



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.06.13.02-TDI

## **ESTUDO DO MECANISMO DE GERAÇÃO DAS CAMADAS ESPORÁDICAS DE SÓDIO**

Danielle Cristina de Morais Amorim

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Alexandre Alvares Pimenta, e Barclay Robert Clemesha, aprovada em 13 de março de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J4KHCP>>

INPE  
São José dos Campos  
2015

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

## **COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):**

### **Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **Membros:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas  
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  
(CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação  
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.06.13.02-TDI

## **ESTUDO DO MECANISMO DE GERAÇÃO DAS CAMADAS ESPORÁDICAS DE SÓDIO**

Danielle Cristina de Morais Amorim

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Alexandre Alvares Pimenta, e Barclay Robert Clemesha, aprovada em 13 de março de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J4KHCP>>

INPE  
São José dos Campos  
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Amorim, Danielle Cristina de Moraes.

Am68e Estudo do mecanismo de geração das camadas esporádicas de sódio / Danielle Cristina de Moraes Amorim. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxiv + 84 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.06.13.02-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. Alexandre Alvares Pimenta, e Barclay Robert Clemesha.

1. Camadas esporádicas de sódio. 2. Lidar. 3. Neutralização. 4. Região MLT. I.Título.

CDU 550.2:546.33

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Doutor(a)** em  
**Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas**

Dr. Alisson Dal Lago

  
\_\_\_\_\_  
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

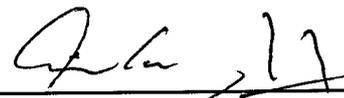
Dr. Alexandre Alvares Pimenta

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Barclay Robert Clemesha

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

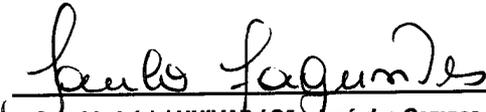
Dra. Alícia Luisa Clúa de Gonzalez Alarcon

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

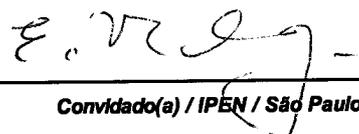
Dr. José Humberto Andrade Sobral

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Paulo Roberto Fagundes

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

Dr. Eduardo Landulfo

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / IPEN / São Paulo - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Danielle Cristina de Moraes Amorim**

São José dos Campos, 13 de Março de 2015



**“Se não puder voar, corra. Se não puder correr, ande. Se não puder andar, rasteje, mas continue em frente de qualquer jeito”.**

**Martin Luther King**



*Dedico este trabalho a meus pais Paulo Marcelino de Amorim e Marlene Aparecida de  
Morais Amorim, a minha querida irmã Miriele Aparecida Amorim e ao meu noivo  
Raoni Francisco Silva.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus que me deu a vida e sempre colocou pessoas maravilhosas em meu caminho.

Aos meus orientadores Dr. Alexandre Alvares Pimenta e Dr. Barclay Robert Clemesha, por todo auxílio, ensinamentos, pela dedicação e paciência que tiveram comigo durante todo o período em que estive no INPE, desde a iniciação científica até o doutorado. Agradeço também todo o apoio e ensinamentos que recebi do Dr. Dale Martin Simonich.

Agradeço aos membros da banca examinadora, Dr. Eduardo Landulfo, Dr. Paulo Roberto Fagundes, Dr. Alisson Dal Lago, Dra. Alcía Luisa Clúa de Gonzalez Alarcon e Dr. José Humberto de Andrade Sobral, pelas contribuições para a melhoria desse trabalho.

Agradeço às amigas e pesquisadoras Dra. Vânia Fátima Andrioli Novaes Silva e Dra. Laysa Cristina de Araújo Resende pela amizade e pela valiosa ajuda, com ensinamentos e discussões que contribuíram para a elaboração dessa tese e para meu crescimento intelectual.

Ao grupo de Física e Astronomia da UNIVAP, especialmente o Dr. Paulo Roberto Fagundes e Dr. Valdir Gil Pilat, pela gentileza em nos ceder os dados da CADI, o programa de redução e por me ensinar a reduzir os dados.

Ao Dr. Guotao Yang da Chinese Academy of Sciences, pela concessão dos dados do lidar de Wuhan e por me ensinar o processo de redução desses dados.

Ao Dr. Cristiano Wrasse por me ajudar com o processo de calibração do imageador.

À Dra. Inez Batista pela concessão dos dados da digissonda de Cachoeira Paulista e a Maria Goreti Aquino por ter me ajudado na separação e redução dos dados.

Ao engenheiro Fernando Morais, agradeço a ajuda nas diversas vezes que me acompanhou até Cachoeira Paulista para fazer ajustes no imageador e coletar dados.

Agradeço aos técnicos e engenheiros de Cachoeira Paulista Pedro Paulo da Silva Braga e Carlos Alberto Abrahao pela ajuda, empenho e paciência que tiveram comigo durante o período em que precisamos instalar e fazer ajustes no imageador.

A meus pais, eu agradeço o apoio constante, a paciência, o carinho e o colo durante os períodos mais conturbados. Obrigada por estarem ao meu lado e me darem forças para seguir sempre em frente.

A minha irmã, agradeço não a força, mas o empurrão. Foi por sua causa que hoje esta tese existe. Nunca esquecerei o que fez por mim. Obrigada mesmo! Não haveria no mundo irmã melhor que você.

Ao meu noivo, Raoni Francisco Silva, agradeço o companheirismo, a amizade, o carinho e a compreensão. Obrigada por estar sempre ao meu lado.

Aos amigos que fiz durante minha passagem pelo INPE, principalmente os do laboratório LASER, agradeço a amizade, o carinho e os momentos de descontração.

Agradeço aos amigos da FATEC, que acompanharam e compreenderam as dificuldades do término da tese, me apoiaram e torceram por mim.

Agradeço à CAPES e CNPq pelo apoio financeiro. Ao INPE pelo suporte, infraestrutura e pela oportunidade de cursar o mestrado e doutorado em Geofísica Espacial.

## RESUMO

Através de medidas óticas, feitas com radar de laser sintonizado no comprimento de onda do sódio (589 nm), instalado no INPE de São José dos Campos (23° S, 46° O), foram estudadas as características do fenômeno conhecido como camadas esporádicas de sódio (também referido como camadas Na<sub>s</sub>). As mesmas caracterizam-se por camadas muito finas de concentração aumentada de sódio, com largura a meia altura (FWHM) da ordem de 2 km e concentração igual ou maior que o dobro da concentração da camada de sódio de fundo. Apresentam tempo de vida entre poucos minutos a algumas horas e, em 70% dos casos observados, são acompanhadas por camadas esporádicas ionosféricas (E<sub>s</sub>). Inicialmente, foi feito um estudo estatístico, o qual, através de análise de perfis de sódio obtidos pelo lidar do INPE e por um lidar instalado em Wuhan (31°N, 114°L), permitiu a comparação entre as características estatísticas de ambas as localidades. Os dados observados compreendem o período de 2000 a 2008, período de atividade solar descendente. Os resultados desse estudo mostram boa concordância entre as características dos eventos ocorridos em latitudes diferentes, o que sugere um mecanismo comum de geração para as Na<sub>s</sub> observadas no Brasil e na China. Posteriormente, foi reunido um grande conjunto de dados, obtidos por ionossonda, radar meteórico e imageador all-sky, os quais foram analisados com o intuito de investigar os parâmetros geofísicos da mesosfera durante eventos de Na<sub>s</sub>. Tal estudo foi feito somente para a região de São José dos Campos. Os resultados mostram alta correlação entre a ocorrência de Na<sub>s</sub>, E<sub>s</sub> e cisalhamento de ventos. Foram comparadas as velocidades de descida das Na<sub>s</sub> com as velocidades de fase das componentes de maré, porém não verificou-se correlação entre elas. Imagens all-sky da emissão de sódio, obtidas pelo imageador de Cachoeira Paulista (22.7° S, 45° O), não mostraram variação significativa na intensidade da emissão durante eventos de Na<sub>s</sub>, o que não permitiu o estudo do local de geração e das dimensões horizontais das Na<sub>s</sub>. Embora ainda permaneçam algumas questões em aberto, os resultados obtidos pelas múltiplas análises efetuadas, apontam o mecanismo de neutralização dos íons de sódio presentes em camadas esporádicas ionosféricas como sendo o responsável pela formação das camadas esporádicas de sódio.



# STUDY OF THE GENERATION MECHANISM FOR SPORADIC SODIUM LAYER

## ABSTRACT

Through optical measurements using a lidar tuned in sodium wavelength (589 nm), which is installed at INPE, São José dos Campos (23° S, 46° W), we have studied a phenomenon known as sporadic sodium layers (referred as  $\text{Na}_s$ ). This phenomenon is characterized as thin layers of enhanced sodium density, with full width at half maximum about 2 km and abundance equal or higher than the double of the background layer. They present a lifetime from few minutes to some hours and, in 70% of the observed cases, are linked to ionospheric sporadic layers ( $E_s$ ). At first, we have made a statistical study in which we analyzed sodium profiles obtained by INPE lidar and by a lidar from Wuhan (31°N, 114°E). For this study, we have used data from 2000 to 2008, descending solar activity period. Our analysis was made in order to investigate common features in both region. The results are well correlated, which suggests a common generation mechanism for  $\text{Na}_s$  at both latitude region. Then we gathered a large amount of data from ionosonde, meteoric radar and all-sky images of sodium emission, in order to investigate the geophysical parameters of the mesosphere during  $\text{Na}_s$  events. The results show high correlation among  $\text{Na}_s$ ,  $E_s$  and wind shear. We also have compared descending speed of  $\text{Na}_s$  with tidal phase velocity, however we did not observe correlation between them. All-sky images from sodium emission, obtained from an imager installed at Cachoeira Paulista (22.7° S, 45° W) did not show significant variation in the emission intensity. So that it was not possible to study the local of  $\text{Na}_s$  generation and their horizontal dimension. Although some questions remain opened, the results obtained by multiple instrument analysis, indicates that the neutralization of sodium ions in the  $E_s$  layers is the responsible for  $\text{Na}_s$  generation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Perfil da atmosfera terrestre conforme a temperatura, composição, escape gasoso e ionização. ....	6
Figura 2.2 - A ionosfera da Terra e as principais radiações ionizantes responsáveis por sua formação. FONTE: Adaptado de astronomyonline.org .....	7
Figura 2.3-Diagrama de blocos do mecanismo íon-molecular para neutralização dos íons de sódio na região E.....	15
Figura 2.4-Tempos de vida dos íons de sódio em função da altura. ....	16
Figura 3.1 - Mapa mostrando a localização dos instrumentos utilizados nesse trabalho. O ponto azul mostra a localização do lidar no INPE de São José dos Campos; o ponto amarelo mostra a localização da ionossonda na UNIVAP em São José dos Campos; e o ponto verde mostra a localização do INPE de Cachoeira Paulista, onde estão instalados o radar meteorológico e o imageador all-sky. A distância entre o INPE e a UNIVAP em São José dos Campos é de 9,5 km e a distância entre o INPE de São José dos Campos e Cachoeira Paulista é de 110 km.....	20
Figura 3.2- Estágios para obtenção do laser pulsado, em 589 nm.....	22
Figura 3.3-Esquema simplificado do funcionamento do radar de laser. Um pulso de luz é emitido, através de uma saída ótica, para a atmosfera (linhas tracejadas azuis). A luz espalhada que retorna é concentrada em um telescópio receptor (linhas tracejadas pretas). ....	23
Figura 3.4- (a) Tela do programa de redução de dados do lidar que mostra um perfil de densidade do sódio atmosférico. O eixo das abscissas mostra a faixa de alturas (entre 75 e 110 km) e o eixo das ordenadas mostra a concentração de sódio em $m^{-3}$ . Observa-se que a camada de sódio se concentra entre aproximadamente 85 e 100 km, com pico de densidade em torno de 90 km. (b) Tela do programa de redução mostrando a ocorrência de uma camada esporádica de Sódio. Note que o evento se caracteriza por uma fina camada de concentração aumentada, sobreposta à camada de fundo.....	25
Figura 3.5- Diagrama dos estados energéticos do átomo de sódio nas linhas D1 e D2. 26	
Figura 3.6 - Perfil espectral das linhas D <sub>1</sub> e D <sub>2</sub> e intensidades relativas das componentes hiperfinas. FONTE: MEGIE,G.(1988).....	27
Figura 3.7 – Série temporal de perfis de temperatura obtidos em Fort Collins, Colorado. ....	28
Figura 3.8 - Tela de visualização de ionogramas do programa UDIDA, mostrando um ionograma obtido em 02/10/2000 em São José dos Campos. São mostrados os parâmetros ionosféricos, os ruídos e segunda reflexão. FONTE: Pillat et al. (2012). ...	31
Figura 3.9 - Sistema ótico do imageador all-sky instalado em Cachoeira Paulista.....	32

Figura 3.10 - Curva de eficiência quântica da CCD do imageador all-sky utilizado nesse trabalho. ....	33
Figura 3.11 – Imagens all-sky da emissão de fundo (BG – 589 nm), (a) antes e (b) após o processo de calibração, que alinha a imagem às coordenadas geográficas. ....	36
Figura 3.12- Representação do esquema de funcionamento do radar meteorológico SKiYMET.....	37
Figura 3.13 – Gráficos de contorno que expressam as componentes meridional (esquerda) e zonal (direita) do vento mesosférico na região de 82 a 98 km. Os gráficos se referem às condições dos ventos observados em 06 de junho de 2008 na região de Cachoeira Paulista. ....	38
Figura 3.14 - Gráficos que ilustram a amplitude (esquerda) e fase (direita) da maré diurna para cada altura. Os gráficos superiores se referem à componente meridional do vento, e os gráficos inferiores se referem à componente zonal, observada em 06 de junho de 2008 na região de Cachoeira Paulista. ....	39
Figura 4.1 – Localização do pico das camadas esporádicas de sódio em São José dos Campos. ....	43
Figura 4.2 - Localização do pico das camadas esporádicas de sódio em Wuhan.....	43
Figura 4.3 – (A) Horas observadas, e (B) Horários em que foram observados os picos das camadas esporádicas em São José dos Campos. ....	45
Figura 4.4- (A) Horas observadas, e (B) Horários em que foram observados os picos das camadas esporádicas em Wuhan. ....	46
Figura 4.5- Período de observação do lidar de Andoya, entre novembro de 1985 e novembro de 1987. FONTE: Hansen e von Zahn (1990).....	47
Figura 4.6- (A) Período de observação (horas) e (B) Período de ocorrência de $Na_s$ (%), para São José dos Campos.....	48
Figura 4.7 - (A) Período de observação (horas) e (B) Período de ocorrência de $Na_s$ (%), para Wuhan.....	49
Figura 4.8 - Ionograma obtido na noite de 26 de Fevereiro de 2014, às 19h00 LT. O ionograma mostra a ocorrência de uma camada $E_s$ , destacada na figura. A camada $E_s$ mostrada tem características de uma camada do tipo flat. ....	53
Figura 4.9 - Mecanismo de cisalhamento de vento. ....	54
Figura 4.10 - Sequência de ionogramas que mostra a ocorrência de $E_s$ na noite de 09 de setembro de 2002.....	63
Figura 4.11 - Sequência de perfis de sódio, que mostra a ocorrência de uma $N_{as}$ em torno de 102 km, no dia 08/09/2003.....	65

Figura 4.12 – (a) e (b) Gráficos de contorno da velocidade dos ventos horizontais e (c) e (d) intensidade do cisalhamento vertical dos ventos horizontais. ....	66
Figura 4.13 - Sequência dos perfis de sódio da noite de 26 de fevereiro de 2014. ....	69
Figura 4.14 - Variação da concentração de sódio em função da altura e tempo em 26 de fevereiro de 2014. ....	69
Figura 4.15 - Sequência de imagens de airglow da emissão de sódio em 26 de fevereiro de 2014. ....	70
Figura 4.16 - Keograma mostrando a variação da emissão de sódio em longitude e tempo, mantendo-se fixa a latitude de São José dos Campos. ....	71
Figura 4.17 - Keograma mostrando a variação da emissão de sódio em latitude e tempo, mantendo-se fixa a longitude de São José dos Campos. ....	71
Figura 4.18 - Variação sazonal da emissão de sódio em quatro sítios de observação: Davao (7°N, 125,6°L), Haleakala (20,7°N, 156,3° O), Abastumani (41,7°N, 42,8°O) e Haute Provence (43,9°N, 5,7°L) . A linha pontilhada azul destaca o valor médio de intensidade para mês de fevereiro em Haleakala, região de baixa latitude. ....	72
Figura 4.19 - Variação sazonal da intensidade da emissão de sódio para a região de São José dos Campos. Para o mês de Novembro não havia dados suficientes para qualquer análise. ....	73



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- A química íon-molecular do sódio na baixa termosfera. Fonte: Cox e Plane (1998). .....	14
Tabela 3.1 - Características do lidar do INPE de São José dos Campos. FONTE: Clemesha et al. (2011) .....	22
Tabela 4.1 - Parâmetros obtidos da análise simultânea de $Na_s$ e $E_s$ . .....	56
Tabela 4.2 - Análise das características das $Na_s$ com dados simultâneos de lidar e Imageador all-sky. ....	68



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{B}$	Vetor campo magnético
$\vec{U}$	Vetor vento neutro
$E_s$	Camada esporádica ionosférica
$f$	Frequência do plasma
$f_oF2$	Frequência crítica da camada F2 ionosférica
$h'F$	Altura virtual mínima da camada F ionosférica
$hpF2$	Altura de pico da camada F ionosférica
$n$	Índice de refração do plasma ionosférico
$Na$	Sódio
$Na^+$	Íon de sódio
$Na_s$	Camada esporádica de sódio
$N_e$	Densidade eletrônica
$\beta$	Coefficiente de extinção
$\epsilon_0$	Permissividade elétrica no vácuo
$v_{in}$	Frequência de colisão entre íons e partículas neutras
$\sigma(h)$	Secção transversal de retroespalhamento volumétrico
$\sigma_{Na}$	Coefficiente de espalhamento de sódio
$\omega$	Frequência angular de uma onda eletromagnética
$\Omega_i$	Girofrequência dos íons
$\omega_N$	Frequência angular do plasma



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objetivos dessa tese .....	2
1.2	Estrutura da tese.....	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	5
2.1	A região MLT e seus principais processos.....	5
2.2	Observações de camadas metálicas na região MLT .....	8
2.3	Camadas esporádicas de sódio: Observações e mecanismos de geração propostos..	9
2.4	O mecanismo de neutralização de íons de sódio presentes em camadas Es .....	12
3	INSTRUMENTAÇÃO .....	19
3.1	Radar de Laser .....	21
3.2	A ionossonda digital – CADI.....	28
3.3	Imageador all-sky .....	31
3.3.1	A emissão de sódio mesosférico .....	33
3.3.2	Calibração do imageador .....	34
3.4	Radar meteórico SKiYMET.....	36
4	ANÁLISE DE DADOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1	Estudo comparativo das características das camadas esporádicas de sódio observadas em São José dos Campos e Wuhan.....	41
4.1.1	Distribuição de altura .....	42
4.1.1	Variação noturna.....	44
4.1.2	Variação sazonal.....	47
4.1.3	Tempos de subida e descida .....	50
4.2	Análise simultânea dos dados do lidar e da Digissonda CADI.....	52
4.3	Análise de dados obtidos por radar meteórico .....	59
4.4	Análise simultânea dos dados do lidar e imagens all-sky .....	67
5	SUMÁRIO E CONCLUSÕES .....	75

Referências bibliográficas ..... 79

## 1 INTRODUÇÃO

Observações feitas com radares de laser operando em ressonância com a linha de sódio (589 nm) revelaram o curioso fenômeno das camadas esporádicas de sódio ( $\text{Na}_s$ ). As  $\text{Na}_s$  são camadas muito finas de átomos de sódio concentrado (aproximadamente 2 km), que ocorrem em altitudes entre aproximadamente 90 e 110 km, podendo durar de poucos minutos a algumas horas. A largura a meia altura (FWHM) média da camada é de 2 km e sua concentração no pico é igual ou maior que 2 vezes a concentração da camada de fundo, sendo que a concentração média da camada de fundo é de  $3 \cdot 10^9 \text{ m}^{-3}$ .

Os primeiros relatos de observação das  $\text{Na}_s$  foram feitos por Clemesha et al. (1978) que observaram, por várias horas, uma fina camada de sódio de 2 km de espessura em 92 km de altura, na noite de 19 de abril de 1977 em São José dos Campos (23°S, 46°O). Desde então, muitas observações foram feitas, em diferentes regiões geográficas, na tentativa de conhecer melhor as características do fenômeno [exemplos: Kwon et al. (1988), Batista et al. (1989), Senft et al. (1989), Hansen e von Zahn (1990), Kane e Hostetler (1991), Gardner et al. (1993)]. Algumas campanhas incluindo medidas com lidar a bordo de avião, observações com radar de espalhamento incoerente e airglow também foram feitas na tentativa de investigar a extensão horizontal das  $\text{Na}_s$  [KANE et al. , 1991, 1993]. Através desses trabalhos, muitas características das  $\text{Na}_s$  foram conhecidas, porém sua dependência com a latitude e seu mecanismo de formação ainda não são claros.

O principal objetivo deste trabalho é investigar o mecanismo de geração das camadas esporádicas de sódio. Para isso, foram utilizados dados de um lidar instalado em São José dos Campos (23°S, 46°W) para identificação dos eventos e suas principais características. Adicionalmente, a fim de verificar as condições da atmosfera ambiente durante eventos de  $\text{Na}_s$ , utilizaram-se dados de uma ionossonda instalada no mesmo sítio, além de um radar meteórico e de um imageador all-sky instalados em Cachoeira Paulista (~110 km de distância do sítio do lidar). Possíveis correlações com camadas esporádicas ionosféricas ( $E_s$ ) e cisalhamento de ventos foram analisadas através dos ionogramas e dados de ventos, respectivamente. O imageador all-sky foi utilizado para verificar a existência de variações na camada de emissão do sódio durante o período de ocorrência das camadas  $\text{Na}_s$ .

## 1.1 Objetivos dessa tese

O objetivo principal dessa tese é estudar os mecanismos de geração para as camadas esporádicas de sódio, e determinar aquele que seja capaz de explicar todas as características observadas e que seja válido para todas as regiões de latitude.

A fim de alcançar esse objetivo, foram desenvolvidos os seguintes estudos:

- Análise de dados do lidar de São José dos Campos (23°S, 46°O) do período de 2000 a 2008 (período de atividade solar descendente) para identificação de camadas esporádicas de sódio e suas características (horário de início e término, tempo de duração do evento, largura a meia altura, altura e horário de máxima concentração, fator de intensidade, velocidade de descida);
- Análise de dados do lidar de Wuhan (31°N, 114°L) do período de 2000 a 2008 para identificação de camadas esporádicas de sódio e suas características (horário de início e término, tempo de duração do evento, largura a meia altura, altura e horário de máxima concentração, fator de intensidade);
- Análise de dados de ionossonda de São José dos Campos do período de 2000 a 2008 para verificação da ocorrência de camadas esporádicas ionosféricas e suas características (período de ocorrência, altura, densidade);
- Análise de dados de radar meteorológico de Cachoeira Paulista do período de 2000 a 2008, a fim de verificar a ocorrência de cisalhamento de ventos durante eventos de Na<sub>s</sub>, de modo a investigar a influência dos ventos na formação das camadas esporádicas de sódio. Além disso, valores de velocidade da maré foram comparados com a velocidade de descida das Na<sub>s</sub> a fim de verificar se há influência da maré no movimento de descida das camadas Na<sub>s</sub>;
- Análise de dados do imageador all-sky da linha de emissão do sódio para o ano de 2013 e 2014, a fim de verificar as dimensões horizontais das Na<sub>s</sub> e seu local de geração.

## 1.2 Estrutura da tese

A tese está estruturada em cinco capítulos, os quais são brevemente descritos a seguir:

**Capítulo 1 – Introdução:** Nesse capítulo é feita uma breve descrição a respeito do fenômeno estudado e são expostos os objetivos a serem atingidos ao longo do trabalho.

**Capítulo 2 – Fundamentação teórica:** Esse capítulo descreve a região MLT, que é uma região dinâmica, onde muitos processos atmosféricos importantes ocorrem. É discutida também a formação das camadas metálicas, em especial a camada de sódio, e relatadas as características das camadas esporádicas de sódio observadas em diferentes regiões de latitudes. Por fim, é feita uma descrição do mecanismo mais aceito como sendo o responsável pela geração das camadas esporádicas, que é o mecanismo de neutralização dos íons de sódio presentes em camadas esporádicas ionosféricas.

**Capítulo 3 - Instrumentação:** Nesse capítulo, é feita uma descrição detalhada do funcionamento do radar de laser, que foi o principal instrumento utilizado ao longo deste trabalho. Adicionalmente, faz-se uma breve descrição do funcionamento do radar meteorológico, ionossonda e imageador all-sky, instrumentos que forneceram dados complementares ao trabalho.

**Capítulo 4 – Análise de dados, resultados e discussão:** Esse capítulo se divide em quatro partes, sendo:

1. Comparação entre dados estatísticos obtidos em baixas e médias latitudes: Esse item apresenta a comparação entre dados estatísticos obtidos em uma estação de baixa latitude (SJC) e em uma estação de média latitude (Wuhan), durante o período de 2000 a 2008, a fim de verificar se as características são coincidentes, o que seria um indício de um mecanismo comum de geração de  $\text{Na}_s$  em ambas as regiões de latitude.

2. Análise simultânea de dados de lidar e ionossonda: Esse item apresenta a análise das características ionosféricas durante ocorrência de  $\text{Na}_s$  para o período de 2000 a 2008. O intuito foi o de verificar a correlação entre ocorrência de camadas esporádicas de sódio e camadas esporádicas ionosféricas.

3. Análise simultânea de dados do lidar e radar meteorológico: Neste item é mostrada a análise que foi feita sobre a correlação entre a ocorrência de camadas esporádicas de sódio e cisalhamento vertical do vento horizontal. Ainda são comparadas as velocidades de descida das camadas esporádicas com as velocidades de fase das componentes diurna e semidiurna da maré de origem solar.

4. Análise simultânea de dados de lidar e imagens all-sky: Esse item apresenta uma análise simultânea de dados de lidar e imagens da emissão de sódio para o ano de 2013 e 2014. O objetivo foi verificar a ocorrência de variações na emissão de sódio devido a eventos de camadas esporádicas de sódio e em caso afirmativo, medir as dimensões horizontais das mesmas e seu local de geração.

**Capítulo 5 – Sumário e conclusões:** Nesse capítulo os resultados são sumarizados e conclusões alcançadas com base na análise de dados e consulta à literatura são apresentadas.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 A região MLT e seus principais processos**

A região MLT (Mesosphere and Lower-Thermosphere - Mesosfera e baixa termosfera), que se estende de aproximadamente 60 km a 100 km de altitude, é a região de transição entre a média atmosfera e a baixa termosfera e tem algumas características próprias, que a difere das demais regiões da atmosfera terrestre.

Essa região é de interesse particular, pois se forma na transição entre a heterosfera e a homosfera e está sujeita a diversos processos, como a entrada de meteoros, a quebra de ondas de gravidade, o mínimo de temperatura da atmosfera, a ablação de meteoros, entre outros processos. As condições dinâmicas da região são exploradas através de medidas feitas in situ com foguetes, e com vários instrumentos remotos em solo e no espaço. Com a melhoria na instrumentação em tempos recentes, tem-se melhorado também os modelos numéricos dessa região. Modelos atuais incluem química com concentrações realísticas e tendências de gases traços natural e antropogênicos, forçante externo por variabilidade solar e fluxos de partículas energéticas.

Na região MLT há um decréscimo de temperatura com a altura, conforme visualizado na Figura 2.1. Isso se deve ao fato de que a maior parte da radiação na faixa do Extremo Ultra Violeta (EUV- 10 nm) é absorvida na termosfera e, na baixa atmosfera, os gases do efeito estufa, principalmente o CO<sub>2</sub>, impedem a passagem da radiação infravermelha, contribuindo para o resfriamento da região MLT (Plane, 2003).

A região MLT abriga o ponto de menor temperatura da atmosfera, em torno de 180 K, sendo que esse mínimo é ainda menor nos meses de verão. Esse gradiente de temperatura que ocorre do hemisfério de verão para o hemisfério de inverno, se deve ao resfriamento e aquecimento associado a uma circulação vigorosa movida primariamente por ondas de gravidade (Smith, 2012). As ondas de gravidade que se propagam de modo ascendente se dissipam e depositam momento nessa região, o que influencia a circulação atmosférica e a estrutura da região MLT.

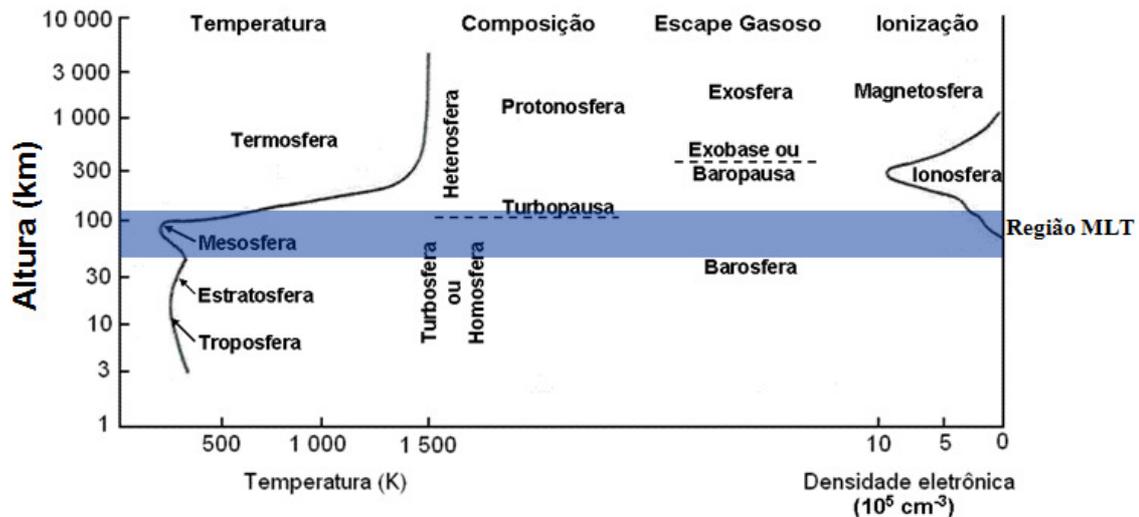


Figura 2.1- Perfil da atmosfera terrestre conforme a temperatura, composição, escape gasoso e ionização.

FONTE: Adaptado de adaptado de Hargreaves (1992, p.99).

Marés e ondas planetárias também contribuem para a variabilidade dinâmica na região MLT. Assim como as ondas de gravidade, as marés e as ondas planetárias são causadas por perturbações que provocam o desequilíbrio do ar a partir de um estado básico. A classificação das ondas se dá de acordo com o período das mesmas. As ondas planetárias são ondas com período maior que 24 horas e possuem grande estrutura horizontal, da ordem do diâmetro terrestre. Isso se deve ao efeito da força de Coriolis com a latitude, que age sobre a atmosfera como uma força externa, produzindo ondas com grande comprimento de onda horizontal. As marés são ondas cujos períodos são submúltiplos do dia solar ou lunar. Tratam-se de oscilações de escala global, produzidas pela ação gravitacional do Sol e da Lua sobre a Terra e, em maior proporção, pela absorção diferencial da radiação solar pela atmosfera terrestre. A maré produz efeito significativo nos campos de pressão, densidade e temperatura na região MLT e influencia também a distribuição dos constituintes atmosféricos.

Outro aspecto importante da região MLT é que essa região é exposta à radiação solar em comprimentos de onda que são energéticos o suficiente para ionizar átomos e moléculas, dando origem a concentrações significativas de plasma acima de aproximadamente 60 km. Os raios X e EUV são a fonte primária de íons e elétrons na região E (acima de 100 km). E na região D (~60 – 100 km) a ionização ocorre devido aos Raios-X, radiação Lyman- $\alpha$  e pelos raios cósmicos. A Figura 2.2 mostra o perfil

vertical da ionosfera terrestre até aproximadamente 400 km e as radiações ionizantes responsáveis por sua formação.

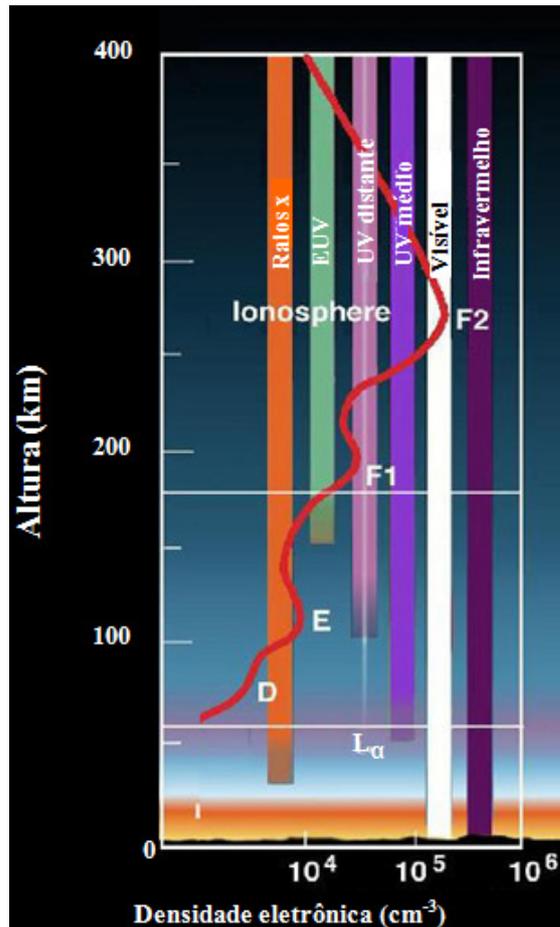


Figura 2.2 - A ionosfera da Terra e as principais radiações ionizantes responsáveis por sua formação.

FONTE: Adaptado de astronomyonline.org

Ainda na região MLT ocorre a ablação de meteoroides, que dá origem as camadas metálicas, que é o objeto de estudo dessa tese. Diariamente, milhares de partículas de poeira de origem interplanetária, denominadas meteoroides, entram na atmosfera da Terra. Devido a suas altas velocidades de entrada, os meteoroides sofrem rápido aquecimento friccional por colisões com as moléculas do ar e se vaporizam, depositando na atmosfera, toneladas de átomos metálicos que se agrupam em forma de camadas entre aproximadamente 80 e 105 km. Vários desses metais (sódio, ferro, potássio, cálcio e lítio) possuem transições óticas e podem ser observados em solo por técnicas espectroscópicas de fotometria e lidar.

## 2.2 Observações de camadas metálicas na região MLT

Os meteoros que atingem a atmosfera terrestre têm duas fontes principais. A primeira, que dá origem às chuvas de meteoros, tais como a Parseids e Leonids, se deve a trilhas de poeira produzidas pela sublimação de cometas quando, em sua órbita, passam próximo ao Sol. A segunda são fragmentos do cinturão de asteroides e partículas de poeira de trilhas cometárias. A última fonte é responsável pela entrada contínua de meteoroides que provê um fluxo de massa muito maior do que as chuvas de meteoros.

As camadas de átomos metálicos (Na, K, Fe e  $\text{Ca}^+$ ) começaram a ser observadas nos anos 1950 com a utilização de fotômetros que mediam a ressonância fluorescente de transições óticas dos átomos excitados por radiação solar. As grandes secções transversais de espalhamento ressonante desses constituintes permitiam sua observação (Plane, 2003).

Com o desenvolvimento da técnica de sondagem por meio de radares de laser (lidar) ressonantes, nos anos 1970, a fotometria foi substituída. Basicamente, o funcionamento de um lidar de espalhamento ressonante se baseia na transmissão de um feixe de laser pulsado, que é sintonizado com uma transição ótica permitida de um átomo metálico. Na região da mesopausa, o pulso sofre espalhamento ressonante ao interagir com os átomos metálicos cujo nível de transição corresponde ao comprimento de onda da luz emitida. Parte da luz espalhada retorna ao solo e é coletada por um telescópio. Os fótons coletados por esse telescópio são então analisados de acordo com o tempo de emissão e recepção (o que fornece informação sobre a altitude em que ocorreu o espalhamento), a taxa na qual os fótons são recebidos (fornecendo informação sobre a densidade dos constituintes local) e com seu comprimento de onda exato (o que cede informações sobre movimento, temperatura e concentração do sinal retroespalhado) (von Zahn et al., 2002).

Atualmente, lidars têm sido usados para observar Na, K, Li, Ca,  $\text{Ca}^+$  e Fe. Historicamente, a camada de sódio é estudada com maiores detalhes, pois é composta pelo metal mais fácil de ser observado. Sua altura de pico varia entre 88 km e 92 km, sendo os maiores valores observados durante o verão. Outra característica observada é

que a parte superior da camada de sódio tem uma altura de escala muito menor do que a da atmosfera (~2-3 km), o que indica a ocorrência de perdas nessa região. Tais perdas podem ser resultantes da ionização do sódio, principalmente por ionização direta e reações de troca de carga com os íons majoritários, tais como o  $\text{NO}^+$  e o  $\text{O}_2^+$ .

A camada de sódio, assim como as outras camadas metálicas presentes na atmosfera, tem sido extensivamente explorada, devido à sua densidade relativamente alta, grande seção transversal de retroespalhamento ressonante, e por ser um traçador do estado térmico e dinâmico da região da mesosfera e baixa termosfera (Collins et al., 2002). As observações, acopladas com experimentos em laboratório, resultaram em modelos que reproduzem, com sucesso, as principais características da camada de sódio (Helmer e Plane, 1993). No entanto, a formação esporádica de finas camadas de alta concentração de sódio ainda tem sido um fenômeno intrigante, cuja origem há muito vem sendo discutida.

### **2.3 Camadas esporádicas de sódio: Observações e mecanismos de geração propostos**

Observações feitas com radares de laser operando em ressonância com a linha de sódio (589 nm) revelaram o curioso fenômeno das camadas esporádicas de sódio ( $\text{Na}_s$ ). As  $\text{Na}_s$  são camadas muito finas de átomos de sódio concentrado, que ocorrem localmente e em altitudes entre aproximadamente 90 e 100 km, podendo durar de poucos minutos a algumas horas. Sua largura a meia altura (FWHM - do inglês Full Width at Half Maximum) é maior ou igual a 2 km e sua concentração no pico é igual ou maior que duas vezes a concentração da camada de fundo.

Desde os primeiros relatos de observação das  $\text{Na}_s$  (Clemesha et al., 1978), muitos estudos têm sido feitos em diferentes regiões geográficas, e muitas de suas características já são conhecidas, exceto sua dependência com a latitude e seu mecanismo de formação.

No que se refere à dependência com a latitude, inicialmente as  $\text{Na}_s$  pareciam ser um fenômeno fortemente dependente da latitude, tendo sido usualmente observadas em baixas e altas latitudes, como por exemplo, em São José dos Campos-Brasil (23°S) (Clemesha et al., 1980), Andoya – Noruega (69°N) (von Zahn et al., 1987), Longyarbyen – Svalbard (78°N) (Gardner et al., 1988) e Mauna Kea-Hawaii (19,5°N)

(Kwon et al.,1988). Relatos mais recentes têm mostrado a ocorrência de Na<sub>s</sub> em médias latitudes. As primeiras observações foram feitas por Megie (1988) na Haute Provence – França (44°N) e Senft et al. (1989) em Urbana-Illinois (40°N), que mostraram poucas ocorrências de Na<sub>s</sub> nessas regiões. Contudo, Nagassawa e Abo (1995) e Gong et al.(2002) observaram grande taxa de ocorrência de Na<sub>s</sub> em Tokio (35,6° N) e Wuhan (31°N), respectivamente, indicando que as Na<sub>s</sub> podem ser um fenômeno frequente em médias latitudes. C. O’Sullivan et al. (1999) também relataram ocorrência de Na<sub>s</sub> em 4 das 5 noites de observação feitas em setembro de 1997 e agosto de 1998 em Callar Alto – Espanha (37,22°N).

Com relação ao mecanismo de formação das Na<sub>s</sub>, várias teorias foram postuladas, porém, nenhuma delas pareceu ser capaz de levar em consideração todas as características das Na<sub>s</sub> observadas. Várias hipóteses para o mecanismo de geração têm sido levantadas, desde os primeiros relatos de observações das camadas esporádicas por Clemesha et al. (1978), que atribuíram à deposição de metal de origem meteórica a formação das camadas esporádicas de sódio. A observação de Na<sub>s</sub> em altas latitudes, levou à suposição de que as mesmas pudessem ser geradas através da liberação de sódio de aerossóis devido à precipitação de partículas de origem auroral (von Zahn et al., 1987). Clemesha et al. (1988) evoluíram a teoria da origem de camadas esporádicas de sódio por deposição meteórica, incluindo o papel do cisalhamento de ventos como responsável pelo estreitamento da camada.

Com o aumento das observações feitas por muitos grupos de pesquisas, em diversas regiões, a teoria sobre deposição de meteoros foi rejeitada. Supondo que ela fosse verdadeira, Hansen e von Zahn (1990) calcularam a massa aproximada de um meteoro capaz de gerar o fenômeno observado, como sendo da ordem de 100 kg. Meteoros desse tamanho são raramente observados, em comparação com a frequência de ocorrência do fenômeno. A teoria sobre a liberação de átomos de sódio de partículas de aerossóis também foi rejeitada, uma vez que se aplica somente a regiões de altas latitudes.

Desde as primeiras observações de camadas Na<sub>s</sub>, há forte evidência da relação com camada E<sub>s</sub>. von Zahn e Hansen (1988) e Batista et al. (1989) apresentaram evidências estatísticas, mostrando que as E<sub>s</sub> estão presentes na maioria das ocasiões em

que as Na<sub>s</sub> foram observadas. A alta correlação temporal e espacial entre as camadas Na<sub>s</sub> e as camadas E<sub>s</sub>, levaram os pesquisadores a acreditar que o mecanismo mais provável para a formação das Na<sub>s</sub> seria a neutralização de Na<sup>+</sup> existente nas camadas E<sub>s</sub>.

Correlações entre eventos de Na<sub>s</sub> e cisalhamento de ventos também foram reportadas. Gardner et al. (1995) relataram um evento de camada Na<sub>s</sub> acompanhado de um forte cisalhamento de ventos, observado por um lidar de sódio, que também mediu temperatura e ventos em Haleakala, Maui (20,8°N, 156,2°O) durante a campanha ALOHA-93. Na ocasião, foi observado um forte cisalhamento de vento zonal de 42 m/s/km. Qian et al. (1998) investigaram 43 eventos de Na<sub>s</sub> observados durante a mesma campanha e verificaram a ocorrência de forte cisalhamento dos ventos horizontais na maioria dos eventos, aproximadamente 0,5 km abaixo da camada Na<sub>s</sub>. Na maioria dos casos, o cisalhamento do vento meridional foi significativamente maior que o do vento zonal. O cisalhamento total foi, geralmente, para o norte-nordeste e sul.

No estudo de Miyagawa et al. (1999), foram investigadas as correlações entre as Na<sub>s</sub> em médias latitudes e os parâmetros dinâmicos da atmosfera, com a utilização de um radar MU (Middle and Upper Atmosphere Radar) e um lidar. Comparações foram feitas com os eventos abaixo de 100 km, devido às limitações do radar. Foram investigados os parâmetros de cisalhamento de ventos, variações de temperatura e índices de estabilidade atmosférica, na escala temporal e espacial das camadas Na<sub>s</sub> observadas com o lidar. Os autores verificaram a ocorrência de fortes cisalhamentos de ventos, especialmente nos eventos que não foram acompanhados de camada E<sub>s</sub>. Notaram também que marés diurnas propagantes nos ventos horizontais são significativamente fortes nessa região e, portanto, podem contribuir para o cisalhamento.

Variações na temperatura também são candidatas a mecanismo de geração de Na<sub>s</sub>. Com base no fato de que a taxa de produção de Na é uma função sensível da temperatura, Zhou et al. (1993) argumentaram que a flutuação de temperatura induzida por ondas de gravidade podem causar a formação da camada Na<sub>s</sub>. Nesse sentido, o aumento local de temperatura causado por ondas de gravidade, poderia acelerar a reação química que gera o sódio atômico a partir de compostos de sódio. Gardner et al. (1995) observaram dois eventos de Na<sub>s</sub> associados a um aumento de temperatura de mais de

40K. Contudo, Qian et al. (1998), analisando o mesmo conjunto de dados, verificaram que o aumento de temperatura nem sempre estava associado à presença de camadas Na<sub>s</sub>. Os dados do lidar de São José dos Campos também não mostram a ocorrência de aumentos de temperatura associados a eventos de Na<sub>s</sub> (B.R. Clemesha – comunicação pessoal).

De todos os mecanismos de geração de Na<sub>s</sub> propostos, o de neutralização de íons de sódio é o que mais se adéqua às observações. Uma teoria proposta por Cox e Plane (1998), atribui a geração de Na<sub>s</sub> ao mecanismo de neutralização de íons de sódio presentes nas camadas E<sub>s</sub>. Essa é a explicação mais aceita e é descrita na seção a seguir:

#### **2.4 O mecanismo de neutralização de íons de sódio presentes em camadas Es**

Considerando promissora a hipótese de que a neutralização de íons pudesse ser o processo responsável pela geração de Na<sub>s</sub>, Cox e Plane (1998) fizeram um estudo em laboratório da química íon-molecular do Na<sup>+</sup> pertinente à região MLT. Inicialmente os pesquisadores fizeram um estudo em laboratório para determinação dos coeficientes de taxa das reações responsáveis pela neutralização do Na (Reações R1 a R3 na tabela 1), considerando uma concentração de íons Na<sup>+</sup> da ordem de 10<sup>3</sup> a 10<sup>5</sup> cm<sup>-3</sup>. Posteriormente, construíram um modelo computacional da química íon-molecular do sódio na região MLT.

Em um estudo anterior, baseado na criação de um modelo da química e difusão vertical na região MLT, Cox et al. (1993) verificaram que, para que as Na<sub>s</sub> fossem produzidas, seria necessário a presença de um reservatório de átomos de sódio na região MLT, e estabeleceram 5 critérios que tal reservatório deve atender:

1. A intensidade mínima da fonte requerida para produzir uma Na<sub>s</sub> típica é de 1 átomo cm<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>;
2. Como o fenômeno é esporádico, o reservatório deve ser relativamente estável até que o mecanismo de geração ative a liberação de sódio;
3. O reservatório ou o mecanismo de liberação deve ser concentrado em uma fina camada, de largura 1-2 km;

4. O reservatório de espécies deve estar presente em quantidade suficiente para acumular o Na em concentrações observadas em uma  $Na_s$  típica;
5. Um mecanismo bem sucedido deve explicar a ausência relativa de  $Na_s$  em médias latitudes.

Antes de prosseguir com o detalhamento do mecanismo de neutralização dos íons de sódio, é importante ressaltar que o 5º critério que um reservatório de íons de sódio deve atender, proposto por Cox et al. (1993), não se aplica mais às observações atuais. As camadas esporádicas de sódio eram consideradas um fenômeno de baixas e médias latitudes, contudo, desde o trabalho de Nagassawa e Abo (1995), que relatam grande taxa de ocorrência de  $Na_s$  em Tokio (35,6° N), o fenômeno tem se mostrado frequente em regiões de médias latitudes, como também relatado por Gong et al.(2002), C. O'Sullivan et al. (1999) e como é mostrado no item 4.1 desta tese.

Considerando que as camadas  $E_s$  pudessem prover tal reservatório de espécies, Cox e Plane (1998) realizaram um estudo em laboratório, onde os coeficientes de taxa das reações químicas envolvendo o sódio na região MLT foram obtidos experimentalmente. As reações R1 a R3 mostradas na tabela 1 foram estudadas em um tubo de fluxo rápido acoplado a um espectrômetro de massa. Sob condições atmosféricas, foram obtidos os coeficientes de reação mostrados na terceira coluna da tabela 1.

Tabela 2.1- A química íon-molecular do sódio na baixa termosfera. Fonte: Cox e Plane (1998).

	Reação	Coefficiente de reação
R1	$\text{Na}^+ + \text{N}_2 + \text{M} \rightarrow \text{Na} \cdot \text{N}_2^+ + \text{M}$	$4,8 \cdot 10^{-30} (\text{T}/200\text{K})^{-2,2}$
R2	$\text{Na}^+ + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{Na} \cdot \text{O}_2^+ + \text{M}$	$6,4 \cdot 10^{-31} (\text{T}/200\text{K})^{-4,5}$
R3	$\text{Na}^+ + \text{CO}_2 + \text{M} \rightarrow \text{Na} \cdot \text{CO}_2^+ + \text{M}$	$3,7 \cdot 10^{-29} (\text{T}/200\text{K})^{-2,9}$
R4	$\text{Na} \cdot \text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{Na} \cdot \text{O}^+ + \text{N}_2$	$6 \cdot 10^{-10}$
R5	$\text{Na} \cdot \text{O}^+ + \text{O} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{O}_2$	$6,2 \cdot 10^{-10}$
R6	$\text{Na} \cdot \text{N}_2^+ + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na} \cdot \text{CO}_2^+ + \text{N}_2$	$7,8 \cdot 10^{-10}$
R7	$\text{Na} + \text{X}^+ \rightarrow \text{Na} + \text{X} \quad (\text{X} = \text{N}_2, \text{CO}_2, \text{O})$	$1 \cdot 10^{-6} (\text{T}/200\text{K})^{-1/2}$
R8	$\text{Na} + \text{O}_2^+ \rightarrow \text{Na}^+ + \text{O}_2$	$1,4 \cdot 10^{-9}$
R9	$\text{Na} + \text{NO}^+ \rightarrow \text{Na}^+ + \text{NO}$	$1 \cdot 10^{-9}$

Após obtenção experimental dos coeficientes de reação, os pesquisadores construíram um modelo computacional da química íon-molecular do sódio na região MLT. Os perfis verticais das espécies atmosféricas O, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> foram obtidos pelo modelo bidimensional de Garcia e Solomon (1985, 1994). Os perfis foram obtidos para condições noturnas no mês de Outubro e na latitude de 23° N. Tais condições foram utilizadas para comparação com os eventos de Na<sub>s</sub> observados durante a campanha ALOHA-93. Os perfis de concentração dos íons NO<sup>+</sup>, O<sup>+</sup> e elétrons (e<sup>-</sup>) foram obtidos do trabalho de Thomas et al. (1983). Por fim, o perfil de temperatura utilizado no modelo foi obtido realizando-se uma média de 20 noites de dados de um radar de laser de sódio localizado em Haleakala durante a referida campanha.

Os resultados mostraram que o primeiro passo para a neutralização do Na<sup>+</sup> é a formação do íon aglutinado Na<sup>+</sup>.N<sub>2</sub> por recombinação termo-molecular do Na<sup>+</sup> com o N<sub>2</sub>. O íon Na<sup>+</sup>.N<sub>2</sub> poderia então, se ligar com o N<sub>2</sub>, com o CO<sub>2</sub> (ou H<sub>2</sub>O), formando um íon aglutinado ainda mais estável, que se recombina dissociativamente com elétrons e forma o Na, ou pode novamente se ligar com o O, formando novamente o Na<sup>+</sup>. A Figura

2.3 resume o processo e a Figura 2.4 mostra um perfil vertical do tempo de vida do  $\text{Na}^+$  em função da altitude. Na figura 2.4, a linha pontilhada se refere ao resultado obtido por Cox e Plane (1998), a linha tracejada mostra o resultado do modelo caso o oxigênio atômico fosse desprezado, a linha contínua central mostra o resultado do modelo proposto por Collins et al. (2002) e a linha contínua inferior mostra o tempo de vida dos íons de ferro que foi usado pelo autor para fins de comparação. O resultado mais intrigante é que, no modelo de Cox e Plane, o tempo de vida do  $\text{Na}^+$  contra a neutralização varia de mais do que um dia acima de 100 km, para poucos minutos em 90 km. A razão de tal resultado é que em 100 km, por exemplo, apenas 3% do  $\text{Na.N}_2^+$  se combina com o  $\text{CO}_2$  para formar  $\text{Na}$  e os 97% restantes se combinam com o O (R5) para refazer o  $\text{Na}^+$ . Em contraste, na altitude de 90 km, a concentração de  $\text{CO}_2$  é maior e o mecanismo de neutralização é mais eficiente.

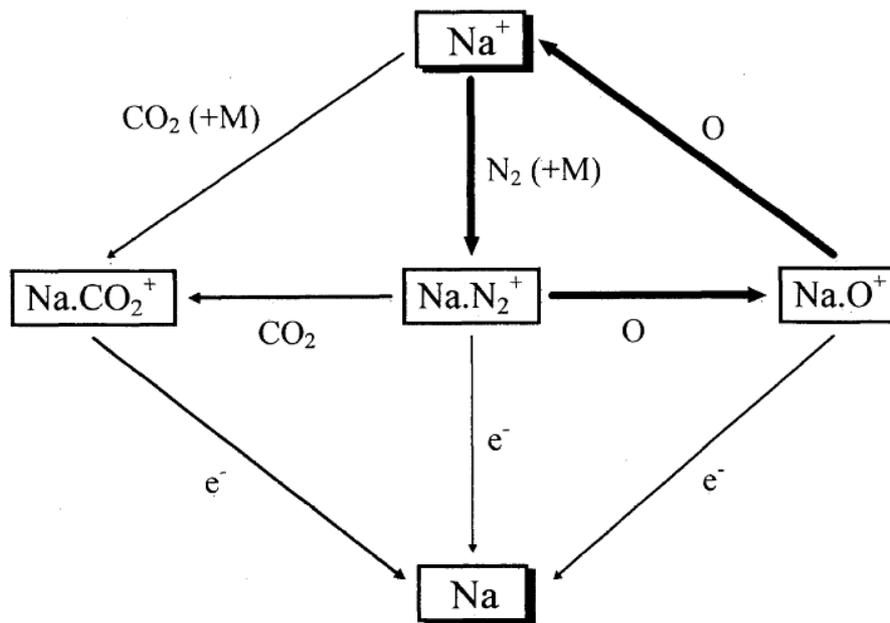


Figura 2.3-Diagrama de blocos do mecanismo íon-molecular para neutralização dos íons de sódio na região E.

FONTE: Collins et al. (2002)

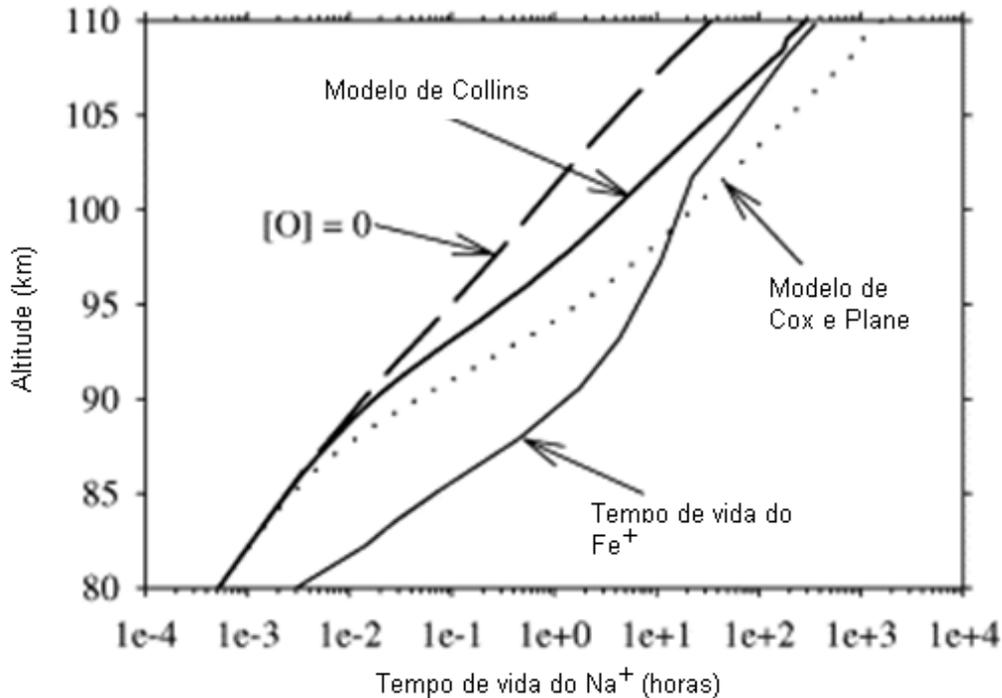


Figura 2.4-Tempos de vida dos íons de sódio em função da altura.  
 FONTE: Adaptado de Collins et al. (2002)

Com base nos resultados encontrados, Cox e Plane (1998) concluem que a formação de  $\text{Na}_s$  pela neutralização de íons  $\text{Na}^+$  oriundos de camadas esporádicas ionosféricas, é dependente da pressão atmosférica, uma vez que a principal reação (R1) cresce com o quadrado da pressão atmosférica, e da razão  $\text{CO}_2/\text{O}$ , que aumenta conforme decréscimo na altitude.

Collins et al. (2002) adicionaram ao modelo de Cox e Plane (1998) a reação  $\text{NaO}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{Na}^+ \cdot \text{N}_2 + \text{O}$ . Essa reação é importante em altas altitudes, onde  $\text{O} \gg \text{N}_2$ , e contribui para a diminuição do tempo de reação em altas altitudes. O perfil em linha contínua na Figura 2.4 mostra essa diminuição no tempo de reação. Nesse mesmo trabalho, os autores fazem simulações da ocorrência de  $\text{Na}_s$  em três diferentes situações, sendo uma para camadas geradas localmente, outra para as camadas que foram geradas em outra localidade e foram advectadas sobre o sitio de observação e outra considerando uma camada estacionária. Em cada simulação foram utilizados valores razoáveis para parâmetros que representam a fração de íons  $\text{Na}^+$ . Seis eventos de camada esporádica de sódio, detectados sobre Arecibo ( $18,3^\circ \text{ N}$ ,  $66,75^\circ \text{ O}$ ) com um radar de laser, e dados do conteúdo eletrônico total, obtidos por um radar de espalhamento

incoerente, foram utilizados a fim de observar ocorrências simultâneas de  $N_s$  e  $E_s$ . Os autores concluem que a química ion-molecular nas camadas de plasma é, provavelmente, o principal mecanismo para a produção das camadas  $Na_s$  em baixas e médias latitudes, uma vez que resultados observacionais concordaram bem com os resultados do modelo, exceto para um único caso, onde se observou somente o evento de  $Na_s$ . Segundo os pesquisadores, isso pode significar que o mecanismo íon-molecular não seja o mecanismo exclusivo na formação de  $Na_s$ .

Recentemente, Yuan et al.(2014) testaram o mecanismo de neutralização de íons de sódio através de simulação computacional. O que motivou o estudo foi uma análise estatística feita por eles próprios, que mostra alta correlação entre camadas esporádicas ionosféricas e de sódio. Além disso, frequentemente se observa a ocorrência de  $Na_s$  acima de 100 km, o que difere da teoria de Cox e Plane (1998). Utilizando parâmetros de entrada obtidos pelos modelos HAMMONIA e CTMT, foram simuladas variações horárias da deriva vertical iônica e as associadas variações na densidade de plasma na baixa região E, em médias latitudes. Também foram incluídas na simulação, características da atmosfera de fundo como vento zonal, temperatura e densidade atmosférica. Com base na teoria de cisalhamento de ventos (Whitehead, 1989), a simulação implica que o esquema de convergência de íons domina essa região durante o verão, mas a difusão iônica prevalece no inverno. Isso explicaria as observações de  $E_s$  e  $Na_s$  mais frequentes nos meses de verão.

Com relação às camadas  $Na_s$  acima de 100 km, a teoria de Cox e Plane (1998) indica que o mecanismo de neutralização não é efetivo, devido à baixa densidade e pressão atmosférica nessa região. Contudo, são observadas frequentemente, camadas  $Na_s$  nessa região. As simulações feitas por Yuan et al. (2014) mostram que os parâmetros de pressão e densidade atmosférica tendem a crescer em altitudes maiores devido a modulações por ondas de marés e o processo de neutralização, portanto, torna-se mais provável.

Assim, os autores concluem que a neutralização de  $Na^+$  presentes em camadas  $E_s$ , é o mecanismo mais provável para geração das camadas  $Na_s$ . Os autores destacam ainda que as condições da atmosfera padrão contribuem para as características de

sazonalidade e variação diurna, e os ventos de marés contribuem para a formação de  $\text{Na}_s$  em altitudes superiores.

### 3 INSTRUMENTAÇÃO

O Radar de Laser (lidar) foi o instrumento que norteou o presente trabalho. Usando perfis de densidade de sódio obtidos em São José dos Campos (23°S, 46°O), foram identificados casos de camadas esporádicas de sódio e observadas suas principais características, como o horário de ocorrência, a intensidade do evento, altura de ocorrência, tempo de duração e largura da camada. O conjunto de oito anos de dados (2000-2008) permitiu a realização de um estudo estatístico, mostrando também variações sazonais. Além dos dados do lidar de São José dos Campos (23°S, 46°O), foram utilizados dados do lidar instalado em Wuhan/China (31°N, 114°L), cujas características estatísticas foram comparadas com as de São José dos Campos. Os resultados mostram boa concordância, o que é um indício de que o mecanismo de geração seja comum para as duas localidades.

Além do lidar, dados complementares de outros três instrumentos foram utilizados para investigação das características geofísicas locais durante eventos de Na<sub>s</sub>. A instrumentação complementar consiste em uma digissonda CADI instalada em São José dos Campos. Além da digissonda, foram utilizados um imageador all-sky e um radar meteórico, ambos instalados no INPE de Cachoeira Paulista (22.7°S, 45°O). A Figura 3.1 mostra a localização dos equipamentos utilizados.

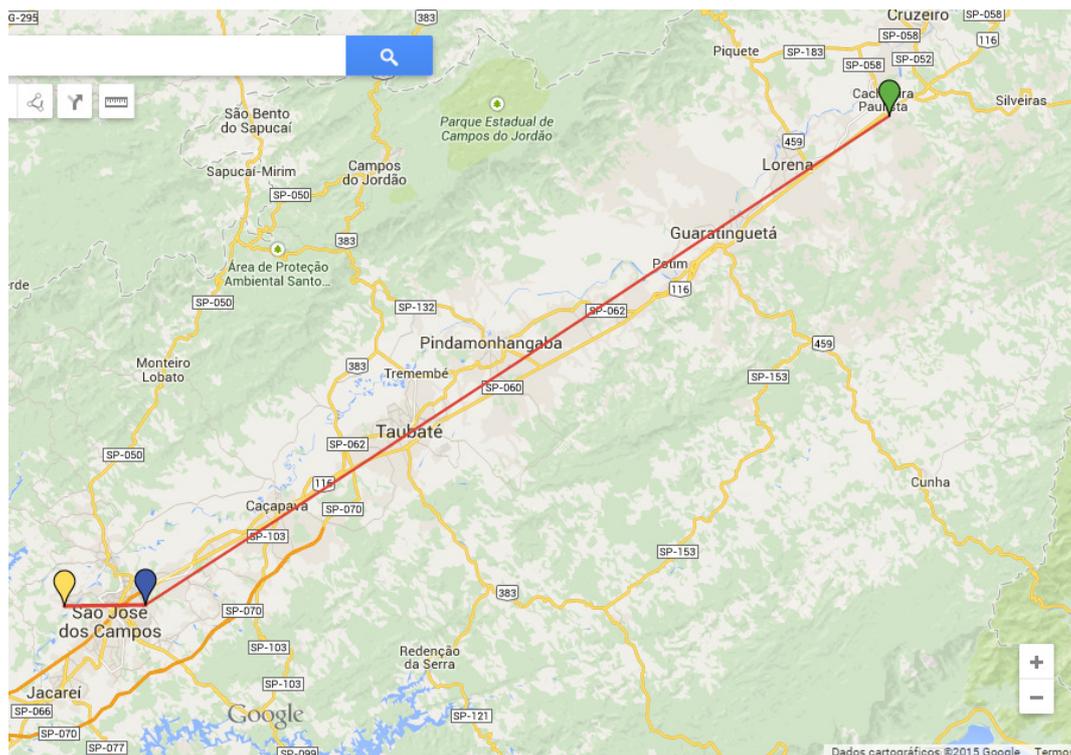


Figura 3.1 - Mapa mostrando a localização dos instrumentos utilizados nesse trabalho. O ponto azul mostra a localização do lidar no INPE de São José dos Campos; o ponto amarelo mostra a localização da ionossonda na UNIVAP em São José dos Campos; e o ponto verde mostra a localização do INPE de Cachoeira Paulista, onde estão instalados o radar meteórico e o imageador all-sky. A distância entre o INPE e a UNIVAP em São José dos Campos é de 9,5 km e a distância entre o INPE de São José dos Campos e Cachoeira Paulista é de 110 km. Fonte: maps.google.com

A análise dos dados da digissonda CADI permitiu a observação da ocorrência de camadas esporádicas ionosféricas, que podem estar correlacionadas às  $Na_s$ , dado o grande número de eventos simultâneos observados. Imagens da emissão de Sódio, obtidas por um imageador all-sky foram utilizadas com o objetivo de investigar variações na emissão de sódio, capazes de mostrar as dimensões horizontais das  $Na_s$  e permitir identificar os casos em que elas tenham sido geradas localmente e casos em que as  $Na_s$  são advectadas para o sítio de observação. Dados de ventos, obtidos por um radar meteórico, foram analisados com o intuito de investigar o comportamento das componentes da maré durante eventos de  $Na_s$  e a possível correlação da formação das  $Na_s$  com cisalhamento de ventos.

A descrição do Radar de Laser é feita com mais detalhes, por ser o instrumento principal deste trabalho. Para os demais instrumentos, seu princípio de funcionamento e suas principais atribuições são brevemente descritos. São sugeridas referências bibliográficas para maiores detalhes.

### **3.1 Radar de Laser**

O Radar de Laser, também chamado lidar (Light Detection and Ranging), é um instrumento ótico capaz de medir diferentes parâmetros da atmosfera através do espalhamento da luz pelos constituintes atmosféricos. O tipo de espalhamento depende do comprimento de onda da luz emitida e do tamanho da molécula ou átomo atmosférico.

Um radar de laser é constituído, basicamente, de um laser pulsado que, através da saída ótica apropriada, é direcionado para a atmosfera. Um telescópio receptor concentra a luz retro espalhada que passa por um filtro de banda estreita, o qual seleciona o intervalo de comprimento de onda de observação, evitando a contaminação por outros comprimentos de onda. O sinal recebido segue, então, para o sistema de foto detecção, usualmente composto por fotomultiplicadores. O sinal luminoso, convertido em pulsos elétricos é, por fim, enviado para uma unidade de controle e aquisição de dados, onde é registrado e armazenado.

O radar de Laser do INPE foi projetado para prover uma emissão em 589 nm a fim de medir o espalhamento ressonante do sódio atmosférico. O laser pulsado em 589 nm, correspondente à linha ressonante do sódio, é obtido através da mistura de dois feixes de comprimentos de onda de 1319 nm e 1064 nm gerados por dois cristais Yttrium Aluminium Garnet (YAG), cujos comprimentos de onda são sintonizados termicamente. A tabela 2 mostra as principais características do lidar do INPE, sendo a resolução temporal e em altura referentes às medidas de densidade.

Tabela 3.1 - Características do lidar do INPE de São José dos Campos. FONTE: Clemesha et al. (2011)

Comprimento de onda	589 nm
Energia do pulso	50 mJ
Duração do pulso	20 ns
Taxa de repetição do pulso	10 pps
Diâmetro do telescópio receptor	75 cm
Potência x abertura	0,22 W.m <sup>2</sup>
Resolução em altura	300 m
Resolução temporal	3 min

A Figura 3.2 ilustra o processo para obtenção do laser de 589 nm.

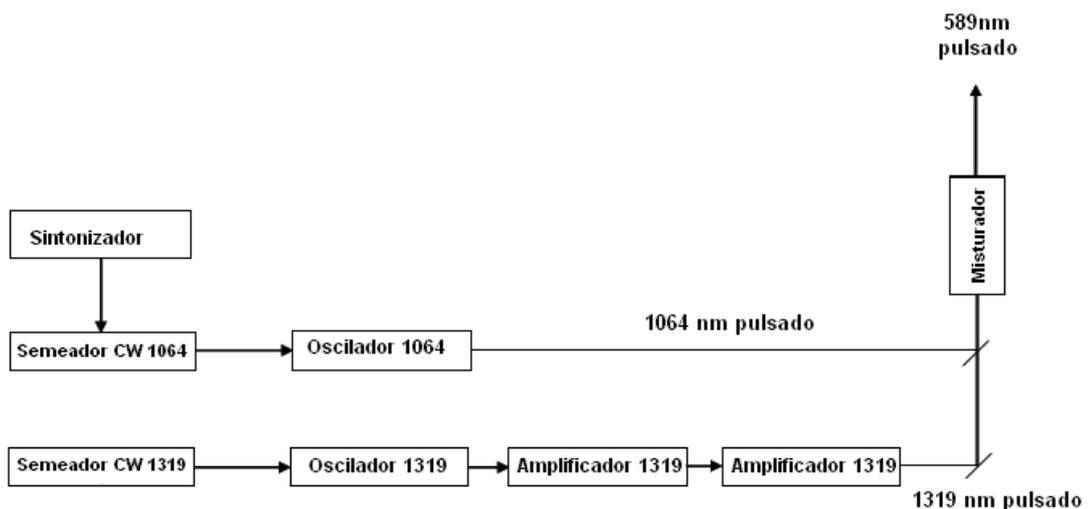


Figura 3.2- Estágios para obtenção do laser pulsado, em 589 nm.

FONTE: Clemesha (2011).

Antes de seguir para a atmosfera, o feixe de laser gerado passa pelo sistema óptico, que colima o feixe de laser. Uma pequena porção do feixe é, ainda, desviada para um analisador de comprimento de onda, que consiste em uma célula com uma amostra de sódio a 100°C, usada para comparação com o feixe de laser gerado. Posteriormente, o feixe vai para um detector de pulso que então aciona o sistema de aquisição de dados e marca o início da obtenção dos perfis (Jorge, 1996). A porção restante do feixe é enviada à atmosfera, conforme representado pelas linhas tracejadas azuis na Figura 3.3, onde é espalhada, absorvida e refletida ao longo de seu percurso. Os processos em que o

feixe de laser interage com a atmosfera são o espalhamento Rayleigh, Mie, Raman e Ressonante, a fluorescência e a absorção.

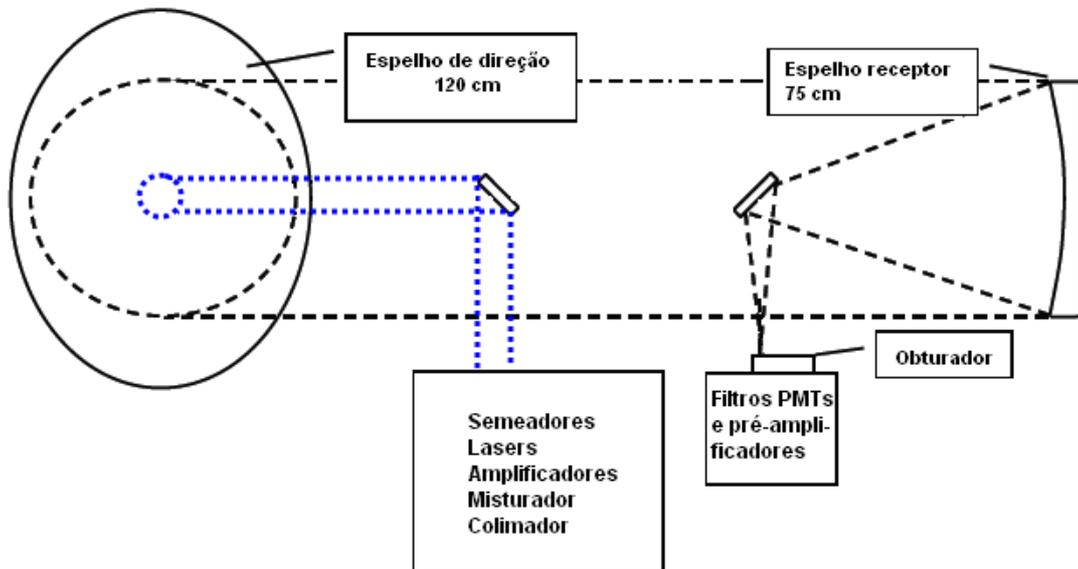


Figura 3.3-Esquema simplificado do funcionamento do radar de laser. Um pulso de luz é emitido, através de uma saída ótica, para a atmosfera (linhas tracejadas azuis). A luz espalhada que retorna é concentrada em um telescópio receptor (linhas tracejadas pretas).

O espalhamento Rayleigh é o espalhamento elástico da luz por partículas muito menores que o comprimento de onda da luz emitida e é usado para medir o perfil de densidade atmosférica até aproximadamente 100 km de altura. O espalhamento ressonante é o espalhamento elástico por átomos que possuem o nível de transição correspondente ao comprimento de onda da luz emitida e é usado para medir a distribuição vertical de metais meteóricos (Na, Fe, K, Ca) em torno de 80-100 km. Através da medição do deslocamento Doppler, pode-se determinar ventos e temperatura. O espalhamento Raman é o espalhamento inelástico por átomos ou moléculas, envolvendo uma troca no comprimento de onda da luz espalhada. É usado para medir perfis verticais de constituintes minoritários, tais como o  $H_2O$ . O espalhamento Mie é o espalhamento por partículas com dimensões comparáveis ou maiores que o comprimento de onda e é usado para medir aerossóis na troposfera e estratosfera. Na fluorescência, a radiação do laser é espalhada com mudança de comprimento de onda devido às transições não radiativas entre estados vibracionais. E a

absorção ocorre quando a radiação do laser tem o mesmo comprimento de onda de uma banda de absorção específica de uma molécula.

A luz espalhada que retorna atinge um receptor, formado por um telescópio e um conjunto de espelhos (linhas tracejadas em preto na Figura 3.3). Posteriormente, a luz passa por um filtro de interferência, que seleciona o intervalo de comprimentos de onda úteis para observação e rejeita a radiação em outros comprimentos de onda. Ao deixar o analisador de espectro, o sinal segue para o sistema de detecção, que consiste de células fotomultiplicadoras, as quais amplificam e convertem o sinal luminoso em sinal elétrico.

Em um radar de laser, a intensidade de luz que atinge as fotomultiplicadoras é menor que a intensidade de luz emitida para a atmosfera. Ao longo do caminho, o sinal é atenuado e a potência recebida pelo lidar, que é expressa pela equação do lidar, é proporcional à área do telescópio, o coeficiente volumétrico de retro espalhamento e o intervalo de espaço sobre o qual o sinal é integrado, e inversamente proporcional ao quadrado da distância. Para lidars destinados a trabalhar na região MLT, o sinal retornado é tão fraco que, ao invés de medir a intensidade da luz contínua, contam-se os fótons. A equação do lidar para contagem de fótons é a seguinte:

$$N \propto \frac{AN_0\sigma(h)\Delta H}{h^2} \exp\left[-2\int_0^h \beta dh\right] \quad (3.1)$$

Onde  $N$  é o número de fótons recebidos no intervalo de altura  $\Delta H$ ,  $A$  é a área do receptor,  $N_0$  é o número de fótons transmitidos,  $\sigma(h)$  é a seção transversal retroespalhamento volumétrico,  $h$  é a altura e  $\beta$  é o coeficiente de extinção.

De acordo com Fricke e von Zahn(1985), a densidade numérica do sódio pode ser, em princípio, deduzida através dos parâmetros da potência absoluta do transmissor nos pulsos de laser, da transmissão da atmosfera (que varia com o tempo), que é geralmente determinado na troposfera, e a eficiência absoluta do receptor do lidar. Porém, segundo os autores, tais informações não são muito precisas, e é mais vantajoso eliminá-las através da normalização das medidas para o sinal retro espalhado da estratosfera. Assim, a equação que determina a densidade numérica de sódio pode ser escrita como:

$$n_{\text{Na}}(z_{\text{Na}}) = n_{\text{St}}(z_{\text{St}}) \frac{\sigma(180^\circ)_{\text{St}}}{\sigma(180^\circ)_{\text{Na}}} \left[ \frac{z_{\text{Na}}}{z_{\text{St}}} \right]^2 \frac{I_{\text{Na}}}{I_{\text{St}}} \quad (3.2)$$

onde as quantidades com subscrito Na se referem ao sódio e St à estratosfera,  $\frac{I_{\text{Na}}}{I_{\text{St}}}$  é a razão entre a contagem de fótons vindos da camada de sódio e da estratosfera.  $\sigma(180^\circ)_{\text{Na}}$  é a secção transversal de retro espalhamento para o sódio e  $\sigma(180^\circ)_{\text{St}}$  para a estratosfera, sendo a última referente à secção transversal de retro espalhamento Rayleigh pelas moléculas gasosas.

Os perfis de densidade numérica são obtidos automaticamente, por um programa que controla a operação do radar, e armazenados em um microcomputador. Para obter-se um desses perfis, são necessários de 1000 a 2000 disparos do laser. A Figura 3.4(a) mostra um exemplo de perfil de densidade do sódio atmosférico, conforme visualizado no programa utilizado para redução dos dados e a Figura 3.4(b) mostra um perfil que ilustra uma camada esporádica de sódio.

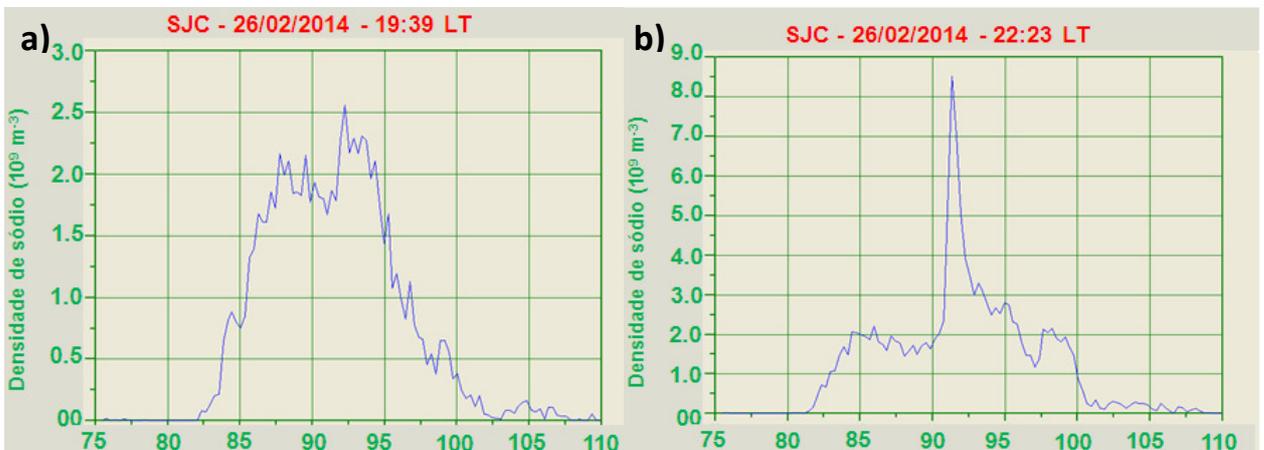


Figura 3.4- (a) Tela do programa de redução de dados do lidar que mostra um perfil de densidade do sódio atmosférico. O eixo das abscissas mostra a faixa de alturas (entre 75 e 110 km) e o eixo das ordenadas mostra a concentração de sódio em m<sup>-3</sup>. Observa-se que a camada de sódio se concentra entre aproximadamente 85 e 100 km, com pico de densidade em torno de 90 km. (b) Tela do programa de redução mostrando a ocorrência de uma camada esporádica de Sódio. Note que o evento se caracteriza por uma fina camada de concentração aumentada, sobreposta à camada de fundo.

Além de medir a densidade da camada de sódio, o lidar pode medir a temperatura atmosférica, uma vez que na região da mesopausa, o alargamento Doppler da fluorescência de sódio é função da temperatura. Porém, antes de apresentar a técnica para obtenção da temperatura atmosférica, é necessário explicar com maiores detalhes o processo de espalhamento ressonante dos átomos de sódio. O processo de espalhamento ressonante, assim como a técnica para medição de temperatura são melhor detalhados nos trabalhos de Fernandes (2009) e Jorge (1996).

O processo de espalhamento ressonante da luz por um átomo, se inicia com a absorção de um fóton pelo átomo, que o leva de um estado quântico fundamental para um estado excitado e, posteriormente, emite espontaneamente luz na mesma frequência do fóton absorvido. Os átomos de sódio absorvem fortemente a luz em 589,189 nm. A Figura 3.5 mostra a transição eletrônica do estado fundamental do sódio  $3^2S$  para o primeiro estado excitado  $3^2P$ :

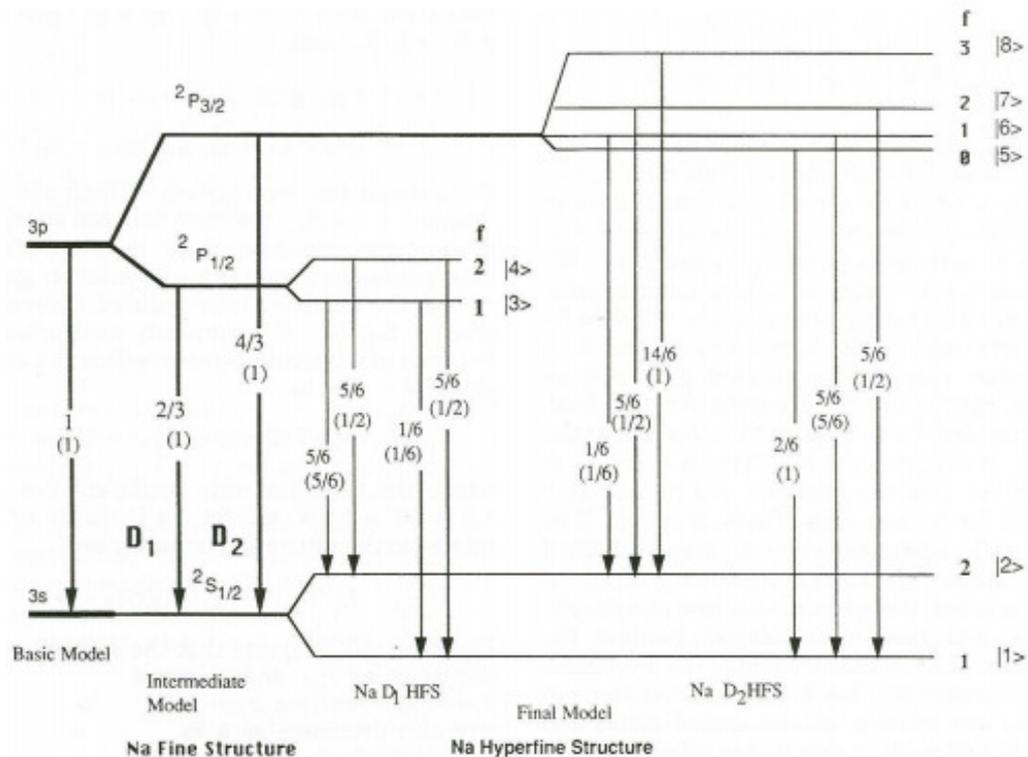


Figura 3.5- Diagrama dos estados energéticos do átomo de sódio nas linhas D1 e D2.  
 FONTE: She and Yu (1995)

O estado excitado do sódio se divide em dois níveis correspondentes aos valores de momento angular do número quântico  $J=1/2$  e  $J=3/2$ . No estado fundamental, duas

transições ópticas são permitidas,  $D_1$  ( $\lambda=589,593$  nm) e  $D_2$  ( $\lambda=588,997$  nm). Como o núcleo do átomo de sódio tem onze prótons, seu spin nuclear diferente de zero. Esses resultados, em um acoplamento hiperfino, divide o nível mais baixo em dois estados hiperfinos e o nível superior em quatro estados. A Figura 3.6 mostra as intensidades relativas das componentes hiperfinas do sódio e o perfil espectral do sódio para diferentes temperaturas.

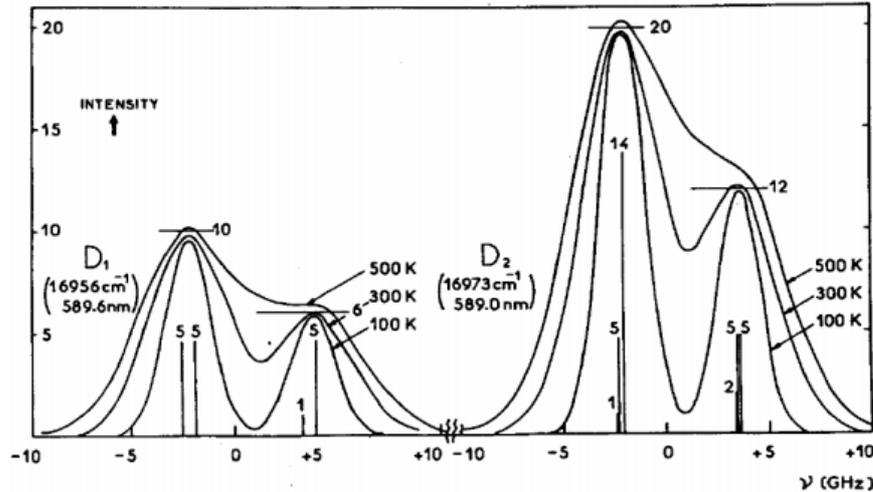


Figura 3.6 - Perfil espectral das linhas  $D_1$  e  $D_2$  e intensidades relativas das componentes hiperfinas. FONTE: Megie,G.(1988).

Para medir temperatura com o lidar do laboratório LASER, utiliza-se a técnica de She et al. (1990), que mede o sinal de retorno no pico da linha  $D_{2a}$  e no mínimo entre  $D_{2a}$  e  $D_{2b}$ . Para que as frequências de excitação sejam determinadas precisamente, o laser contínuo é sintonizado com o auxílio de uma célula contendo vapor de sódio a  $48^\circ$  C. Uma vez que a largura Doppler dos átomos de sódio na célula é muito grande para servir como referência, coloca-se um espelho parcialmente refletor ( $\sim 10\%$ ) na janela posterior da célula.

Ao entrar na célula, o feixe de laser, satura o meio de forma que a parte refletida pelo espelho interage apenas com um grupo de átomos. Se esse feixe estiver no pico da linha de ressonância, interagem com o feixe somente os átomos que possuem velocidade perpendicular à direção de propagação do feixe, sem efeito Doppler. Desse modo, o feixe satura esses átomos e o feixe refletido passa pelo meio sem ser absorvido, causando uma nítida depressão no perfil de emissão (Jorge, 1996).

Fora do pico da linha de ressonância, o feixe de laser satura um grupo de átomos e o feixe de prova, satura outro grupo, contribuindo assim para a intensidade média. Quando o feixe de laser está no mínimo entre  $D_{2a}$  e  $D_{2b}$ , tanto esse feixe como o feixe de prova conseguem excitar dois grupos de átomos com velocidades tais que pertencem aos dois níveis de energia. Assim ocorre um aumento na intensidade do perfil de emissão. Com esse procedimento, fica determinado com precisão o comprimento de onda no pico da linha  $D_{2a}$  e no mínimo entre  $D_{2a}$  e  $D_{2b}$ , o que permite a obtenção de um perfil de temperatura com a altura, conforme mostrado na figura 3.7 (Jorge, 1996).

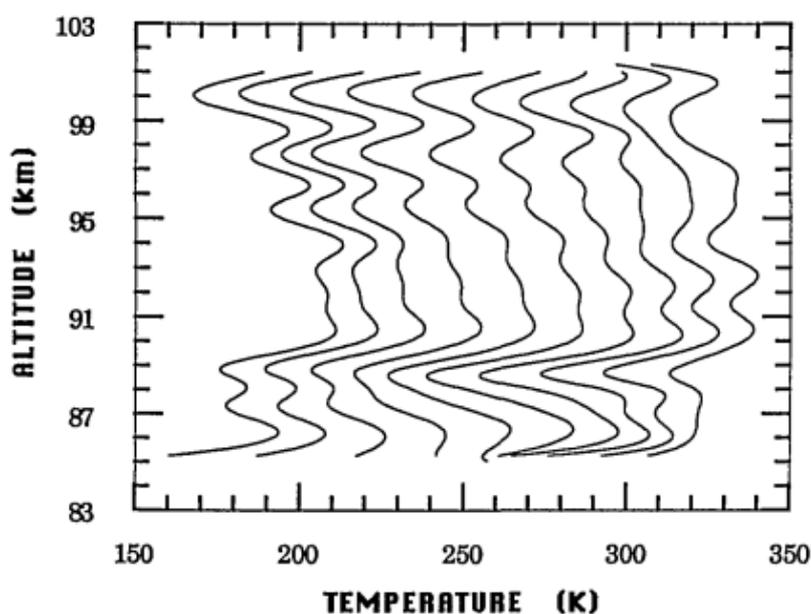


Figura 3.7 – Série temporal de perfis de temperatura obtidos em Fort Collins, Colorado.  
FONTE: She et al. (1992)

### 3.2 A ionossonda digital – CADI

Ao longo de todo o período de estudo sobre as camadas esporádicas de sódio, muita atenção tem sido dada ao seu possível mecanismo de geração devido à neutralização dos íons de sódio presentes em camadas esporádicas ionosféricas ( $E_s$ ). As camadas E esporádicas tratam-se de picos pronunciados de concentração eletrônica ( $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ), vistos em ionogramas como finas camadas superpostas ao perfil médio de fundo. Atribui-se a geração de tais camadas ao mecanismo de cisalhamento de ventos em baixas e médias latitudes, e aos campos elétricos no equador magnético e regiões aurorais (Mathews, 1998).

Com o intuito de verificar a ocorrência simultânea de camadas esporádicas de sódio e ionosféricas, foram analisados ionogramas de uma ionossonda CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde), instalada na UNIVAP em São José dos Campos, cerca de 9,5 km de distância do sítio do lidar.

O princípio de funcionamento de uma ionossonda consiste em transmitir um pulso de radiação eletromagnética verticalmente e medir o tempo de retorno do sinal refletido (conhecido como eco). Uma vez conhecido o tempo de ida e volta do sinal, é possível determinar a altura virtual da ionosfera  $h'$ :

$$h' = ct/2 \quad (3.3)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz e  $t$  é o tempo de ida e volta do sinal emitido.

A altura virtual é maior que a altura real, dado que a ionização local abaixo do ponto de reflexão retarda o pulso emitido. Desprezando os efeitos de campo geomagnético e as colisões entre elétrons e partículas neutras, o índice de refração do plasma ionosférico ( $n$ ) pode ser expresso pela equação de Appleton-Hartree (Hargreaves, 1992):

$$n^2 = 1 - X = 1 - \omega_N^2 / \omega^2, \quad (3.4)$$

onde  $\omega_N$  é a frequência angular do plasma e é proporcional à densidade eletrônica ( $N_e$ ).  $\omega$  é a frequência da onda, sendo que  $\omega^2 = (N_e e^2 / \epsilon_0 m)^{1/2}$ .

Abaixo da ionosfera,  $N_e=0$  e conseqüentemente  $X=0$  e, portanto, o índice de refração  $n=1$ . Conforme aumento da altitude, a densidade eletrônica ( $N_e$ ) e a frequência do plasma ( $\omega$ ) aumentam (abaixo do pico da região F ionosférica). Na altura em que a frequência da onda emitida se iguala a frequência do plasma, o índice de refração é 0 e a onda é refletida. Nessa condição,  $\omega=\omega_N$  e, portanto, é possível determinar a densidade eletrônica na altura em que ocorreu a reflexão. Explicitando  $N_e$  na condição de ressonância, obtêm-se a expressão que relaciona a densidade eletrônica com a frequência do plasma.

$$N_e = (1,24 \cdot 10^4) f^2 \quad (3.5)$$

onde a frequência ( $f$ ) é dada em kHz e a densidade eletrônica ( $N_e$ ) em  $m^{-3}$ . Fazendo uma varredura em uma determinada faixa de frequências, a ionossonda fornece o perfil de

densidade eletrônica em função da frequência de sondagem. A ionossonda utilizada nesse trabalho é programada para realizar varreduras na faixa de frequências de 1-20 MHz, a cada 5 minutos.

A CADI fornece medidas sobre o retardo, amplitude e fase da onda refletida na vertical, o ângulo de chegada e a polarização da onda, e medidas de deriva ionosférica. O sistema da ionossonda CADI da UNIVAP é composto pela Placa de Síntese Digital Direta que gera os sinais de RF, transmissor para ampliação da potência dos sinais de RF, antenas transmissoras e receptoras, cartões receptores que demodulam e amplificam os sinais refletidos e um microcomputador que processa o software que controla o equipamento, exibe e armazena os dados de sondagem (Moor, 2011).

O resultado obtido durante uma varredura é expresso graficamente através de um ionograma. A Figura 3.8 mostra um exemplo de ionograma, visualizado no software UDIDA (Univap Digital Ionossonde Data Analysis). O eixo das abscissas representa a frequência e o eixo das ordenadas, a altura virtual. Nesse ionograma, são mostrados os parâmetros ionosféricos da camada F:  $h'F$  (altura virtual mínima da camada F),  $hpF2$  (altura de pico da camada F) e  $foF2$  (frequência crítica da camada F2). Além disso, é identificada a região E da ionosfera, a ocorrência de segunda reflexão e os ruídos. Informações detalhadas sobre a ionossonda CADI e o programa UDIDA podem ser encontrados no trabalho de Muella (2004) e Pillat et al. (2012).

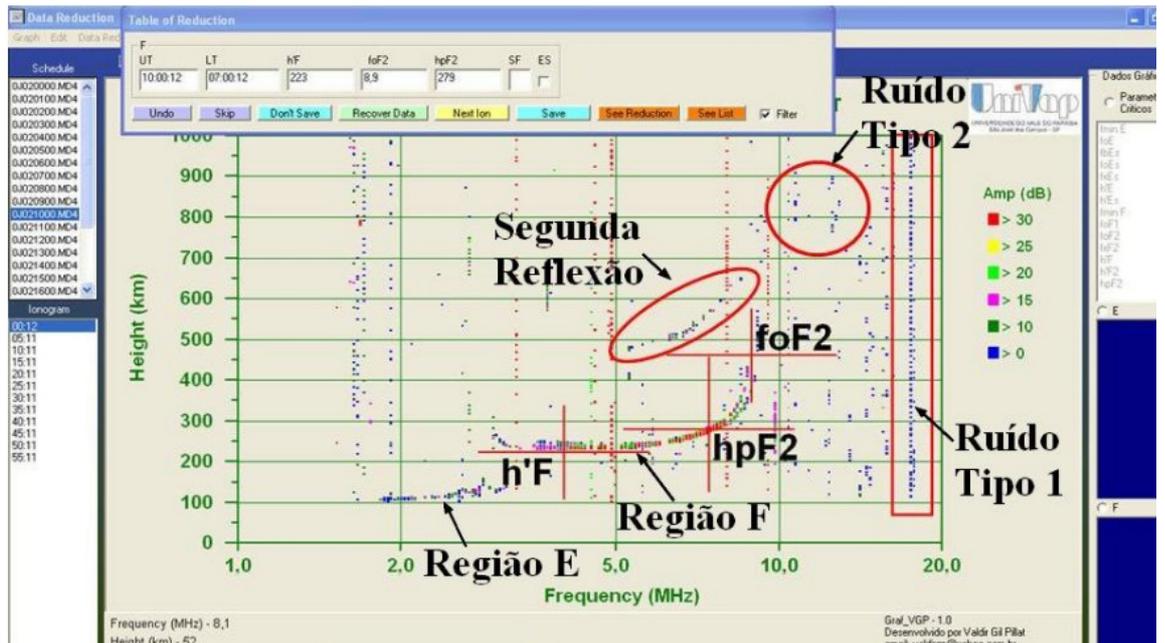


Figura 3.8 - Tela de visualização de ionogramas do programa UDIDA, mostrando um ionograma obtido em 02/10/2000 em São José dos Campos. São mostrados os parâmetros ionosféricos, os ruídos e segunda reflexão. FONTE: Pillat et al. (2012).

### 3.3 Imageador all-sky

O imageador all-sky é um instrumento destinado à medição de emissões de luminescência atmosférica em várias faixas espectrais. O instrumento detecta variações de intensidade das camadas de luminescência atmosférica e as registra em imagens, através das quais se podem realizar observações do comportamento da atmosfera em diferentes altitudes.

A emissão de sódio mesosférico sobre a região centrada em Cachoeira Paulista, foi observada com a utilização de um imageador desse tipo. Imagens obtidas durante o período de maio a novembro de 2013 foram analisadas com o objetivo de identificar e estudar as dimensões horizontais e o local de geração das camadas esporádicas de sódio.

Um esquema do sistema ótico do imageador utilizado nesse estudo é mostrado na figura 3.9.

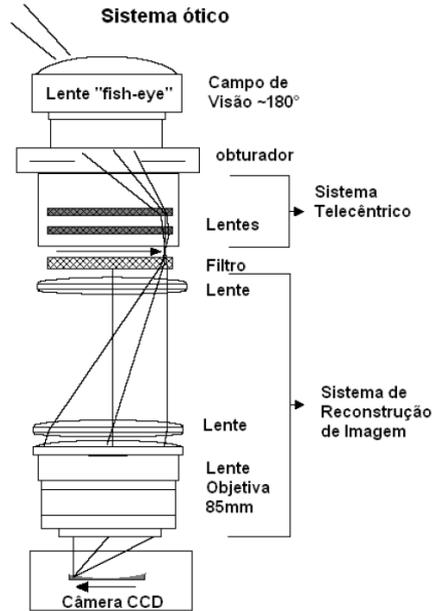


Figura 3.9 - Sistema ótico do imageador all-sky instalado em Cachoeira Paulista.  
 FONTE: Wrasse, 2004.

O sistema ótico do imageador monocromático é constituído por lentes que formam uma imagem telecêntrica próximo ao plano dos filtros de interferência ótica. A lente primária frontal é do tipo *Fish-Eye* com distância focal de 37 mm e com um campo de visão aproximadamente de 160°. O sistema de lentes telecêntricas consiste em um par de lentes plano-convexas localizado entre o obturador e a roda de filtros, e faz com que os raios de luz vindos da lente all-sky fiquem paralelos ao eixo do sistema ótico.

O imageador possui uma roda com capacidade para alojar seis filtros óticos de interferência com quatro polegadas cada, porém apenas o filtro de sódio (589 nm) e da radiação de fundo (578 nm) estiveram em operação durante o período de observação. A roda de filtros, gerenciada pelo programa de aquisição de imagens, gira automaticamente, com um intervalo de 8,25 minutos, e tempo de exposição que é ajustado de acordo com a emissão a ser medida. A emissão de sódio tem tempo de exposição de 90 segundos e a emissão de fundo, 120 segundos. O equipamento possui um sistema de reconstrução de imagem acromática sobre uma matriz CCD. A câmera CCD que integra o imageador é um sensor do tipo retroiluminado com uma grade de 2048 × 2048 pixels, onde cada pixel possui dimensão de 13,5 × 13,5 µm. O equipamento possui baixo ruído e um sistema de refrigeração que garante temperaturas em torno de - 70 °C. Ainda, o imageador possui uma CCD com alta eficiência quântica,

conforme mostrado na Figura 3.10, curva em azul. Para a linha de emissão do sódio, a eficiência chega a 96%, ou seja, 96% dos fótons detectados pela CCD são convertidos em sinal elétrico. O equipamento está conectado a um microcomputador, que é utilizado para controlar a roda de filtros de interferência ótica, possibilitando que a mesma gire automaticamente, controla o tempo de exposição da câmara CCD e dá suporte ao programa de aquisição de dados.

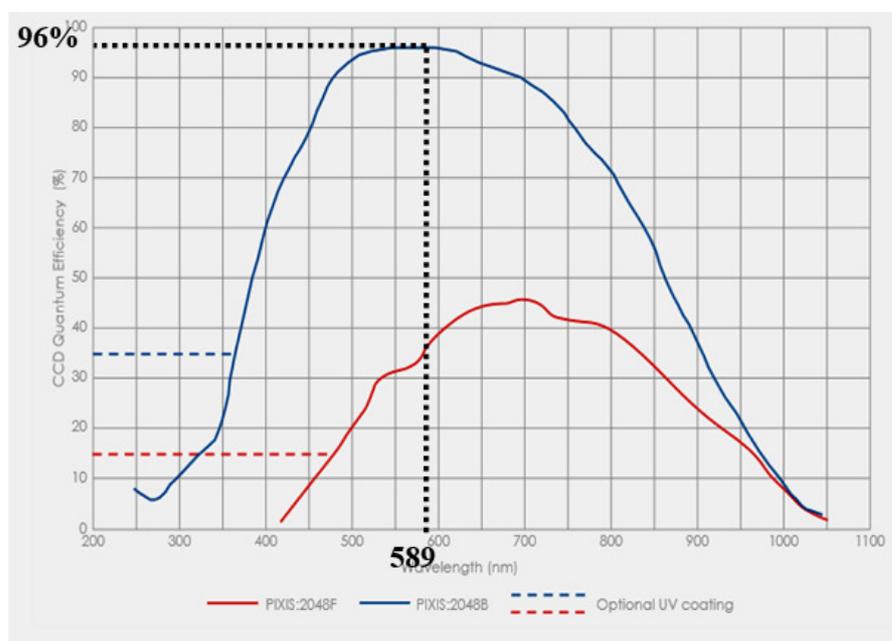


Figura 3.10 - Curva de eficiência quântica da CCD do imageador all-sky utilizado nesse trabalho. FONTE:Princeton Instruments, 2013.

### 3.3.1 A emissão de sódio mesosférico

A luminescência atmosférica, ou airglow, trata-se de uma luz natural proveniente, principalmente, da alta atmosfera, sendo sua ocorrência durante o dia e a noite. O airglow é também conhecido por “dayglow” durante o dia, “nightglow” à noite e “twilight” durante o crepúsculo. Ele pode ser observado em qualquer latitude e existe em vários comprimentos de onda, sendo definido como radiação eletromagnética, tênue, amorfa e constante, cuja emissão se dá principalmente em altitudes entre 80 km e 400 km (Amorim, 2010).

A observação de luminescência atmosférica noturna do sódio mesosférico em 589 nm foi relatada primeiramente por Sliper (1929) e, posteriormente, Chapman

(1939) postulou a seguinte sequência de reações como responsáveis pela referida emissão:



O esquema proposto por Chapman ainda é considerado o principal mecanismo de produção de átomos de sódio no estado excitado. Estudos em laboratório mostraram que as reações R1 e R2 são suficientemente rápidas para gerar a emissão com intensidades entre 30 e 150 Rayleighs (Plane, 2003). A emissão de sódio, referida como linha NaD, é proporcional às concentrações de sódio e ozônio na região da camada emissora.

A fonte de átomos de sódio é a ablação de dezenas de toneladas de material interplanetário que atingem a atmosfera terrestre todos os dias. O pico da camada emissora de sódio é em torno de 90 km na região de Cachoeira Paulista e sua largura a meia altura é de aproximadamente 5 km (Clemesha et al., 1993). Takahashi et al. (1995), com base em uma série de cinco anos de dados, mostraram uma forte variação semi-anual com máximas taxas de emissão nos equinócios e mínimas nos solstícios em Cachoeira Paulista.

### 3.3.2 Calibração do imageador

No âmbito do estudo de fenômenos atmosféricos pelo imageamento de emissões de airglow, é fundamental utilizar um sistema de coordenadas que relacione as posições dos pixels na imagem com as coordenadas geográficas locais.

Uma imagem all-sky projetada em uma câmara CCD está deslocada com relação ao zênite e ao azimute (ou seja, o norte da imagem não corresponde ao norte geográfico). Antes de efetuar qualquer estudo baseado na análise das imagens, é necessário corrigir essas distorções e converter as coordenadas em pixel das imagens em coordenadas geográficas.

Neste trabalho, o procedimento utilizado para conversão de coordenadas é o mesmo utilizado por Pimenta (2002), que se baseia no método descrito por Hapgood e Taylor (1982). Os referidos autores relacionam o sistema de coordenadas da CCD (imagem plana) e o sistema de coordenadas da atmosfera (coordenadas curvilíneas) através de uma transformação linear, que culmina na determinação da função da lente, a qual relaciona o ângulo zenital e a distância ao centro do campo de visão.

O processo de calibração do imageador é resumidamente descrito nos passos a seguir:

1º Passo: Selecionar uma imagem do céu local. Deve ser escolhida uma imagem de céu claro e com bastante estrelas.

2º Passo: Usando uma rotina em IDL, identificar as coordenadas x e y de cada estrela escolhida na imagem.

3º Passo: Usar um aplicativo que forneça valores de azimute e elevação das estrelas. Neste trabalho, foi usado o aplicativo “Sky-Map”.

4º Passo: Usando uma segunda rotina em IDL, fazer a correção das coordenadas obtidas no 2º passo. A rotina aqui utilizada abre a imagem original e permite que o usuário posicione o cursor sobre cada uma das estrelas. Para cada estrela, o programa identifica suas coordenadas em pixel e cria uma matriz quadrada de 5×5 pixels mais próximos para identificar o que apresenta maior intensidade. A coordenada do pixel mais intenso é retornada pelo programa, o que corresponde à coordenada da estrela escolhida.

5º Passo: Criar um arquivo em .txt, contendo os valores de azimute e elevação e as coordenadas de cada estrela.

6º Passo: Abrir uma nova rotina, que, através dos dados tabelados no 5º passo, irá retornar o azimute corrigido, o zênite e a função da lente all-sky, que permitirá realizar, posteriormente, o processo de linearização das imagens, ou seja, sua projeção em uma área plana.

As rotinas em linguagem IDL para determinação da função da lente, foram desenvolvidas por R. Maekawa, da universidade de Kyoto (Maekawa, 2000). Para calibração do imageador all-sky de Cachoeira Paulista, foi usada uma imagem da emissão de fundo (BG), obtida no dia 02 de novembro de 2013 às 20:02 LT. A Figura 3.11 (a) mostra a imagem antes e a Figura 3.11 (b) mostra a imagem após a calibração.

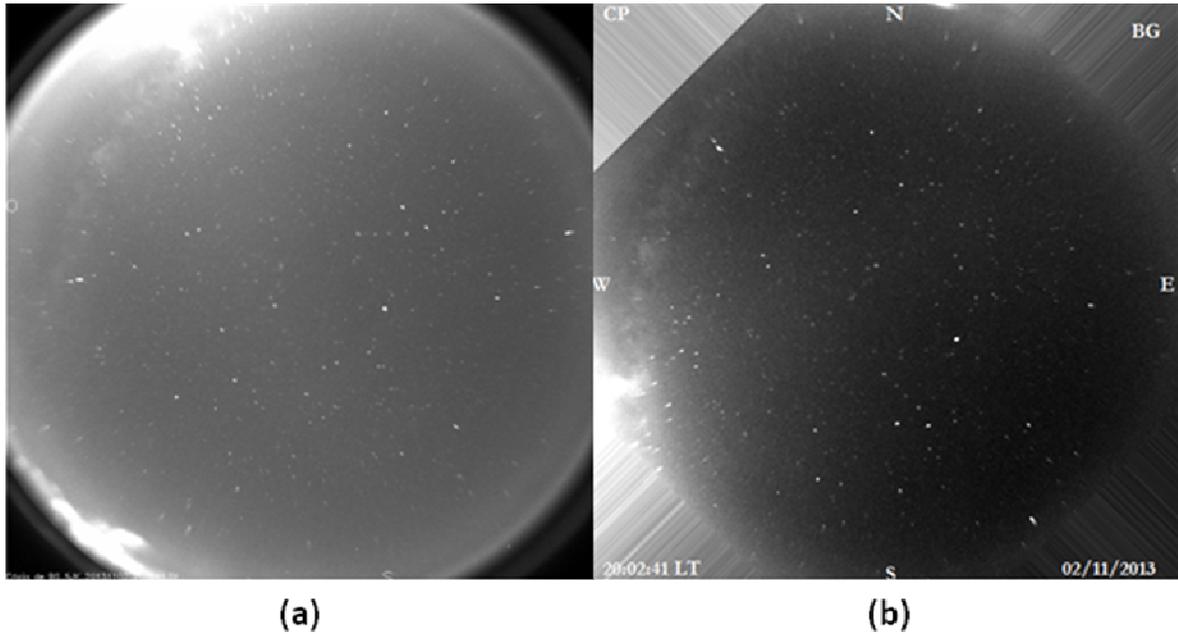


Figura 3.11 – Imagens all-sky da emissão de fundo (BG – 589 nm), (a) antes e (b) após o processo de calibração, que alinha a imagem às coordenadas geográficas.

### 3.4 Radar meteórico SKiYMET

Sequências temporais dos perfis de sódio indicam um aparente movimento descendente das camadas esporádicas de sódio. Isso pode ser um indício da influência dos ventos de marés sobre as camadas esporádicas observadas.

Dados sobre velocidade dos ventos horizontais obtidos com o radar SKiYMET instalado em Cachoeira Paulista, permitiu a análise da possível correlação entre as camadas esporádicas e cisalhamento vertical do vento horizontal e também sua correlação com os ventos de marés.

O SKiYMET é um radar, cujo princípio de funcionamento se baseia na medida do deslocamento Doppler do sinal refletido por trilhas meteóricas, para inferência de ventos na região da mesosfera.

Ao entrarem na atmosfera da Terra, os meteoros sofrem ablação devido ao atrito com as partículas dos gases atmosféricos, formando trilhas de gás ionizado, as quais são capazes de refletir ondas de rádio. Como as partículas de gás ionizado das trilhas são transportadas através da atmosfera pelo vento, surge um deslocamento Doppler da frequência recebida, o que permite o cálculo da velocidade do vento neutro.

O radar meteórico SKiYMET é um radar de visada completa do céu e opera em Cachoeira Paulista desde 1999. O sistema consiste de uma antena transmissora, que

emite ondas de rádio com frequência de 35,24 MHz, e cinco antenas receptoras que captam os ecos das trilhas meteóricas. A Figura 3.12 ilustra o funcionamento do radar.

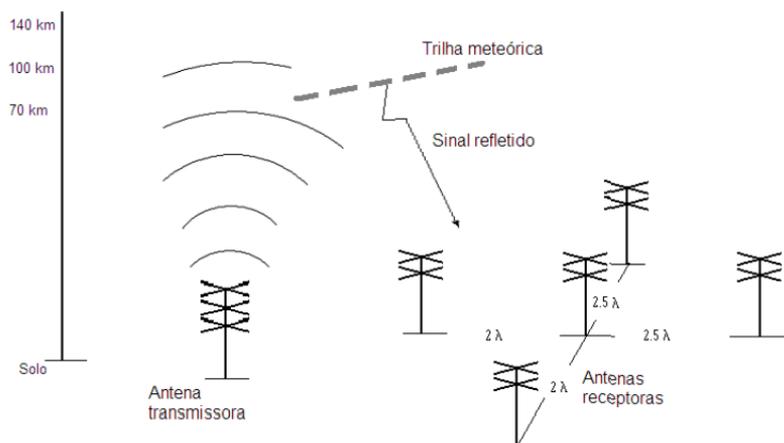


Figura 3.12- Representação do esquema de funcionamento do radar meteórico SKiYMET. FONTE: Andrioli (2012).

As antenas receptoras estão dispostas no solo em uma configuração interferométrica, que minimiza a ambiguidade do ângulo de chegada do sinal refletido. A determinação das velocidades dos ventos se dá a partir da combinação das velocidades radiais de cada meteoro detectado. Conforme explicado no trabalho de Lima (2005), as posições dos meteoros são determinadas através de funções de autocorrelação, e correlação cruzada, associada aos meteoros detectados, e a velocidade radial pelo uso da taxa de mudança de fase no intervalo próximo a zero. A média e o desvio padrão são obtidos usando-se todas as correlações cruzadas possíveis entre todos os sinais das cinco antenas receptoras, como também as funções de autocorrelação de cada receptor.

O radar meteórico detecta meteoros na faixa de alturas de aproximadamente 80 a 110 km. A vantagem do radar é que ele opera 24 h por dia, todos os dias, sem necessidade de céu claro como ocorre com equipamentos que operam com sistemas óticos.

A Figura 3.13 mostra um exemplo de gráficos de contorno das componentes da velocidade zonal (direção leste-oeste) e meridional (direção norte-sul) dos ventos, em função da altura e hora local. E a Figura 3.14 mostra a amplitude e fase da maré diurna zonal e meridional para a mesma data.

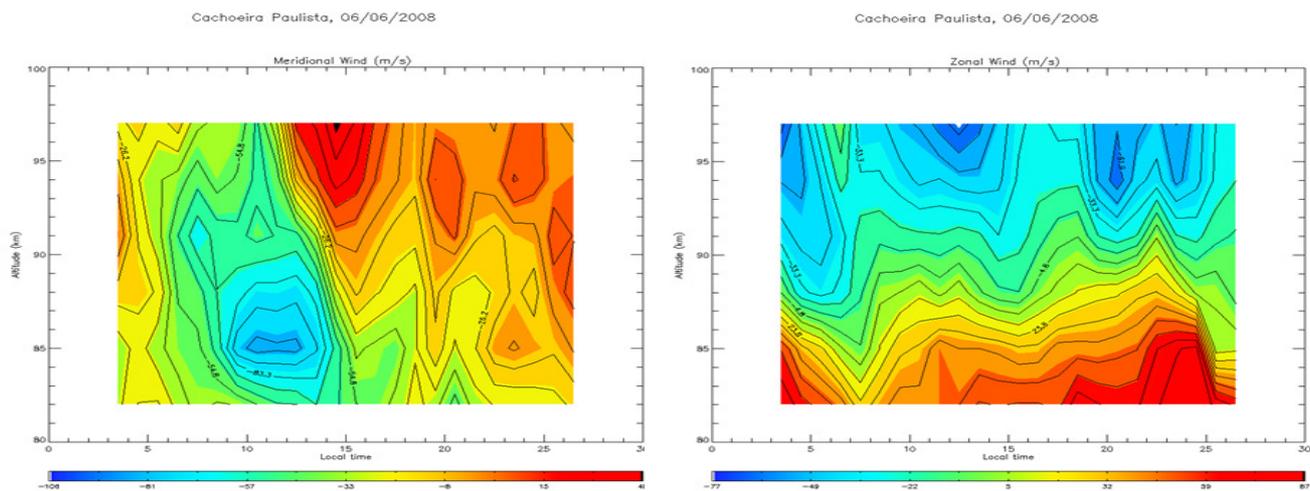


Figura 3.13 – Gráficos de contorno que expressam as componentes meridional (esquerda) e zonal (direita) do vento mesosférico na região de 82 a 98 km. Os gráficos se referem às condições dos ventos observados em 06 de junho de 2008 na região de Cachoeira Paulista.  
 FONTE: Andrioli (2012).

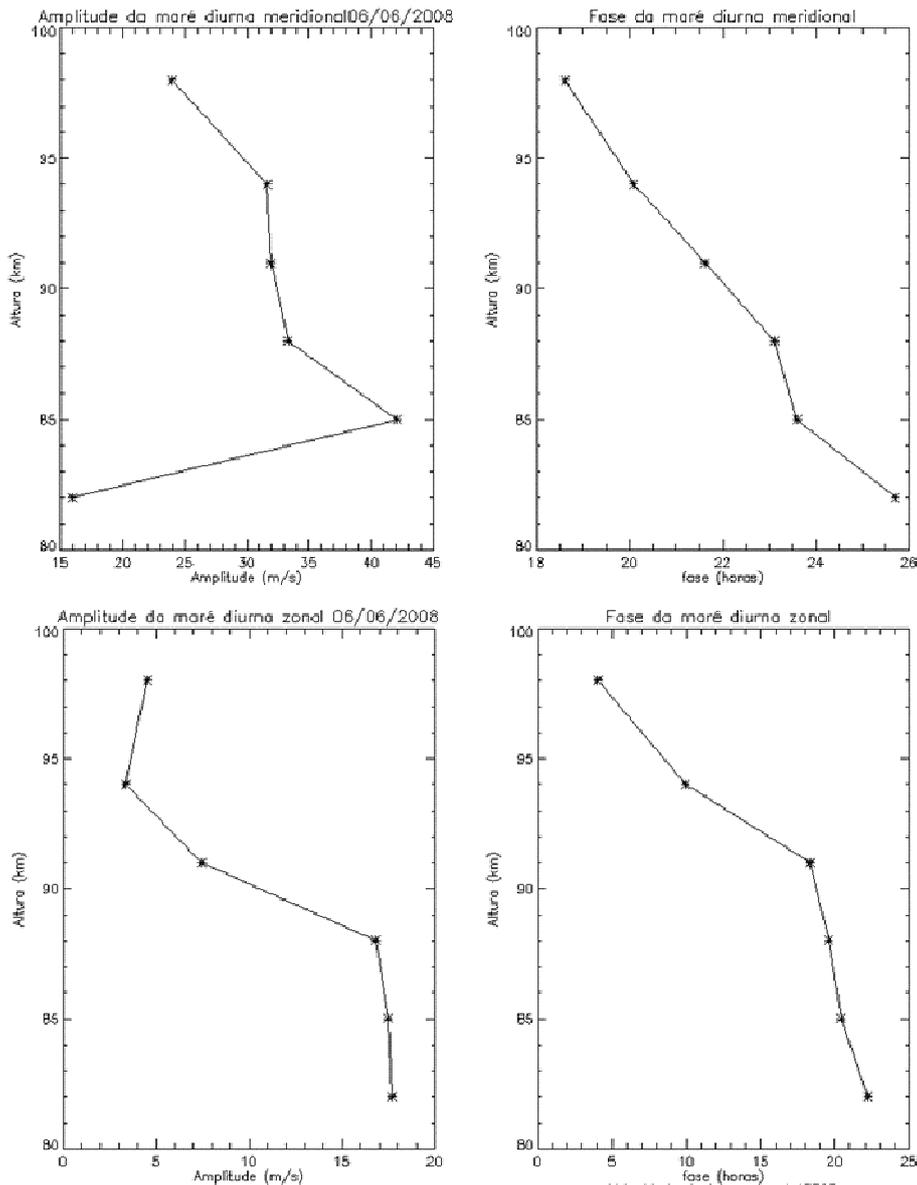


Figura 3.14 - Gráficos que ilustram a amplitude (esquerda) e fase (direita) da maré diurna para cada altura. Os gráficos superiores se referem à componente meridional do vento, e os gráficos inferiores se referem à componente zonal, observada em 06 de junho de 2008 na região de Cachoeira Paulista. FONTE: Andrioli (2012).

Os ventos, como mostrados na Figura 3.13 são uma combinação dos ventos médios, marés, ondas planetárias e de gravidade. Já a Figura 3.14 mostra o resultado da decomposição do vento total em harmônicos, cuja componente devido à maré foi extraída através de técnica de análise espectral. Para comparação com os eventos de camadas esporádicas de sódio, foi calculada a velocidade de fase da maré para cada evento e comparada com a velocidade de descida das camadas esporádicas de sódio. A análise é explicada em detalhes no capítulo 4. Além de extrair as componentes da maré,

foi calculado, a partir dos dados de ventos, o cisalhamento vertical do vento horizontal nas componentes zonal  $\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)$  e meridional  $\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)$ . Os valores de cisalhamento de ventos foi usado para comparação com eventos de camadas  $\text{Na}_s$  a fim de verificar sua influência na formação das mesmas.

Uma vez que os dados do radar meteorológico foram utilizados para uma análise complementar, não será descrita a técnica utilizada para obtenção das componentes zonal e meridional dos ventos. A descrição da técnica com maior riqueza de detalhes, pode ser consultada nos trabalhos de Lima (2005) e Tokumoto (2007).

## 4 ANÁLISE DE DADOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Estudo comparativo das características das camadas esporádicas de sódio observadas em São José dos Campos e Wuhan

Neste tópico, são descritas as propriedades das  $Na_s$  com base na literatura e nos resultados já obtidos com a análise dos dados feitas durante o período de trabalho nesta tese. O que definiu o período a ser analisado foi o banco de dados do lidar de Wuhan, que foi cedido pelo grupo da Chinese Academy of Sciences. Os dados cedidos compreendem o período de 1996 a 2008 e, embora o banco de dados do lidar de São José dos Campos seja maior, foi usado o mesmo período, uma vez que as características observadas nas duas localidades foram comparadas.

Os dados do lidar de Wuhan forneciam somente a contagem de fótons retro espalhados da atmosfera e, para determinar a densidade relativa do sódio, foi usada a equação (3.2). Uma vez que não havia a informação sobre o coeficiente de espalhamento do sódio ( $\sigma_{Na}$ ), estimou-se, primeiramente, essa variável, utilizando valores de densidade do sódio no pico da camada (~90 km) de  $3 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$  (Measures, 1984), densidade atmosférica (~35 km) obtida pelo modelo MSIS-E90 e a seção transversal de retro espalhamento Rayleigh de  $3,9727 \cdot 10^{-32} \text{ m}^2$ . Uma vez determinado o  $\sigma_{Na}$ , foi calculada a densidade relativa do sódio para uma faixa de alturas de 80 a 110 km. Para a conversão de fótons em densidade relativa, foi feita uma rotina em Matlab, que retorna os valores numéricos e os perfis individuais de densidade em função da altura de forma gráfica.

O software de aquisição de dados do lidar de São José dos Campos fornece, automaticamente, os valores de densidade do sódio, e o laboratório LASER dispõe de aplicativos que auxiliam na redução de dados. O levantamento da ocorrência de  $Na_s$ , para as duas localidades, foi feito através da análise visual dos perfis individuais. Os resultados foram tabulados em planilhas que contém informações sobre o período de análise dos perfis de sódio, o número de perfis existentes, a ocorrência ou não de  $Na_s$ , o período de ocorrência das  $Na_s$ , o fator de intensidade, a largura a meia altura das camadas, o horário em que a  $Na_s$  atinge o pico e se o evento foi completo ou não. Os dias para os quais havia ruído excessivo ou menos do que quatro perfis individuais sucessivos, foram excluídos da análise.

O período total de observação da camada de sódio em São José dos Campos foi de 3474,98 horas, distribuídos em 715 noites entre 1996 e 2008. Foram considerados casos de  $\text{Na}_s$ , finas camadas superpostas à camada de sódio de fundo, que apareceram em mais do que três perfis individuais sucessivos e com densidade igual ou maior que duas vezes a densidade da camada de fundo. Nessas condições, foram detectados 484 eventos de  $\text{Na}_s$  em um total de 714,35 horas, sendo 230 eventos completos, ou seja, tiveram começo e fim durante o período de observação com o instrumento.

Em Wuhan, foram investigadas 161 noites de observação (923,45 horas), e detectados 82 eventos (212,35 horas), dos quais 33 foram completos.

Com relação ao período de duração dos eventos completos, tanto em São José dos Campos quanto em Wuhan, esses períodos são em média de 2 a 3 horas. A largura a meia altura das camadas, também é coincidente nas duas localidades e apresentam valores médios em torno de 1 a 2 km.

O fator de intensidade é um parâmetro determinado como sendo a razão entre a densidade de sódio no pico da  $\text{Na}_s$  em sua máxima evolução e a densidade média da camada na mesma altura, antes do início do evento de camada esporádica. Em São José dos Campos, a maioria dos eventos tem fator de intensidade entre 2 e 4 e em Wuhan, entre 3 e 5. Casos com fator de intensidade tão alto quanto 14 foram registrados em São José dos Campos, e 10 em Wuhan.

#### **4.1.1 Distribuição de altura**

As camadas esporádicas de sódio ocorrem, principalmente, acima de 90 km, geralmente acima do pico da camada regular. A Figura 4.1 mostra a distribuição de altura das  $\text{Na}_s$  para São José dos Campos e a Figura 4.2, para Wuhan. As barras de erro no gráfico representam o desvio padrão da amostra. Em ambas as localidades, a faixa de alturas mais comum para ocorrência de  $\text{Na}_s$  é entre 91 e 97 km, sendo que a altura média de pico é de 95 km para São José dos Campos e 93 km para Wuhan. Poucos eventos foram detectados abaixo de 90 km (7 em São José dos Campos e 6 em Wuhan) e acima de 100 km (18 em São José dos Campos e nenhum em Wuhan).

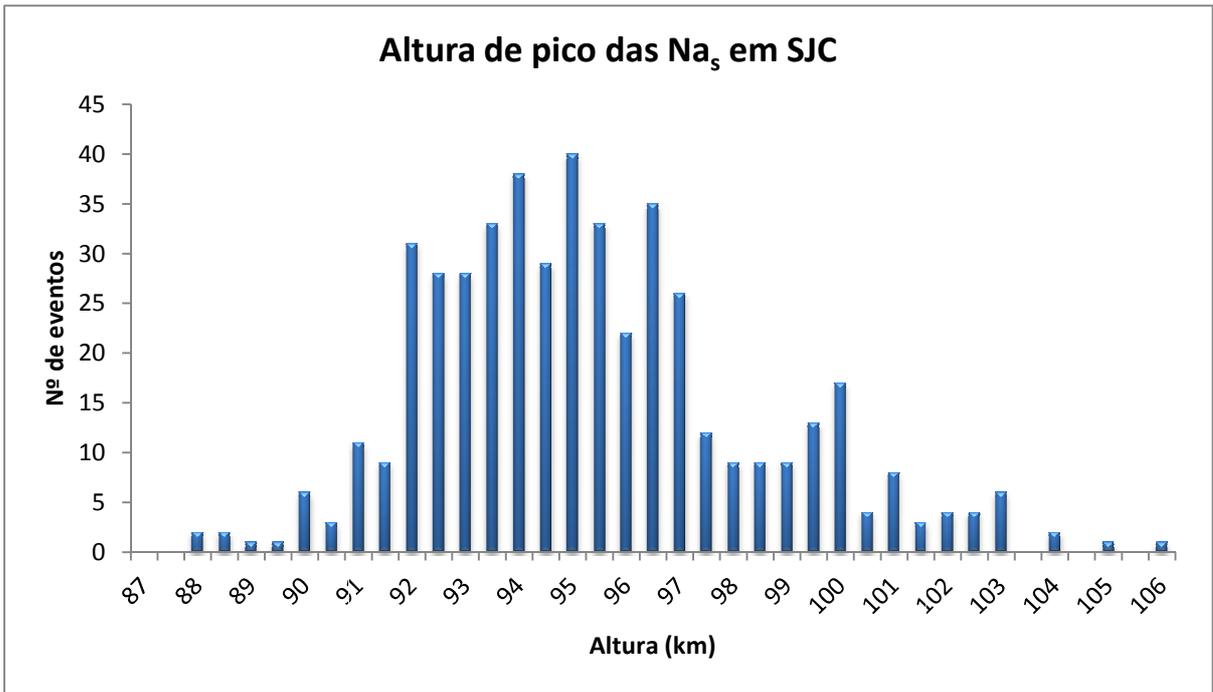


Figura 4.1 – Localização do pico das camadas esporádicas de sódio em São José dos Campos.

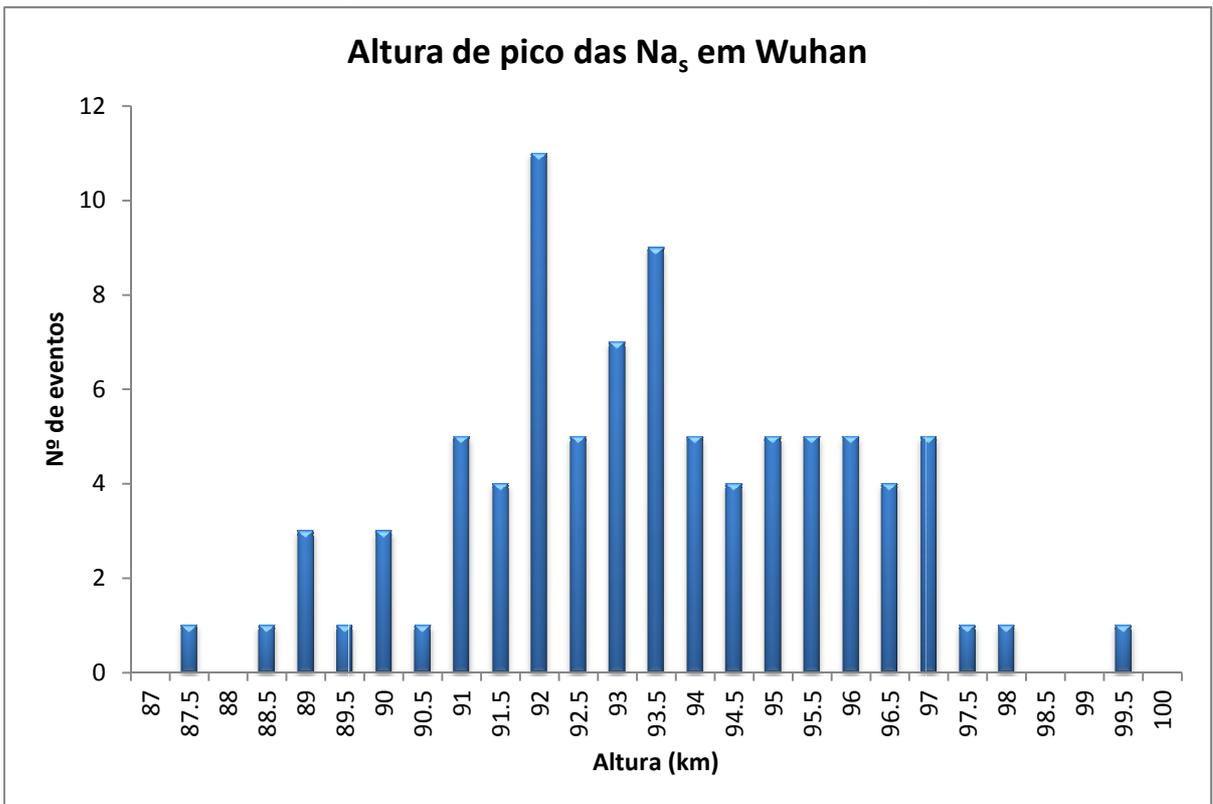


Figura 4.2 - Localização do pico das camadas esporádicas de sódio em Wuhan.

A distribuição em altura é similar entre as regiões de baixa latitude (São José dos Campos) e média latitude (Wuhan) e também concordam com os resultados de Hansen e von Zahn (1990) para Andoya (alta latitude), exceto que, durante o inverno, um número considerável de casos é visto entre 100 e 110 km.

#### **4.1.1 Variação noturna**

Os Gráficos das Figuras 4.3b e 4.4b mostram a variação temporal do pico da camada esporádica de sódio para São José dos Campos e Wuhan, respectivamente. O valor plotado corresponde à porcentagem de eventos em função do número de horas observadas. Em São José dos Campos há um máximo de ocorrência em torno das 20:00, entre 21:00 e 02:00 há uma taxa de ocorrência aproximadamente constante e com um valor relativamente alto e, às 03:00 ocorre o pico de maior ocorrência das Na<sub>s</sub>. Em Wuhan há um máximo também em torno das 20 horas e um segundo máximo entre 23:00 e 00:00. Hansen e Von Zahn (1990) mostraram uma distribuição para as camadas vistas em Andoya (alta latitude), com todos os eventos ocorrendo entre 20:00 e 02:00, com máxima ocorrência às 22:00.

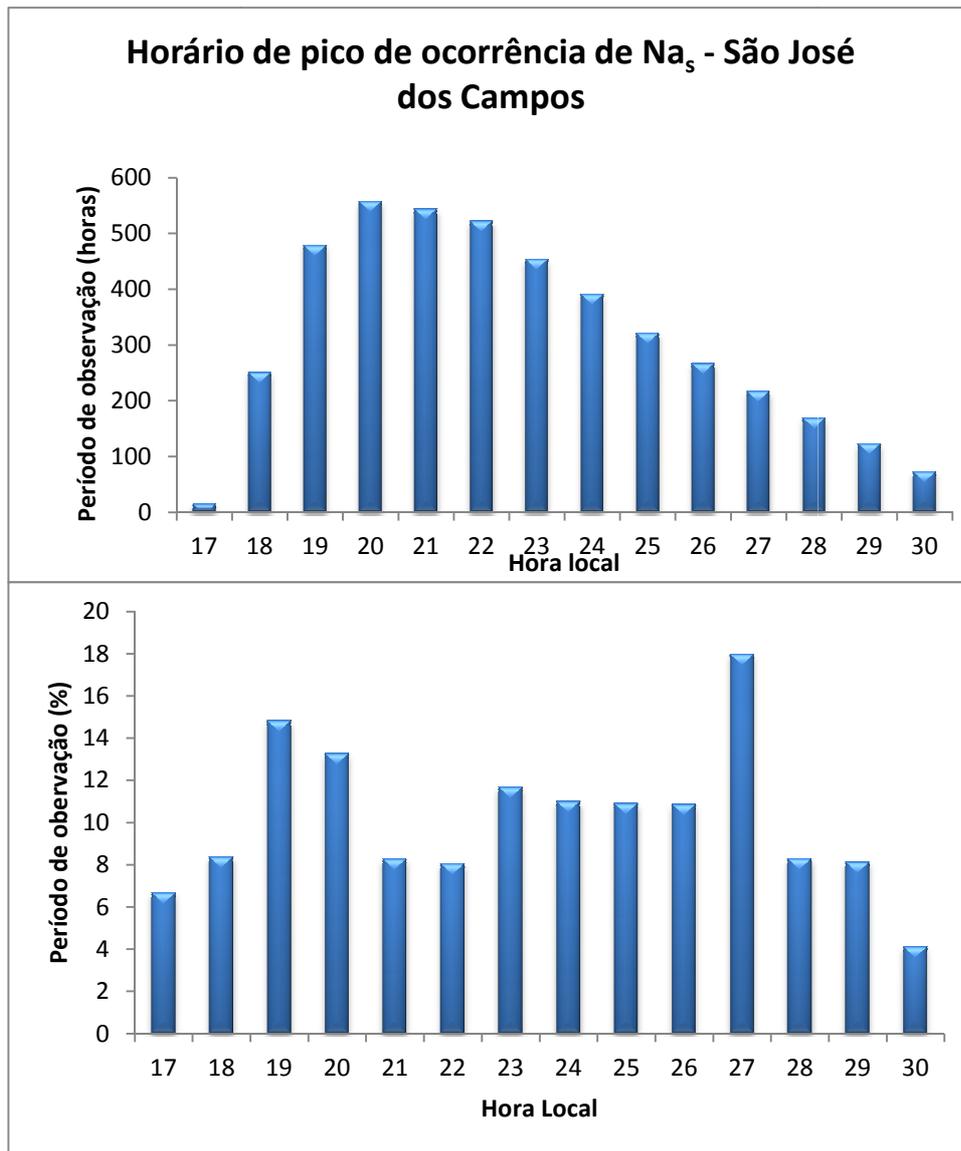


Figura 4.3 – (A) Horas observadas, e (B) Horários em que foram observados os picos das camadas esporádicas em São José dos Campos.

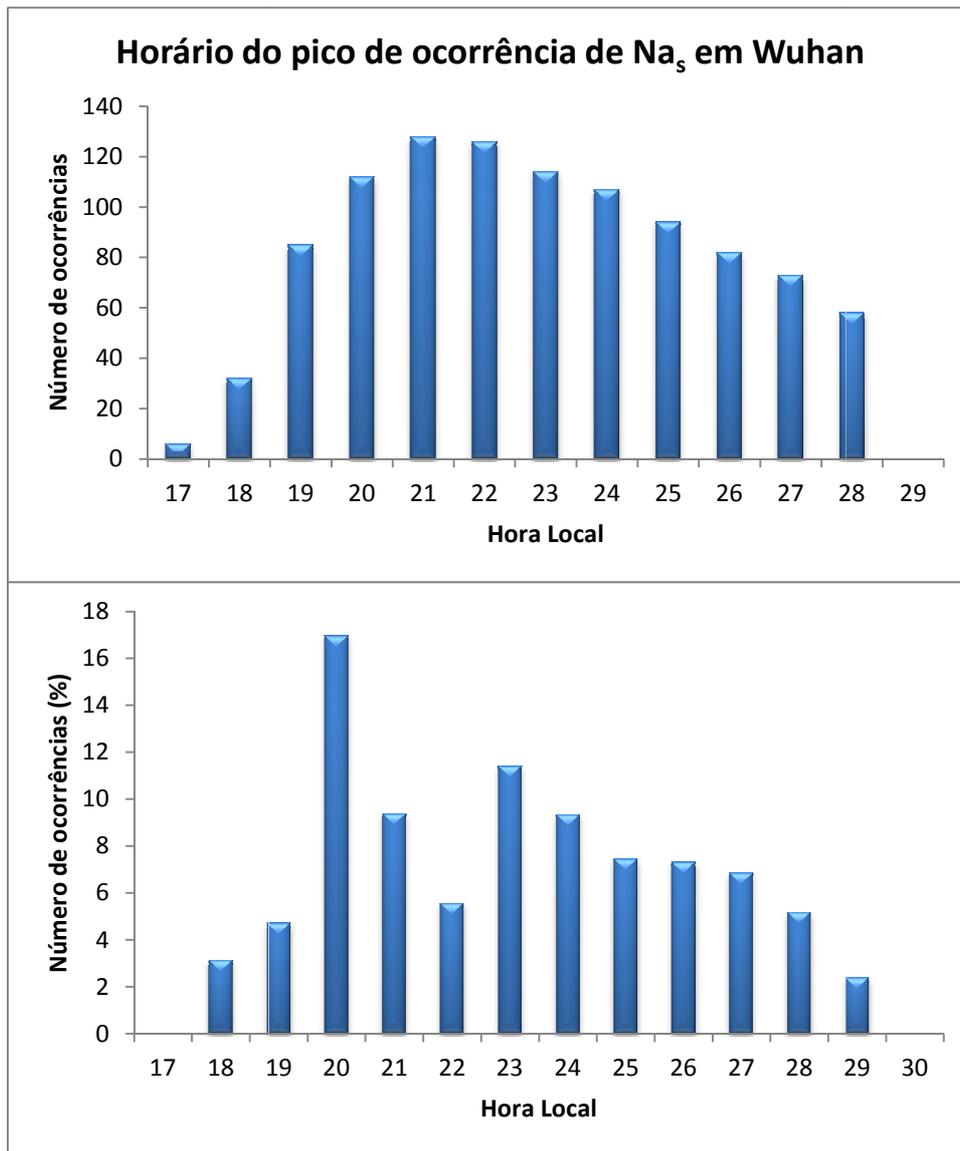


Figura 4.4- (A) Horas observadas, e (B) Horários em que foram observados os picos das camadas esporádicas em Wuhan.

A variação diurna da ocorrência de Na<sub>s</sub> parece ser dependente da latitude. No entanto, comparando-se o número de horas observadas em São José dos Campos, Wuhan e Andoya (Figura 4.3a, 4.4a e 4.5), nota-se que as medidas de São José dos Campos foram obtidas ao longo de um período muito maior e deve, portanto, representar uma melhor amostra estatística. Além da estatística atual para São José dos Campos, o trabalho de Batista et al. (1989) também apresenta uma estatística baseada em uma longa série de dados, de 1975 a 1987, que apresenta resultados semelhantes.

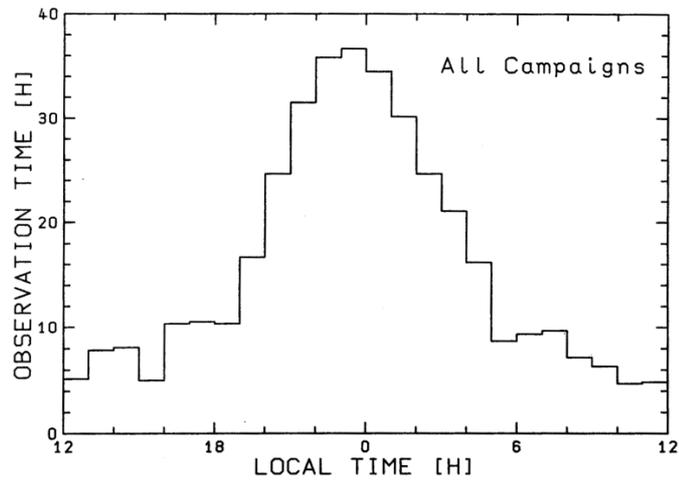


Figura 4.5- Período de observação do lidar de Andoya, entre novembro de 1985 e novembro de 1987. FONTE: Hansen e von Zahn (1990).

#### 4.1.2 Variação sazonal

A densidade da camada de sódio varia ao longo do ano, apresentando um máximo durante o inverno em todas as regiões de latitude (Clemesha et al., 1995). A variação sazonal das camadas esporádicas de sódio não segue a mesma tendência. As Figuras 4.6 e 4.7 mostram (a) o período de observação (horas) da camada de sódio e (b) o percentual de ocorrência de  $\text{Na}_s$  em função do período observado, para São José dos Campos e Wuhan, respectivamente.

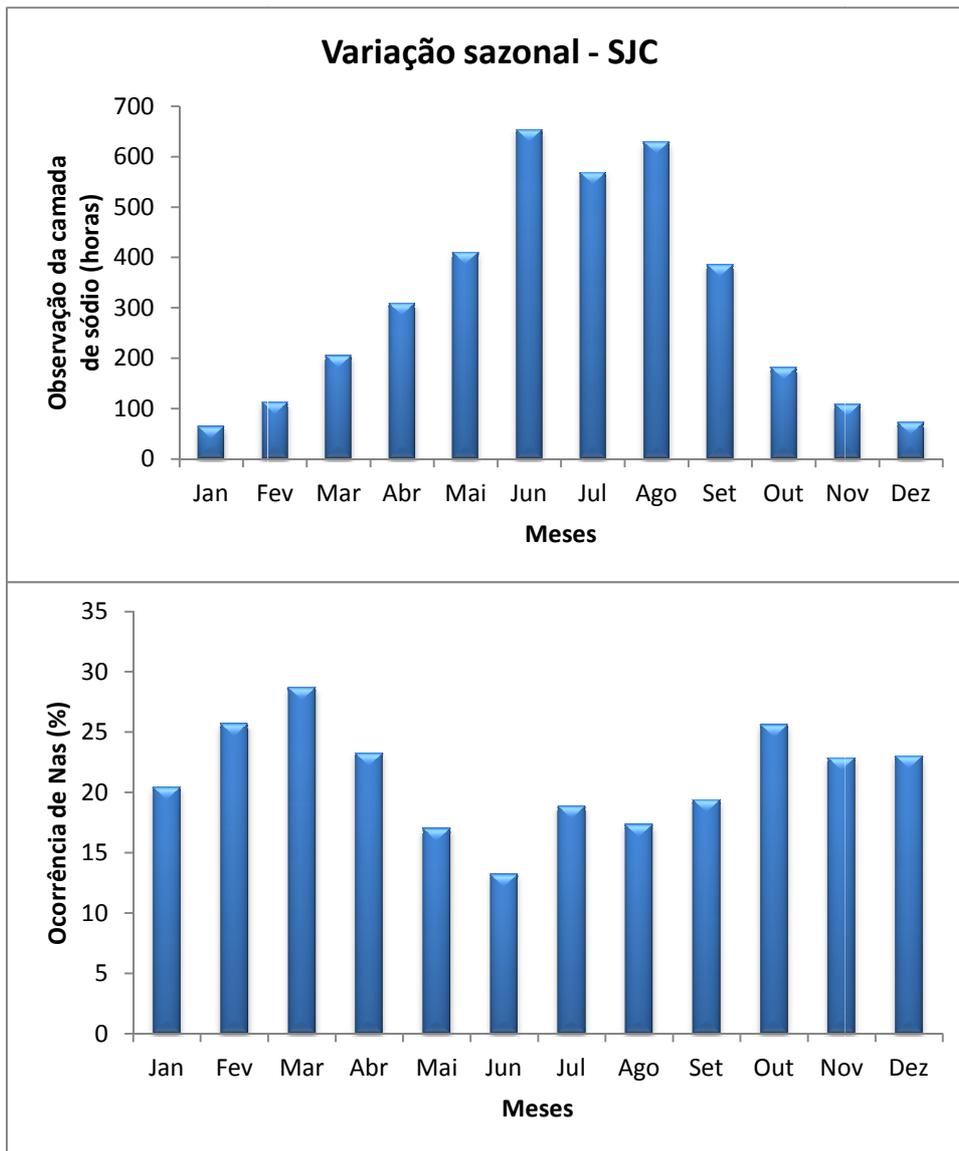


Figura 4.6- (A) Período de observação (horas) e (B) Período de ocorrência de Na<sub>s</sub> (%), para São José dos Campos.

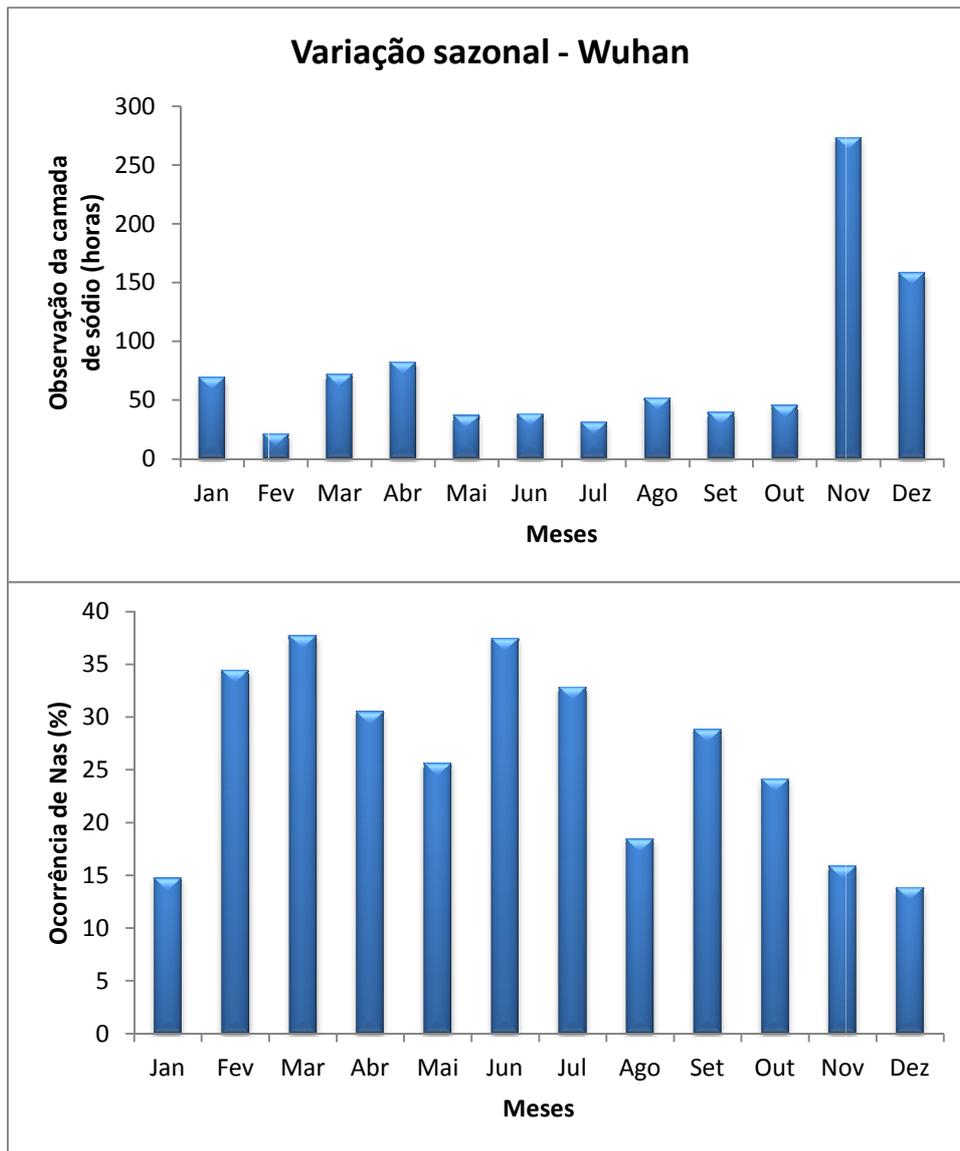


Figura 4.7 - (A) Período de observação (horas) e (B) Período de ocorrência de Na<sub>s</sub> (%), para Wuhan.

Em São José dos Campos, nota-se um comportamento semi-anual, com máxima ocorrência nos meses de equinócio e mínimos nos meses de solstício. Em Wuhan aparentemente ocorrem três picos, sendo os maiores no equinócio de primavera e no solstício de verão e um pico menor ocorre no equinócio de outono. Curiosamente, os máximos em São José dos Campos coincidem com os máximos de amplitude da maré nessa região. O comportamento da maré é semelhante em Wuhan, com máximos nos equinócios e mínimos nos solstícios, porém o pico de ocorrência de Na<sub>s</sub> no verão é observada apenas em Wuhan.

Em altas latitudes, Hansen e Von Zahn não encontraram diferenças significativas na frequência de ocorrência de  $\text{Na}_s$  ao longo do ano, porém, detectaram maior ocorrência de camadas acima de 100 km durante o inverno local.

Um estudo recente feito por Yuan et al.(2014) mostra características estatísticas de  $\text{Na}_s$  observadas em Logan (42° N, 112° O) e Pequim (40° N, 116° L). Em ambas as regiões de médias latitudes, foi observada uma variação sazonal semelhante à de Wuhan, com um pico pronunciado no verão.

No modelo proposto por Cox e Plane (1998), cujo mecanismo de geração de  $\text{Na}_s$  se baseia na neutralização de íons de sódio presentes nas camadas  $\text{E}_s$ , as reações de neutralização são altamente dependentes da densidade e pressão atmosférica. Os coeficientes de taxa das reações (R1) e (R3) são inversamente proporcionais à temperatura e como se sabe, os menores valores de temperatura na atmosfera são atingidos durante o verão na mesopausa.

Partindo da hipótese de que as  $\text{Na}_s$  são geradas pelo mecanismo de neutralização, e levando em consideração a alta correlação entre  $\text{E}_s$  e  $\text{Na}_s$  observadas em Logan e Pequim, Yuan et al.(2014) simularam a climatologia da deriva de íons e variações na densidade atmosférica dentro da baixa região E para essas localidades. Os parâmetros de entrada para a simulação foram obtidos pelos modelos HAMMONIA (Hamburg Model of the Neutral and Ionized Atmosphere) e CTMT (Climatological Tidal Model of the Thermosphere). A simulação mostrou maior convergência de íons durante os meses de verão e maior difusão nos meses de inverno. O resultado concorda com a sazonalidade na ocorrência de  $\text{E}_s$  obtida previamente por um estudo estatístico.

O fato de não ter sido observado o pico pronunciado de ocorrência de  $\text{Na}_s$  em São José dos Campos, pode ser devido ao baixo volume de dados nesse período se comparado às demais épocas do ano. O verão brasileiro se caracteriza por ser chuvoso e em dias chuvosos o lidar não realiza medidas da camada de sódio.

#### **4.1.3 Tempos de subida e descida**

O tempo de subida é definido como sendo o intervalo de tempo entre a primeira aparição de uma  $\text{Na}_s$  e o momento em que ela atinge seu máximo valor de densidade. E o tempo de descida ocorre entre o máximo valor de densidade até a completa

desaparição da camada esporádica. Resultados apresentados por Batista et al. (1989), mostram tempos de subida entre 5 e 30 minutos e tempos de descida entre 30 e 90 minutos para São José dos Campos.

Ainda não é claro se esses tempos de subida e descida estão relacionados ao período de formação e decaimento das  $\text{Na}_s$ , ou se são resultado do movimento de pacotes de concentração aumentada passando sobre o local de observação (Clemesha, 1995). Clemesha et al. (1980) e Batista et al. (1991) realizaram medições da camada de sódio usando radar de laser em três posições diferentes, separadas por aproximadamente 60 km, e verificaram diferentes valores de densidade para cada posição. Clemesha et al. (1980) também verificaram registros da emissão de sódio, obtidos por um fotômetro instalado em Cachoeira Paulista (~100 km distante de São José dos Campos), e observaram um atraso entre os aumentos na concentração de sódio em ambas as localidades. Esses resultados indicam o movimento horizontal de uma nuvem de sódio com concentração aumentada.

Um estudo estatístico comparativo como este nunca foi feito anteriormente, e os resultados mostram boa concordância entre si, o que sugere um mecanismo comum de geração das  $\text{Na}_s$  em ambas as localidades. Os primeiros relatos de observação de  $\text{Na}_s$  mostravam um cenário diferente. Acreditava-se que esse fenômeno era exclusivo em baixas e altas latitudes. Kwon et al.(1988) observaram 16 camadas esporádicas em 30 horas de observação em Mauna Kea (19,8° N, 155,5° O) e Hansen e von Zahn(1990) observaram 75 camadas em 378 horas de medidas em Andoya (69,2°N, 16,0°L). No Brasil (23°S, 46°O), Batista et al.(1989) observaram 65 eventos em 3500 h de observação e no presente estudo (para a mesma localidade) foram observados 484 eventos em quase 3500 horas observadas. Em Illinois (40°N, 88°O), Senft et al.(1989) observaram apenas 2 camadas esporádicas em 350 horas, Megie(1988) observou apenas um evento na Província Haute (44°N) e nenhum evento foi relatado por Gibson e Sandford (1971) e Megie e Blamonte (1977). Os primeiros relatos de observação de  $\text{Na}_s$  em médias latitudes (35.6°N, 139.4°L) foram feitos por Nagassawa e Abo (1995). Gong et al. (2002) fizeram um estudo estatístico sobre a ocorrência de  $\text{Na}_s$  em Wuhan China (31°N, 114°L) e Williams et al. (2007) relatam a ocorrência de fortes  $\text{Na}_s$  em Fort Collins (40.6 N, 105 O).

## 4.2 Análise simultânea dos dados do lidar e da Digissonda CADI

A segunda parte do trabalho consistiu da análise simultânea dos dados do lidar e da digissonda CADI. Uma vez que o lidar fornece dados que mostram o comportamento local da camada de Sódio, o estudo comparativo deveria ser feito com a utilização de dados ionosféricos obtidos no mesmo sítio de observação. A digissonda do INPE mais próxima está instalada em Cachoeira Paulista. Por esse motivo, estabeleceu-se uma parceria com o grupo de Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, que cedeu os dados da digissonda CADI instalada em São José dos Campos. Como a digissonda começou a operar no ano 2000, a análise simultânea dos dados foi feita para o período de 2000 a 2008.

Dos oito anos de dados, foram encontrados e analisados 110 casos de  $Na_s$ , para os quais havia observação simultânea da ionosfera. A tabela 3 mostra os casos em que há dados simultâneos de lidar e ionossonda e os parâmetros considerados nas análises. Foram observados horários e alturas iniciais das camadas  $Na_s$  e  $E_s$ , respectivamente. Para as  $Na_s$ , foram obtidas suas velocidades de descida, enquanto que para as  $E_s$  não foi possível obter tal parâmetro. Foram acrescentados à tabela valores referentes às velocidades de fase das componentes das marés para comparação com as velocidades de descida das  $Na_s$ . A letra N em algumas células indica que não havia dados para aquela data.

Em 93 casos foram registrados eventos de  $E_s$  antes ou durante os eventos de  $Na_s$ . Desse total, 75 apresentam um aparente movimento de descida das camadas esporádicas de sódio, e apenas 18 casos mostram movimento aparente de subida. Nos 17 casos observados em períodos que não houve  $E_s$ , 9 mostram movimento aparente de subida e 8 mostram movimento aparente de descida. É importante notar, que na maioria dos casos, as camadas  $E_s$  se apresentaram conforme indica a classificação F para camadas esporádicas ionosféricas. Uma camada do tipo F (flat) aparece tipicamente em regiões de médias latitudes, no período noturno e sua formação é atribuída ao mecanismo de cisalhamento de ventos (RESENDE, 2010). Sua aparência nos ionogramas é no formato de uma linha contínua, onde a altura permanece constante com o aumento da frequência, similar ao mostrado na Figura 4.8.

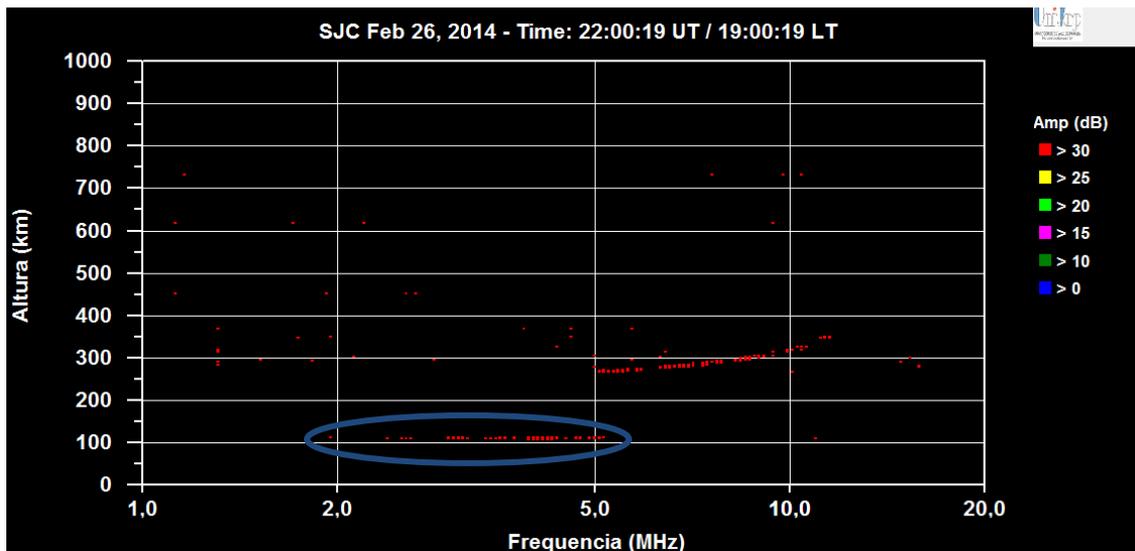


Figura 4.8 - Ionograma obtido na noite de 26 de Fevereiro de 2014, às 19h00 LT. O ionograma mostra a ocorrência de uma camada  $E_s$ , destacada na figura. A camada  $E_s$  mostrada tem características de uma camada do tipo flat.

É importante ressaltar que a  $E_s$  mostrada na Figura 4.8 está relacionada a um evento de  $Na_s$ . Esse evento é discutido na seção 4.4.

A Figura 4.9 mostra o mecanismo de cisalhamento de ventos explicado por Whitehead (1970), que consiste no acúmulo de íons em uma fina camada em torno de 90 km de altitude devido a uma combinação entre o campo magnético terrestre e a variação na direção ou intensidade dos ventos com a altura. O esquema no lado esquerdo da figura mostra a direção sul para a esquerda, norte para a direita, oeste saindo do papel e leste entrando no papel. O esquema também mostra o movimento dos íons na região E, que é governado pelos ventos neutros ( $v_{in} > \Omega_i$ ). Na presença do campo magnético, devido a força de Lorentz ( $\vec{U} \times \vec{B}$ ), os íons executam um movimento de deriva para cima em regiões onde o vento estiver para leste e um movimento de deriva para baixo em regiões onde o vento estiver para oeste. Esse processo resulta em um acúmulo de cargas na altitude em que a velocidade do vento é nula, conforme mostrado no esquema à direita na figura 4.9.

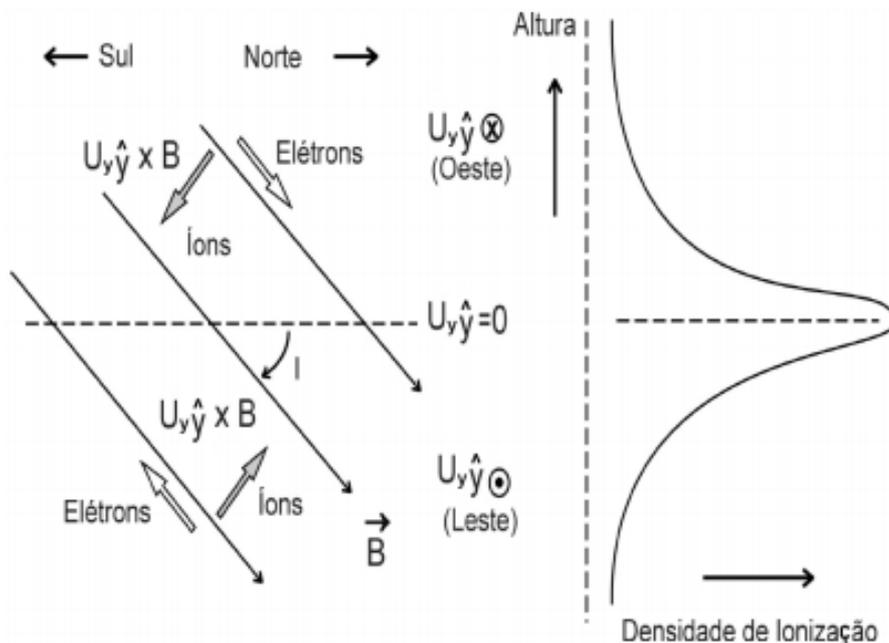


Figura 4.9 - Mecanismo de cisalhamento de vento.  
 FONTE: Adaptado de Whitehead (1970).

Na seção anterior, foi mencionado que Yuan et al.(2014) realizaram um estudo estatístico que mostra correlação entre a sazonalidade das camadas  $E_s$  e  $Na_s$ . Com relação à sazonalidade das  $E_s$ , é importante destacar que vários outros pesquisadores também publicaram resultados mostrando as mesmas características em regiões de médias latitudes, cujo pico pronunciado de ocorrência em meses de verão é sempre observado em ambos os hemisférios (Abdu e Batista, 1977; Whitehead, 1989; Mathews, 1998; Haldoupis et al., 2007). Tal característica é resultado da variabilidade dos íons metálicos que atingem a atmosfera terrestre.

Aproximadamente 70% do total de casos analisados são favoráveis ao mecanismo de geração das  $Na_s$  por neutralização dos íons de sódio presentes nas camadas  $E_s$ . Infelizmente, não foi possível calcular a velocidade de descida das camadas  $E_s$ , o que permitiria uma comparação com a velocidade de descida das  $Na_s$ . A digissonda CADI mede concentração eletrônica a partir de 100 km de altura e as camadas esporádicas geralmente ocorrem abaixo dessa altura. Os ionogramas analisados mostram camadas esporádicas concentradas em torno de 100 km entre algumas horas e alguns minutos antes da observação de  $Na_s$  nos dados do lidar. É possível que as  $E_s$  não tenham sido observadas em alguns casos devido a limitação do instrumento, podendo as

mesmas estarem abaixo de 100 km. Há também a possibilidade de que os eventos de  $\text{Na}_s$  para os quais não há observação de  $E_s$  antes e nem durante sua ocorrência, se deva ao fato de que o fenômeno não tenha sido gerado localmente. É possível que as  $\text{Na}_s$  tenham sido geradas em outra localidade e foram advectadas para a região do sítio do lidar. Uma forma de verificar essa hipótese é com a utilização de instrumentos que forneçam uma visão do comportamento horizontal das  $\text{Na}_s$ : suas dimensões, direção e velocidade de propagação. A observação da emissão de sódio através de um imageador all-sky, poderia, além disso, fornecer a informação sobre o local exato de geração das camadas  $\text{Na}_s$ . Considerando a emissão de sódio em torno de 90 km, um imageador com ângulo de abertura em torno de  $160^\circ$ , fornece uma área de cobertura com diâmetro de aproximadamente 2150 km. Um imageador desse tipo foi instalado em Cachoeira Paulista com a finalidade de observar a emissão de sódio e possíveis eventos de  $\text{Na}_s$ .

Com relação ao aparente movimento de subida das  $\text{Na}_s$ , deve-se lembrar de que o lidar fornece uma visão da variação em altura em uma posição horizontal fixa. Variações no padrão dos ventos locais pode causar esse efeito de subida da camada.

Conforme dito anteriormente, devido a não disponibilização dos dados de ionossonda de Wuhan, não foi possível fazer uma comparação entre as duas localidades. Porém, Gong et al.(2002) relatam a análise que fizeram usando dados da ionossonda de Wuhan para verificar a ocorrência de camadas  $E_s$  durante eventos de  $\text{Na}_s$  detectados pelo lidar. Eles analisaram dados disponíveis em 18 noites para as quais foram detectadas eventos de  $\text{Na}_s$ . Em 15 casos foi detectada a presença de  $E_s$  entre 3 horas antes e 2 horas depois da ocorrência de  $\text{Na}_s$ . Em 7 desses eventos, a melhor correlação entre  $E_s$  e  $\text{Na}_s$  era de 1 hora em tempo e 5 km em espaço. Os pesquisadores ainda compararam o fator de intensidade das  $\text{Na}_s$  com a frequência crítica da camada  $E_s$  ( $f_oE_s$ ) e observaram que eram proporcionais na maioria dos casos. Esses resultados concordam bem com os resultados aqui apresentados e, novamente, apontam para a teoria de neutralização de íons de sódio.

Tabela 4.1 - Parâmetros obtidos da análise simultânea de  $N_{as}$  e  $E_s$ .

	Data	Hora inicial da $N_{as}$	Altura inicial da $N_{as}$ (km)	Velocidade de descida da $N_{as}$ (km/h)	Vel. de fase da maré diurna (km/h)	Vel. de fase da maré semidiurna (km/h)	Hora inicial da $E_s$	Altura inicial da $E_s$ (km)
1	26/10/2000	23h49	99.62	-0.09	N		22h50	105
2	09/11/2000	21h46	93.33	-0.26	-0.39	-1.662	16h00	108
3	09/11/2000	01h19	95.66	1.3	-0.39	-1.662	Não há $E_s$	
4	21/11/2000	01h08	96.56	1.1	N	N	20h05	102
5	11/12/2000	21h38	102.36	-0.4	-0.47	-1.313	19h45	111
6	11/12/2000	21h50	94.86	-0.88	-0.47	-1.313	16h15	102
							19h45	111
7	05/01/2001	00h52	98.47	-3.28	-1.62	-1.032	16h45	114
8	16/01/2001	01h25	96.32	-0.82	-2.48	-1.132	16h15	132
							21h15	120
							23h00	102
9	19/02/2001	22h54	95.35	-0.83	N	N	19h45	100
10	20/02/2001	01h33	100.24	-1.23	-0.134	-1.181	01h00	102
11	22/02/2001	01h15	99.65	-0.7	0,134	-0.687	00h50	105
12	06/03/2001	01h48	99.65	-1.22	1,212	-1.098	A noite toda	100
13	15/03/2001	01h41	102.12	-1.22	-0.069	-0.939	A noite toda	100
14	22/03/2001	01h32	96.7	-1.15	-0.532	-0.763	A noite toda	
15	12/04/2001	22h21	99.97	0.47	-0.485	-0.77	A noite toda	
16	12/04/2001	02h17	102.5	-1.17	-0.485	-0.77	02h20	100
17	19/04/2001	01h00	93.68	1.52	-0.468	-0.469	19h10	101
18	09/05/2001	22h05	93.72	-3.82	-1.614	-1.573	20h45	108
19	16/07/2002	02h29	96.35	-0.48	-0.559	-1.296	A noite toda	
20	20/08/2002	00h25	96.98	-0.72	-0.071	-1.137	A noite toda	
21	02/09/2002	20h13	100.56	-2	0.345	-0.867	19h55	102
22	03/09/2002	01h57	93.33	-0.03	-0.413	-1.324	A noite toda	
23	09/10/2002	20h52	96.39	-1.09	N	N	A noite toda	
24	09/10/2002	00h27	99.38	-0.98	N	N	A noite toda	
25	08/11/2002	22h14	99.76	-1.07	-1.493	-0.867	A noite toda	
26	16/06/2003	18h31	103.44	-1.6	-0.476	-0.953	17h20	102
27	05/08/2003	00h38	94.58	-1.43	-0.525	-2.877	19h45	102
28	08/09/2003	20h33	101.77	0.37	-0.53	-0.812	Não há $E_s$	
29	19/09/2003	04h10	93.4	1.33	-0.342	-0.592	23h50	100
30	23/09/2003	20h54	94.31	0.61	-0.403	-1.013	13h10	108
31	03/02/2004	04h32	105.1	0.95	N	N	03h00	120
32	01/03/2004	01h40	98.16	-0.92	-1.664	-3.743	19h30	111
							23h30	105
33	08/03/2004	02h12	103.2	-1.1	-1.472	-0.837	01h50	108
34	29/03/2004	22h29	99.72	-1.19	N	N	22h20	102

35	07/06/2004	21h33	95.8	-0.76	0.141	3.478	19h00	102
36	16/06/2004	19h41	101.81	-2.37	-0.52	-1.123	A noite toda	
37	17/06/2004	22h25	99.38	0.0014	0.579	-0.846	A noite toda	
38	23/06/2004	20h04	93.99	-0.68	-0.565	-2.404	A noite toda	
39	23/06/2004	01h09	94.62	-0.21	-0.565	-2.404	A noite toda	
40	19/08/2004	20h22	100.69	-0.14	-0.499	-6.682	A noite toda	
41	19/08/2004	02h49	91.84	-0.14	-0.499	-6.682	A noite toda	
42	14/12/2004	20h29	95.19	-1.1	N	N	19h55	105
43	15/12/2004	21h50	101.15	-1.1	-3.284	-3.016	A noite toda	
44	12/07/2005	18h43	96.39	-0.35	N	N	19h20	129
							15h50	101
45	04/04/2006	02h16	95.49	-2.53	-0.448	-0.912	18h40	101
46	04/05/2006	00h33	94.9	-0.54	N	N	21h30	117
47	07/07/2006	18h05	101.15	0.63	-0.519	-1.199	18h00	110
48	07/07/2006	22h05	96.11	-2.31	-0.519	-1.199	18h00	110
49	14/07/2006	22h33	102.1	0.036	N	N	21h25	105
50	17/07/2006	02h13	93.09	-0.72	-0.524	-1.01	23h25	105
51	19/07/2006	19h45	97.19	-0.44	-0.505	-2.906	15h05	117
52	19/07/2006	22h29	96.39	0.27	-0.505	-2.906	22h40	102
53	24/07/2006	01h01	95.14	-1.89	-0.531	2.158	22h10	128
54	24/07/2006	02h25	93.47	-1.8	-0.531	2.158	15h05	108
55	26/07/2006	23h16	99.38	-1.9	0.512	-5.906	22h45	100
56	04/08/2006	20h52	100.28	0.18	-0.131	-1.503	Não há E <sub>s</sub>	
57	04/08/2006	23h16	99.38	-1.9	-0.131	-1.503	22h25	100
58	04/08/2006	00h44	99.38	-1.1	-0.131	-1.503	Não há E <sub>s</sub>	
59	08/08/2006	20h10	99.69	2.36	N	N	Não há E <sub>s</sub>	
60	08/08/2006	01h15	94.9	1.95	N	N	20h55	102
61	08/08/2006	05h11	93.68	1.23	N	N	23h05	101
62	14/08/2006	19h44	101.81	0.65	N	N	19h25	102
63	14/08/2006	03h22	93.4	0.26	N	N	19h25	102
64	16/08/2006	23h26	96.39	-4.89	N	N	20h20	102
65	22/08/2006	23h25	98.02	-2.68	N	N	18h15	102
							21h35	108
66	23/08/2006	05h26	96.08	-2.17	N	N	03h00	114
67	24/08/2006	21h27	97.26	-0.97	N	N	18h45	105
68	30/08/2006	02h32	96.04	-1.11	N	N	Não há E <sub>s</sub>	
69	12/09/2006	03h04	100.9	-1.42	N	N	03h10	105
70	27/09/2006	19h23	95.17	0.1	N	N	19h35	102
71	27/09/2006	23h30	101.18	0.33	N	N	23h25	111
72	28/09/2006	21h25	99.1	-0.28	N	N	18h45	102
73	27/10/2006	19h22	99.38	-2.42	N	N	19h15	102
74	01/03/2007	23h22	94.55	0.77	N	N	17h40	114
75	23/04/2007	01h42	100.28	-1.06	N	N	00h55	105
76	21/05/2007	18h23	95.21	-0.78	N	N	17h45	102

77	21/05/2007	19h42	102.36	3.15	N	N	17h45	102
78	04/06/2007	19h50	99.97	-0.96	N	N	17h30	102
79	13/06/2007	00h55	94.27	-0.43	N	N	20h40	126
80	18/06/2007	02h10	94.55	-0.57	N	N	19h35	138
81	19/06/2007	19h30	98.44	-1.32	N	N	16h55	108
82	22/06/2007	19h42	99.69	-0.64	N	N	18h10	102
83	29/06/2007	18h43	97.6	-1.57	N	N	17h10	117
84	03/07/2007	18h29	99.97	-2.98	N	N	18h20	101
85	04/07/2007	19h08	95.45	-0.36	N	N	Até 16h25	100
86	30/07/2007	23h04	101.35	0.94	N	N	22h25	102
87	01/08/2007	00h41	96.39	-2.81	N	N	21h45	105
88	02/08/2007	18h53	97.6	-0.48	N	N	15h50	102
89	07/08/2007	21h01	101.53	-1.14	N	N	Não há E <sub>s</sub>	
90	14/08/2007	19h38	100.56	2.33	N	N	18h15	105
91	14/08/2007	00h32	97.01	-0.99	N	N	18h15	105
92	15/08/2007	18h52	102.19	1.58	N	N	13h45	100
93	15/08/2007	00h35	97.88	3.1	N	N	13h45	100
94	11/09/2007	21h14	94.62	-0.78	-0.541	-1.266	até 19h10	100
95	01/10/2007	21h35	93.99	-0.74	-0.455	-1.01	Não há E <sub>s</sub>	
96	03/10/2007	23h01	97.29	-2.02	-0.502	-0.881	20h45	108
97	05/10/2007	01h01	93.96	-0.72	-0.235	-1.291	Não há E <sub>s</sub>	
98	10/10/2007	19h03	92.74	-0.52	-0.515	-2.447	20h40	107
99	11/10/2007	22h28	99.9	2.12	0.310	-2.441	15h15	100
100	11/10/2007	23h04	96.11	-0.54	0.310	-2.441	15h15	100
101	23/11/2007	20h50	102.43	-0.49	-2.688	-0.341	18h00	108
102	05/03/2008	21h07	93.23	-0.5	-0.612	-1.699	O dia todo	100
103	19/03/2008	03h17	104.79	-1.55	-0.230	-2.315	02h10	105
104	28/03/2008	18h58	96.63	-1.06	-0.472	-1.842	10h30	105
105	31/03/2008	23h42	95.8	-3.21	-0.305	-3.183	18h45	114
106	18/08/2008	20h34	93.4	-0.62	-0.269	-5.697	14h50	113
107	19/08/2008	01h11	95.17	-0.14	-0.548	-0.036	Não há E <sub>s</sub>	
108	27/08/2008	01h03	97.53	-0.35	-0.764	-1.144	23h10	108
109	24/09/2008	21h42	95.7	-0.8	-0.370	-2.464	21h10	100
110	02/10/2008	00h28	95.49	-5	-0.229	-3.974	23h25	100

### 4.3 Análise de dados obtidos por radar meteorológico

Dados do radar meteorológico do INPE, instalado em Cachoeira Paulista, do período de 2000 a 2008 foram analisados a fim de verificar a influência dos ventos na formação das camadas esporádicas de sódio.

No item 4.2 dessa tese foi mostrado que 70% dos casos de  $Na_s$ , ou seja, 73 dos 110 casos observados, estão acompanhados de  $E_s$ . Mais importante ainda é que as camadas  $E_s$  observadas durante esses eventos é do tipo F, cuja nomenclatura é atribuída, na literatura, a camadas geradas pelo mecanismo de cisalhamento de ventos. Por esse motivo, foram verificados os dados de vento do radar meteorológico de Cachoeira Paulista, que está cerca de 110 km distante de São José dos Campos. Embora o radar não esteja instalado na mesma localidade do lidar, a proximidade entre os dois sítios permite uma visão do comportamento dos ventos neutros nas proximidades do local em que foram vistas as camadas esporádicas de sódio.

Havia dados do radar meteorológico disponíveis para 76 eventos de  $Na_s$ . Desse total, foi observada ocorrência de cisalhamento de ventos em horários e alturas próximas às das  $Na_s$  em 64 casos. Há uma predominância de cisalhamento do vento meridional (53% dos casos), enquanto que o cisalhamento do vento zonal representa 31% dos casos.

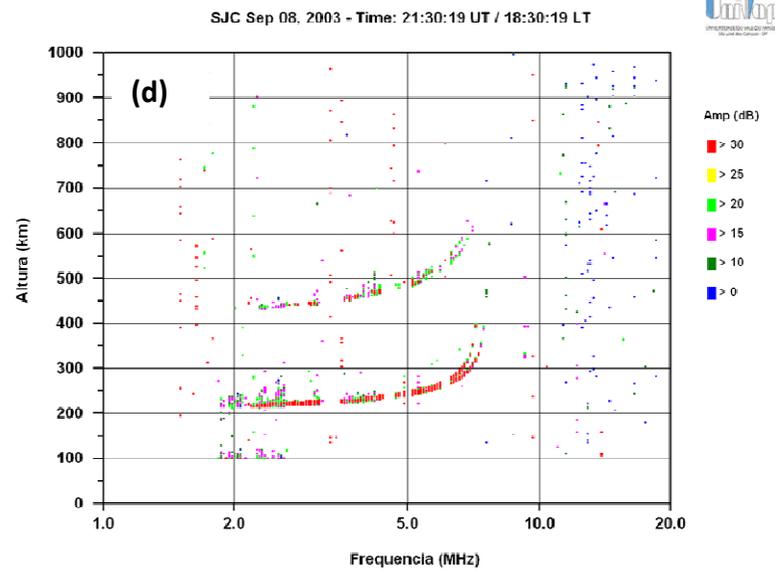
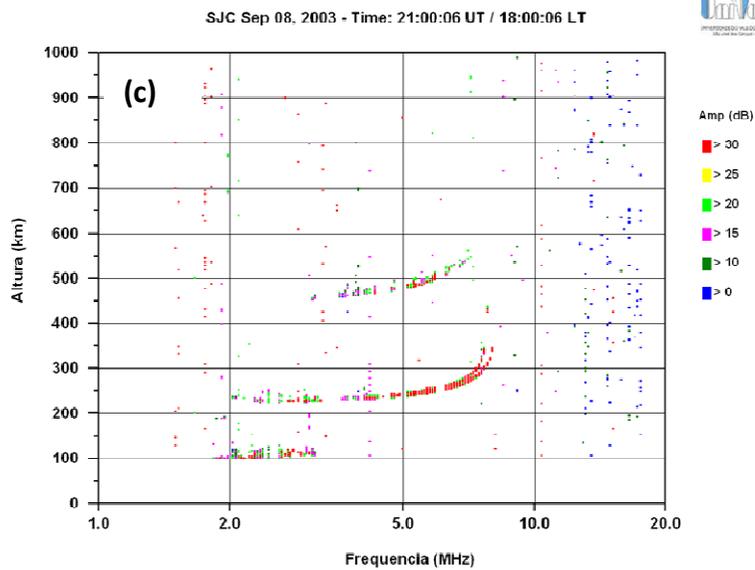
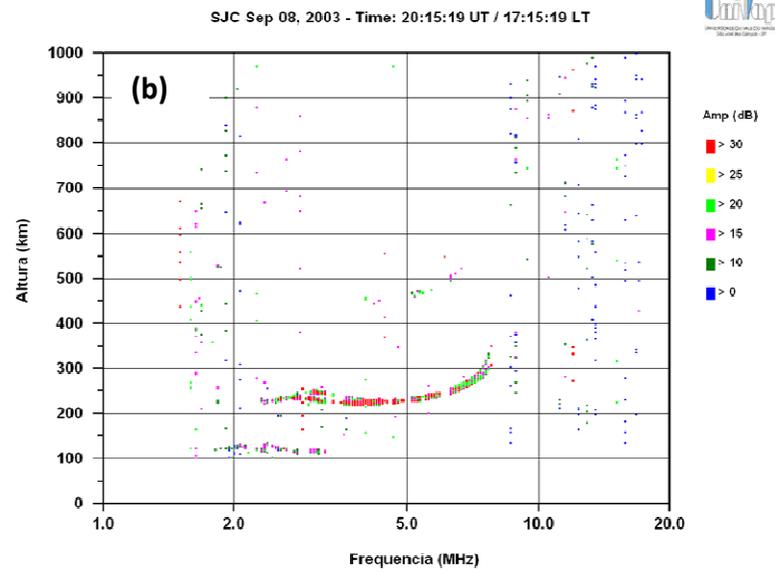
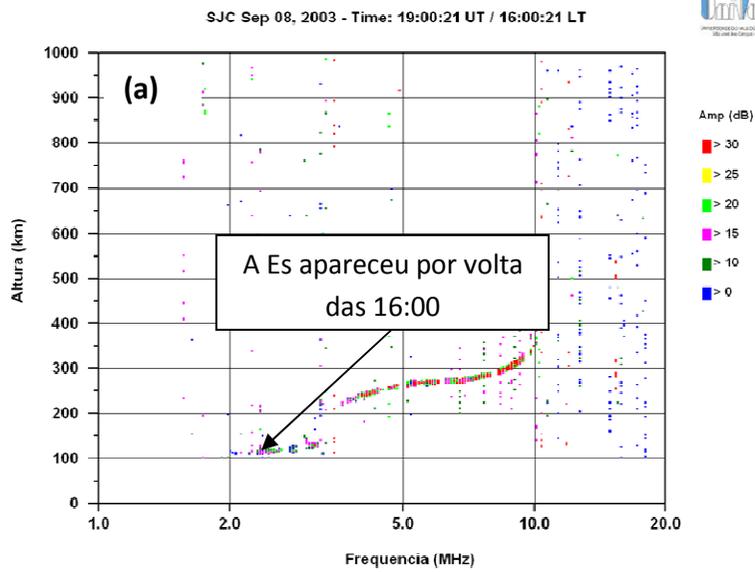
As figuras a seguir ilustram um evento de  $Na_s$ , acompanhado por  $E_s$  que ocorreu na noite de 08 de setembro de 2003. A Figura 4.10 contém uma sequência de ionogramas que mostra a ocorrência de  $E_s$  desde às 16:00 LT, mas que apresentou um aumento significativo na densidade eletrônica às 20:30 LT. No horário em que a densidade eletrônica da  $E_s$  aumenta significativamente, é registrada também a ocorrência de uma  $Na_s$  em 102 km (Figura 4.11). A Figura 4.12 mostra as velocidades dos ventos zonal e meridional e a intensidade do cisalhamento vertical das duas componentes do vento horizontal para a mesma data. Devido à limitação do radar meteorológico, não há dados de ventos acima de 100 km de altura e, portanto, não se tem informação do comportamento dos ventos que possivelmente estejam envolvidos na geração da camada  $Na_s$  vista em 102 km às 20:30 LT.

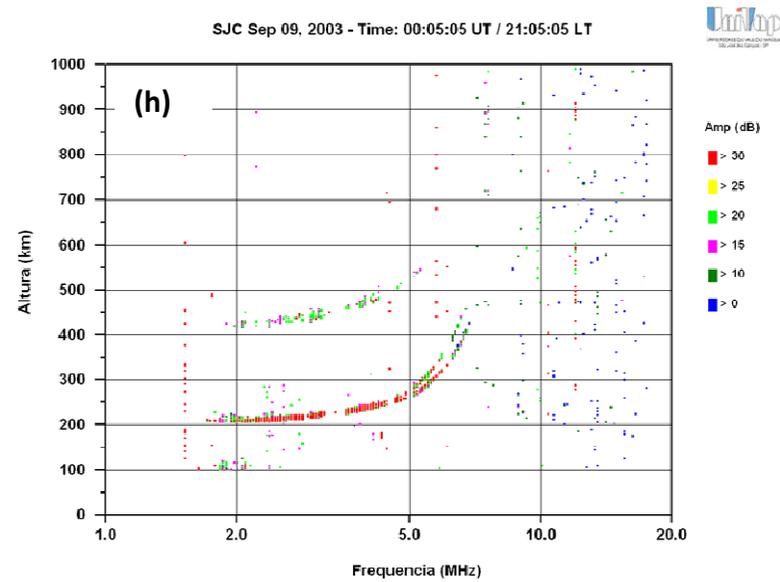
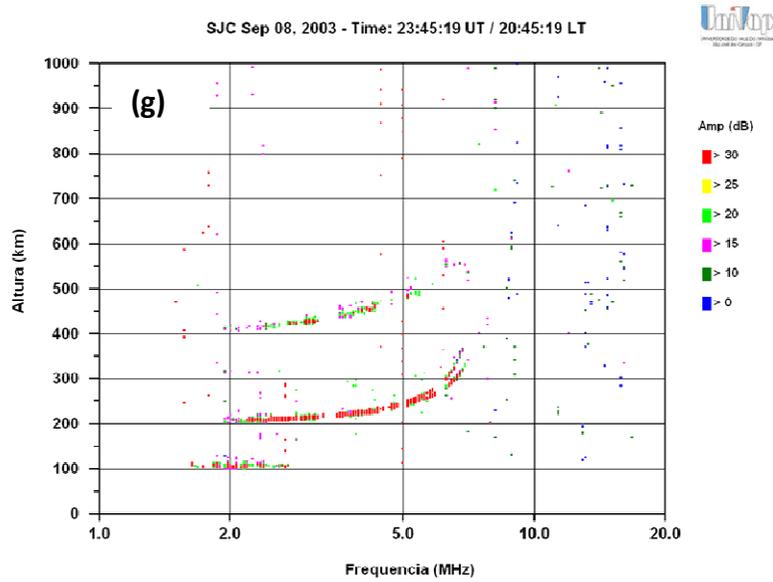
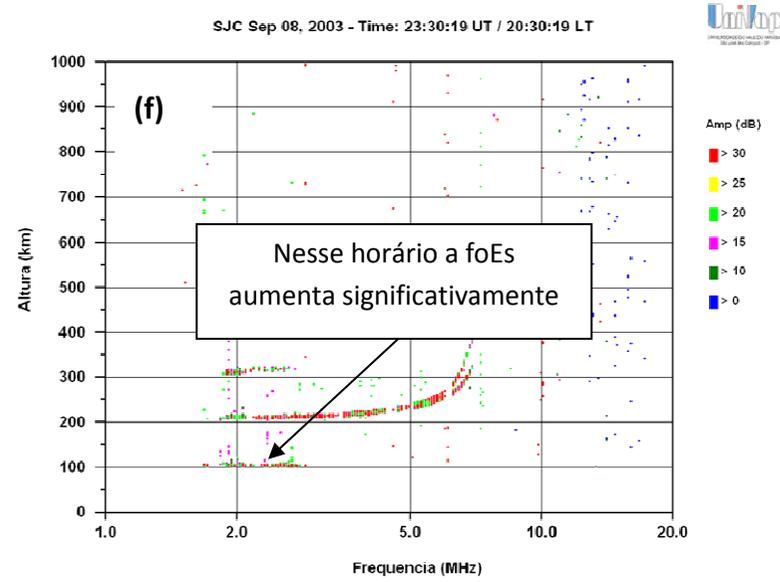
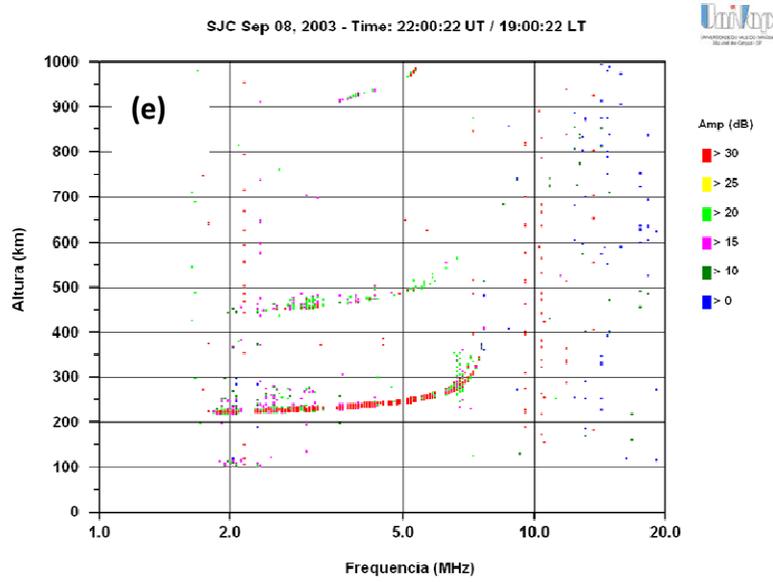
Observando os perfis de sódio da Figura 4.11, pode-se notar que há outra camada esporádica em torno de 92 km, que começou algum tempo antes, mais

precisamente às 19:00 LT. Durante todo o período de ocorrência dessa  $Na_s$ , foi observada também a ocorrência de  $E_s$  e, embora não se tenha feito uma análise dos ventos no caso anterior, agora pode-se fazê-la. Note, na Figura 4.12, que por volta das 18:00 LT, há um forte cisalhamento do vento meridional em torno de 90 km, o que, possivelmente, está relacionado ao caso de  $Na_s$  aqui relatado.

Na tabela 3, são apresentados também, os valores de velocidade de fase da maré diurna e semidiurna para fins de comparação com as velocidades de descida das camadas esporádicas de sódio. Do total de 110 eventos, em 46 não há dados simultâneos de radar meteórico, em 12 casos os valores de velocidade de descida da  $Na_s$  são parecidos com a velocidade de fase da maré diurna e em 6 casos, a velocidade de descida da  $Na_s$  está correlacionada à velocidade de fase da maré semidiurna. Nos demais casos não há aparente correlação. No entanto, foram analisadas somente as componentes de maré e não foi levada em consideração a possível contribuição de ondas de gravidade no processo. Estudos feitos sobre ondas de gravidade mostram que as mesmas podem alcançar grandes amplitudes ao chegarem à região da baixa termosfera e contribuem significativamente para a dinâmica da atmosfera e do plasma (Fritts e Vadas, 2008).

Nas simulações feitas por Yuan et al.(2014), também foi notada a ausência das ondas de gravidade, uma vez que inserindo na simulação somente as componentes dos ventos devido a marés, verificaram que o cisalhamento do vento era uma ordem de magnitude menor que valores observados experimentalmente. Outro exemplo que pode ilustrar a valiosa contribuição das ondas de gravidade no entendimento da dinâmica nessa região da atmosfera é o trabalho de Fritts et al. (2004). Eles mostraram que grandes valores de cisalhamento de ventos podem ser induzidos por amplificação por ondas de gravidade, através de um mecanismo de saturação, quando as mesmas se propagam através de uma camada estável altamente convectiva.





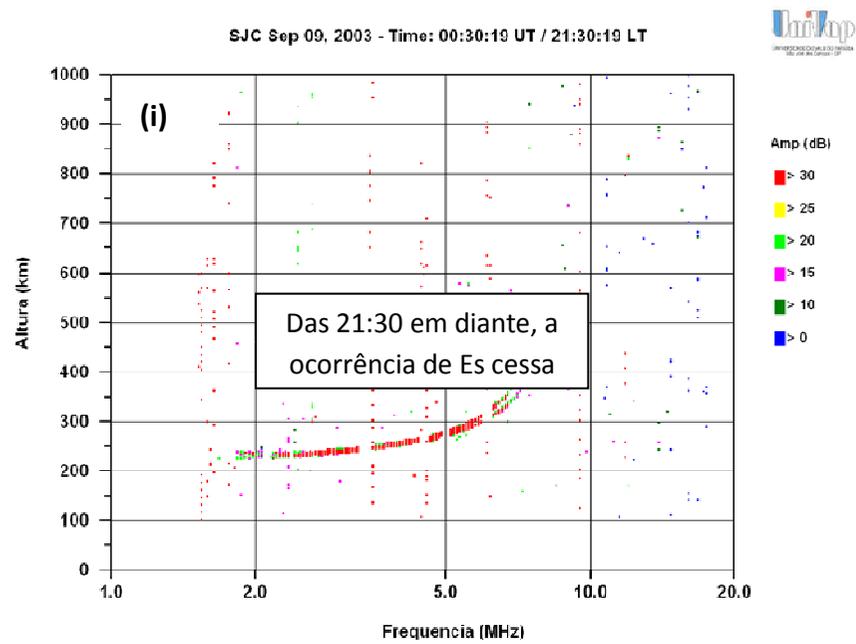
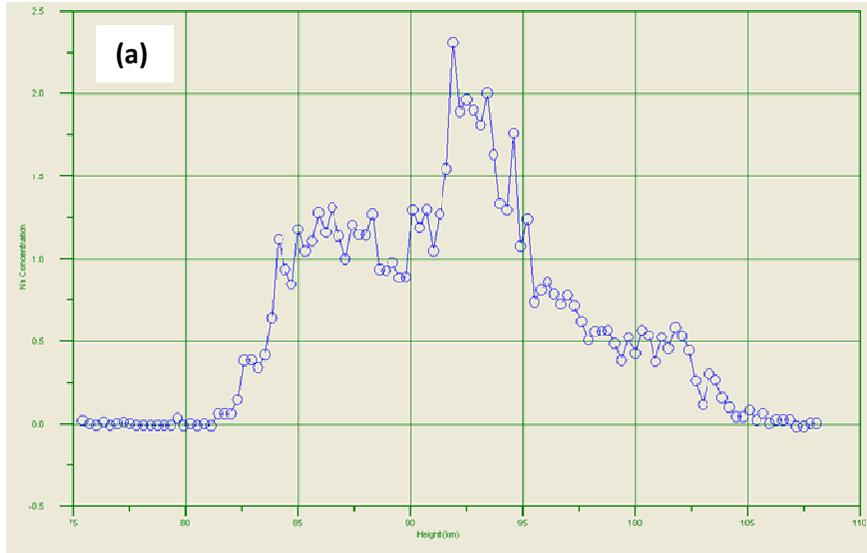
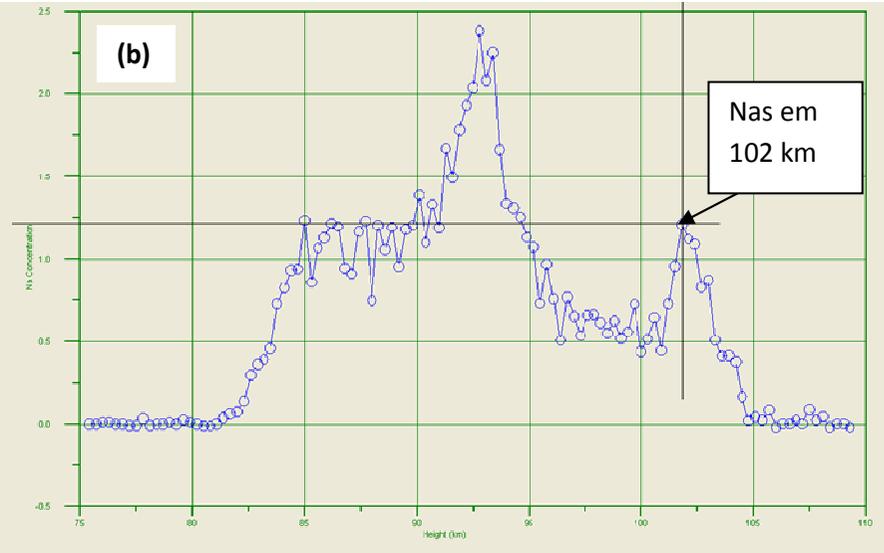


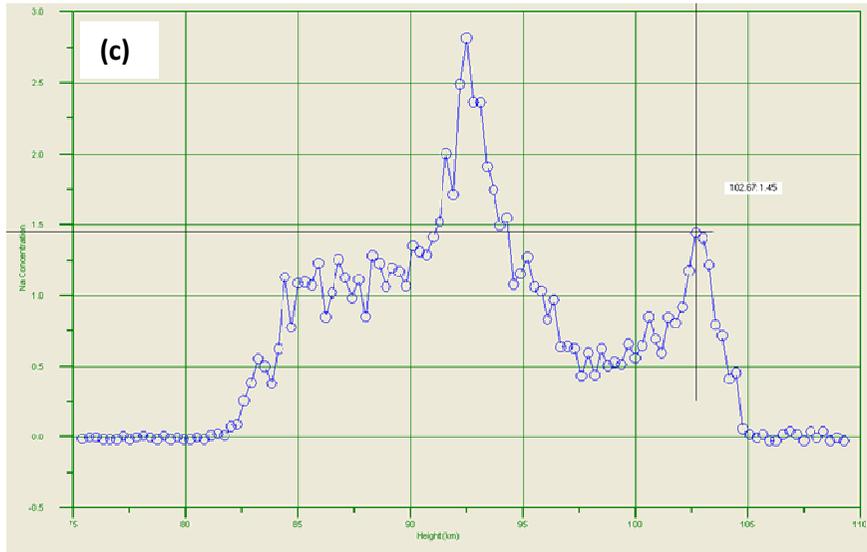
Figura 4.10 - Sequência de ionogramas que mostra a ocorrência de Es na noite de 09 de setembro de 2002.



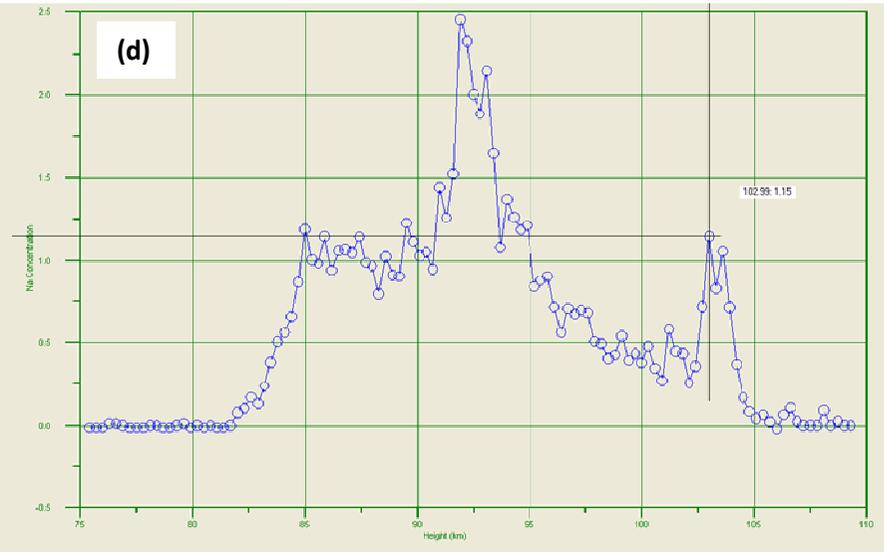
20:28



20:33



20:38



20:43

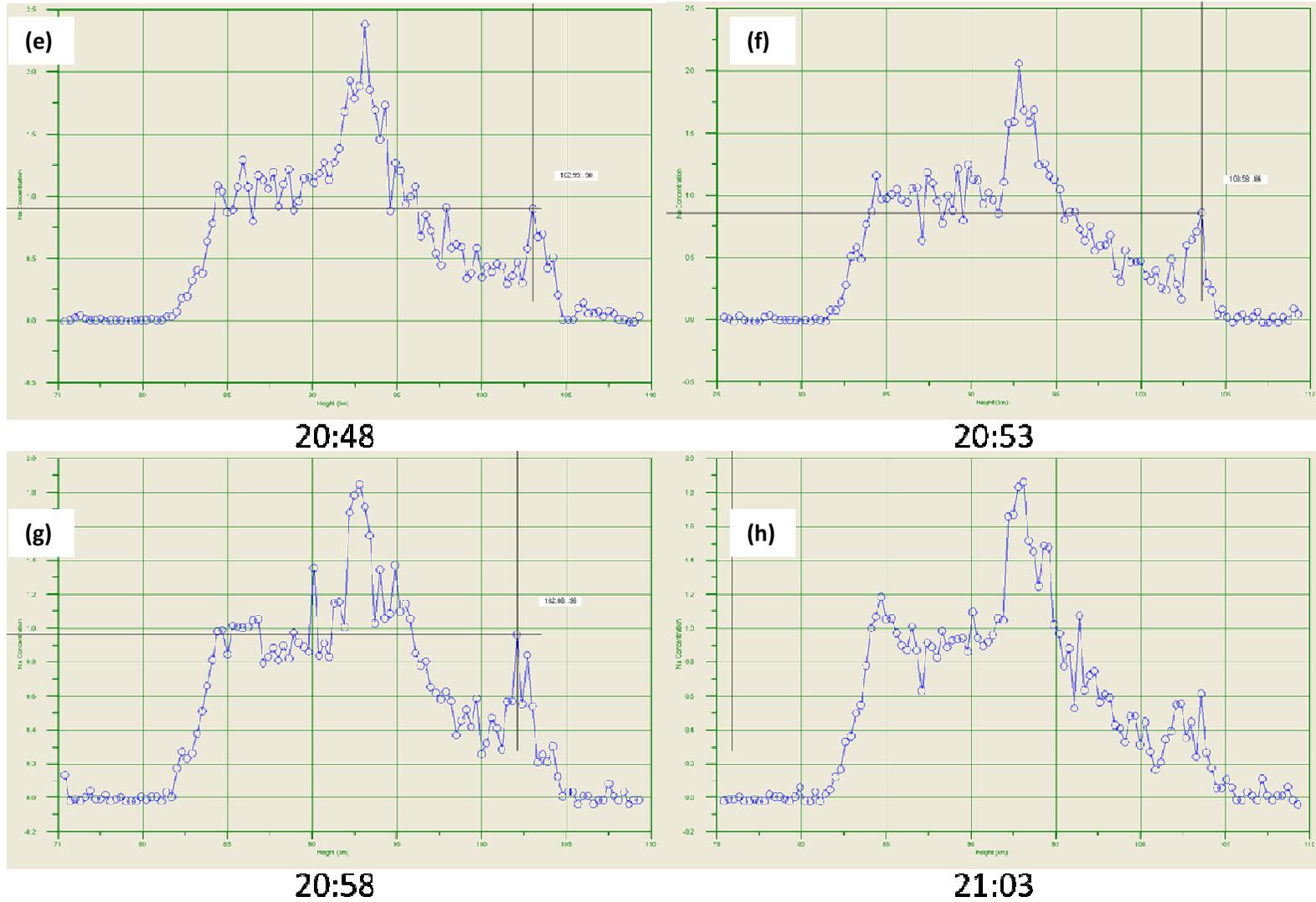


Figura 4.11 - Sequência de perfis de sódio, que mostra a ocorrência de uma  $N_{as}$  em torno de 102 km, no dia 08/09/2003.

Cachoeira Paulista, 08/09/2003

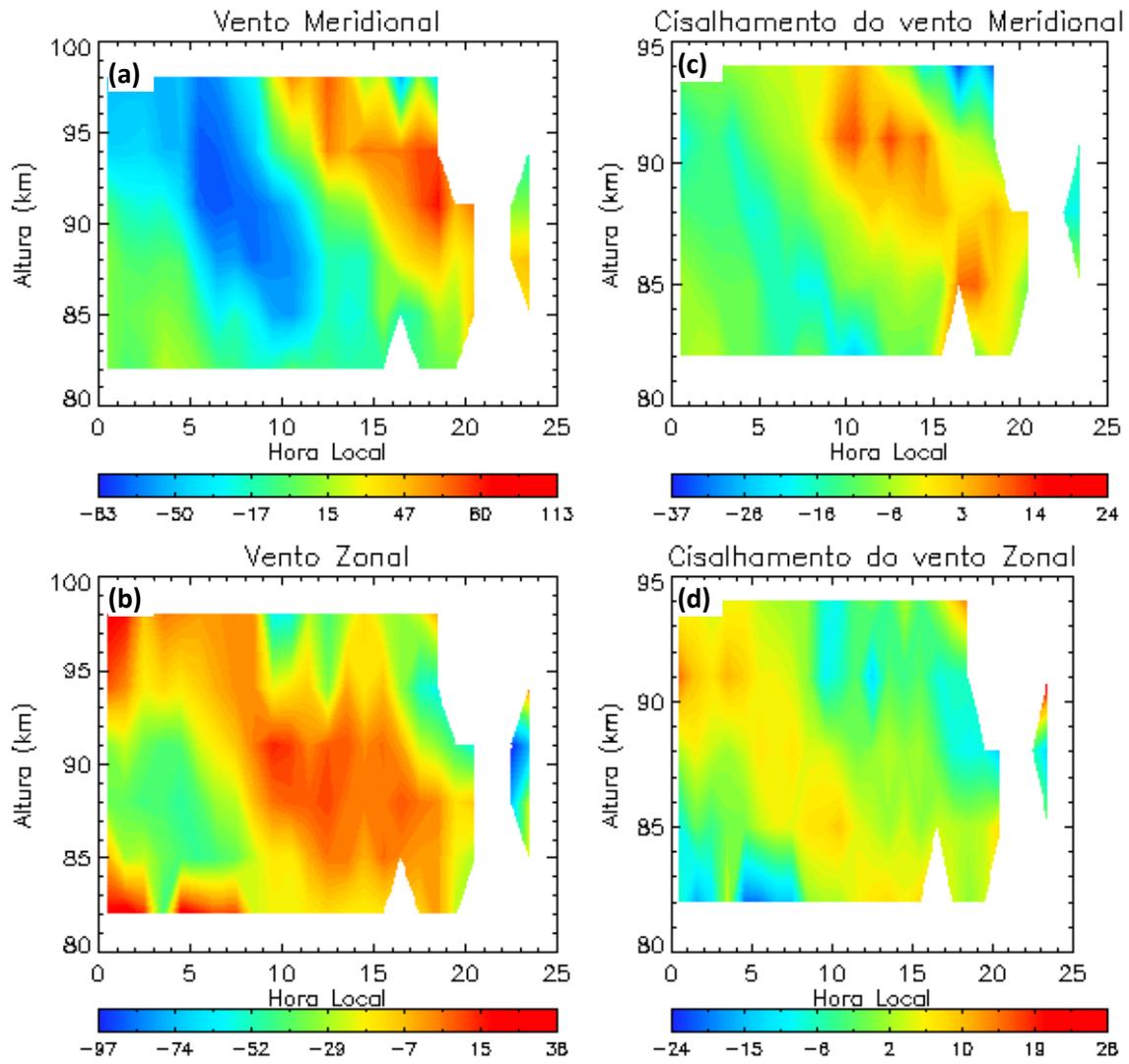


Figura 4.12 – (a) e (b) Gráficos de contorno da velocidade dos ventos horizontais e (c) e (d) intensidade do cisalhamento vertical dos ventos horizontais.

#### 4.4 Análise simultânea dos dados do lidar e imagens all-sky

O fenômeno das camadas esporádicas de sódio foi descoberto por Clemesha e colaboradores em 1978 (Clemesha et al., 1978), usando medidas de densidade obtidas por um radar de laser que emite pulsos de luz para a atmosfera que, ao atingirem a camada de sódio, são espalhados. O sinal que retorna à superfície fornece informações sobre a dinâmica da atmosfera em uma faixa de alturas entre aproximadamente 85 km e 105 km. No entanto, desde a descoberta das camadas esporádicas de sódio, nenhum estudo foi feito com a utilização de um instrumento ótico que pudesse ser capaz de fornecer informações sobre suas dimensões horizontais e seu local de geração. Batista et al. (1991) realizaram um experimento no qual, alterando a direção do feixe de laser, mediram a densidade do sódio em três pontos distintos no céu e estimaram o tamanho médio das camadas esporádicas de Sódio como sendo 615 km. No entanto, trata-se de uma estimativa, e isso foi feito considerando estruturas isotrópicas e cujo formato não se alteraria durante sua advecção de um ponto de medição ao outro.

Com o objetivo de obter informações sobre as dimensões horizontais e o local de geração das  $\text{Na}_s$ , foram analisadas medidas da emissão de airglow na linha do sódio mesosférico (589,3 nm), utilizando para este fim, um imageador all-sky instalado em Cachoeira Paulista, aproximadamente 110 km distante do sítio onde se encontra o radar de laser. O imageador possui um campo de visão de aproximadamente 2000 km para a emissão de sódio, o que torna sua utilização perfeitamente viável para observação da região de São José dos Campos. O imageador começou a operar em Maio de 2013 e encerrou sua operação em Junho de 2014. As especificações do equipamento estão descritas no capítulo 3 desta tese.

Para o estudo em questão, foi adotado o seguinte procedimento: primeiramente foi verificada, dentro do período de operação do imageador, a disponibilidade de dados do lidar para comparação. A série de dados do lidar, contendo informações sobre densidade do sódio mesosférico, foi então analisada, dia a dia, a fim de identificar as noites em que ocorreram camadas  $\text{Na}_s$  e suas características. Identificados os casos de camadas  $\text{Na}_s$ , foram separados apenas os casos em que a ocorrência se deu até 95 km. Uma vez que a camada de airglow depende da reação química com o Ozônio para ser

gerada (vide reação 1 no item 3.3.1 dessa tese), sua localização é em torno de 90 km. (abaixo do pico de concentração do sódio). A tabela 4 resume essa análise.

Tabela 4.2 - Análise das características das Na<sub>s</sub> com dados simultâneos de lidar e Imageador all-sky.

Nº	Data	Período de observação	Período de ocorrência das Na <sub>s</sub>	Altura (km)	Imagens com nuvens ou chuva (S/N)	Há variação significativa na intensidade do airglow (S/N)
1	10/05/2013	19:50 - 05:18	22:10 - 01:10	92 - 87	N	N
2	14/05/2013	19:40 - 01:43	23:21 - 01:39	98,5 - 94,5	N	N
3	15/05/2013	19:51 - 00:15	22:21 - 23:51	95 - 92,5	N	N
4	03/07/2013	18:27 - 04:27	19:05 - 20:59	95 - 92,5	N	N
5			23:53 - 04:27	95-91	N	N
6	04/07/2013	18:48 - 29:31	22:45 - 01:27	98-93	S	-
7	01/08/2013	18:25 - 05:30	00:10 - 04:08	96-93	N	N
8	09/08/2013	18:46 - 05:31	20:06-23:12	95-92	N	N
9	06/01/2014	20:37 -02:41	20:37-21:42	95-95	S	-
10			22:58-23:09	95	S	-
11	26/02/2014	19:26-04:21	20:19-01:19	92,5-92	S	-
12	08/04/2014	19:13-04:59	22:57-23:52	98-95	S	-
13			01:59-04:12	93-94,5	S	-
14	07/05/2014	19:21-03:49	19:21-22:47	96-92	S	-

Verificando novamente o gráfico da Figura 4.1, que mostra a estatística da localização do pico das camadas Na<sub>s</sub> em São José dos Campos, pode-se observar que as mesmas ocorrem com maior frequência entre 93 e 95 km, e mais raramente em torno de 90 km. Por outro lado, o curto período de observação simultânea reduz ainda mais a probabilidade de encontrar casos para estudo, sem contar as limitações de operação do imageador (céu limpo, Lua nova). Foi encontrado um único caso onde a camada esporádica de sódio ocorreu na faixa de 90 km, sendo seu pico alcançado em 90 km de altura, onde houve observações simultâneas de airglow e concentração de sódio. A Figura 4.13 ilustra uma sequência de perfis de sódio e a Figura 4.14 mostra um gráfico de contorno da densidade de sódio, que mostra a evolução da camada Na<sub>s</sub> ocorrida no dia 26 de Fevereiro de 2014.

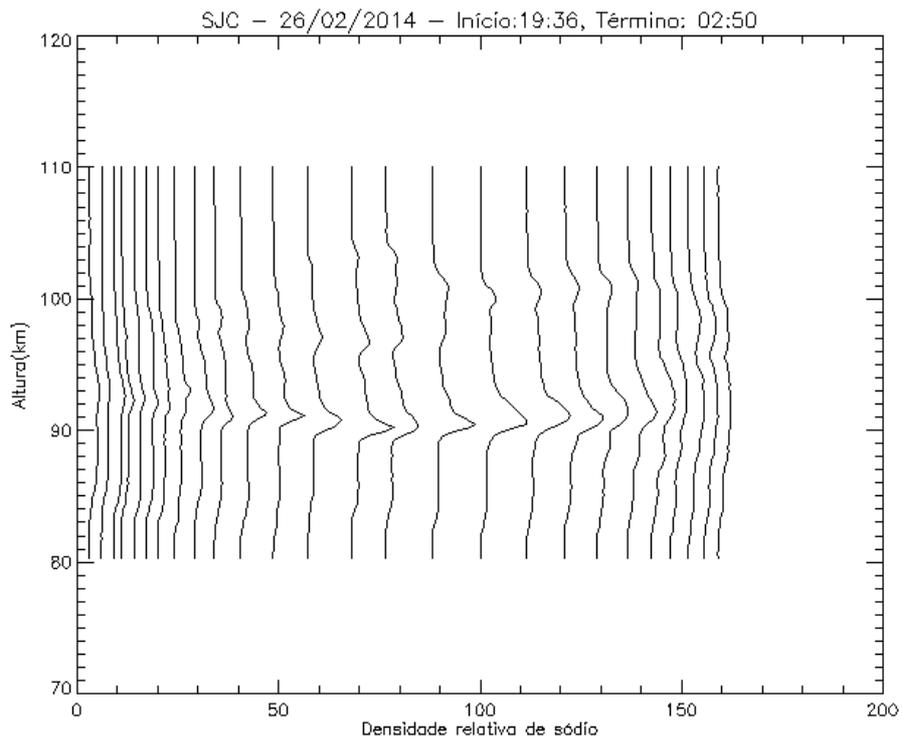


Figura 4.13 - Sequência dos perfis de sódio da noite de 26 de fevereiro de 2014.

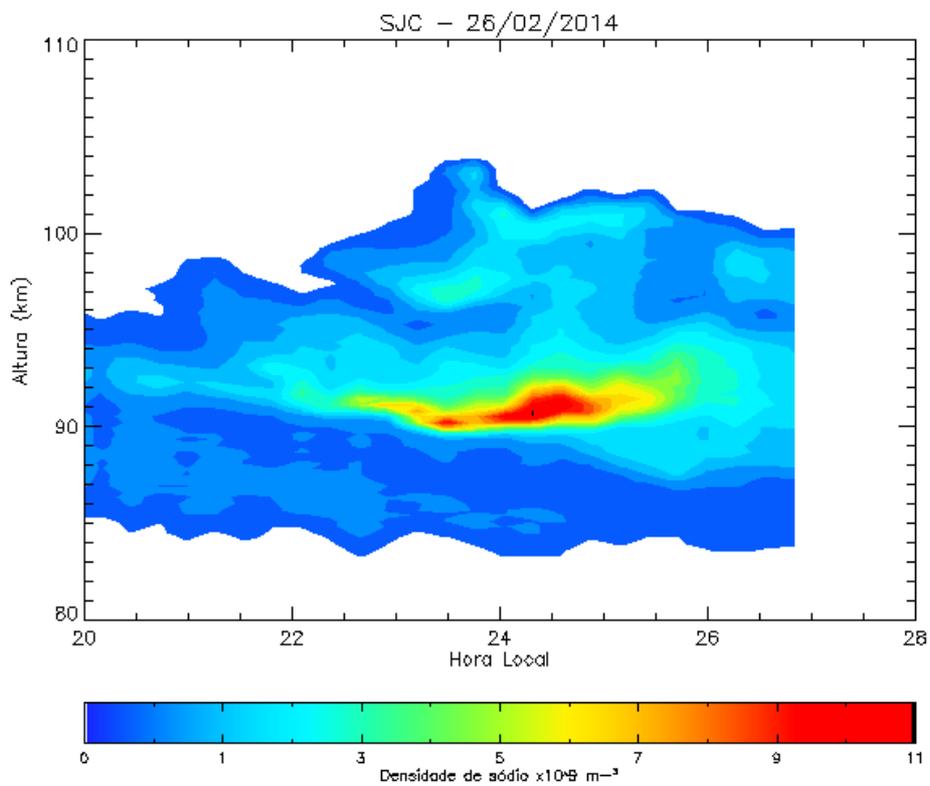


Figura 4.14 - Variação da concentração de sódio em função da altura e tempo em 26 de fevereiro de 2014.

Na Figura 4.15, é mostrada uma sequência de imagens da emissão de sódio, as quais foram linearizadas para remover os efeitos de curvatura da lente all-sky. Sua projeção mostra uma área de  $256 \times 256$  km<sup>2</sup> e da emissão de sódio foi subtraída a emissão de fundo (background), a fim de eliminar possíveis contaminações pelo OH. Uma vez que a intensidade da emissão de sódio é fraca (historicamente menor que 50 Rayleighs durante o mês de fevereiro – Figura 4.18), foram feitos Keogramas com o intuito de verificar possíveis variações na intensidade da emissão devido a ocorrência de camadas esporádicas de sódio. A Figura 4.16 mostra um keograma onde se manteve fixa a latitude de São José dos Campos, e plotou-se a variação de intensidade em longitude e tempo. Na Figura 4.17, foi mantida fixa a longitude de São José dos Campos e plotou-se a variação de intensidade em latitude e tempo. Os keogramas das figuras 4.16 e 4.17 não mostram variações significativas na intensidade da emissão que possam ser atribuídas à ocorrência de camadas esporádicas de sódio.

### Cachoeira Paulista – 26/02/2014

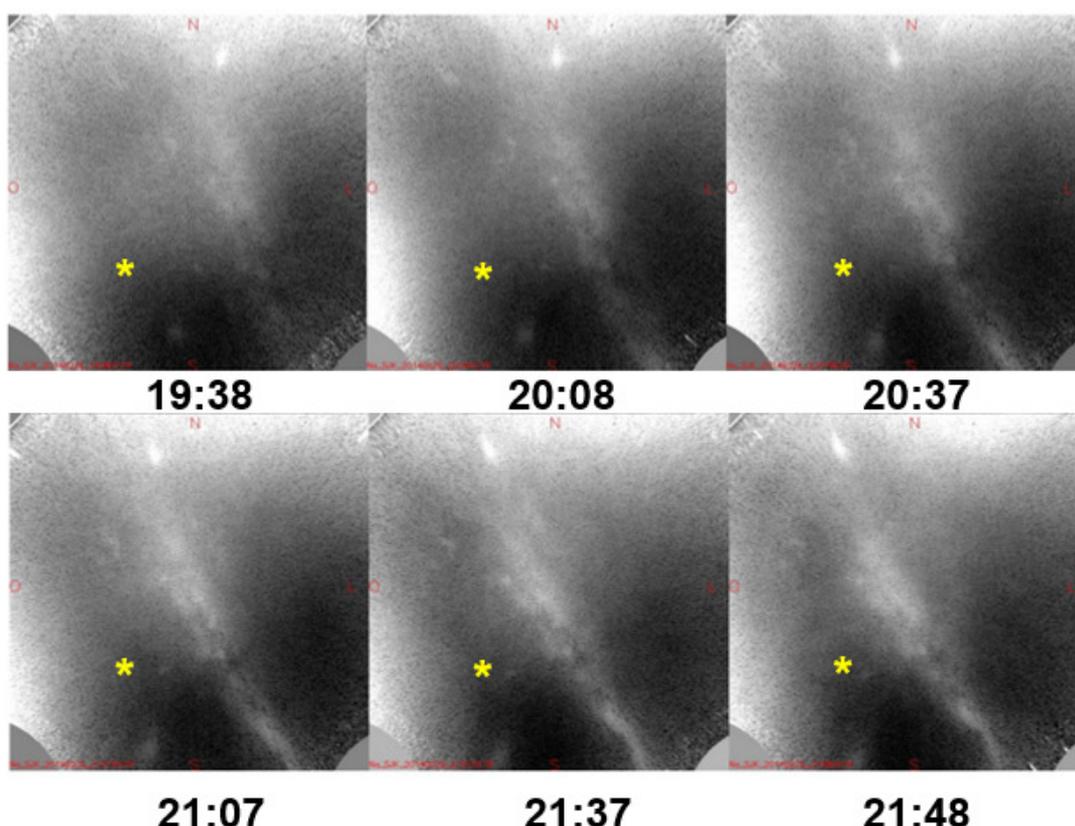


Figura 4.15 - Sequência de imagens de airglow da emissão de sódio em 26 de fevereiro de 2014.

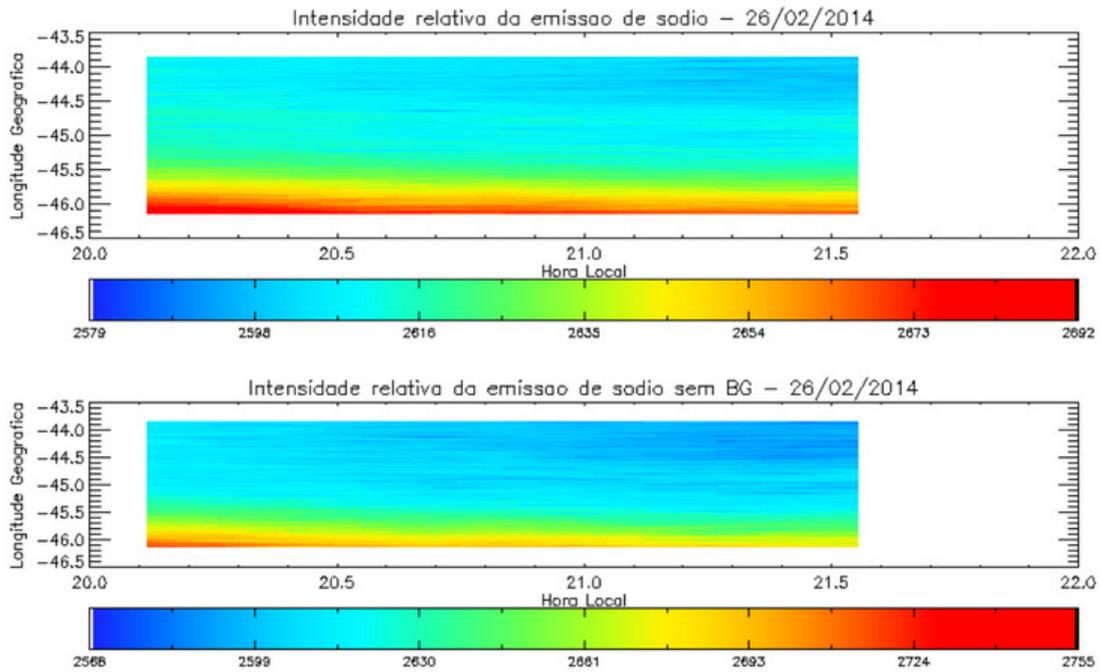


Figura 4.16 - Keograma mostrando a variação da emissão de sódio em longitude e tempo, mantendo-se fixa a latitude de São José dos Campos.

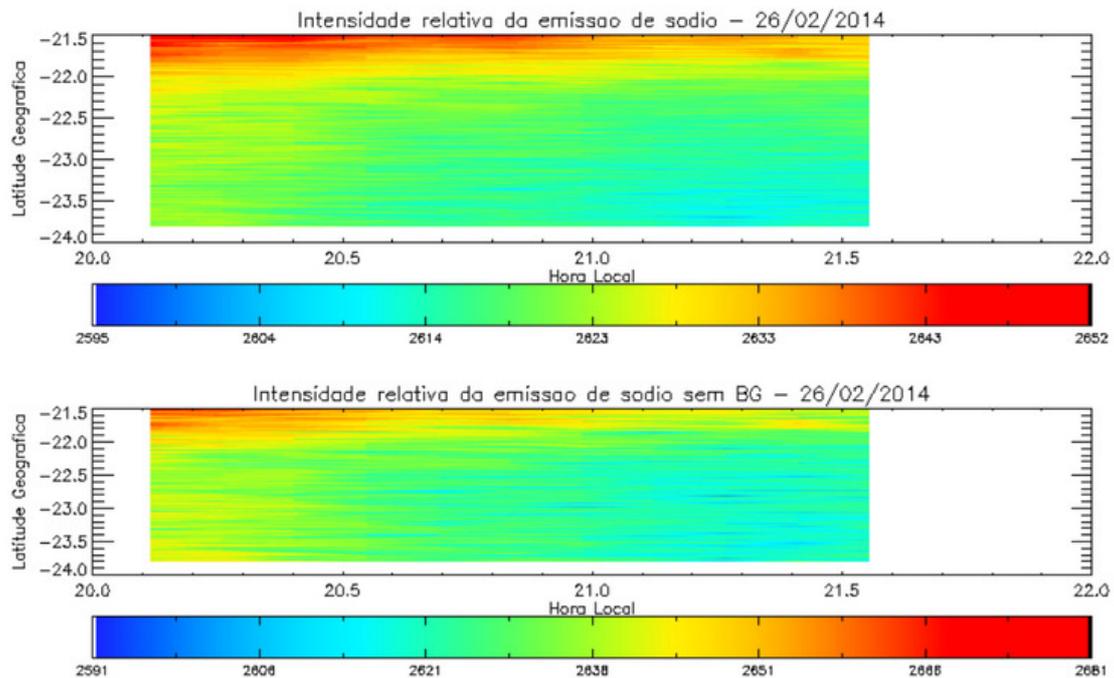


Figura 4.17 - Keograma mostrando a variação da emissão de sódio em latitude e tempo, mantendo-se fixa a longitude de São José dos Campos.

Infelizmente, nenhum padrão de irregularidade na emissão foi observado, o que não permitiu a análise das dimensões horizontais das camadas Na<sub>s</sub> e seu local de geração. A emissão de sódio mesosférico é muito fraca, entre 30 e 150 Rayleighs, e no mês de Fevereiro é relativamente menor, se comparada com algumas épocas do ano como em Abril e Maio e Novembro e Dezembro. O gráfico da Figura 4.18, adaptada do trabalho de Fukuyama (1977), mostra a variação sazonal da intensidade da emissão de sódio para algumas estações de diferentes latitudes. A estação de Haleakala (2ª curva no gráfico) fica em uma região de latitude baixa (20°43'N), e pode ser usada como parâmetro de comparação para a região em que o imageador se encontra. Além disso, foi feita uma análise da intensidade relativa da emissão de sódio para o período em que o imageador ficou em operação em Cachoeira Paulista e, apesar de ser para um curto período, os resultados obtidos coincidem com os de Fukuyama (1976). A Figura 4.19 mostra o resultado dessa análise.

### Variação sazonal da intensidade da emissão Na

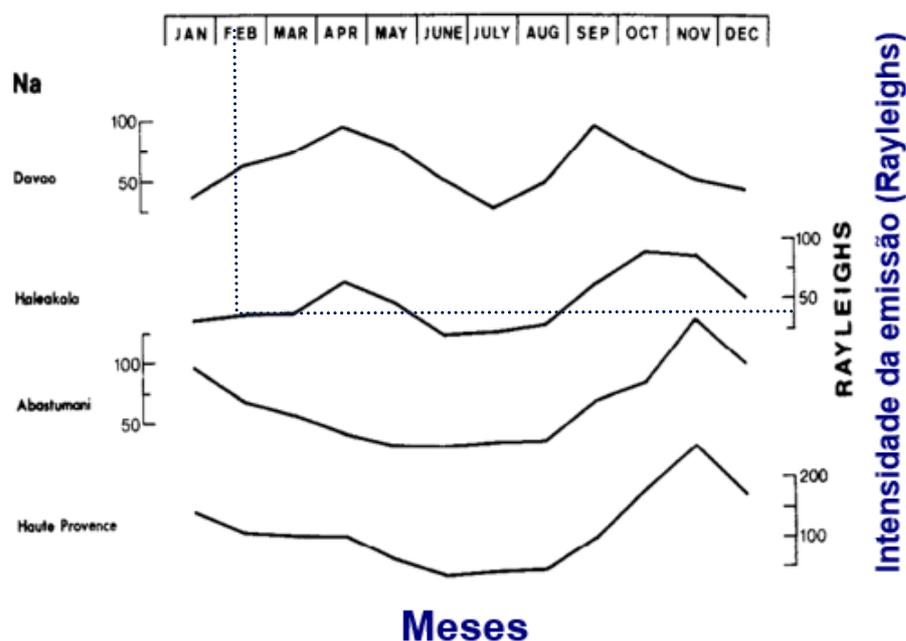


Figura 4.18 - Variação sazonal da emissão de sódio em quatro sítios de observação: Davao (7°N, 125,6°L), Haleakala (20,7°N, 156,3° O), Abastumani (41,7°N, 42,8°O) e Haute Provence (43,9°N, 5,7°L) . A linha pontilhada azul destaca o valor médio de intensidade para mês de fevereiro em Haleakala, região de baixa latitude.

FONTE: Fukuyama et al., 1977.

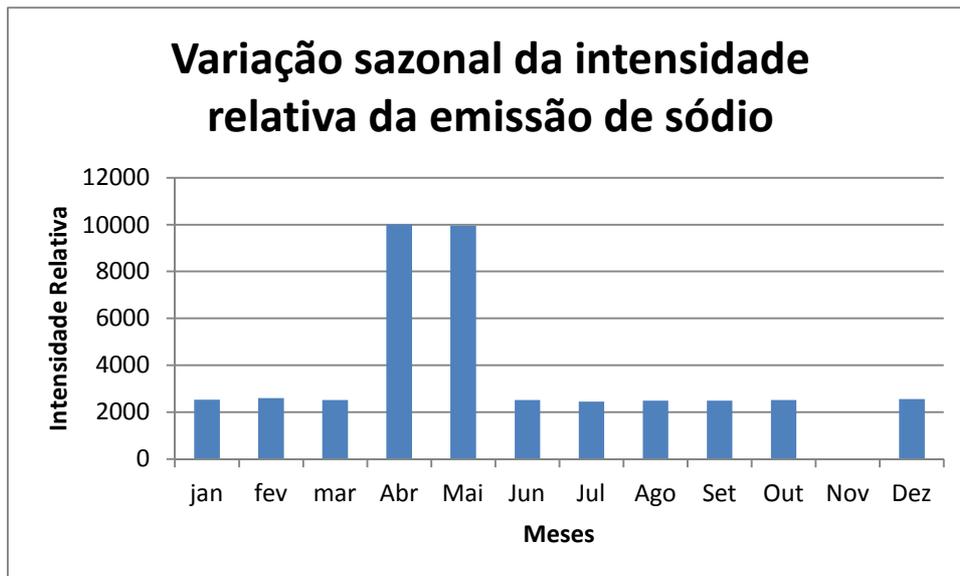


Figura 4.19 - Variação sazonal da intensidade da emissão de sódio para a região de São José dos Campos. Para o mês de Novembro não havia dados suficientes para qualquer análise.

A observação de camadas  $\text{Na}_s$  através de medidas de airglow já foram feitas anteriormente, o que motivou a realização de um novo estudo para essa tese, apesar das condições para observações serem restritas. Clemesha et al.(1980) observaram variações na intensidade do airglow na linha NaD durante um evento de camada esporádica, porém, o instrumento utilizado, um fotômetro, mostra variações na intensidade da emissão em um determinado ponto e não fornece um panorama dentro de um campo de visão horizontal extenso como o imageador all-sky. Porém, as limitações do instrumento, aliado ao seu curto período de funcionamento, impediram que o estudo atual fosse desenvolvido com sucesso. Contudo, recomenda-se fortemente que estudos posteriores sejam feitos com a utilização de um banco de dados mais extenso.



## 5 SUMÁRIO E CONCLUSÕES

Os principais resultados obtidos através da análise de dados podem ser sumarizados conforme segue:

- O estudo estatístico comparativo, feito ao longo de um período de 8 anos, mostrou características comuns às duas regiões de latitudes diferentes. Características como altura preferencial de ocorrência, horário preferencial de ocorrência, largura a meia altura e fator de intensidade concordam bem em ambas as regiões. O estudo da variação sazonal, no entanto, mostrou que em Wuhan há um pico de ocorrência nos meses de verão, o que não foi observado em São José dos Campos. Comparando com estudos da mesma espécie, feitos por outros grupos de pesquisa, verificou-se que o pico de ocorrência no verão não é exclusividade de Wuhan. Além disso, as condições atmosféricas para a formação de  $\text{Na}_s$  pelo mecanismo de neutralização dos íons de sódio, são mais propícias no verão, o que justifica as altas taxas de ocorrência relatadas. No Brasil, o verão é chuvoso e o número de observações diminui consideravelmente nessa época do ano. Acredita-se que esse seja o motivo pelo qual a variação sazonal difere das demais regiões.
- A análise simultânea de ionogramas da ionossonda CADI e dados do lidar, mostra alta correlação entre ocorrência de  $\text{Na}_s$  e  $E_s$  (70%), o que sugere o mecanismo de neutralização como sendo responsável pela geração de  $\text{Na}_s$ . Devido a limitação da ionossonda, não foi possível calcular a velocidade de descida das camadas  $E_s$  para comparar com as velocidades de descida das  $\text{Na}_s$ . No caso de correlação entre as velocidades de descida, mais forte seria o indício de que o mecanismo de neutralização é o responsável pela geração das  $\text{Na}_s$ .
- A análise simultânea dos dados de ventos e lidar mostraram correlação com o cisalhamento de ventos, ou seja, observa-se a ocorrência de cisalhamento de ventos antes ou durante os eventos de  $\text{Na}_s$ . Já a

comparação com as velocidades de descida da maré diurna e semidiurna foi inconclusiva. A literatura mostra que as ondas de gravidade desempenham um papel importante na dinâmica da atmosfera neutra e ionizada na região MLT, contudo, no presente trabalho, não foram consideradas as contribuições devido às mesmas.

- A análise simultânea de dados do lidar e imagens all-sky, que era o objetivo principal deste trabalho, também foi inconclusiva. O período de observação foi curto (1 ano), visto que a emissão de sódio ocorre em uma região onde raramente se observa eventos de  $\text{Na}_s$  (~90 km). Durante o período de observação, apenas 1 evento nessa altura foi registrado nos dados do lidar, porém não foram verificadas variações na emissão de sódio. Foi feita uma análise da variação da emissão durante o período observado, a fim de verificar possíveis problemas de calibração do instrumento. Contudo, foi observado que esse não era o problema, porém a época do ano em que foi registrado o evento coincidiu com uma época em que a emissão de sódio atinge os menores valores de intensidade, o que justifica tal resultado. Acredita-se que, com uma base de dados maior, possivelmente se fará a análise das dimensões horizontais e local de geração das  $\text{Na}_s$ .
- Para trabalhos futuros, recomenda-se fortemente a continuação do estudo da emissão de sódio. Com um banco de dados mais extenso, maior é a probabilidade de ocorrência de eventos simultâneos e, conseqüentemente, será possível estudar as dimensões horizontais e o local de geração das camadas esporádicas de sódio.
- Recomenda-se também um estudo da atividade de ondas de gravidade durante eventos de  $\text{Na}_s$ . Técnicas utilizando cálculos de variância e fluxo de momento fornecem um panorama da atividade de ondas de gravidade em diferentes espectros.

- Embora ainda permaneçam em aberto algumas questões, os resultados aqui apresentados apontam o mecanismo de neutralização dos íons de sódio presentes nas camadas  $E_s$  como sendo responsável pela geração das camadas  $Na_s$ . A alta correlação entre camadas  $E_s$  e  $Na_s$  e alta correlação com cisalhamento de ventos reforça essa conclusão.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDU, M.A, BATISTA, I.S. Sporadic E-layer phenomena in the Brazilian geomagnetic anomaly: evidence for a regular particle ionization source. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.39, n.6, p.723-731. Julho 1977.
- AMORIM, D.C.M. **Caracterização de distúrbios ionosféricos propagantes na região de baixas latitudes no setor brasileiro associados à instabilidade de plasma Perkins gerada em médias latitudes**. 2010. 108p. (INPE-16667-TDI/1620). Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial – INPE, São José dos Campos. 2010.
- ANDRIOLI, V. F. **Variância e fluxo de momento devidos às ondas de gravidade na região MLT**. 2012. 151p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/07.10.14.17-TDI). Tese de Doutorado em Geofísica Espacial – INPE, São José dos Campos, 2012.
- ASTRONOMY.ORG. **Earth-Weather**. Disponível em: <<http://astronomyonline.org/SolarSystem/EarthWeather.asp>> . Acesso em: 30 mar. 2015.
- BATISTA, P. P., CLEMESHA, B. R., SIMONICH, D. M. Characteristics of the sporadic sodium layers observed at 23°S. **J. Geophysical Research Letters**,v. 94, n.11, p.15349– 15358, Novembro 1989.
- BATISTA, P. P.; CLEMESHA, B. R., SIMONICH, D. M. Seasonal variations in mesospheric tidal activity. **Journal of Geophysical Research**, v.95, n. D6. p.7435-7442, Maio 1990.
- BATISTA, P.P., CLEMESHA, B.R., SIMONICH, D.M. Horizontal structures in sporadic sodium layers at 23°S. **Geophysical Research Letters**, v. 18, n.6, p.1027–1030, Julho 1991.
- CHAPMAN, S. Notes on atmospheric sodium. **Astrophysical Journal**, v.90, p.309-316, 1939.
- CLEMESHA B. R. Sporadic neutral metal layers in the mesosphere and lower thermosphere. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.57, n.7, p.725-736, Junho 1995.
- CLEMESHA, B. R., BATISTA, P. P., SIMONICH, D. M. Concerning the origin of enhanced sodium layers. **Geophysical Research Letters**, v.15, n.11, 1267–1270, Outubro 1988.
- CLEMESHA, B. R., KIRCHHOFF, V.W. J. H., SIMONICH, D. M., TAKAHASHI, H. Evidence of an extra-terrestrial source for the mesospheric sodium layer. **Geophysical Research Letters**, v.5, n.10, p.873–876, Outubro 1978.
- CLEMESHA, B. R., KIRCHHOFF, V.W. J. H., SIMONICH, D. M., TAKAHASHI, H., BATISTA, P. P. Spaced lidar and nightglow observations of an atmospheric sodium

enhancement. **Journal of Geophysical Research**, v. 85, n. A7, p. 3480–3484, Julho 1980.

CLEMESHA, B.R., SIMONICH, D.M., TAKAHASHI, H., MELO, S.M.L. A simultaneous measurement of the vertical profiles of sodium nightglow and atomic sodium density in the upper atmosphere. **Geophysical Research Letters**, v.20, n.13, p.1347-1350, Julho 1993.

CLEMESHA, B. R., SIMONICH, D. M., BATISTA, P. P., TAKAHASHI, H. Seasonal variation in the solar diurnal tide and its possible influence on the atmospheric sodium layer. **Advances in Space Research**, v. 35, n.11, p.1951-1956, 2005.

CLEMESHA, B.R., SIMONICH, D.M., BATISTA, P.P. Sodium lidar measurements of mesopause region temperatures at 23° S. **Advances in Space Research**, v.47, n.7, p.1165–1171, Abril 2011.

COLLINS, S.C., PLANE, J.M.C., GERRARD, A.J., GRIME, B.W., ROLLASON, R.J., FRIEDMAN, J.S., GONZALEZ, S.A., ZHOU, Q., SULZER, M.P., TEPLY, C.A. A study of the role of ion–molecule chemistry in the formation of sporadic sodium layers. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.64, n.7, p.845-860, Maio 2002.

COX, R.M., PLANE, J.M.C., GREEN, J.S.A. A modeling investigation of sudden sodium layers. **Geophysical Research Letters**, v.20, n.24, p.2841-2844. Dezembro 1993.

COX, R.M., PLANE, J.M.C. An ion–molecule mechanism for the formation of neutral sporadic Na layers. **Journal of Geophysical Research**, v.103, n.D6, p.6349–6360. Março 1998.

FERNANDES, F.T. **Medidas simultâneas de temperatura na mesosfera superior através de radar de laser e luminescência atmosférica em baixas latitudes no setor brasileiro**. 2009. 152p. (INPE-16583-TDI/1572). Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial – INPE, São José dos Campos. 2009.

FRICKE, K.H., VON ZAHN, U. Mesopause temperatures derived from probing the hyperfine structure of the D<sub>2</sub> resonance line of sodium by lidar. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.47, n.5, p.499–512, Maio 1985.

FRITTS, D. C., WILLIAMS, B. P., SHE, C. Y., VANCE, J. D., RAPP, M., LÜBKEN, F.-J., MÜLLEMANN, A., SCHMIDLIN, F. J., GOLDBERG, R. A. Observations of extreme temperature and wind gradients near the summer mesopause during the MaCWAVE/MIDAS rocket campaign. **Geophysical Research Letters**, v.31, n.24, Dezembro 2004.

FUKUYAMA. K. Airglow variations and dynamics in the lower thermosphere and upper mesosphere-II. Seasonal and long-term variations. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.39, n.1, p.1-14, Janeiro 1977.

- GARCIA, R. R., SOLOMON, S. The effect of breaking waves on the dynamics and chemical composition of the mesosphere and lower thermosphere. **Journal of Geophysical Research**, v.90, n.D2, p.3850–3868. Abril 1985.
- GARCIA, R. R., SOLOMON, S. A new numerical model of the middle atmosphere, 2, Ozone and related species. **Journal of Geophysical Research**. v.99, n.D6, p.12937–12951. Junho 1994.
- GARDNER, C. S., SENFT, D. C., KWON, K. H. lidar observations of a substantial sodium depletion in the summertime Arctic mesosphere. **Nature**, v.332, p.142–144, Março 1988.
- GARDNER, C. S., TAO, X., PAPEN, G. C. Observations of strong wind shears and temperature enhancement during several sporadic Na layer events above Haleakala. **Geophysical Research Letters**, v.22, n.20, p.2809–2812, Outubro 1995.
- GARDNER, C., KANE, T., SENFT, D., QIAN, J., PAPEN, G. Simultaneous Observations of Sporadic E, Na, Fe, and Ca<sup>+</sup> Layers at Urbana, Illinois: Three Case Studies. **Journal of Geophysical Research**, v.98, n.D9, p.16865-16873, Setembro 1993.
- GONG, S.S., YANG, G.T., WANG, J.M., LIU, B.M., CHENG, X.W., XU, J.Y., WAN, W.X. Occurrence and characteristics of sporadic sodium layer observed by lidar at a mid-latitude location. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.64, n.18, p.1957–1966, Dezembro 2002.
- HALDOUPIS, C., PANCHEVA, D., SINGER, W., MEEK, C., MACDOUGALL, J. An explanation for the seasonal dependence of midlatitude sporadic E layers. **Journal of Geophysical Research**, v.112, n. A6. Junho 2007.
- HANSEN, G., VON ZAHN, U. Sudden sodium layers in polar latitudes. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.52, n.6-8, p.585–608, Junho-Agosto 1990.
- HAPGOOD, M.A., TAYLOR, M.J. Analysis of airglow image data. **Annales Geophysicae**, v.38, n.6, p.805-813, 1982.
- HARGREAVES, J. K. **Solar-terrestrial environment an introduction to geospace - the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere.** - Cambridge, England: Cambridge University, 1992. 420300207 ISBN 0-521-42737-1.
- HELMER, M., PLANE, J.M.C. A study of the reaction  $\text{NaO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{NaO} + \text{O}_2$ : Implications for the chemistry of sodium in the upper atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, v.8, n.D12, p.23207-23222, Dezembro 2003.
- JORGE, M.P.P.M. **O perfil de temperatura na região da mesopausa em São José dos Campos (23°S, 46°O) obtido com radar de laser.** 1996. 136p.(INPE-6130-TDI/589). Tese de Doutorado em Geofísica Espacial - INPE, São José dos Campos, 1996.

KANE, T. J., HOSTETLER, C. A., GARDNER, C. S. Horizontal and vertical structure of the major sporadic sodium layer events observed during the ALOHA-90 campaign. **Geophysical Research Letters**, v.18, p.1365- 1368, 1991.

KANE, T. J., GARDNER, C. S., ZHOU, Q., MATHEW, J. D., TEPLEY, C. A. lidar, radar and airglow observations of a prominent sporadic Na/sporadic E layer event at Arecibo during AIDA-89. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.55, n.3, p.499–511, Março 1993.

KWON, K. H., SENFT, D. C., GARDNER, C. S. lidar observations of sporadic sodium layers at Mauna Kea Observatory, Hawaii. **Journal of Geophysical Research**, v.93, n.14, p.199–14,208, Novembro 1988.

LIMA, L.M. **Observações de ondas planetárias na região da mesopausa equatorial e de baixas latitudes do hemisfério sul**. 2004. 245p. (INPE-12346-TDI/995). Tese de Doutorado em Geofísica Espacial – INPE, São José dos Campos, 2004.

MAEKAWA, R. **Observations of gravity waves in the mesopause region by multicolor airglow imaging**. 64 p. Dissertação de Mestrado — Kyoto University, 2000.

MATHEWS, J. D. Sporadic E: Current views and recent progress. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.60, n.4, p.413–435, Março 1998.

MEASURES, R. M. **Laser remote sensing fundamentals and applications**. New York, Ny: John Wiley & Sons, 1984. 51089239 ISBN 0-471-08193-0

MÉGIE, G., BLAMONT, J.E. Laser sounding of atmospheric sodium interpretation in terms of global atmospheric parameters. **Planetary and Space Science**, v.25, n.12, p.1093-1109. Dezembro 1977.

MÉGIE, G. Laser measurements of atmospheric trace constituents. In: \_\_\_\_\_. **Laser remote chemical analysis by measures**, 1988. cap. 5.

MIYAGAWA, H., NAKAMURA, T., TSUDA, T., ABO, M., NAGAWAWA, C., KAWAHARA, T.D., KOBAYASHI, K., KITAHARA, T., NOMURA, A. Observations of mesospheric sporadic sodium layers with the MU radar and sodium lidars. **Earth, Planets and Space**, v.51, n.7-8, p.785–797, Julho 1999.

MOOR, L.P. **Estudo das irregularidades ionosféricas da região F durante um período de atividade solar mínima**. 2011. 161p. Dissertação de mestrado em física e astronomia – UNIVAP, São José dos Campos, 2011.

MUELLA, M. T. DE A. H. **Ventos termosféricos meridionais inferidos por meio de sondagens ionosféricas**. 2004. 215 p. (INPE-14201-TDI/1102). Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial - INPE, São José dos Campos, 2004.

NAGASAWA, C., ABO, M. lidar observations of a lot of sporadic sodium layers in mid-latitude. **Geophysical Research Letters**, v.22, n.3, p.263–266, Fevereiro 1995.

O'SULLIVAN, C., REDFERN, R.M., AGEORGES, N., HOLSTENBERG, H.-C., HACKENBERG, W., OTT, T., RABIEN, S., DAVIES, R., ECKART, A. Short timescale variability of the mesospheric sodium layer. **Experimental Astronomy**, v.10, n.1, p.147–156, Abril 2000.

PILLAT, V.G.; GUIMARÃES, L.N.F. Identificação de traços ionosféricos em ionogramas para ionossondas localizadas em baixas latitudes e região equatorial utilizando lógica nebulosa. In: Workshop de Computação Aplicada, 12, 2012, São José dos Campos. São José dos Campos: INPE, 2012. Disponível em: <[http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18/2013/01.07.11.44/doc/worcap2012\\_submission\\_3%20-%20Valdir%20Gil%20Pillat.pdf?metadataarepository=&mirror=iconet.com.br/banon/2005/09.28.12.40](http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18/2013/01.07.11.44/doc/worcap2012_submission_3%20-%20Valdir%20Gil%20Pillat.pdf?metadataarepository=&mirror=iconet.com.br/banon/2005/09.28.12.40)>. Acesso em 08 dez. 2014.

PIMENTA, A. A. **Estudos da deriva zonal e dinâmica das bolhas de plasma na região tropical**. 2002. 194p. (INPE-9546-TDI/827). Tese de Doutorado em Geofísica Espacial – INPE, São José dos Campos, 2002.

PLANE, J. M. C. Atmospheric chemistry of meteoric metals. **Chemical Reviews**, v.103, n.12, p.4963–4984, Outubro 2003.

PRINCETON INSTRUMENTS. **PIXIS System Manual**. Trenton, NJ: Princeton Instruments. 2013. 134p.

QIAN, J., GU, Y., GARDNER, C. S. Characteristics of the sporadic Na layers observed during the ALOHA/ANLC-93 campaigns. **Journal of Geophysical Research**, v.103, n.D6, p. 6333–6347, Março 1998.

RESENDE, L.C.A. **Estudo do comportamento dos parâmetros de frequência das camadas E<sub>s</sub> na região equatorial durante períodos perturbados**. 2010. 140p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/08.17.14.45-TDI). Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial – INPE, São José dos Campos. 2010.

SENF, D. C., COLLINS, R. L., GARDNER, C.S. Mid-latitude lidar observations of large sporadic sodium layers. **Geophysical Research Letters**, v.16, n.7, p.715-718, Julho 1989.

SHE, C.Y.; YU, J.R. Doppler-free saturation fluorescence spectroscopy of Na atoms for atmospheric application. **Applied Optics**, v.34, n.6, p.1063-1075, 1995.

SLIPHER V.M. Emissions in the spectrum of the light of the night sky. **Popular Astronomy**, v.37, p.327, 1929.

SMITH, A.K. Global Dynamics of the MLT. **Surveys in Geophysics**, v.33, n.6, p.1177-1230, Novembro 2012.

TAKAHASHI, H., CLEMESHA, B. R., BATISTA, P. P. Predominant semiannual oscillation of the upper mesospheric airglow intensities and temperatures in the

equatorial region. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.57, n.4, p.407 – 414, Março 1995.

THOMAS, L., ISHERWOOD, M. C., BOWMAN, M. R. A theoretical study of the height distribution of sodium in the mesosphere. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.45, n.8-9, p.587–594. Agosto - Setembro 1983.

TOKUMOTO, A.S. **Variabilidade de maré diurna na região de 80-100 km de altitude sobre Cachoeira Paulista (22,7° S; 45° O)**. 2007. 163p. (INPE-14805-TDI/1248). Tese de Doutorado em Geofísica Espacial – INPE, São José dos Campos, 2007.

VON ZAHN, U., HANSEN, T.L. Sudden neutral sodium layers: a strong link to sporadic E layers. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.50, n.2, p.93–104, Fevereiro 1988.

VON ZAHN, U., VON DER GATHEN, P., HANSEN, G. Forced release of sodium from upper atmospheric dust particles. **Geophysical Research Letters**, v.14, n.1, p.76–79, Janeiro 1987.

VON ZAHN, U., HOFFNER, J., MCNEIL, W. J. Meteor trails as observed by lidar. In: \_\_\_\_\_. **Meteors in the Earth's Atmosphere**. Edited by Murad, E. and Williams, I. P., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 149–187, 2002

ZHOU, Q., MATHEWS, J. D., TEPLEY, C. A. A proposed temperature dependent mechanism for the formation of sporadic sodium layers. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.55, n.3, p.513–521, Março 1993.

WHITEHEAD, J. Production and prediction of sporadic E. **Reviews of geophysics and space physics**, v. 8, n. 1, p.65-144, Fevereiro 1970.

WHITEHEAD, J. D. Recent work on midlatitude and equatorial sporadic E. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.51, n.5, p. 401-424. Maio 1989.

WILLIAMS, B. P., BERKEY, F. T., SHERMAN, J., SHE, C. Y. Coincident extremely large sporadic sodium and sporadic E layers observed in the lower thermosphere over Colorado and Utah. **Annales Geophysicae**, v.25, p.3-8. Março 2007.

WRASSE, C. M. **Estudos de geração e propagação de ondas de gravidade atmosféricas**. 2004. 253 p. (INPE-12249-TDI/978). Tese de Doutorado em Geofísica Espacial - INPE, São José dos Campos. 2004.

YUAN, T. , WANG, J., CAI, X., SOJKA, J., RICE, D., OBERHEIDE, J., CRIDDLE, N. Investigation of the seasonal and local time variations of the high-altitude sporadic Na layer (Na<sub>s</sub>) formation and the associated midlatitude descending E layer (E<sub>s</sub>) in lower E region. **Journal of Geophysical Research**, v.119, n.7, p.5985–5999, Julho 2014.