em alguns pontos dos resultados apresentados por Fagundes et al., (2011), para o período de LSA (referente ao ano de 2006), onde são analisados os dados de ionossonda no sítio de São José dos Campos. Fagundes et al., (2011), estuda um período de HSA, de Setembro de 2000 a Agosto de 2001, e um período de LSA, que compreende todo o ano de 2006. As divergências apresentadas entre os resultados do artigo de Fagundes et al., (2011) e os resultados dessa tese, para o período de LSA sobre SJC, podem ter origem na técnica utilizada na identificação da camada F3. Isto se justifica porque este processo é inteiramente visual. Por esse motivo, os dados de ionossonda desse período foram novamente analisados em detalhe e mantidos como mostrados na Figura 41. As divergências apresentadas, não colaboram significativamente nos resultados de ambos os estudos, com exceção para os resultados do mês de Outubro. Neste caso, os resultados do artigo não indicam a ocorrência de camada F3 e, apresentam a ausência de dados nos dias 15, 16, 17 e 18, deste mês, o que não foi verificado em nosso banco de dados. Em

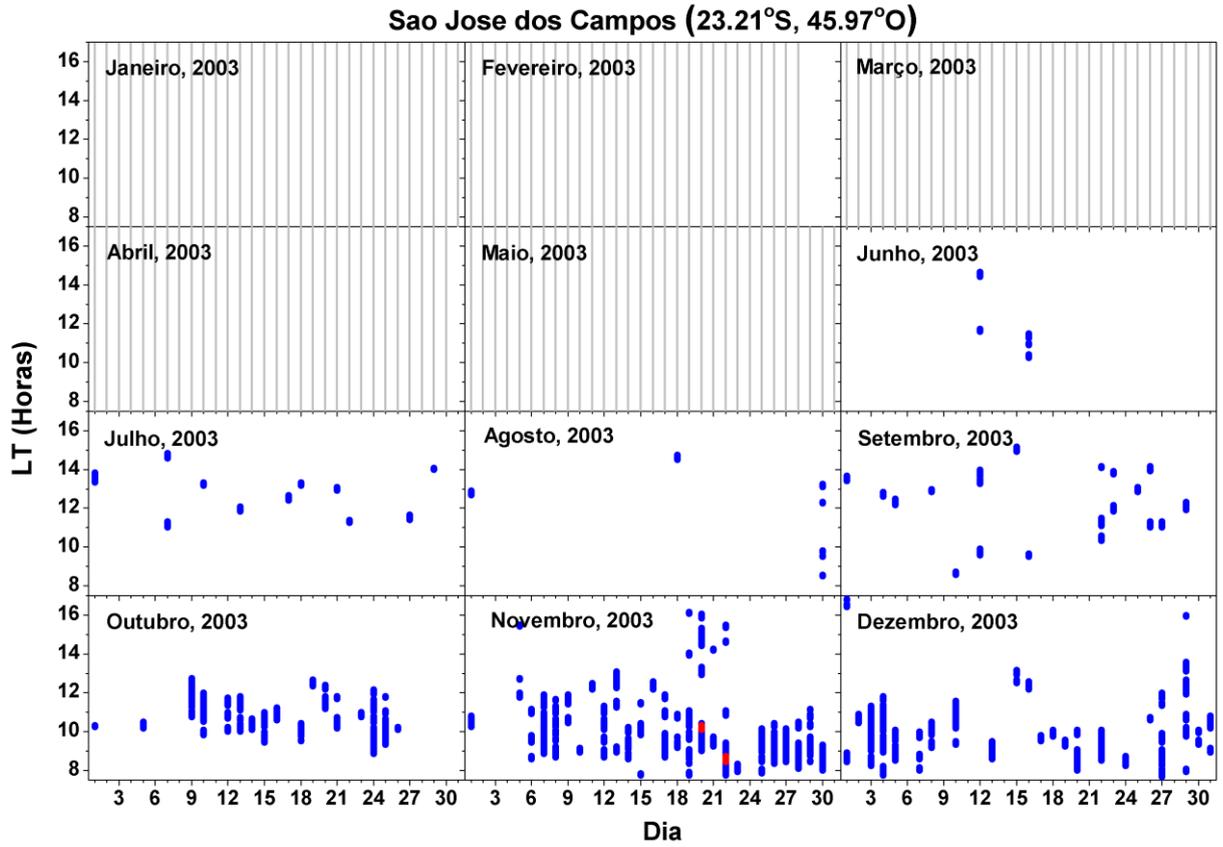
Outubro, verificamos também, que a frequência de ocorrência de camada F3 indica uma tendência de aumento, durante o decorrer do mês.

Os resultados encontrados na análise dos dados de variação dia-a-dia da ocorrência de camadas F3 e StF-4, para o sítio de São José dos Campos, mostram, de maneira geral, que no ano de 2002 (período de HSA), a ocorrência de camada F3 foi muito baixa. Para os demais anos (2003 – 2006), a ocorrência de camada F3 foi maior nos meses de verão local. A camada StF-4 foi registrada em Novembro de 2003 ( $F_{10,7}$  137,70 – média mensal), Janeiro de 2004 ( $F_{10,7}$  110,44 – média mensal), Novembro de 2004 ( $F_{10,7}$  111,22 – média mensal), e Dezembro de 2004 ( $F_{10,7}$  92,49 – média mensal). Diferentemente do comportamento apresentado em Palmas, a formação de camada StF-4 em São José dos Campos indica não haver correlação com o período de atividade solar. Este comportamento é melhor expressado na Figura 49. Como apresentado nas Figuras 30 (PAL) e 31 (SJC), a ocorrência de StF-4 em São José dos Campos, mostrou também ser sempre antecedida e sucedida pela camada F3.

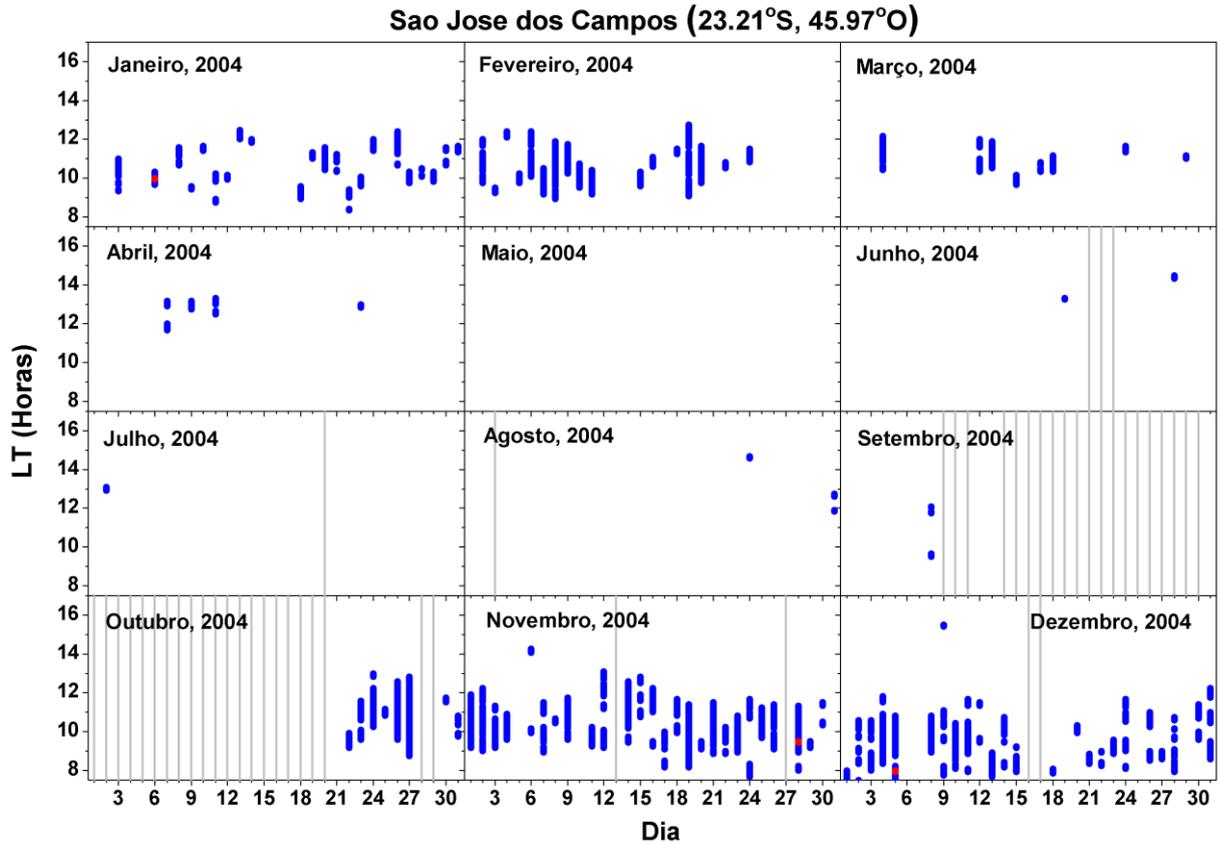
**Figura 37** – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2002, analisada em São José dos Campos. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados.



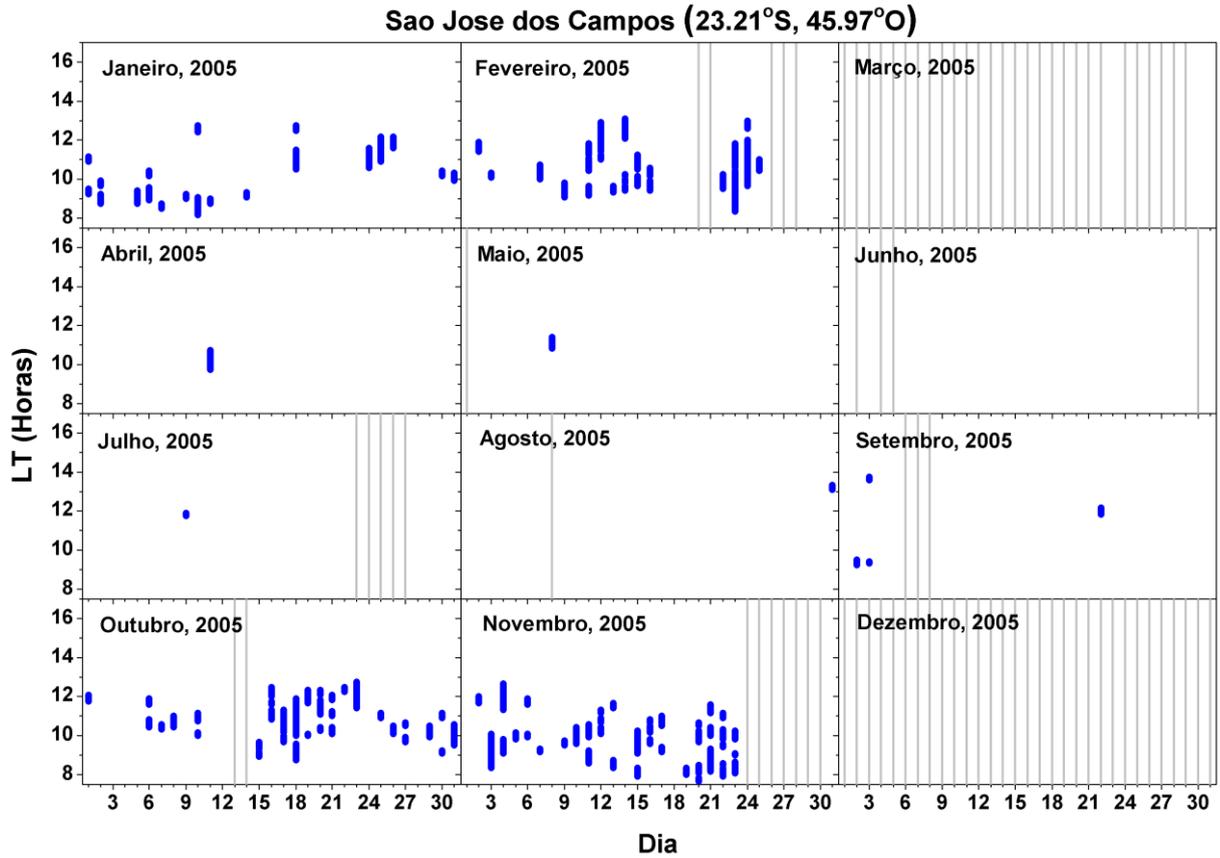
**Figura 38** – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2003, analisada em São José dos Campos. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados.



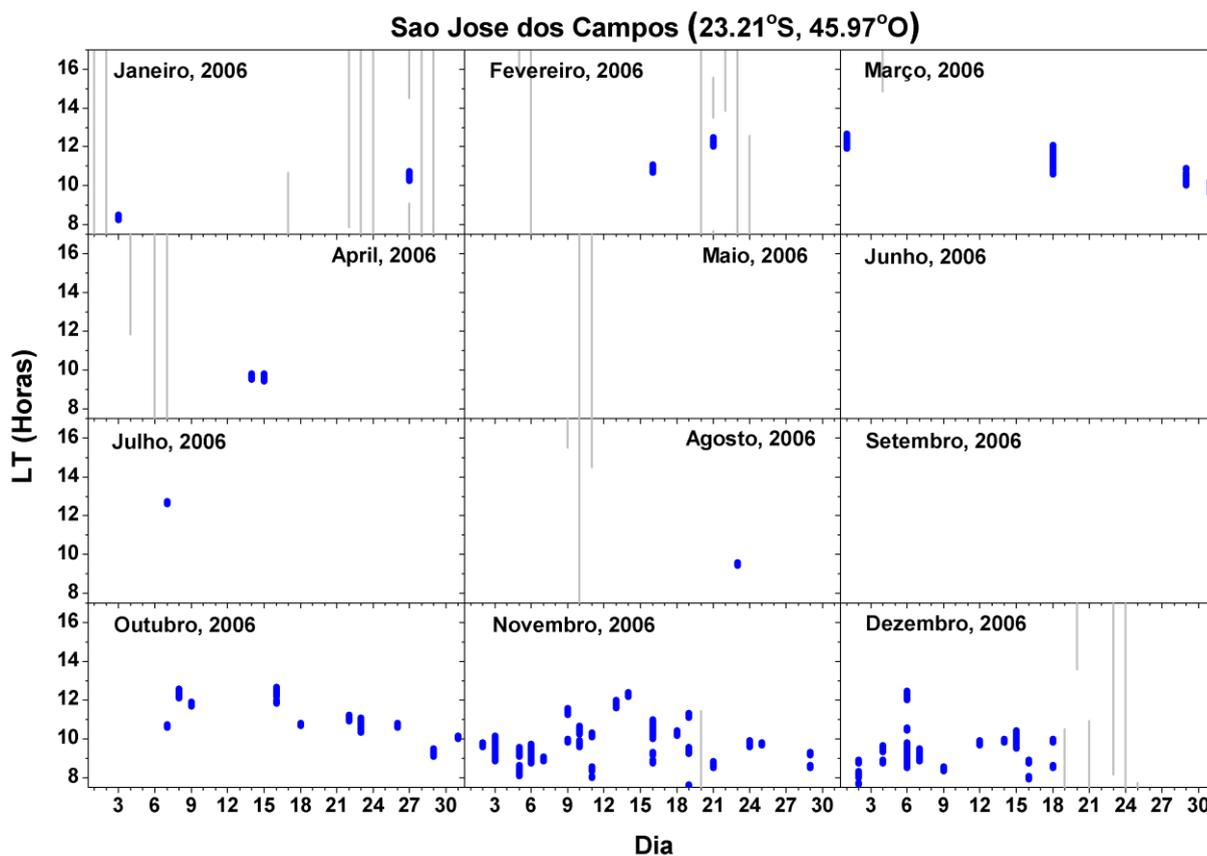
**Figura 39** – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2004, analisada em São José dos Campos. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados.



**Figura 40** – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2005, analisada em São José dos Campos. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados.



**Figura 41** – Variação dia-a-dia da formação de camada F3 e quarta estratificação StF-4 da região F, para o ano de 2006, analisada em São José dos Campos. As barras em azul indicam a ocorrência de camada F3, as barras em vermelho indicam a ocorrência de StF-4, e as barras em cinza indicam a ausência de dados.



As Figuras 42 e 43, mostram os dados referentes ao tempo total de duração da camada F3 (tempo acumulado), registrados nos sítios de Palmas e São José dos Campos, respectivamente, para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006. Em Palmas (Figura 42), os resultados do ano de 2002, indicam que nos meses de Junho e Julho, o tempo total de duração da camada F3, foi superior aos demais meses do ano, sendo maior no mês de Julho (46h 50min). Para o ano de 2003, o mês que apresentou o tempo máximo de duração de camada F3 foi Dezembro (51h 15min). Os demais meses do ano de 2003 (meses com dados), o tempo máximo de duração não ultrapassou 22 horas (mês de Julho) de camada F3 no mês. Para o ano de 2004, os dados disponíveis foram de Janeiro a Maio (até dia 15), e indicam que no

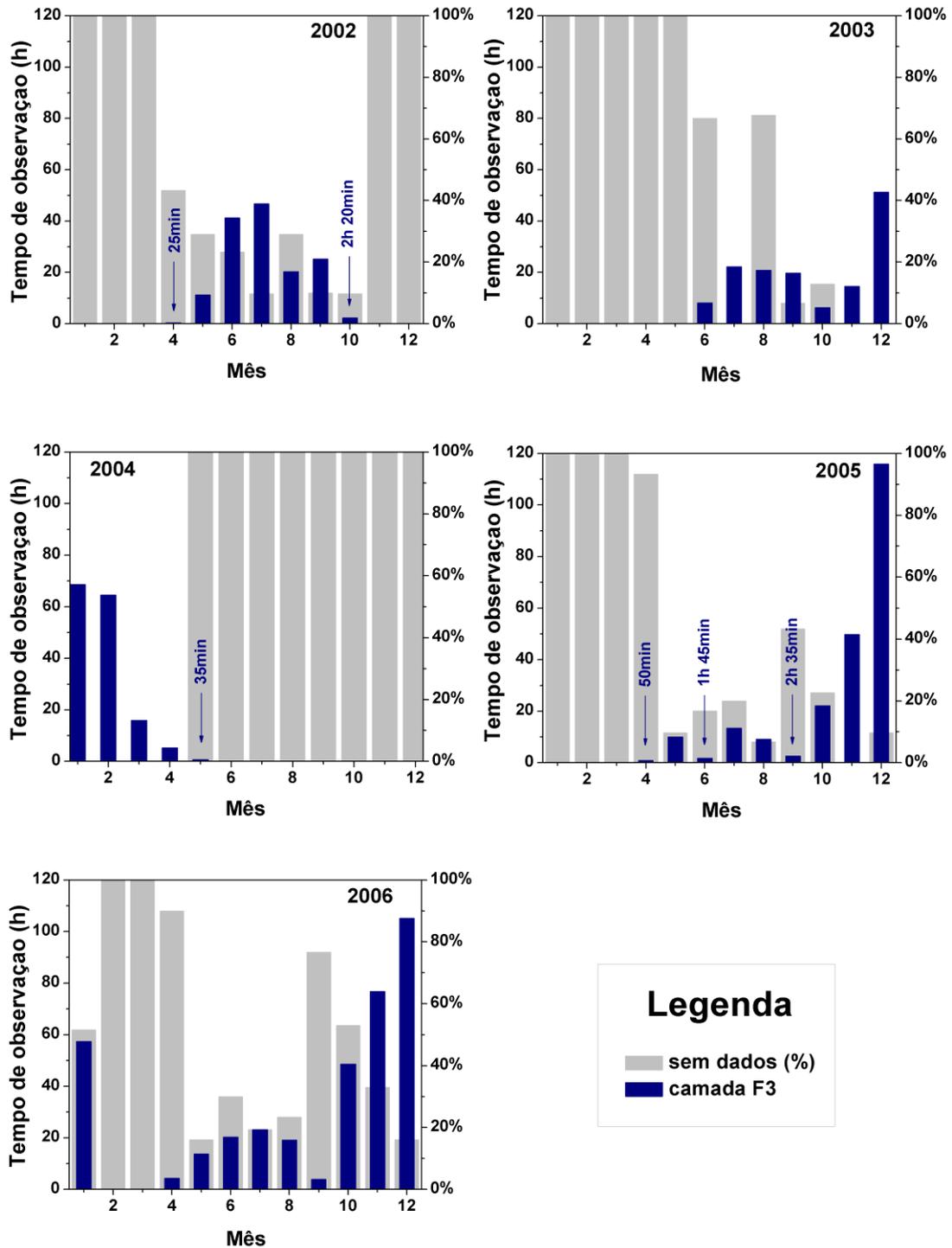
mês de Janeiro o tempo de duração de camada F3 foi maior que os demais meses, atingindo o valor de 68h 40min totais. Em Fevereiro o valor foi levemente inferior, chegando a 64h 35min. Este comportamento de decréscimo é mantido para os demais meses, porém com valores bem inferiores aos registrados em Janeiro e Fevereiro. Para o ano de 2005 em PAL, os resultados indicam que o tempo de duração (total para cada mês) de camada F3 nos meses de Maio, Julho e Agosto, foi aproximadamente o mesmo, alcançando o máximo em Julho (13h 25min); no mês de Outubro, inicia-se um padrão de crescimento exponencial, atingindo o máximo em Dezembro, com o valor de 115h 55min. O mesmo comportamento foi percebido para os resultados de 2006 em PAL, onde percebe-se haver dois padrões de máximos (picos) de tempo de duração de camada F3, um acontecendo no mês de Julho (pico de inverno), iniciando então um decréscimo, e outro máximo acontecendo no mês de Dezembro (pico de verão). Outro ponto importante a ressaltar, é que o tempo de duração de camada F3 no período de alta atividade solar (HSA), nos meses de inverno (pico de inverno) é maior se comparado ao do período de baixa atividade solar (LSA). Este comportamento se inverte para os meses de verão (pico de verão), onde percebe-se que os valores de tempo de duração de camada F3 são maiores em LSA se comparados ao período de HSA.

Em São José dos Campos (Figura 43), os resultados indicam, para o ano de 2002, que o tempo de duração da camada F3 não ultrapassou 4 horas, o que ocorreu no mês de Novembro. De Fevereiro a Maio, o tempo de duração chegou a 2 horas, havendo um decréscimo em Junho, alcançando o menor valor em Julho (15min), em Agosto o tempo de duração voltou a aumentar. No ano de 2003, os dados úteis iniciaram no mês de Junho. De Junho a Agosto, o tempo de duração de camada F3 foi baixo, não ultrapassando 2h 05min (em Julho); em Setembro o valor

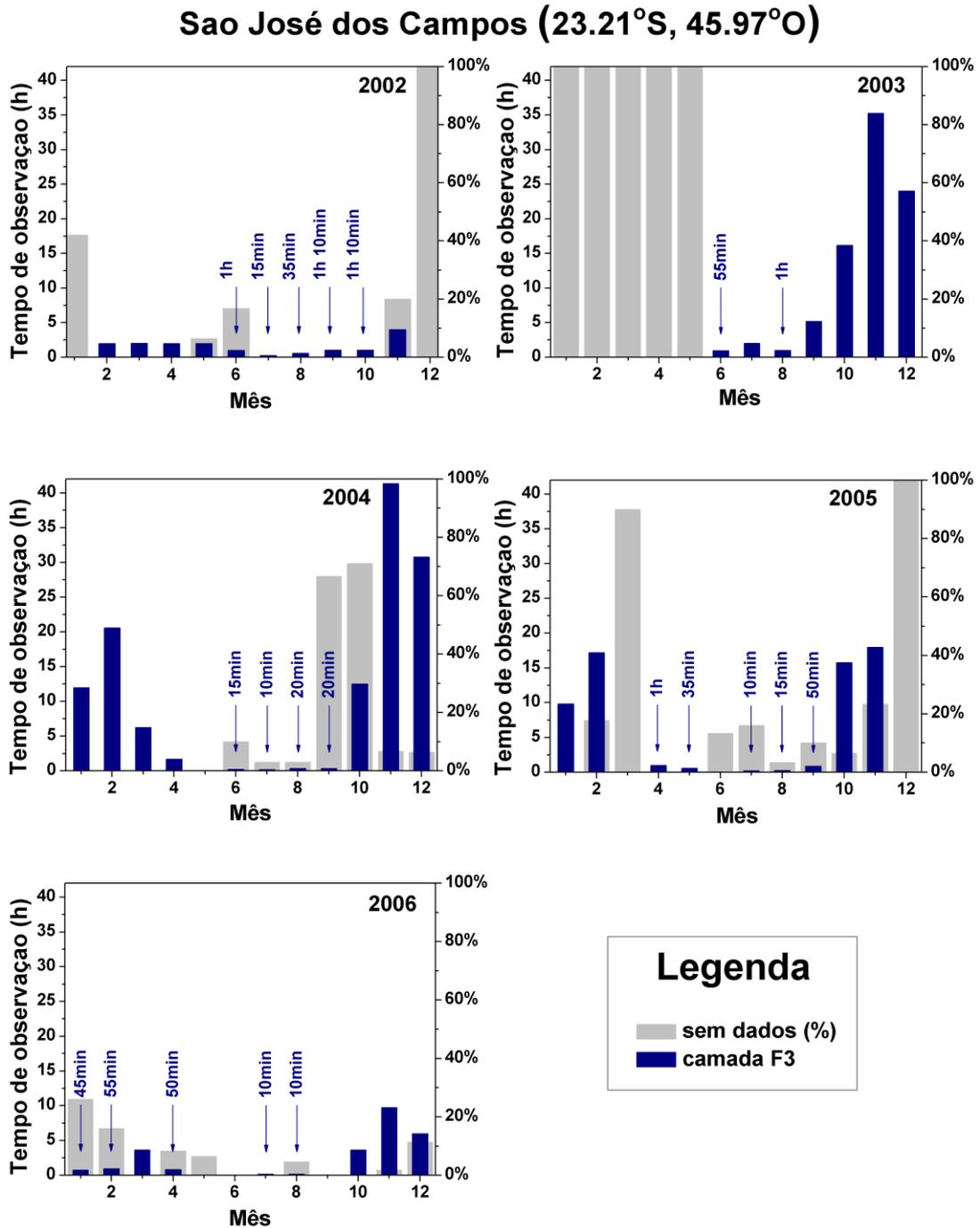
inicia um padrão de crescimento, que acontece até o mês de Novembro (chegando a 35h 15min). Em 2004, em relação aos anos anteriores analisados, foi o ano com a maior quantidade de dados úteis. Neste período, percebe-se que os meses com o maior tempo de duração são os meses em verão local, e que o mês de Novembro repete o padrão já constatado nos dados dos anos anteriores, sendo o mês com o maior tempo relativo de duração de camada F3. Este padrão se repete para os anos de 2005 e 2006, mantendo ainda o mês de Novembro como o de maior duração de camada F3. Em 2006. O padrão ocorrido no ano de 2006, para o tempo de duração de camada F3, foi similar ao ocorrido no ano de 2004, pelo menos para os meses de Outubro, Novembro e Dezembro.

**Figura 42** – Tempo acumulado de observação mensal da camada F3 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, analisadas em Palmas. As barras em azul indicam o tempo total de duração da observação da camada F3, as barras em cinza indicam o percentual do período sem dados no respectivo mês.

**Palmas (10.28°S, 48.33°O)**



**Figura 43** – Tempo acumulado de observação mensal da camada F3 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, analisadas em São José dos Campos. As barras em azul indicam o tempo total de duração da observação da camada F3, as barras em cinza indicam o percentual do período sem dados no respectivo mês.



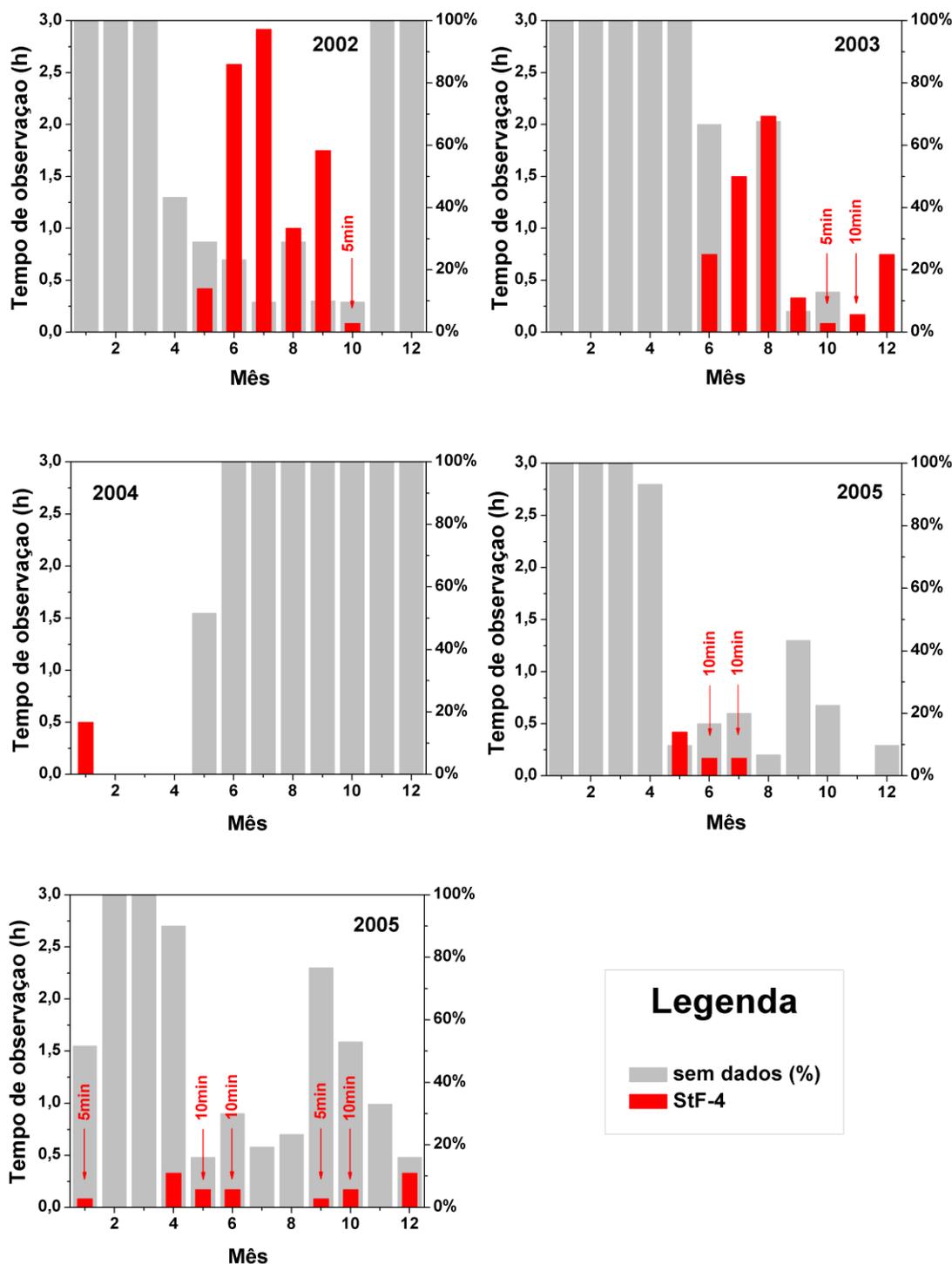
As Figuras 44 e 45, mostram os dados referentes ao tempo total de duração da camada StF-4 (tempo acumulado), registrados nos sítios de Palmas e São José dos Campos, respectivamente, para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006. Em Palmas, os resultados do ano de 2002 apresentados na Figura 44, indicam que os maiores valores de tempo total de duração de camada StF-4 ocorreram nos meses de Junho e Julho, atingindo 2h 55min em Julho. No ano de 2003, os meses com o maior tempo de duração de camada StF-4 foram os meses em inverno (Junho, Julho e Agosto), e também o mês de Dezembro, sendo que no período em inverno, o tempo total de camada StF-4 foi superior se comparado ao período em verão. É importante ressaltar que em Dezembro de 2003 (verão), a ocorrência de camada F3 foi alta, tendo registros praticamente todos os dias, já a ocorrência de camada StF-4 foi baixa, tendo registros apenas em quatro dias do mês (ver Figura 33). Em 2004, a ocorrência de StF-4 se deu apenas no dia 02 de Janeiro, com um tempo de duração de 30min. Os dados úteis no ano de 2004, foram de 01 de Janeiro a 15 de Maio. Nos anos de 2005 e 2006, a ocorrência de camada StF-4 foi baixa, e o tempo de duração dessa camada, neste período, foi também proporcional. O tempo total máximo de duração de camada StF-4 no ano de 2005 foi de 25min (mês de Maio), e no ano de 2006 foi de 20min (nos meses de Abril e Dezembro). Assim como verificado no comportamento da ocorrência de camada StF-4, o tempo de duração dessa camada também foi maior no período de alta atividade solar HSA (ano de 2002), diminuindo proporcionalmente ao índice  $F_{10,7}$  (índice de fluxo solar). De maneira geral, o tempo total de duração de camada StF-4 foi maior nos meses em inverno, se comparado ao período em verão.

Em São José dos Campos (Figura 45), não foi registrada a ocorrência de camada StF-4 nos anos de 2002, 2005 e 2006. No ano de 2003, foi registrada

apenas no mês de Novembro, com tempo total de duração de camada StF-4 de 30min, e no ano de 2004, foi registrada nos meses de Janeiro, Novembro e Dezembro, ambos com o tempo de duração de 5min (tempo de resolução da ionossonda).

**Figura 44** – Tempo acumulado de observação da StF-4 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, analisadas em Palmas. As barras em vermelho indicam o tempo total de duração da observação da StF-4, as barras em cinza indicam o percentual do período sem dados no respectivo mês.

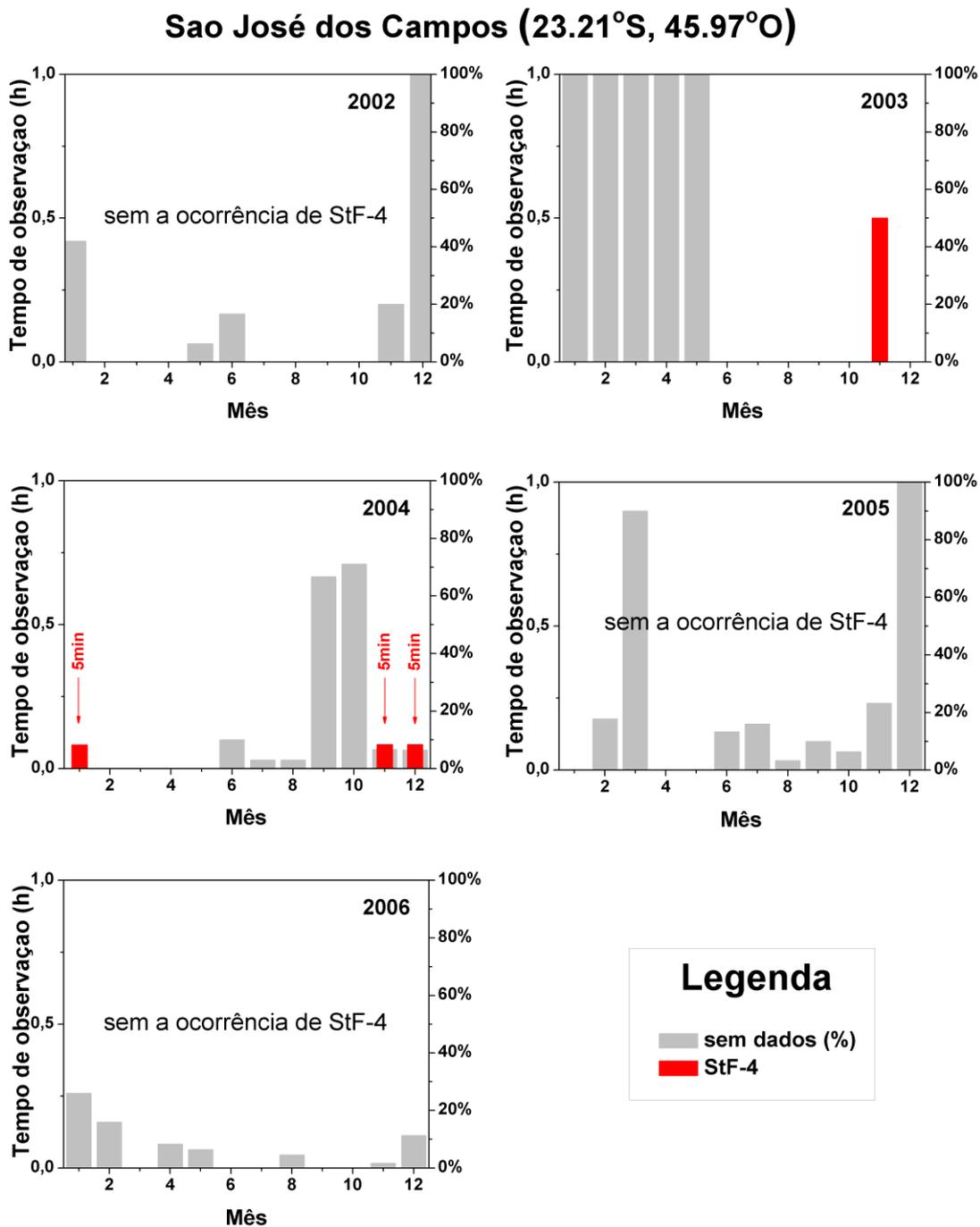
### Palmas (10.28°S, 48.33°O)



**Legenda**

- sem dados (%)
- StF-4

**Figura 45** – Tempo acumulado de observação da StF-4 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, analisadas em São José dos Campos. As barras em vermelho indicam o tempo total de duração da observação da StF-4, as barras em cinza indicam o percentual do período sem dados no respectivo mês.



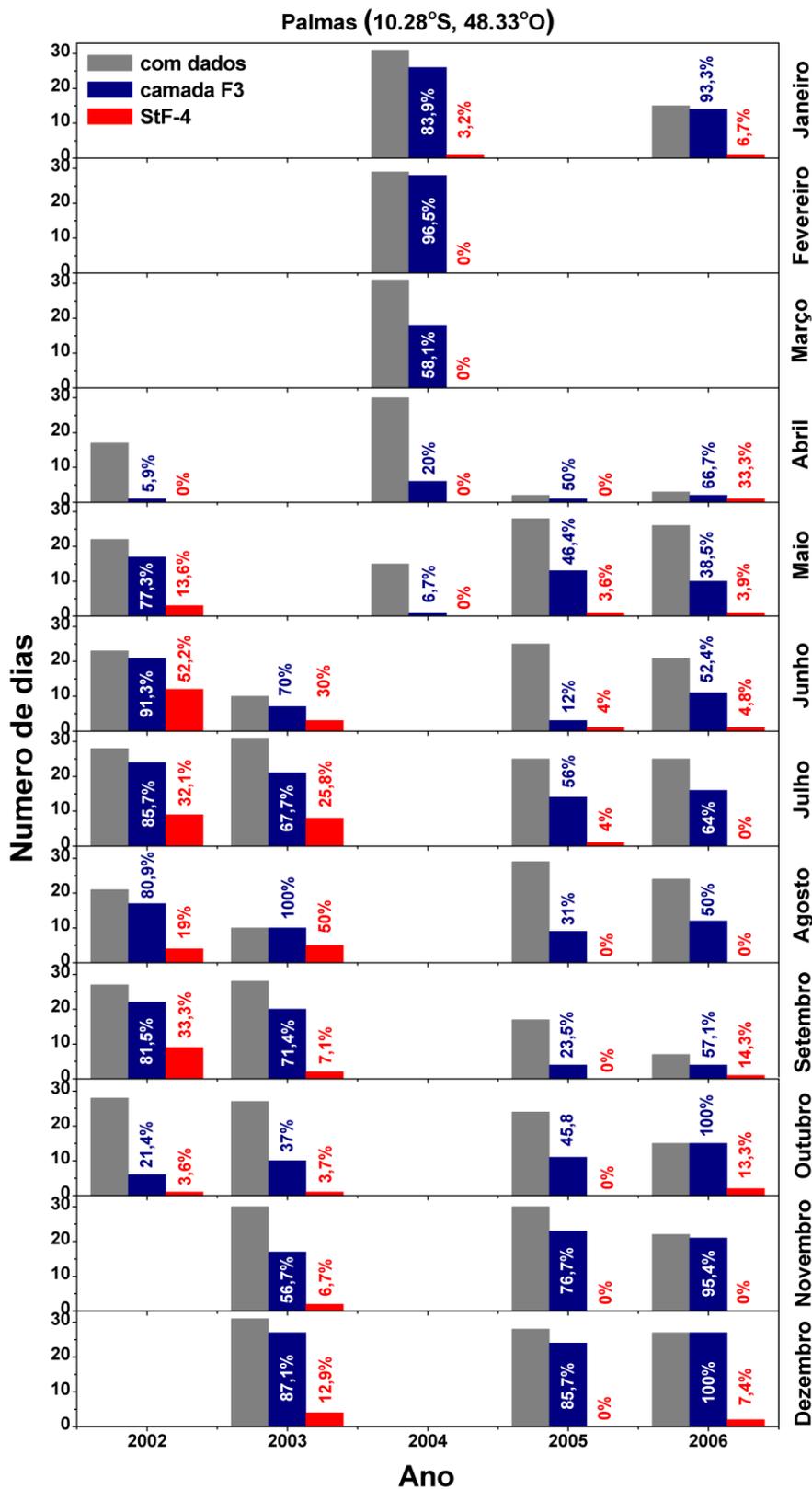
As Figuras 46 e 47, mostram uma visão geral mensal das ocorrências das camadas F3 e StF-4 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, em Palmas e São José dos Campos, respectivamente. Em Palmas (Figura 46), os resultados mostram, adicionalmente, que a ocorrência de camada F3 foi maior nos meses em verão. Entre os meses de Maio a Setembro, a ocorrência de camada F3 foi maior no período de alta atividade solar (HSA), e mostrou decréscimo a medida que diminui a atividade solar; este comportamento é mais evidente no mês de Setembro (equinócio de primavera). Nos meses de Outubro, Novembro e Dezembro, o comportamento (ocorrência de camada F3) se inverte, aumentando a ocorrência a medida em que diminui a atividade solar. Nessa análise, os dados confirmam os resultados já apresentados para o comportamento da camada StF-4, indicando que a ocorrência de camada StF-4 é maior no período de alta atividade solar. Percebe-se também, que a ocorrência de camada StF-4 foi maior, para o ano de 2002 (HSA), no mês de Junho (solstício de inverno).

Em São José dos Campos (Figura 47), os resultados mostram, adicionalmente, que a ocorrência de camada F3 foi maior nos meses de Janeiro, Fevereiro, Outubro, Novembro e Dezembro. Percebe-se que as ocorrências de camada StF-4 registradas nos sítio de SJC, aconteceram nos meses de grande ocorrência de camada F3 (Janeiro – 2004, Novembro - 2003 e 2004, Dezembro – 2004), indicando a forte correlação com a formação de camada F3.

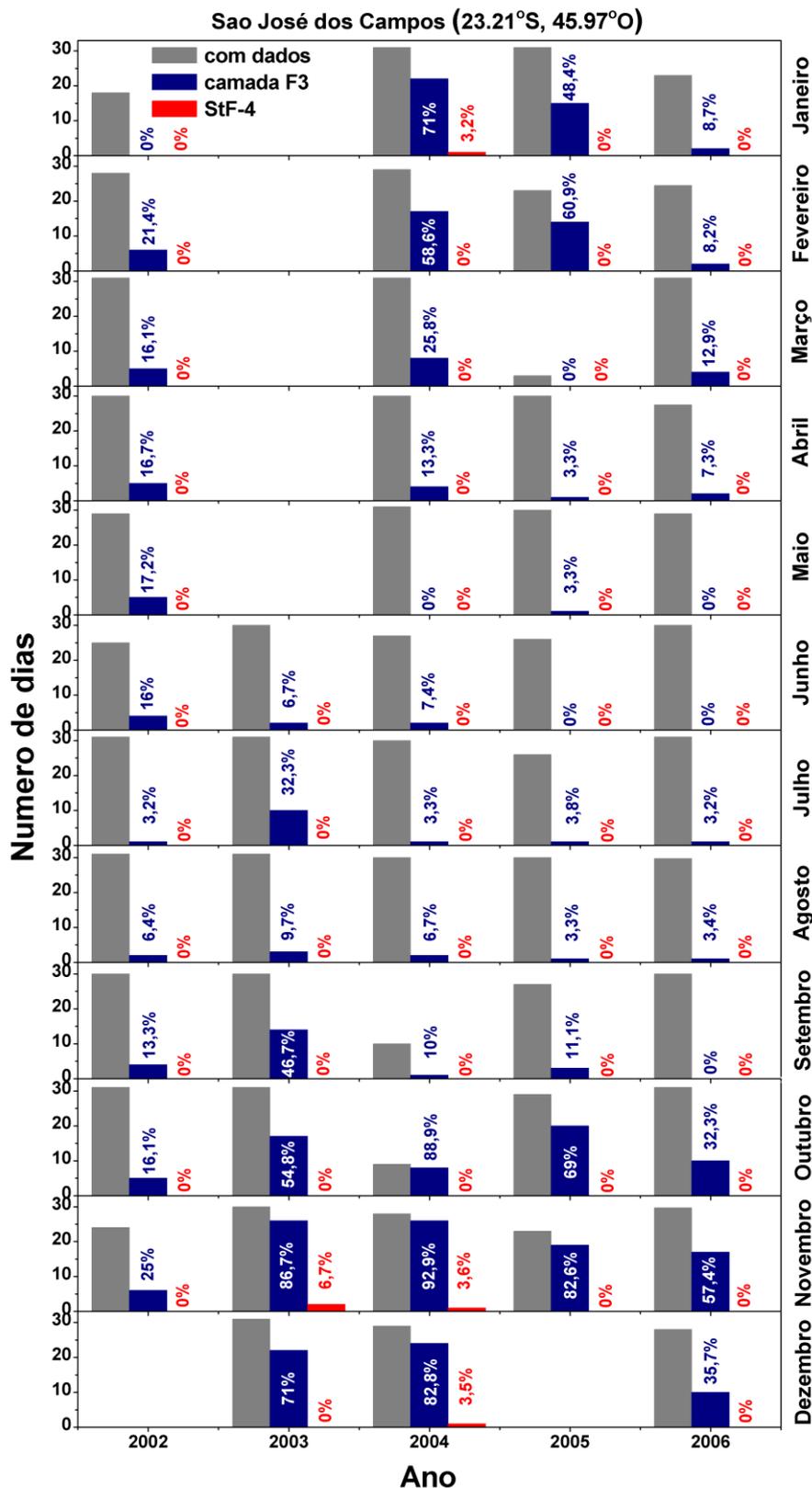
As Figuras 48 e 49, mostram o índice F10,7 (variação média diária), painel (a), e os dados de ocorrência mensal de camada StF-4, painel (b), para o período de 2002 a 2006. O objetivo desta análise é verificar se há a correlação da formação das camadas F3 e StF-4 com a atividade solar em ambos os sítios, de Palmas (região próxima ao equador magnético) e São José dos Campos (região de baixa latitude).

As análises anteriores, assim como a feita sobre os dados apresentados nas Figuras 46 e 47, já apresentaram resultados importantes, indicando o comportamento das camadas F3 e StF-4, durante a variação da atividade solar ao longo do período estudado (2002 – 2006). Especificamente sobre o comportamento da camada StF-4, é importante ressaltar a forte correlação da formação de camada StF-4 com a atividade solar, verificada no sítio de Palmas (Figura 48). Em São José dos Campos (Figura 49), os resultados não indicam correlação da formação das camadas F3 e StF-4, com o período do ciclo de atividade solar.

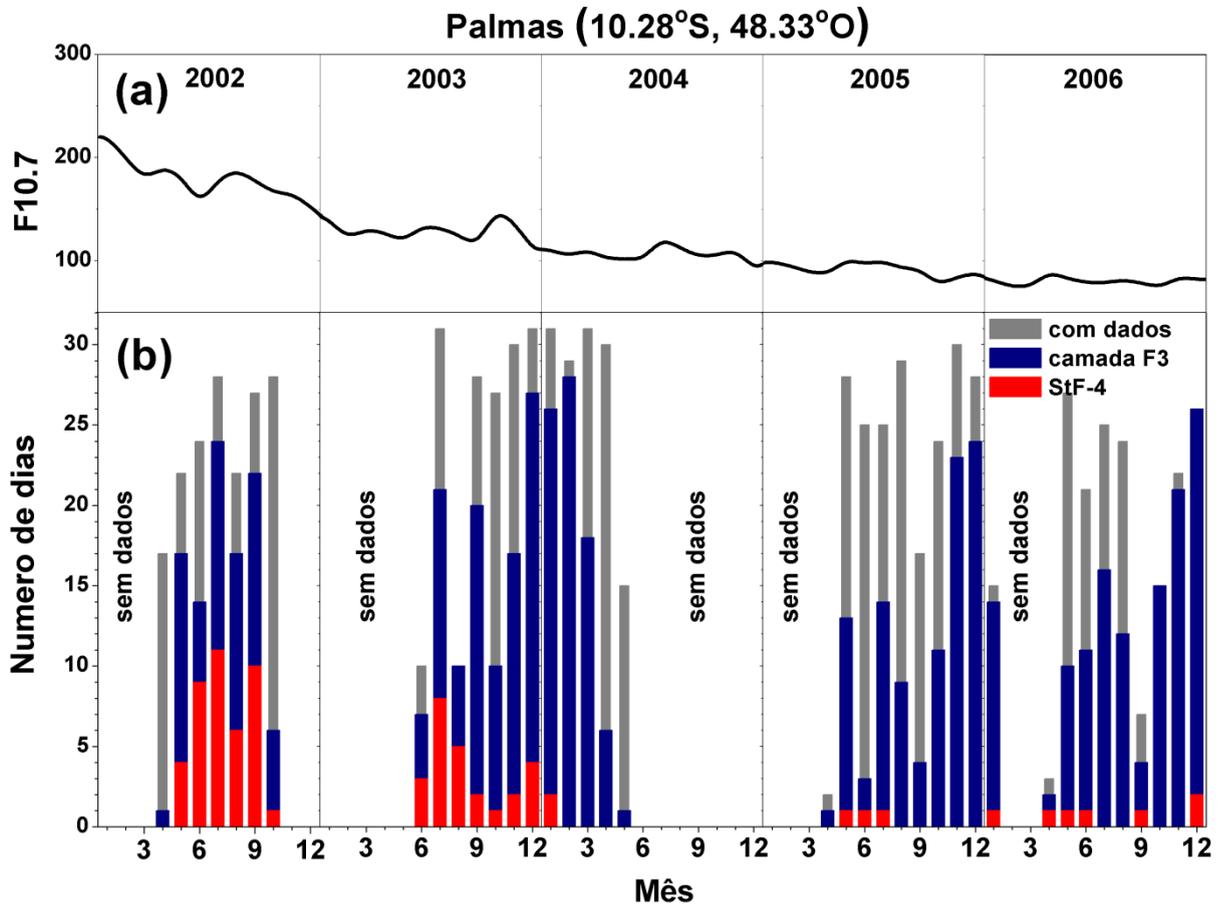
**Figura 46** – Visão geral mensal das ocorrências das camadas F3 e StF-4 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, analisadas em Palmas. O gráfico informa também a estatística de dias com camadas F3 e StF-4, calculadas em relação ao período com dados úteis (em cinza).



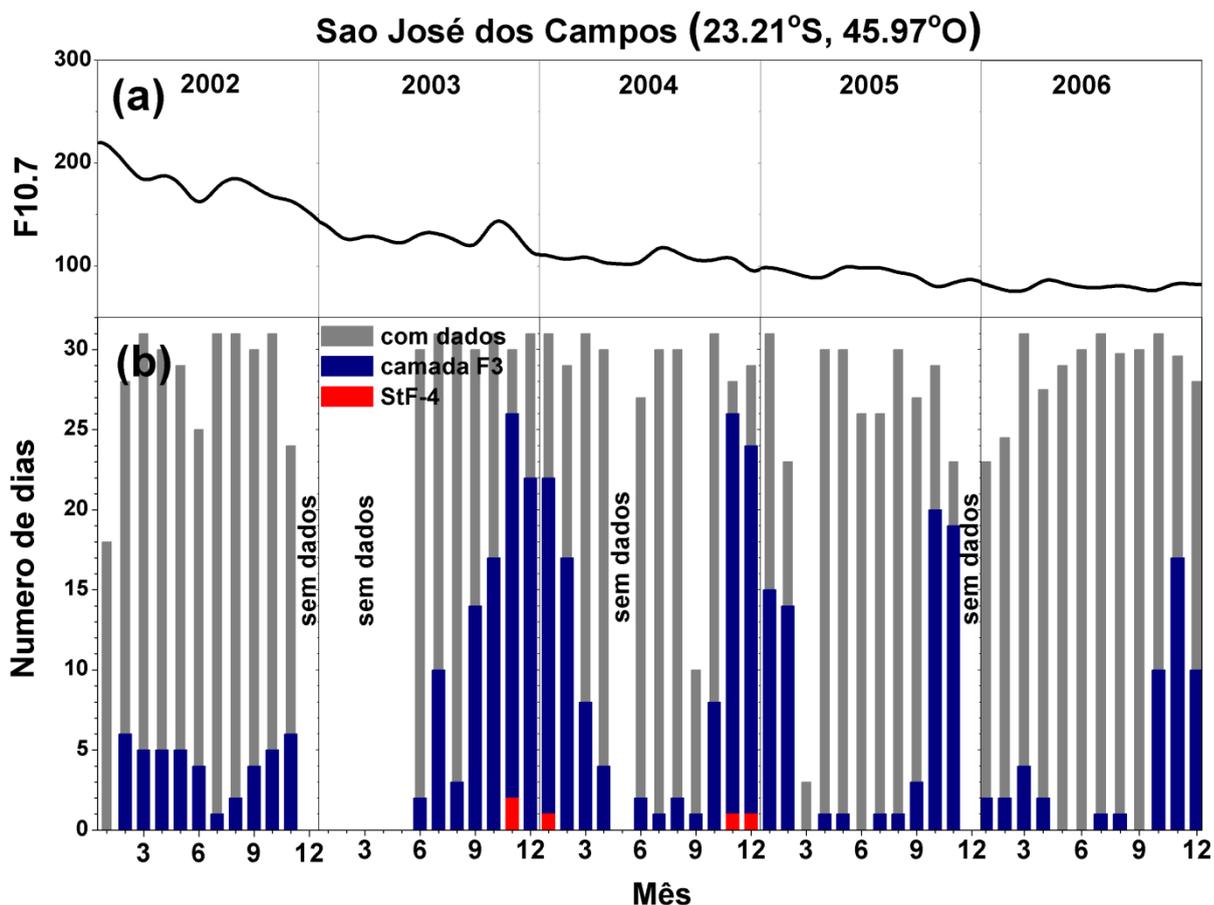
**Figura 47** – Visão geral mensal das ocorrências das camadas F3 e StF-4 para os anos de 2002, 2003, 2004, 2005 e 2006, analisadas em São José dos Campos. O gráfico informa também a estatística de dias com camadas F3 e StF-4, calculadas em relação ao período com dados úteis (em cinza).



**Figura 48** – O painel (a) mostra a variação da média mensal do índice F10,7 para o período de 2002 a 2006. O painel (b) mostra a ocorrência mensal (em número de dias) das camadas F3 e StF-4 para o período de 2002 a 2006, analisadas em PAL; as barras em cinza indicam o número de dias no mês com dados, e as barras em azul e vermelho indicam o número de dias no mês em que ocorreram a formação das camadas F3 e StF-4, respectivamente.



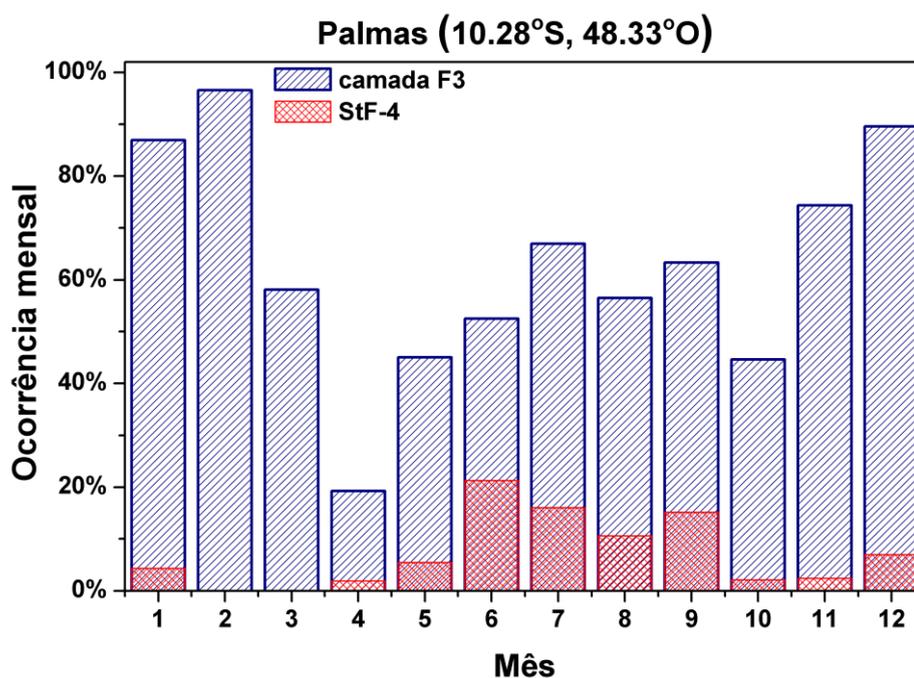
**Figura 49** – O painel (a) mostra a variação da média mensal do índice F10,7 para o período de 2002 a 2006. O painel (b) mostra a ocorrência mensal (em número de dias) das camadas F3 e StF-4 para o período de 2002 a 2006, analisadas em SJC; as barras em cinza indicam o número de dias no mês com dados, e as barras em azul e vermelho indicam o número de dias no mês em que ocorreram a formação das camadas F3 e StF-4, respectivamente.



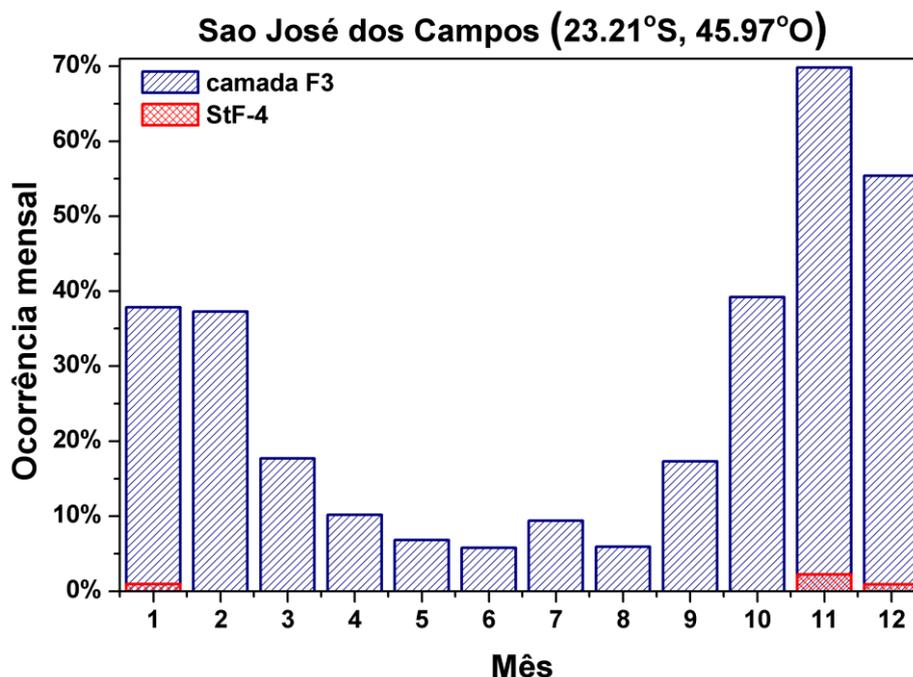
As Figuras 50 e 51, mostram a média mensal de ocorrências de camadas F3 e StF-4, em Palmas e São José dos Campos, respectivamente. O cálculo da média foi realizado para o período de 2002 a 2006, utilizando somente os dados mês-a-mês (de cada ano estudado), com a ocorrência das respectivas camadas (F3 e StF-4), e em relação aos dados úteis dos respectivos meses. Para os dados de Palmas (Figura 50), os resultados indicam adicionalmente que, a ocorrência de camada StF-4 foi maior nos meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro. Neste período (Junho a Setembro), a ocorrência de camada F3 apresentou um padrão semelhante ao da

camada StF-4. Para os dados em São José dos Campos (Figura 51), os dados confirmam os resultados já apresentados anteriormente. Não foi possível se estabelecer um padrão definido para o comportamento da ocorrência de camada StF-4.

**Figura 50** – Média mensal de ocorrências de camadas F3 e StF-4, para o período de 2002 a 2006, analisadas em Palmas. As barras em azul representam a média de ocorrências de camada F3, e as barras em vermelho representam a média de ocorrências de camada StF-4, para os respectivos meses.



**Figura 51** – Média mensal de ocorrências de camadas F3 e StF-4, para o período de 2002 a 2006, analisadas em São José dos Campos. As barras em azul representam a média de ocorrências de camada F3, e as barras em vermelho representam a média de ocorrências de camada StF-4, para os respectivos meses.



Neste estudo, foram analisados 867 dias com dados úteis para o sítio de Palmas TO, e 1477 para o sítio de São José dos Campos SP. Em Palmas, dos 867 dias analisados, em 532 dias ocorreu a formação de camada F3 (61,4% dos dias úteis), em 74 dias ocorreu a formação de camada StF-4 (8,5% dos dias com dados úteis, e 13,9% dos dias com a formação de camada F3 ocorreu a camada StF-4). Em São José dos Campos, dos 1477 dias analisados, em 382 dias ocorreu a formação de camada F3 (25,9% dos dias com dados úteis) e, dos 1447 dias totais, ocorreu a formação de camada StF-4 em apenas 5 dias (0,3% dos dias com dados úteis, e 1,3% dos dias com a formação de camada F3 ocorreu a formação de camada StF-4).

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo principal estudar o comportamento das camadas F3 e StF-4 (quarta estratificação da região F da ionosfera) na região próxima ao equador magnético, no sítio de Palmas TO (latitude  $10,3^{\circ}\text{S}$ , longitude  $48,3^{\circ}\text{O}$ ; dip latitude  $5,5^{\circ}\text{S}$ ), e na região de baixa latitude, no sítio de São José dos Campos SP (latitude  $23,21^{\circ}\text{S}$ , longitude  $45,97^{\circ}\text{O}$ ; dip latitude  $17,6^{\circ}\text{S}$ ), no setor brasileiro. O estudo foi feito através de dados obtidos em ionossondas instaladas nos sítios citados.

Os principais resultados encontrados das observações de quádrupla estratificação (StF-4) da região F ionosférica, para o período de Junho, Julho e Agosto de 2002 obtidos sobre Palmas (PAL), estão resumidos a seguir:

- A camada StF-4 tem tempo de vida mais curto se comparado à camada ionosférica F3.
- A camada StF-4 é sempre antecedida e sucedida pela camada F3.
- Pela análise das isofrequências nos períodos onde ocorreu a formação de camada StF-4, observou-se que a camada StF-4 em geral, se forma quando o pico de densidade de elétrons da região F atinge a altura máxima durante o dia.

- Existe a indicação de que a quarta estratificação StF-4 é formada devido à combinação da deriva de plasma para cima diurna  $E \times B$  de fundo (deriva do plasma comum ao ambiente para o período diurno) com uma deriva de plasma  $E \times B$  formada por um campo elétrico zonal não-uniforme, que pode estar sendo gerado por oscilações ondulatórias do ambiente.

A seguir, são apresentados os principais resultados da análise feita para o período de 2002 a 2006, no sítio de PAL para o estudo da variação sazonal e dependência do ciclo solar das camadas F3 e StF-4:

- As observações feitas da camada StF-4 em PAL, indicam também, que o tempo de vida da camada é curto, e que a camada StF-4 é sempre antecedida e sucedida pela camada F3.
- A frequência de ocorrências de StF-4 mostrou ser maior durante o período de inverno. No ano de 2002 (HSA), a maior ocorrência foi no mês de Junho (solstício de inverno local).
- No período de HSA a frequência de ocorrências de camada StF-4 é maior, se comparada ao período de LSA.
- O tempo acumulado de camada StF-4 foi maior em HSA, se comparado a LSA, e mostra um comportamento de decréscimo em sentido a LSA.

- O tempo acumulado de camada StF-4, mostrou ser maior nos meses em inverno, analogamente à frequência de ocorrências.
- A frequência de ocorrências de camada F3 mostrou ser maior nos meses em verão e inverno local.
- Nas fases de decréscimo da atividade solar (a partir de 2003) e LSA, a frequência de ocorrências de camada F3 mostrou ser maior nos meses em verão, se comparado aos meses em inverno.
- Foram identificados dois períodos distintos onde o tempo de duração de camada F3 atinge o pico (ponto de máxima duração), nomeamos como pico de verão e pico de inverno. No período do ciclo solar de HSA, o tempo de duração de camada F3 foi maior no pico de inverno. Já no período do ciclo solar de LSA, verificamos que o tempo de duração de camada F3 foi maior no pico de verão.

São apresentados agora, os principais resultados da análise feita para o período de 2002 a 2006, no sítio de SJC para o estudo da variação sazonal e dependência do ciclo solar das camadas F3 e StF-4:

- Como observado em PAL, o tempo de vida da camada StF-4 em SJC é curto, e é sempre antecedida e sucedida pela camada F3.

- A formação de camada StF-4 não mostrou correlação com o período do ciclo de atividade solar. Comportamento diferente ao constatado em PAL.
- A frequência de ocorrências de camada F3 durante todo o ano de 2002 e 2006 foi muito baixa, no período de 2003 a 2006, a frequência de ocorrências de camada F3 mostrou ser maior nos meses em verão, indicando um padrão para um máximo sempre nos meses de Novembro. Percebe-se também uma baixa frequência de ocorrência de camadas F3 de Março a Setembro nos anos de 2003, 2004 e 2005.
- O tempo de duração de camada F3 mostrou um padrão para um máximo acontecendo sempre nos meses de Novembro (para todo o período de estudo, de 2002 a 2006).

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

O estudo de uma quarta estratificação (StF-4) da região F da ionosfera, no continente americano é inédito. Por esse motivo, as sugestões para trabalhos futuros são neste sentido, com o objetivo de ampliar os conhecimentos obtidos. Seguem algumas sugestões:

- Estudar a formação de camada StF-4 durante períodos geomagneticamente perturbados.

- Estudar, através de modelagem numérica, quais são as condições físicas iniciais para a formação de camada StF-4 e o papel que a camada F3 tem neste processo, visto que, observou-se que a ocorrência de camada StF-4 é antecedida e sucedida pela ocorrência de camada F3.
- Ampliar o período de estudo, tanto para as regiões próxima ao equador magnético, com as de baixas latitudes. Tentar compreender melhor o comportamento sazonal e dependência da formação de camada StF-4 com o ciclo solar.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Appleton E. V. (1927), The existence of more than one ionised Layer in the Upper Atmosphere, **Nature**, 330, n.3018 Vol. 120.
- Bailey, D. K. (1948), The geomagnetic nature of the F2-Layer longitude-effect, **Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity**, vol. 53, no. 1, pp. 35–39, 1948.
- Balan, N., and G. J. Bailey (1995), Equatorial plasma fountain and its effects: Possibly of an additional layer, **J. Geophys. Res.**, 101(All), 21,421–21,432, doi:10.1029/95JA01555.
- Balan, N., G. J. Bailey, M. A. Abdu, K. I. Oyama, P. G. Richards, J. Macdougall, and I. S. Batista (1997), Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: Evidence for an additional layer, the F3 layer, **J. Geophys. Res.**, 102, 2047–2056, doi:10.1029/95JA02639.
- Balan, N., I. S. Batista, M. A. Abdu, J. Macdougall, and G. J. Bailey (1998), Physical mechanism and statistics of occurrence of an additional layer in the equatorial ionosphere, **J. Geophys. Res.**, 103, 29,169–29,181, doi:10.1029/98JA02823.
- Balan, N., I. S. Batista, M. A. Abdu, G. J. Bailey, S. Watanabe, J. MacDougall, and J. H. A. Sobral (2000), Variability of an additional layer in the equatorial ionosphere over Fortaleza, **J. Geophys. Res.**, 105, 10,603–10,613, doi:10.1029/1999JA000020.
- Balan, N., S. V. Thampi, K. Lynn, Y. Otsuka, H. Alleyne, S. Watanabe, M. A. Abdu, and B. G. Fejer (2008), F3 layer during penetration electric field, **J. Geophys. Res.**, 113, A00A07, doi:10.1029/2008JA013206.
- Banks P. M. and G. Kockarts, (1973), Aeronomy, **Academic Press**, Part “A” and “B”.
- Batista, I. S., M. A. Abdu, J. MacDougall, and J. R. Souza (2002), Long-term trends in the frequency of occurrence of the F3 layer over Fortaleza, Brazil, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 64, 1409–1412.
- Batista, I. S., M. A. Abdu, A. M. da Silva, and J. R. Souza (2003), Ionospheric F3 layer: Implications for the IRI model, **Adv. Space Res.**, 31(3), 607–611.

- Depuev, V. H., and S. A. Pulinets (2001), Intercosmos-19 observations of an additional topside ionization layer: The F3 layer, **Adv. Space Res.**, 27(6-7), 1289–1292.
- Fagundes, P. R., V. Klausner, Y. Sahai, V. G. Pillat, F. Becker-Guedes, F. C. P. Bertoni, M. J. A. Bolzan, and J. R. Abalde (2007), Observations of daytime F2 layer stratification under the southern crest of the equatorial ionization anomaly region, **J. Geophys. Res.**, 112, A04302, doi:10.1029/2006JA011888.
- Fagundes, P. R., V. Klausner, J. A. Bittencourt, Y. Sahai, and J. R. Abalde (2011), Seasonal and solar cycle dependence of F3 layer near the southern crest of the equatorial ionospheric anomaly, **Adv. Space Res.**, 48(3), 472–477, doi:10.1016/j.asr.2011.04.003.
- Grant, I. F., J. W. MacDougall, J. M. Ruohoniemi, W. A. Bristow, G. J. Sofko, J. A. Koehler, D. Danskin, and D. Andre (1995), Comparison of plasma flow velocities determined by the ionosonde Doppler drift technique, SuperDARN radars, and patch motion, **Radio Sci.**, 30, 1537–1549, doi:10.1029/95RS00831.
- Heisler, L. H. (1962), Anomalous ionospheric stratification F1–5, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 24, doi:10.1016/0021-9169(62)90212-X.
- Hunsucker, R. D., (1991), Radio Techniques for Probing the Terrestrial Ionosphere, **Springer-Verlag**, doi: 10.1007/978-3-642-76257-4.
- Jenkins, B., G. J. Bailey, M. A. Abdu, I. S. Batista, and N. Balan (1997), Observations and model calculations of an additional layer in the topside ionosphere above Fortaleza, Brazil, **Ann. Geophys.**, 15(6), 753–759, doi:10.1007/s00585-997-0753-3.
- Karpachev, A. T., M. V. Klimenko, V. V. Klimenko, G. A. Zhabankov, and V. A. Telegin (2012), Latitudinal structure of the equatorial F3 layer based on the Intercosmos-19 topside sounding data, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 77, 186–193, doi:10.1016/j.jastp.2011.12.018.
- Karpachev, A. T., M. V. Klimenko, V. V. Klimenko, G. A. Zhabankov, and V. P. Kuleshova (2013), Statistical study of the F3 layer characteristics retrieved from Intercosmos-19 satellite data, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 103, 121–128, doi:10.1016/j.jastp.2013.01.010.

- Keley M. C., (2009), *The Earth's Ionosphere Plasma Physics and Electrodynamics*, **Academic Press**, second edition, ISBN 13:9780120884254.
- Klimenko, M. V., V. V. Klimenko, K. G. Ratovsky, L. P. Goncharenko, Y. Sahai, P. R. Fagundes, R. de Jesus, A. J. de Abreu, and A. M. Vesnin (2011), Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005, **Radio Sci.**, 46, RS0D03, doi:10.1029/2010RS004590.
- Klimenko, M. V., B. Zhao, A. T. Karpachev, and V. V. Klimenko (2012a), Stratification of the low-latitude and near-equatorial F2 layer, topside ionization ledge, and F3 layer: What we know about this? A review, **Int. J. Geophys.**, 938057, doi:10.1155/2012/938057.
- Klimenko, M. V. and V. V. Klimenko, (2012b), Mechanisms of F2-layer stratification and formation of the F3- and G-layers in the equatorial ionosphere, **Geomagnetism and Aeronomy**, vol. 52, no. 3, pp. 321–334, 2012.
- Klimenko, M. V., V. V. Klimenko, and A. T. Karpachev (2012c), Formation mechanism of additional layers above regular F2 layer in the near-equatorial ionosphere during quiet period, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, doi:10.1016/j.jastp.2012.02.011.
- Kotova D. S., Klimenko, M. V., Klimenko V. V., Zakharov V. E., Ratovsky K. G., Nosikov I. A. and Zhao B., (2015), Using IRI and GSM TIP model results as environment for HF radio wave propagation model during the geomagnetic storm occurred on September 26-29, 2011, **Adv. Space Res.**, 56(2015), 2012–2019, doi:10.1016/j.asr.2015.05.009.
- Lynn, K. J. W., T. J. Harris, and M. Sjarifudin (2000), Stratification of the F2 layer observed in Southeast Asia, **J. Geophys. Res.**, 105(A12), 27,147–27,156, doi:10.1029/2000JA900056.
- MacDougall, J. W., G. E. Halland, and K. Havashi (1997), F region gravity waves in the central polar cap, **J. Geophys. Res.**, 102(A7), 14,513–14,530, doi:10.1029/97JA01076.

- Mridula N. and Pant T. K., (2015), On the possible role of zonal dynamics in the formation and evolution of F3 layers over equator, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 134(2015), 69–77, doi:10.1016/j.jastp.2015.09.019.
- Paznukhov, V. V., B. W. Reinisch, P. Song, X. Huang, T. W. Bullett, and O. Vellz (2007), Formation of an F3 layer in the equatorial ionosphere: A result from strong IMF changes, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 69(10-11), 1292–1304, doi:10.1016/j.jastp.2006.08.019.
- Piggott, W. R. and K. Rawer, (1972), U.R.S.I Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction, second edition, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics.
- Pillat, V. G., (2006), Estudo da Ionosfera em baixas latitudes através do modelo computacional LION e comparação com parâmetros ionosféricos observados, Dissertação de Mestrado.
- Pulinets, S. A., V. H. Depuev, A. T. Karpachev, S. M. Radicella, and N. P. Damiikin (2002), Recent advances in topside profile modeling, **Adv. Space Res.**, 29(6), 815–823.
- Radtel Network: <http://www.radtelnetwork.com.au/propagation/hfprop.html>, acesso em Março de 2014.
- Rama Rao, P. V. S., K. Niranjana, D. S. V. V. D. Prasad, and P. S. Brahmanandam (2005), Features of additional stratification in ionospheric F2 layer observed for half a solar cycle over Indian low latitudes, **J. Geophys. Res.**, 110, A04307, doi:10.1029/2004JA010646.
- Ratcliffe, J. A., (1962), The Magneto-ionic theory and its applications to the Ionosphere, a monograph, second edition, Cambridge at the University Press.
- Rishbeth H. and O. K. Garriott, (1969), Introduction to Ionospheric Physics, **Academic Press**.
- Rishbeth H., (2000), The equatorial F-layer: progress and puzzles, **Ann. Geophysicae**, 18, 730-739.
- Schunk R. W. and A. F. Nagy, (2009), Ionospheres, Physics, Plasma Physics, and Chemistry, **Cambridge University Press**, second edition, ISBN 9780521877060.

- Sen, H. Y. (1949), Stratification of the F2 layer of the ionosphere over Singapore, **J. Geophys. Res.**, 54(4), 363–366, doi:10.1029/JZ054i004p00363.
- Skinner, N. J., R. A. Brown, and R. W. Wright (1954), Multiple stratification of the F layer at Ibadan, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 5, 92–100.
- Sreeja, V., Devasia C.V., Ravindran S., Pant T.K. and Sridharan R., (2009a) Response of the equatorial and low-latitude ionosphere in the Indian sector to the geomagnetic storms of January 2005, **J. Geophys. Res.**, 114(2009), p.06314, doi.org/10.1029/2009JA014179.
- Sreeja, V., N. Balan, S. Ravindran, T. K. Pant, R. Sridharan, and G. J. Bailey (2009b), Additional stratifications in the equatorial F region at dawn and dusk during geomagnetic storms: Role of electrodynamics, **J. Geophys. Res.**, 114, A08309, doi:10.1029/2009JA014373.
- Sreeja V., Ravindran S. and Pant T. K., (2010), Features of F3 layer occurrence over the equatorial location of Trivandrum, **Ann. Geophys.**, 28 (2010), pp. 1741–1747.
- Tardelli A. and Fagundes P. R. (2015), Observations of ionospheric F layer quadruple stratification near equatorial region, **J. Geophys. Res.**, 120, 834-840, DOI: 10.1002/2014JA020653.
- Uemoto, J., T. Ono, A. Kumamoto, and M. Iizima, (2006), Statistical analysis of the ionization ledge in the equatorial ionosphere observed from topside sounder satellites, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 68(12), 1340–1351, doi:10.1016/j.jastp.2006.05.
- Pillat, V., (2006), Estudo da ionosfera em baixas latitudes através do modelo computacional LION e comparação com parâmetros ionosféricos observados. Dissertação.
- Whitten R. C. and I. G. Poppoff, (1971), Fundamentals of Aeronomy, **John Wiley & Sons, Inc.**, ISBN 0471941204.
- Zain A. F. M., Abdullah S., Homam M. J., Seman F. C., Abdullah M, and Ho Y. H., (2008), Observations of the F3-layer at equatorial region during 2005, **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, 70(2008), 918–925, doi:10.1016/j.jastp.2007.12.002.

Zhao B., Wan W., Liu L., Igarashi K., Yumoto K., Ning B. (2009), Ionospheric response to the geomagnetic storm on 13–17 April 2006 in the West Pacific region, **J. Atmos. Solar Terr. Phys.**, 71(2009), pp. 88–100, doi.org/10.1016/j.jastp.2008.09.029.

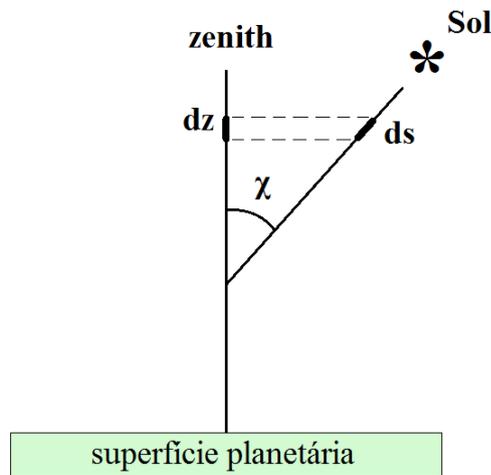
Zhao, B., J. Zhu, B. Xiong, X. Yue, M. Zhang, M. Wang, and W. Wan (2014), An empirical model of the occurrence of an additional layer in the ionosphere from the occultation technique: Preliminary results, **J. Geophys. Res. Space Physics**, 119, 10,204–10,218, doi:10.1002/2014JA020220.

## APÊNDICE – A

## PROCESSO DE FOTOIONIZAÇÃO NA IONOSFERA

Para entender melhor o processo de fotoionização que ocorre na atmosfera inicialmente neutra, vejamos a Figura 52, que representa a esquematização de um fluxo de radiação solar adentrando a atmosfera terrestre.

**Figura 52** – Relação entre os argumentos de comprimentos,  $ds$  (representando o argumento do fluxo de radiação penetrando a atmosfera) e  $dz$  (argumento zenith), num plano estratificado da atmosfera terrestre.



Fonte: adaptado de **Banks e Kockarts (1973)**.

Considerando um fluxo de radiação  $\varphi(\lambda)$  num intervalo de comprimento de onda  $\lambda, \lambda + d\lambda$ , a variação deste fluxo é  $d\varphi$ , devido à absorção do fluxo por um gás neutro, deslocando-se a uma distância  $ds$ , temos:

$$\frac{d\varphi}{ds} = -\varrho \varphi \quad (12)$$

$$\varrho = \frac{d\tau}{ds} \quad (13)$$

onde  $\rho$  é uma constante relacionada a absorção de radiação pela atmosfera, o termo

$$ds = -\frac{dz}{\cos \chi}, \chi \text{ o ângulo zenital solar (que é medido em relação a um eixo vertical –}$$

ver Figura 52),  $\tau$  é a profundidade óptica e tem a seguinte relação:

$$\tau = \int_{s_0}^s \rho ds' \quad (14)$$

Considerando a atmosfera como uma resistência à incidência do fluxo de radiação, e à medida em que este fluxo penetra na atmosfera, este será atenuado pelo processo de absorção. O fluxo de radiação pode ser expresso da seguinte forma:

$$d\varphi = -n \sigma_a \varphi ds \quad (15)$$

onde  $n$  é a densidade neutra, e o termo  $\sigma_a$  é referenciado aqui como sendo a seção transversal (seção de choque) com o subíndice “a”, relacionado à absorção.

Resolvendo a Equação diferencial (13), obtemos:

$$\varphi = \varphi_\infty \exp \left[ - \int_z^\infty n \sigma_a ds \right] \quad (16)$$

Como a radiação incidente é normalmente absorvida por diversos gases neutros, cada constituinte tem sua própria seção de choque  $\sigma_a$ , assim, a expressão (14) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\tau = \sum_i \sigma_a^i(s) \int_z^\infty n_i ds' \quad (17)$$

A expressão do fluxo pode ser reescrita como sendo:

$$\varphi(\lambda) = \varphi_{\infty}(\lambda) e^{-\tau} \quad (18)$$

A atenuação da atmosfera sobre o fluxo de radiação solar incidente, expressa que o comportamento do fluxo tem características de diminuição à medida em que penetra na atmosfera terrestre, e essa atenuação deverá ser exponencial, conforme expressa a Equação (18). Assim, do ponto de vista da superfície para cima, verifica-se que a densidade atmosférica decai com a altura de maneira exponencial (BANKS e KOCKARTS, 1973; SCHUNK e NAGY, 2009). Considerando que os gases neutros sofram uma distribuição de acordo com a lei barométrica dos gases, temos:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{dz}{kT/mg}$$

$$\frac{dp}{p} = -\frac{dz}{H} \quad (19)$$

onde a pressão  $p$  dos constituintes, tem um comportamento de redução com o incremento de altura. A relação (19) refere-se a equação hidrostática que segue:

$$\frac{dp}{p} = \frac{dn}{n} + \frac{dT}{T} = \frac{dq}{q} + \frac{dT}{T} - \frac{dm}{m} = -\frac{dz}{\frac{kT}{mg}} \quad (20)$$

onde  $q = nm$ , e  $n$  é a concentração molecular e  $m$  a massa molecular,  $H = kT/mg$  (chamada “escala de altura”). O termo  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  a temperatura absoluta,  $g$  a aceleração gravitacional (BANKS e KOCKARTS, 1973).

Resolvendo a Equação (19), temos:

$$p = p_0 \exp\left[-\int_{z_0}^z \frac{dz'}{H}\right] \quad (21)$$

Da lei dos gases, onde  $p = nkT$ , e substituindo em (21), temos:

$$n = n_0 \frac{T_0}{T} \exp \left[ - \int_{z_0}^z \frac{dz'}{H} \right] \quad (22)$$

Supondo que  $T$  e  $H$  não variam, obtemos:

$$n = n_0 \exp \left[ - \frac{1}{H} \int_{z_0}^z dz' \right] \quad (23)$$

onde se supõe que  $H$  pode ser chamado de  $H_0$ , em referência à avaliação numa altitude  $z_0$ , assim temos que:

$$n = n_0 \exp \left[ - \frac{(z - z_0)}{H_0} \right] \quad (24)$$

Considerando  $g$  constante, e permitindo que a escala de altura varie como:

$$H = H_0 + \gamma (z - z_0) \quad (25)$$

sendo uma variação linear com a altura, com um gradiente de escala de altura  $\gamma$  (onde  $\gamma$  é constante) . A densidade pode ser expressa através da relação:

$$n = n_0 \frac{H^{-(1+\gamma)/\gamma}}{H_0} \quad (26)$$

Das relações:

$$\tau = \sum_i \sigma_a^i(s) \int_z^\infty n_i ds'$$

$$ds = - \frac{dz}{\cos \chi}$$

$$\sec \chi = \frac{1}{\cos \chi}$$

Através das equações (14), (24) e (26), e fazendo algumas considerações, obtemos a profundidade óptica, através da Equação (27) a seguir:

$$\tau = \int_z^\infty n_0 \exp\left[-\frac{(z - z_0)}{H_0}\right] \sigma_a ds \quad (27)$$

A densidade de coluna vertical será:

$$\int_{z_0}^\infty n(s) ds = \int_0^\infty n(z') H(z') dz = \int_0^\infty \frac{p}{kT} H dz$$

Para  $z_0$ , e  $H = \frac{kT}{mg}$

$$\int_{z_0}^\infty n(s) ds = \int_0^\infty \frac{p(z')}{kT} \frac{kT}{mg} dz' = \int_0^\infty \frac{p(z')}{mg} dz' \quad (28)$$

Substituindo a Equação (21) na Equação (28), teremos:

$$\int_{z_0}^\infty n(s) ds = \frac{p_0}{mg} \int_0^\infty \exp\left[-\int_{z_0}^z \frac{dz'}{H}\right] dz' \quad (29)$$

Usando:

$$n = n_0 \frac{T_0}{T} \exp\left[-\int_{z_0}^z \frac{dz'}{H}\right]$$

Sendo  $ds = \frac{dz}{H}$ , temos:

$$n = n_0 \frac{T_0}{T} \exp\left[-\int_{z_0}^z ds\right] = n_0 \frac{T_0}{T} \exp[-(z - z_0)]$$

$\frac{T_0}{T} \equiv 1$  e  $z_0 = 0$  assim temos:

$$n = n_0 \exp(-z') \quad \text{e para,} \quad p = p_0 \exp(-z')$$

Assim, usando em (29), temos:

$$\int_{z_0}^{\infty} n(s) ds = \frac{p_0}{mg} \int_0^{\infty} \exp(-z') dz'$$

Como,  $H = \frac{kT}{mg}$  e,  $p = nkT$ , temos  $\int_{z_0}^{\infty} n(s) ds = n H$

Chegamos então a seguinte relação para a profundidade óptica:

$$\tau = \int_z^{\infty} n \sigma_a ds \rightarrow \tau = n H \sigma_a \sec \chi \quad (30)$$

que deve ser considerada para uma atmosfera composta de um único constituinte. Para uma atmosfera composta por diversos gases, podemos reescrever a relação da seguinte forma:

$$\tau = \sec \chi \sum_i n_i H_i \sigma_a^i \quad (31)$$

Referindo-se às equações (30) e (31), temos que  $\tau$  decresce exponencialmente com a altitude. A profundidade óptica é um argumento da exponencial de fluxo, assim, a absorção da radiação ocorre muito rapidamente após o ponto onde  $\tau = 1$  é alcançado. Podemos então verificar que  $\tau$  varia em cada altitude conforme o ângulo zenital aumenta. Neste sentido, temos que com a variação da posição do Sol (aumento do ângulo zenital  $\chi$ ), o conteúdo da coluna atmosférica torna-se progressivamente maior. Dessa forma, à medida que  $\chi$  aumenta, o fator  $\sec \chi$  torna-se impreciso (no ponto onde  $\chi > 70^\circ$ ), e devido à curvatura da superfície terrestre, temos que a função que representa o conteúdo da coluna atmosférica passa a ser complexa. Dessa forma, é necessário uma expressão para a correção do ângulo zenital. As equações são geralmente derivadas de aproximações para o

comportamento real, para alguns propósitos, as expressões aproximadas são úteis. A profundidade óptica pode então ser expressa da seguinte forma:

$$\tau(X, \chi) = n H \sigma_a F(X, \chi) \quad (32)$$

onde  $X = \frac{(R_E + z)}{H}$  e,  $F(X, \chi)$  é uma dada função. Para uma escala constante de altitude, é comum escrever  $F(X, \chi)$  como  $Ch(X, \chi) \rightarrow$  função Chapman.

Para o caso onde a função  $\sec \chi$  deixa de ser válida, ou seja, para  $\chi = 90^\circ$  e  $\chi > 90^\circ$ , utiliza-se a seguinte expressão:

$$F(X, \chi) = \exp \left[ \frac{\frac{\chi^2}{2}}{(1 - 0,115 \chi^2 - \varrho \chi^4)} \right] \quad (33)$$

$$\varrho = \frac{\frac{0,284 - 2,47}{\ln\left(\frac{\pi X}{2}\right)}}{6,09}$$

Para  $\chi > \pi/2$ , usa-se:

$$\tau = n_{(A)} H_{(A)} \sigma_a F\left(Y, \chi \geq \frac{\pi}{2}\right) \quad (34)$$

$$F\left(Y, \chi \geq \frac{\pi}{2}\right) = 2F\left(Y, \frac{\pi}{2}\right) - F(X, \pi - \chi) \exp Y(1 - \csc \chi) \quad (35)$$

sendo “Y”, o parâmetro “X” verificado na altura mínima, “A”, da incidência de radiação solar (BANKS e KOCKARTS, 1973; RISHBETH e GARRIOTT, 1969).

A distribuição vertical de ionização na alta atmosfera, dependerá da taxa de produção de íons e dos diferentes processos de perda iônica. Através da Equação

(18), a taxa de produção iônica, resultante de um fluxo  $\varphi(\lambda)$  de radiação, pode ser expressa da seguinte forma:

$$q_j = n_j \sigma_I^j \varphi_{\infty(\lambda)} e^{-\tau} \quad (36)$$

onde  $n_j$  é a concentração da espécie de íons  $j^{th}$  e  $\sigma_I^j$  seção de choque de ionização dependente do comprimento de onda. O produto da seção de choque de ionização e o fluxo solar, podem ser combinados para obtermos uma equação para o coeficiente da taxa de fotoionização  $I_{j(\lambda)} = \sigma_I^j \varphi_{\infty(\lambda)}$ , assim, a expressão para a produção iônica pode ser reescrita conforme a Equação (37), e considerando as possíveis espécies de íons  $j^{th}$ , em diversas bandas de comprimentos de onda, a taxa de produção iônica fica conforme a Equação (38):

$$q_j = n_j I_{j(\lambda)} e^{-\tau} \quad (37)$$

$$Q_j = \sum_{\lambda} q_j = n_j \sum_{\lambda} I_{j(\lambda)} e^{-\tau} \quad (38)$$

## RESEARCH ARTICLE

10.1002/2014JA020653

## Key Points:

- First time that StF-4 has been reported in the American sector
- StF-4 has a short lifetime as compared with  $F_3$  layer
- StF-4 is antecedent and followed by  $F_3$  layer

## Correspondence to:

A. Tardelli,  
tardelli@univap.br

## Citation:

Tardelli, A., and P. R. Fagundes (2015), Observations of ionospheric  $F$  layer quadruple stratification near equatorial region, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, doi:10.1002/2014JA020653.

Received 24 SEP 2014

Accepted 28 DEC 2014

Accepted article online 6 JAN 2015

Observations of ionospheric  $F$  layer quadruple stratification near equatorial regionA. Tardelli<sup>1</sup> and P. R. Fagundes<sup>1</sup><sup>1</sup>Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, Brazil

**Abstract** This paper presents and discusses the occurrence of  $F$  layer quadruple stratification (StF-1, StF-2, StF-3, and StF-4) during southern hemisphere winter season (June, July, and August 2002) and high solar activity condition, which was observed at Palmas (10.3°S, 48.3°W; dip latitude 5.5°S—near equatorial region), Brazilian sector. This is the first time that the formation of  $F$  layer quadruple stratification (StF-1, StF-2, StF-3, and StF-4) has been reported in the South American sector. The StF-4 has a short lifetime compared with triple stratification/ $F_3$  layer, and it is antecedent and followed by triple/ $F_3$  layer stratification.

## 1. Introduction

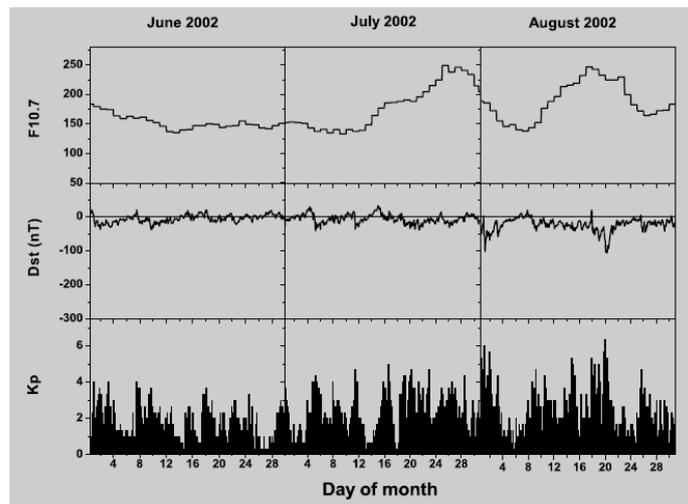
The investigation of  $F$  layer multiple stratifications is a very old research area related to  $F$  layer electrodynamics and thermosphere-ionosphere coupling [Sen, 1949; Skinner *et al.*, 1954; Heisler, 1962]. Nevertheless, recently, investigations related to multiple  $F$  layer stratifications/ $F_3$  layer have become very activate again [Balan and Bailey, 1995; Balan *et al.*, 1997, 1998, 2000, 2008; Batista *et al.*, 2002, 2003; Depuev and Pulinets, 2001; Jenkins *et al.*, 1997; Klimenko *et al.*, 2011, 2012a, 2012b; Karpachev *et al.*, 2012, 2013; Lynn *et al.*, 2000; Pulinets *et al.*, 2002; Uemoto *et al.*, 2006; Fagundes *et al.*, 2007, 2011; Paznukhov *et al.*, 2007; Sreeja *et al.*, 2009].

In the equatorial Brazilian longitudinal sector and Indian longitudes, the occurrence of  $F_3$  is higher during summer months and low solar activity (LSA) [Batista *et al.*, 2002; Rama Rao *et al.*, 2005]. On the other hand, near the equatorial ionospheric anomaly (EIA) southern crest in Brazil,  $F_3$  layer occurs during high solar activity (HSA) 11 times more frequently than during low solar activity (LSA) [Fagundes *et al.*, 2011].

The investigation of multiple  $F$  layer stratifications/ $F_3$  layer, using ground-based observations, was restricting to triple  $F$  layer stratification ( $F_1$ ,  $F_{1.5}/F_2$ , and  $F_3$ ). However, after the first report of  $F$  layer quadruple stratification [Sen, 1949] over Singapore, it appears that the observation and study of  $F$  layer quadruple stratification research area had been completely forgotten. Although ground-based instrumentation, such as digital ionosonde, has improved its observation capability to record multiple  $F$  layer stratification, the occurrence of bottomside  $F_4$  or  $F$  layer quadruple stratification has not been reported since Sen [1949]. Nevertheless, ground-based observation of  $F_3$  layer during geomagnetic quiet and disturbed times has increased significantly in recent years. The lack of observation of  $F$  layer quadruple stratification may be related to its short lifetime and/or that researchers do not look carefully in their ionogram database. The capability to identify the  $F_3$  layer in the ionogram depends on personal experience, because quadruple stratification has a short lifetime. Therefore, this paper is quite important to call the attention of all the ionospheric community to this particular event.

Recently, Klimenko *et al.* [2011] studied the formation of  $F_4$  in the equatorial region using the Global Self-Consistent Model of Thermosphere, Ionosphere, and Protonosphere model and compared its results with the IK-19 satellite. However, they focused their study on the upper part of the  $F$  layer electron density profile.

A mechanism to explain the formation of  $F_3$  layer was proposed by Balan and Bailey [1995] and Jenkins *et al.* [1997]. This mechanism takes into account the combination of effects of vertical  $E \times B$  drift and meridional wind flowing from the summer hemisphere to the winter hemisphere. Fagundes *et al.* [2007] proposed that gravity waves with vertical wavelength larger than the  $F$  layer vertical extension create favorable conditions for  $F_3$  layer formation. Recently, Klimenko *et al.* [2011] proposed that during geomagnetic storms, a nonuniformity in height zonal electric field at the geomagnetic equator forms additional peaks ( $F_3$  layer and



**Figure 1.** The variations of the  $F_{10.7}$ ,  $Dst$ , and  $Kp$  indices during the periods June, July, and August 2002 (HSA).

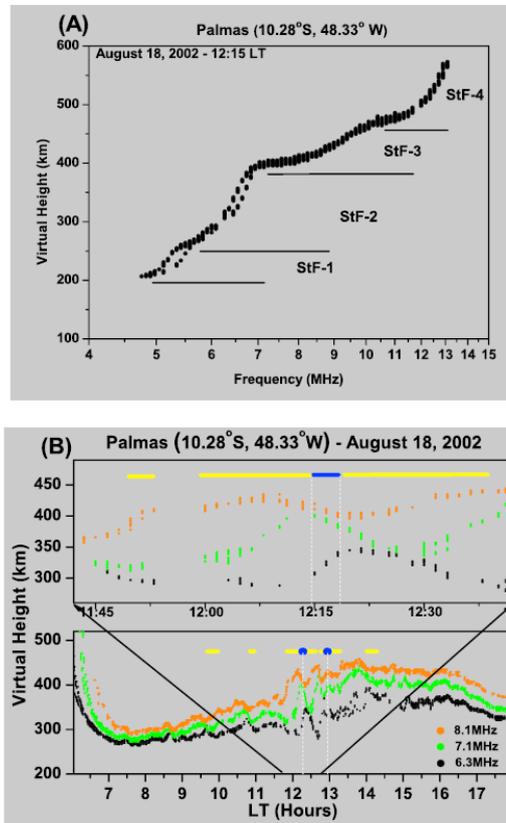
$F_4$  layer) in the upper part of the electron density profile through the nonuniformity of height vertical plasma drift. In addition, *Klimenko et al.* [2012a, 2012b] proposed that during geomagnetic quiet condition, the nonuniform height vertical  $E \times B$  plasma drift is the source for the formation of the  $F$  layer stratification at the geomagnetic equator. It appears that researchers need to make an extra effort to model and simulate the physical mechanism to explain the formation of the bottomside  $F$  layer quadruple stratification.

This paper presents and discusses the occurrence of  $F$  layer quadruple stratification (StF-1, StF-2, StF-3, and StF-4) during winter season (June, July, and August 2002) and high solar activity condition, which was observed at Palmas (10.3°S, 48.3°W; dip latitude 5.5°S—near equatorial region), Brazilian sector. This is the first time that the formation of  $F$  layer quadruple stratification (StF-1, StF-2, StF-3, and StF-4) has been reported in the South American sector.

## 2. Observation, Results, and Discussion

The  $F$  layer quadruple stratification (StF-1, StF-2, StF-3, and StF-4) was observed from ionospheric soundings carried out in Palmas (10.3°S, 48.3°W; dip latitude 5.5°S, near equatorial region—hereafter referred as PAL), Brazil, using a digital ionosonde of the type Canadian Advanced Digital Ionosonde (CADI). The transmitter power is 600 W, and pulse length of 20 s, which provides 6 km height resolution. The ionosonde antenna is a single delta dipole antenna supported by a 20 m tower for transmitting and four dipole receiving antennas. The CADI operates from 1 to 20 MHz at vertical incidence and covers heights from 90 to 1000 km [Grant et al., 1995; MacDougall et al., 1997]. The CADI works in two different frequency scanning modes: in the first mode, it operates every 300 s (5 min), and ionograms are obtained by scanning 180 frequencies (1–20 MHz), and in the second mode, it operates every 100 s obtaining a fast ionogram and scanning only six frequencies: 3.1, 4.1, 5.1, 6.3, 7.1, and 8.1 MHz. The high time resolution (see Figure 2b) of the second mode of operation is very important to study wave propagation and to detect rapid changes in ionospheric layer characteristics [Fagundes et al., 2008].

The studied period comprises the 2002 southern hemisphere winter season (June, July, and August), during high solar activity (HSA). The occurrence of  $F$  layer quadruple stratification (StF-1, StF-2, StF-3, and StF-4) takes place during quiet and moderated disturbed geomagnetic conditions. For more details about the geophysical conditions of June, July, and August months, see Figure 1. Because this unexpected result is very interesting and important for the ionospheric community, we decided to publish it immediately, and the

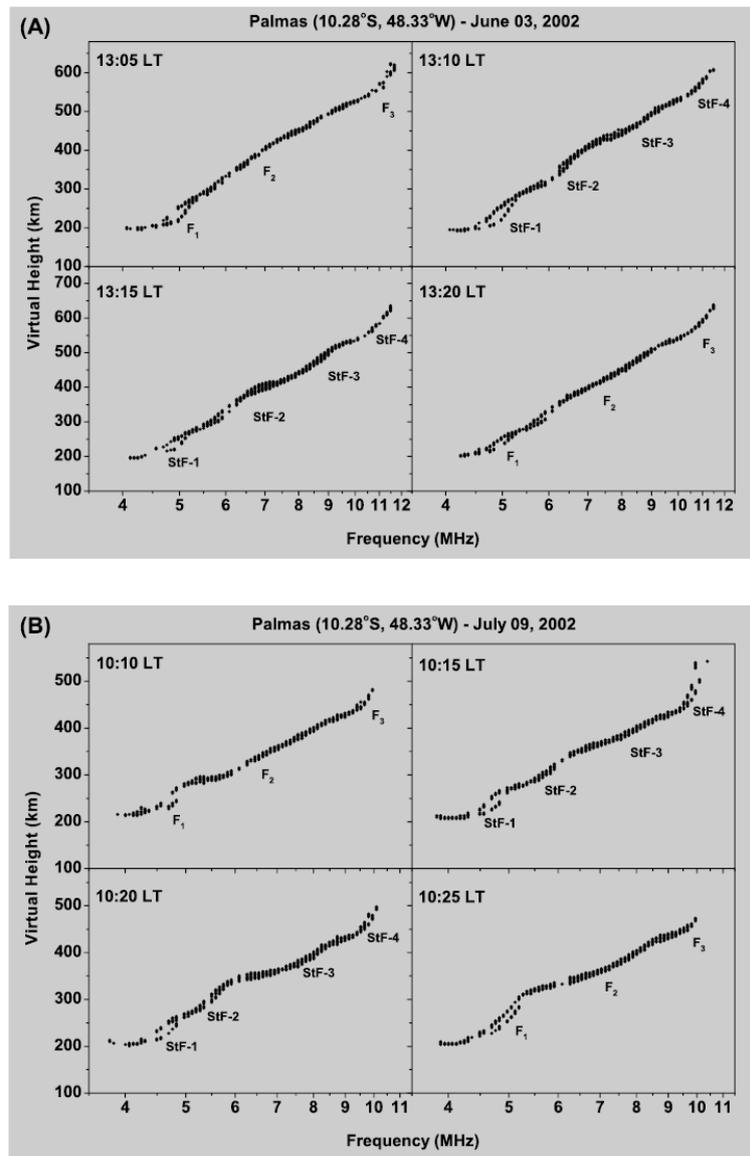


**Figure 2.** (a) Ionogram showing *F* layer quadruple stratification in the South American sector (PAL 10.28°S), with the presence of the StF-1, StF-2, StF-3, and StF-4 layers on 18 August 2002 at 12:15 LT. (b) Daily virtual height variations for 6.3 (black), 7.1 (green), and 8.1 MHz (orange) on 18 December 2002.

following papers will discuss in detail the seasonal variation of  $F_3$  and quadruple *F* layer stratification as a function of solar activity.

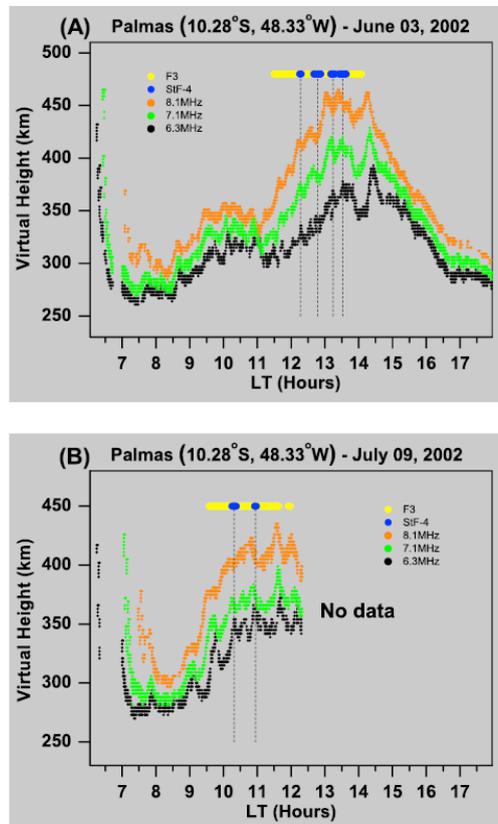
Figures 2a, 3a, and 3b show for the first time the formation of *F* layer quadruple stratification (StF-1, StF-2, StF-3, and StF-4) in the South American sector. For instance, the ionogram recorded on 18 August 2002 at 12:15 LT shows a very clear formation of StF-1, StF-2, StF-3, and StF-4 (Figure 2a). The StF-1 is located between 206 km and 255 km, the StF-2 between 255 km and 395 km, the StF-3 between 395 km and 467 km, and StF-4 above 467 km. These observations reopen the theoretical discussion of possible physical mechanism that generate quadruple bottomside *F* layer stratification near the equatorial region and call the attention of the ionospheric community to this particular event. In addition, it reinforces the need to look back into ionosonde databases to recheck for the occurrence of StF-4.

Figure 2b (bottom) shows daytime virtual height variations for 6.3, 7.1, and 8.1 MHz (isofrequency plot) on 18 August 2002. At 07:30 LT, the virtual height for 8.1 MHz is ~330 km and starts to increase, reaching a maximum value (~450 km) at 13:30 LT, and afterward, it starts to decrease. A similar behavior is noted for 6.3 and 7.1 MHz. A significant role of this height increase is closely related to the vertical  $E \times B$  drift, which is one of the most important electrodynamic ingredients to generate  $F_3$  layer [Balan and Bailey, 1995; Jenkins et al., 1997]. Then, around 09:30 LT, the  $F_3$  layer/triple stratification occurs; the yellow horizontal full line in Figure 2b (top and bottom) shows the occurrence of  $F_3$  layer.



**Figure 3.** Set of ionograms obtained at PAL (10.3°S) on (a) 3 June and (b) 9 July, showing examples of ionogram with the presence of triple stratification/ $F_3$  and  $F$  layer quadruple stratification (StF-1, StF-2, StF-3, and StF-4).

However, during the occurrence of the  $F_3$  layer (Figure 2), there were two cases of StF-4, which are indicated by the blue full line in Figure 2b (bottom). The StF-4 cases occurred when the  $F$  layer virtual height at 8.1 MHz was above 400 km. Figure 2b (top) also shows that the virtual height of the  $F$  layer at 8.1 and 7.1 MHz was decreasing at 12:15 LT, but at a different rate, and at the bottomside of the  $F$  layer (6.3 MHz), the virtual height was increasing at 12:15 LT. Therefore, the combination of the background vertical  $E \times B$  plasma drift and the local nonuniformity of vertical  $E \times B$  plasma drift created favorable conditions to generate StF-4.

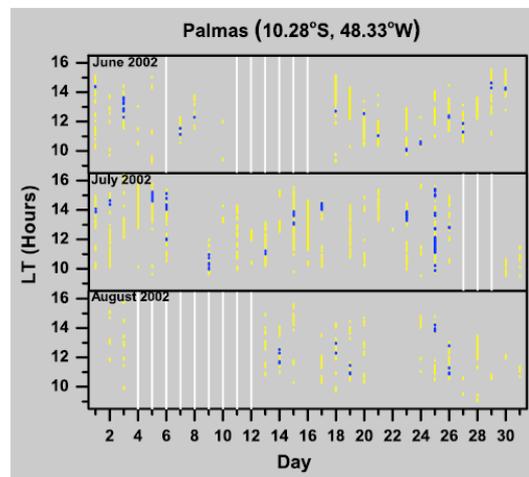


**Figure 4.** Daytime height variations for 6.3, 7.1, and 8.1 MHz on (a) 3 June and (b) 9 July. The yellow and blue full lines indicate the occurrence of triple stratification/ $F_3$  and quadruple stratification, respectively.

In addition, the  $F$  layer at 8.1, 7.1, and 6.3 MHz presents large wavelike oscillations during the periods of 12:15 LT and 13:00 LT, which may have contributed to the generation of StF-4.

Figures 4a and 4b show the isofrequency plots for those days presented in Figures 3a and 3b. Notice that the StF-4 happens when the  $F$  layer is uplifting due to vertical  $E \times B$  plasma drift and height above 400 km at 8.1 MHz. In all the three cases discussed in details (Figures 2, 3, and 4), the StF-4 is antecedent and followed by triple/ $F_3$  layer stratification.

Figure 5 shows  $F_3$  layer and StF-4 day-to-day variability from June to August 2002 (southern hemisphere winter months) and high solar activity (HSA). The yellow, blue, and white full vertical lines indicate time duration of  $F_3$  layer, StF-4, and no data, respectively. On all 29 days that StF-4 was observed, the StF-4 was antecedent and followed by  $F_3$  layer. This strongly suggests that it is not only a coincidence, and the formations of StF-4 and  $F_3$  layer are in some way connected. Nevertheless, more observation and model simulation must be done to understand how the  $F_3$  layer and StF-4 are connected. In addition, in all the 29 cases, the lifetime StF-4 is shorter than the lifetime of  $F_3$  layer. Moreover, the present observation agrees with the idea that nonuniformity of vertical  $E \times B$  plasma drift height is one of the sources that forms the  $F$  layer stratification at the geomagnetic equator [Klimenko *et al.*, 2012]. The combination of  $E \times B$  vertical plasma drift and wavelike oscillation was suggested by Fagundes *et al.* [2007] as a possible source of  $F_3$  formation, and a similar mechanism could be related with the formation of StF-4. However, possible initial condition and sources for the formation of StF-4 need further investigation, including model simulation.



**Figure 5.** Monthly daytime variations of  $F$  layer triple stratification/ $F_3$  and quadruple stratification occurrences from June to August 2002. The yellow, blue, and white full lines indicate the occurrence of triple stratification/ $F_3$ , quadruple stratification, and no data, respectively.

### 3. Conclusion

Ionospheric  $F$  layer observations during daytime, using a Canadian Advanced Digital Ionosonde (CADII), were carried out at Palmas (10.2°S, 48.2°W, near-equatorial region), Brazil. The main purpose of this paper is to present for the first time the occurrence of  $F$  layer quadruple stratification (StF-4) in the South American sector. The main results are summarized below:

1. The StF-4 has shorter lifetime than the triple stratification/ $F_3$  layer.
2. The StF-4 is antecedent and followed by triple/ $F_3$  layer stratification.
3. The StF-4 happens when the  $F$  layer electron density peak reaches its maximum height during daytime.
4. These observations reopen the theoretical discussion of the possible physical mechanism required to generate quadruple bottomside  $F$  layer stratification in the near equatorial region and call the attention of the ionospheric community to this interesting event. In addition, it reinforces the need to look back into ionosonde databases to recheck for the occurrence of  $F$  layer quadruple stratification.
5. There is a strong indication that StF-4 is formed due to the combination of the daytime background upward vertical  $E \times B$  plasma drift and the local nonuniformity of vertical  $E \times B$  plasma drift via wavelike oscillations.

#### Acknowledgments

Thanks are due to the Brazilian funding agencies FAPESP, FINEP, and CNPq for the partial financial support through grants 2012/08445-9 (FAPESP), 01.100661-00 (FINEP), and 302927/2013-1 (CNPq). Data of ionosonde that support this article are from the *Universidade do Vale do Paraíba*, Brazil, contact: tardelli@univap.br. We thank the WDC (Kyoto) and the Goddard Space Flight Center-NASA for providing the geomagnetic data.

Michael Liemohn thanks the reviewers for their assistance in evaluating this paper.

#### References

- Balan, N., and G. J. Bailey (1995), Equatorial plasma fountain and its effects: Possibly of an additional layer, *J. Geophys. Res.*, *101*(All), 21,421–21,432, doi:10.1029/95JA01555.
- Balan, N., G. J. Bailey, M. A. Abdu, K. I. Oyama, P. G. Richards, J. Macdougall, and I. S. Batista (1997), Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: Evidence for an additional layer, the  $F_3$  layer, *J. Geophys. Res.*, *102*, 2047–2056, doi:10.1029/95JA02639.
- Balan, N., I. S. Batista, M. A. Abdu, J. Macdougall, and G. J. Bailey (1998), Physical mechanism and statistics of occurrence of an additional layer in the equatorial ionosphere, *J. Geophys. Res.*, *103*, 29,169–29,181, doi:10.1029/98JA02823.
- Balan, N., I. S. Batista, M. A. Abdu, G. J. Bailey, S. Watanabe, J. MacDougall, and J. H. A. Sobral (2000), Variability of an additional layer in the equatorial ionosphere over Fortaleza, *J. Geophys. Res.*, *105*, 10,603–10,613, doi:10.1029/1999JA000020.
- Balan, N., S. V. Thampi, K. Lynn, Y. Otsuka, H. Alleyne, S. Watanabe, M. A. Abdu, and B. G. Fejer (2008),  $F_3$  layer during penetration electric field, *J. Geophys. Res.*, *113*, A00A07, doi:10.1029/2008JA013206.
- Batista, I. S., M. A. Abdu, J. MacDougall, and J. R. Souza (2002), Long-term trends in the frequency of occurrence of the  $F_3$  layer over Fortaleza, Brazil, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, *64*, 1409–1412.
- Batista, I. S., M. A. Abdu, A. M. da Silva, and J. R. Souza (2003), Ionospheric  $F_3$  layer: Implications for the IRI model, *Adv. Space Res.*, *31*(3), 607–611.
- Depuev, V. H., and S. A. Pulnits (2001), Intercosmos-19 observations of an additional topside ionization layer: The  $F_3$  layer, *Adv. Space Res.*, *27*(6-7), 1289–1292.
- Fagundes, P. R., V. Klausner, Y. Sahai, V. G. Pillat, F. Becker-Guedes, F. C. P. Bertoni, M. J. A. Bolzan, and J. R. Abalde (2007), Observations of daytime  $F_2$  layer stratification under the southern crest of the equatorial ionization anomaly region, *J. Geophys. Res.*, *112*, A04302, doi:10.1029/2006JA011888.

- Fagundes, P. R., M. T. A. H. Muella, J. A. Bittencourt, Y. Sahai, W. L. C. Lima, F. L. Guarnieri, F. Becker-Guedes, V. G. Pillat, A. S. Ferreira, and N. S. Lima (2008), Nighttime ionosphere-thermosphere coupling observed during an intense geomagnetic storm, *Adv. Space Res.*, *41*(4), 539–547, doi:10.1016/j.asr.2007.11.005.
- Fagundes, P. R., V. Klausner, J. A. Bittencourt, Y. Sahai, and J. R. Abalde (2011), Seasonal and solar cycle dependence of  $F_3$  layer near the southern crest of the equatorial ionospheric anomaly, *Adv. Space Res.*, *48*(3), 472–477, doi:10.1016/j.asr.2011.04.003.
- Grant, I. F., J. W. MacDougall, J. M. Ruohoniemi, W. A. Bristow, G. J. Sofko, J. A. Koehler, D. Danskin, and D. Andre (1995), Comparison of plasma flow velocities determined by the ionosonde Doppler drift technique, SuperDARN radars, and patch motion, *Radio Sci.*, *30*, 1537–1549, doi:10.1029/95RS00831.
- Heisler, L. H. (1962), Anomalous ionospheric stratification  $F_1$ – $5$ , *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, *24*, doi:10.1016/0021-9169(62)90212-X.
- Jenkins, B., G. J. Bailey, M. A. Abdu, I. S. Batista, and N. Balan (1997), Observations and model calculations of an additional layer in the topside ionosphere above Fortaleza, Brazil, *Ann. Geophys.*, *15*(6), 753–759, doi:10.1007/s00585-997-0753-3.
- Karpachev, A. T., M. V. Klimenko, V. V. Klimenko, G. A. Zhabankov, and V. A. Telegin (2012), Latitudinal structure of the equatorial  $F_3$  layer based on the Intercosmos-19 topside sounding data, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, *77*, 186–193, doi:10.1016/j.jastp.2011.12.018.
- Karpachev, A. T., M. V. Klimenko, V. V. Klimenko, G. A. Zhabankov, and V. P. Kuleshova (2013), Statistical study of the  $F_3$  layer characteristics retrieved from Intercosmos-19 satellite data, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, *103*, 121–128, doi:10.1016/j.jastp.2013.01.010.
- Klimenko, M. V., V. V. Klimenko, K. G. Ratovsky, L. P. Goncharenko, Y. Sahai, P. R. Fagundes, R. de Jesus, A. J. de Abreu, and A. M. Vesnin (2011), Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude  $F$  region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005, *Radio Sci.*, *46*, RS0D03, doi:10.1029/2010RS004590.
- Klimenko, M. V., V. V. Klimenko, and A. T. Karpachev (2012a), Formation mechanism of additional layers above regular  $F_2$  layer in the near-equatorial ionosphere during quiet period, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, doi:10.1016/j.jastp.2012.02.011.
- Klimenko, M. V., B. Zhao, A. T. Karpachev, and V. V. Klimenko (2012b), Stratification of the low-latitude and near-equatorial  $F_2$  layer, topside ionization ledge, and  $F_3$  layer: What we know about this? A review, *Int. J. Geophys.*, 938057, doi:10.1155/2012/938057.
- Lynn, K. J. W., T. J. Harris, and M. Sjarifudin (2000), Stratification of the  $F_2$  layer observed in Southeast Asia, *J. Geophys. Res.*, *105*(A12), 27,147–27,156, doi:10.1029/2000JA900056.
- MacDougall, J. W., G. E. Halland, and K. Havashi (1997),  $F$  region gravity waves in the central polar cap, *J. Geophys. Res.*, *102*(A7), 14,513–14,530, doi:10.1029/97JA01076.
- Paznukhov, V. V., B. W. Reinisch, P. Song, X. Huang, T. W. Bullett, and O. Vellz (2007), Formation of an  $F_3$  layer in the equatorial ionosphere: A result from strong IMF changes, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, *69*(10–11), 1292–1304, doi:10.1016/j.jastp.2006.08.019.
- Pulinets, S. A., V. H. Depuev, A. T. Karpachev, S. M. Radicella, and N. P. Damiikin (2002), Recent advances in topside profile modeling, *Adv. Space Res.*, *29*(6), 815–823.
- Rama Rao, P. V. S., K. Niranjana, D. S. V. V. D. Prasad, and P. S. Brahmanandam (2005), Features of additional stratification in ionospheric  $F_2$  layer observed for half a solar cycle over Indian low latitudes, *J. Geophys. Res.*, *110*, A04307, doi:10.1029/2004JA010646.
- Sen, H. Y. (1949), Stratification of the  $F_2$  layer of the ionosphere over Singapore, *J. Geophys. Res.*, *54*(4), 363–366, doi:10.1029/JZ054i004p00363.
- Skinner, N. J., R. A. Brown, and R. W. Wright (1954), Multiple stratification of the  $F$  layer at Ibadan, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, *5*, 92–100.
- Sreeja, V., N. Balan, S. Ravindran, T. K. Pant, R. Sridharan, and G. J. Bailey (2009), Additional stratifications in the equatorial  $F$  region at dawn and dusk during geomagnetic storms: Role of electrodynamics, *J. Geophys. Res.*, *114*, A08309, doi:10.1029/2009JA014373.
- Uemoto, J., T. Ono, A. Kumamoto, and M. Izima (2006), Statistical analysis of the ionization ledge in the equatorial ionosphere observed from topside sounder satellites, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, *68*(12), 1340–1351, doi:10.1016/j.jastp.2006.05.