



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/11.20.16.23-TDI

ESTUDO GLOBAL DA MARÉ LUNAR NA MÉDIA ATMOSFERA ATRAVÉS DE MEDIDAS POR SATÉLITE

Ana Roberta da Silva Paulino

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Paulo Prado Batista, e Inez Staciarini Batista, aprovada em 16 de dezembro de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3F94LME>>

INPE
São José dos Campos
2013

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

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

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

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

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

Dr^a 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)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/11.20.16.23-TDI

ESTUDO GLOBAL DA MARÉ LUNAR NA MÉDIA ATMOSFERA ATRAVÉS DE MEDIDAS POR SATÉLITE

Ana Roberta da Silva Paulino

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Paulo Prado Batista, e Inez Staciarini Batista, aprovada em 16 de dezembro de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3F94LME>>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Paulino, Ana Roberta da Silva.

P285e Estudo global da maré lunar na média atmosfera através de medidas por satélite / Ana Roberta da Silva Paulino. – São José dos Campos : INPE, 2013.

xxiv + 186 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/11.20.16.23-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Drs. Paulo Prado Batista, e Inez Staciarini Batista.

1. maré lunar. 2. média atmosfera. 3. SABER. I.Título.

CDU 551.511.3

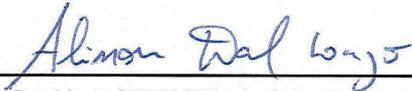


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

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

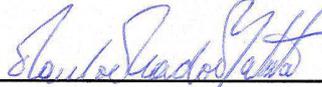
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas

Dr. Alisson Dal Lago



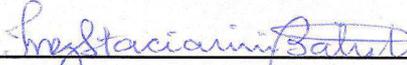
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Paulo Prado Batista



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Inez Staciarini Batista



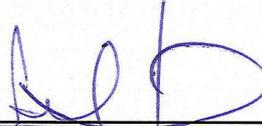
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Barclay Robert Clemesha



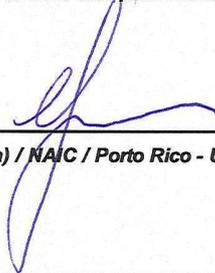
Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Lourivaldo Mota Lima



Convidado(a) / UEPB / Campina Grande - PB

Dr. Christiano Garnett Marques Brum



Convidado(a) / NAIC / Porto Rico - USA

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(✓) unanimidade

Aluno (a): **Ana Roberta da Silva Paulino**

São José dos Campos, 16 de Dezembro de 2013

*Ao meu esposo Igo, a meus pais Socorro e Roberto e a meus
irmãos Roxalva, Renan e Renato*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores, Dr. Paulo Prado Batista e Dra. Inez Staciarini Batista, pela confiança e pela dedicação na construção de cada etapa deste trabalho.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de pesquisa para o desenvolvimento deste trabalho de tese.

Agradeço à NASA, ao Laboratory Applied Physics da Johns Hopkins University, à equipe da missão TIMED pelo fornecimento dos dados do instrumento SABER/TIMED.

Agradeço ao programa de pós-graduação em Geofísica Espacial do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelas oportunidades.

Agradeço ao banco de dados do CEDAR, em especial à Dra. Barbara Emery, por gentilmente, fornecer os dados do modelo Vial e Forbes (1994) para a Maré Atmosférica Semidiurna Lunar.

RESUMO

Utilizando dez anos de medidas de temperatura fornecidas pelo instrumento SABER/TIMED é possível estudar a maré semidiurna lunar desde 20 km até 120 km. As amplitudes e fases no campo de temperatura são calculadas aplicando o ajuste de mínimos quadrados no conjunto de dados de aproximadamente 60 dias (combinando os dados obtidos na órbita ascendente e descendente do satélite). A assinatura da maré semidiurna lunar na temperatura é estudada para o intervalo de altitude entre 20 km e 120 km, no intervalo de latitude entre 50° S e 50° N e centrada em cada mês para o período entre fevereiro de 2002 e janeiro de 2012. Uma clara assinatura de uma onda de 12,42 h, correspondente a maré semidiurna lunar, é observada nos dados. Características de uma onda verticalmente propagante para cima é observada nos perfis verticais de amplitude e fase para praticamente todas as altitudes. As melhores condições de propagação para a maré semidiurna lunar são obtidas na região da baixa termosfera. Um comportamento assimétrico entre os hemisférios e uma variabilidade sazonal são observados na amplitude desta oscilação. Além disso, variações longitudinais são observadas indicando a presença de componentes não migrantes.

GLOBAL STUDY OF THE LUNAR TIDE IN THE MIDDLE ATMOSPHERE BY SATELLITE MEASUREMENTS

ABSTRACT

Atmospheric lunar semidiurnal tides are studied using ten years of temperature data collected by the TIMED/SABER satellite. The amplitudes and phases in the temperature field are calculated by performing a least mean square fit to a dataset of about 60-day interval (combining ascending and descending data together). The mean tidal structures are studied for the height range from 20 km to 120 km, between $\pm 50^\circ$ latitude, and centered on each month from February 2002 to January 2012. A clear signature of the 12,42 h lunar semidiurnal tide is observed in the data. Characteristics of propagating waves are observed in the vertical amplitude and phase profiles at almost all heights. The best conditions of propagation for the lunar semidiurnal tide are reached in the lower thermosphere region. Asymmetry between the hemispheres and seasonal variability is observed in the amplitudes of the tide. Longitudinal variations are also observed, which reveals the existence of non-migrating components in addition to the dominant migrating lunar tide.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Geometria utilizada para o cálculo do potencial de maré. O é o centro da Terra, C é o centro da Lua ou do Sol.	15
2.2 Amplitude média da maré semidiurna lunar na pressão de superfície para diferentes números de onda zonal.	20
2.3 Decomposição em modos de Hough da amplitude e fase da maré semidiurna lunar na temperatura devido a forçante gravitacional.	21
2.4 Estruturas verticas da amplitude (esquerda) e fase (direita) para a maré semidiurna lunar na temperatura nos meses de equinócio para 0° , 18° , 42° e 60° de latitude.	22
2.5 Variação da amplitude (a) e fase (b) da maré lunar no vento zonal para 90 km em junho. A linha sólida designa a variação com vento de fundo e temperatura normais, a linha tracejada curta sem variação de temperatura com a latitude e a linha tracejada longa sem a presença do vento.	23
2.6 Variação da amplitude no vento zonal (esquerda) e meridional (direita) como função da latitude em 90 km de altitude em janeiro.	24
2.7 Variação sazonal da maré semidiurna lunar no campo de vento para a altitude de 93 km no ano de 2005 para São João do Cariri (painel superior), Cachoeira Paulista (painel central) e Santa Maria (painel inferior). As amplitudes são mostradas no painel do lado esquerdo e a fase no painel do lado direito.	27
2.8 Intensificação da amplitude da maré semidiurna lunar durante o aquecimento estratosférico de 2006. As amplitudes da maré semidiurna lunar são mostradas para São João do Cariri - componente meridional 84 km (a) e componente zonal 96 km (d), Cachoeira Paulista - componente meridional 87 km (b) e componente zonal 96 km (e) e Santa Maria - componente meridional 84 km (c) e componente zonal 96 km (f)	28
3.1 Concepção artística do satélite TIMED.	32
3.2 Perfis de temperatura obtidos através do instrumento SABER (linha contínua) e do modelo atmosférico NRLMSISE-00 (linha tracejada).	35
3.3 Temperatura média zonal obtida pelo SABER para janeiro (a) e julho (b) de 2003. Os níveis de cores indicam os valores da temperatura.	37

3.4	Órbitas do SABER para o dia 03 de janeiro de 2003. O retângulo cinza delimita uma grade de 40° de longitude por 10° de latitude, centrada em 30° S e 50° W.	38
3.5	Cobertura latitudinal das sondagens do SABER em 2003.	39
3.6	Ilustração das órbitas do satélite TIMED/SABER dentro de uma grade centrada em 50° W e 30° S.	40
3.7	Distribuição das medidas de temperatura dentro de uma grade centrada em 50° W e 30° S, em função da hora local, dada pelo código de cores.	41
3.8	Distribuição do número de órbitas diárias contidas na grade da Figura 3.6 para 60 dias de medidas do instrumento SABER/TIMED.	42
3.9	Distribuição das medidas de temperatura no intervalo de tempo entre 15 de dezembro de 2002 e 15 de fevereiro de 2003 (~ 60 dias) para as altitudes de 94 km (painel inferior), 102 km (painel central) e 113 km (painel superior).	43
3.10	Análise do dia composto solar para as altitudes de 94 km (painel inferior), 102 km (painel central) e 113 km (painel superior). A linha contínua representa a média horária	45
3.11	Análise do dia composto lunar para as altitudes de 94 km (painel inferior), 102 km (painel central) e 113 km (painel superior). A linha contínua representa a média horária e a linha tracejada o ajuste de mínimos quadrados para a maré semidiurna lunar.	47
3.12	Análise do dia composto lunar para a temperatura residual no intervalo de altitude entre 35 km e 80 km para o período entre 15 de dezembro de 2002 e 15 de fevereiro de 2003 (~ 60 dias). A linha zero é indicada pela linha contínua.	49
3.13	Análise do dia composto lunar para a temperatura residual no intervalo de altitude entre 80 km e 120 km para o período entre 15 de dezembro de 2002 e 15 de fevereiro de 2003 (~ 60 dias). A linha zero é indicada pela linha contínua.	50
3.14	Configuração da relação entre o tempo solar (t), lunar (τ) e do ângulo da fase lunar para um ponto P na Terra.	55
3.15	(a) Sinal artificial (asteriscos) e recuperado (linha contínua) para as componentes de maré sem adição de ruído. (b) Sinal artificial (asteriscos) e recuperado (linha contínua) para as componentes de maré com adição de ruído de 1%. (b) Sinal artificial (asteriscos) e recuperado (linha contínua) para as componentes de maré com adição de ruído de 10%.	57

3.16	Curvas de ajuste das componentes diurna, semidiurna e terdiurna da maré lunar (linha tracejada) e da componente semidiurna apenas (linha sólida) sobrepostas aos dados experimentais coletados na mesma grade da Figura 3.7 e para a altitude de 102 km.	59
3.17	(a) Estruturas longitudinais calculadas nas amplitudes para um sinal arbitrário. (b) Recuperação da distribuição das amplitudes a partir da decomposição em modos.	63
3.18	O mesmo que a Figura 3.17, só que adicionando um ruído ao sinal simulado.	64
3.19	O mesmo que a Figura 3.17, só que para um sinal composto de modos com amplitudes e fases completamente aleatórias.	65
3.20	O mesmo que a Figura 3.19, só que adicionado um ruído ao sinal simulado.	66
3.21	Perfil vertical de temperatura medido pelo SABER no dia 19 de dezembro de 2002 às 04:47 em aproximadamente (28,8°S; 30,7°W). As barras de erro representam as incertezas máximas para as medidas.	70
4.1	Perfil vertical médio de amplitude da temperatura para maré semidiurna lunar nos meses de solstício para 0° (linha preta sólida + círculo preenchido), 10° S (linha azul pontilhada + estrela vazia), 10° N (linha verde tracejada + estrela preenchida), 20° S (linha vermelha traço-ponto-ponto + quadrado vazio) e 20° N (linha amarela traço-ponto + quadrado preenchido)	73
4.2	Perfil vertical médio de amplitude da temperatura para maré semidiurna lunar nos meses de solstício para 30° S (linha roxa sólida + X vazio), 30° N (linha rosa pontilhada + X preenchido), 40° S (linha verde tracejada + triângulo vazio), 40° N (linha verde traço-ponto + triângulo preenchido), 50° S (linha laranja traço-ponto-ponto + hexágono vazio) e 50° N (linha vermelha traço-longo + hexágono preenchido)	75
4.3	Igual a Figura 4.1, porém, para os meses de equinócio.	77
4.4	Idêntico a Figura 4.2, porém, para os meses de equinócio.	79
4.5	Perfil vertical médio de fase da temperatura para maré semidiurna lunar nos meses de solstício para 0° (linha preta sólida + círculo preenchido), 10° S (linha azul pontilhada + estrela vazia), 10° N (linha verde tracejada + estrela preenchida), 20° S (linha vermelha traço-ponto-ponto + quadrado vazio) e 20° N (linha amarela traço-ponto + quadrado preenchido).	83

4.6	Perfil vertical médio de fase da temperatura para maré semidiurna lunar nos meses de solstício para 30° S (linha roxa sólida + X vazio), 30° N (linha rosa pontilhada + X preenchido), 40° S (linha verde tracejada + triângulo vazio), 40° N (linha verde traço-ponto + triângulo preenchido), 50° S (linha laranja traço-ponto-ponto + hexágono vazio) e 50° N (linha vermelha traço-longo + hexágono preenchido).	85
4.7	Igual a Figura 4.5, porém, para os meses de equinócio.	88
4.8	Igual a Figura 4.6, porém, para os meses de equinócio.	90
4.9	Amplitude média zonal da maré semidiurna lunar como função da altitude e latitude.	94
4.10	Amplitude média zonal da maré semidiurna lunar como função da altitude (80 km - 100 km) e latitude.	96
4.11	Amplitude da maré semidiurna lunar modelada por Vial e Fobres (1994) em função da altitude e latitude	97
4.12	Amplitude da maré semidiurna lunar em função da latitude e do mês nas altitudes de 114 km (a), 108 km (b), 99 km (c) e 90 km (d)	99
4.13	Amplitude da maré semidiurna lunar modelada por Vial e Forbes (1994) em função da latitude e do mês nas altitudes 100 km (a) e 90 km (b)	100
4.14	Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 60 km.	104
4.15	Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 72 km.	106
4.16	Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 81 km.	108
4.17	Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 90 km.	110
4.18	Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 93 km.	112
4.19	Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 105 km.	113

4.20	Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 108 km.	115
4.21	Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 111 km.	116
4.22	Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 114 km.	118
4.23	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para dezembro na altitude de 108 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando apenas a componente migrante. (c) - Distribuição latitudinal da maré migrante.	121
4.24	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para dezembro na altitude de 108 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SW2, SW5, SW6, SE1 e SE2. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	123
4.25	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para dezembro na altitude de 108 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SW2, SW3, SW5, SW6, S0, SE1 e SE2. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	124
4.26	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para dezembro na altitude de 108 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SW3, SW5, SW6, S0, SE1 e SE2. (c) - Distribuição latitudinal das componentes não migrantes.	125
4.27	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para janeiro na altitude de 72 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4 e SW5. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	127
4.28	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 72 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE3, S0, SW1, SW2 SW3, SW4 e SW5. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	129

4.29	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para agosto na altitude de 81 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE4, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	131
4.30	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 81 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE4, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	133
4.31	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 81 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	136
4.32	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 81 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE4, SE3, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4 e SW6. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	137
4.33	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para janeiro na altitude de 105 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE3, SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6 (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	139
4.34	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 105 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE2, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5, SW6 e SW7 (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	140
4.35	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para dezembro na altitude de 105 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE3, SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5, SW6 e SW7 (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	141

4.36	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 108 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6 (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	143
4.37	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 111 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE3, SE2, SE1, SW1, SW2, SW3, SW6 e SW7 (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	145
4.38	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para dezembro na altitude de 111 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, e SW6 (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	146
4.39	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 114 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SSE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5, SW6 e SW7 (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	148
4.40	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para dezembro na altitude de 114 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE4, SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	149
4.41	Perfil vertical da componente migrante SW2 e das componentes não migrantes SE3, SE2, SE1, S0, SW1, SW3, SW4, SW5 e SW6 para as latitudes de 20° N (painel (a)) e 30° S (painel (b)) para o mês de dezembro no intervalo de altitude entre 70 km e 120 km.	153
4.42	Perfil vertical da componente migrante SW2 e das componentes não migrantes SE3, SE2, SE1, S0, SW1, SW3, SW4, SW5, SW6 e SW7 para as latitudes de 20° N (painel (a)) e 20° S (painel (b)) para o mês de setembro no intervalo de altitude entre 70 km e 120 km.	154
4.43	Perfil vertical para o mês de dezembro no intervalo de altitude entre 20 km e 120 km para a componente migrante SW2 e para as componentes não migrantes SE1 e SW1 na latitude de 20° N (painel (a)), e no painel (b) SE2 e SE1 na latitude de 30° S.	156

4.44	Perfil vertical para o mês de setembro no intervalo de altitude entre 20 km e 120 km para a componente migrante SW2 e para as componentes não migrantes SW4 na latitude de 20° N (painel (a)), e no painel (b) SE3, SE1, SW4 e SW6 na latitude de 20° S.	158
4.45	Amplitude média zonal da maré semidiurna lunar para o mês de janeiro para diferentes anos (2003-2012).	160
4.46	Amplitude média zonal da maré semidiurna lunar para o mês de outubro para diferentes anos (2002-2011).	161
4.47	Varição ano-a-ano da amplitude da maré semidiurna lunar com a latitude para as altitudes de 111 km (a), 99 km (b) e 90 (c) km.	163
4.48	Varição ano-a-ano da amplitude da maré semidiurna lunar com a altitude para as latitudes 20° N (a) e 20° S (b).	164
4.49	Varição longitudinal da amplitude da maré semidiurna lunar para o mês de dezembro nos anos de 2002 a 2011 na altitude de 108 km.	166
4.50	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para o mês de dezembro de 2004 na altitude de 108 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW5 e SW6. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	168
4.51	(a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para o mês de dezembro de 2003 na altitude de 108 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).	170
4.52	Varição ano-a-ano da amplitude das principais componentes não migrantes SE2 (a), SW6 (b), SE1 (c), SW5 (d), SW1 (e), SW3 (f), S0 (g) e SW4 (h) da maré lunar nos anos de 2002 até 2012 e na latitude de 20° N.	172
4.53	Varição ano-a-ano da amplitude das principais componentes não migrantes SE2 (a), SW6 (b), SE1 (c), SW5 (d), SW1 (e), SW3 (f), S0 (g) e SW4 (h) da maré lunar nos anos de 2002 até 2012 e na latitude de 30° S.	173

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Principais periodicidades produzidas pelos potenciais gravitacionais.	16
3.1 Períodos para marés solares e gravitacionais vistos a partir do solo e do satélite TIMED.	53
3.2 Parâmetros fornecidos e extraídas do ajuste.	56
3.3 Parâmetros calculados para as componentes da maré para a altitude de 102 km para a grade especificada na Figura 3.7. Neste caso, σ_R representa o desvio padrão das amplitudes e σ_ϕ o desvio padrão das fases.	58
3.4 Estimativa do erro para os valores experimentais da temperatura obtida pelo satélite TIMED/SABER para as altitudes da tropopausa, estratosfera e baixa mesosfera.	68
3.5 Estimativa do erro para os valores experimentais da temperatura obtida pelo satélite TIMED/SABER para as altitudes da MLT.	69
4.1 Amplitudes máximas mensais da maré semidiurna lunar na temperatura em função da latitude.	81
4.2 Resumo das componentes utilizadas para reconstruir as estruturas de amplitude mostradas nas Figuras 4.27 a 4.30 . O símbolo ‘✓’ indica que a componente foi utilizada na figura de reconstrução da respectiva altitude.134	134
4.3 Resumo das componentes utilizadas para reconstruir as estruturas de 3-4 picos mostradas nas Figuras 4.31 - 4.40 . O símbolo ‘✓’ indica que a determinada componente foi utilizada na figura de reconstrução das respectiva altitude.	150

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 MARÉS ATMOSFÉRICAS	7
2.1 Teoria Clássica de Marés	7
2.2 Maré Atmosférica Lunar	19
3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA	31
3.1 Instrumento SABER	31
3.2 Banco de dados	38
3.3 Identificação da maré semidiurna lunar nos dados de temperatura do SABER	40
3.4 Determinação da maré semidiurna lunar	51
3.5 Decomposição da maré semidiurna lunar em componentes	61
3.6 Estimativas das incertezas na obtenção das amplitudes e fases	67
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1 Estruturas Verticais	71
4.2 Variação latitudinal	93
4.3 Variação longitudinal	103
4.4 Variação temporal	159
5 CONCLUSÕES	175
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	179

1 INTRODUÇÃO

A existência da maré atmosférica lunar ou maré atmosférica gravitacional foi reconhecida por Newton e estudada por Laplace. Ambos a estudaram teoricamente e através de medidas de pressão obtidas por barômetros. Entretanto, por muitos anos, as tentativas de determinação da maré lunar na atmosfera falharam devido à insuficiência de dados, pois as medidas apresentavam uma baixa resolução temporal.

O primeiro resultado com identificação confiável desta oscilação foi publicado em 1847 por Sabine, que utilizou dados de pressão do observatório de Santa Helena na região tropical. Já a determinação da maré lunar na atmosfera fora da região tropical foi obtida apenas em 1918 por Chapman que utilizou dados horários de pressão obtidos em Greenwich [ver [Chapman e Lindzen \(1970\)](#) para detalhes sobre os primeiros trabalhos de determinação da maré lunar na atmosfera].

A maré atmosférica lunar é gerada na região mais densa da atmosfera terrestre, principalmente, através da atração gravitacional da Lua. Além da função de excitação gravitacional, os movimentos verticais dos oceanos influenciam a região inferior da atmosfera contribuindo na geração desta maré. Esta oscilação é composta por diferentes modos, porém a componente semidiurna migrante (período de 12,420 horas solar ou 1,9323 ciclos por dia) é a mais importante, porque apresenta maior amplitude.

A maré semidiurna lunar se propaga verticalmente, atingindo amplitudes mais elevadas na região da mesosfera e baixa termosfera (MLT, do Inglês “Mesosphere and Lower Thermosphere”). Nesta região, medidas contínuas de radar têm contribuído para entender as suas características. Uma delas, por exemplo, é a sazonalidade, ou seja, a maré lunar tem uma dependência apreciável com as estações do ano.

Alguns trabalhos mostraram que, geralmente, a maré semidiurna lunar apresenta amplitude máxima no solstício de dezembro e no solstício de junho ([SANDFORD; MITCHELL, 2007](#); [SANDFORD et al., 2007](#); [STENING; JACOBI, 2001](#); [STENING et al., 1994](#)). Porém [Sandford et al. \(2006\)](#) observaram amplitudes máximas no inverno e no outono do hemisfério norte.

Como a função de excitação da maré lunar é a princípio, constante, a variabilidade observada deve representar respostas às mudanças nas condições básicas da atmosfera ao longo da região de propagação. Desta maneira, a determinação desta oscilação é uma excelente ferramenta para entender mecanismos de acoplamento entre as camadas atmosféricas.

O comportamento da maré semidiurna lunar também foi previsto por modelos (STENING et al., 1997; VIAL; FORBES, 1994; FORBES, 1982). Através de simulações, Vial e Forbes (1994) mostraram a variação latitudinal e sazonal desta maré. Stening et al. (1997) mostraram a influência da atmosfera básica (ventos e temperaturas) na propagação vertical da maré lunar. Forbes (1982), por sua vez, estudou teoricamente as características verticais da maré lunar desde a superfície até 400 km de altitude nos campos de vento e temperatura. Modelos numéricos também foram utilizados para analisar a importância de diferentes mecanismos na geração da maré lunar e do papel do vento e da temperatura de fundo à medida que esta se propaga na atmosfera (ASO et al., 1981; HOLLINGSWORTH, 1971; GELLER, 1970).

Trabalhos recentes mostram a influência da intensificação da maré semidiurna lunar no eletrojato equatorial e na velocidade de deriva vertical durante eventos de aquecimento súbito da estratosfera (PARK et al., 2012; FEJER et al., 2011; FEJER et al., 2010). Também foi verificada uma intensificação desta oscilação em dados de vento na região da MLT, em três localidades do setor brasileiro durante o aquecimento súbito da estratosfera que aconteceu em 2006 (PAULINO et al., 2012). Além disso, estudos teóricos mostraram que essa intensificação da maré lunar desempenha um papel importante na geração de perturbações na ionosfera de baixas latitudes durante estes eventos (PEDATELLA; LIU, 2012b).

No Brasil, medidas contínuas e simultâneas por meio de três radares meteorológicos instalados em São João do Cariri (7, 4° S, 36, 5° W), Cachoeira Paulista (23° S, 45° W) e Santa Maria (29, 7° S, 53, 7° W) permitiram a determinação da maré semidiurna lunar em dados de vento na região da MLT (PAULINO, 2010). O longo período de medidas de vento em Cachoeira Paulista permitiu o estudo climatológico da maré lunar de 2000 a 2008, no qual foram abordados a sazonalidade, perfis verticais e comprimentos de onda verticais desta oscilação (PAULINO et al., 2012).

Verificou-se também que houve uma intensificação da amplitude da maré semidiurna lunar na MLT durante o evento de aquecimento súbito estratosférico de 2006 (PAULINO et al., 2012). Estes trabalhos mostraram que a maré lunar apresenta diferenças latitudinais no seu comportamento que precisam ser exploradas para poder de fato compreender sua importância para os eventos e fenômenos que acontecem na alta atmosfera brasileira.

Alguns trabalhos utilizando medidas de vento na região da MLT sugeriram que a maré lunar não apresenta características de uma maré migrante pura e sim de uma onda que tem contribuições das componentes migrante e não migrantes (SANDFORD; MITCHELL, 2007; SANDFORD et al., 2007; STENING; JACOBI, 2001). No entanto, estes estudos são realizados com, no máximo, dois instrumentos instalados em dois pontos de longitude. A diferença sazonal observada em estações de latitudes semelhantes pode ser atribuída à contribuição das marés não migrantes.

Variações longitudinais na maré semidiurna lunar já foram observadas utilizando medidas de pressão de uma rede de estações de barômetros distribuídos pelo globo (HAURWITZ; COWLEY, 1970). Pedatella e Forbes (2010) mostraram que a maré lunar observada no conteúdo eletrônico total apresenta variações longitudinais que devem ser geradas pela presença de componentes não migrantes. Variações longitudinais na maré lunar também foram previstas por modelo. No entanto, estas variações são difíceis de observar através de instrumentos de solo devido a dificuldade em operar simultaneamente instrumentos em diversas regiões do globo por um período de tempo apreciável para desenvolver o estudo.

Por fornecer uma cobertura global em latitude e longitude, medidas por satélite têm sido utilizadas no estudo de marés atmosféricas. Luhr et al. (2012), utilizando 10 anos de medidas do satélite CHAMP (do inglês, “Challenging Minisatellite Payload”) investigaram os efeitos da maré semidiurna lunar no eletrojato equatorial e concluíram que a maré lunar gera um aumento na intensidade do eletrojato equatorial. Forbes e Zhang (2013), utilizando medidas de temperatura do SABER (do inglês, “Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry”) analisaram o comportamento latitudinal da maré semidiurna lunar, considerando que esta oscilação é composta apenas pela componente migrante.

Algumas questões ainda não são bem entendidas em relação as variações longitudinais da maré lunar, como por exemplo:

- a) Como é o comportamento longitudinal da maré semidiurna lunar ao longo do ano e com a altitude?
- b) Qual é o papel das componentes não migrantes da maré lunar?
- c) Como é a distribuição latitudinal das componentes migrante e não migrantes?
- d) Quais são as componentes não migrantes mais importantes para a geração dos padrões longitudinais observados na maré lunar?

Desta maneira, medidas obtidas por instrumento a bordo de satélite fornecem uma cobertura global, tornando possível a separação das componentes de maré migrante e não migrantes para estudar suas estruturas globais. As medidas de temperatura fornecidas pelo instrumento SABER/TIMED (do inglês “Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics”) fornecem uma ótima oportunidade para estudar detalhadamente as estruturas globais da maré lunar, incluindo o papel das marés migrantes e não migrantes. As medidas são fornecidas desde 20 km até 120 km, possibilitando a análise dos perfis verticais de amplitude e de fase desta oscilação para diferentes latitudes e longitudes.

A maré atmosférica solar, por exemplo, vem sendo bastante estudada utilizando essas medidas de temperatura. Várias características dessa oscilação na temperatura estão sendo investigadas através da distribuição de amplitudes e fases em uma ampla cobertura de latitudes, longitudes e altitudes, tais como, componentes dominantes, variações sazonais, inter-anuais, latitudinais e longitudinais (PANCHEVA et al., 2013; MEEK et al., 2011; PANCHEVA et al., 2010; PANCHEVA et al., 2009; MUKHTAROV et al., 2009; FRIEDMAN et al., 2009; FORBES et al., 2006; OBERHEIDE et al., 2006).

O presente trabalho tem como objetivo determinar a maré semidiurna lunar na temperatura cinética fornecida pelo instrumento SABER, com o intuito de investigar o comportamento desta oscilação na atmosfera e ao longo do tempo, a partir de uma perspectiva global.

Pretende-se ainda analisar os perfis verticais de amplitude e fase no intervalo de altitude entre 20 km e 120 km para diferentes latitudes, além de discutir o comportamento das componentes migrantes e não migrantes da maré lunar. Para o desenvolvimento deste estudo são utilizadas medidas de temperatura no período de fevereiro de 2002 a janeiro de 2012, no intervalo de latitude de -50° a 50° e de altitude de 20 km a 120 km. Alguns aspectos das variações longitudinais obtidas neste trabalho podem ser vistos em [Paulino et al. \(2013\)](#).

Este trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma:

- O [Capítulo 2](#) apresenta uma descrição da teoria clássica de marés e da função de excitação da maré lunar. Neste capítulo também é apresentada a revisão bibliográfica onde são exibidas as principais características da maré semidiurna lunar;
- No [Capítulo 3](#) é feita uma apresentação resumida dos instrumentos que compõem o satélite TIMED. Além disso serão mostradas as principais características do instrumento SABER e uma breve descrição de como a temperatura cinética é determinada. O banco de dados utilizado e a metodologia desenvolvida neste trabalho de tese são descritos neste capítulo;
- No [Capítulo 4](#) são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos neste trabalho de tese, os quais foram separados em 4 seções. Na [Seção 4.1](#) são apresentados os resultados para as estruturas verticais da maré semidiurna lunar em diferentes latitudes. Na [Seção 4.2](#) é mostrada a variação latitudinal da maré lunar na temperatura. A [Seção 4.3](#) exhibe as principais características das variações longitudinais da maré semidiurna lunar, além dos resultados para a separação de componentes da maré lunar. E, por fim, a variabilidade ano-a-ano da maré semidiurna lunar é mostrada na [Seção 4.4](#);
- No [Capítulo 5](#) são sumarizadas as principais conclusões obtidas com este trabalho. Trabalhos futuros, que podem ser desenvolvidos utilizando as ferramentas desenvolvidas nesta tese, também são sugeridos neste capítulo.

2 MARÉS ATMOSFÉRICAS

Neste Capítulo será feita uma descrição da teoria clássica de marés e serão discutidos alguns aspectos da forçante da maré lunar. Além disso, serão apresentadas as principais características da maré semidiurna lunar que foram verificadas através de simulações e observações.

2.1 Teoria Clássica de Marés

Os estudos das marés tiveram início com as marés oceânicas, as quais foram explicadas por Newton através da atração gravitacional baseada nas suas leis da mecânica. De uma forma simplificada pode-se dizer que as marés oceânicas ocorrem devido a um desbalanço entre a força gravitacional e a força centrífuga. Newton e Laplace sugeriram que as forças de marés também deveriam afetar a atmosfera. Porém, as marés atmosféricas seriam muito pequenas para serem detectadas (CHAPMAN; LINDZEN, 1970).

Embora a teoria de Laplace tenha sido desenvolvida para uma fluido incompressível, para o caso da atmosfera, que pode ser tratada como compressível, a teoria pode ser aplicada impondo algumas restrições. O desenvolvimento da teoria de marés atmosféricas teve a contribuição de cientistas famosos como Newton (1687), Laplace (1799), Kelvin (1882) e Rayleigh(1890).

A teoria clássica de marés atmosféricas consiste em estudar a resposta da atmosfera à excitação das marés, tanto gravitacional quanto térmica, e o comportamento dessas funções de excitação. Na teoria clássica de maré é feita uma análise simplificada da resposta da atmosfera, partindo do conjunto de equações básicas da hidrodinâmica. Cálculos mais rigorosos deveriam envolver diversos efeitos como a circulação geral da atmosfera, efeitos orográficos, acoplamento hidromagnético, composição atmosférica e outros processos, os quais tornam o conjunto de equação mais complexo. Todo o desenvolvimento descrito abaixo foi baseado no livro Chapman e Lindzen (1970).

Nessa teoria, o sistema de coordenadas deve estar em coordenadas esféricas, girando com a Terra, porque o movimento é de escala global e relativamente lento, podendo assim sofrer efeitos da rotação da Terra. As seguintes simplificações são aplicadas:

- a) A atmosfera básica é considerada estar em equilíbrio termodinâmico e equilíbrio hidrostático;
- b) A atmosfera obedece à lei dos gases perfeitos ($p = \rho RT$, sendo p a pressão,

ρ a densidade, R a constante dos gases e T a temperatura) e supõe-se que a composição da atmosfera é homogênea;

- c) A atmosfera é considerada como sendo uma camada de fluido fino, de pequena espessura comparada com o raio da Terra (a), ou seja, a aproximação de atmosfera rasa ($r = a + z$, $z \ll a$, sendo z a altitude e r a distância do centro da Terra);
- d) A elipticidade da Terra, os efeitos das montanhas e da distribuição de continentes e oceanos são desprezados;
- e) Os efeitos devidos aos processos dissipativos, como viscosidade molecular, condutividade, arraste iônico e transferência radiativa são desprezados;
- f) Os campos de maré são considerados como perturbações linearizadas sobre um estado básico, ou seja, um dado campo atmosférico pode ser linearizado ($L = \delta L + L_0$, L_0 é o campo básico e δL é a perturbação.). O escoamento básico é considerado nulo e os campos básicos são independentes da latitude e longitude. Os campos básicos ρ_0 e P_0 podem ser escritos como $P_0(z) = P_0(0)e^{-x}$, $\rho_0 = \frac{P_0}{gH}$ ($H = \frac{RT_0}{g}$ é a altura de escala e $x = \int_0^z \frac{dz}{H}$ é a altura reduzida).

O conjunto de equações básicas é composto pela equação do movimento ou conservação do momentum, pela equação da conservação da massa e conservação da energia, ou seja,

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} + 2(\vec{\omega} \times \vec{V}) = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \vec{g} + \vec{F}, \quad (2.1)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.2)$$

e

$$\frac{DP}{Dt} - C^2 \frac{D\rho}{Dt} = (\gamma - 1)\rho J \quad (2.3)$$

sendo, $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)$ (neste caso o operador $\vec{\nabla}$ é escrito em coordenadas esféricas $\frac{\partial}{\partial z}\hat{z} + \frac{1}{a}\frac{\partial}{\partial\theta}\hat{\theta} + \frac{1}{a\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\phi}\hat{\phi}$), $\vec{\omega}$ a taxa de rotação angular da Terra, \vec{V} a velocidade que tem componentes na direção vertical (w), meridional (u) e zonal (v), P a pressão, ρ

a densidade, \vec{g} aceleração devida à gravidade, \vec{F} forças externas, $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ (c_p é o calor específico a pressão constante e c_v calor específico a volume constante), $C^2 = \gamma RT$ é o quadrado da velocidade do som na atmosfera e J é a função de excitação térmica.

A equação do movimento pode ser separada nas três componentes, meridional, zonal e vertical (equações 2.4, 2.5 e 2.6, respectivamente), como é mostrado abaixo:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{a} \frac{\partial u}{\partial \theta} - 2\omega v \cos \theta = -\frac{1}{\rho} \frac{1}{a} \frac{\partial P}{\partial \theta} + F_\theta, \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{a \sin \theta} \frac{\partial v}{\partial \phi} + 2\omega u \cos \theta = -\frac{1}{\rho} \frac{1}{a \sin \theta} \frac{\partial P}{\partial \phi} + F_\phi, \quad (2.5)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g + F_z = 0 \quad (2.6)$$

Linearizando estas equações, obtém-se:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - 2\omega v \cos \theta = -\frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\delta P}{\rho_0} + \Omega \right), \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + 2\omega u \cos \theta = -\frac{1}{a \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\delta P}{\rho_0} + \Omega \right), \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \delta P}{\partial z} = -\delta \rho g - \rho_0 \frac{\partial \Omega}{\partial z}. \quad (2.9)$$

Aqui foram utilizados os campos da seguinte forma: $u = \delta u + u_0$, $v = \delta v + v_0$, $P = \delta P + P_0$, $\rho = \delta \rho + \rho_0$. Porém, como já foi mencionado, o escoamento básico é considerado nulo, sendo assim, $u = \delta u$ e $v = \delta v$. Além disso, as variações $\frac{\partial P_0}{\partial \theta}$, $\frac{\partial \rho_0}{\partial \theta}$, $\frac{\partial P_0}{\partial \phi}$, $\frac{\partial \rho_0}{\partial \phi}$ e os termos não lineares foram desprezados e, neste caso, a força externa é devida ao potencial gravitacional (Ω), assim $\vec{F} = -\nabla \Omega = -\frac{\partial \Omega}{\partial z} \hat{z} - \frac{1}{a} \frac{\partial \Omega}{\partial \theta} \hat{\theta} - \frac{1}{a \sin \theta} \frac{\partial \Omega}{\partial \phi} \hat{\phi}$.

As equações da conservação da massa e da energia também são linearizadas, como pode-se observar abaixo:

$$\frac{D\rho}{Dt} = \frac{\partial \delta \rho}{\partial t} + w \frac{d\rho_0}{dz} = -\rho_0 \chi, \quad (2.10)$$

$$\frac{R}{\gamma - 1} \frac{DT}{Dt} = \frac{gH}{\rho_0} \frac{D\rho}{Dt} + J . \quad (2.11)$$

Nessas equações foram feitas as seguintes suposições $\rho = \delta\rho + \rho_0$, $w = \delta w + w_0$, $\chi = \nabla \cdot \vec{V} = \frac{1}{a \operatorname{sen} \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (u \operatorname{sen} \theta) + \frac{1}{a \operatorname{sen} \theta} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \frac{\partial w}{\partial z}$ e J , na equação da conservação da energia é a fonte de calor que pode ser devida ao aquecimento radiativo, aquecimento joule e condução térmica. No caso da maré térmica, J é a função de excitação.

A equação linearizada da energia também pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{DP}{Dt} = \frac{\partial \delta P}{\partial t} w \frac{dP_0}{dz} = \gamma g H \frac{D\rho}{Dt} + (\gamma - 1) \rho_0 J . \quad (2.12)$$

Desta maneira, o conjunto de equações linearizadas é composto pelas Equações 2.7, 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11. Outra variável que é usada nesse desenvolvimento é $G = -\frac{1}{\gamma P_0} \frac{DP}{Dt}$, que está relacionada com o movimento vertical do fluido. No estudo de marés, geralmente, procuram-se soluções que sejam periódicas em tempo e longitude. Para isto, considera-se que as soluções das equações são do tipo onda ($f = f^{\sigma,s}(\theta, z) e^{i(\sigma t + s\phi)}$), ou seja:

$$\{u, v, w, \delta P, \delta \rho\} = \{u^{\sigma,s}, v^{\sigma,s}, w^{\sigma,s}, \delta P^{\sigma,s}, \delta \rho^{\sigma,s}\} e^{i(\sigma t + s\phi)} , \quad (2.13)$$

sendo, σ a frequência e s o número de onda zonal. Usando a Equação 2.13 é possível resolver as Equações 2.7 e 2.8 para u e v :

$$\begin{aligned} u^{\sigma,s} &= \frac{i\sigma}{4a\omega^2(f^2 - \cos^2 \theta)} \left(\frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{s \cot \theta}{f} \right) \left(\frac{\delta P^{\sigma,s}}{\rho_0} + \Omega^{\sigma,s} \right) \\ v^{\sigma,s} &= \frac{-\sigma}{4a\omega^2(f^2 - \cos^2 \theta)} \left(\frac{\cos \theta}{f} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{s}{\operatorname{sen} \theta} \right) \left(\frac{\delta P^{\sigma,s}}{\rho_0} + \Omega^{\sigma,s} \right) , \end{aligned} \quad (2.14)$$

em que, $f \equiv \frac{\sigma}{2\omega}$. Os sobrescritos σ e s mostram que diferentes soluções são obtidas para cada frequência e número de onda zonal. Substituindo a Equação 2.14 na expressão $\chi = \nabla \cdot \vec{V} = \frac{1}{a \operatorname{sen} \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (u \operatorname{sen} \theta) + \frac{1}{a \operatorname{sen} \theta} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \frac{\partial w}{\partial z}$, obtém-se:

$$\chi - \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{i\sigma}{4a^2\omega^2} F \left(\frac{\delta P}{\rho_0} + \Omega \right) , \quad (2.15)$$

na qual,

$$F \equiv \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\frac{\sin\theta}{f^2 - \cos^2\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \right) - \frac{1}{f^2 - \cos^2\theta} \left(\frac{s}{f} \frac{f^2 + \cos^2\theta}{f^2 - \cos^2\theta} + \frac{s^2}{\sin^2\theta} \right) . \quad (2.16)$$

As Equações 2.15, 2.12, 2.9, 2.10 e a expressão para G formam um conjunto de cinco equações com cinco incógnitas G , δP , $\delta\rho$, w e χ . Este sistema de equações pode ser reduzido a apenas uma equação em G da seguinte forma:

$$H \frac{\partial^2}{\partial z^2} G^{\sigma,s} + \left(\frac{dH}{dz} - 1 \right) \frac{\partial}{\partial z} G^{\sigma,s} - \frac{i\sigma}{g} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \Omega^{\sigma,s} = \frac{g}{4a^2\omega^2} F \left[\left(\frac{dH}{dz} + \kappa \right) G^{\sigma,s} - \frac{\kappa J^{\sigma,s}}{\gamma g H} \right] . \quad (2.17)$$

em que $\kappa = (\gamma - 1)/\gamma = 2/7$. Em geral, a variação de Ω em z é aproximadamente a distância Lua-Terra ou Sol-Terra; assim, com a aproximação $z \ll a$, o termo $\frac{\sigma}{g} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \Omega^{\sigma,s}$ pode ser desprezado, levando à seguinte equação:

$$H \frac{\partial^2}{\partial z^2} G^{\sigma,s} + \left(\frac{dH}{dz} - 1 \right) \frac{\partial}{\partial z} G^{\sigma,s} = \frac{g}{4a^2\omega^2} F \left[\left(\frac{dH}{dz} + \kappa \right) G^{\sigma,s} - \frac{\kappa J^{\sigma,s}}{\gamma g H} \right] . \quad (2.18)$$

A Equação 2.18 é uma equação diferencial que pode ser resolvida pelo método de separação de variáveis, supondo que $G^{\sigma,s}$ pode ser escrito por:

$$G^{\sigma,s} = \sum_n L_n^{\sigma,s}(z) \Theta_n^{\sigma,s}(\theta) , \quad (2.19)$$

sendo $\Theta_n^{\sigma,s}(\theta)$ completo no intervalo $0 \leq \theta \leq \pi$. Pode-se escrever também:

$$J^{\sigma,s} = \sum_n J_n^{\sigma,s}(z) \Theta_n^{\sigma,s}(\theta) . \quad (2.20)$$

Substituindo as Equações 2.19 e 2.20 na Equação 2.18 obtém-se o seguinte conjunto de equações para $\Theta_n^{\sigma,s}$ e $J_n^{\sigma,s}$:

$$F(\Theta_n^{\sigma,s}) = -\frac{4a^2\omega^2}{gh_n^{\sigma,s}} \Theta_n^{\sigma,s} , \quad (2.21)$$

$$H \frac{d^2 L_n^{\sigma,s}}{dz^2} + \left(\frac{dH}{dz} - 1 \right) \frac{dL_n^{\sigma,s}}{dz} + \frac{1}{h_n^{\sigma,s}} \left(\frac{dH}{dz} + \kappa \right) L_n^{\sigma,s} = \frac{\kappa}{\gamma g H h_n^{\sigma,s}} J_n^{\sigma,s}, \quad (2.22)$$

nesse caso, $h_n^{\sigma,s}$ é a constante de separação.

A Equação 2.21 define um problema de autovalor e autofunção onde $h_n^{\sigma,s}$ são autovalores e $\Theta_n^{\sigma,s}$ autofunções, também conhecidas como funções de Hough. Em analogia à teoria de Laplace para maré oceânica, onde h_n é a profundidade do oceano, h_n é chamada de profundidade equivalente. A Equação 2.22 é chamada de equação da estrutura vertical. Para cada modo de Hough, isto é, para cada estrutura horizontal e h_n determinadas pela Equação 2.21, a Equação 2.22 tem apenas uma solução sujeita às condições de contorno.

A equação 2.22 pode ser reescrita na variável x usando $x = -\ln\left(\frac{P}{P_0(0)}\right)$ e $L_n = e^{\frac{x}{2}} y_n$:

$$\frac{d^2 y_n}{dx^2} - \frac{1}{4} \left[1 - \frac{4}{h_n} \left(\kappa H + \frac{dH}{dx} \right) \right] y_n = \frac{\kappa J_n}{\gamma g h_n} e^{-\frac{x}{2}}. \quad (2.23)$$

Para determinar os campos de marés (u, v, w, ρ, P, T) são necessárias as seguintes etapas:

- i. Encontrar os autovalores e as autofunções (Funções de Hough) da Equação 2.21;
- ii. Expandir a função de excitação em Θ_n para obter $\Omega_n^{\sigma,s}$ e $J_n^{\sigma,s}$;
- iii. Resolver a equação da estrutura vertical para cada σ, s e n ;
- iv. Obtém-se então $G_n^{\sigma,s}$ e, conseqüentemente, os campos de marés.

Os campos de marés podem ser expandidos da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
\delta P &= \sum_n \delta P_n \Theta_n \\
\delta \rho &= \sum_n \delta \rho_n \Theta_n \\
\delta T &= \sum_n \delta T_n \Theta_n \\
w &= \sum_n w_n \Theta_n \quad , \\
u &= \sum_n u_n U_n(\theta) \\
v &= \sum_n v_n V_n(\theta)
\end{aligned} \tag{2.24}$$

com,

$$\delta P_n = \frac{P_0(0)}{H} \left[-\frac{\Omega_n(x)}{g} e^{-x} + \frac{\gamma h_n}{i\sigma} e^{-\frac{x}{2}} \left(\frac{dy_n}{dx} - \frac{1}{2} y_n \right) \right] , \tag{2.25}$$

$$\begin{aligned}
\delta \rho_n &= - \left[\frac{P_0(0)}{(Hg)^2} \right] \Omega_n e^{-x} \left(1 + \frac{1}{H} \frac{dH}{dx} \right) + \\
&\left[\frac{P_0(0)}{(Hg)^2} \right] \frac{\gamma h_n}{i\sigma} e^{-\frac{x}{2}} \left[\left(1 + \frac{1}{H} \frac{dH}{dx} \right) \left(\frac{dy_n}{dx} - \frac{1}{2} \right) + \frac{H}{h_n} \left(\kappa + \frac{1}{H} \frac{dH}{dx} \right) y_n \right] - \left[\frac{P_0(0)}{(Hg)^2} \right] \frac{\kappa J_n}{i\sigma} , \tag{2.26}
\end{aligned}$$

$$\delta T_n = \frac{1}{R} \left\{ \frac{\Omega_n}{H} \frac{dH}{dx} - \frac{\gamma g h_n}{i\sigma} e^{\frac{x}{2}} \left[\frac{\kappa H}{h_n} + \frac{1}{H} \frac{dH}{dx} \left(\frac{d}{dx} + \frac{H}{h_n} - \frac{1}{2} \right) \right] y_n + \frac{\kappa J_n}{i\sigma} \right\} , \tag{2.27}$$

$$w_n = -\frac{i\sigma}{g} \Omega_n + \gamma h_n e^{\frac{x}{2}} \left[\frac{dy_n}{dx} + \left(\frac{H}{h_n} - \frac{1}{2} \right) y_n \right] , \tag{2.28}$$

$$u_n = \frac{\gamma g h_n e^{\frac{x}{2}}}{4a\omega^2} \left(\frac{dy_n}{dx} - \frac{1}{2} y_n \right) , \tag{2.29}$$

$$v_n = \frac{i\gamma g h_n e^{\frac{x}{2}}}{4a\omega^2} \left(\frac{dy_n}{dx} - \frac{1}{2} y_n \right) , \tag{2.30}$$

$$U_n = \frac{1}{f^2 - \cos^2 \theta} \left(\frac{d}{d\theta} + \frac{s \cot \theta}{f} \right) \Theta_n , \tag{2.31}$$

$$V_n = \frac{1}{f^2 - \cos^2 \theta} \left(\frac{\cos \theta}{f} \frac{d}{d\theta} + \frac{s}{\text{sen}\theta} \right) \Theta_n . \quad (2.32)$$

Expandindo $\Omega = \sum_n \Omega_n \Theta_n$, considerando que a Terra é uma esfera perfeita e aplicando a condição de contorno $w = 0$ em $x = z = 0$ na [Equação 2.28](#), pode-se escrever:

$$\frac{dy_n}{dx} + \left(\frac{H}{h_n} - \frac{1}{2} \right) y_n = \frac{i\sigma}{\gamma g h_n} \Omega_n . \quad (2.33)$$

As equações diferenciais para as estruturas verticais e horizontais da maré são resolvidas utilizando alguns métodos matemáticos, os quais são baseados nos trabalhos de Hough. Hough, nos anos de 1897 e 1898, foi um dos pioneiros a encontrar soluções para a equação de maré de Laplace. Ele transformou a equação não homogênea num sistema de equações homogêneas, expandindo as autofunções em polinômios associados de Legendre e fazendo manipulações algébricas. Dessa maneira, ele conseguiu determinar os autovalores para essas autofunções, que posteriormente receberam o nome de funções de Hough.

O livro de [Chapman e Lindzen \(1970\)](#) traz uma discussão mais ampla sobre os métodos de soluções usados para determinação dos autovalores e das autofunções para a maré atmosférica. Uma vez que seja conhecida a função de Hough correspondente a uma determinada altura equivalente, pode-se conhecer tanto o comportamento horizontal, quanto o comportamento vertical do respectivo modo de maré.

Após as funções de Hough serem normalizadas e as funções de excitações J e/ou Ω expandidas, a [Equação 2.23](#) pode ser resolvida para obter $y_n(x)$ e, finalmente, os conjuntos de equações mostrados na [Equações 2.24 e 2.25 a 2.33](#) são utilizados para avaliar a resposta dos campos atmosféricos u , v , w , δp , $\delta \rho$, e δT a estas funções de excitação.

Como este trabalho trata da maré lunar, apenas a função de excitação gravitacional será discutida. A maré lunar é gerada, principalmente, pela força de atração de gravidade da lua agindo sobre o sistema terra-oceano-atmosfera, com contribuições secundárias da atração gravitacional do Sol. A força da maré lunar pode ser obtida pelo seguinte potencial:

$$\Omega = -\frac{3}{2} \frac{\gamma M a^2}{D^3} \left[\frac{3}{2} \left(\cos^2 \Delta - \frac{1}{3} \right) \left(\cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right) + \frac{1}{2} \sin 2\Delta \sin 2\theta \cos(\alpha + \phi) + \frac{1}{2} \sin^2 \Delta \sin^2 \theta \cos 2(\alpha + \phi) \right] \quad (2.34)$$

na qual, γ é a constante gravitacional, M denota a massa da Lua ou do Sol, a é a distância entre o centro da Terra e o ponto P (como pode ser visto na Figura 2.1), D é a distância entre o centro da Terra e o centro da Lua ou do Sol (ver Figura 2.1), α é o ângulo horário, ϕ a longitude do ponto P e Δ é o ângulo que localiza a Lua a partir do polo norte. O potencial descrito na Equação 2.34 foi desenvolvido por Lamb (1932).

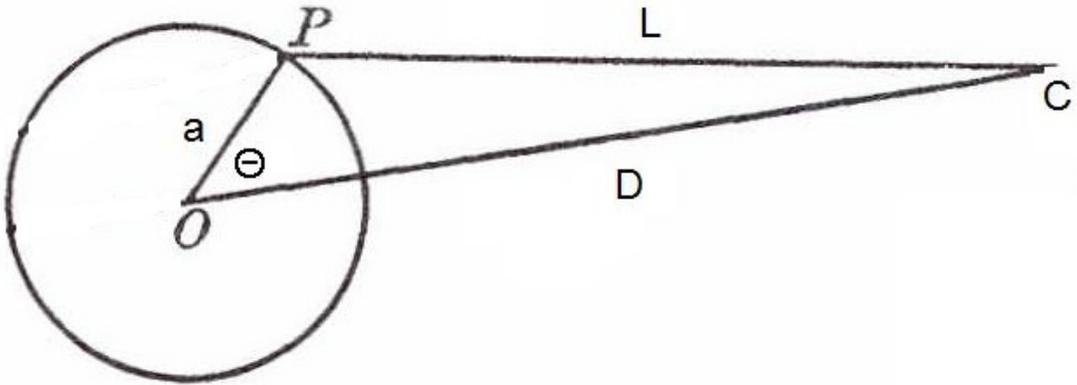


Figura 2.1 - Geometria utilizada para o cálculo do potencial de maré. O é o centro da Terra, C é o centro da Lua ou do Sol.

Fonte: Chapman e Lindzen (1970)

A forçante da maré semidiurna lunar, também conhecida como M2, é a que apresenta maior amplitude dentre todas as marés geradas devido ao potencial gravitacional da Terra e da Lua. Supondo que a órbita da Lua em torno da Terra seja um círculo perfeito e esteja no mesmo plano que o equador da Terra, o potencial gravitacional geraria apenas a componente semidiurna.

Porém, a órbita da Lua possui uma pequena excentricidade e um ângulo com respeito ao plano do equador da Terra. Portanto, a componente semidiurna não é a única gerada por este potencial. Um raciocínio semelhante pode ser aplicado ao caso da atração gravitacional do Sol em relação à Terra. Doodson (1922) estudou detalhadamente o potencial gravitacional e, baseado neste trabalho, Siebert (1961) calculou

as periodicidades produzidas por ambos os potenciais gravitacionais. Na [Tabela 2.1](#) são descritas as principais periodicidades com potenciais dados em cm^2/s^2 :

Tabela 2.1 - Principais periodicidades produzidas pelos potenciais gravitacionais.

Maré	Descrição	Período (horas)	Potencial (cm^2/s^2)
O_1	quase diurna lunar	25,819	$-6585.N_2^1(\theta) \text{sen}[(\sigma_0 - 2\sigma_1^L)t + \phi]$
P_1	quase diurna solar	24,04	$-3067.N_2^1(\theta) \text{sen}[(\sigma_0 - 2\sigma_1^S)t + \phi]$
K_1	diurna luni-solar	23,934	$+9268.N_2^1(\theta) \text{sen}(\sigma_0 t + \phi)$
N_2	semidiruna lunar elíptica	12,66	$-1518.N_2^2(\theta) \text{cos}[(2\sigma_2^L - \sigma_1^S + \nu)t + 2\phi]$
M_2	semidiurna lunar	12,42	$-7933.N_2^2(\theta) \text{cos}[2(\sigma_2^L t + \phi)]$
S_2	semidiurna solar	12,00	$-3700.N_2^2(\theta) \text{cos}[2(\sigma_2^S t + \phi)]$
K_2	semidiurna luni-solar	11,97	$-1005.N_2^2(\theta) \text{cos}[2(\sigma_0 t + \phi)]$

Nas expressões tem-se:

$$\sigma_0 = \frac{2\pi}{1 \text{ dia sideral}} \quad , \quad (2.35)$$

$$\sigma_1^L = \frac{2\pi}{1 \text{ mes lunar}} \quad , \quad (2.36)$$

$$\sigma_1^S = \frac{2\pi}{1 \text{ ano sideral}} \quad , \quad (2.37)$$

em que σ_2^L é a taxa de rotação angular da terra em torno dela própria com respeito à Lua e é dada por $\sigma_2^L = \sigma_0 - \sigma_1^L$ e com respeito ao Sol é $\sigma_2^S = \sigma_0 - \sigma_1^S$. Os termos $N_2^1(\theta) = \frac{3}{2}\text{sen}2\theta$ e $N_2^2(\theta) = 3\text{sen}^2\theta$ são os polinômios associados de Legendre, t é o tempo em hora universal e ϕ é a longitude. Mais informações sobre a função de excitação gravitacional podem ser obtidas em [Chapman e Lindzen \(1970\)](#).

N_2 é o principal harmônico que depende da variação da distância entre a Lua e a Terra. A presença desta oscilação em dados geofísicos foi verificado por [Bartels e Johnston \(1940\)](#).

Considerando apenas os modos simétricos, a expansão do potencial gravitacional para a maré semidiurna lunar torna-se:

$$\Omega = (-23662.\Theta_2 - 5615.\Theta_4 - 2603.\Theta_6\dots) \cos(2(\sigma_2^L t + \phi)) . \quad (2.38)$$

em que Θ_n é a função de Hough para cada n . Para cada modo tem-se um autovalor (h_n) e um coeficiente ($C_{n,m}$) cujos valores podem ser vistos na tabela 3.7 de [Chapman e Lindzen \(1970\)](#).

Assim como a maré semidiurna solar, a maior parte da excitação da maré semidiurna lunar é concentrada no modo 2. No caso das marés gravitacionais, a função de excitação devido à absorção solar é tomada igual a zero e a equação [Equação 2.23](#) torna-se homogênea. A função de excitação entra apenas na condição de contorno da [Equação 2.33](#), sendo assim, a excitação das marés gravitacionais é concentrada em apenas um nível.

[Sawada \(1956\)](#) analisou a resposta da atmosfera a função de excitação mostrada na [Equação 2.38](#) para várias distribuições de temperatura (T_0) e verificou que diferentemente da maré semidiurna solar, a amplitude e a fase da maré semidiurna lunar na pressão de superfície é muito dependente da distribuição da temperatura. Tendo em vista que as funções de Hough e a profundidade equivalente destas oscilações são bem parecidas, esta diferença se deve apenas à diferença entre as funções de excitação, pois o potencial gravitacional se concentra em apenas um nível e o potencial térmico se distribui em um amplo intervalo da atmosfera.

Como já foi mencionado, Θ_n são as autofunções da equação de Laplace e h_n são os autovalores, sendo assim, cada par de autofunção e autovalor constitui um modo de maré. Em geral, a seguinte nomenclatura é utilizada para identificar os modos de maré: Θ_n^s ou apenas (s,n) , sendo, s o número de onda zonal, n um índice meridional (este parâmetro fornece o número de nós em latitude e informação sobre a simetria da onda) e a informação do período da onda. Por exemplo, a maré diurna $(1,1)$ corresponde ao primeiro modo simétrico propagante da maré diurna.

Como as marés atmosféricas são oscilações de escala global que acompanham o movimento aparente da Lua ou do Sol, elas podem ser classificadas como migrante e não migrante. As marés migrantes são ondas que se propagam para oeste com o movimento aparente da Lua ou do Sol. As marés não migrantes podem se propagar para oeste ou para leste e também podem ser estacionárias. A maré não migrante apresenta velocidade de fase diferente da maré migrante.

Variações de marés nos campos atmosféricos podem ser representadas matematicamente da seguinte maneira:

$$A_{n,s} \cos(n\Omega t - s\lambda - \phi_{n,s}) . \quad (2.39)$$

com t sendo o tempo em dias (hora universal), $\Omega = 2\pi/\text{dia}$ a taxa de rotação da Terra, λ a longitude, s o número de onda zonal, n denota os sub-harmônicos de um dia Lunar ou Solar, ou seja, $n = 1$ corresponde à maré diurna, $n = 2$ à maré semidiurna, $n = 3$ à maré terdiurna e assim por diante. $A_{n,s}$ (amplitude) e $\phi_{n,s}$ (fase) são funções da altitude e da latitude. Em cada altitude e latitude a resposta da maré é obtida pela soma sobre n e s . Além disso, nesta equação as marés podem ser consideradas propagantes para oeste ($s > 0$), para leste ($s < 0$) e aprisionada ($s = 0$).

A presença de marés não migrantes em observações na pressão de superfície foi primeiro reportada por [Chapman e Westfold \(1956\)](#) e [Kato \(1989\)](#). Porém, sua detecção em altitudes superiores na atmosfera só foi possível com as medidas globais de satélite. As medidas de satélite permitem separar as marés migrantes das não migrantes e estudar suas estruturas globais ([PANCHEVA et al., 2010](#)).

2.2 Maré Atmosférica Lunar

As marés atmosféricas são oscilações de escala global com períodos que são submúltiplos do dia solar ou lunar. A maré com períodos relacionados ao dia solar é definida como maré solar, e quando relacionado ao dia lunar é denominada maré lunar. As marés atmosféricas são geradas termicamente pelo aquecimento solar ou pela atração gravitacional da lua e do sol em menor escala.

A investigação da maré lunar na atmosfera tem uma longa história. Os primeiros estudos da maré atmosférica lunar foram baseados em observações de pressão na superfície. Entretanto, muitos destes estudos apresentaram problemas devido a séries de dados insuficientes. A maré atmosférica lunar foi determinada pela primeira vez, com boa precisão, em meados do século XIX por Sabine (1847). Esta oscilação apresentou uma tendência de máximo na hora local do meio dia e meia noite.

Haurwitz e Cowley (1970) calcularam a amplitude média da maré semidiurna lunar na pressão de superfície para diferentes números de onda zonal (s) utilizando 24 pontos de medidas de barômetros no intervalo de latitudes entre 50° N e 50° S. A distribuição das amplitudes médias ($\overline{A_s}$) em escala logarítmica com o número de onda zonal é mostrada na Figura 2.2. Como esperado, a onda com $s = 2$ apresenta a maior amplitude. As ondas com número de onda zonal 1 e 3 apresentam a segunda maior amplitude, porém amplitudes uma ordem de magnitude menores que a principal. As próximas ondas que apresentam amplitudes significativas são $s = 0$ e $s = -2$.

A componente principal corresponde a uma onda propagante com a Lua em torno da Terra e a onda com número de onda zonal igual a zero representa uma onda estacionária. As ondas com $s \neq 2$ podem ser geradas pelas diferentes propriedades de fricção das superfícies continentais e oceânicas, e pela distribuição desigual dos sistemas de temperatura e vento que podem modificar a resposta da atmosfera ao potencial lunar. As marés oceânicas também podem influenciar a geração dessas ondas.

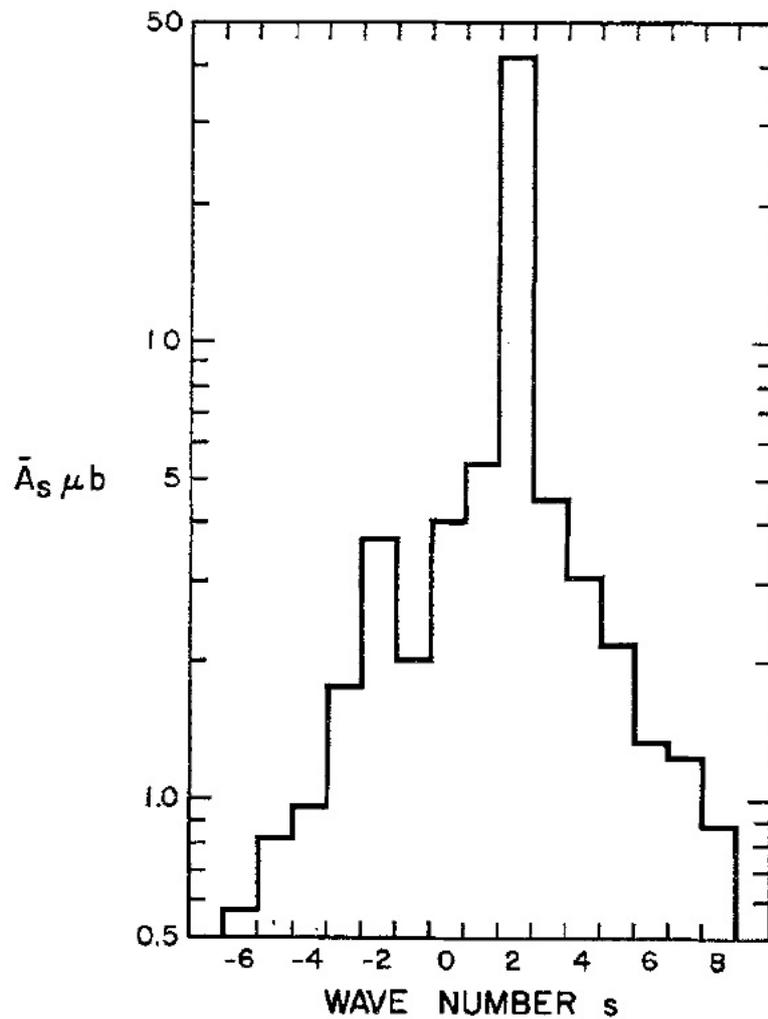


Figura 2.2 - Amplitude média da maré semidiurna lunar na pressão de superfície para diferentes números de onda zonal.

Fonte: Haurwitz e Cowley (1970)

Através de um modelo baseado na teoria clássica de marés, com a inclusão de outros efeitos como vento básico, variação da composição, acoplamento hidromagnético, resfriamento Newtoniano e difusão molecular e turbulenta, Forbes (1982) calculou as funções de Hough e a expansão da velocidade zonal e meridional da maré semidiurna devida às forçantes térmica e gravitacional e verificou que existem poucas diferenças dessas funções em relação a estas funções de excitação.

Na análise da expansão da temperatura em função dos modos de Hough para a maré devida à forçante gravitacional, ele verificou que seu comportamento vertical também se assemelha ao da maré semidiurna solar. Para as condições de solstício, a maré semidiurna lunar (ver Figura 2.3) está, principalmente, associada ao modo (2,2) abaixo de 70 km. Entre 80 km e 110 km, o modo (2,4) torna-se dominante, com contribuições secundárias dos modos (2,2), (2,3) e (2,5). Acima de 120 km, o modo (2,2) torna-se novamente o mais importante, com contribuições secundárias dos modos (2,3), (2,4), (2,5). Nas condições de equinócio, o comportamento é semelhante ao anterior, porém com a exceção dos modos (2,3) e (2,5). Os modos acoplados devidos aos ventos mesosféricos e ao gradiente de temperatura também são importantes para a maré semidiurna lunar.

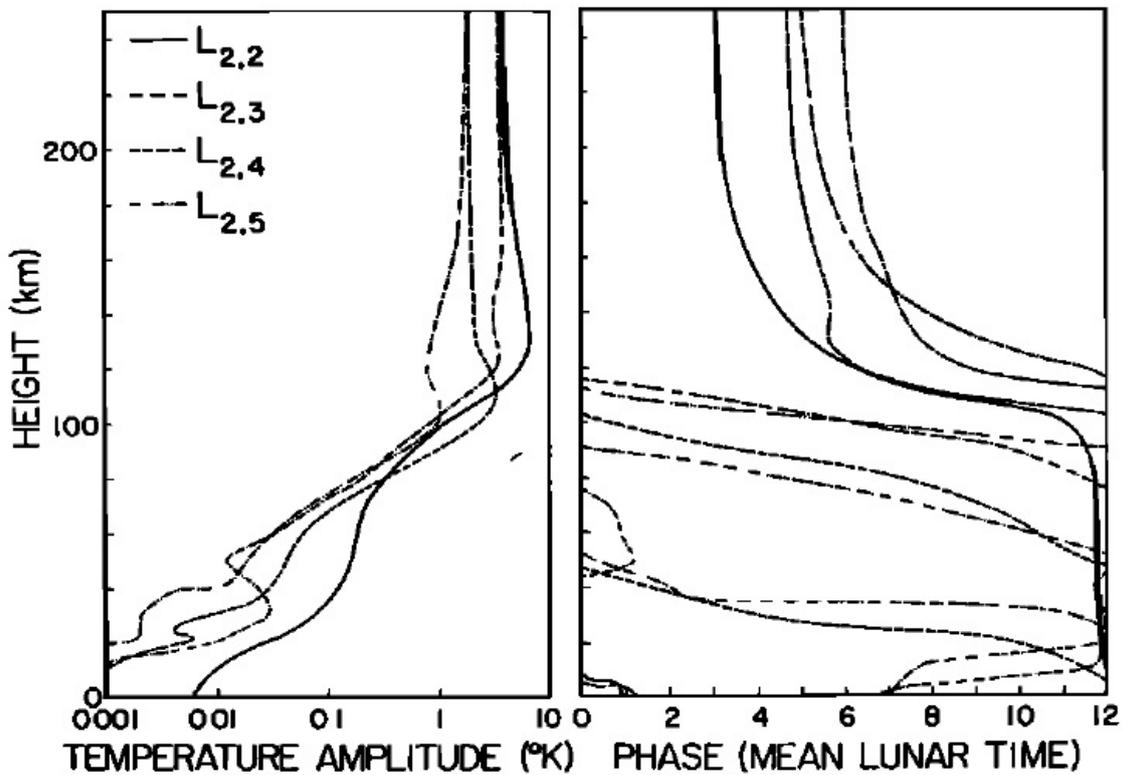


Figura 2.3 - Decomposição em modos de Hough da amplitude e fase da maré semidiurna lunar na temperatura devido a forçante gravitacional.

Fonte: Forbes (1982)

Nesse estudo teórico também é mostrado o comportamento da estrutura vertical da amplitude e da fase para os campos de temperatura, vento zonal e meridional para a maré semidiurna lunar, desde a superfície até 400 km de altitude. Na Figura 2.4 é mostrado, como exemplo, apenas o perfil vertical para a temperatura. Os perfis verticais da amplitude da maré lunar na temperatura são crescentes desde a troposfera até a baixa termosfera, onde atinge os valores máximos de amplitude. Acima de 120 km, a amplitude não muda significativamente com a altitude. Pode-se observar também que a fase apresenta, para quase todas as latitudes, progressão com o decréscimo da altitude, porém na mesosfera e baixa termosfera, essa progressão é mais acentuada (mesmo comportamento mostrado no painel da direita da Figura 2.3).

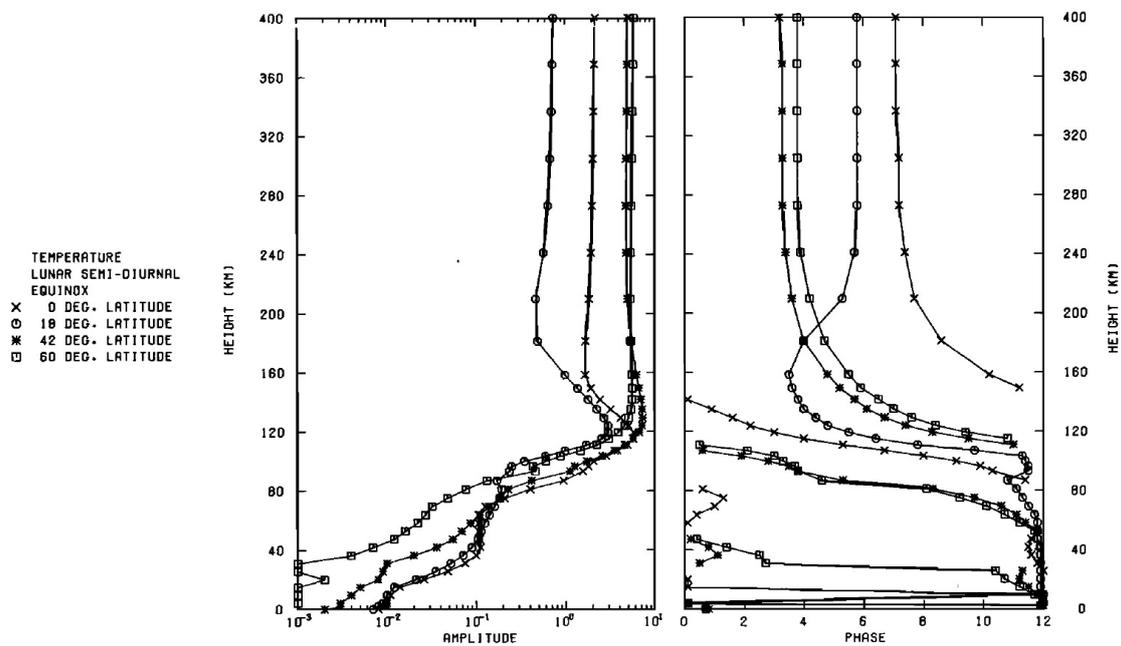


Figura 2.4 - Estruturas verticas da amplitude (esquerda) e fase (direita) para a maré semidiurna lunar na temperatura nos meses de equinócio para 0° , 18° , 42° e 60° de latitude.

Fonte: Forbes (1982)

Stening et al. (1997) investigaram os efeitos do vento de fundo e da temperatura na propagação da maré atmosférica lunar através de um modelo baseado na teoria clássica, porém com a inclusão dos efeitos de dissipação devidos à difusão, ao arraste iônico e ao resfriamento Newtoniano. Nesse estudo foi realizada uma análise da amplitude e fase da maré semidiurna lunar em 90 km, primeiramente sem o vento de fundo para verificar a influência da temperatura e, depois, fazendo a temperatura constante com a latitude. A Figura 2.5 mostra o resultado desta análise para o mês de junho, no painel (a) a amplitude e no painel (b) a fase.

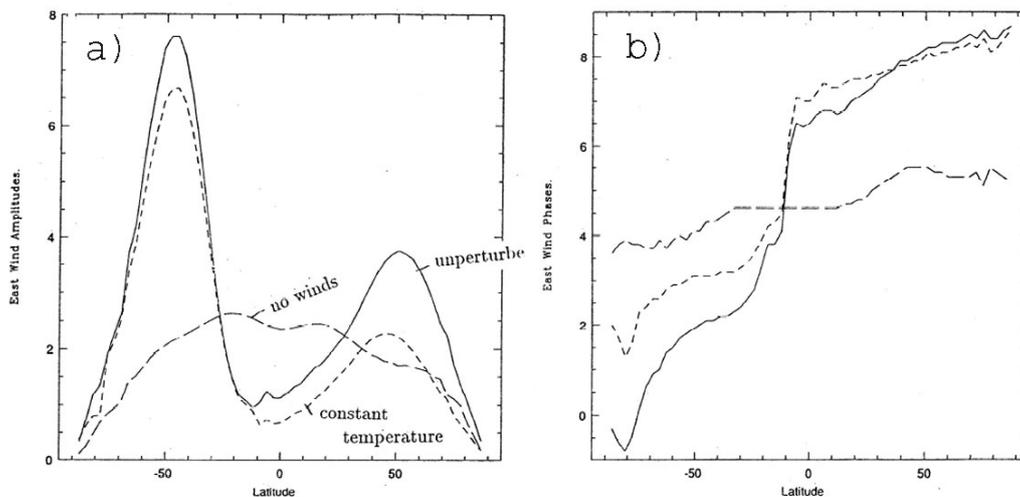


Figura 2.5 - Variação da amplitude (a) e fase (b) da maré lunar no vento zonal para 90 km em junho. A linha sólida designa a variação com vento de fundo e temperatura normais, a linha tracejada curta sem variação de temperatura com a latitude e a linha tracejada longa sem a presença do vento.

Fonte: Stening et al. (1997)

Na Figura 2.5 a linha sólida representa a resposta da maré lunar à influência do vento e da temperatura em condições normais, a linha com traços curtos mostra os resultados quando a temperatura foi considerada sem variação com a latitude e a linha com traços longos mostra os resultados para o vento nulo. Quando o vento foi removido, a estrutura da amplitude da maré semidiurna lunar com a latitude é totalmente modificada e a diferença da fase entre os hemisférios também é perdida, porém quando a temperatura é considerada constante ocorre apenas uma diminuição na intensidade da amplitude e um deslocamento da fase.

Além disso, [Stening et al. \(1997\)](#) analisaram também o efeito do aquecimento estratosférico (esses eventos modificam o vento e a temperatura no tempo e espaço), verificaram que, quando esse aquecimento foi incluído no hemisfério norte, ocorreu uma intensificação na amplitude da maré lunar do hemisfério sul. Como o aquecimento estratosférico pode ser acompanhado de um resfriamento nas altitudes entre 50 e 80 km, uma simulação adicionando um resfriamento nestas altitudes também foi aplicada e verificou-se um aumento da amplitude da maré lunar, porém mais expressivo no hemisfério norte.

Essas simulações do aquecimento estratosférico são mostradas na [Figura 2.6](#), onde a linha contínua representa a variação da amplitude da maré semidiurna lunar com a latitude no vento zonal (painel do lado esquerdo) e no vento meridional (painel do lado direito) em condições normais. A linha pontilhada mostra a resposta ao aquecimento adicionado em 40 km de altitude e a linha tracejada mostra a resposta a um aquecimento adicionado em 40 km e um resfriamento em 80 km. Na [Figura 2.6](#) também é possível observar que a variação da amplitude normal com a latitude apresenta vários máximos e mínimos, principalmente na componente meridional, indicando a presença de vários modos de maré.

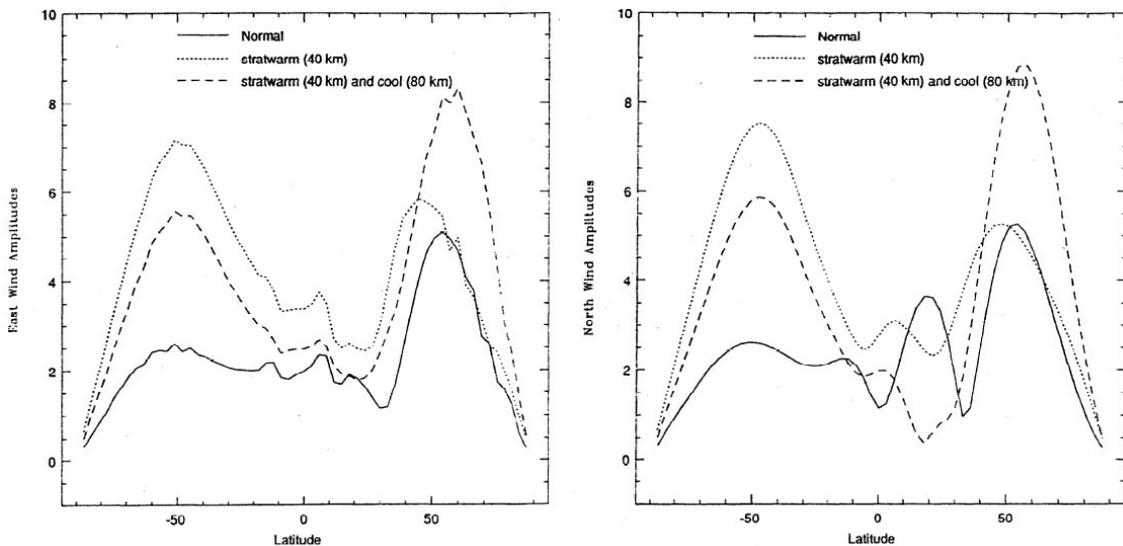


Figura 2.6 - Variação da amplitude no vento zonal (esquerda) e meridional (direita) como função da latitude em 90 km de altitude em janeiro.

Fonte: [Stening et al. \(1997\)](#)

Desta maneira, embora a forçante da maré lunar pela ação gravitacional na atmosfera inferior e pelo efeito do movimento dos oceanos e da superfície da Terra seja bem conhecida, mudanças nas condições básicas na estratosfera e mesosfera podem afetar essa oscilação em níveis mais altos. Além disso, mudanças no vento de fundo que acontecem em um hemisfério podem influenciar o comportamento da maré lunar no outro hemisfério.

Recentemente, [Pedatella e Liu \(2012a\)](#) incluíram a maré semidiurna lunar no modelo WACCM (do inglês, “Whole Atmosphere Community Climate Model”) com o intuito de estudar o comportamento climatológico desta oscilação na pressão de superfície e nos campos de vento na região da MLT. As principais características da maré semidiurna lunar obtidas nesta simulação foram:

- (1) A maré semidiurna lunar migrante apresenta uma variação semianual na pressão de superfície com valores máximos ocorrendo próximo aos meses do solstício de dezembro e junho;
- (2) Os valores máximos de amplitude no vento neutro estão entre ~ 5 e 10 m/s , com o máximo ocorrendo de média para alta latitude no hemisfério de verão;
- (3) Foram obtidas variações longitudinais mesmo tendo incluído apenas forçantes invariantes com a longitude, ou seja, forçantes devido a maré migrante, indicando que as componentes não migrantes são também geradas pela interação não linear entre a maré migrante e as ondas planetárias.

O modelo WACCM também foi utilizado para investigar a resposta da maré lunar aos eventos de aquecimento estratosféricos ([PEDATELLA; LIU, 2012b](#)). Nesta simulação foi verificado que ocorre uma intensificação global da amplitude da maré semidiurna lunar migrante durante estes eventos. Verificaram também que as intensificações que ocorrem na maré lunar durante os eventos de aquecimento estratosféricos súbitos são importantes para a geração das perturbações observadas na ionosfera de baixas latitudes durante estes eventos.

Na região da MLT, as medidas contínuas fornecidas pelos radares possibilitaram o estudo da maré lunar no campo de vento para diferentes setores de longitude, como por exemplo, Ásia ([STENING et al., 2003](#); [NIU et al., 2005](#)), Austrália ([STENING et al., 1994](#); [STENING; VINCENT, 1989](#)), América do Norte ([STENING et al., 1987](#); [STENING et al., 1990](#)), América do Sul ([PAULINO et al., 2012](#); [PAULINO et al., 2012](#)), Europa

(STENING et al., 1990), Atlântico (SANDFORD; MITCHELL, 2007), Ártico (SANDFORD et al., 2006) e Antártica (SANDFORD et al., 2007). Estes estudos mostraram que esta oscilação apresenta algumas diferenças em relação às longitudes, indicando possíveis variações longitudinais.

Os diversos estudos desenvolvidos com medidas de vento na região da MLT contribuíram para a caracterização da maré semidiurna lunar, tais como a variação sazonal da amplitude, da fase e do comprimento de onda desta oscilação, além da variabilidade ano-a-ano. A Figura 2.7 mostra a variação sazonal da maré semidiurna lunar no vento meridional e zonal para a altitude de 93 km no ano de 2005 para três latitudes brasileiras: São João do Cariri (painel superior), Cachoeira Paulista (painel central) e Santa Maria (painel inferior). A variação sazonal da maré semidiurna lunar é bem evidente tanto para a amplitude (painel do lado esquerdo) quanto para a fase (painel do lado direito).

Com a utilização de medidas de vento também foi possível observar a influência de aquecimentos estratosféricos na maré lunar no setor brasileiro (PAULINO et al., 2012). A Figura 2.8 mostra o aumento na amplitude da maré semidiurna lunar que ocorreu durante o aquecimento estratosférico de 2006. A intensificação da amplitude da maré semidiurna lunar é mostrada para a componente meridional [São João do Cariri (84 km - painel (a)), Cachoeira Paulista (87 km - painel (b)) e Santa Maria (84 km - painel (c))] e zonal [São João do Cariri (96 km - painel (d)), Cachoeira Paulista (96 km - painel (e)) e Santa Maria (96 km - painel (f))] do vento. O aumento na amplitude da maré semidiurna lunar ocorre quase simultaneamente nas três latitudes mostradas na Figura 2.8.

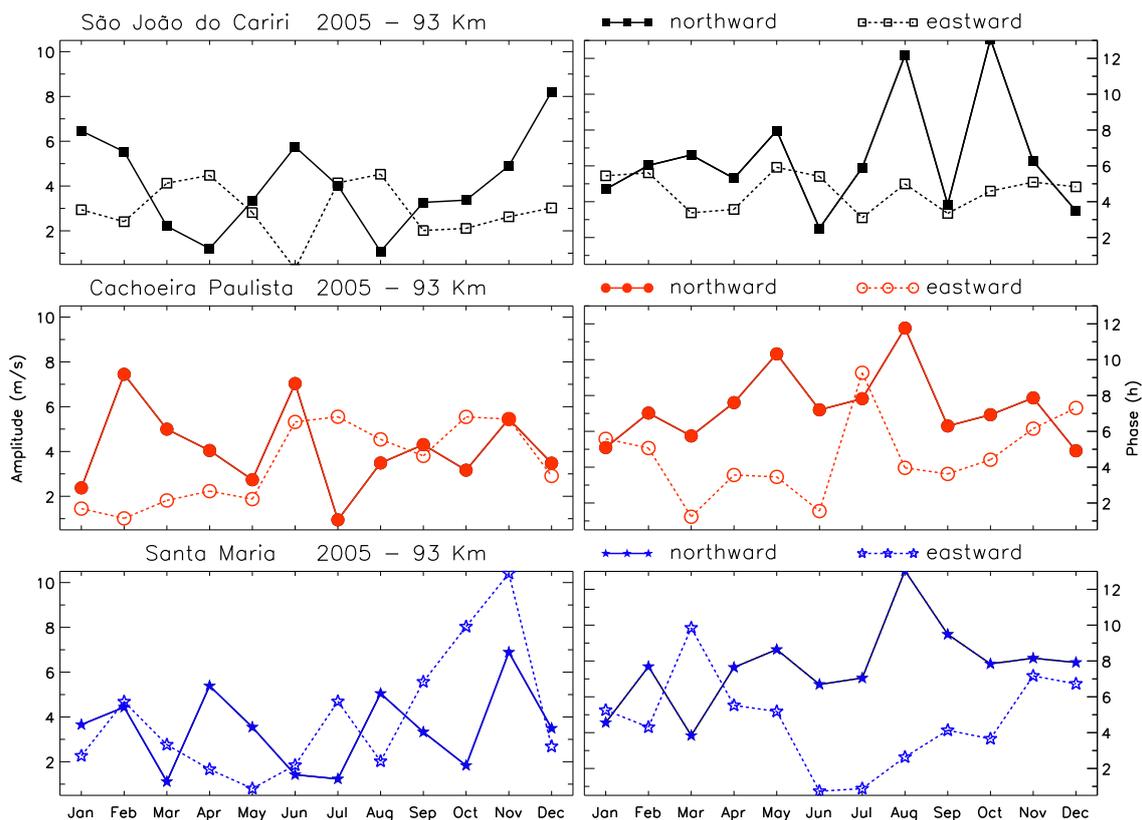


Figura 2.7 - Variação sazonal da maré semidiurna lunar no campo de vento para a altitude de 93 km no ano de 2005 para São João do Cariri (painel superior), Cachoeira Paulista (painel central) e Santa Maria (painel inferior). As amplitudes são mostradas no painel do lado esquerdo e a fase no painel do lado direito.

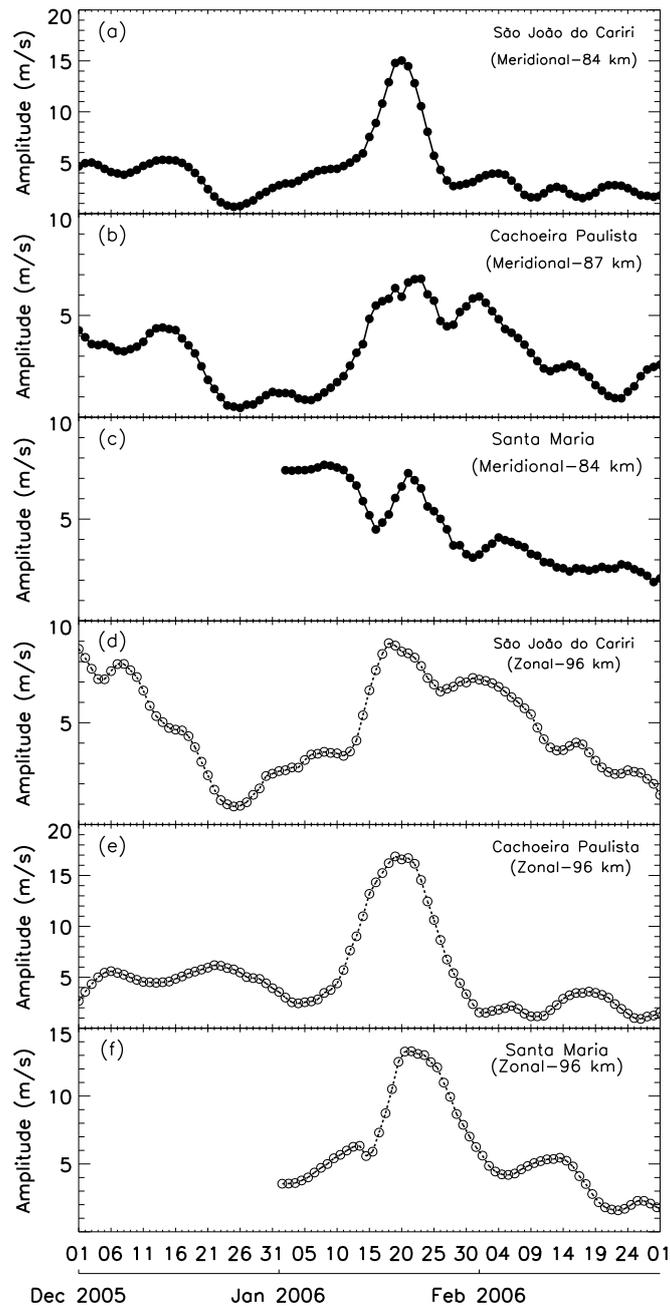


Figura 2.8 - Intensificação da amplitude da maré semidiurna lunar durante o aquecimento estratosférico de 2006. As amplitudes da maré semidiurna lunar são mostradas para São João do Cariri - componente meridional 84 km (a) e componente zonal 96 km (d), Cachoeira Paulista - componente meridional 87 km (b) e componente zonal 96 km (e) e Santa Maria - componente meridional 84 km (c) e componente zonal 96 km (f)

Fonte: [Paulino et al. \(2012\)](#)

Vários estudos mostraram a assinatura da maré semidiurna lunar na ionosfera. As primeiras observações da maré lunar na região F da ionosfera datam do final da década de 1940 em dados do parâmetro foF2 observados em Huancayo. Nos anos subsequentes, trabalhos teóricos (ABURROBB; DUNFORD, 1975; HANDA; MAEDA, 1978a; HANDA; MAEDA, 1978b) e experimentais (MISRA, 1973) foram realizados no intuito de melhorar o entendimento dessa oscilação na região F.

Já em relação à região E da ionosfera, os estudos eram focados nas possíveis influências da maré lunar na geração das camadas esporádicas, no eletrojato e nas variações da componente horizontal do campo geomagnético (MATSUSHITA, 1956; MATSUSHITA; MAEDA, 1965; TARPLEY; MATSUSHITA, 1971; TARPLEY; MATSUSHITA, 1972; WRIGHT; SKINNER, 1959; BROWN, 1965; KOTADIA, 1962).

O interesse em estudar a maré lunar tanto na deriva da região F quanto nas camadas E esporádicas é devido à maré lunar contribuir para a probabilidade da ocorrência de irregularidades na região F da ionosfera (STENING; FEJER, 2001) e também por contribuir com a amplificação do cisalhamento de vento na região E e, conseqüentemente, aumentar a ocorrência de camadas esporádicas (STENING, 1999). Eccles et al. (2011) estudaram a influência da maré lunar na ionosfera e concluíram que, durante períodos geomagneticamente calmos, esta oscilação contribui significativamente na variação da deriva vertical. Mesmo assim, pouco se conhece sobre a interação da maré lunar gerada na baixa atmosfera com a atmosfera ionizada, principalmente, no que se diz respeito às variações latitudinais, longitudinais, sazonais e inter-anuais.

A assinatura da maré lunar na linha verde do oxigênio no comprimento de onda de 5577 nas medidas de aeroluminescência, também foi estudada (FORBES; GELLER, 1972; HURUHATA, 1965). Rastogi et al. (1985) analisaram o comportamento da maré lunar nos dados de conteúdo eletrônico total em baixas latitudes na Índia. Pedatella e Forbes (2010), utilizando medidas do conteúdo eletrônico total obtido por receptores de GPS espalhados pelo globo, revelaram características globais da maré lunar.

Trabalhos mais recentes estudaram a maré semidiurna lunar utilizando medidas de satélite. Zhang e Forbes (2013) determinaram o comportamento da maré semidiurna lunar migrante, utilizando dados de vento nas altitudes entre 80 e 115 km, medidos pelo instrumento HRDI (do inglês, “High Resolution Doppler Imager”) a bordo do satélite UARS (do inglês, Upper Atmosphere Research Satellite), e obtiveram amplitudes típicas de 4-12 *m/s* e comprimento de onda vertical de \sim 40-50 km nas altitudes superiores a 100 km.

Park et al. (2012) utilizaram medidas do satélite CHAMP para investigar a relação entre os eventos de aquecimento estratosférico e a assinatura da maré lunar na ionosfera e verificaram que estes eventos têm uma influência direta sobre a assinatura da maré lunar na ionosfera. Luhr et al. (2012) analisaram os efeitos da maré lunar no eletrojato equatorial através de medidas contínuas do campo magnético fornecidas pelo satélite CHAMP e concluíram que a maré lunar gera um aumento na intensidade do eletrojato equatorial. Forbes e Zhang (2013) comparam a maré semidiurna lunar migrante simulada pelo modelo GSWM (do inglês, “Global-Scale Wave Model”) com a maré lunar migrante obtida nos dados de temperatura do instrumento SABER. Eles concluíram que o modelo GSWM explica algumas características da distribuição latitudinal-sazonal da maré semidiurna lunar migrante e que esta distribuição pode ser, em parte, explicada em termo dos modos de Hough (2,2) e (2,3) da teoria clássica de marés.

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritas as principais características da instrumentação utilizada para obtenção dos dados analisados neste trabalho de tese. Além disso, será apresentada, detalhadamente, a metodologia desenvolvida para identificação e determinação da maré semidiurna lunar nas medidas de temperatura obtidas pelo instrumento SABER.

3.1 Instrumento SABER

O instrumento SABER (do inglês ‘Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry’) foi lançado a bordo do satélite TIMED (do inglês ‘Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics’) no dia 07 de dezembro de 2001, porém as observações começaram efetivamente em janeiro de 2002. O satélite TIMED é composto por quatro instrumentos: SEE (do inglês ‘Solar Extreme Ultraviolet Experiment’), TIDI (do inglês, ‘TIMED Doppler Interferometer’), GUVI (do inglês ‘Global Ultraviolet Imager’) e SABER.

O instrumento SEE é composto por um espectrômetro e por um conjunto de fotômetros projetados para realizar medidas de radiação ultravioleta solar na mesosfera e na baixa termosfera-ionosfera (entre 60 km e 180 km). Este instrumento mede a radiação solar na faixa de comprimento de onda de raios-X menos intensos, extremo ultravioleta e ultravioleta distante. Os principais objetivos deste instrumento são estudar a variação da radiação solar, a forma como esta radiação afeta a atmosfera e o quanto ela aquece e altera sua composição.

O instrumento TIDI mede perfis de vento e temperatura globais na região entre 60 km e 180 km. Ele observa emissões do Oxigênio atômico no comprimento de onda de 557.7 nm (OI557,7 nm) e linhas rotacionais na banda atmosférica O_2 em 762 nm para, através do deslocamento Doppler, determinar o vento.

O instrumento GUVI, por sua vez, é um espectrógrafo que realiza medições globais da composição atmosférica, da temperatura e da entrada de energia auroral. A [Figura 3.1](#) ilustra a concepção artística do TIMED e as respectivas posições dos seus instrumentos.

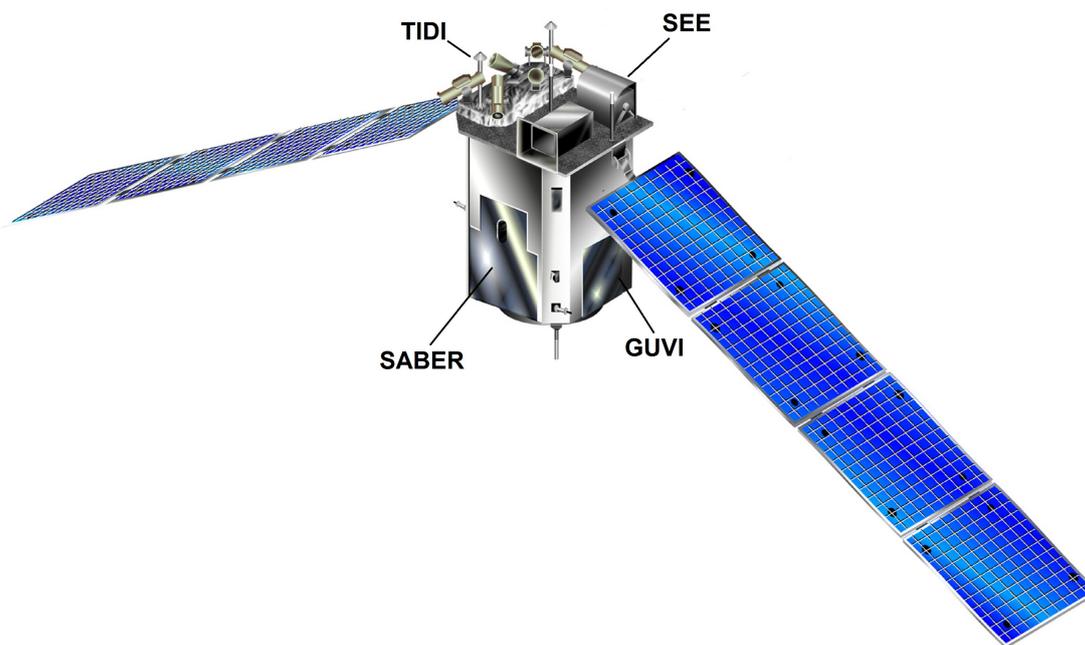


Figura 3.1 - Concepção artística do satélite TIMED.

Fonte: [http : //www.timed.jhuapl.edu/WWW/index.php](http://www.timed.jhuapl.edu/WWW/index.php)
- Website do satélite TIMED (2013).

O instrumento SABER é um radiômetro multi-espectral que opera no infravermelho entre $1,27\mu m$ e $17\mu m$. Ele é capaz de medir perfis verticais de emissões de vários gases na atmosfera terrestre. Este instrumento possui uma visada de limbo, que permite a realização de sondagens contínuas durante o dia e a noite, possibilitando o estudo da variabilidade de parâmetros atmosféricos com uma cobertura global.

Os principais objetivos científicos deste instrumento são proporcionar medidas que permitam estudar a estrutura da atmosfera na região da mesosfera e da baixa termosfera-ionosfera, ou seja, a variação da temperatura, densidade e pressão com a altitude. Além disso, estudar também as variações dos gases, tais como Oxigênio e Hidrogênio e a dinâmica entre as regiões atmosféricas.

Os perfis de emissões de limbo observados são analisados para recuperar perfis verticais, com ~ 2 km de resolução em altitude, dos seguintes parâmetros: temperatura cinética, concentrações do CO_2 , O_3 , H_2O , Oxigênio e Hidrogênio atômico, taxa de emissão volumétrica do O_2 , OH, NO, principais taxas de resfriamento atmosférico

(como por exemplo, a aeroluminescência irradiada de volta para o espaço), taxas de aquecimento solar, taxas de aquecimento químico e vento geostrófico (MERTENS et al., 2002).

A cada 58 segundos, este instrumento realiza uma varredura do horizonte da Terra para cima e para baixo coletando dados sobre um intervalo de ~ 180 km de altitude até a superfície da Terra. No curso de uma órbita, o SABER observa regiões polares em um hemisfério e altas latitudes no hemisfério oposto. No curso de um dia, possui uma cobertura de medidas em um intervalo de 15 longitudes.

Neste trabalho são utilizados perfis de temperatura fornecidos pelo instrumento SABER. A temperatura fornecida pelo SABER é a temperatura cinética, a qual é obtida utilizando medidas de emissões de CO_2 em $15 \mu\text{m}$ de dois canais passa banda ($650 - 695 \text{ cm}^{-1}$) e ($580 - 760 \text{ cm}^{-1}$). Os dois canais são utilizados para registrar a pressão com a altitude na estratosfera e inferir a temperatura cinética supondo condições de equilíbrio termodinâmico local (LTE, do inglês ‘Local Thermodynamic Equilibrium’).

Neste caso é considerado que o CO_2 possui sua taxa volumétrica de mistura homogênea e que a mesma é bem conhecida. Além disso, é preciso considerar que as bandas vibro-rotacionais observadas do CO_2 estão em condições de equilíbrio local. No entanto, estas suposições são válidas apenas para medidas de radiância abaixo de 70 km, pois para altitudes superiores o CO_2 não é uniformemente misturado. Sendo assim, na região da MLT é utilizado um algoritmo de recuperação considerando condições de não-LTE para inferir simultaneamente a temperatura cinética e a razão de mistura volumétrica do CO_2 através de medidas de radiância do CO_2 em $15 \mu\text{m}$ no canal espectral ($650 - 695 \text{ cm}^{-1}$) e CO_2 em $4,3 \mu\text{m}$ no canal ($2320 - 2400 \text{ cm}^{-1}$).

A recuperação da temperatura em condições LTE e a distribuição de pressão na estratosfera fornecem condições de contorno inferior para a aplicação da condição não-LTE. O modelo não-LTE de obtenção da temperatura cinética é composto principalmente por dois componentes: (1) modelo de radiância e (2) modelo de inversão. O modelo de radiância é o componente que simula a medida da radiância ao longo da linha de visada de limbo. Este algoritmo é composto por duas partes: (i) modelo de temperatura vibracional e (ii) modelo de radiância de limbo. A radiância de limbo é calculada utilizando o algoritmo BANDPAK, com expansão para condição de não-LTE. Uma descrição detalhada do algoritmo BANDPAK e a inclusão das condições não-LTE no mesmo é realizada por Edwards et al. (1993), Marshall et al. (1994) e Mlynczak et al. (1994).

Existem dezessete bandas em $15 \mu\text{m}$ que contribuem para radiância de limbo do CO_2 no canal espectral passa banda de $(650 - 695 \text{ cm}^{-1})$. A temperatura vibracional para estas bandas são entradas não-LTE para o modelo de radiância de limbo e são calculadas através do modelo operacional ($\text{CO}_2 T_\nu$) desenvolvido por López-Puertas et al. (1998) que utiliza o algoritmo BANDPAK para o cálculo de transferência de radiação.

No módulo de recuperação da temperatura para condições não-LTE existem dois ciclos primários de relaxação. No ciclo interno a temperatura cinética é recuperada utilizando a aproximação da casca de cebola, enquanto que a pressão, a razão de mistura volumétrica do CO_2 e a temperatura vibracional são fixas. A técnica da casca de cebola mede a radiância da camada atmosférica mais externa para então, sucessivamente, medir nas camadas internas seguintes. A temperatura cinética é obtida em cada altitude ajustando a temperatura cinética local até que a radiância modelada corresponda à radiância medida dentro do critério de convergência.

A temperatura é ajustada utilizando a interação newtoniana e o algoritmo de estimação ideal (RODGERS, 1976). A aproximação da casca de cebola é crítica na recuperação da temperatura através das medidas de emissão de limbo do CO_2 na região da MLT devido a radiância de limbo do CO_2 $15 \mu\text{m}$ para altitudes mesosféricas ser dominado por emissões de camadas de altitudes superiores. Isto também ocorre para radiância de limbo do CO_2 $4,3 \mu\text{m}$. A técnica da casca de cebola assegura que a emissão modelada corresponda a medida em camadas de altitudes superiores, mesmo que a combinação recuperada temperatura-pressão- CO_2 esteja incorreta em etapas intermediárias no processo de relaxação. Para um caminho de limbo particular, este efeito apresenta maior sensibilidade para a temperatura cinética local na altitude tangente procurada.

No ciclo externo de relaxação, o perfil de pressão é reconstruído a partir da altitude limite inferior utilizando o perfil de temperatura obtido pelo processo anterior (aproximação da casca de cebola) e a lei barométrica de pressão. A temperatura vibracional é atualizada utilizando o modelo de CO_2 $15 \mu\text{m}$ para esta temperatura com os perfis de pressão, temperatura cinética e razão de mistura volumétrica do CO_2 recuperados previamente como parâmetro de entrada. Este procedimento é repetido até que todo o processo de recuperação da temperatura alcance o critério de convergência. Isto é, o critério requer que a diferença entre a temperatura recuperada em duas interações sucessivas seja muito menor que o erro da solução esperada (valor especificado pelo operador) em todas as altitudes acima da altitude especificada.

Mais informações sobre a obtenção da temperatura cinética podem ser encontradas em Mertens et al. (2002) e Mertens et al. (2001).

A Figura 3.2 mostra perfis de temperatura em tempo local ($\sim 23.9 h$) para o dia 13 de janeiro de 2003 para um segmento de órbita. A localização dos perfis é aproximadamente $22^\circ S$ de latitude e $44^\circ W$ de longitude. A linha contínua representa o perfil recuperado das medidas do SABER e a linha tracejada o perfil do modelo atmosférico NRLMSISE-00. O NRLMSISE-00 é um modelo empírico da atmosfera adaptado do modelo “Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Radar”(MSIS) pelo “Naval Research Laboratory”(NRL), a letra “E”na sigla indica que o modelo se estende desde do solo até o espaço. Este modelo calcula composição, temperatura e densidade de massa total da atmosfera neutra. Mais informações sobre NRLMSISE-00 e seus parâmetros podem ser obtidas através da seguinte página eletrônica: <http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>.

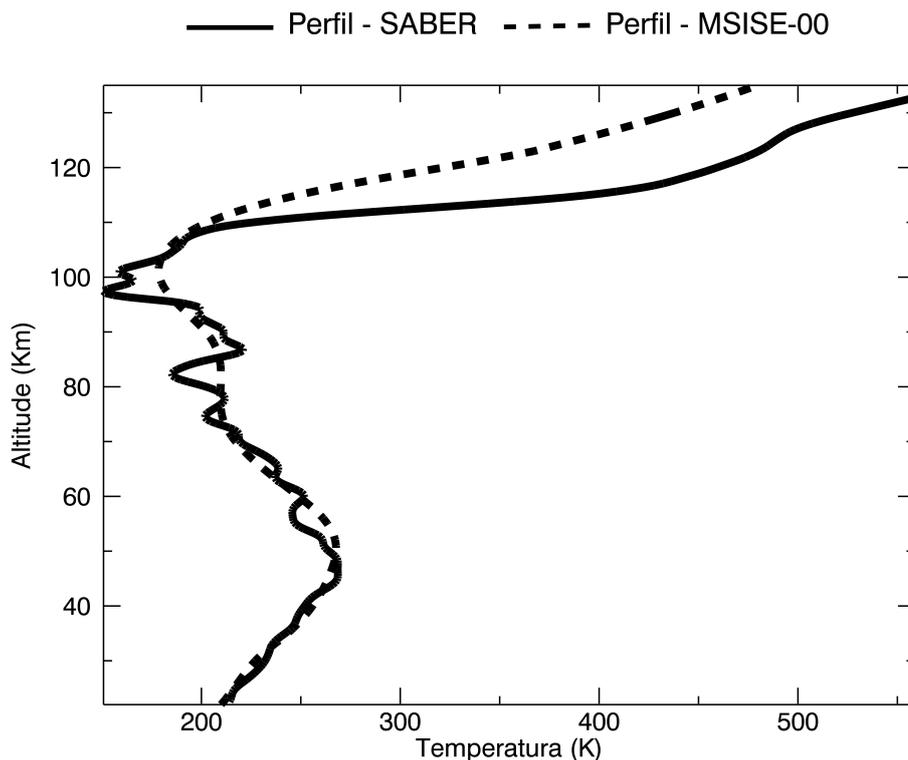


Figura 3.2 - Perfis de temperatura obtidos através do instrumento SABER (linha contínua) e do modelo atmosférico NRLMSISE-00 (linha tracejada).

Nos perfis de temperatura observam-se distintamente as regiões atmosféricas segundo a variação vertical da temperatura. Nesta figura verifica-se que nas altitudes entre 20 km e 110 km os perfis de temperatura são similares, no entanto o perfil do SABER apresenta pequenas variações que podem estar associadas a ondas de gravidade. Acima de 110 km, as curvas de temperatura apresentam a mesma tendência de crescimento, porém os valores modelados são menores do que os medidos.

Médias zonais da temperatura são mostradas na [Figura 3.3](#) para os meses de janeiro (a) e julho (b) de 2003 para altitudes entre 20 km e 130 km. Os níveis de cores indicam os valores da temperatura. Nesta figura é possível verificar as camadas da atmosfera baseada na estrutura vertical da temperatura. O intervalo entre ~ 20 km e 50 km, no qual a temperatura aumenta devido à absorção da radiação ultravioleta pelo O_3 e H_2O , atingindo um valor máximo para este período de ~ 270 K, corresponde à estratosfera seguida da estratopausa. Logo acima deste intervalo, a temperatura decresce até ~ 85 km -100 km, onde se observa uma temperatura mínima. Esta camada corresponde à mesosfera e a região de temperatura constante corresponde à mesopausa. A camada acima da mesopausa, onde a temperatura aumenta rapidamente com a altitude devido a absorção da radiação solar direta na região espectral do ultravioleta e extremo ultravioleta, corresponde à termosfera. A estrutura básica da mesosfera superior e da baixa termosfera é bem representada pelas medidas do SABER. Além disso, verifica-se que a altitude da mesopausa varia com a latitude em ambas as figuras, podendo variar de ~ 85 km a 98 km sendo mais elevada no hemisfério de inverno. Esta característica da mesopausa também foi observada através de medidas de instrumentos de solo em algumas localidades, entretanto as medidas contínuas globais fornecidas pelo SABER permitem analisar detalhadamente a evolução térmica da região da MLT.

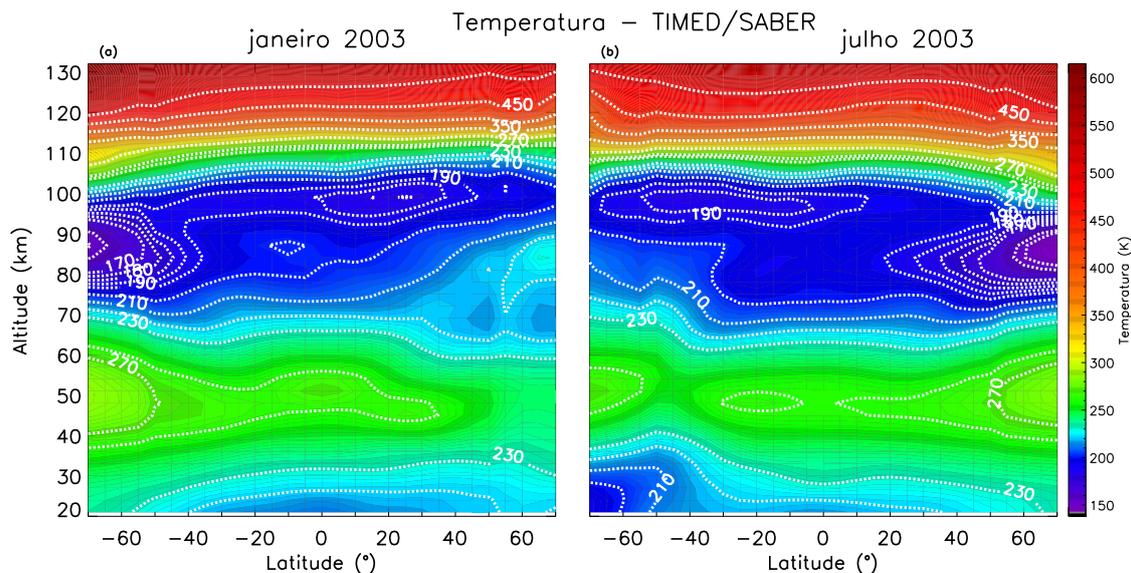


Figura 3.3 - Temperatura média zonal obtida pelo SABER para janeiro (a) e julho (b) de 2003. Os níveis de cores indicam os valores da temperatura.

Na recuperação da temperatura, além das incertezas geradas pelo instrumento e erro de calibração, as incertezas na determinação do CO_2 também afetam este processo. Um dos parâmetros que mais influencia a incerteza nesta recuperação é a taxa de desativação vibracional do CO_2 pela colisão com o oxigênio atômico. Este processo é crítico na determinação da temperatura vibracional da banda fundamental do CO_2 na MLT.

A recuperação do perfil de temperatura depende do conhecimento do coeficiente da taxa de reação e da concentração do oxigênio atômico (ver mais detalhes em Mertens et al. (2001)). A incerteza no CO_2 é obtida utilizando dois perfis diferentes da razão volumétrica de mistura do CO_2 , sendo o perfil medido através de foguetes considerado como verdadeiro. A incerteza no CO_2 domina o erro na recuperação da temperatura abaixo de 100 km.

3.2 Banco de dados

Os dados atmosféricos medidos a bordo de satélite fornecem uma ótima cobertura espacial para o estudo global de ondas tais como as marés atmosféricas. O satélite TIMED possui um órbita quase-sol-síncrona (em inglês “quasi-sun-synchronous”), ou seja, as sondagens cruzam o equador quase no mesmo horário local. A Figura 3.4 mostra uma ilustração das órbitas do SABER para o dia 3 de janeiro de 2003. No eixo horizontal é mostrada a longitude de -180° a 180° , no eixo vertical têm-se a latitude de -90° a 90° e a barra de cores indica a hora local. Cada ponto representa a localização em longitude e latitude da medida de temperatura.

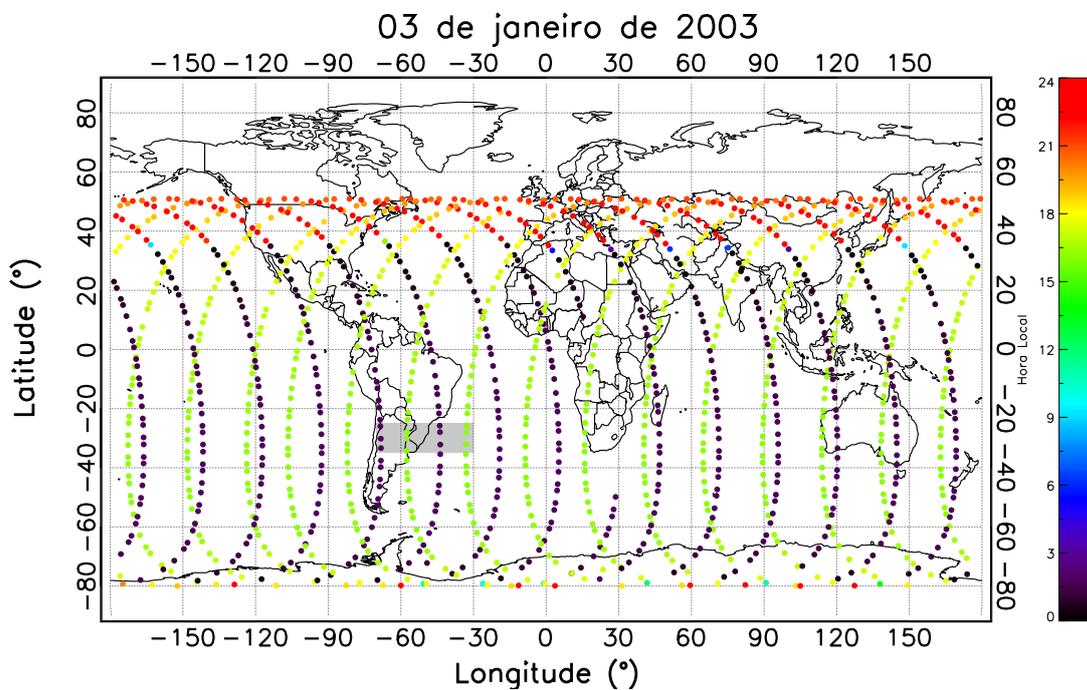


Figura 3.4 - Órbitas do SABER para o dia 03 de janeiro de 2003. O retângulo cinza delimita uma grade de 40° de longitude por 10° de latitude, centrada em 30° S e 50° W.

Nesta Figura pode-se verificar que as órbitas de subida ou descida acontecem praticamente na mesma hora local no intervalo de latitude entre aproximadamente -70° e 40° , ou seja, por volta das 17 h para órbita ascendente e por volta das 3 h para órbita descendente. No entanto, o tempo local em que as medições ocorrem se desloca um pouco a cada dia, completando 24 horas em tempo local em um intervalo

de 60 dias quando combinados os dados de subida e descida.

A cobertura das sondagens do satélite/instrumento TIMED/SABER é de $\pm 180^\circ$ em longitude e de $\pm 83^\circ$ em latitude. Porém, em um período regular, no caso do SABER aproximadamente a cada 60 dias, a direção de sondagem muda, fazendo com que a cobertura latitudinal seja maior em um dado hemisfério, dependendo da época do ano. Esta variação na cobertura latitudinal pode variar de 53° em um hemisfério e 83° no outro hemisfério. A Figura 3.5 mostra a cobertura latitudinal ao longo do ano de 2003 das medidas do SABER. No eixo horizontal são mostrados os meses do ano e no eixo vertical a latitude de -90° a 90° . Pode-se verificar que para o ano de 2003 a cobertura do satélite muda seis vezes, nos dias 14 de janeiro, 17 de março, 21 de maio, 15 de julho, 18 de setembro e 19 de novembro.

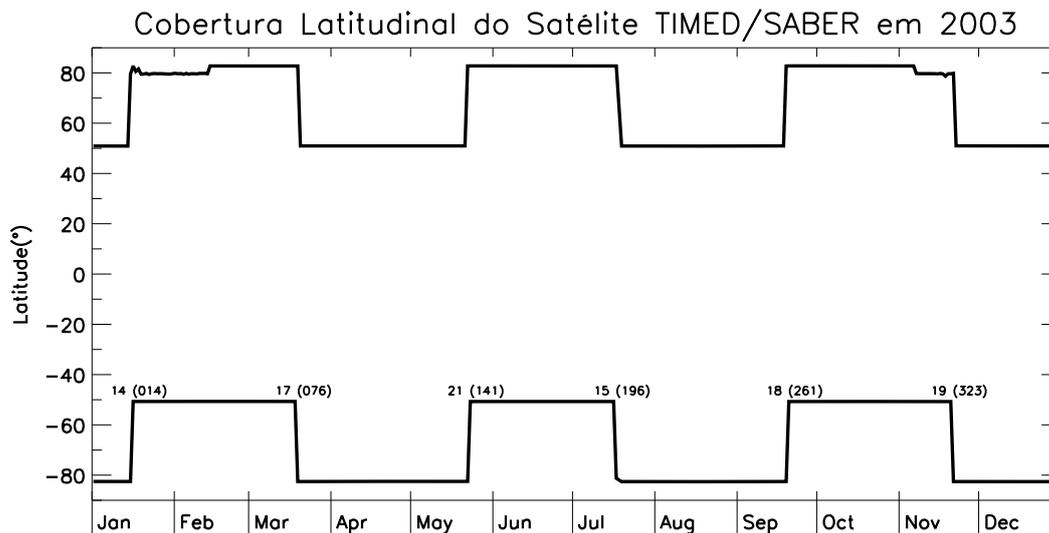


Figura 3.5 - Cobertura latitudinal das sondagens do SABER em 2003.

3.3 Identificação da maré semidiurna lunar nos dados de temperatura do SABER

Com o intuito de verificar a assinatura da maré lunar nos dados de temperatura medidos pelo instrumento SABER foram analisados intervalos de aproximadamente 60 dias de medidas restritas a grades arbitrárias de latitude e longitude. Na [Figura 3.6](#) é mostrada uma grade de 40° de longitude por 10° de latitude, centrada em (30°S ; 50°W). Dentro dessa grade foi possível reunir dados de quatro passagens diárias do satélite, duas ascendente e duas descendentes. Essa grade corresponde à amplificação da região delimitada pelo retângulo cinza da [Figura 3.4](#).

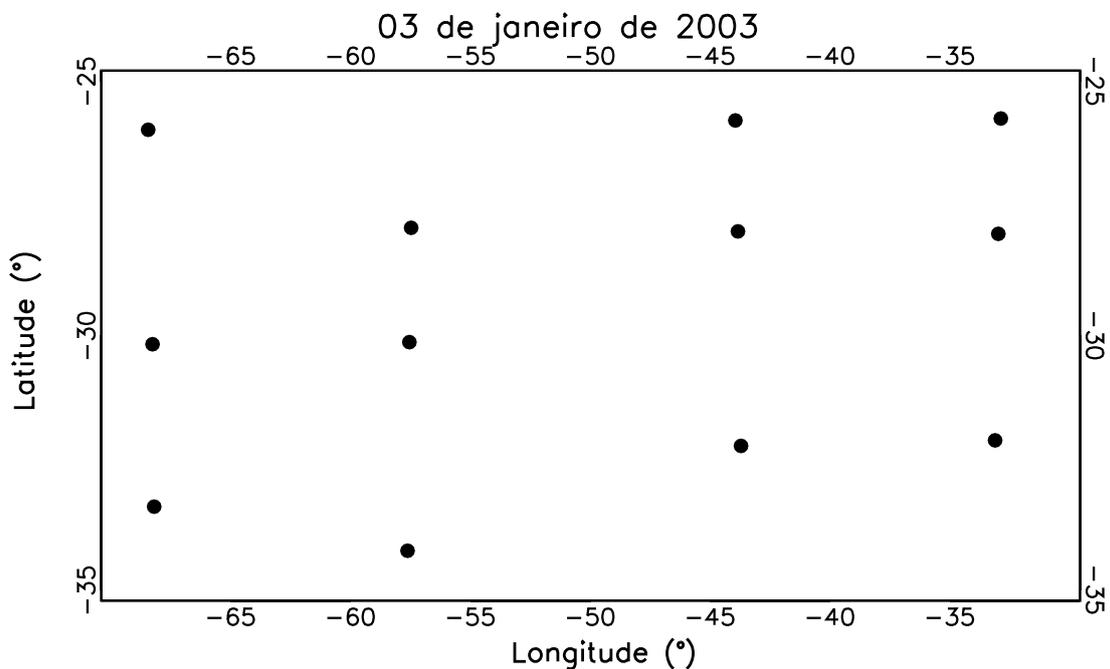


Figura 3.6 - Ilustração das órbitas do satélite TIMED/SABER dentro de uma grade centrada em $50^\circ W$ e $30^\circ S$.

Tomando aproximadamente 60 dias de dados no período entre 15 de dezembro de 2002 e 15 de fevereiro de 2003, foi possível obter uma quantidade significativa de sondagens com uma boa distribuição ao longo do dia, como pode ser observado na [Figura 3.7](#). A barra de cores indica a hora local em que as medidas foram realizadas. Observa-se que os pontos estão distribuídos aleatoriamente ao longo da grade, além disso, não existe nenhuma região e nenhum intervalo de hora preferencial.

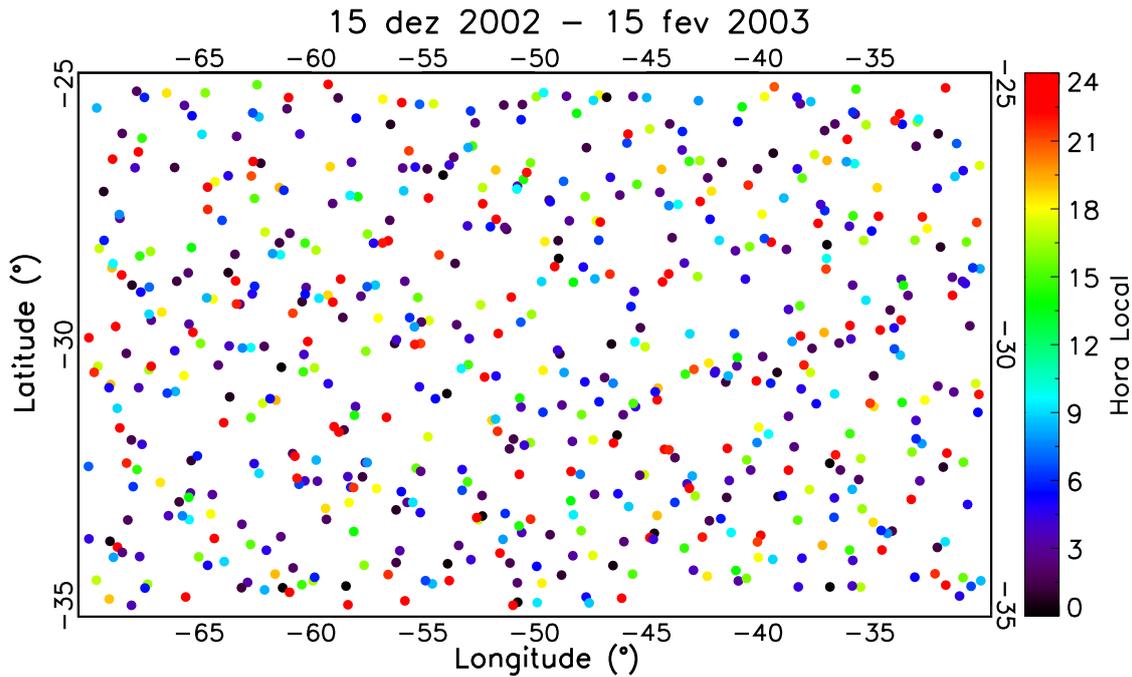


Figura 3.7 - Distribuição das medidas de temperatura dentro de uma grade centrada em 50° W e 30° S, em função da hora local, dada pelo código de cores.

Este intervalo de 60 dias também garante cinco ciclos completos da maré semidiurna lunar, tendo em vista que a mesma tem um período diferente da perspectiva do instrumento a bordo do satélite. Forbes e Zhang (2013) mostraram que apenas 11,86 dias são suficientes para determinar, sem “aliasing”, a maré semidiurna lunar nos dados do SABER, porém este intervalo de 60 dias visa aumentar a confiabilidade estatística dos resultados. Mais detalhes sobre o intervalo mínimo para determinação da maré lunar a partir de instrumentos a bordo de satélites serão dados na Seção 3.4.

Após a verificação da distribuição de sondagens ao longo do dia para o intervalo de 60 dias, analisamos o número de órbitas diárias para este intervalo de tempo e para as dimensões da grade especificadas na Figura 3.6. O histograma com a distribuição diária do número de órbitas pode ser visto na Figura 3.8. Para um intervalo específico de aproximadamente 60 dias a grade centrada em 50° W e 30° S contém 4 órbitas durante 23 dias, 3 órbitas para 33 dias, 2 órbitas para um dia e 1 órbita para 2 dias. O zero nesta figura representa que não ocorreu passagens do satélite ou que não foram obtidas medidas em algum dia para esta grade. Sendo assim, para 3 dias não temos medidas e/ou não foram observados passagens do satélite.

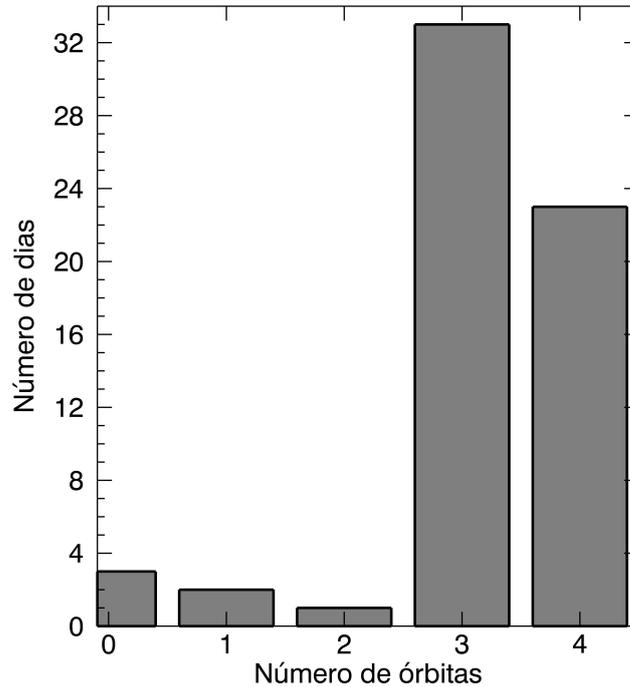


Figura 3.8 - Distribuição do número de órbitas diárias contidas na grade da Figura 3.6 para 60 dias de medidas do instrumento SABER/TIMED.

Desta maneira, verifica-se que na maioria dos dias é possível obter entre 3 e 4 órbitas. Portanto este intervalo de tempo e tamanho da grade fornece uma boa quantidade de dados para serem utilizados no estudo de marés. Como a maré semidiurna lunar se propaga verticalmente, atingindo maiores valores de amplitude entre 90 km e 120 km de altitude, foram escolhidas, inicialmente, altitudes próximas a este intervalo para analisar sua assinatura nos dados de temperatura. Na Figura 3.9 pode ser vista a sequência temporal da temperatura nas altitudes de 94 km (painel inferior), 102 km (painel central) e 113 km (painel superior) para o mesmo período da Figura 3.7. No eixo horizontal são mostrados os dias do ano e no eixo vertical a temperatura em unidade Kelvin. A disposição sequencial da temperatura para as três altitudes não mostra padrões de oscilações bem definidos.

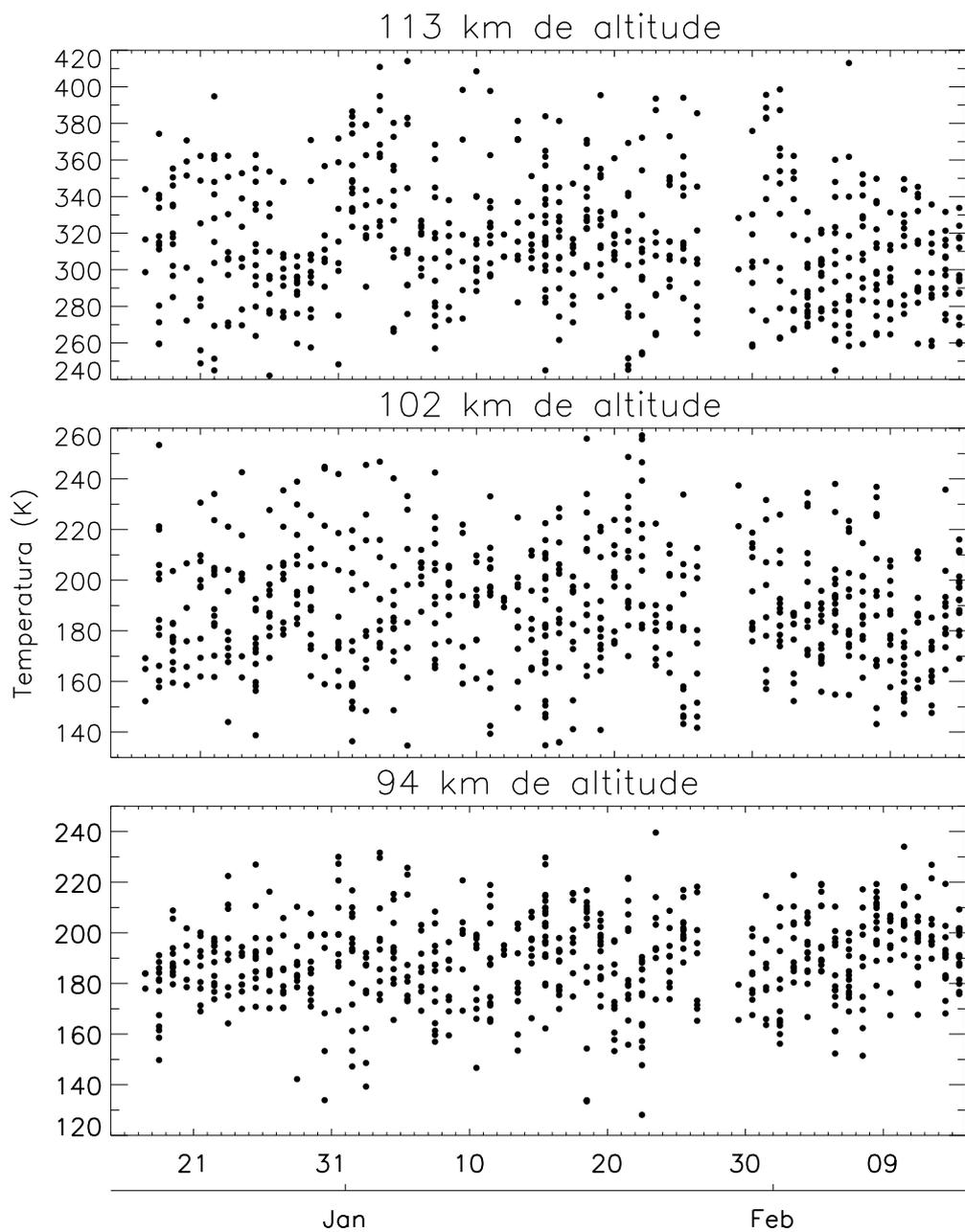


Figura 3.9 - Distribuição das medidas de temperatura no intervalo de tempo entre 15 de dezembro de 2002 e 15 de fevereiro de 2003 (~ 60 dias) para as altitudes de 94 km (painel inferior), 102 km (painel central) e 113 km (painel superior).

Com o intuito de verificar o comportamento das medidas de temperatura ao longo do dia, os dados de temperatura mostrados na [Figura 3.9](#) foram agrupados dentro de um dia solar.

A [Figura 3.10](#) mostra a distribuição das medidas em um dia solar para 94 km (painel inferior), 102 km (painel central) e 113 km (painel superior). Os símbolos representam as medidas de temperatura em hora solar local e a linha contínua representa os valores médios calculados para cada hora.

Na [Figura 3.10](#) verifica-se que, mesmo utilizando uma resolução temporal de ~ 60 dias, período em que o satélite TIMED completa uma cobertura de 24 horas em tempo local, espaços sem medidas são observados para este intervalo de tempo, latitude e longitude. Isto acontece, principalmente, devido a duas razões: (1) o instrumento SABER olha apenas para um lado do satélite, e (2) o satélite muda de direção antes que a cobertura ao meio dia seja obtida. A cobertura em tempo local é avançada para depois do meio dia após a mudança de direção ([ZHU et al., 2005](#)). Devido aos intervalos sem medidas, não é possível certificar um padrão de onda na distribuição dos dados em 24 horas solares ([Figura 3.10](#)).

No entanto, a maré lunar é controlada pelo movimento da Lua ao invés do Sol, sendo assim, esta oscilação não se repetirá dia-a-dia com a mesma fase quando medida em tempo solar local. Portanto, a análise deve ser aplicada relacionando a fase da maré com a posição da Lua no céu. Para isto, será feita a análise do dia composto lunar, ou seja, o tempo solar local das medidas será convertido para tempo lunar local (um dia lunar é definido como 24 h e 50 min (solar), o qual corresponde ao tempo necessário para a Lua completar uma órbita em torno da Terra) e as medidas serão agrupadas dentro de um dia. A análise do dia composto consiste em agrupar as medidas realizadas dentro de um intervalo de tempo pré estabelecido (neste caso, 60 dias) como se tivessem medidas em um único dia.

A análise do dia composto revela apenas características do número inteiro de ciclos em um dia, neste caso, dia lunar. Utilizando esta análise, qualquer característica coerente que se repita com um período igual a exatamente n (um valor inteiro) vezes a frequência de trânsito lunar será evidente, enquanto que, quaisquer oscilações com frequências que não estejam relacionadas ao trânsito lunar tenderão a cancelar-se após um grande número de ciclos e conseqüentemente não serão evidentes.

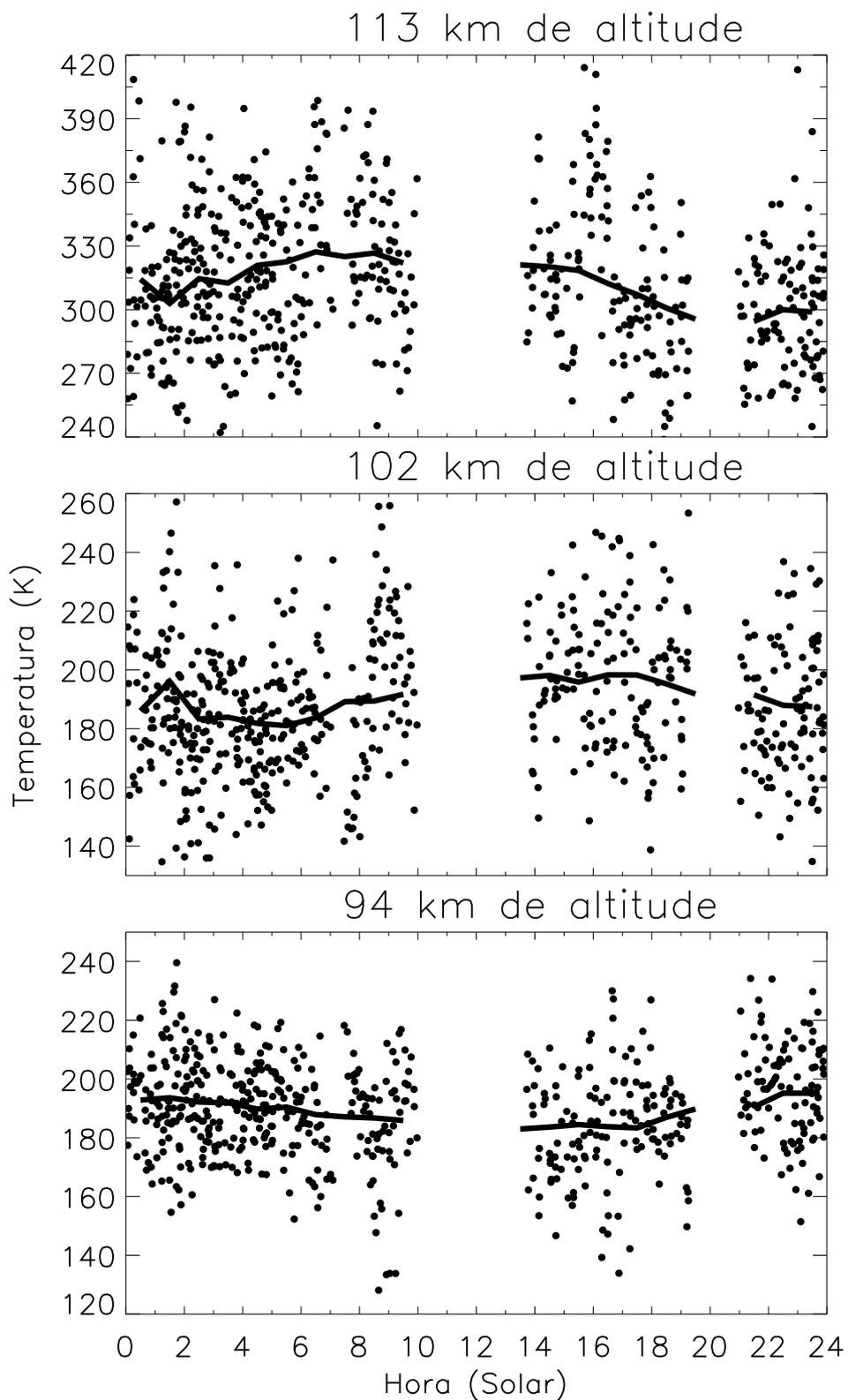


Figura 3.10 - Análise do dia composto solar para as altitudes de 94 km (painel inferior), 102 km (painel central) e 113 km (painel superior). A linha contínua representa a média horária

Na [Figura 3.11](#) mostra-se a análise do dia composto lunar para as mesmas altitudes e intervalo de tempo da [Figura 3.10](#). Os símbolos representam as medidas de temperatura em hora lunar local, a linha contínua representa os valores médios calculados para cada hora lunar e a linha tracejada o ajuste de mínimos quadrados para o período de 12 horas lunares (correspondente a 12,42 horas solares), ou seja, a maré semidiurna lunar.

Na [Figura 3.11](#) pode-se observar que a oscilação semidiurna é bem evidenciada pela linha de ajuste (linha tracejada) nas três altitudes, contudo, a assinatura também pode ser vista através dos valores médios (linha contínua) e do envoltório de todas as medidas (principalmente em 102 km e 113 km de altitude). Para este intervalo de tempo e grade específica a contribuição da maré semidiurna lunar alcança valores de amplitude de ~ 12 K em 113 km, ~ 6 K em 102 km e ~ 4 K em 94 km.

Para verificar se a oscilação identificada na [Figura 3.11](#) apresenta característica de uma onda verticalmente propagante, ou seja, uma progressão de fase com o decréscimo da altitude e um aumento da amplitude com a altitude, a análise do dia composto lunar foi estendida para os intervalos de altitude entre 80 km e 120 km ([Figura 3.13](#)) e 35 km e 80 km ([Figura 3.12](#)). Na análise da [Figura 3.13](#) e da [Figura 3.12](#) em cada altitude a média da temperatura foi subtraída.

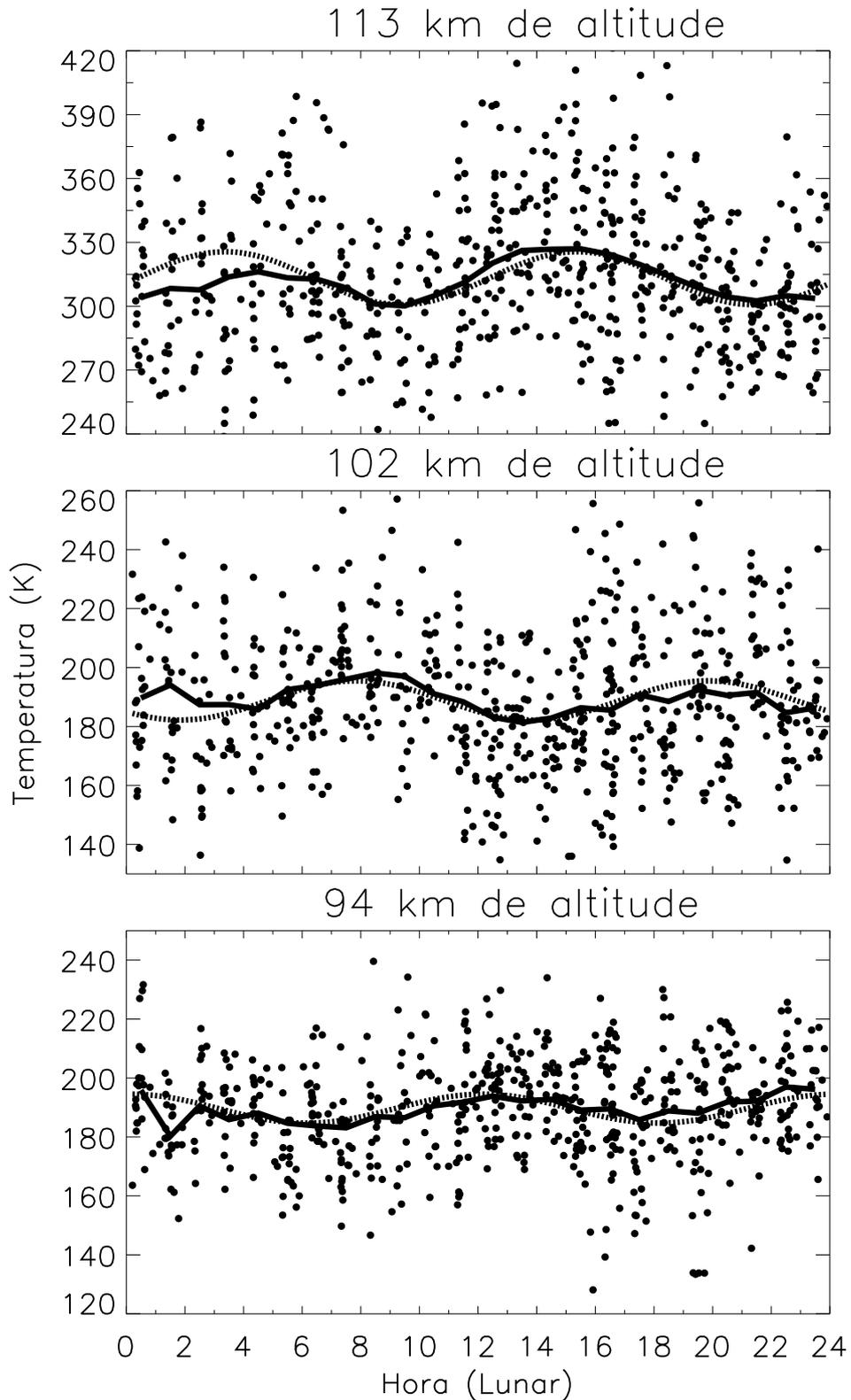


Figura 3.11 - Análise do dia composto lunar para as altitudes de 94 km (painel inferior), 102 km (painel central) e 113 km (painel superior). A linha contínua representa a média horária e a linha tracejada o ajuste de mínimos quadrados para a maré semidiurna lunar.

As Figuras 3.13 e 3.12 mostram o comportamento da maré lunar na perturbação da temperatura desde a estratosfera até a baixa termosfera (que corresponde também à base da camada E da ionosfera). As barras de cores ilustram os valores das amplitudes e as isolinhas de zero são indicadas pelas linhas sólidas.

Em ambas as Figuras (3.13 e 3.12) é possível identificar um padrão de onda com dois ciclos em um dia lunar. Além disso, verifica-se que na região da MLT a amplitude aumenta de ~ 1 K em 80 km para 10 K - 14 K entre 115 km e 120 km, enquanto que, na região da estratosfera e mesosfera varia de ~ 1 K (35 km) para ~ 3 K - 4 K (70 km - 75 km). As maiores amplitudes são observadas na região da MLT, como é esperado teoricamente para a maré semidiurna lunar (FORBES, 1982). Analisando as duas figuras observa-se uma mudança de fase entre 70 km e 80 km.

Pode-se concluir que a análise do dia composto lunar revela característica coerente de onda, que tem exatamente dois ciclos por dia lunar e além disso, mostra um gradiente de fase correspondente a uma onda verticalmente propagante para cima. É importante destacar que nenhuma ferramenta de filtragem foi aplicada para os dados e que esta grade foi selecionada aleatoriamente. Chama a atenção o fato que mesmo nas altitudes inferiores da atmosfera (Figura 3.12) quando a amplitude da maré lunar ainda é relativamente pequena, é possível identificá-la nos dados de maneira bem clara. A característica de propagação da fase, sendo mais inclinada em relação à vertical para as altitudes da MLT (o que identifica ondas que se propagam verticalmente com mais facilidade) também é algo previsto pelos modelos para a maré semidiurna lunar (FORBES, 1982).

Portanto, as ilustrações mostradas ao longo desta secção nos permite concluir que é possível determinar a maré semidiurna lunar nos dados de temperatura do satélite TIMED/SABER utilizando o intervalo de tempo de 60 dias e uma grade de 40° de longitude e 10° de latitude. Na Seção 3.4 será apresentada a metodologia que foi empregada para a extração da maré semidiurna lunar dos dados estudados.

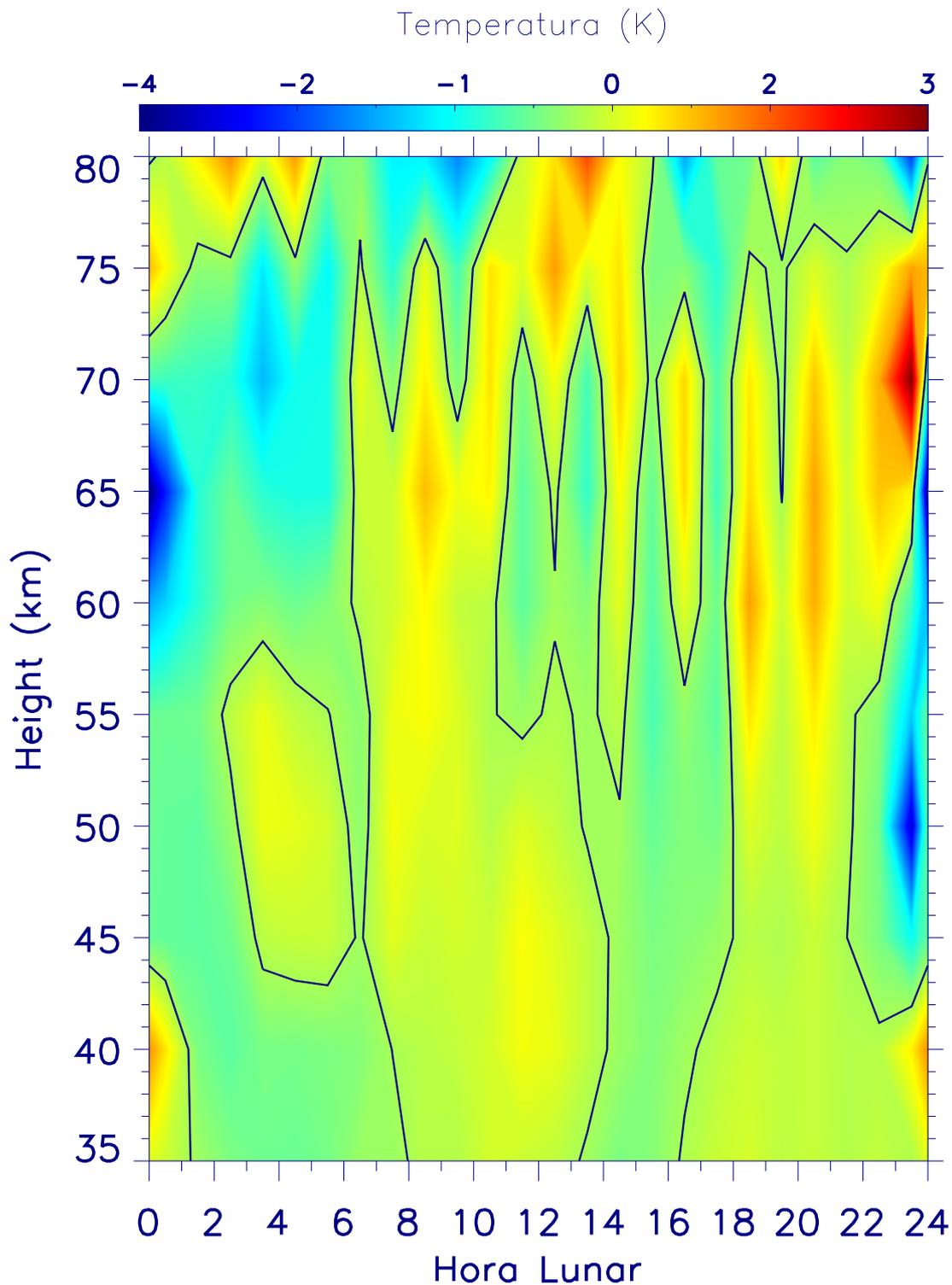


Figura 3.12 - Análise do dia composto lunar para a temperatura residual no intervalo de altitude entre 35 km e 80 km para o período entre 15 de dezembro de 2002 e 15 de fevereiro de 2003 (~ 60 dias). A linha zero é indicada pela linha contínua.

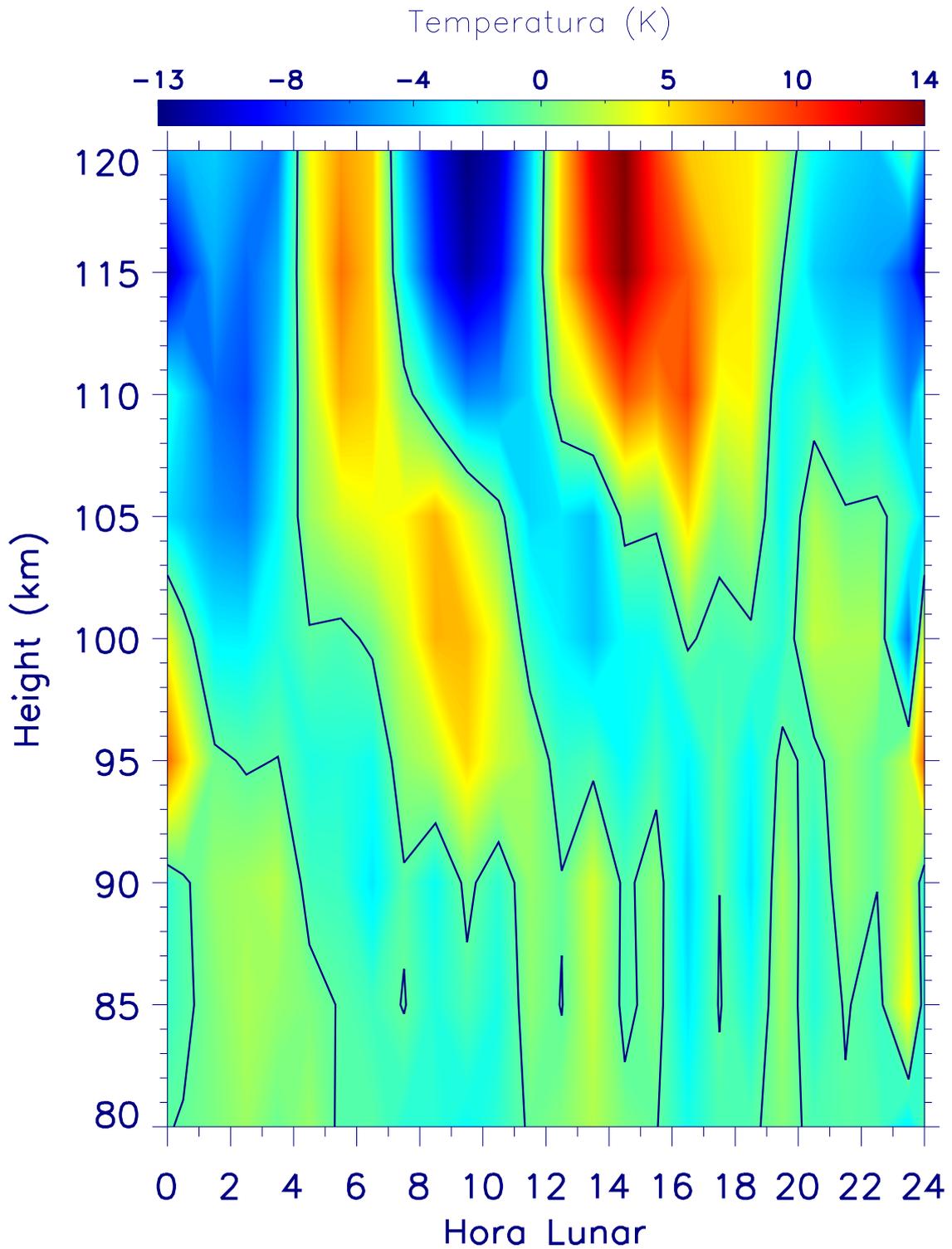


Figura 3.13 - Análise do dia composto lunar para a temperatura residual no intervalo de altitude entre 80 km e 120 km para o período entre 15 de dezembro de 2002 e 15 de fevereiro de 2003 (~ 60 dias). A linha zero é indicada pela linha contínua.

3.4 Determinação da maré semidiurna lunar

Nesta secção será apresentado o método utilizado para extrair a maré semidiurna lunar dos dados de temperatura coletados pelo instrumento SABER. Esta metodologia baseia-se no ajuste de mínimos quadrados para curvas específicas e conhecidas. A maré semidiurna lunar apresenta a maior amplitude dentre as marés geradas pelo potencial gravitacional da Lua sobre o sistema combinado Terra-oceano-atmosfera.

A determinação da maré lunar na atmosfera apresenta dificuldades devido principalmente a dois fatores: (1) o sinal da maré lunar, geralmente, é pequeno quando comparado com a maré solar e (2) apresenta frequência muito próxima à da maré semidiurna solar (para a maré semidiurna solar tem-se 2 ciclos/dia e para lunar 1,9323 ciclos/dia). Esta proximidade nos períodos da maré solar semidiurna (12 h) e lunar (12,42 h) precisa ser cuidadosamente considerada.

Para a perspectiva vista por instrumentos de solo, por exemplo, se a maré solar apresentar um espectro alargado, então a energia desta onda irá se espalhar para o período da maré lunar. Porém, esta influência será mais efetiva quanto mais curto o conjunto de dados analisado. Desta maneira, um extenso conjunto de dados é requerido para fornecer uma resolução espectral necessária para separar as componentes solar e lunar (STENING; VINCENT, 1989; STENING et al., 2003; SANDFORD; MITCHELL, 2007; PAULINO et al., 2012).

Na perspectiva das amostragens tomadas a partir de satélites, este problema de “aliasing” é minimizado conforme foi mencionado Seção 3.3. Para entender um pouco melhor este aspecto, serão calculados os períodos das maré lunar e solar semidiurnas de acordo com a perspectiva da amostragem dos dados que são coletados pelo satélite TIMED. Todo o desenvolvimento abaixo é baseado no texto de Forbes e Zhang (2013).

O período de qualquer maré vista por uma satélite que orbita um astro e coleta amostra de dados do mesmo depende da precessão do satélite (RAY; LUTHCKE, 2006). Para o satélite TIMED que orbita a Terra com um ângulo de inclinação de $74,1^\circ$, o período de precessão é de ~ 120 dias.

A idade da Lua ν é praticamente uma função linear do tempo universal. Sendo assim, da Figura 3.14 pode-se perceber que a diferença entre a taxa de rotação da Terra em relação ao Sol (σ^S) e a taxa de rotação da Terra em relação à Lua (σ^L) é praticamente constante, ou seja:

$$\sigma^S - \sigma^L = C . \quad (3.1)$$

Denotando o subscrito ‘ t ’ para a perspectiva vista de um observador na Terra e o subscrito ‘ s ’ para perspectiva de um observador num satélite, tem-se:

$$\sigma_t^S - \sigma_t^L = C \quad (3.2)$$

e

$$\sigma_s^S - \sigma_s^L = C . \quad (3.3)$$

Igualando a Equação 3.2 com a Equação 3.3, obtém-se:

$$\sigma_s^L = \sigma_s^S + \sigma_t^L - \sigma_t^S , \quad (3.4)$$

em que σ_t^L é a frequência diurna da componente gravitacional medida na Terra, $\sigma_t^S = 1$ ciclo/dia que é a frequência de rotação da Terra com relação ao Sol e σ_s^S é a taxa de precessão do satélite.

Por exemplo, da perspectiva de uma estação no solo, para a componente M_2 , $C = 1/29,53$ ciclos/dia (29,53 é o chamado mês lunar e é o intervalo entre duas fases iguais da lua), então $1/\sigma^L = 1,035$ dias ou 24,84 h, que é conhecido como dia lunar ou duas vezes o período de M_2 (que corresponde a maré semidiurna lunar). Utilizando a Equação 3.4 é possível calcular o período da maré M_2 visto pelo satélite TIMED. Da Equação 3.2, $\sigma_t^S = 1/29,53 + 1/1,035 = 1$ e $\sigma_t^L = 1/1,035$, sendo assim, $\sigma_s^L = -1/120 + 1/1,035 - 1 \approx -0,0421$ ciclos/dia, então o período é $1/\sigma_s^L = -23,7$ dias. Porém este cálculo está sendo aplicado para dois períodos da maré semidiurna lunar, então no caso da componente M_2 o período na perspectiva do satélite TIMED é $1/\sigma_s^L = 11,84$ dias. O sinal negativo indica que a hora lunar decresce em relação a hora universal. Comparando com o período da maré semidiurna solar (S_2) que é observada na perspectiva de satélite com aproximadamente 60 dias, pode-se concluir que mesmo M_2 e S_2 tendo períodos bem próximos em relação às medidas de solo 12,42 h e 12,00 h, respectivamente, com relação à medidas de satélite, os períodos são bem distintos o que evita o problema do “aliasing”.

Na [Tabela 3.1](#) são mostrados os períodos de marés conhecidos em ambas as perspectivas (vistos do solo e do satélite TIMED). Nota-se que os períodos das marés quando vistas pelo TIMED são bem distintos do que é medido na Terra. Se a precessão do satélite acontecer na direção oposta à rotação da Terra, um sinal negativo precisa ser adicionado a σ_s^S . Caso, o resultado para o período visto pelo satélite seja negativo ([Equação 3.4](#)), como é o caso dos períodos obtidos para estas marés vistas pelo TIMED, este sinal indica apenas que a hora lunar diminui com o aumento da hora solar.

Tabela 3.1 - Períodos para marés solares e gravitacionais vistos a partir do solo e do satélite TIMED.

Maré	Descrição	Período (solo) (horas)	Período (satélite) (dias)
S_1	diurna solar	24,00	120,00
O_1	quase diurna lunar	25,82	12,69
P_1	quase diurna solar	24,04	90,28
N_2	semidiurna lunar elíptica	12,66	8,28
K_2	semidiurna luni-solar	11,97	89,67
S_2	semidiurna solar	12,00	60,00
M_2	semidiurna lunar	12,42	11,84

É importante destacar que a precessão do satélite que acontece lentamente é uma vantagem para o presente estudo porque serve para resolver o problema de “aliasing” existente entre as marés M_2 e S_2 , quando estudadas por medidas de instrumentos na Terra, com bastante eficiência. Neste trabalho, conforme apresentado na [Seção 3.3](#), serão utilizados intervalos de 60 dias de dados para extrair a maré semidiurna lunar. De acordo com os resultados apresentados, este intervalo de tempo é suficiente para garantir uma confiabilidade nos resultados, tendo em vista que aproximadamente cinco ciclos da maré semidiurna lunar estarão presentes na amostragem.

Neste estudo foram utilizados 10 anos de dados de temperatura medidos pelo instrumento SABER no período de fevereiro de 2002 a janeiro de 2012, para estudar a contribuição da maré semidiurna lunar neste campo atmosférico.

As componentes da maré lunar são obtidas aplicando o ajuste de mínimos quadrados utilizando a seguinte equação:

$$T(\tau) = \bar{T} + \sum_{n=1}^3 R_n \cos(n\tau + \Phi_n) , \quad (3.5)$$

nesta equação, τ denota tempo lunar local, n representa sub-harmônicos de um dia lunar (~ 24 h 50m), R_n e Φ_n são a amplitude e a fase, respectivamente, das componentes da maré lunar e \bar{T} representa o valor médio da temperatura.

Como as medidas são geradas em tempo solar, a seguinte expressão foi utilizada para relacionar o tempos solar e lunar:

$$\tau = t - \nu , \quad (3.6)$$

em que t é o tempo solar local e ν é a idade da Lua.

A relação entre o tempo solar e lunar pode ser melhor entendida através da ilustração na [Figura 3.14](#), a qual mostra a relação entre estes tempos para um ponto P observado por um instrumento em solo ou a bordo de um satélite. A idade da Lua é um termo cíclico dependente da fase da Lua, no qual $\nu = 0$ equivale a Lua Nova. O dia médio lunar é o intervalo médio entre duas passagens sucessivas da Lua sobre um meridiano local. O dia lunar equivale a 1,03505 dias solar ou ~ 24 h50,47min. Um exemplo de como transformar o referencial de tempo solar para lunar pode ser visto em [Paulino \(2010\)](#).

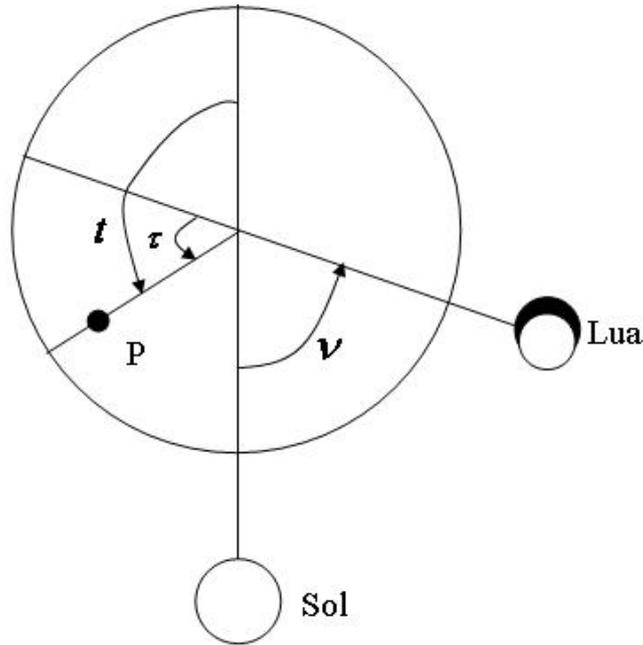


Figura 3.14 - Configuração da relação entre o tempo solar (t), lunar (τ) e do ângulo da fase lunar para um ponto P na Terra.

Fonte: Chapman e Lindzen (1970).

Os parâmetros (amplitude e fase) da maré lunar devem ser determinados utilizando o tempo lunar, pois diferente da maré solar que acompanha o movimento aparente do Sol e, conseqüentemente, tem uma fase consistente com o período solar, a fase da maré lunar decresce sistematicamente dia a dia quando medida em tempo solar.

Para exemplificar a estimação do parâmetros da maré lunar considera-se o sinal descrito pela Equação 3.5 como sendo:

$$T(\tau) = \bar{T} + \sum_{n=1}^3 R_n \cos(n\tau + \Phi_n) + \epsilon, \quad (3.7)$$

neste caso, ϵ representa o resíduo da estimação do sinal pelos cossenos. Fazendo $\bar{T} = 0$ e supondo n constante, pode-se escrever a seguinte transformação que representa o quadrado do erro na estimação, ou seja,

$$G(A_n, B_n) = \sum_{\tau} \left[T(\tau) - \sum_{n=1}^3 A_n \cos(n\tau) + B_n \cos(n\tau) \right]^2. \quad (3.8)$$

O método dos mínimos quadrados consiste em estimar os valores dos coeficientes A_n e B_n minimizando a função $G(A_n, B_n)$. Para isto basta tomar as derivadas parciais de $G(A_n, B_n)$ e igualar a zero para encontrar os pontos de mínimos da função. Procedendo com a aplicação do método, resolve-se o sistema de equações para A_n e B_n . No presente caso, o sistema de equações possui 6 equações e 6 incógnitas, ou seja, trata-se de um sistema de equações possível e determinado que pode ser solucionado por métodos numéricos convencionais.

Foi desenvolvido um software computacional em linguagem IDL (do Inglês “Interactive Data Language”) para calcular estes parâmetros. Para ilustrar o procedimento de cálculo dos parâmetros da maré lunar, foram tomados exemplos de sinais gerados artificialmente, os quais foram submetidos ao software. Os sinais possuem a seguinte forma:

$$T(\tau) = R_1 \cos(\tau + \phi_1) + R_2 \cos(2\tau + \phi_2) + R_3 \cos(3\tau + \phi_3) + rr , \quad (3.9)$$

em que rr representa um ruído arbitrário que foi adicionado ao sinal.

Escolhendo-se valores iniciais para os parâmetros R_n e ϕ_n conforme ilustra a [Tabela 3.2](#), foi possível obter valores de saída muito próximos dos fornecidos para três situações distintas: (a) sem adição de ruído ao sinal; (b) impondo um ruído aleatório de 1% do sinal original e (c) com um ruído de 10% do sinal original. Todos os valores recuperados podem ser visto na [Tabela 3.2](#). Note que quando o ruído aumenta, a precisão na determinação dos parâmetros diminui consideravelmente e, ainda, quanto menor o valor da amplitude da componente, mais difícil sua recuperação.

Tabela 3.2 - Parâmetros fornecidos e extraídas do ajuste.

Parâmetros	inicial	saída (a)	saída (b)	saída (c)
		$rr = 0$	$rr = 1\%$	$rr = 10\%$
A_1	0,5	0,496	0,475	0,645
ϕ_1	$\frac{\pi}{2}$	1,570	1,527	1,875
A_2	2,0	1,990	2,002	1,902
ϕ_2	π	3,135	3,145	3,164
A_3	0,1	0,107	0,107	0,03
ϕ_3	$\frac{\pi}{4}$	0,701	0,688	3,384

A Figura 3.15 ilustra graficamente este exemplo. Note que para os painéis (a) e (b) a curva recuperada se aproxima bastante do sinal original e no painel (c) a forma geral do sinal também é bem recuperado.

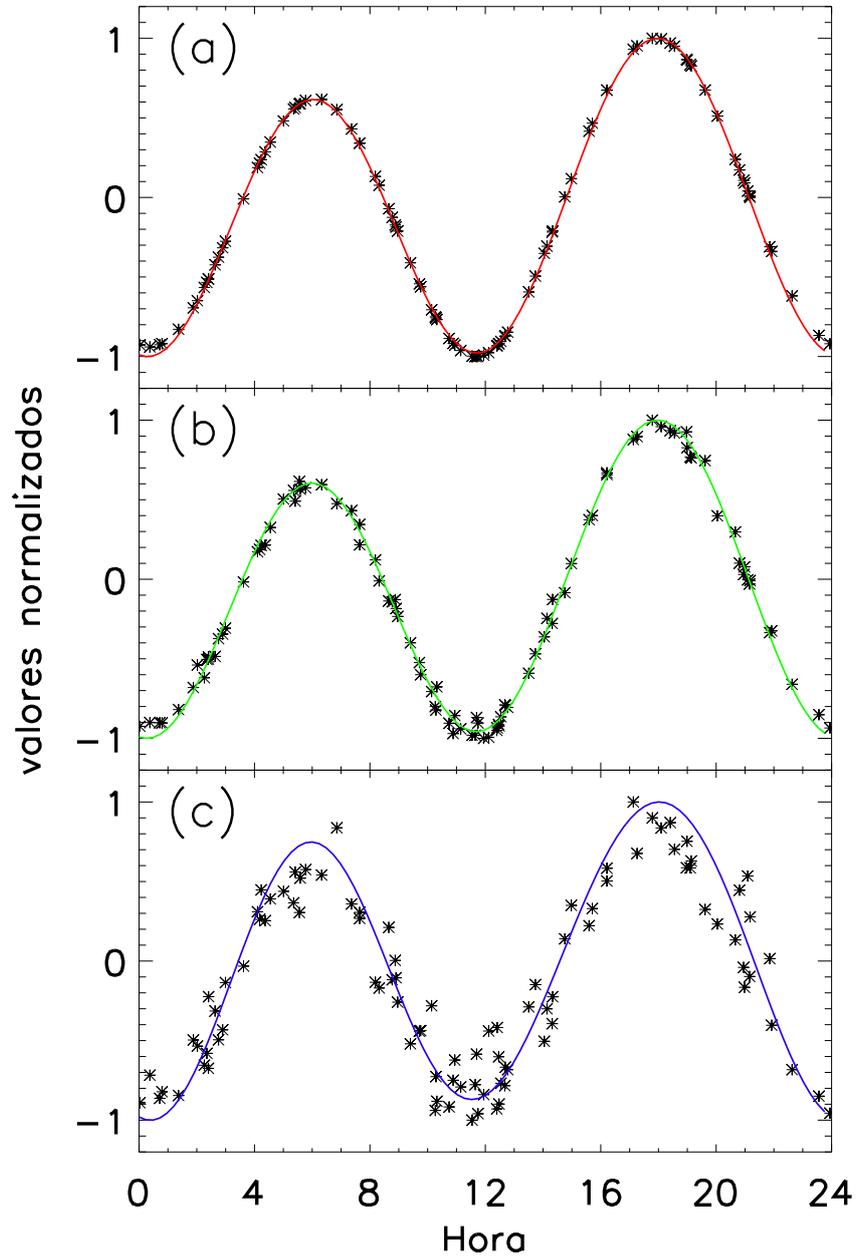


Figura 3.15 - (a) Sinal artificial (asteriscos) e recuperado (linha contínua) para as componentes de maré sem adição de ruído. (b) Sinal artificial (asteriscos) e recuperado (linha contínua) para as componentes de maré com adição de ruído de 1%. (b) Sinal artificial (asteriscos) e recuperado (linha contínua) para as componentes de maré com adição de ruído de 10%.

Um teste adicional também foi executado utilizando uma série de dados reais. Estes dados foram os mesmos utilizados para compor a [Figura 3.11](#) na altitude de 102 km. As amplitudes e fases das componentes da maré calculadas são ilustradas na [Tabela 3.3](#).

Tabela 3.3 - Parâmetros calculados para as componentes da maré para a altitude de 102 km para a grade especificada na [Figura 3.7](#). Neste caso, σ_R representa o desvio padrão das amplitudes e σ_ϕ o desvio padrão das fases.

Parâmetros	n		
	1	2	3
R_n (K)	2,24	6,67	4,76
σ_R (K)	0,09	0,23	0,07
ϕ_n (h)	2,63	8,02	1,10
σ_ϕ (h)	0,03	0,01	0,01

A [Figura 3.16](#) mostra as curvas obtidas a partir dos parâmetros recuperados sobrepostas às medidas. A linha sólida é apenas para a componente semidiurna e a linha tracejada representa o somatório das componentes diurna, semidiurna e ter-diurna. Pode-se observar que a principal componente é a semidiurna e que as demais componentes acrescentam apenas detalhes na curva de ajuste.

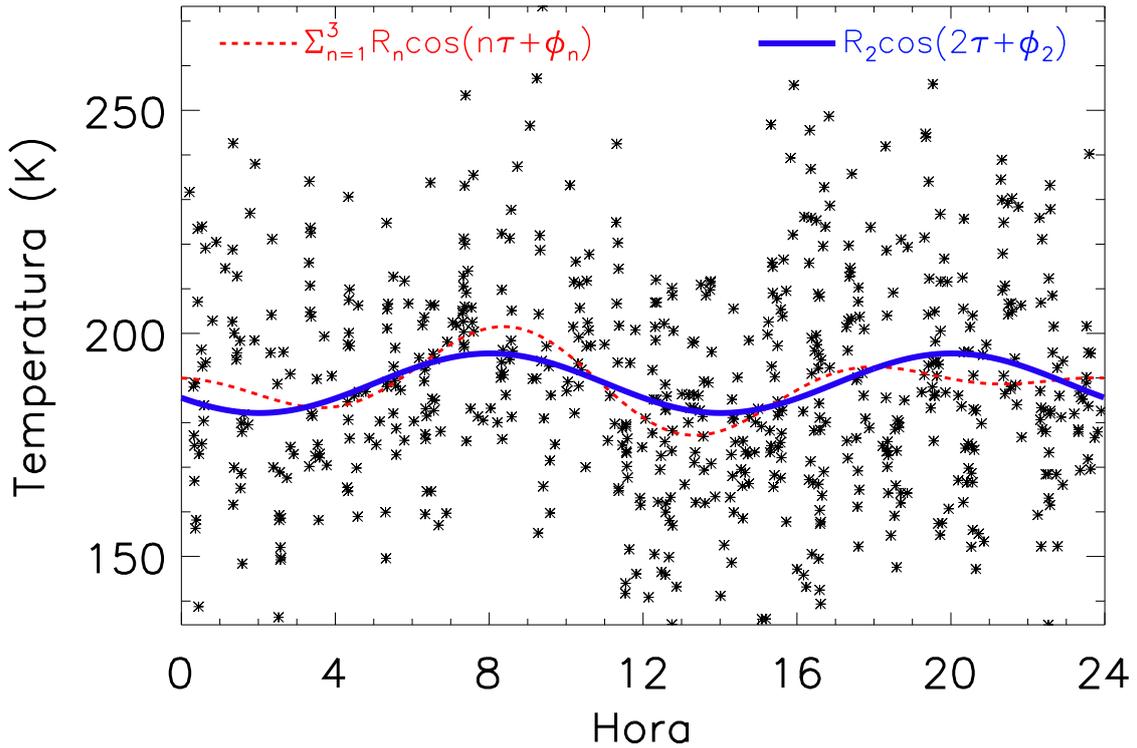


Figura 3.16 - Curvas de ajuste das componentes diurna, semidiurna e terdiurna da maré lunar (linha tracejada) e da componente semidiurna apenas (linha sólida) sobrepostas aos dados experimentais coletados na mesma grade da Figura 3.7 e para a altitude de 102 km.

Esta técnica foi aplicada para o banco de dados completo do SABER que foi detalhado na Seção 3.2. O tamanho horizontal da grade utilizada é o mesmo mostrado na Seção 3.3 e foi selecionado sempre um intervalo de tempo de 60 dias centrado no mês de interesse, combinando órbitas ascendentes e descendentes para compor o dia composto lunar. Em relação à altitude, foram tomados perfis ente 21 km e 120 km, os quais foram divididos em camadas de 4 km espaçadas de 3 em 3 km com sobreposição de 2 km, sendo 1 km na base e 1 km no topo.

Devido à mudança periódica de cobertura latitudinal do satélite foram utilizados os dados entre -50° e 50° de latitude, que constitui um intervalo que não é afetado pela mudança de direção do satélite. O tamanho da grade de latitude escolhido foi de 10° . Para a longitude, a largura da grade utilizada foi de 40° . A grade horizontal se movimenta a cada 5° tanto em latitude como em longitude.

As amplitudes (R_2) e fases (ϕ_2) da maré semidiurna lunar para o período de dados estudado são dependentes do tempo (t), longitude (λ), latitude (θ) e altitude (z), ou seja:

$$R_2 = R_2(t, \lambda, \theta, z) \quad (3.10)$$

e

$$\phi_2 = \phi_2(t, \lambda, \theta, z) . \quad (3.11)$$

Neste caso, o vetor de tempo tem espaçamento mensal e é centrado em cada mês desde fevereiro de 2002 até janeiro de 2012, totalizando 120 meses. O vetor de longitude tem espaçamento de 5° centrado em $-180^\circ, -175^\circ, \dots, 0, \dots, 175^\circ, 180^\circ$ totalizando 72 pontos. O espaçamento entre as latitudes também é de 5° e está centrado em $-50^\circ, -45^\circ, \dots, 0, \dots, 45^\circ, 50^\circ$ o que dá 21 pontos. Em relação às altitudes o espaçamento é de 3 km e os pontos de referência são 21 km, 24 km, ..., 117 km, 120 km, totalizando 33 pontos. Portanto, os vetores das amplitudes e fases da maré semidiurna lunar têm as seguinte dimensões:

$$[n^\circ \text{meses}, n^\circ \text{longitudes}, n^\circ \text{latitudes}, n^\circ \text{altitudes}] = [120, 73, 21, 33] . \quad (3.12)$$

A influência da maré solar sobre a lunar também é removida a partir da conversão de tempo solar para lunar. Como a fase da maré solar não tem relação com a posição da Lua, com o passar de alguns dias, haverá um autocancelamento e, conseqüentemente, efeitos significantes desta oscilação não serão produzidos nos resultados, conforme já ilustrado na [Seção 3.3](#).

3.5 Decomposição da maré semidiurna lunar em componentes

A presença de continentes e oceanos no planeta Terra faz com que a atmosfera sofra respostas diferentes devido à interação que acontece entre as superfícies. Por sua vez, este mecanismo de interação da Terra sólida com a atmosfera e dos oceanos com a atmosfera são conhecidos como fontes secundárias para a maré lunar atmosférica. Além disso, a distribuição irregular de continentes e oceanos, de acordo com a teoria clássica, deve produzir componentes não migrantes para a maré semidiurna lunar.

Uma contribuição importante deste trabalho consiste exatamente em estudar detalhadamente as estruturas longitudinais da maré semidiurna lunar na atmosfera. Para tanto, os dados do SABER foram submetidos a uma outra análise que teve por objetivo extrair as amplitudes e fases de diversas componentes. O objetivo principal desta análise complementar é descobrir quais são as componentes da maré semidiurna lunar mais importantes para explicar a presença de estruturas longitudinais.

Para separar a maré semidiurna lunar em componentes, foi feito um ajuste de mínimos quadrados utilizando a seguinte equação:

$$T(\tau, \lambda) = \bar{T} + \sum_{s=-6}^7 L_s \cos(2\tau + (s-2)\lambda + \Phi_s) , \quad (3.13)$$

aqui, L_s e Φ_s são coeficientes que representam a amplitude e a fase de cada componente que possui número de onda zonal s . A maré é propagante para oeste quando o número de onda zonal é positivo e se propaga para leste quando s assume valores negativos.

De posse das componentes de maré é possível, por exemplo, calcular a distribuição longitudinal das amplitudes e fases da maré semidiurna lunar. Sendo assim, é possível fazer uma comparação com a distribuição longitudinal das amplitudes calculada pelo método descrito na [Seção 3.4](#) e determinar as componentes mais importantes para explicar os padrões encontrados.

Como etapas de validação deste método, alguns testes foram realizados em sinais gerados artificialmente. Os sinais gerados foram escritos da seguinte forma:

$$y(\tau, \lambda) = \sum_{s=-6}^7 A_s \cos(2\tau + (s-2)\lambda + \varphi_s) + rr , \quad (3.14)$$

em que τ é o tempo lunar arbitrário contido no intervalo $[0, 24] \equiv [0, 4\pi]$, λ é a longitude contida entre $[-\pi, \pi]$, A_s seriam as amplitudes e φ seriam as fases, que foram escolhidas arbitrariamente e rr representa um ruído a ser introduzido no sinal.

Inicialmente, foram calculadas as amplitudes correspondentes pelo método da Seção 3.4. Em seguida foram calculadas as amplitudes e fases das componentes descritas pela Equação 3.13. Na Figura 3.17 são mostrados os resultados. No painel (a) pode ser vista a distribuição latitudinal e longitudinal das amplitudes calculadas diretamente pelo ajuste da Equação 3.5.

No painel (b) da Figura 3.17 pode ser vista a distribuição horizontal das amplitudes referentes as componentes recuperadas. Neste exemplo foi simulado um sinal simples constituído apenas de cossenos com amplitudes e fases arbitrárias para cada componente. Observa-se na Figura 3.17 uma concordância quase perfeita dos resultados, ou seja, as discrepâncias entre as estruturas de amplitudes são quase imperceptíveis visualmente.

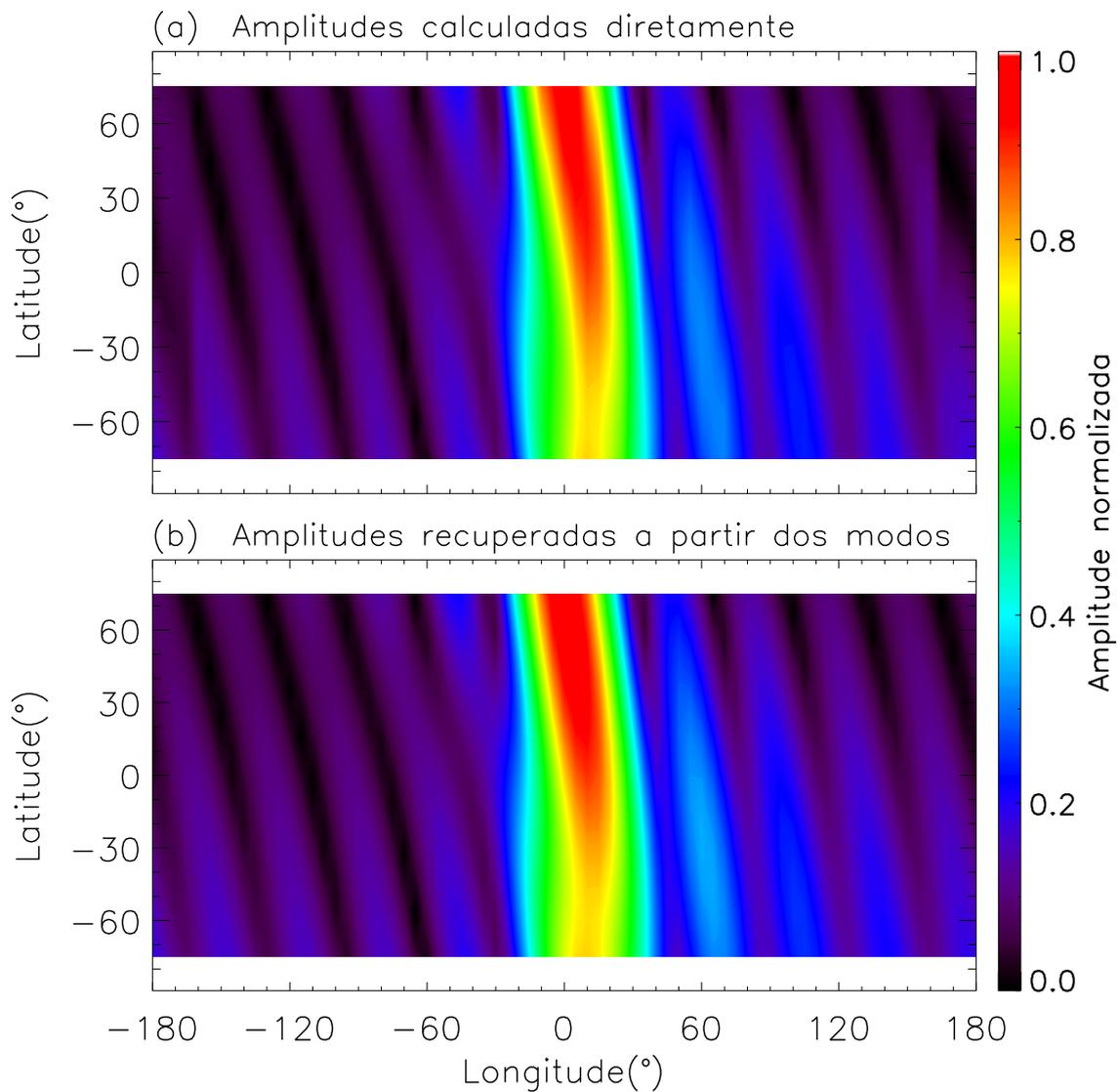


Figura 3.17 - (a) Estruturas longitudinais calculadas nas amplitudes para um sinal arbitrário. (b) Recuperação da distribuição das amplitudes a partir da decomposição em modos.

Na Figura 3.18 é mostrada uma comparação semelhante à da Figura 3.17, porém, foi adicionado um ruído ao sinal simulado. Nota-se claramente que a recuperação das estruturas horizontais das amplitudes [Figura 3.18(b)], pela soma das amplitudes das componentes, representa as formas gerais das amplitudes calculadas diretamente para a suposta maré semidiurna lunar [Figura 3.18(a)]. Apenas os detalhes nas formas das amplitudes que foram introduzidos pelo ruído não puderam ser reproduzidos.

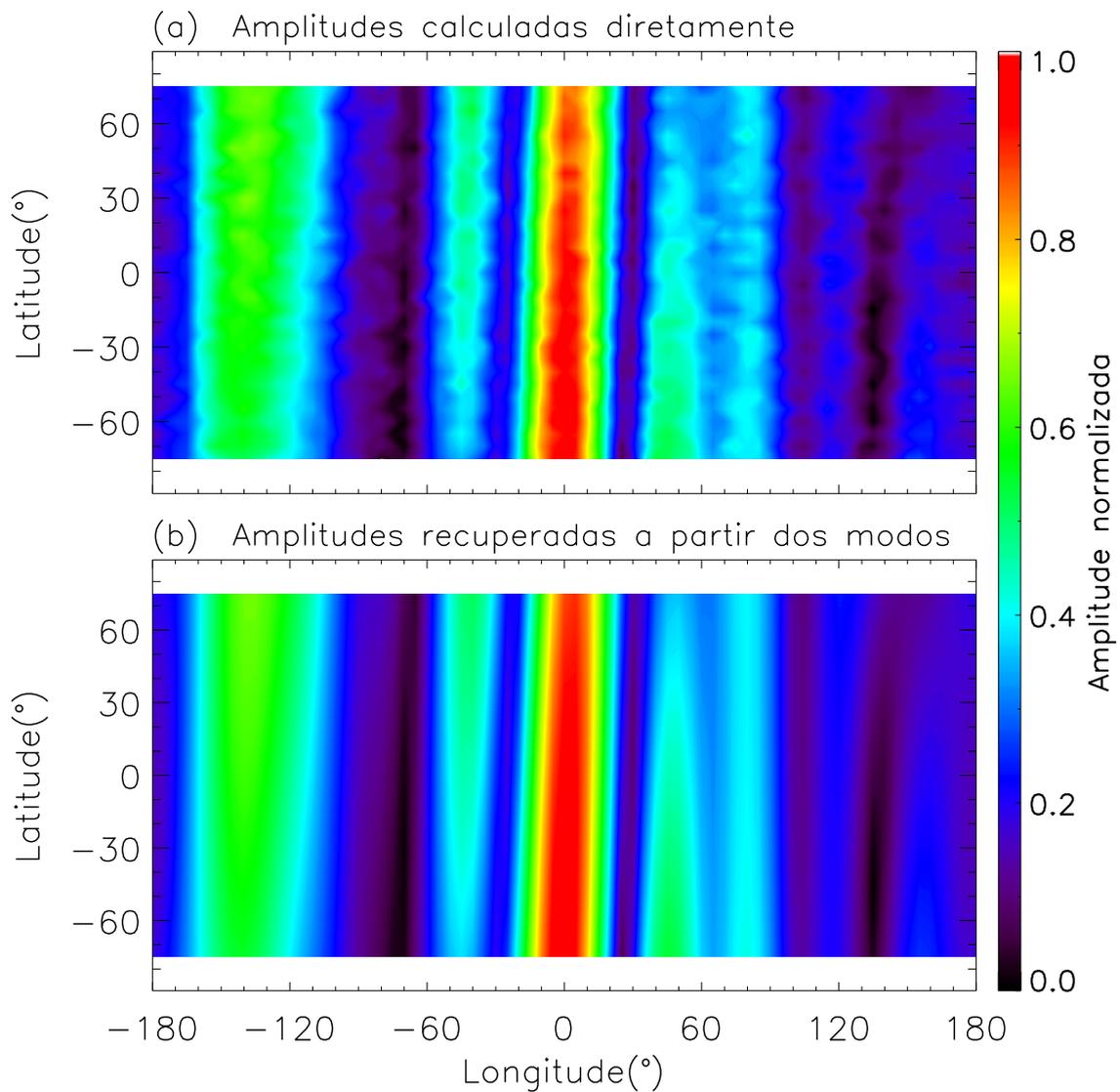


Figura 3.18 - O mesmo que a Figura 3.17, só que adicionando um ruído ao sinal simulado.

Procedendo com o processo de validação do método, foi feita uma tentativa de recuperação das estruturas horizontais da maré simulada por um sinal completamente aleatório. Ou seja, foi atribuído para cada ponto do sinal uma amplitude e uma fase aleatória. Os resultados são mostrados na Figura 3.19. Nota-se, que mesmo para o caso de um sinal sem formas bem definidas a recuperação a partir das somas das componentes reproduz bem as formas calculadas pelo método direto.

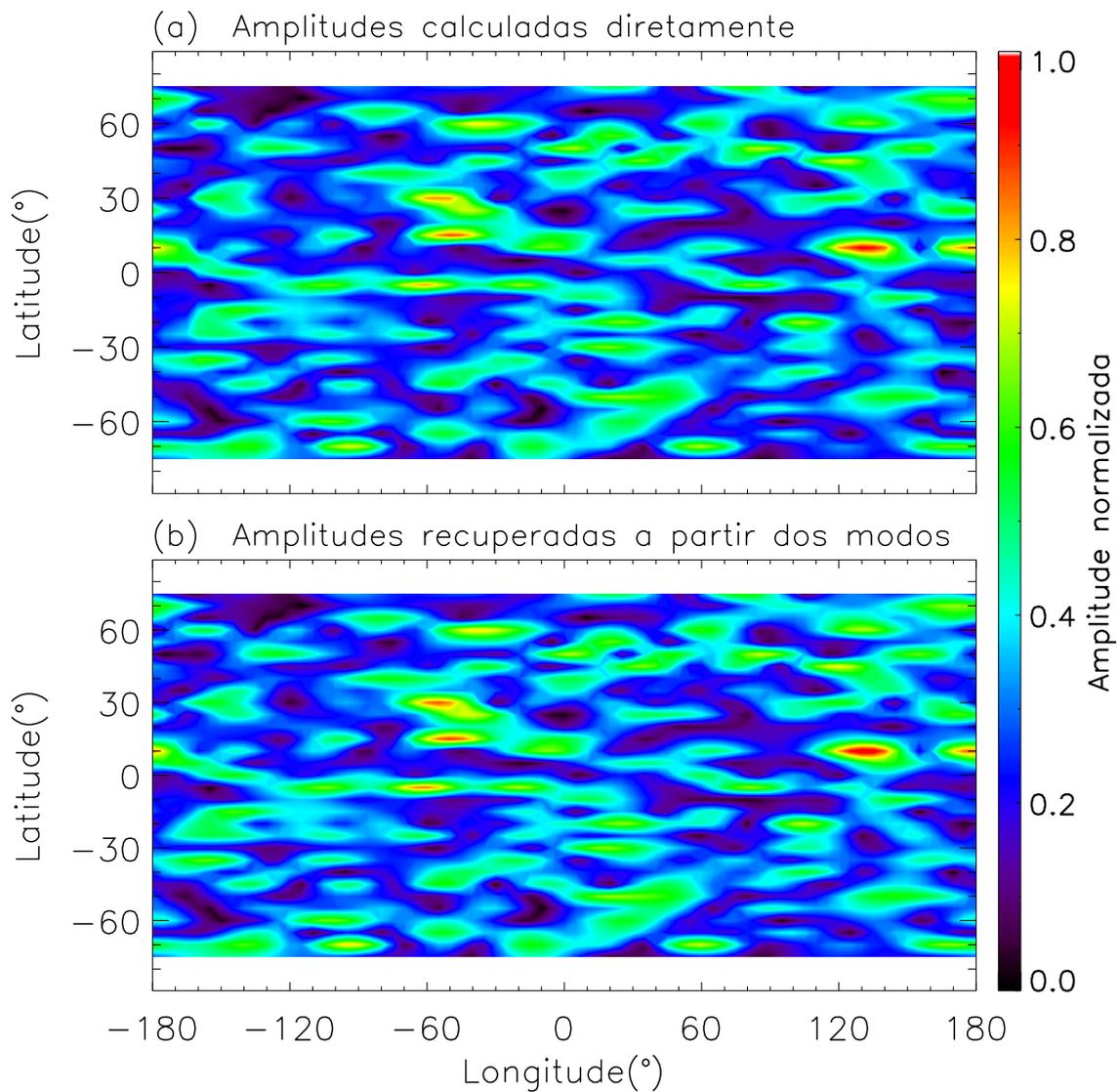


Figura 3.19 - O mesmo que a Figura 3.17, só que para um sinal composto de modos com amplitudes e fases completamente aleatórias.

O último teste é mostrado na Figura 3.20. Este teste é bem similar ao que foi mostrado na Figura 3.19. Contudo, um ruído com amplitude da mesma ordem das amplitudes do sinal simulado foi adicionado. Os cálculos realizados são mostrados nos painéis (a) e (b) da Figura 3.20. Mais uma vez, apenas os pequenos detalhes do painel (a) não puderam ser obtidos utilizando a soma das amplitudes das componentes [painel (b)].

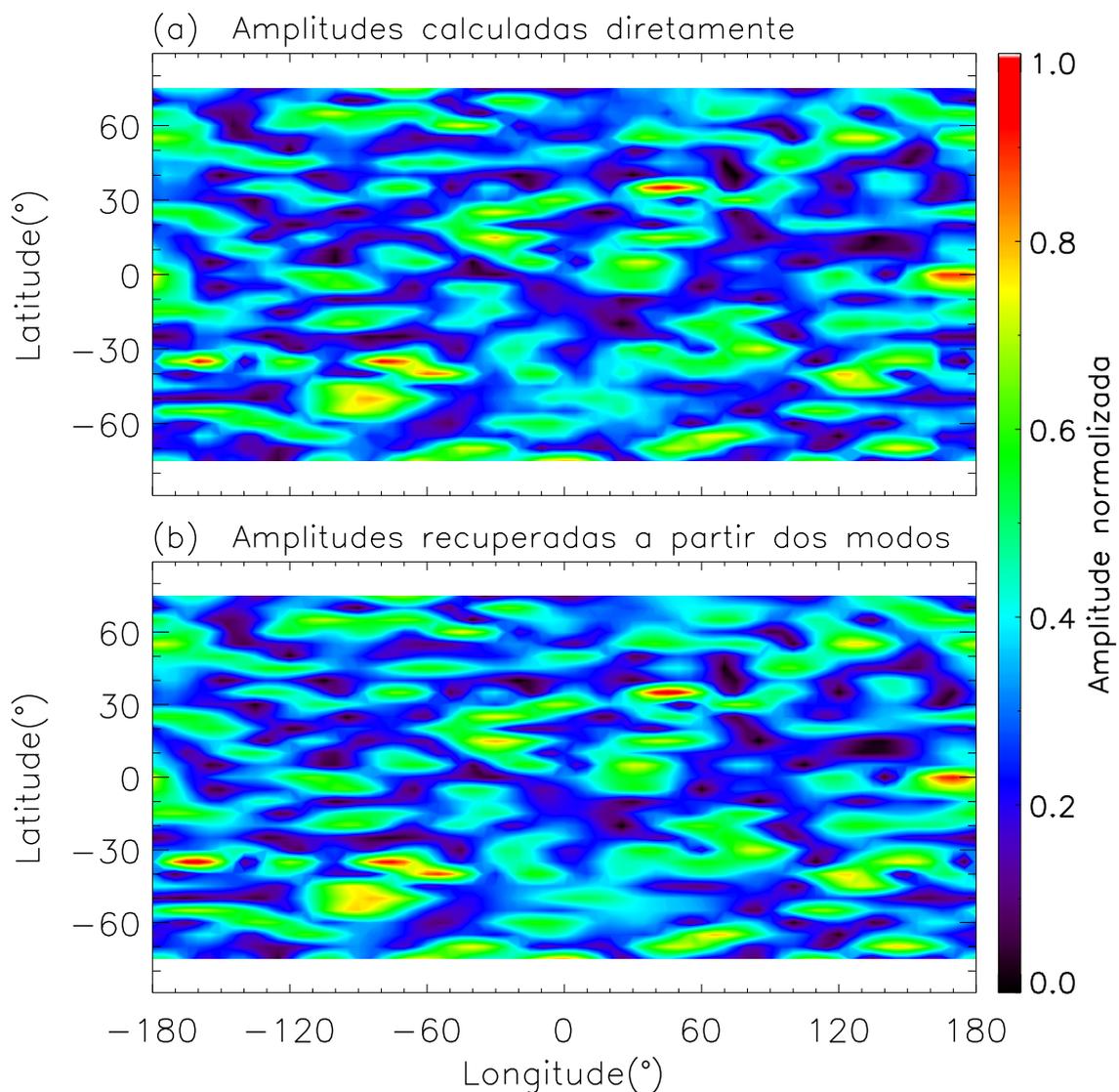


Figura 3.20 - O mesmo que a Figura 3.19, só que adicionado um ruído ao sinal simulado.

Os resultados desta simulação conduzem à conclusão de que é possível fazer um estudo de estruturas longitudinais da maré lunar a partir da decomposição da maré semidiurna lunar em componentes migrante e não migrantes. Uma dificuldade encontrada nesta técnica é saber exatamente quais componentes devem ser consideradas para decomposição. Por isto, foram escolhidos as componentes correspondentes aos números zonais $s = -6$ até $s = 7$ para ser feito o ajuste. A teoria clássica prevê que poucas componentes da maré semidiurna lunar possuem amplitudes significativas. Pedatella e Liu (2012a), por exemplo, encontraram que as componentes

$s = -3, -2, \dots, 6, 7$ conseguiram reproduzir os resultados de suas simulações. No [Capítulo 4](#) serão definidas quais são as componentes mais importantes para este estudo.

3.6 Estimativas das incertezas na obtenção das amplitudes e fases

A estimativa das incertezas na determinação dos coeficientes foi calculada baseado no livro de [Bevington \(1969\)](#). Para tanto, foi considerada a incerteza nas medidas de cada ponto de temperatura que será denotada por σ_i e o efeito que cada ponto de dados tem sobre a determinação dos coeficientes do ajuste (a_j). Desta forma, a incerteza nos coeficientes pode ser escrita matematicamente por:

$$\sigma_{a_j}^2 = \sum \left[\sigma_i^2 \left(\frac{\partial a_j}{\partial y_i} \right)^2 \right], \quad (3.15)$$

em que y_i representa a medida experimental ‘ i ’.

Fazendo algumas manipulações algébricas, pode-se reescrever a [Equação 3.15](#) da seguinte forma:

$$\sigma_{a_j}^2 = \frac{\frac{1}{N-1} \frac{1}{s_j^2} r_{jj}^{-1}}{\frac{1}{N} \sum \frac{1}{\sigma_i^2}}, \quad (3.16)$$

em que N é o número total de amostras, r_{jj} é a diagonal da matriz de correlação para as variáveis independentes e s_j^2 representa a variância para cada função ajustada.

Sempre que for preciso calcular os valores médios para as amplitudes e fases é preciso fazer médias vetoriais. Estas médias vetoriais consideram tanto a variabilidade nas amplitudes quanto nas fases. Detalhes de como calcular as médias vetoriais e seus respectivos desvios padrões podem ser encontrados em [Paulino \(2010\)](#).

As incertezas nas medidas σ_i que alimentam a [Equação 3.16](#) foram inseridas considerando as estimativas de [Remsburg et al. \(2008\)](#). Para as altitudes inferiores a 65 km, conforme discutido na [Seção 3.1](#), a obtenção dos valores de temperatura utiliza a condição LTE. Para estes níveis os valores máximos para o erro são mostrados na [Tabela 3.4](#).

Tabela 3.4 - Estimativa do erro para os valores experimentais da temperatura obtida pelo satélite TIMED/SABER para as altitudes da tropopausa, estratosfera e baixa mesosfera.

Altitude (km)	Estimativa do erro para a temperatura (K)
16	1,4
20	1,3
31	0,8
39	1,6
48	2,0
55	2,1
65	2,6

Fonte: Remsberg et al. (2008)

Os valores máximos para o erro mostrados na [Tabela 3.4](#) são relativamente pequenos o que permite uma boa confiabilidade nas medidas fornecidas pelo SABER para estes níveis de altitudes.

Nas altitudes da MLT, a temperatura é obtida utilizando um modelo não-LTE, conseqüentemente, os valores para as incertezas nas medidas são superiores aos que foram obtidos utilizando o modelo LTE ([REMSBERG et al., 2008](#)). Os valores extremos para incerteza nas medidas do SABER acontecem durante o verão para latitudes polares, os quais chegam a ser praticamente o dobro do que é previsto para as demais latitudes. Como, no presente trabalho, as medidas de altas latitudes do SABER não foram consideradas, utilizou-se como referência os valores da [Tabela 3.5](#).

Tabela 3.5 - Estimativa do erro para os valores experimentais da temperatura obtida pelo satélite TIMED/SABER para as altitudes da MLT.

Altitude (km)	Estimativa do erro para a temperatura (K)
80	2,3
85	3,8
90	5,4
95	6,5
100	8,4

Fonte: Remsberg et al. (2008)

Os valores das incertezas máximas mostrados na Tabela 3.5 para as altitudes da MLT crescem proporcionalmente à altitude e podem atingir magnitudes mais de três vezes maior das que são mostradas na Tabela 3.5 para as altitudes da estratopausa e baixa mesosfera. Mesmo assim, os valores das incertezas, quando comparados com os valores das medidas, são bem pequenos ($< 10\%$).

Neste trabalho, os valores das incertezas nas medidas da temperatura para as altitudes superiores a 100 km foram obtidos a partir de uma extrapolação ‘spline’ dos valores mostrados na Tabela 3.4 e na Tabela 3.5. A Figura 3.21 ilustra um perfil vertical de temperatura obtido pelo SABER às 04:47 do dia 19 de dezembro de 2002 em (28,8°S; 30,7°W). As barras de erro indicam as incertezas em cada medida para cada altitude. Os valores das incertezas abaixo de 40 km de altitude são da mesma ordem que os mostrados em 40 km, por isso, foram suprimidos.

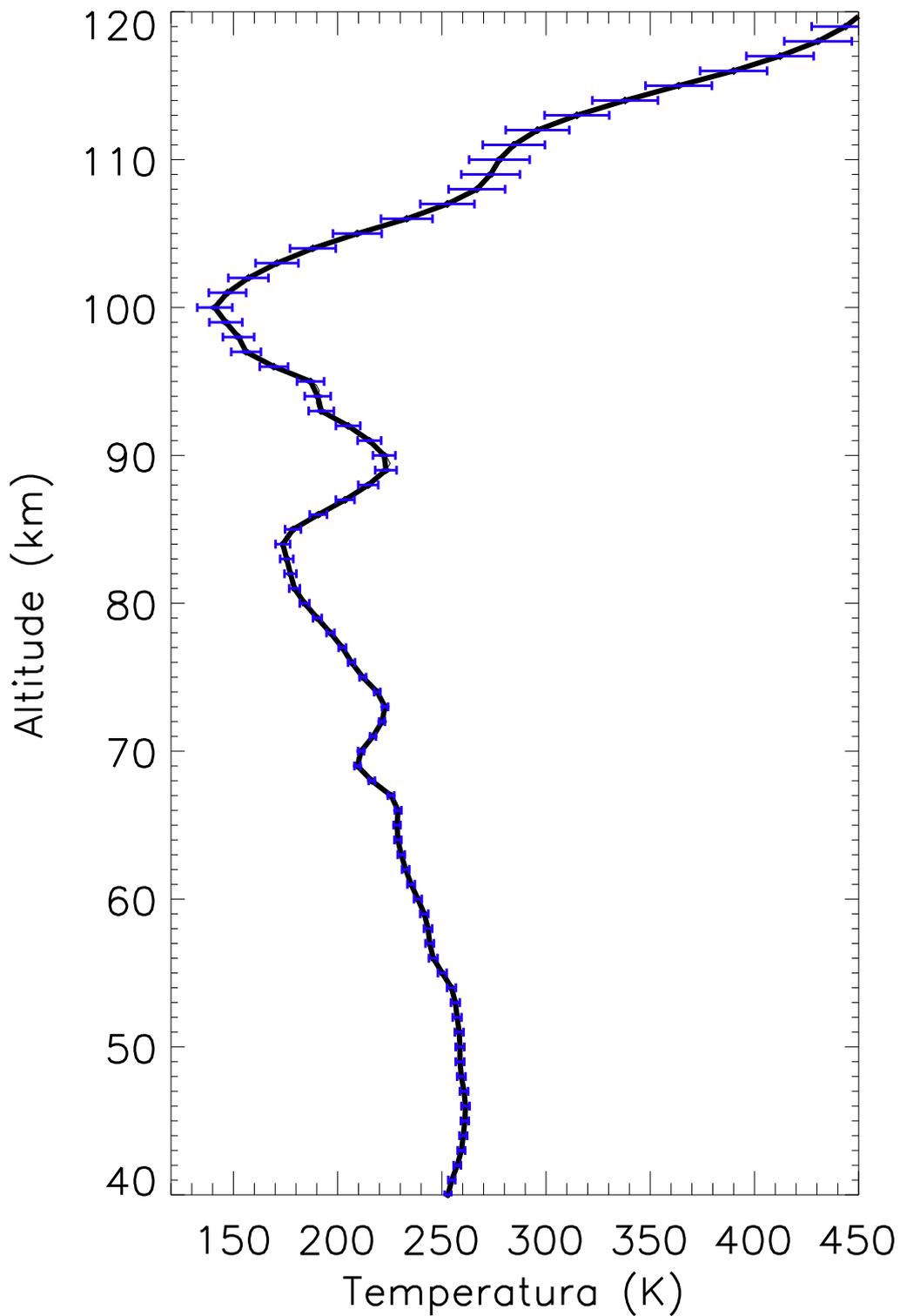


Figura 3.21 - Perfil vertical de temperatura medido pelo SABER no dia 19 de dezembro de 2002 às 04:47 em aproximadamente (28,8°S; 30,7°W). As barras de erro representam as incertezas máximas para as medidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da análise climatológica mês a mês da resposta da atmosfera terrestre à forçante da maré semidiurna lunar, utilizando medidas de temperatura obtidas por satélite. Nas seções 4.1 e 4.2 serão exibidos os resultados da estrutura vertical e da variação sazonal/latitudinal da maré semidiurna lunar migrante, ou seja, a componente que não apresenta variação com a longitude. Na seção 4.3 serão mostrados e discutidos os resultados obtidos utilizando ambas as componentes migrante e não migrante da maré, além da decomposição de componentes de maré obtidas através do ajuste de mínimos quadrados bidimensional. Na última parte deste capítulo será abordada a variação ano-a-ano da maré lunar.

As características climatológicas da maré semidiurna lunar na temperatura são investigadas através da distribuição das amplitudes e fases mensais em tempo, altitude, latitude e longitude. Os resultados que serão explorados neste capítulo cobrem o intervalo entre fevereiro de 2002 e janeiro de 2012. Vários anos de observações são combinados com o intuito de diminuir a incerteza na determinação das componentes de maré. Serão analisadas as contribuições desta oscilação por um longo período, para assegurar que a maré lunar não sofra influência de oscilações secundárias. Além disso, como a análise é desenvolvida em tempo lunar, ao longo de vários dias, uma fase aleatória de uma onda secundária com respeito a posição da Lua irá se cancelar, e conseqüentemente, não produzirá um sinal significativo.

4.1 Estruturas Verticais

Nesta seção serão mostradas as características verticais em diferentes latitudes da maré semidiurna lunar na temperatura para altitudes entre 20 km e 130 km durante o período analisado. A estrutura vertical da maré semidiurna lunar foi investigada calculando a amplitude e fase como função da altitude para cada mês. Os dados de um mês específico, em todos os anos, foram utilizados para obter as médias vetoriais para compor um mês médio baseado em 10 anos de dados para as latitudes entre -50° e 50° .

As figuras que serão mostradas nesta seção representam os perfis verticais de amplitudes e fases da maré semidiurna lunar. Os resultados mensais foram organizados de tal forma que seja possível ver o comportamento dos meses de solstício (dezembro, janeiro e fevereiro para o solstício de dezembro, e junho, julho e agosto para o solstício de junho) e dos meses de equinócio (março, abril e maio para o equinócio de

março e setembro, outubro e novembro para o equinócio de setembro). Além disso, as figuras que serão mostradas foram separadas em baixas latitudes ($0, \pm 10^\circ$ e $\pm 20^\circ$) e médias latitudes ($\pm 30^\circ, \pm 40^\circ$ e $\pm 50^\circ$)

Foram selecionadas as seguintes latitudes para apresentar os resultados: 0° (linha preta sólida + círculo preenchido), 10° S (linha azul pontilhada + estrela vazia), 10° N (linha verde tracejada + estrela preenchida), 20° S (linha vermelha traço-ponto-ponto + quadrado vazio), 20° N (linha amarela traço-ponto + quadrado preenchido), 30° S (linha roxa sólida + X vazio), 30° N (linha rosa pontilhada + X preenchido), 40° S (linha verde tracejada + triângulo vazio), 40° N (linha verde traço-ponto + triângulo preenchido), 50° S (linha laranja traço-ponto-ponto + hexágono vazio) e 50° N (linha vermelha traço-longo + hexágono preenchido).

As barras de erro representam as incertezas no cálculo somadas à variabilidade temporal da maré lunar, ou seja, as barras de erro levam em consideração o quanto as amplitudes e fases estão mudando ao longo dos anos. A incerteza relacionada ao campo de temperatura medido pelo instrumento SABER, combinada com o desvio padrão relacionado ao método de ajuste dos mínimos quadrados, foi utilizada para estimar as incertezas na determinação das amplitudes e fases da maré, conforme foi discutido no [Capítulo 3](#). Sendo assim, é de se esperar que as barras de erro para os parâmetros médios sejam bem maiores que as barras de erros para valores mensais para apenas um ano. Isto acontece devido à já conhecida variabilidade ano-a-ano da maré lunar (STENING et al., 1997; STENING; JACOBI, 2001).

As Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 mostram os perfis verticais das amplitudes para a maré semidiurna lunar desde 20 km até 130 km de altitude.

Nas altitudes entre 20 km e 70 km as amplitudes da maré semidiurna lunar são praticamente constantes para todas as latitudes e meses estudados. Nos meses de solstício para todas as latitudes (Figura 4.1 e Figura 4.2), a partir de 80 km as amplitudes começam a crescer até atingir um valor máximo em ~ 115 km no solstício de dezembro e ~ 110 km no solstício de junho.

Para baixas latitudes (Figura 4.1) no mês de dezembro os picos de amplitude são ~ 6 K em 20° S e em 10° S, ~ 5 K em 20° N e em 10° N e ~ 4 K no equador. No mês de janeiro, todas as latitudes ($0, \pm 10^\circ, \pm 20^\circ$) apresentaram amplitudes elevadas, sendo ~ 8 K para 20° S, 10° S e 20° N e ~ 6 K no equador e em 10° N. Em fevereiro as maiores amplitudes (~ 6 K) ocorrem no equador, 10° S, 20° S e 10° N e a menor (~ 4) K em 20° N.

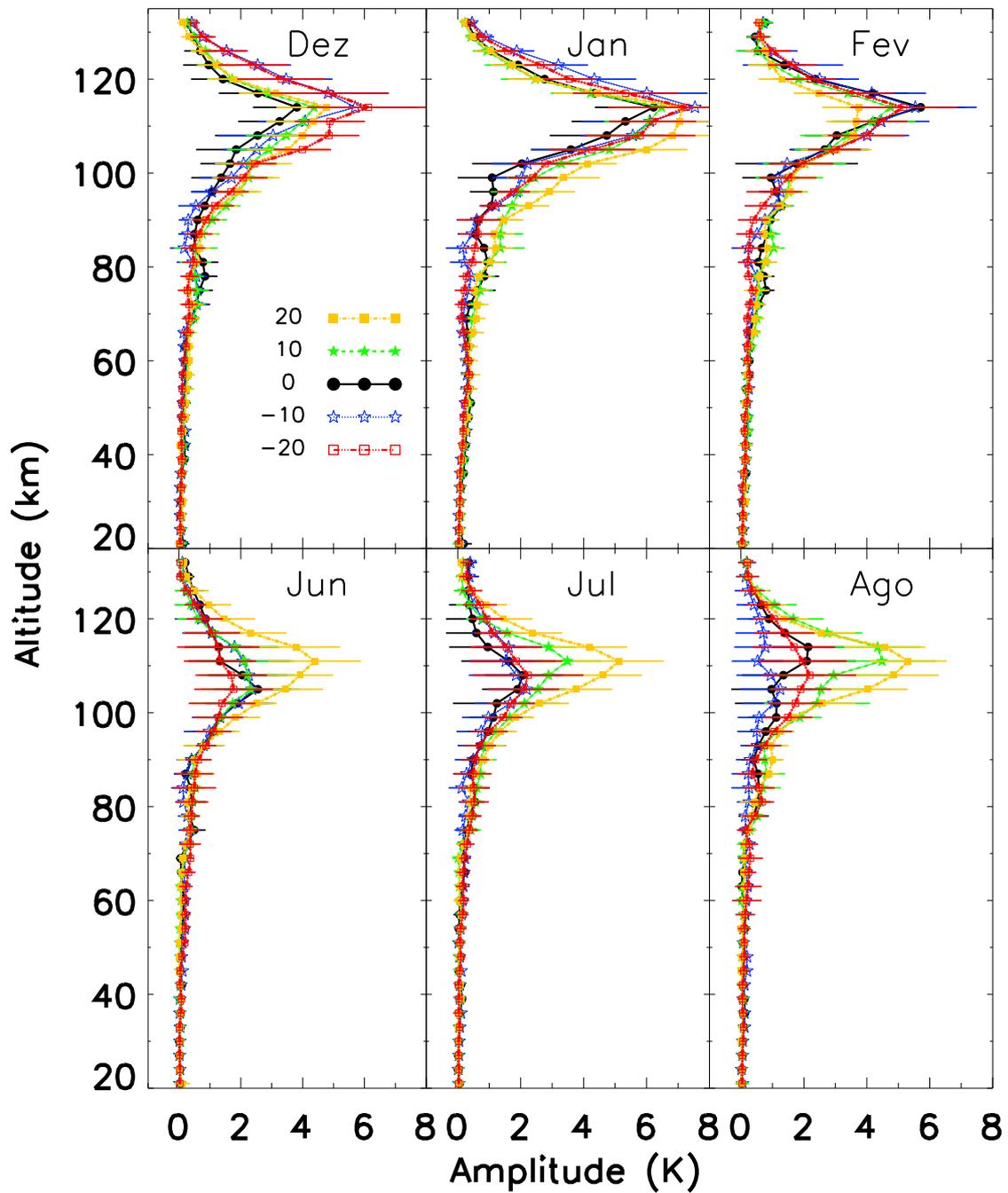


Figura 4.1 - Perfil vertical médio de amplitude da temperatura para maré semidiurna lunar nos meses de solstício para 0° (linha preta sólida + círculo preenchido), 10° S (linha azul pontilhada + estrela vazia), 10° N (linha verde tracejada + estrela preenchida), 20° S (linha vermelha traço-ponto-ponto + quadrado vazio) e 20° N (linha amarela traço-ponto + quadrado preenchido)

Em junho (Figura 4.1), a maior amplitude (~ 4 K) foi observada em 20° N e as menores (~ 2 K) no equador, 10° S, 20° S e 10° N. Em julho as maiores amplitudes são verificadas em 20° N (~ 5 K) e 10° N (~ 3 K) e os menores (~ 2 K) valores no equador, em 20° S e 10° S. No mês de agosto as maiores amplitude também foram encontradas em 20° N ($\sim 4,7$ K) e 10° N ($\sim 4,3$ K) e as menores no equador e em 20° S com valores de 2 K e em 10° S com 1 K.

Para médias latitudes nos meses de solstício (Figura 4.2), as maiores amplitudes para o mês de dezembro ocorrem em 30° S (~ 6 K) e 30° N ($\sim 5,5$ K). Em 40° S o pico de amplitude é observado em altitude diferente daquela das latitude anteriores. Em 40° N a amplitude é de ~ 3 K e em 50° S e 50° N são observadas as menores amplitudes (~ 1) K. Em janeiro, as latitudes em que foram observados os maiores valores de amplitude foram 30° S, 30° N e 40° N. Em 40° S o pico de amplitude é observado em uma altitude inferior às anteriormente descritas, em 50° N obtemos uma amplitude de 2 K e em 50° S de 1 K. Em fevereiro, a maior amplitude é obtida em 30° S (~ 4 K), seguido de 30° N ($\sim 2,5$ K), 40° S (~ 2 K) e 40° N (~ 2 K), e 50° S e 50° N apresentaram as menores amplitudes.

Nos meses de junho, julho e agosto (Figura 4.2) as maiores amplitudes são observadas em 30° N ($\sim 4,5$ K) e 40° N para estes meses apresenta a segunda maior amplitude (~ 3 K). As outras latitudes apresentam praticamente o mesmo valor de amplitude, exceto 50° S em julho.

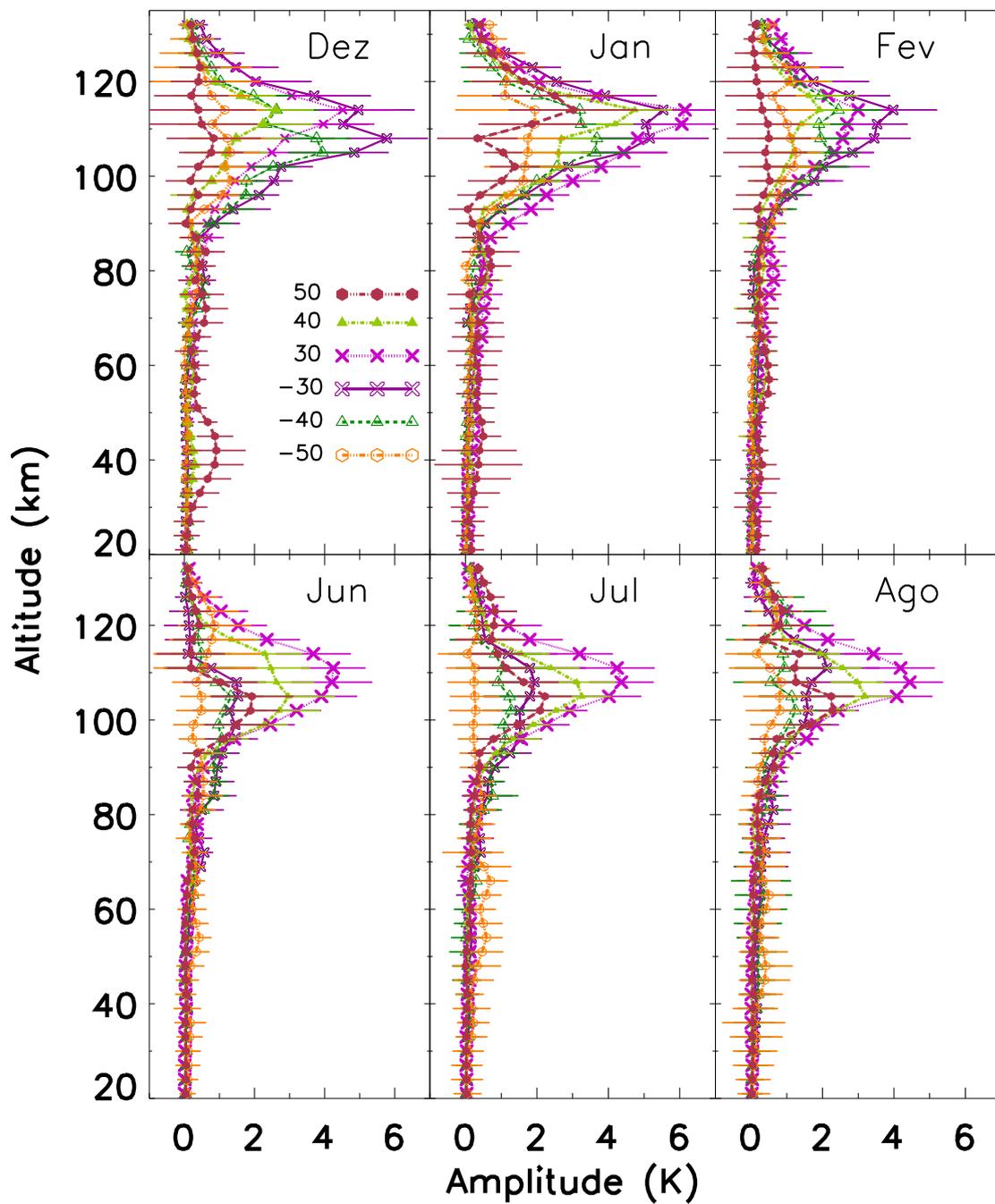


Figura 4.2 - Perfil vertical médio de amplitude da temperatura para maré semidiurna lunar nos meses de solstício para 30° S (linha roxa sólida + X vazio), 30° N (linha rosa pontilhada + X preenchido), 40° S (linha verde tracejada + triângulo vazio), 40° N (linha verde traço-ponto + triângulo preenchido), 50° S (linha laranja traço-ponto-ponto + hexágono vazio) e 50° N (linha vermelha traço-longo + hexágono preenchido)

As amplitudes da maré semidiurna lunar na temperatura para os meses de equinócio (ver [Figura 4.3](#) e [Figura 4.4](#)), nas altitudes entre 80 km e 120 km, apresentam valores menores em relação aos meses de solstício. Além disso, são obtidos valores mais elevados no equinócio de setembro em relação ao equinócio de março, exceto para o mês de maio em médias latitudes, no qual as amplitudes em 30° N apresentam maiores amplitudes do que em novembro.

Na [Figura 4.3](#) observa-se que em março as amplitudes para o equador e 10° S apresentam dois picos, sendo um em ~ 95 km com amplitude de ~ 2 K para o equador e ~ 1,5 K para 10° S. O outro pico ocorre em ~ 115 km, com amplitudes de ~ 3,5 K para ambas as latitudes. Entre 100 km e 120 km, as amplitudes para o equador, 10° S e 20° S são ligeiramente maiores (~ 3,5 K) que para as demais latitudes.

No mês de abril ([Figura 4.3](#)), entre 80 km e 110 km, as amplitudes crescem com a altitude com valores praticamente da mesma magnitude, sendo que no equador e em 10° S as amplitudes são um pouco maiores. Na altitude do pico (~ 115 km), nas latitudes do equador, em 10° N, 20° N e 10° S as amplitudes apresentam a mesma magnitude (~ 3,5 K) e em 20° S a amplitude é ~ 2,5 K. Acima de 105 km as amplitudes começam a decrescer até atingirem valores menores que 1,0 K.

Em maio ([Figura 4.3](#)), as amplitudes em 10° S e no equador apresentam um pequeno pico de ~ 1,5 K por volta de 100 km de altitude. Acima desta altitude as amplitudes decrescem até ~ 110 km de altitude e tornam-se praticamente constantes com altura. Na latitude de 20° S, as amplitudes crescem com a altitude, porém não ultrapassam 1 K. Entre 100 km e 120 km, podem ser vistos picos de amplitude por volta de 110 km para 20°N e 115 km para as demais latitudes. O pico é mais pronunciado em 20° N (~ 3,5 K).

Em setembro ([Figura 4.3](#)), as amplitudes para o equador, 10° N e 20° N crescem com a altitude até ~ 115 km, onde apresentam um pico de amplitude com valores de ~ 3,5 K, ~ 4,3 K e ~ 3,8 K, respectivamente. As amplitudes em 10° S e 20° S ([Figura 4.3](#)) crescem com a altitude, porém os valores não ultrapassam 1,2 K.

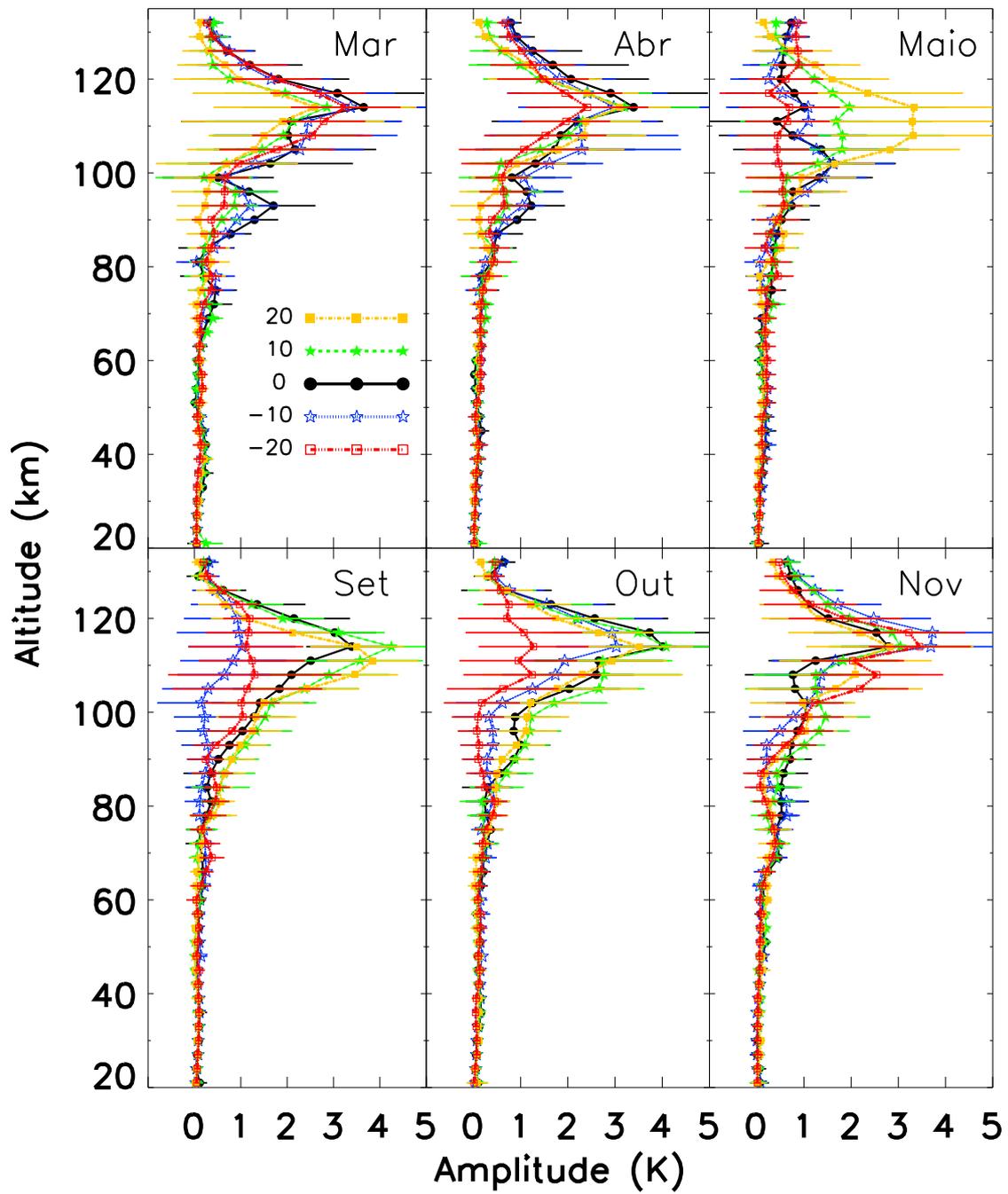


Figura 4.3 - Igual a Figura 4.1, porém, para os meses de equinócio.

No mês de outubro da [Figura 4.3](#), as amplitudes crescem a altitude até atingirem o pico de amplitude em 115 km com praticamente a mesma magnitude para todas as latitudes, exceto para 20° S que apresenta amplitude praticamente constante com a altitude até 100 km, aumentando suavemente, após esta altitude, alcançando valores de ~ 1 K em 115 km. Em novembro, as amplitudes crescem com a altitude até atingirem o pico de amplitude por volta de 115 km com praticamente a mesma magnitude.

Na [Figura 4.4](#) verifica-se que no mês de março para as altitudes a partir de 95 km, as amplitudes crescem lentamente para todas as latitudes até atingirem o pico de amplitude em 110 km (30° S), ~ 115 km (30° N), 108 km (40° S), 115 km (40° N) e 120 km (50° S e 50° N). Entre as altitudes de 80 km e 120 km, os maiores valores de amplitude foram observado em 30° S (~ 3 K) e 30° N (~ 2 K), as demais latitudes apresentaram praticamente a mesma magnitude.

No mês de abril, as amplitudes entre 80 km e 100 km crescem com praticamente os mesmos valores, enquanto que, nas altitudes entre 100 km e 120 km, em 30° N as amplitudes crescem rapidamente com a altitude atingindo o valor mais elevado (3 K) em 115 km. Já em 50° S e 50° N ([Figura 4.4](#)) são obtidas amplitudes praticamente constantes até 100 km. Acima desta altitude a amplitude em 50° S cresce rapidamente até 120 km com um valor de $\sim 3K$ e em 50° N são observados dois pequenos picos em 108 km (1 K) e 120 km ($\sim 0,8$ K), a partir desta altitude as amplitudes decrescem. Nas latitudes de 30° S e 40° N são obtidos picos com pequenos valores de amplitude em 115 km com 1,5 K e 1,0 K, respectivamente. Em 40° S verifica-se que o perfil de amplitude é praticamente constante com a altitude.

Para o mês de maio ([Figura 4.4](#)) são obtidos os maiores valores de amplitude em 30° N, onde a amplitude acima de 80 km apresenta um crescimento rápido com a altitude até ~ 115 km, com valor de ~ 4 K e acima desta altitude decresce rapidamente. A amplitude em 40° N apresenta um perfil semelhante ao anterior, porém com valores inferiores. Nas latitudes de 30° S, 40° S e 50° N são observados perfis com comportamentos semelhantes: as amplitudes crescem com a altitude até atingirem um pico em 110 km com amplitude de 1 K, decrescem até ~ 110 km e tornam-se praticamente constantes com a altitude. Para 50° S o pico de amplitude ocorre em altitude superior (120 km) às demais latitudes.

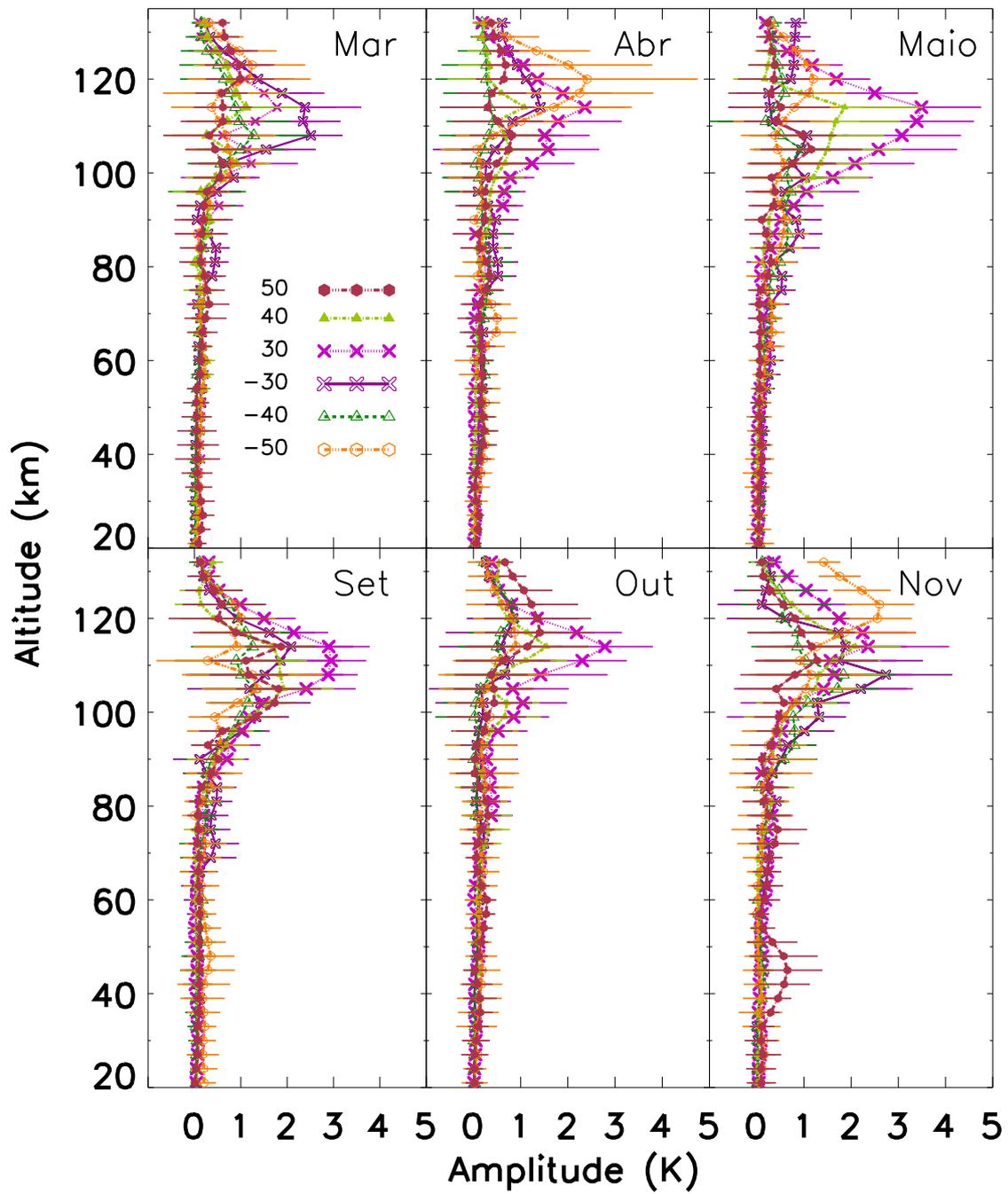


Figura 4.4 - Idêntico a Figura 4.2, porém, para os meses de equinócio.

Em setembro (Figura 4.4), a partir de ~ 70 km, o crescimento da amplitude com a altitude é mais evidente até ~ 112 km para 30° N (~ 3 K) e 105 km para 40° N (2 K). As latitudes de 40° S, 50° N e 50° S apresentam dois picos de amplitude, um em 105 km e o outro em 115 km. Nas altitudes superiores, os perfis apresentam um decréscimo na amplitude.

No mês de outubro (Figura 4.4), são obtidos perfis crescentes de amplitude com a altitude para todas as latitudes, com picos em 115 km em 30° N (3 K), 30° S (1 K), 40° N (1,8 K), 40° S (1 K), 50° S (1 K) e em 120 km para 50° N (1,5 K).

No mês de novembro (Figura 4.4), as amplitudes em 30° S e 40° S apresentam um crescimento mais rápido do que as demais latitudes, sendo em 30° S ligeiramente maior, com um pico de amplitude em 110 km (3 K e 2 K, respectivamente). O comportamento dos perfis de amplitude em 30° N e 40° N é similar, porém em 30° N apresenta valores mais elevados. Estes perfis crescem com a altitude até 115 km e logo após decrescem. Nas latitudes 50° N e 50° S, as amplitudes crescem com a altitude até 110 km para 50° N, que apresenta um pequeno pico de ~ 1 K, e 120 km para 50° S com uma amplitude de $\sim 2,8$ K no pico.

A Tabela 4.1 mostra um resumo dos valores máximos obtidos para a amplitude da maré semidiurna lunar na temperatura. Estes valores do pico de amplitude foram mostrados nas figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. Na tabela é possível verificar a variação do máximo da amplitude com a latitude e com os meses do ano.

Tabela 4.1 - Amplitudes máximas mensais da maré semidiurna lunar na temperatura em função da latitude.

Latitude (°)	Amplitude (K)											
	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov
0	4,0	6,0	6,0	3,5	3,5	1,5	2,0	2,0	2,0	3,5	4,0	2,5
10 S	6,0	8,0	6,0	3,5	3,5	1,5	2,0	2,0	1,0	1,0	3,0	3,7
20 S	6,0	8,0	6,0	3,5	2,5	1,0	2,0	2,0	2,0	1,2	1,0	3,5
30 S	6,0	5,7	4,0	3,0	1,5	1,0	1,8	2,0	2,0	2,2	1,0	3,0
40 S	4,0	3,5	2,0	1,0	0,5	1,0	1,7	1,0	1,0	1,3	1,0	2,0
50 S	1,0	1,0	1,0	0,7	3,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	2,8
10 N	5,0	6,0	6,0	2,5	3,5	2,0	2,0	3,0	4,3	4,3	4,0	3,0
20 N	5,0	8,0	4,0	2,5	3,5	3,5	4,0	5,0	4,7	3,8	3,5	2,5
30 N	5,5	6,0	2,5	2,0	3,0	4,0	4,5	4,5	4,5	3,0	3,0	2,8
40 N	3,0	5,0	2,0	1,0	1,0	2,0	3,0	3,0	3,0	2,0	1,8	2,0
50 N	1,0	2,0	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,4	2,0	2,0	1,5	1,0

O comportamento da estrutura vertical das fases da maré semidiurna lunar na temperatura é mostrado nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8. Estas figuras exibem as fases médias zonais mensais da maré semidiurna lunar na temperatura em função da altitude, para os meses de solstício e de equinócio. As latitudes dos perfis são as mesmas latitudes dos perfis de amplitude.

Para o equador e baixas latitudes, em dezembro (Figura 4.5), verifica-se que no intervalo de altitude entre 20 km e 70 km as fases da maré lunar apresentam uma progressão com o decréscimo da altitude entre 20 km e 40 km e acima desta altitude tornam-se quase constante até ~ 70 km, exceto para 20° S que apresenta uma fase levemente crescente com a altitude. No entanto nos meses de janeiro e fevereiro, neste mesmo intervalo de altitude, a fase apresenta progressão com o decréscimo da altitude para todas as latitudes.

Nos meses de junho e julho, ainda para baixas latitudes, é possível observar uma progressão de fase, principalmente, para o equador, 10° S e 20° S, já que os perfis para 10° N e 20° N apresentam algumas variações. O mês de agosto apresenta alguns trechos (20 km - 40 km e 50 km - 60 km) em que a fase cresce a medida que a altitude aumenta e entre 60 km e 70 km torna-se praticamente constante.

No entanto, os perfis de fase da maré lunar para a região entre 80 e 110 km, onde as amplitudes mostradas anteriormente apresentam valores mais expressivos, nos meses de solstício (Figura 4.1), para o equador e baixas latitudes, mostram uma clara progressão de fase para todos os meses e latitudes, exceto para 20° S (nos meses de janeiro, julho e agosto) e para 10° S (em agosto), pois nestes casos foram observadas descontinuidade na fase nas seguintes altitudes: 90 km, 105 km, 108 km e 108 km, respectivamente.

Nas altitudes superiores a 110 km, a fase para o equador torna-se quase constante para todos os meses, exceto para fevereiro que apresenta uma mudança de direção de propagação. Na latitude de 20° N para dezembro, 10° N e 20° N para fevereiro, junho e julho, 10° S e 20° S para agosto, a fase segue o mesmo padrão de propagação das altitudes de 80 km a 110 km, sendo que em dezembro, junho e julho o perfil de fase indica um comprimento de onda maior. Nos meses de fevereiro, junho e julho, as fases em 10° S e 20° S são crescentes com a altitudes, ou seja, apresentam características de uma onda propagante para baixo. Esta característica também é observada no mês de agosto para as latitudes de 10° N e 20° N e para o equador em fevereiro. Nos meses de dezembro e janeiro, as fase são quase constantes para 10° S e 20° S. A fase em 20° N, nas altitudes inferiores a 70 km nos meses de junho e julho apresenta um perfil variável em relação às demais latitudes.

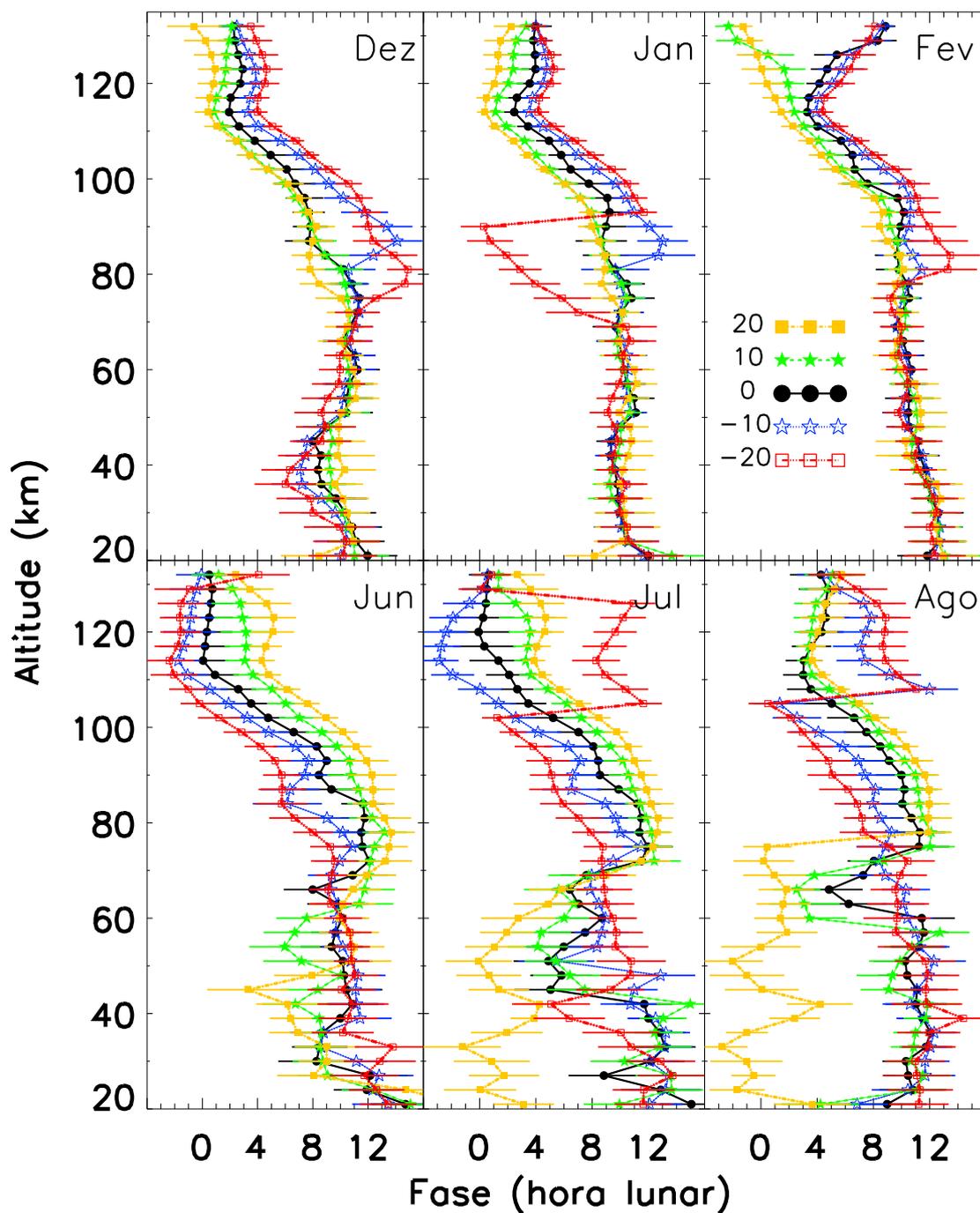


Figura 4.5 - Perfil vertical médio de fase da temperatura para maré semidiurna lunar nos meses de solstício para 0° (linha preta sólida + círculo preenchido), 10° S (linha azul pontilhada + estrela vazia), 10° N (linha verde tracejada + estrela preenchida), 20° S (linha vermelha traço-ponto-ponto + quadrado vazio) e 20° N (linha amarela traço-ponto + quadrado preenchido).

A estrutura vertical de fase para médias latitudes nos meses de solstício é mostrada na [Figura 4.6](#). Nesta figura observa-se que para o mês de dezembro a fase em 40° S apresenta características de uma onda verticalmente propagante para cima desde 30 km até 110 km, embora o perfil de fase apresente descontinuidade em 60 km e 100 km. A partir de 110 km a fase torna-se praticamente constante com a altitude.

Em janeiro ([Figura 4.6](#)) a fase para esta latitude é variável até 40 km, nas altitudes superiores torna-se propagante com o decréscimo da altitude até 110 km, porém com um ponto de descontinuidade em 100 km. Fevereiro mostra um perfil semelhante ao de janeiro, só que com descontinuidade em altitude diferente (95 km). Nas altitudes superiores a 110 km a progressão da fase ocorre em sentido oposto para janeiro e a fase torna-se constante para fevereiro.

Nos meses de junho e julho ([Figura 4.6](#)), foram obtidas características de uma onda verticalmente propagante para cima desde 30 km até 120 km. Além disso, verifica-se que entre 50 km e 60 km a progressão da fase acontece em direção oposta para ambos os meses. Em agosto a progressão de fase com o decréscimo da altitude é observada até 120 km, exceto entre 20 km e 40 km, onde a fase é constante, indicando uma onda com comprimento de onda muito alto. Entretanto, para 40° N foi obtida uma progressão de fase com o decréscimo da altitude em dezembro (70 km - 120 km), janeiro (70 km - 110 km), fevereiro (90 km - 120 km), junho (20 km - 50 km, 80 km - 120 km com um ponto de descontinuidade em 100 km), julho (90 km - 120 km) e agosto (40 km - 50 km, 80 km - 110 km).

Observa-se ainda na [Figura 4.6](#), uma fase constante em fevereiro (20 km - 90 km com descontinuidade em ~ 40 km), julho (40 km - 60 km) e agosto (20 km - 40 km). Em 30° N o perfil de fase em dezembro apresenta algumas variações entre 20 km e 60 km, nas altitudes entre 60 km e 120 km há progressão de fase com o decréscimo da altitude. Em janeiro a progressão de fase com o decréscimo da altitude ocorre de 30 km até 120 km, o mesmo comportamento é observado em fevereiro só que a partir de ~ 90 km o perfil indica um comprimento de onda menor do que nas altitudes inferiores.

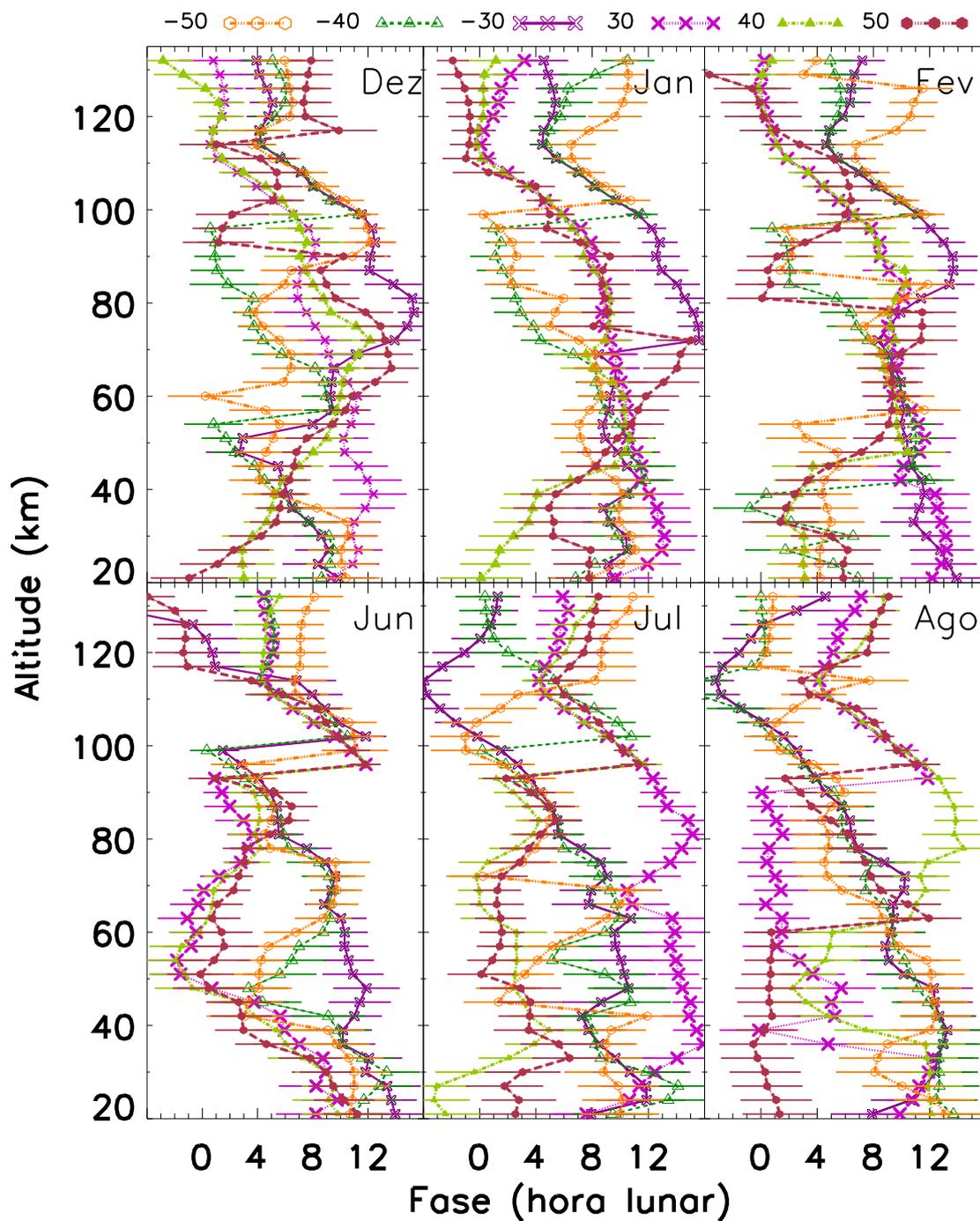


Figura 4.6 - Perfil vertical médio de fase da temperatura para maré semidiurna lunar nos meses de solstício para 30° S (linha roxa sólida + X vazio), 30° N (linha rosa pontilhada + X preenchido), 40° S (linha verde tracejada + triângulo vazio), 40° N (linha verde traço-ponto + triângulo preenchido), 50° S (linha laranja traço-ponto-ponto + hexágono vazio) e 50° N (linha vermelha traço-longo + hexágono preenchido).

Em 30° N a progressão de fase com o decréscimo da altitude ocorre em julho de 40 km até 120 km (Figura 4.6) com um trecho de mudança de direção de propagação entre 70 km e 80 km e em agosto de 40 km até 120 km com uma descontinuidade em 90 km. Em junho o perfil vertical de fase é crescente com o aumento da altitude nos intervalos entre 20 km - 50 km e 80 km - 115 km com descontinuidade em 100 km. Já para 30° S observa-se progressão de fase com o decréscimo da altitude em dezembro desde 20 km até 120 km (exceto entre 50 e 70 km que há uma mudança de direção de propagação da onda), em janeiro de 80 km a 110 km, fevereiro de 80 km até 110 km, junho de 20 km a 120 km com descontinuidade em 100 km. Julho é similar a junho só que a descontinuidade na fase ocorre em 40 km e em agosto a progressão da fase ocorre de 70 km a 120 km.

Também são obtidos (ver a Figura 4.6) para 30° S perfis constantes com a altitude em janeiro (20 km - 70 km), fevereiro (30 km - 70 km) e agosto (40 km - 50 km) e fase crescente com o aumento da altitude em agosto (20 km - 40 km). Para 50° N a progressão da fase com o decréscimo da altitude é observado dezembro (70 km - 110 km com descontinuidade em 90 km), janeiro (80 km - 110 km), fevereiro (100 km - 130 km), junho (20 km - 60 km e 90 km - 120 km), julho (90 km - 120 km) e agosto (60 km - 120 km com descontinuidade em 90 km). É obtido perfil de fase crescente com o aumento da altitude em dezembro (20 km - 70 km), janeiro (20 km - 70 km), fevereiro (30 km - 100 km) e constante com a altitude em janeiro (70 km - 80 km), junho (60 km - 90 km) e agosto (20 km - 60 km) e junho apresenta um perfil variável sem padrão bem definido até 90 km.

Em 50° S, ainda na Figura 4.6, a maré lunar apresenta característica de uma onda verticalmente propagante para cima em dezembro, exceto entre 60 km e 90 km, onde a progressão de fase ocorre em direção oposta, em fevereiro nos intervalos de 20 km - 55 km e 90 km e 115 km, junho de 80 km a 110 km só que com descontinuidade em 100 km, julho de 80 km a 100 km e agosto nos intervalos entre 20 km - 40 km e 60 km - 100 km. São observados também perfis com fase crescente com o aumento da altitude em dezembro (60 km - 90 km), julho (40 km - 90 km só que no trecho entre 70 km e 90 km acontece mais cedo) e agosto (100 km - 120 km) e constante com a altitude em fevereiro (20 km - 55 km e 80 km - 100 km), junho (20 km - 80 km, só que no intervalo entre 40 km - 60 km a hora do máximo acontece mais cedo), julho (20 km - 40 km) e agosto (40 km - 55 km).

Os perfis verticais de fase nos meses de equinócio para baixas latitudes podem ser vistos na [Figura 4.7](#) e para médias latitudes na [Figura 4.8](#). O mês de março em baixas latitudes ([Figura 4.7](#)) apresenta progressão de fase com o decréscimo da altitude nas altitudes de 80 km a 120 km. Entre 20 km e 80 km a fase é praticamente constante com a altitude para todas as latitudes. Em abril a fase é constante com a altitude entre 40 km e 70 km e entre 80 km e 110 km há uma progressão da fase com o decréscimo da altitude. Acima de 110 km a fase é quase constante com a altitude. Já nas altitudes inferiores a 30 km os perfis de fase são variáveis com as altitudes.

Para o mês de maio ([Figura 4.7](#)) nas altitudes de 20 km a 80 km a fase é constante com a altitude. A propagação da fase com o decréscimo da altitude é observada para as latitude de 0° , 10° N e 20° S entre 80 km - 110 km, para 10° S entre 90 km - 110 km e para 20° S entre 80 km - 100 km. Em setembro este comportamento é verificado em 20° S a partir de 50 km até 110 km, em 20° N e 10° N de 70 km a 110 km, em 0° desde 40 km até 110 km e para 10° S nas altitudes de 40 km - 78 km e 90 km - 110 km.

No mês de outubro, como pode ser visto na [Figura 4.7](#), a fase é quase constante com a altitude para todas as latitudes, embora apresente pequenas variações para as altitudes inferiores a 80 km. Além disso, são propagantes com o decréscimo da altitude para todas as latitudes no intervalo de altitude entre 80 e 110 km, sendo que 20° apresenta uma região de mudança de direção de propagação da fase entre 85 km e 100 km. Em novembro a fase apresenta o mesmo comportamento para todas as latitudes entre 80 km e 110 km. A fase é constante com a altitude entre 50 km e 80 km para todas as latitudes, exceto para 20° N que é propagante para altitudes superiores a 50 km. Nas altitudes superiores a 110 km a fase volta a ser constante com a altitude para praticamente todas as latitudes.

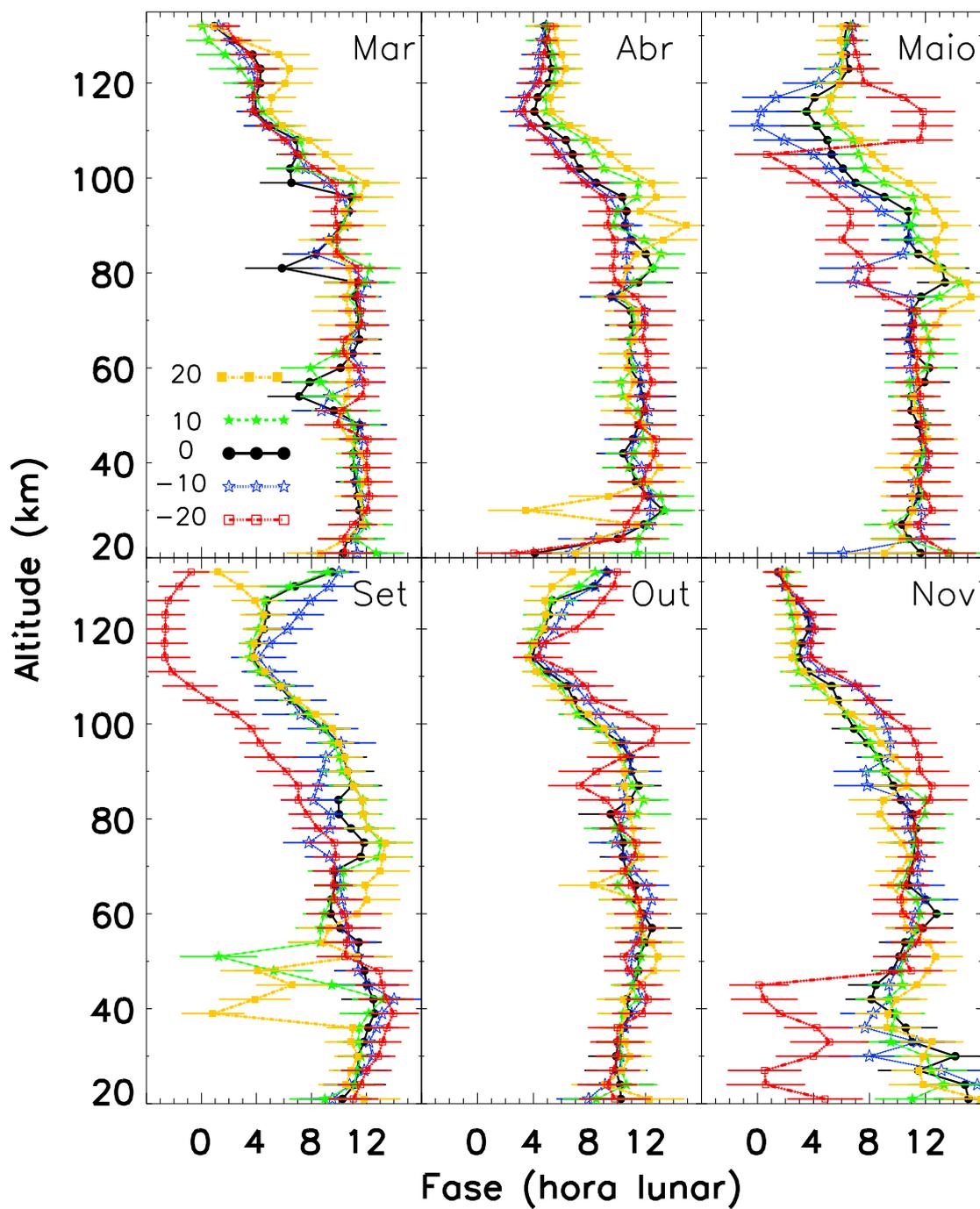


Figura 4.7 - Igual a Figura 4.5, porém, para os meses de equinócio.

Na [Figura 4.8](#) é possível observar que os perfis de fase para médias latitudes apresentam variações com a altitude que não estão presentes em baixas latitudes para os meses de equinócio. A característica de uma onda verticalmente propagante para cima pode ser vista em março nas altitudes de 60 km a 110 km para praticamente todas as latitudes, apresentando uma mudança na hora do máximo em ~ 90 km. Em abril esta característica é verificada em 30° N desde 20 km até 110 km com uma mudança na hora do máximo em ~ 90 km. Em 50° N a fase é propagante desde 60 km até 110 km. Já em 50° S entre 20 km e 60 km a fase é constante, entre 60 km e 80 é crescente com o aumento da altitude e propagante com o decréscimo da altitude entre 80 km e 110 km. Na latitude de 40° N a fase é propagante para cima de 50 km a 110 km com uma mudança na hora do máximo em 80 km.

Em maio (ver [Figura 4.8](#)), nas altitudes inferiores a 60 km a fase para 40° N, 30° S, 30° N e 50° S apresenta variações com a altitude. No entanto, em 50° N e 40° S, as fases são propagantes com o decréscimo da altitude. Para a região entre 60 e 100 km a fase é propagante com a altitude para 50° N (só que com uma mudança na hora do máximo em 90 km), 50° S e 40° S, enquanto que, em 40° N este comportamento é obtido de 70 km a 90 km.

A fase em setembro, de 20 a 50 km de altitude, é praticamente constante para 50° N, 40° N e 50° S, enquanto que, em 30° N, 30° S e 40° S é variável com a altitude para este intervalo. A propagação da fase com o decréscimo da altitude pode ser observada em 30° N (80 km - 110 km), 40° S (70 km - 110 km), 30° S (90 km - 110 km), 50° N (90 km - 110 km) e 40° N (80 km - 110 km).

Em outubro (ver [Figura 4.8](#)) a maré apresenta uma fase praticamente constante desde 20 km até 120 km para as latitudes de 30° N e 50° N. Já em 50° S a fase é propagante com o decréscimo da altitude de 60 km a 100 km, enquanto que, em 40° N mostra o mesmo comportamento de 40 km a 80 km e de 90 km a 110 km, com uma mudança na hora em que ocorre o máximo em 90 km. No entanto, 30° S exhibe uma fase constante com a altitude de 60 km a 80 km e propagante de 80 km a 110 km.

A propagação da fase com o decréscimo da altitude pode ser observada em novembro (ver [Figura 4.8](#)) nos intervalos de altitude de 40 km a 60 km e de 80 km a 120 km em 30° S, 50 km - 70 km e 90 km - 110 km em 30° N, 30 km a 110 km em 40° S, 60 km - 80 km e 100 km - 120 km em 50° S, 70 km e 110 km em 50° N e 60 km - 70 km e 90 km - 110 km para 40° N. Em alguns destes casos são observadas mudanças na hora do máximo.

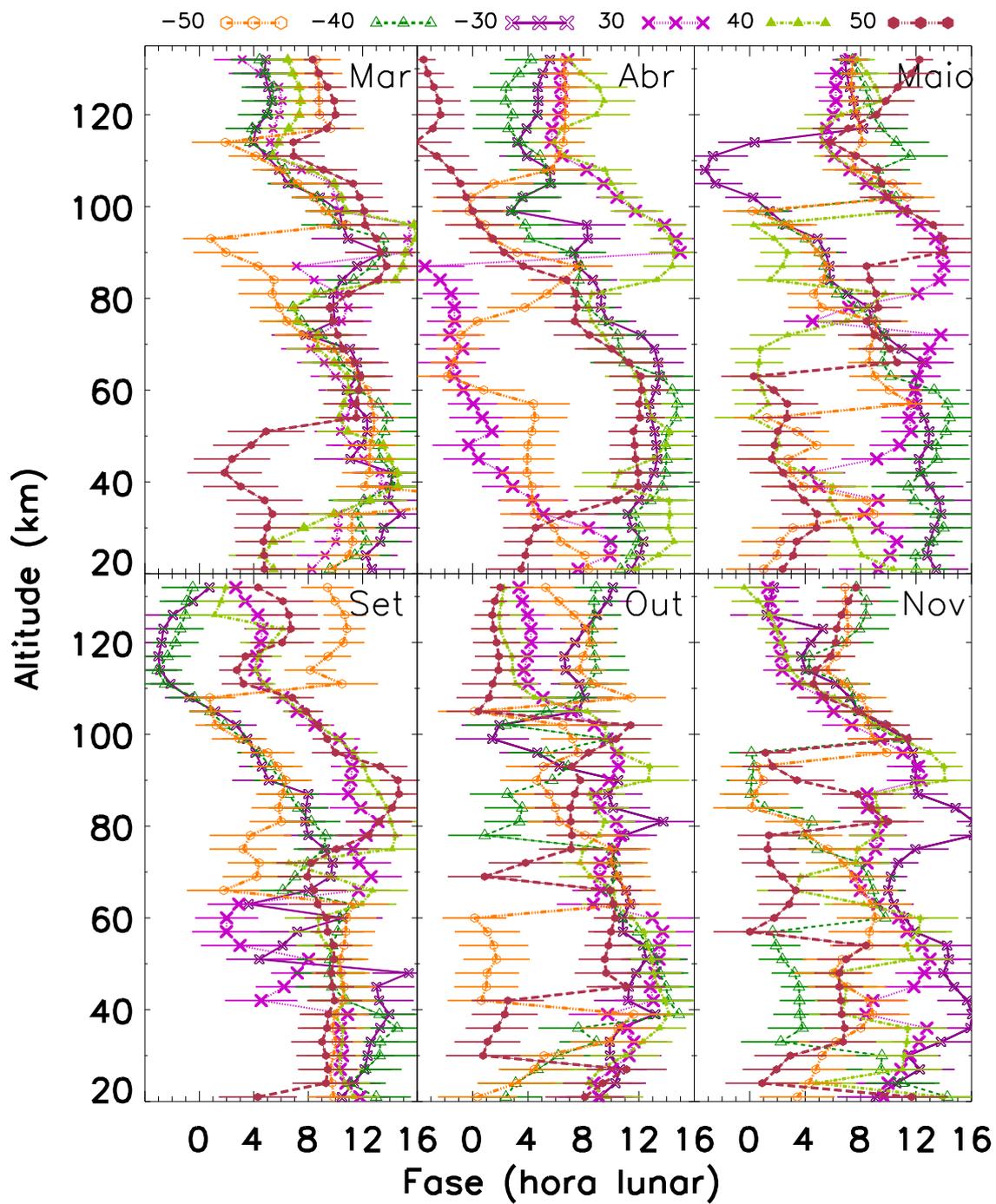


Figura 4.8 - Igual a Figura 4.6, porém, para os meses de equinócio.

Comparando os perfis de fase mostrados nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 é possível notar que as fases em médias latitudes apresentam um comportamento mais variável do que em baixas latitudes.

Teoricamente, espera-se que a maré semidiurna lunar se propague verticalmente alcançando os valores mais elevados de amplitude na região da mesosfera e baixa termosfera, entre ~ 90 km e 120 km de altitude. Através de medidas de solo com radares, trabalhos anteriores mostraram que as amplitudes desta oscilação no campo de vento apresentam valores entre ~ 5 e 10 m/s nas altitudes de 90 km e 100 km (STENING et al., 1987; STENING; VINCENT, 1989; STENING; JACOBI, 2001; STENING et al., 2003; SANDFORD; MITCHELL, 2007; PAULINO et al., 2012).

Embora entre 20 km e 70 km, as amplitudes apresentem valores pequenos, os perfis verticais de fase mostram características esperadas para uma onda verticalmente propagante para cima, ou seja, a fase da onda se propaga com o decréscimo da altitude. Essa característica é, principalmente, observada no equador e em baixas latitudes. Através da análise dos perfis verticais de fase, verifica-se que, na maioria dos casos, tem-se a propagação de fase da onda. Um perfil comportado e bem definido da fase garante a confiabilidade do processo de extração da maré semidiurna lunar dos dados de temperatura do instrumento SABER.

Como a maré lunar é gerada na baixa atmosfera e se propaga para altitudes superiores, é esperado que sua amplitude aumente com a altura para conservar a energia. Nas figuras apresentadas nesta seção, verifica-se claramente este padrão para praticamente todas as latitudes estudadas. Na região da mesosfera, o aumento da amplitude é mais rápido e mais evidente, até atingir o valor máximo em torno de ~ 110 km. Nas altitudes superiores a 110 km as amplitudes decrescem rapidamente. A razão deste comportamento é a competição entre condições de propagação e os processos dissipativos, os quais tornam-se importantes na termosfera.

Forbes e Gillete (1982), mostraram teoricamente que o valor máximo (~ 5.8 K) da amplitude da maré semidiurna lunar ocorre em torno de 115 km e que a mesma decresce para um valor mínimo de ~ 1.6 K próximo a 160 km de altitude, e atinge valores aproximadamente constantes (~ 2 K) em torno de 200 km. Forbes (1982) apresentou perfis verticais teóricos da maré semidiurna lunar desde a superfície até 400 km para algumas latitudes do hemisfério norte. Nestas latitudes as amplitudes aumentam com a altitude, principalmente, na estratosfera, mesosfera e baixa termosfera. Os valores máximos previstos para a amplitude são ~ 10 K por volta de 120 km e, nas altitudes superiores, tornam-se praticamente constantes com a altitude.

Na presente análise são utilizados 10 anos de dados para compor os valores médios através da média vetorial, desta maneira, este processo pode resultar em um certo grau de cancelamento devido a variações sazonais e inter-anuais na fase (flutuações mostradas na barra de desvio padrão), de forma que, os valores médios apresentem valores inferiores aos que seriam esperados para uma único mês.

Quando as amplitudes aumentam rapidamente (região da baixa termosfera) a progressão da fase com a altura é mais pronunciada. Esta progressão regular de fase fornece um indício adicional de que uma clara assinatura de maré foi identificada nos dados. Em 40° S de latitude, entre 60 km e 100 km de altitude, a progressão vertical da fase com a altitude indica comprimentos de onda verticais menores que para outras latitudes. Entre 20 km e 60 km onde as amplitudes apresentam valores pequenos, o perfil vertical de fase de uma maneira geral é aproximadamente constante com a altitude, ou seja, comprimento de onda vertical longo.

Nos níveis mais baixos da atmosfera, ou seja, na estratosfera e baixa mesosfera, o comportamento dos perfis verticais de fase e amplitude, de uma forma geral, está compatível com as previsões teóricas. Os valores máximos de amplitude observados são bastante dependentes da latitude, mas podem atingir maiores magnitudes que os valores previsto pelos modelos. A principal discrepância entre a teoria e as observações é a rápida diminuição observada na amplitude da maré semidiurna lunar para altitudes superiores a 110 km. Como o erro na estimativa da temperatura pelo SABER é relativamente elevado nas altitudes superiores a 120 km, não é possível acompanhar as características da maré lunar nestes níveis com tais dados. Contudo, este resultado é bastante expressivo porque pode dar uma nova interpretação ao processo de interação da maré semidiurna lunar dentro da termosfera-ionosfera.

4.2 Variação latitudinal

Nesta seção serão mostrados os resultados aplicando uma média zonal, a qual se obtém integrando qualquer campo atmosférico em todas as longitudes para uma determinada faixa de latitude e altitude. A média zonal representa uma medida climatológica de extrema importância na atmosfera. Esta estrutura latitudinal climatológica da maré semidiurna lunar é mostrada na [Figura 4.9](#).

A [Figura 4.9](#) ilustra a amplitude média zonal que representa a variabilidade sazonal e latitudinal da maré. De novembro a janeiro, a amplitude apresenta dois picos por volta de $\pm 20^\circ$, porém com o pico do hemisfério sul levemente maior nos meses de novembro e dezembro.

De fevereiro a abril, a amplitude exibe apenas um pico centrado no equador, sendo que nos meses de fevereiro e março as amplitudes são maiores no hemisfério sul e em abril no hemisfério norte.

Em maio, como pode ser visto na [Figura 4.9](#), o pico é centrado em $\sim 20^\circ$ N. Entre os meses de junho e setembro dois picos de amplitude foram observados novamente, porém, com maiores valores no hemisfério norte. Em outubro um pico de amplitude foi observado no hemisfério norte.

Ainda na [Figura 4.9](#), as maiores amplitudes foram observadas em dezembro e janeiro por volta de 110 km com valores da ordem 8 K. De uma maneira geral, as maiores amplitudes foram observadas nos meses de solstício, porém com valores maiores no solstício de dezembro do que no solstício de junho. Os menores valores de amplitude foram obtidos nos meses de equinócios, mas a amplitude da variação na temperatura foi maior durante o equinócio de setembro do que o de maio. As amplitudes atingiram valores de 5 K no solstício de junho, 8 K no solstício de dezembro e 3 K no equinócio. A presente análise mostra uma clara variação sazonal nas amplitudes da maré semidiurna lunar na temperatura.

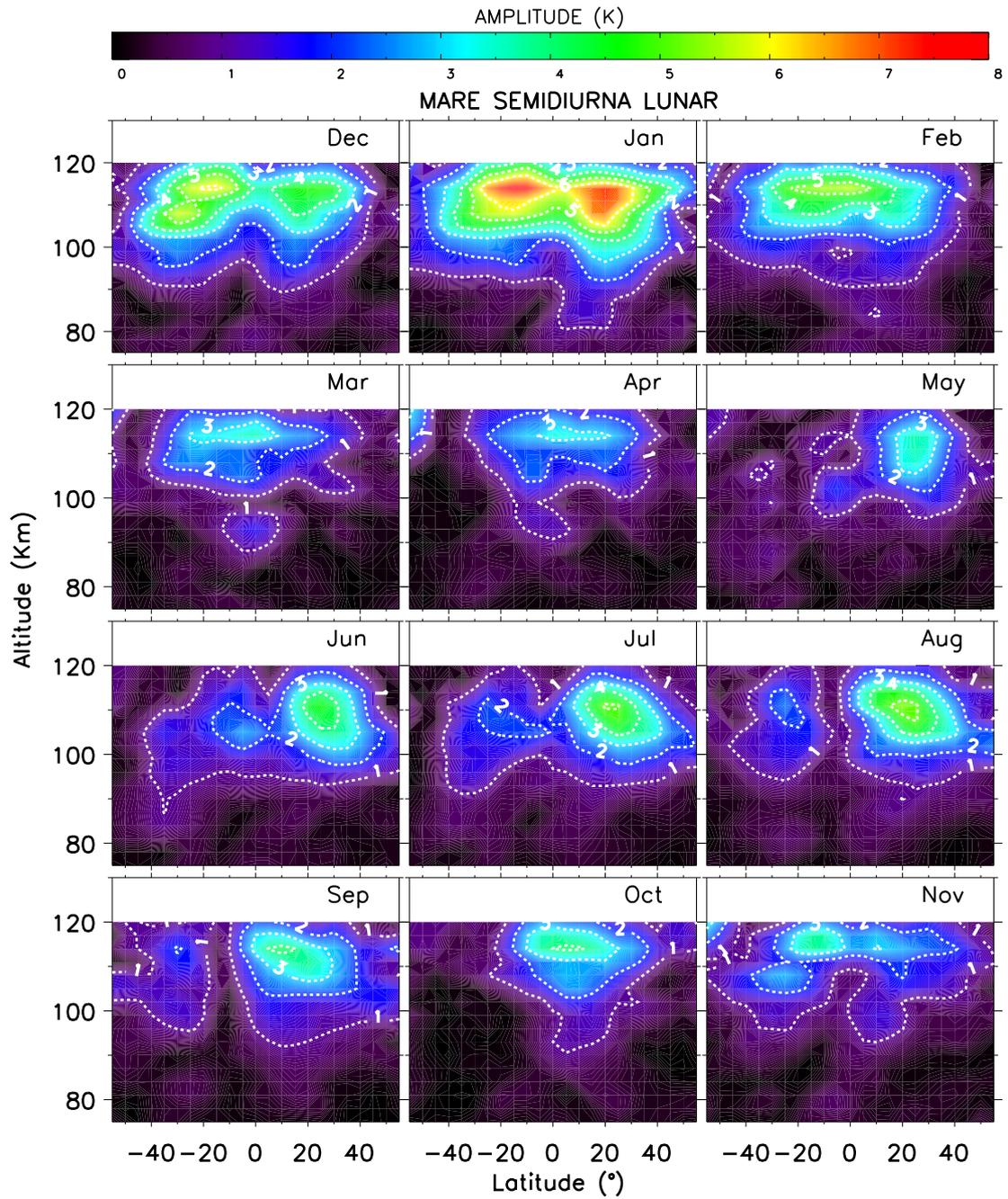


Figura 4.9 - Amplitude média zonal da maré semidiurna lunar como função da altitude e latitude.

Com o intuito de facilitar a comparação entre as estruturas observadas e as estruturas previstas pelo modelo Vial e Forbes (1994), a Figura 4.9 foi refeita para as altitudes coincidentes com as deste modelo e que estão disponíveis on-line no banco de dados do CEDAR. A Figura 4.10 é igual à Figura 4.9 só que para as altitudes entre 80 e 100 km.

A Figura 4.11 exibe a variabilidade sazonal e latitudinal da amplitude da maré semidiurna lunar modelada por Vial e Forbes (1994). Diferentemente dos resultados mostrados no presente trabalho, este modelo prevê apenas um pico de amplitude para os meses de novembro, dezembro e fevereiro, localizado no hemisfério sul. O mês de janeiro apresenta um comportamento similar, porém com os valores da amplitude modelada menores que os do presente trabalho. O meses de março e abril apresentam amplitudes menores que 1 K e sem um padrão definido. O comportamento previsto pelo modelo para os meses de junho, julho, agosto e setembro apresenta semelhanças com as estruturas observadas para estes meses, enquanto que, nos meses de maio, outubro e novembro o modelo prevê comportamento distinto das observações. De uma maneira geral, a magnitude das amplitudes modeladas são menores do que os valores observacionais.

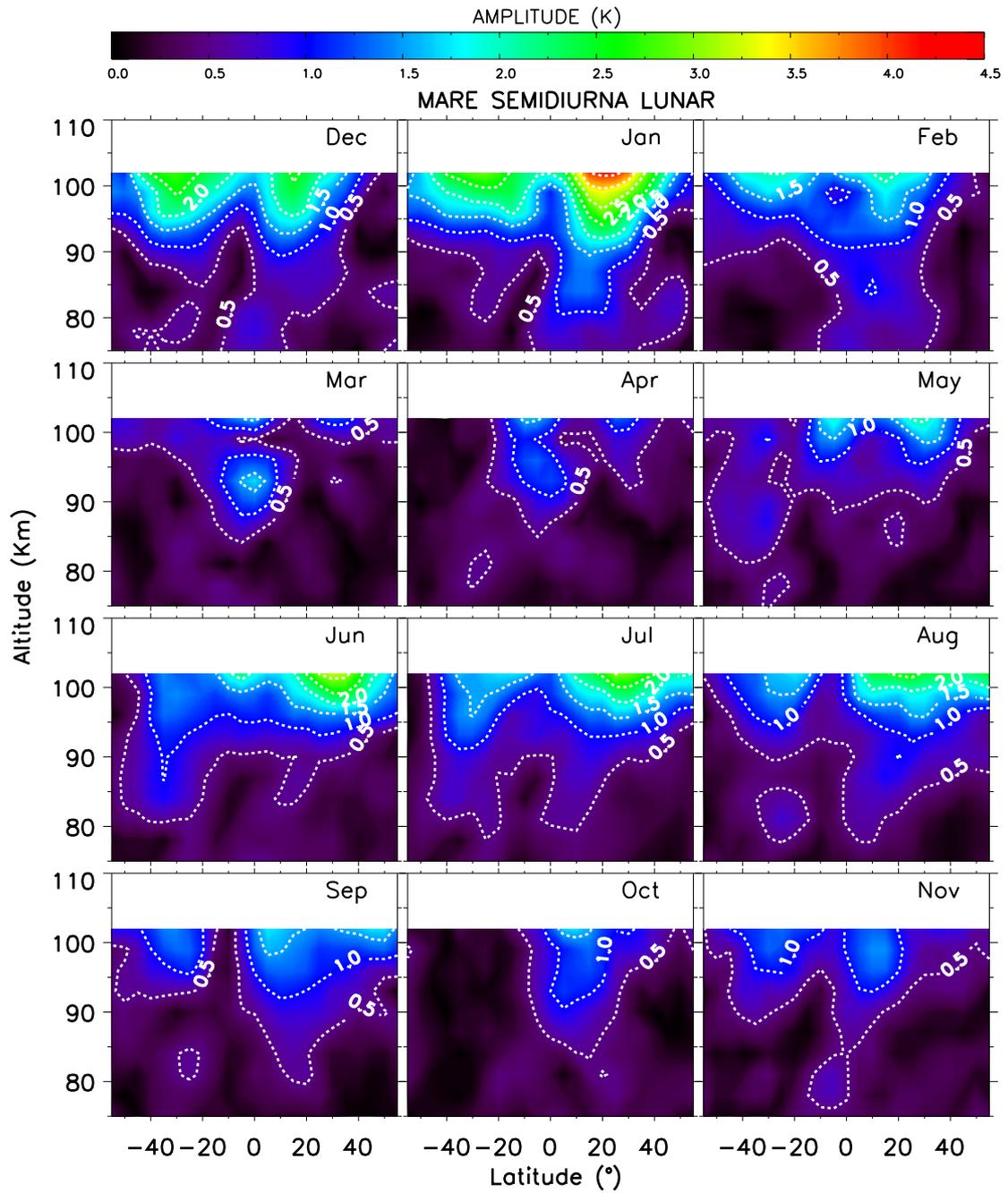


Figura 4.10 - Amplitude média zonal da maré semidiurna lunar como função da altitude (80 km - 100 km) e latitude.

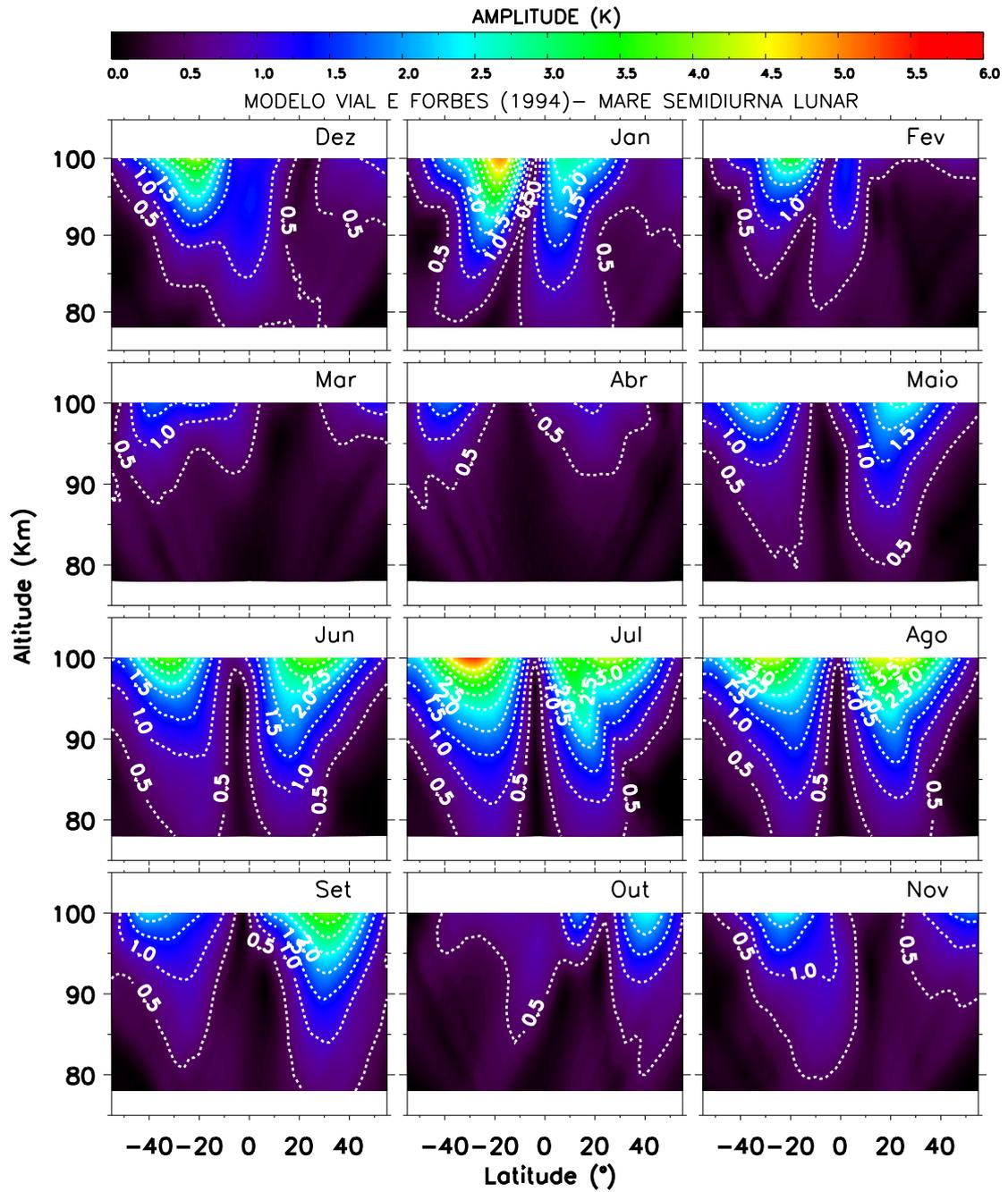


Figura 4.11 - Amplitude da maré semidiurna lunar modelada por Vial e Fobres (1994) em função da altitude e latitude

Para avaliar mais detalhadamente o comportamento sazonal da maré semidiurna lunar na região da MLT, a [Figura 4.12](#) exibe a amplitude da maré lunar em função da latitude e do mês para as altitudes de 114 km (painel a), 108 km (painel b), 99 km (painel c) e 90 km (painel d). De uma forma geral, a variação anual da maré semidiurna lunar apresenta dois períodos de significativa intensificação da amplitude. Estes máximos acontecem entre novembro e fevereiro e entre os meses de maio e setembro. Porém, para as altitudes de 99 km, 108 km e 114 km o segundo máximo é mais expressivo para o hemisfério norte, sendo mais pronunciada esta diferença entre os hemisférios nas altitudes de 108 km e 114 km.

No caso do máximo que ocorre entre os meses de novembro e fevereiro observa-se assimetria latitudinal, na altitude de 90 km em janeiro e fevereiro com amplitudes elevadas no hemisfério norte. Para os mesmos meses, na altitude de 99 km, o pico ocorre em ambos os hemisférios, com as amplitudes levemente maiores no hemisfério norte, com uma diferença da ordem de ~ 1 K. Já para os meses de novembro e dezembro, nas altitudes de 99 km, 108 km e 114 km as amplitudes são maiores no hemisfério sul.

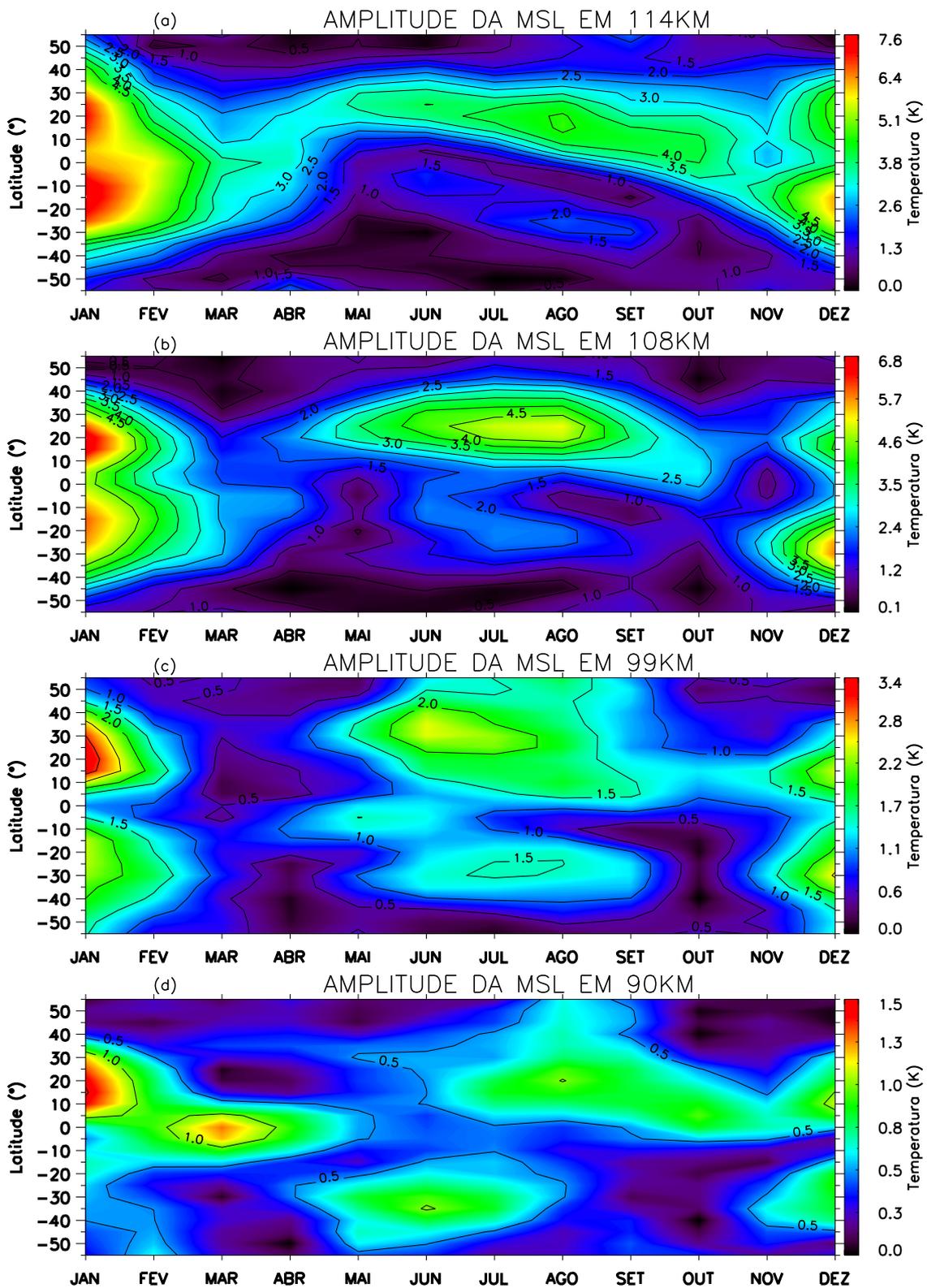


Figura 4.12 - Amplitude da maré semidiurna lunar em função da latitude e do mês nas altitudes de 114 km (a), 108 km (b), 99 km (c) e 90 km (d)

A Figura 4.13 exibe as amplitudes da maré semidiurna lunar na temperatura modelada por Vial e Forbes (1994) em função da latitude para duas altitudes fixas 90 km (painel a) e 100 km (painel b). A barra de cores designa a magnitude da amplitude. Assim como mostrado anteriormente na Figura 4.12, o modelo prevê dois períodos de intensificação da maré lunar durante o ano, sendo que, no máximo que ocorre no solstício de dezembro, as maiores amplitudes são previstas para o hemisfério sul em ambas as altitudes. No entanto, as observações para estas altitudes mostram amplitudes mais elevadas no hemisfério norte, em janeiro.

Uma possível explicação para as diferenças entre as observações e os resultados do modelo Vial e Forbes (1994) pode ser devido o fato de os parâmetros do modelo não apresentarem variação ano-a-ano e ao longo do mês, pois foram gerados apenas para o dia 15 de cada mês de 1993.

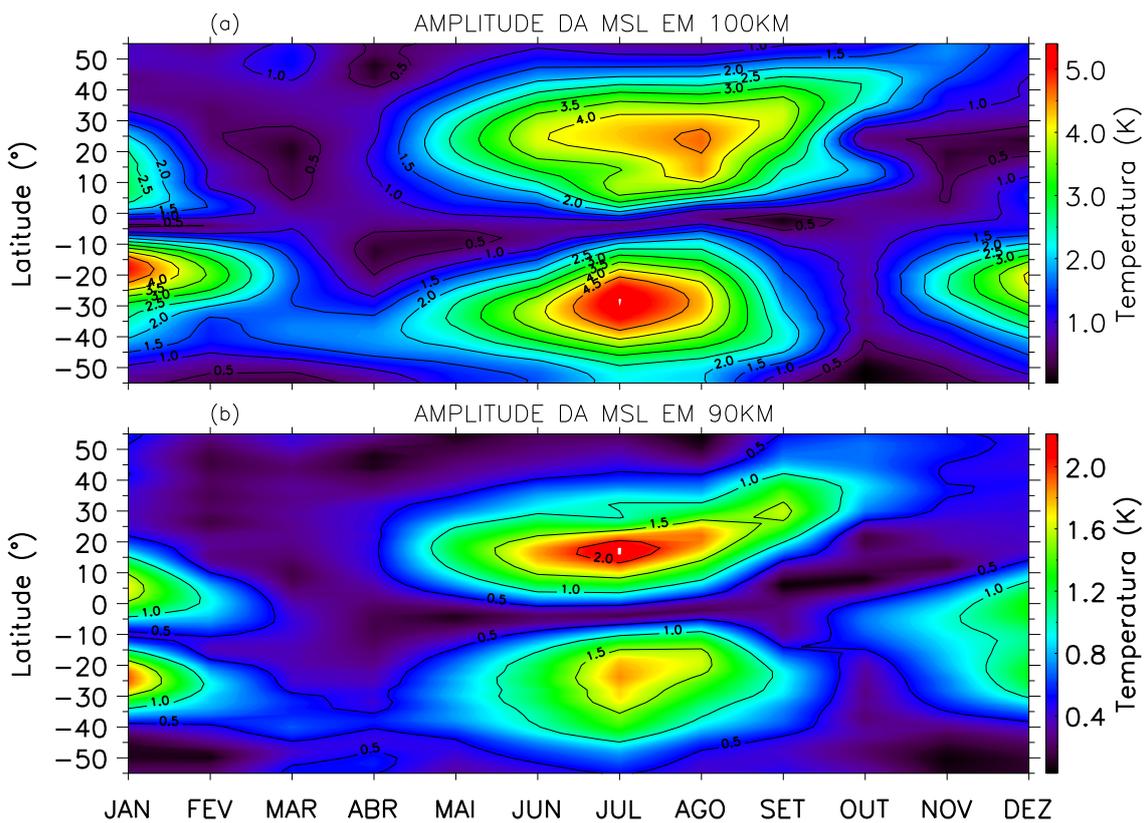


Figura 4.13 - Amplitude da maré semidiurna lunar modelada por Vial e Forbes (1994) em função da latitude e do mês nas altitudes 100 km (a) e 90 km (b)

Sendo a forçante da maré lunar simétrica e o modo de Hough dominante (2,2) também simétrico, um comportamento simétrico desta maré na MLT seria esperado. Entretanto, a [Figura 4.12](#) revela que, para quase todos os meses, há uma assimetria em relação ao equador e esta assimetria apresenta uma clara variação sazonal como foi descrito anteriormente. [Pedatella e Forbes \(2010\)](#) observaram que a maré semidiurna lunar no conteúdo eletrônico total de novembro a fevereiro apresenta também uma significativa assimetria entre os hemisférios.

[Pedatella e Liu \(2012a\)](#) analisaram por meio de modelagem o comportamento sazonal da maré semidiurna lunar na região da MLT no vento e verificaram que, durante os meses de janeiro e julho, a amplitude da maré semidiurna lunar nas componentes zonal e meridional do vento neutro são assimétricas em relação aos hemisférios, com as maiores amplitudes ocorrendo no hemisfério de verão.

[Haurwitz e Cowley \(1970\)](#) também observaram um comportamento assimétrico na maré lunar observada em dados de pressão de superfície utilizando dados de estações distribuídas pelo globo.

Já é bem conhecido que a geração da maré lunar contém contribuições secundárias devida ao movimento vertical dos oceanos. A grande diferença entre a área composta por oceanos entre os hemisférios norte e sul certamente afeta a maré lunar resultante. Entretanto, essa influência desempenha um papel minoritário sobre a maré semidiurna lunar migrante, que é a componente dominante ([PEDATELLA; LIU, 2012a](#)). Sendo assim, apenas a distribuição global dos oceanos não deve ser suficiente para explicar a variação sazonal assimétrica observada. No entanto, a maré lunar é sensível às condições atmosféricas a medida que se propaga verticalmente para cima. Então, o sistema de vento e as estruturas de temperatura podem contribuir com as características obtidas.

A notável variação sazonal-latitudinal da maré lunar observada na temperatura foi explicada por [Forbes e Zhang \(2013\)](#) através da teoria clássica linear de maré, considerando os modos ortogonais de Hough ($\Theta(n, s)(\theta)$) soluções da equação de maré de Laplace, com θ sendo a latitude ou colatitude, n a frequência da maré (neste caso $n = 2$) e s um índice latitudinal. De acordo com [Forbes e Zhang \(2013\)](#) poucos modos de Hough [denotado por (n,s)] foram necessários para obter estruturas semelhantes às estruturas mostradas nas [Figuras 4.9 e 4.12](#). Com o intuito de recuperar as estruturas latitudinais observadas na assinatura da maré semidiurna lunar na temperatura eles incluíram o primeiro e o segundo modo simétrico (2,2) e (2,4), e os primeiros dois modos assimétricos (2,3) e (2,5). Porém, verificaram que estas

estruturas podem ser explicadas em grande parte somando apenas os modos (2,2) e (2,3), tornando mais simples o entendimento da origem das estruturas latitudinais observadas.

Segundo Forbes e Zhang (2013), a assimetria observada se deve ao fato de que o modo (2,3) se maximiza em aproximadamente $\pm 25^\circ$ de latitude, com um hemisfério estando fora de fase em relação ao outro, e nas mesmas latitudes o modo (2,2) é $\sim 70\%$ do seu valor máximo no equador e está em fase entre os hemisférios. Além disso, o máximo quase igual nas amplitudes da maré semidiurna lunar na temperatura do SABER em 108 km e 114 km (painéis (a) e (b) da Figura 4.12) nos meses de dezembro e janeiro e a assimetria entre maio e setembro podem ser obtidos combinando os modos (2,2) e (2,3).

Forbes e Zhang (2013) relatam também que o modo (2,3) é resultado da distorção latitudinal que os ventos médios assimétricos produzem na resposta da maré. No contexto da teoria clássica de maré a distorção é acomodada pela excitação do modo (2,3) como resultado do acoplamento de modos. Uma vez que esse modo é gerado, ele se propaga livremente dentro da termosfera como uma oscilação independente, carregando a assinatura do vento zonal da média atmosfera para altitudes superiores. Durante o mês de julho o modo (2,3) apresenta as maiores magnitudes e o modo (2,2) é reduzido, comportamento consistente com a grande assimetria do vento médio zonal. Isto é refletido na estrutura de dois picos durante junho e setembro, com maiores amplitudes no hemisfério norte, com baixas amplitudes no equador, comportamento que pode ser visto na Figura 4.9.

Em outubro, os ventos médios zonais são pouco assimétricos, com os jatos de vento para leste em ambos os hemisférios. Neste caso o modo (2,2) é dominante e uma assimetria menor é observada na maré lunar total em torno do equinócio, sendo mais evidente em algumas altitudes. De fato, as estruturas mostradas na Figura 4.9 e na Figura 4.12 estão acopladas umas com as outras. Isto é devido a cada modo [(2,2),(2,3),(2,4)] possuir seu comprimento de onda vertical característico, que são da ordem de 100-200 km, 45-70 km e 30-45 km, respectivamente.

A amplitude e a fase relativa dos modos de maré variam com a altitude e agregado a isto, a estrutura vertical da amplitude e fase irá variar com a latitude, ou equivalentemente, a estrutura horizontal irá variar com a altitude. Embora os ventos médios e a temperatura não sejam sazonalmente simétricos em janeiro e julho, muitas das características são compostas por diferentes combinações de modos. Existe também a contribuição devida aos modos de ordem superior (2,4) e (2,5), porém

estes contribuem mais com os detalhes do que como geradores das características observadas.

A variação sazonal assimétrica, com amplitudes elevadas e uma estrutura latitudinal mais simétrica em torno do solstício de dezembro deve ser importante com relação à intensificação da maré lunar na ionosfera neste período, como foi mostrado por Matsushita (1967).

4.3 Variação longitudinal

Nesta seção serão mostradas as estruturas longitudinais na amplitude média mensal da maré semidiurna lunar no campo de temperatura, observadas pelo satélite TIMED/SABER. As figuras que serão exibidas a seguir apresentam a seguinte configuração: no eixo horizontal tem-se as longitudes entre 180° W e 180° E; no eixo vertical, tem-se as latitudes entre 50° S e 50° N. As barras de cores representam a magnitude da amplitude.

Como o principal objetivo desta seção é explorar as variações longitudinais presentes na amplitude da maré, as figuras foram construídas com barras de cores individuais para cada mês, com o intuito de enfatizar as estruturas e não somente comparar as magnitudes. Isto porque a magnitude das amplitudes já foram discutidas nas seções anteriores. Cada painel de cada figura apresenta o comportamento médio mensal da maré lunar obtido através da média vetorial aplicada sobre todo o período estudado, ou seja, um mês específico é composto pela média de todos os meses correspondentes ao período abordado neste estudo.

A Figura 4.14 exibe a amplitude média da maré semidiurna lunar para a altitude de 60 km. Como já foi apresentado nas seções anteriores, a magnitude desta maré nesta altitude é pequena. No entanto, pequenas variações da amplitude com a longitude podem ser observadas nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, principalmente no hemisfério norte. No mês de março, as variações são observadas com mais intensidade entre as latitude de 20° N e 50° N e, no hemisfério sul (40° S - 50° S), entre 60° W e 0° de longitude.

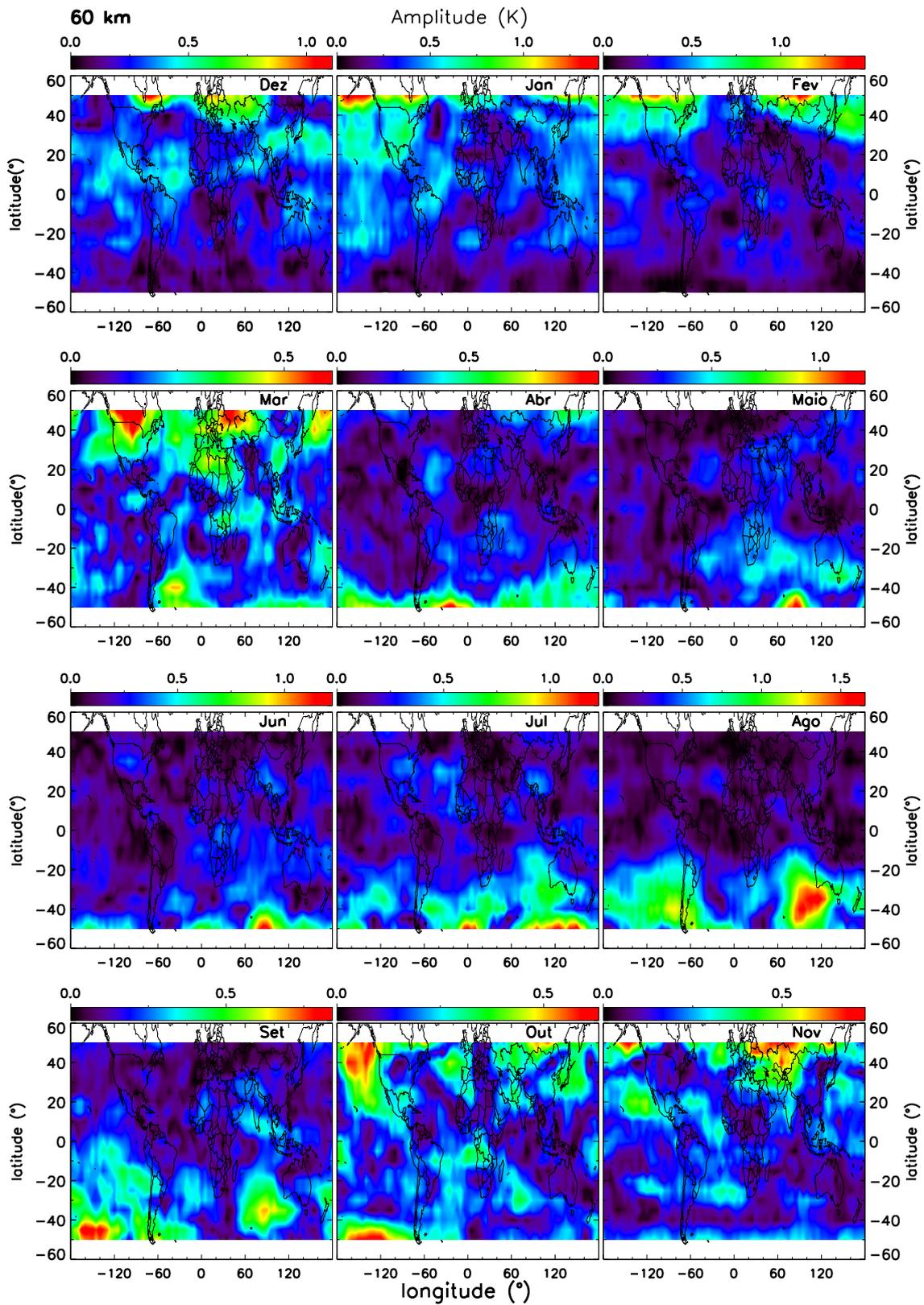


Figura 4.14 - Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 60 km.

Nos meses de abril, maio e junho na [Figura 4.14](#) não são observadas grandes variações longitudinais entre 30° S e 50° N. Nestes meses, são observadas algumas estruturas longitudinais entre 50° S e 30° S. No mês de agosto, variações longitudinais são observadas no intervalo de latitude entre 50° S e 20° S e em setembro de 50° S até o equador. Nos meses de outubro e novembro estruturas mais significativas foram obtidas no hemisfério norte.

Um comportamento interessante que pode ser destacado neste caso é que, a partir de abril, as regiões de amplitudes elevadas foram se movendo em direção ao equador até setembro, e tornam-se mais acentuado no hemisfério norte a partir de outubro. Este comportamento foi observado para praticamente todas as altitudes inferiores a 60 km. Isto constitui uma variação sazonal bem definida da amplitude da maré lunar nos níveis mais baixos. Esta variação sazonal é antissimétrica ao movimento aparente do Sol. Estudos anteriores ([HAURWITZ; COWLEY, 1970](#)) mostraram uma variação sazonal global da amplitude da maré lunar para médias latitudes que exibem um comportamento oposto ao que foi observado pelo SABER, porém, no trabalho de [Haurwitz e Cowley \(1970\)](#), eles utilizaram dados barométricos de pressão medidos na superfície.

No intervalo de altitude entre 60 km e 72 km não foram verificadas mudanças expressivas em relação ao padrão observado em 60 km. A partir de 72 km é que se observam mudanças mais significativas. Sendo assim, a [Figura 4.15](#) mostra a variação da maré semidiurna lunar com a longitude em 72 km. Nesta altitude, em dezembro, é possível observar uma estrutura mais acentuada centrada no equador se estendendo de 20° S a 20° N em latitude e de $\sim 15^\circ$ W a 120° E em longitude e algumas variações que ocorrem em $\sim 50^\circ$ N de latitude.

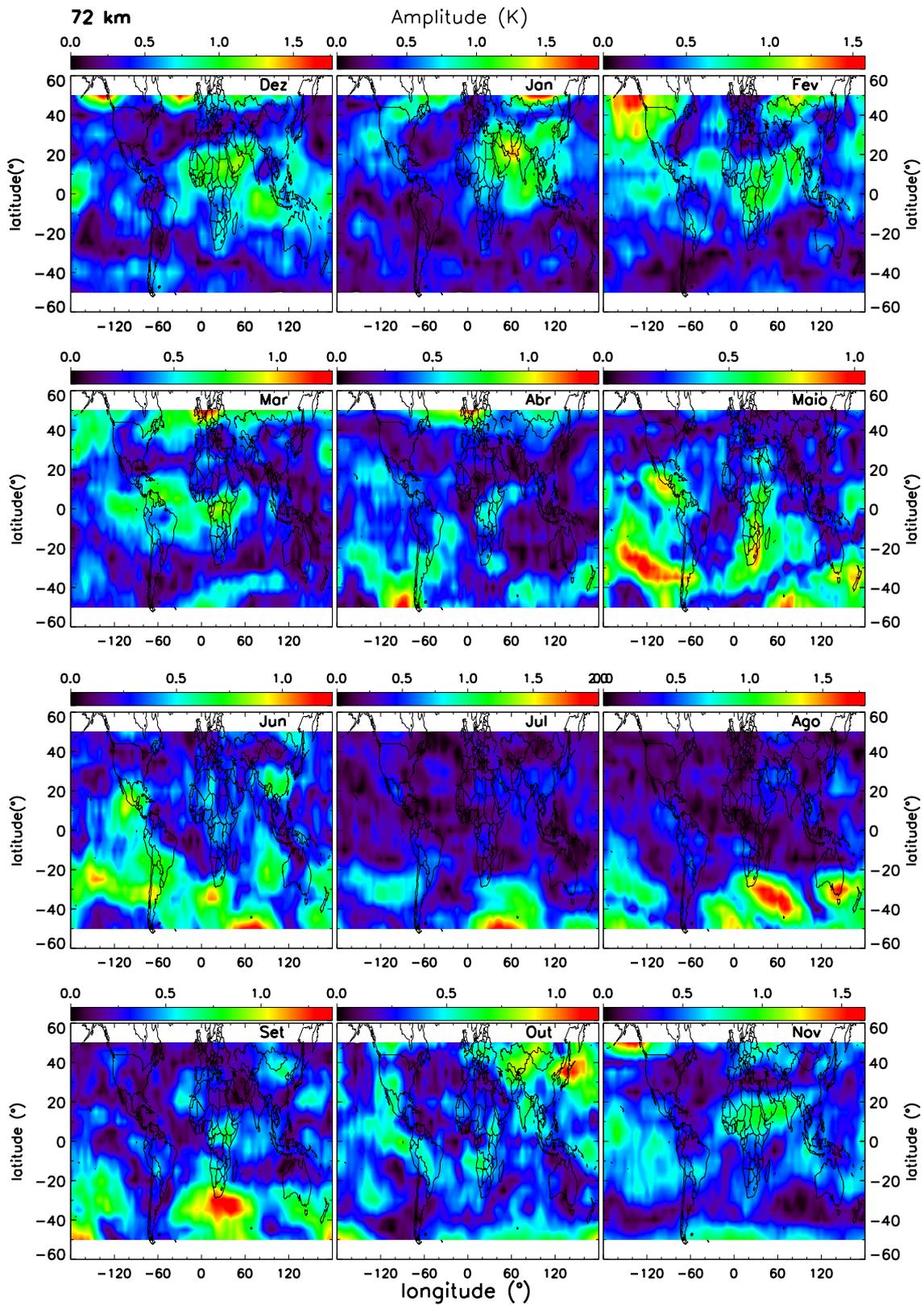


Figura 4.15 - Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 72 km.

Em janeiro (Figura 4.15), uma estrutura mais acentuada encontra-se localizada nas longitudes entre 0° e 120° E e em $\sim 20^\circ$ N de latitude. Nos meses de fevereiro e março, regiões de amplitudes mais significativas são observadas entre 10° S e 50° N. No entanto, em maio, junho, julho, agosto e setembro foram obtidas estruturas de amplitudes mais pronunciadas no hemisfério sul, sendo que nos meses de julho e agosto estas variações se estendem apenas até $\sim 20^\circ$ S. Em outubro e novembro verificam-se variações longitudinais em ambos os hemisférios, porém com maior intensidade no hemisfério norte.

Após verificar as principais características das variações longitudinais nas altitudes inferiores a 72 km serão explorados os comportamentos destas estruturas na região da MLT. A primeira altitude selecionada foi 81 km, cujas características podem ser analisadas na Figura 4.16. O primeiro ponto que pode ser verificado nesta figura é que, de uma maneira geral, as variações longitudinais apresentam padrões diferentes dos mostradas anteriormente (Figura 4.14 e Figura 4.15), principalmente no que se refere à sazonalidade destas estruturas.

No mês de dezembro, na altitude de 81 km (Figura 4.16), verifica-se, principalmente, uma faixa de grandes amplitudes localizada no equador, que se estende até $\sim \pm 120^\circ$ de longitude. Para longitudes maiores que 120° E, a região de maiores amplitudes se desloca em direção ao hemisfério sul. Em janeiro uma estrutura mais significativa centrada em 10° N de latitude, se estendendo em longitude desde 180° W até 120° E, pode ser observada. Já em fevereiro as variações da amplitude em relação à longitude estão concentradas no hemisfério norte, porém sem uma localização mais precisa como no caso de dezembro e janeiro.

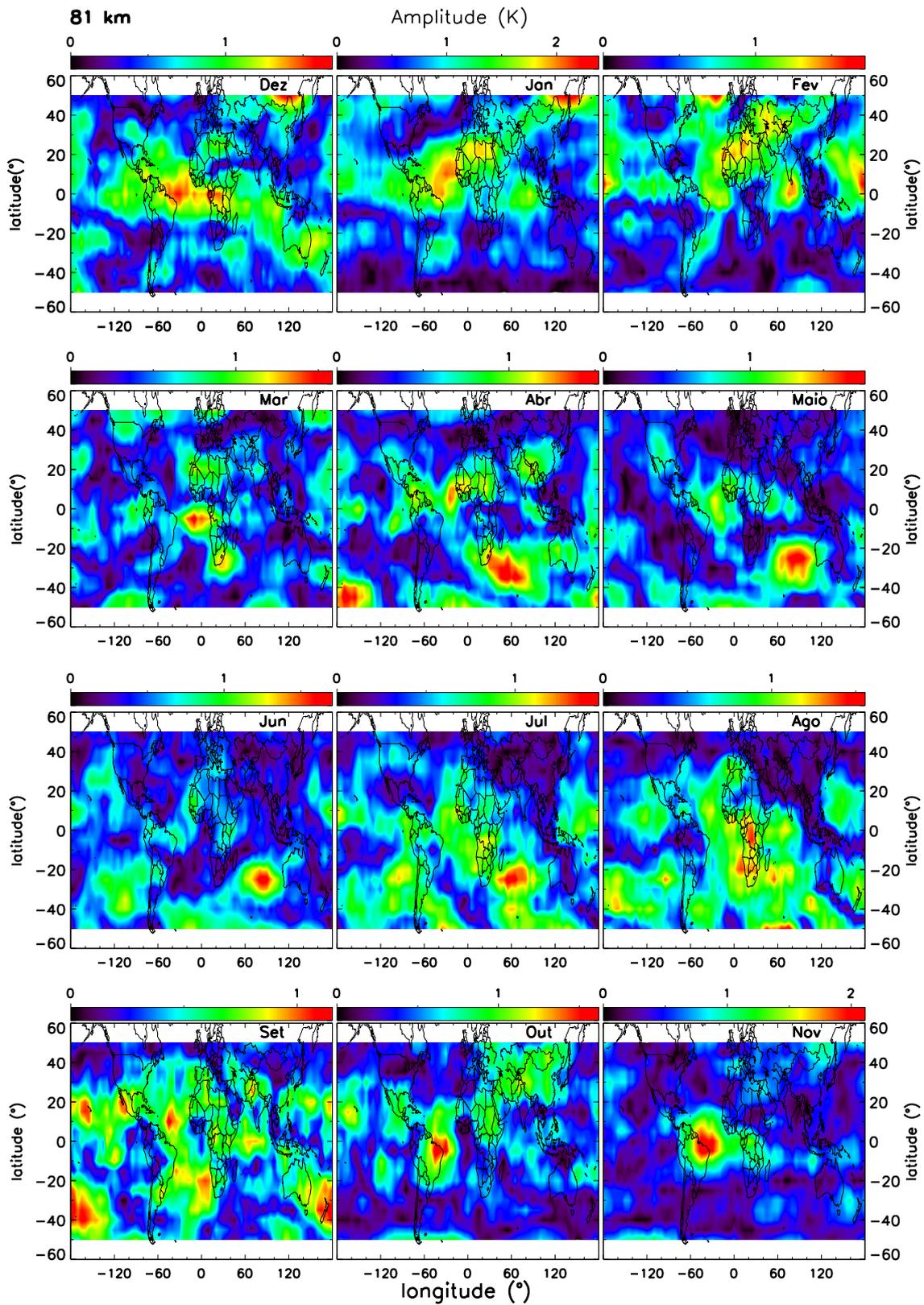


Figura 4.16 - Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 81 km.

As variações da amplitude da maré lunar com a longitude para os meses de março, abril, maio, junho, julho e agosto (ver [Figura 4.16](#)) foram observadas em ambos os hemisférios, porém mais acentuadas no hemisfério sul. Em setembro pode-se destacar ~ 5 picos de amplitude em relação à longitude na faixa de latitude entre 10° N e 20° N, embora os localizados entre -180° e 0° apresentem valores um pouco maiores.

Em outubro, no equador, observa-se um pico localizado nas longitudes entre 60° W e 0° . Além disso, na latitude de 10° N entre as longitudes de 180° W e 40° E, 4 picos foram obtidos. Em 40° N de latitude uma estrutura localizada entre 20° E e 120° E de longitude também pode ser destacada. Por fim, novembro apresenta um pico bem localizado no equador entre 60° W e 60° E de longitude.

A próxima altitude em que serão mostradas as variações da amplitude com a longitude é 90 km ([Figura 4.17](#)). As variações longitudinais na amplitude da maré lunar obtidas para esta altitude apresentam um comportamento diferente das variações observadas em 81 km (ver [Figura 4.16](#)). Tomando a faixa de latitude de $\sim 10^\circ$ N ou de $\sim 20^\circ$ N para o mês de dezembro é possível observar a presença de ~ 4 estruturas, com a seguinte localização em longitude: (180° W - 120° W), (60° W - 10° W), (0° - 60° E) e (100° E - 160° E). Este padrão não é observado no hemisfério sul, neste mês.

No mês de janeiro ([Figura 4.17](#)) verifica-se a presença de 3 ou 4 estruturas também no hemisfério norte. Este padrão também pode ser observado em junho só que no hemisfério sul e, possivelmente, em agosto no hemisfério norte. Março e abril apresentam variações em relação à longitude mais centradas no equador. Nos meses de setembro, outubro e novembro as variações longitudinais da amplitude da maré lunar são mais pronunciadas no hemisfério norte.

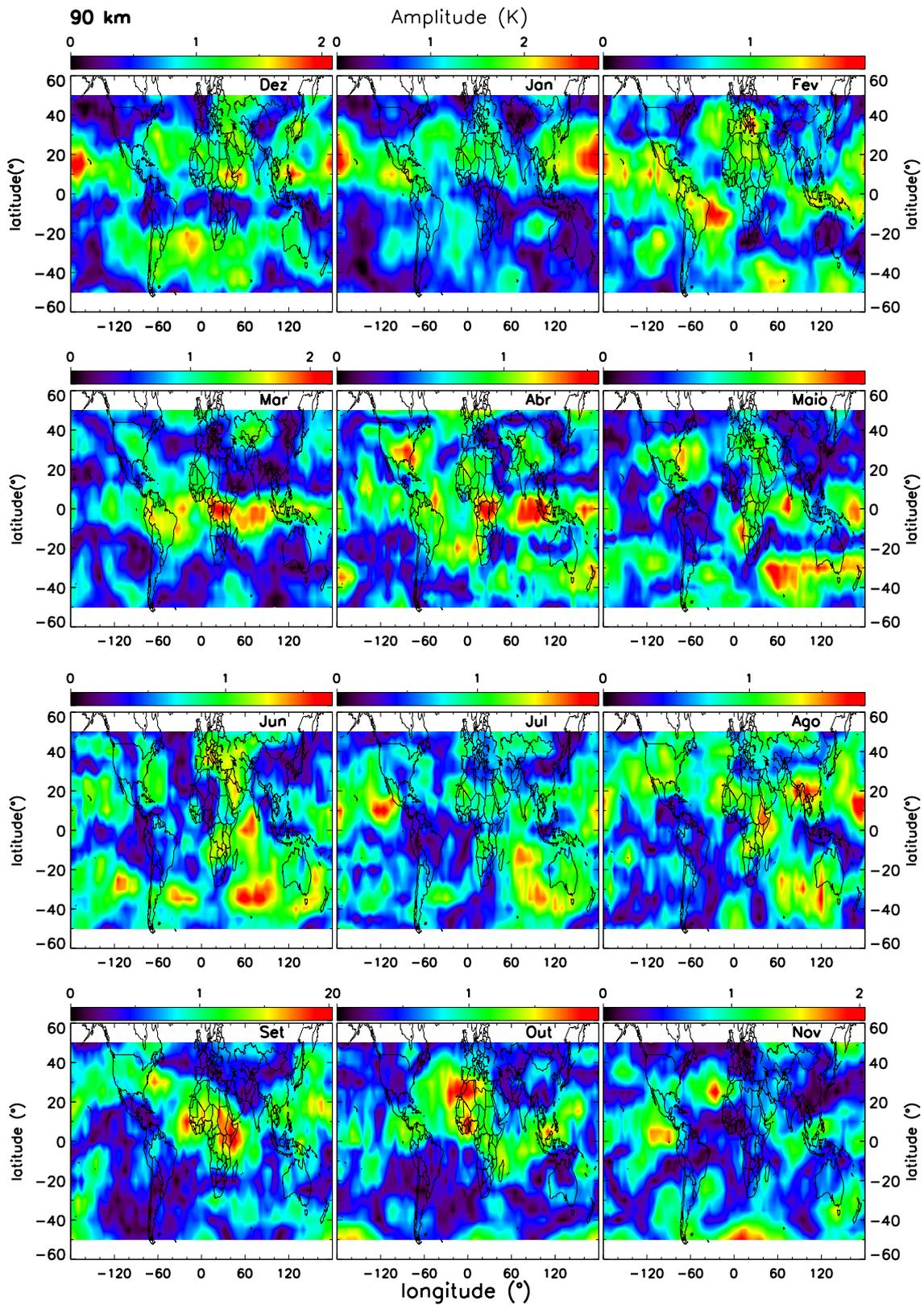


Figura 4.17 - Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 90 km.

A [Figura 4.18](#) mostra a variação da amplitude da maré semidiurna lunar com a longitude para 93 km. Pode-se verificar a estrutura de 4 picos em dezembro (hemisfério norte) e junho (hemisfério sul) similar às observadas em 90 km. Em dezembro, no hemisfério sul, observa-se ainda 3 picos de amplitude em relação à longitude.

No mês de janeiro ([Figura 4.18](#)) observa-se uma possível estrutura de 3 picos. Março e abril apresentam um comportamento semelhante ao observado em 90 km só que bem mais centrado no equador. Setembro, outubro e novembro também mostram, de uma forma geral, padrões bem semelhantes aos obtidos em 90 km para estes meses.

Nas altitudes de 96 km, 99 km e 102 km as estruturas de 3 e 4 picos observado em 90 km e 93 km estão presentes, entretanto não são tão evidentes. Estas estruturas retornam a dominar em 105 km como pode ser visto na [Figura 4.19](#). Em 105 km de altitude, verifica-se a presença da estrutura de 4 picos dominante no hemisfério sul em dezembro, já no hemisfério norte para dezembro e janeiro observa-se estruturas de 3 ou 4 picos.

Entretanto, nesta altitude ([Figura 4.18](#)) as estruturas observadas em 90 km e 93 km em junho já não são observadas. Contudo, estruturas bem definidas de ~ 4 picos iniciam a dominar em agosto e setembro. Em novembro também são observadas estruturas de 3 picos no hemisfério norte e entre 4 e 5 picos no hemisfério sul.

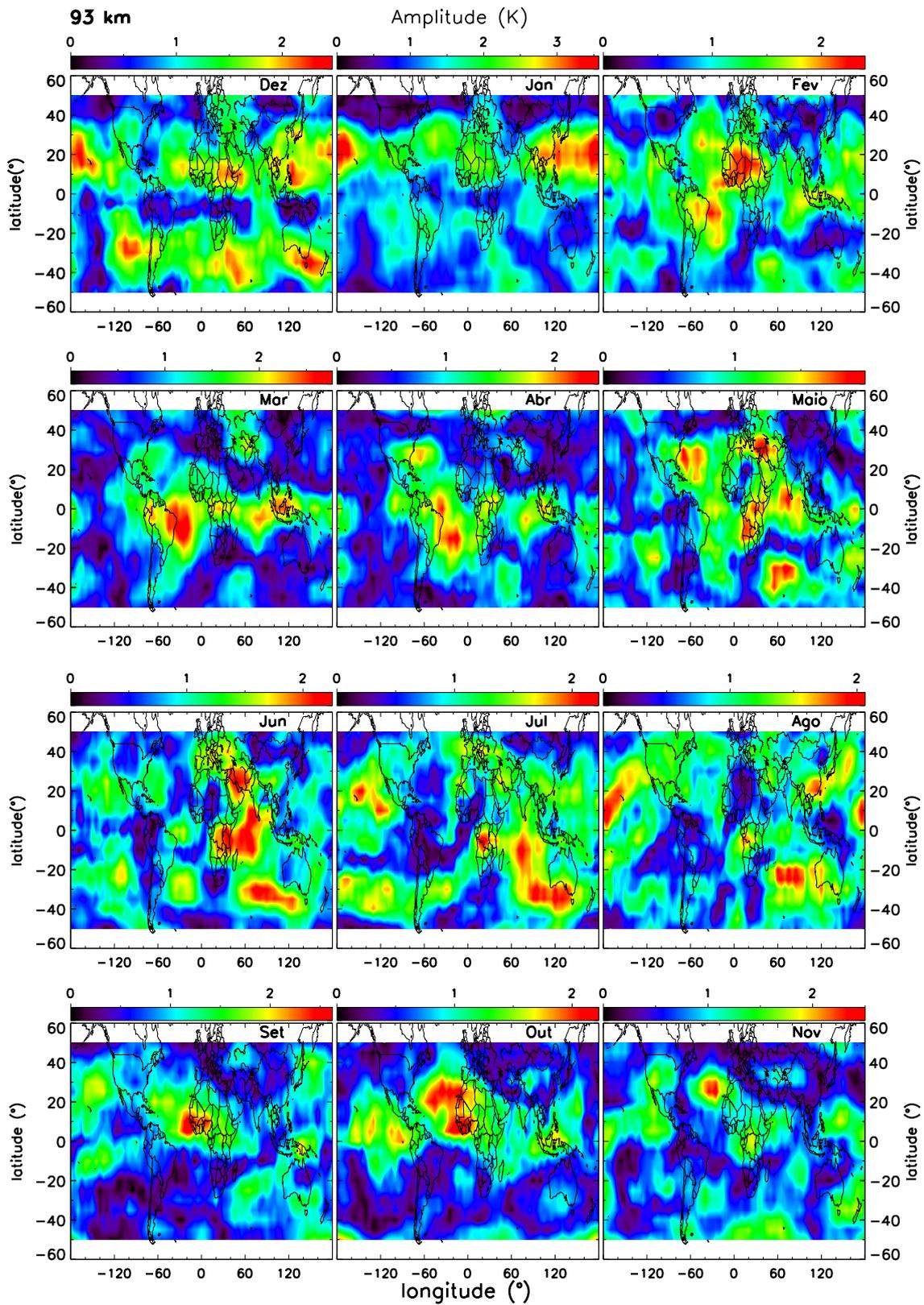


Figura 4.18 - Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 93 km.

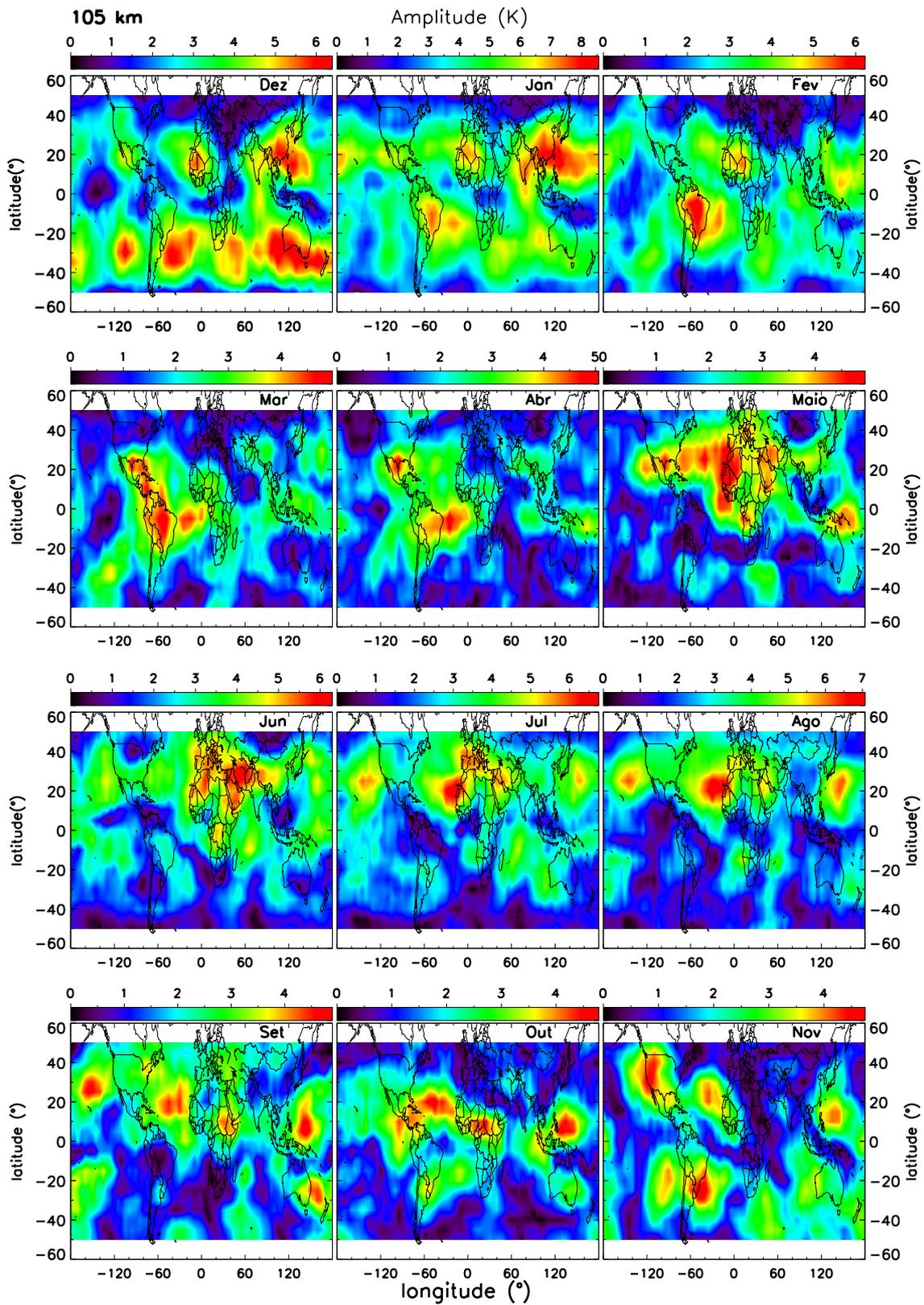


Figura 4.19 - Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 105 km.

Em 108 km (Figura 4.20) as estruturas de 4 picos são evidentes em dezembro em ambos os hemisférios, enquanto que, em janeiro, agosto e setembro são mais evidentes no hemisfério norte. Em novembro, existe uma estrutura de 4 picos no hemisfério sul e de 3 picos no hemisfério norte. Na altitude superior (111 km - Figura 4.21) estas estruturas permanecem no hemisfério norte para dezembro, janeiro, agosto e setembro. Porém, em novembro não são mais observadas. De uma maneira geral, as estruturas observadas na amplitude da maré lunar na altitude de 108 km não diferem muito das que se observa em 111 km de altitude.

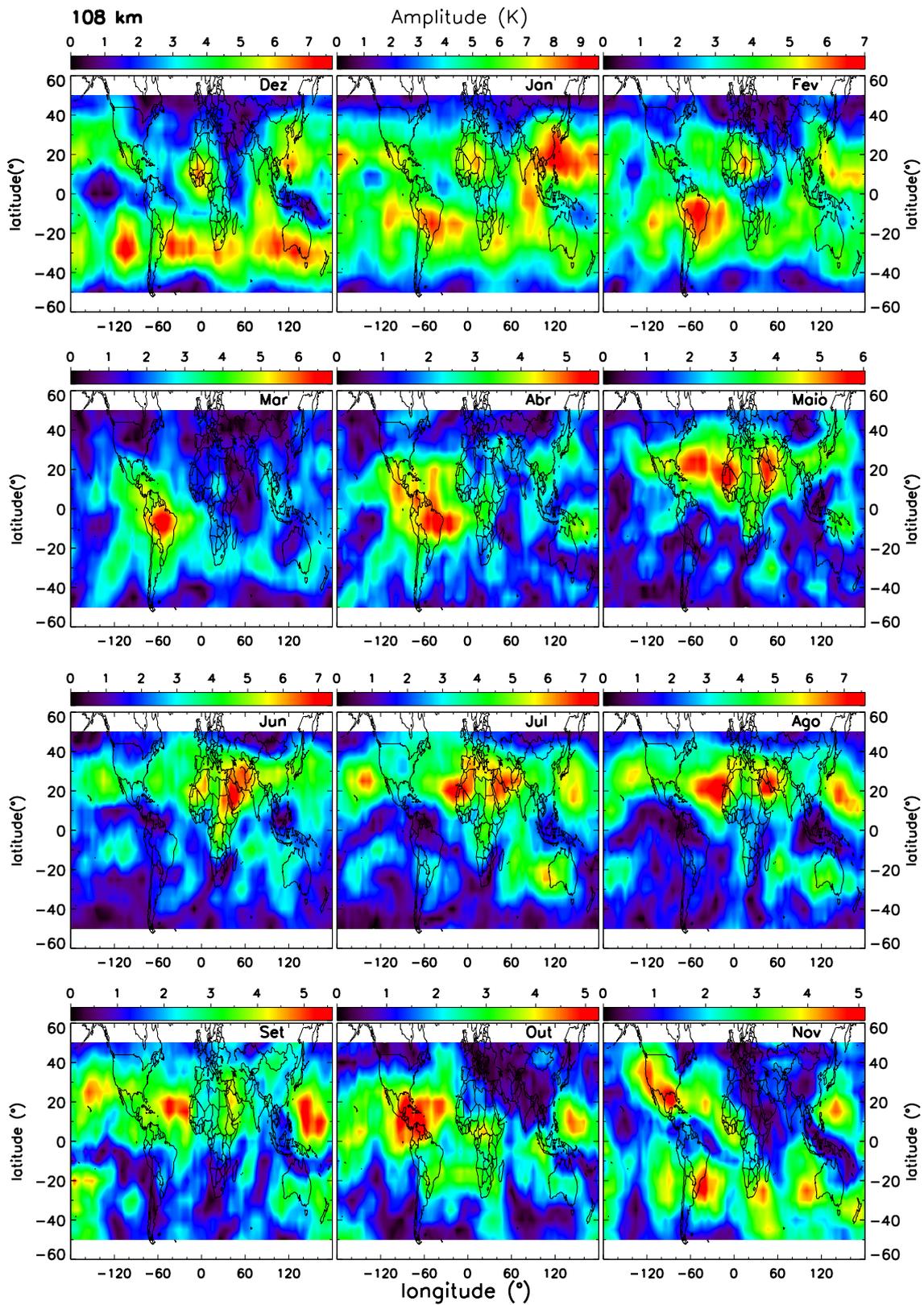


Figura 4.20 - Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 108 km.

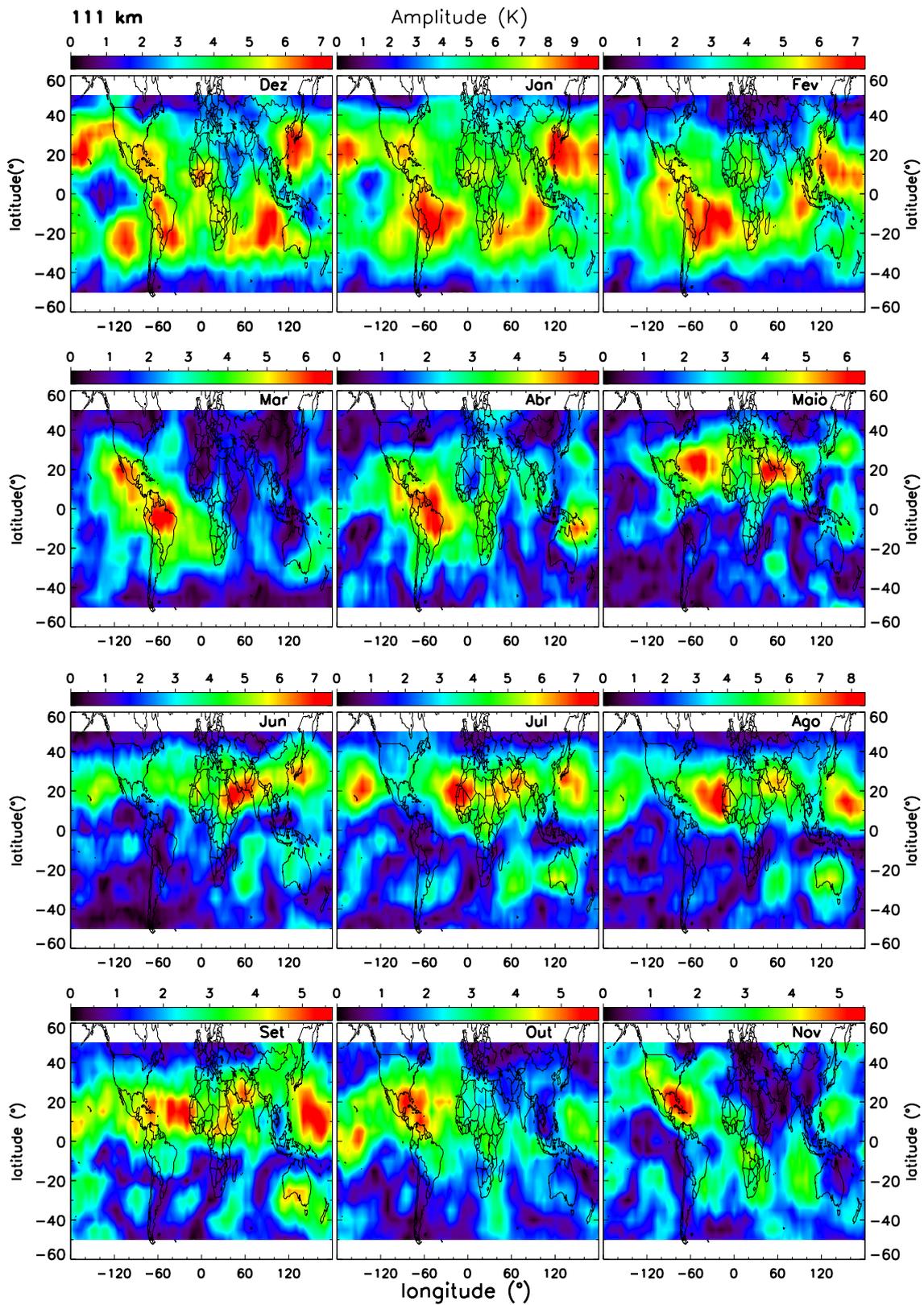


Figura 4.21 - Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 111 km.

Na altitude de 114 km (Figura 4.22) é possível identificar estruturas de ~ 3 picos em dezembro (ambos os hemisférios), janeiro (mais evidente no hemisfério sul) e novembro (hemisfério sul). Já em agosto (hemisfério sul) parece que a estrutura de 3 picos domina, no entanto, ainda é possível identificar a estrutura de 4 picos. Em setembro observa-se a assinatura das estruturas de 3 e 4 picos no hemisfério norte.

Em 120 km de altitude (figura não mostrada aqui), as estruturas de 3 e 4 picos já não são mais observadas. Isto implica que a presença destes 3 e 4 picos longitudinais na amplitude da maré semidiurna lunar é uma característica da região da mesosfera e baixa termosfera. Além disso, estes padrões de amplitude são observados com mais frequência, nestas altitudes, nos meses de setembro e dezembro.

Sendo a forçante da maré lunar puramente gravitacional, sua resposta na atmosfera deveria ser geograficamente uniforme, no entanto, isso não foi observado pois as figuras exibidas acima mostram claramente estruturas longitudinais para diferentes altitudes e meses. Além disso, se a principal forçante da maré lunar gerar apenas modos migrantes, estruturas longitudinais não seriam esperadas, pois estes modos são invariantes com a longitude. Porém, Vial e Forbes (1994) verificaram que, ao inserir na forçante da maré lunar a contribuição da maré dos oceanos e da terra sólida, estruturas longitudinais foram obtidas.

Embora a teoria clássica de maré sugira que a maré lunar seja distribuída de forma regular sobre o planeta, alguns trabalhos realizados há algumas décadas atrás utilizando dados de pressão de superfície medidos através de barômetro, com estações localizadas ao longo do globo, principalmente no hemisfério norte, mostraram o comportamento global desta maré e verificaram que, neste campo atmosférico, apresenta variações longitudinais (CHAPMAN; WESTFOLD, 1956; HAURWITZ; COWLEY, 1970).

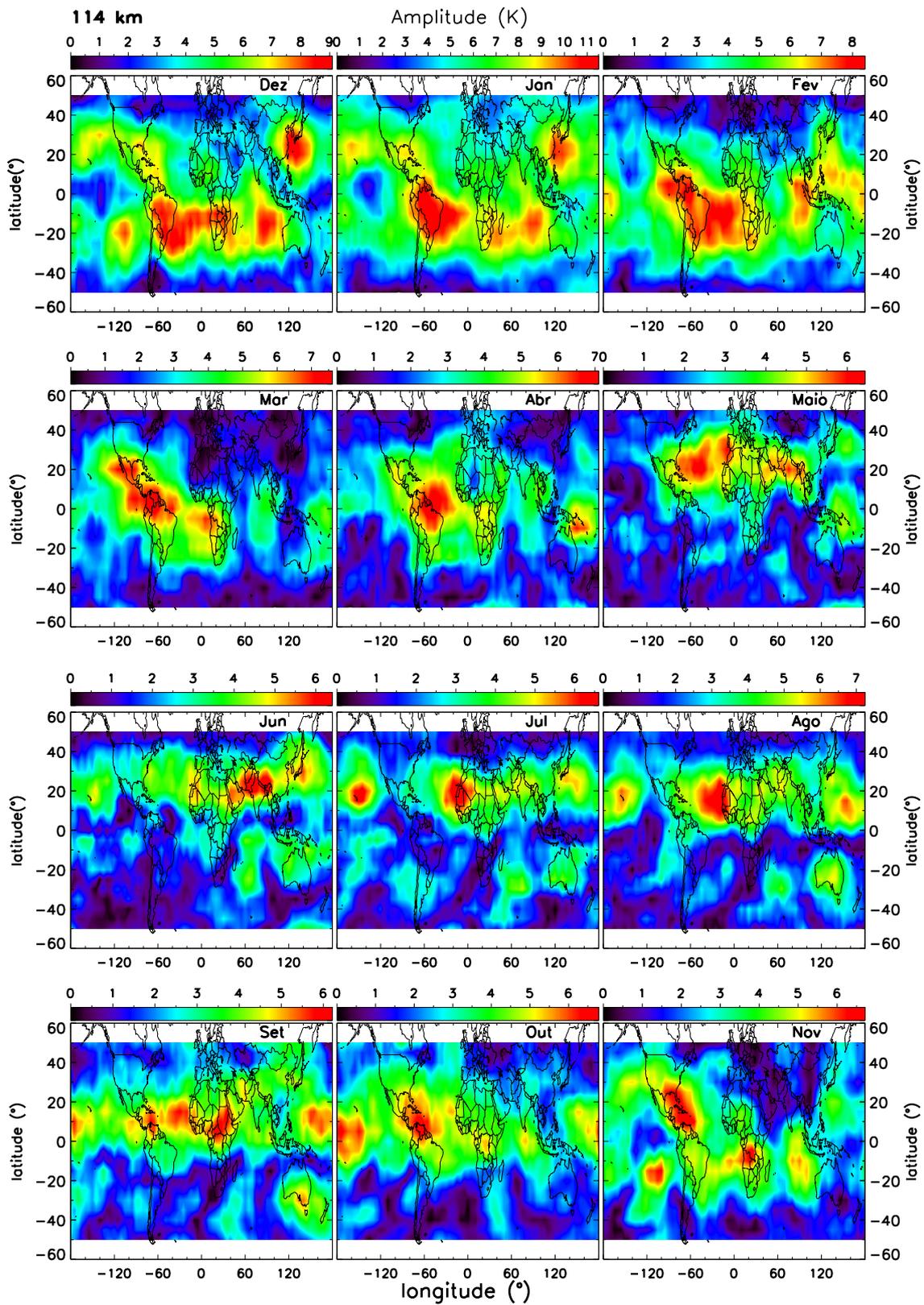


Figura 4.22 - Variação da amplitude média mensal da maré semidiurna lunar na temperatura com a longitude, latitude e meses do ano para a altitude de 114 km.

Pedatella e Forbes (2010) também observaram variações longitudinais na maré lunar em medidas do conteúdo eletrônico total. Pedatella e Liu (2012a) verificaram variações longitudinais na maré semidiurna lunar na pressão da superfície utilizando modelo numérico, além disso, encontraram que estas estruturas foram mais pronunciadas em baixas latitudes.

Hollingsworth (1971) investigou os efeitos das marés do oceano e da terra sobre a maré semidiurna lunar atmosférica modelando através da teoria clássica, o efeito combinado do potencial lunar, da maré da terra e da maré do oceano sobre uma atmosfera realística e verificou que, quando incluiu no modelo apenas o potencial lunar e a maré da terra sólida, a resposta foi uniforme em longitude. Enquanto, quando ele adicionou a forçante devida à maré oceânica, o padrão uniforme em longitude foi distorcido, levando a conclusão que a maré lunar é influenciada tanto pela maré do oceano quanto pela terra sólida.

Sawada (1965) testou, teoricamente, o acoplamento das marés do oceano e da atmosfera e concluiu que os efeitos dos oceanos se estendem sobre toda a atmosfera e que o efeito da maré oceânica sobre a maré lunar depende da profundidade do oceano. Ele sugeriu ainda que as variações longitudinais observadas na distribuição global da maré lunar na pressão de superfície pode ser gerada, em parte, devido aos efeitos da maré oceânica.

Com o intuito de investigar o papel das componentes não migrantes nas estruturas longitudinais da maré semidiurna lunar mostradas nesta seção, foi aplicado o ajuste de mínimos quadrados bidimensional para obter as componentes migrante e não migrantes. Para exemplificar detalhadamente a reconstrução, foi escolhido o mês dezembro para a altitude de 108 km, que apresenta estruturas longitudinais mais definidas.

Nas figuras que serão mostradas a seguir tem-se as amplitudes calculadas para a maré semidiurna lunar utilizando a metodologia que não faz distinção entre componentes migrantes e não migrantes no painel (a). No painel (b) é mostrada a reconstrução da amplitude através da soma das componentes da maré (migrante e não migrantes). As variações com a latitude das componentes utilizadas na reconstrução são exibidas no painel (c) destas figuras. A barra de cor representa a magnitude da amplitude e a barra de erro, o desvio padrão, como já foi mencionado anteriormente.

A partir daqui será utilizada a seguinte notação: SWs e SEs que correspondem a maré semidiurna propagante para oeste ou para leste, respectivamente. Nesta notação, o índice ‘s’ representa o número de onda zonal. Por exemplo, SW2 significa maré semidiurna com número de onda zonal 2 propagante para oeste, ou seja, trata-se da componente migrante.

Para identificar quais estruturas aparecem com a variação da longitude com o número de onda zonal em tempo lunar local pode-se utilizar os parâmetros n (frequência da onda) e s (número de onda zonal) na expressão $|s - n|$. Por exemplo, uma onda semidiurna ($n = 2$) com número de onda zonal 1 propagante para leste, ou seja, $s = -1$ resultará em $|-1 - 2| = 3$ que corresponde a uma assinatura de 3 picos em longitude. Portanto as componentes SE1 e SW5 produzem três estruturas longitudinais na amplitude da maré semidiurna.

Como previsto pela teoria de maré, a maré migrante é a componente dominante. Desta maneira, a [Figura 4.23](#) apresenta a reconstrução da amplitude para o mês de dezembro utilizando apenas a componente com número de onda zonal igual a 2 e propagante para oeste (SW2), ou seja, a componente migrante da maré semidiurna lunar. Através da [Equação 3.13](#) mostrada na [Seção 3.5](#), pode-se verificar que a dependência em tempo local dos campos atmosféricos associados às marés migrantes é independente da longitude, pois, neste caso $s = n$.

No painel (b) da [Figura 4.23](#) verifica-se que a reconstrução da amplitude utilizando apenas a componente migrante não apresenta variação em longitude, apenas mostra onde acontecem os máximos, em latitude. No painel (c) é possível observar mais detalhadamente a variação desta componente com a latitude e verificar que apresenta um comportamento assimétrico, em relação ao equador, sendo maior no hemisfério sul. Esta característica assimétrica foi discutida na [Seção 4.2](#).

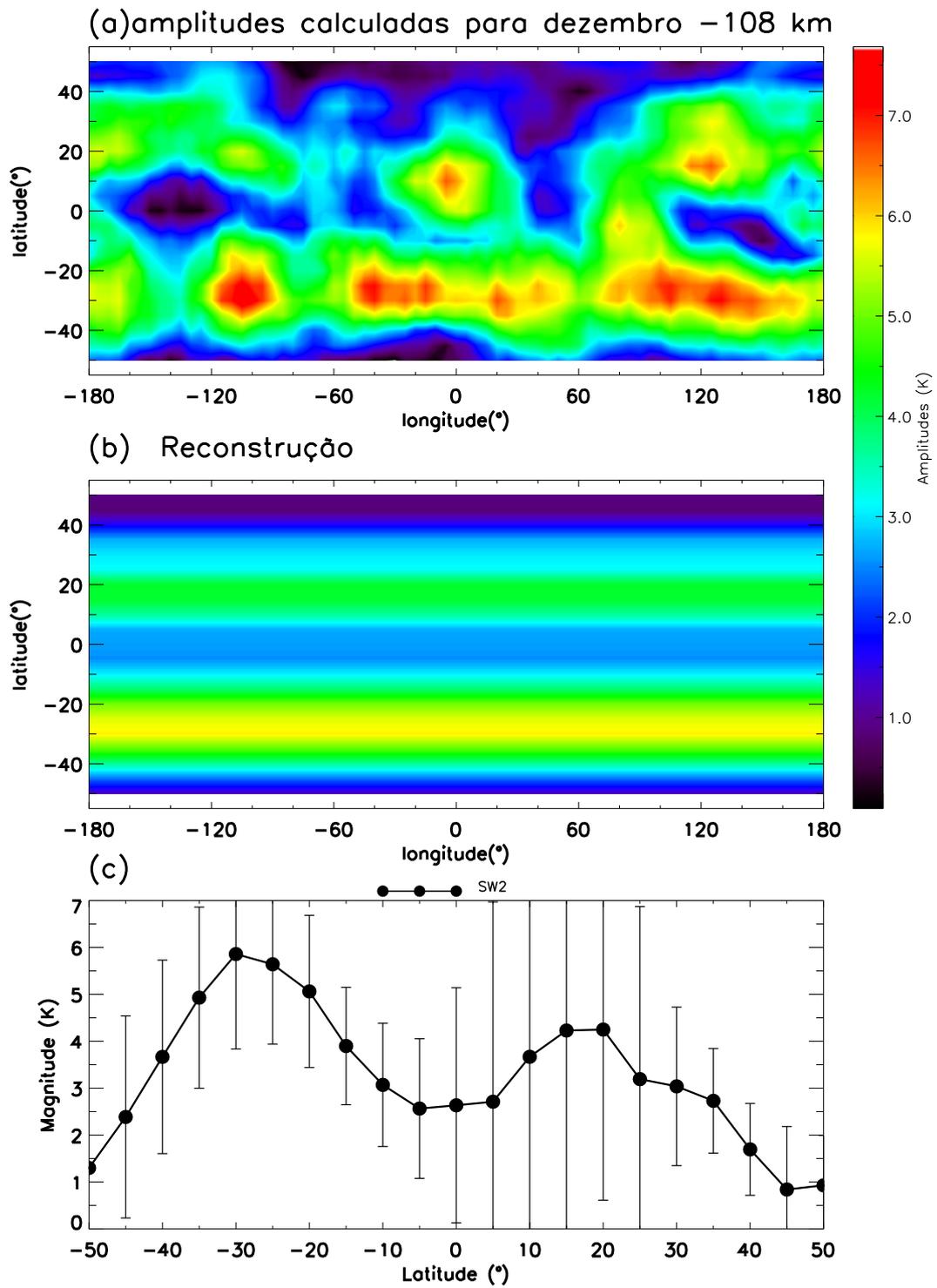


Figura 4.23 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para dezembro na altitude de 108 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando apenas a componente migrante. (c) - Distribuição latitudinal da maré migrante.

A [Figura 4.24](#) foi construída através da sobreposição das componentes de maré SW2, SW5, SW6, SE1 e SE2 (painéis (b) e (c)). Verifica-se que a inclusão destas componentes é suficiente para reproduzir as principais estruturas observadas na amplitude. Como já foi mencionado, os parâmetros s e n podem ser utilizados para estimar o número de estruturas em longitude. Neste caso, as componentes SW6 e SE2 produzem ondas de 4 estruturas em tempo local. As combinações de SW6 e SE2, podem ou não produzir 4 estruturas longitudinais, dependendo da fase. SW5 e SE1, por sua vez, geram 3 estruturas.

No painel (c) da [Figura 4.24](#) pode-se analisar o comportamento de cada componente de maré em relação à latitude. Como previsto pela teoria clássica de maré, a componente migrante é dominante. As amplitudes das componentes não migrantes variam aproximadamente entre 0 e 1,5 K. Este valores são médias vetoriais para o período analisado, sendo assim, podem ser resultados do cancelamento de fase que ocorre devido à variabilidade ano a ano da maré lunar.

Nesta análise, pode-se perceber que, apesar das amplitudes das componentes não migrantes apresentarem valores pequenos, elas são necessárias para reconstruir as variações longitudinais. Além disso, [Zhang et al. \(2006\)](#) para a maré solar verificaram numericamente que, embora a componente migrante apresente valores maiores que as componentes não migrantes, pequenos valores de componentes não migrantes são suficientes para gerar significantes variações longitudinais.

Na [Figura 4.25](#) mostra-se a reconstrução da amplitude quando adicionamos as componentes de maré SW3 e S0, além daquelas já utilizadas para gerar a [Figura 4.24](#). Como pode ser visto na figura, estas componentes apenas contribuem com detalhes nas estruturas.

Para analisar o papel da componente migrante de uma outra perspectiva, aplicamos a reconstrução utilizando apenas as componentes não migrantes já utilizadas na [Figura 4.25](#). Com esta análise podemos perceber que, muito embora a componente migrante seja invariante em longitude ela é fundamental na recuperação dos padrões de onda em longitude, como pode ser visto no painel (b) da [Figura 4.26](#). Portanto pode-se afirmar que a componente migrante é responsável por praticamente toda a força da maré semidiurna lunar, enquanto que as componentes não migrantes respondem pelas formas horizontais na amplitude.

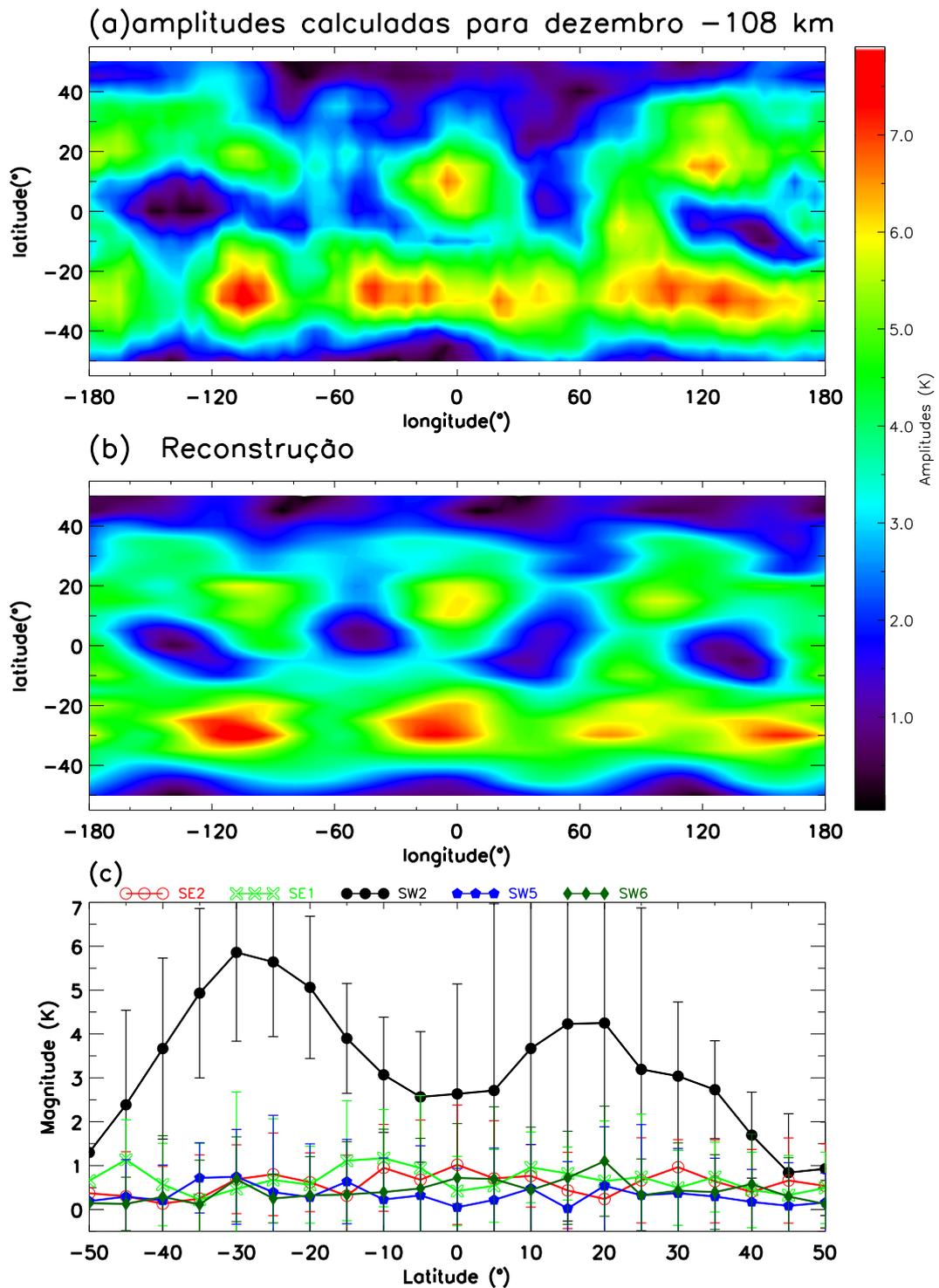


Figura 4.24 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para dezembro na altitude de 108 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SW2, SW5, SW6, SE1 e SE2. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

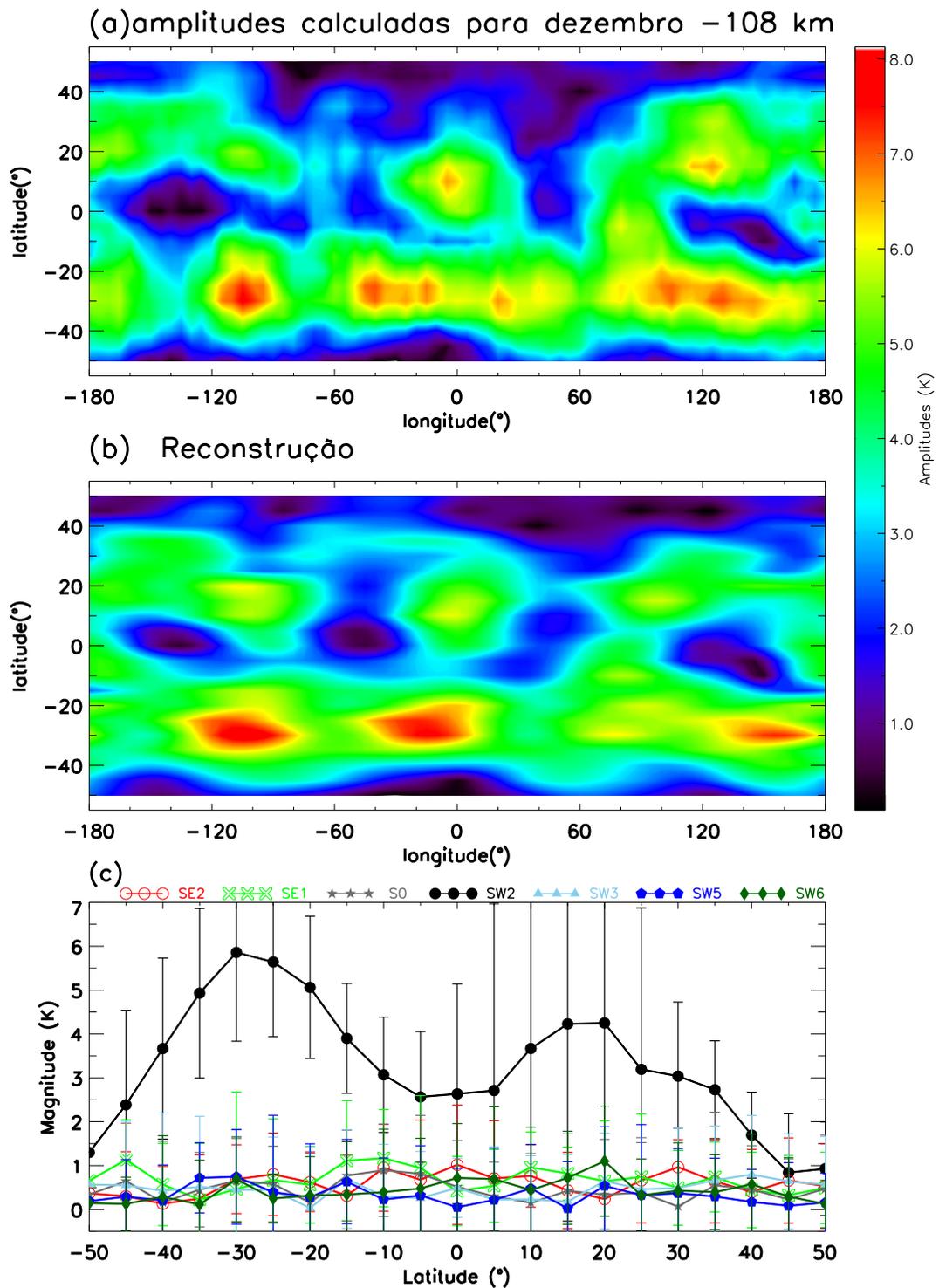


Figura 4.25 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para dezembro na altitude de 108 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SW2, SW3, SW5, SW6, S0, SE1 e SE2. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

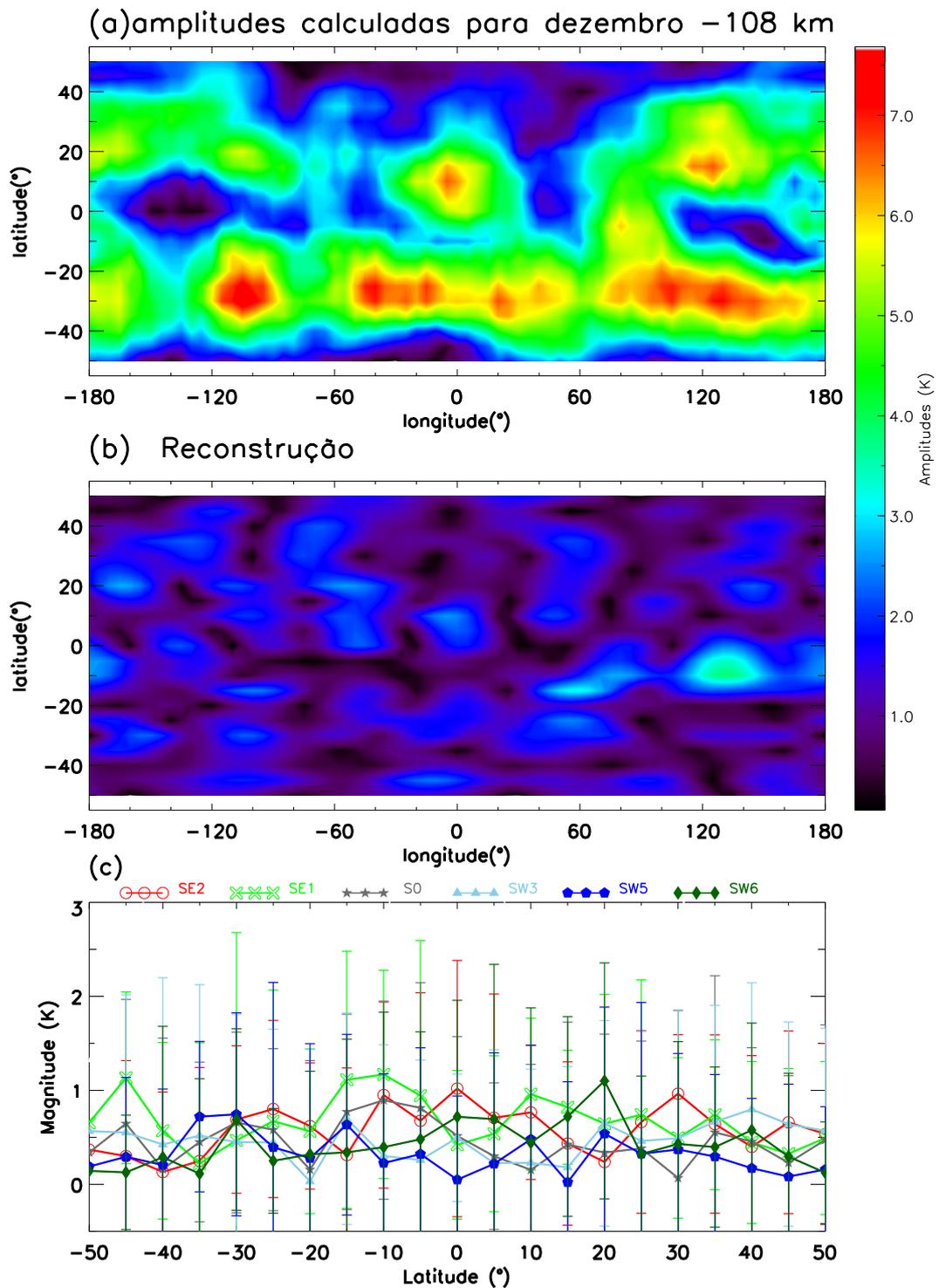


Figura 4.26 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para dezembro na altitude de 108 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SW3, SW5, SW6, S0, SE1 e SE2. (c) - Distribuição latitudinal das componentes não migrantes.

Para analisar detalhadamente as estruturas longitudinais observadas na maré lunar na temperatura, foram escolhidos alguns meses e altitudes que apresentassem padrões diferentes entre si, para aplicar a decomposição de componentes de maré. A [Figura 4.27](#) mostra a amplitude média mensal para janeiro, na altitude de 72 km [painel (a)], sua reconstrução [painel (b)] e as componentes de maré utilizadas na reconstrução [painel (c)].

A amplitude neste mês e altitude ([Figura 4.27](#)) apresenta uma estrutura mais forte localizada entre as longitudes de 20° - 130° E que se estende de 0° a 30° N de latitude. Em 30° N de latitude, um segundo pico é observado entre 130° - 120° W. Duas estruturas de amplitudes maiores são observadas entre as longitudes 110° - 20° E e 60 - 140° W, nas latitudes entre 40° N e 50° N.

No painel (b) da [Figura 4.27](#), pode-se verificar que, com a sobreposição das componentes de maré SW1, SW2, SW3, SW4, SW5, S0, SE1 e SE2, é possível obter uma boa reconstrução das estruturas longitudinais mais evidentes e dos principais detalhes. Além disso, no painel (c) podemos verificar que a componente migrante apresenta um comportamento assimétrico, com valores mais elevados no hemisfério norte. No hemisfério sul, as componentes migrante e não migrante apresentam amplitudes praticamente da mesma magnitude.

Nota-se ainda na [Figura 4.27](#) que, na faixa de latitude entre 0° e 20° N, SW1 é a componente não migrante dominante e esta componente gera uma onda com uma estrutura. Entre as latitudes de 25° e 35° , S0 torna-se aproximadamente da mesma ordem de magnitude de SW1, esta componente produz ondas com 2 assinaturas em longitude, as quais podem ser observadas no painel (a) da [Figura 4.27](#). Já em 50° N, onde existe a presença de uma onda com 2 estruturas mais forte ([Figura 4.27](#) - painel (a)) tem-se a dominância das componentes não migrantes SW1, SW3, SW4 e SW5.

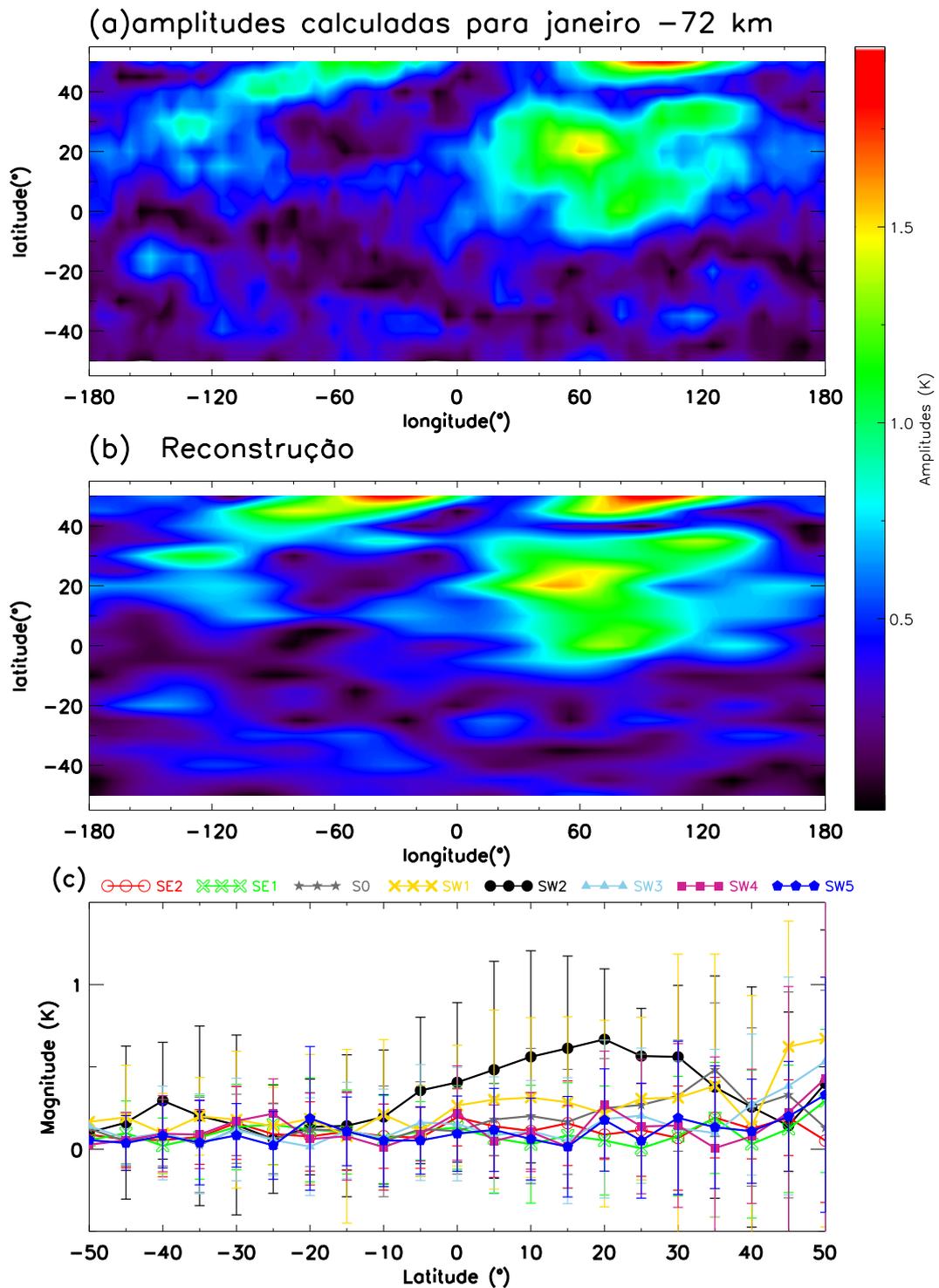


Figura 4.27 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para janeiro na altitude de 72 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4 e SW5. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

A [Figura 4.28](#) mostra a amplitude média mensal para setembro, na altitude de 72 km [painel (a)], sua reconstrução [painel (b)] e as componentes de maré utilizadas na reconstrução [painel (c)]. Na [Figura 4.28](#) é possível ver uma configuração distinta do padrão mostrado na [Figura 4.27](#). Neste caso, tem-se a assinatura mais forte de 1, 2 e 3 estruturas nas latitudes entre 20° S e 50° S. Em 20° S tem-se SW4 da mesma ordem de magnitude da componente migrante, as demais componentes nesta latitude apresentam magnitudes similares. Já nas latitude de 25° S e 30° S, a componente migrante é dominante, seguida por SW4 e S0, que produzem a assinatura de ondas com 2 picos em longitude. Para estas latitudes tem-se também a contribuição de SW1 e SW3 que geram ondas de 1 pico, seguidas das componentes SW5 e SE3 que aparecem como 3 e 5 estruturas.

Nas latitudes de 40° S e 50° S, no painel (c) da [Figura 4.28](#), vê-se que as componentes não migrantes SW3 e SW1 (associadas a ondas com 1 pico) possuem valores maiores que a componente migrante, a qual apresenta a mesma magnitude das componentes SW4 e S0 (produzem ondas com 2 picos). Mais uma vez é possível verificar que a componente migrante tem um comportamento assimétrico, em relação ao equador, com amplitudes mais elevadas no hemisfério sul. Além das estruturas mais pronunciadas, foi possível reconstruir alguns detalhes que podem ser encontrados no hemisfério norte com amplitudes menores que 1 K.

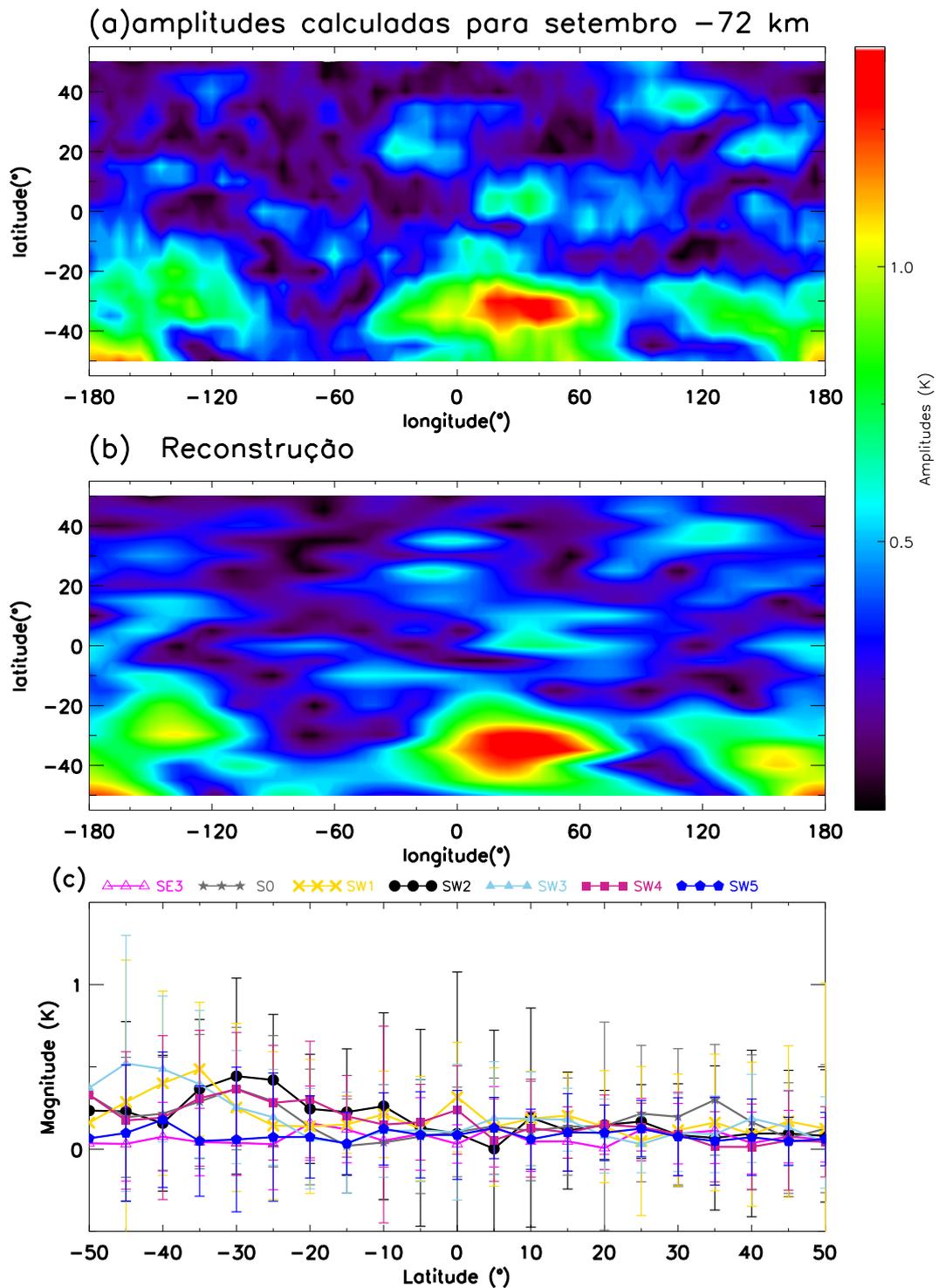


Figura 4.28 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 72 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE3, S0, SW1, SW2 SW3, SW4 e SW5. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

A [Figura 4.29](#) mostra a amplitude média mensal para setembro, na altitude de 72 km [painel (a)], sua reconstrução [painel (b)] e as componentes de maré utilizadas na reconstrução [painel (c)]. Na [Figura 4.29](#) pode-se observar um padrão diferente do que foi encontrado nas [Figuras 4.26](#) e [4.27](#). Neste mês e altitude verifica-se estruturas maiores sobrepostas por estruturas menores. Sendo assim, as principais estruturas foram reconstruídas ([Figura 4.29](#) - painel (b)). Porém, alguns detalhes não foram obtidos com a utilização das componentes mostradas no painel (c) desta figura.

Para praticamente todas as latitudes do hemisfério sul que são mostradas na [Figura 4.29](#), SW4 é a componente não migrante dominante e entre 35° S e 50° S exibe amplitudes maiores que a componente migrante. Para reconstruir alguns detalhes foi necessário adicionar a componente SE4 que gera assinaturas de onda com 6 picos. Para esta configuração, a componente migrante também mostra um comportamento assimétrico com valores mais elevados no hemisfério sul.

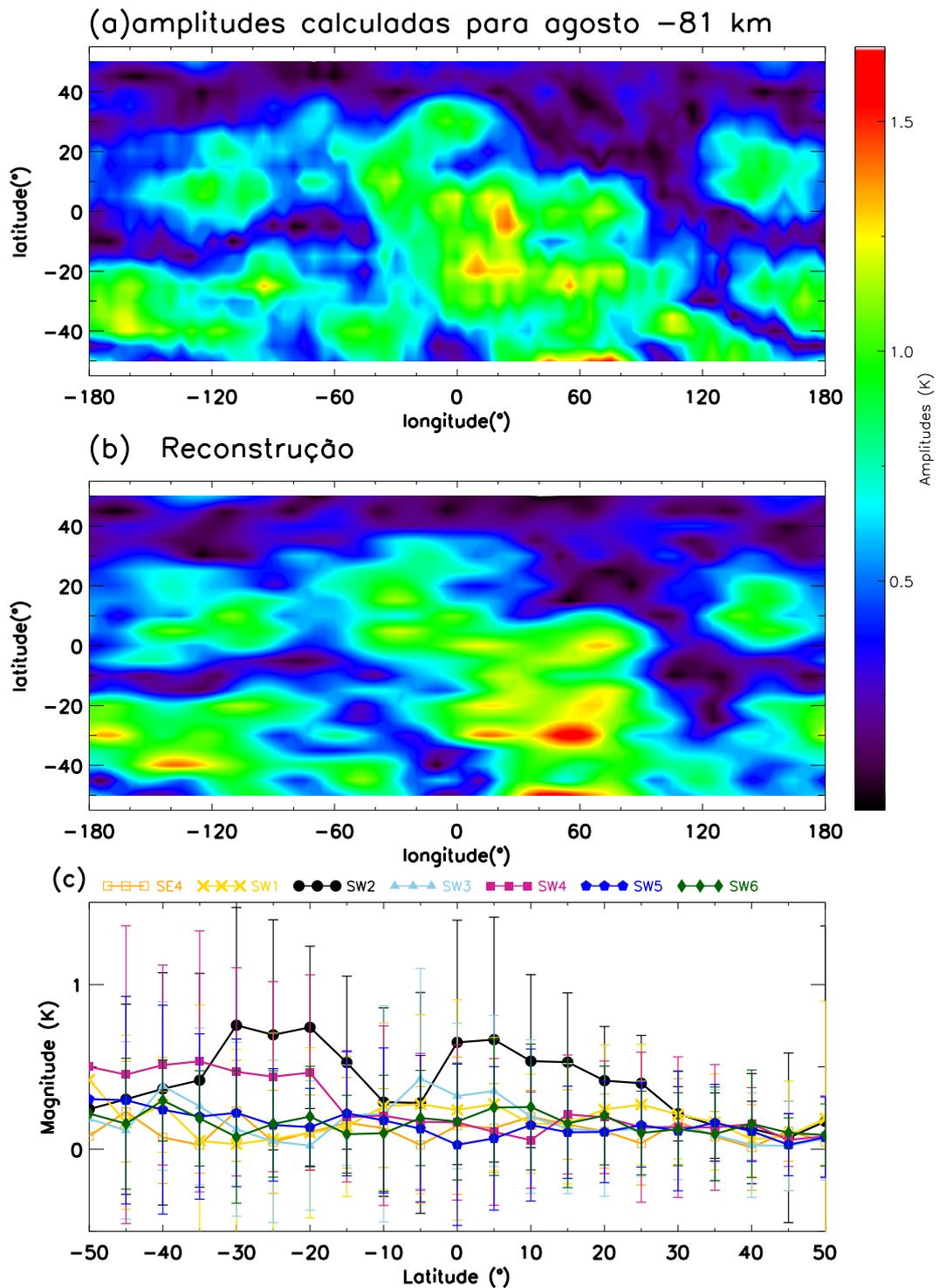


Figura 4.29 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para agosto na altitude de 81 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE4, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

As estruturas longitudinais no mês de setembro em 81 km (Figura 4.30) apresentam uma configuração mais variável. Os casos que apresentam estruturas maiores com variações pontuais sobrepostas e amplitudes pequenas são mais difíceis de reconstruir.

Como pode ser visto no painel (b) da Figura 4.30, as estruturas maiores são obtidas, porém vários detalhes são perdidos, principalmente, os que estão sobrepostos às estruturas maiores. Para este caso foram utilizadas na reconstrução as componentes SE4, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6. As componentes não migrantes apresentam praticamente os mesmos valores, exceto SW4 e SW1 que são dominantes em algumas latitudes. Neste caso, também foi necessário adicionar a componente SE4. A componente migrante também tem um comportamento assimétrico, porém com um comportamento um pouco diferente dos mostrados anteriormente.

É importante observar que as componentes utilizadas para reconstruir a amplitude da maré semidiurna lunar em agosto na altitude de 81 km (Figura 4.29) foram as mesmas utilizadas para recuperar as estruturas na amplitude no mês seguinte, ou seja, em setembro na mesma altitude (Figura 4.30). Isto indica, que neste nível, as principais componentes da maré semidiurna não estão variando rapidamente de um mês para outro, nesta época do ano.

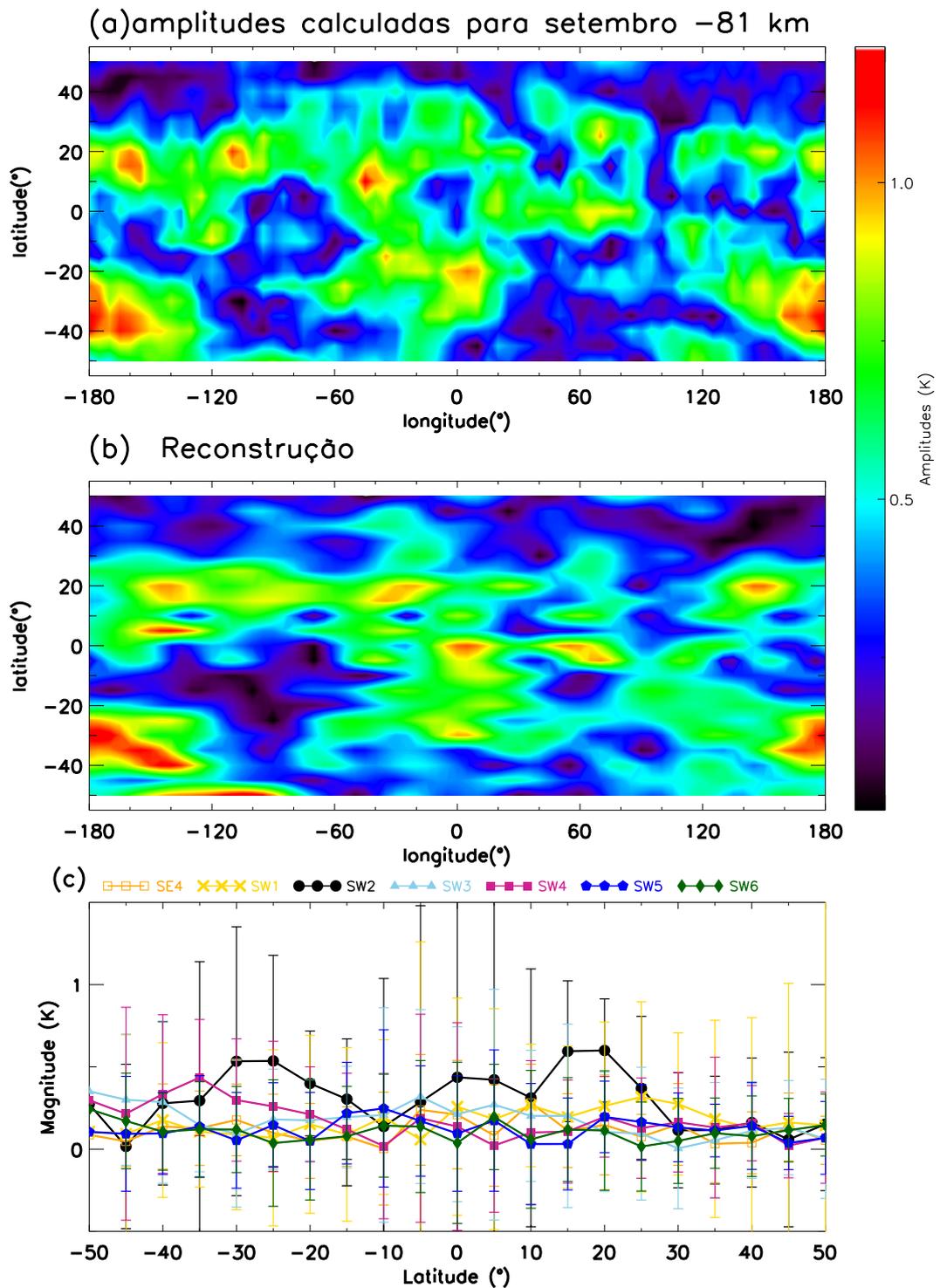


Figura 4.30 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 81 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE4, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

Um resumo das componentes utilizadas nas reconstruções mostradas nas Figuras 4.27 e 4.30 pode ser visto na Tabela 4.2. Observa-se que, além da componente migrante, as componentes não migrantes SW1, SW3, SW4 e SW5 foram sempre utilizadas para reconstruir as estruturas apresentadas na amplitude da maré semidiurna lunar nestas altitudes. Nota-se que, na altitude de 81 km, apenas uma componente não migrante que se propaga para leste (SE4) foi necessária na reconstrução, enquanto que a reconstrução para 72 km de altitude precisou de outras componentes propagantes para leste.

Tabela 4.2 - Resumo das componentes utilizadas para reconstruir as estruturas de amplitude mostradas nas Figuras 4.27 a 4.30 . O símbolo ‘✓’ indica que a componente foi utilizada na figura de reconstrução da respectiva altitude.

Componentes	72 km		81 km	
	jan	set	ago	set
SE4	–	–	✓	✓
SE3	–	✓	–	–
SE2	✓	–	–	–
SE1	✓	–	–	–
S0	✓	✓	–	–
SW1	✓	✓	✓	✓
SW2	✓	✓	✓	✓
SW3	✓	✓	✓	✓
SW4	✓	✓	✓	✓
SW5	✓	✓	✓	✓
SW6	–	–	✓	✓

Após a apresentação de diferentes padrões longitudinais, será dada ênfase aos casos que apresentam dominância de ondas com 3 e/ou 4 picos. Sendo assim, serão discutidos, principalmente, as componentes presentes nas faixas de latitude em que essas estruturas estiverem mais pronunciadas. Estas estruturas começam a se tornar mais evidente a partir altitude de 90 km, como foi discutido anteriormente. Serão mostradas algumas reconstruções em que aparecem 3 e/ou 4 picos, para tentar ver quais são as componentes mais importantes que podem produzir estas estruturas. Pode-se ver no painel (a) da Figura 4.31 que nesta altitude, para o mês de setembro, na faixa de $\sim 0^\circ$ a 30° N, começam aparecer algumas estruturas de ~ 3 a 4 picos na amplitude da maré lunar.

Para reconstruir a amplitude foram utilizadas as seguintes componentes: SW1, SW2, SW3, SW4, SW5, SW6, S0, SE1 e SE2 [Figura 4.31 (a) e (b)]. No hemisfério norte região na qual as estruturas são mais pronunciadas, tem-se a componente migrante dominante e as componentes não migrantes variam entre 0 K e $\sim 0,8$ K. No entanto, conforme já discutido, as componentes não migrantes são fundamentais para geração das estruturas longitudinais observadas. Na faixa de latitude em torno de 20° N, onde as estruturas são mais evidentes, as componentes SE2, SW4 e SW6 possuem amplitudes ligeiramente maiores. Logo abaixo dessas componentes, tem-se SW1, S0 e SE1, importantes e, por último, SW3 e SW5. A componente migrante apresenta um comportamento assimétrico com maiores amplitudes no hemisfério norte.

Na altitude de 90 km também foram observadas essas estruturas no mês de dezembro no hemisfério norte (ver Figura 4.32 - painel (a)). Na latitude de $\sim 15^\circ$ N, onde as observações mostram a assinatura mais evidente de uma onda com 3 e 4 picos, as componentes SW1, SW6 e SW3 possuem amplitudes um pouco mais significativas. Em seguida, as componentes SE4, SE1, S0 e SW4 apresentam as mesmas amplitudes e SE3 tem a menor amplitude. Estas componentes de maré indicam a presença de ondas com 1, 2, 3, 4, 5 e 6 picos em longitude. A componente migrante apresentou um comportamento praticamente simétrico em relação ao equador. É importante notar que existe uma mudança das principais componentes que geram as estruturas em setembro (Figura 4.31) e em dezembro (Figura 4.32).

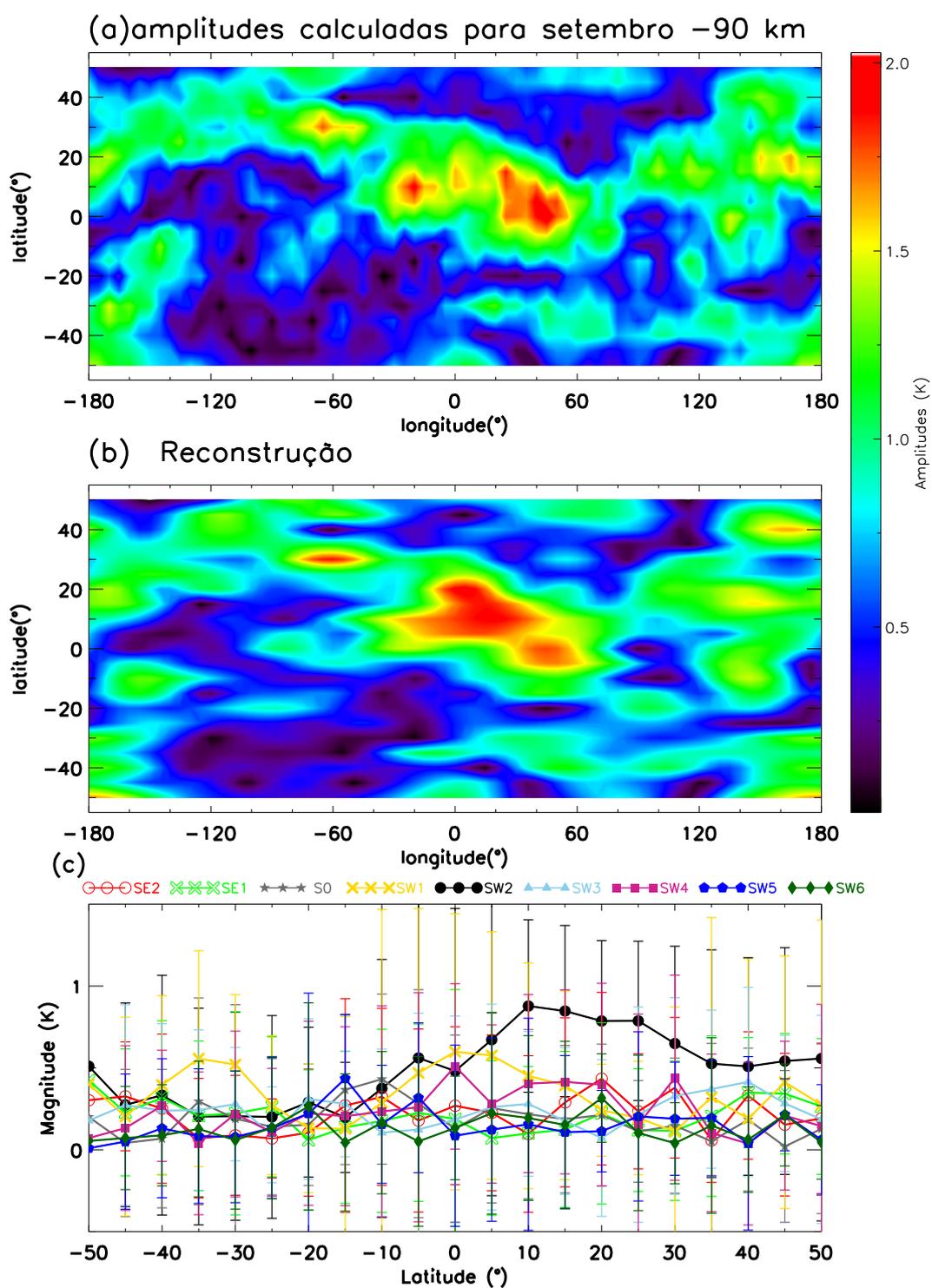


Figura 4.31 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 81 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

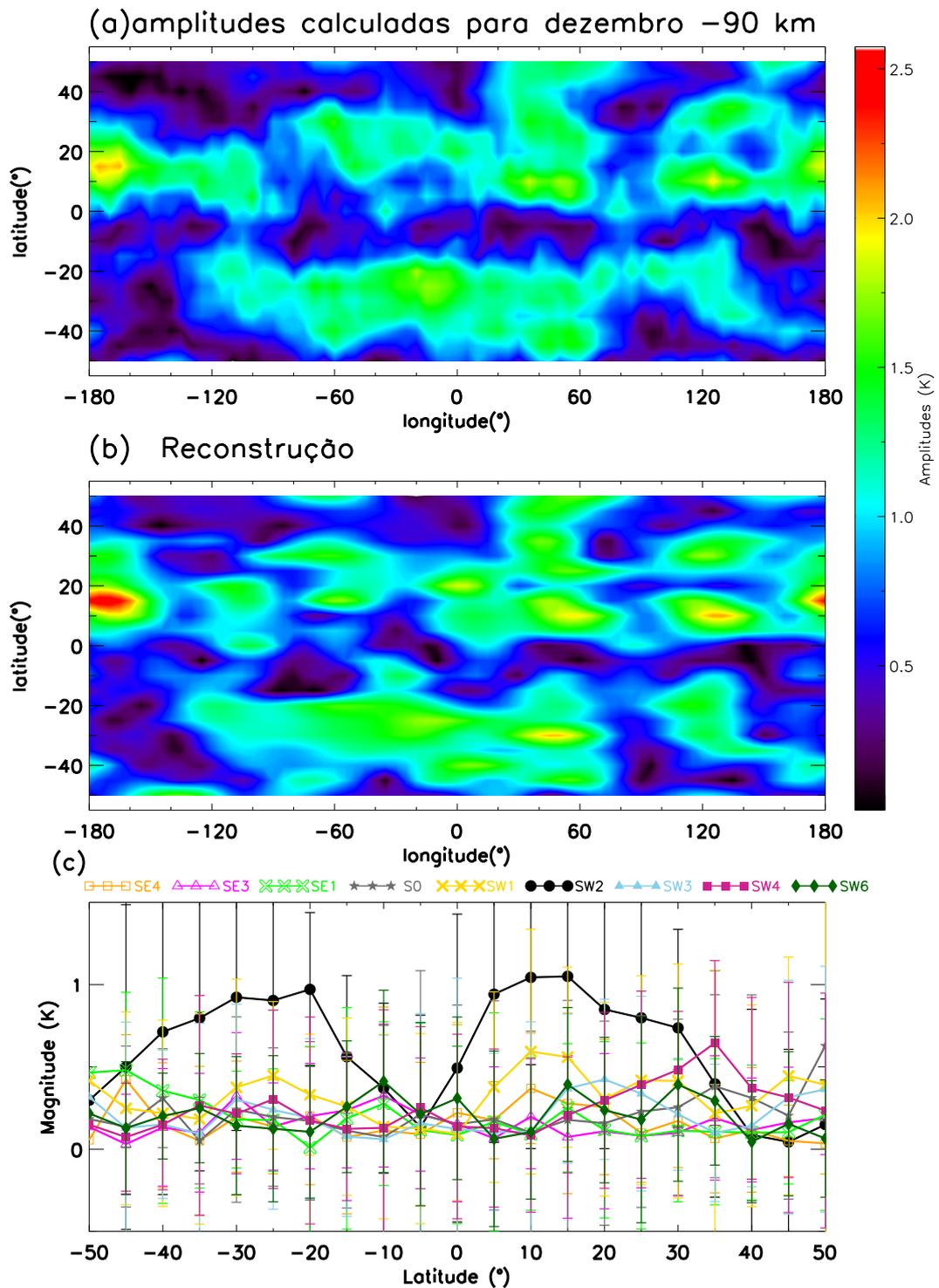


Figura 4.32 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 81 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE4, SE3, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4 e SW6. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

Outra altitude que apresenta estruturas definidas de 3 e/ou 4 picos na amplitude da maré lunar é a de 105 km. Na [Figura 4.33](#) pode-se ver a distribuição global da amplitude da maré lunar para o mês de janeiro, em 105 km. Os picos de amplitude em longitude podem ser vistos na faixa de latitude em torno de 20° N e 20° S. Foram utilizadas as componentes SE3, SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6 para fazer a reconstrução da amplitude da maré semidiurna.

Em janeiro ([Figura 4.33](#)), a componente migrante é dominante em todas as latitudes e apresenta um comportamento assimétrico, sendo as maiores amplitudes no hemisfério norte. Em 20° S as componentes SW6, SW4, SW5, SE2 e S0 são praticamente da mesma magnitude e SW1, SE3, SW3, SE1 apresentam valores maiores, enquanto que, em 20° N todas as componentes possuem, aproximadamente, o mesmo valor.

Em setembro, para 105 km de altitude ([Figura 4.34](#)), a faixa de latitude que mostra estruturas mais pronunciadas é em torno de 20° N. Para esta faixa de latitude, as componentes não migrante SW4 e SE2 apresentam valores ligeiramente maiores, seguidas por SW3 e SW1 e por último SW5, S0, SW7. A componente migrante exibe um comportamento assimétrico com maiores amplitudes no hemisfério norte.

O mês de dezembro, em 105 km, mostrado na [Figura 4.35](#), exibe estruturas bem definidas em ambos os hemisférios, principalmente, nas faixas de latitude em torno de 30° S e 20° N. A componente migrante mais uma vez apresenta um comportamento assimétrico, com amplitudes mais elevadas no hemisfério sul. Analisando a faixa de 30° S de latitude, verificamos que SE3 possui amplitude ligeiramente maior. Depois temos a seguinte ordem: SW1, SW6, SE2, SW4, S0, SE1, SW3 e SW7. Entretanto, em 20° N a seguinte configuração pode ser vista: SW6, SW4, SE1, S0, SW3, SW1, SE2, SE3 e SW7.

Um importante aspecto que pode ser notado é que praticamente as mesmas componentes não migrantes foram necessárias para reconstruir a forma da amplitude para estes meses destacados. Pode-se ver também que em dezembro e janeiro, são observadas as estruturas longitudinais em ambos os hemisférios, enquanto que em setembro, as estruturas são mais acentuados no hemisfério norte.

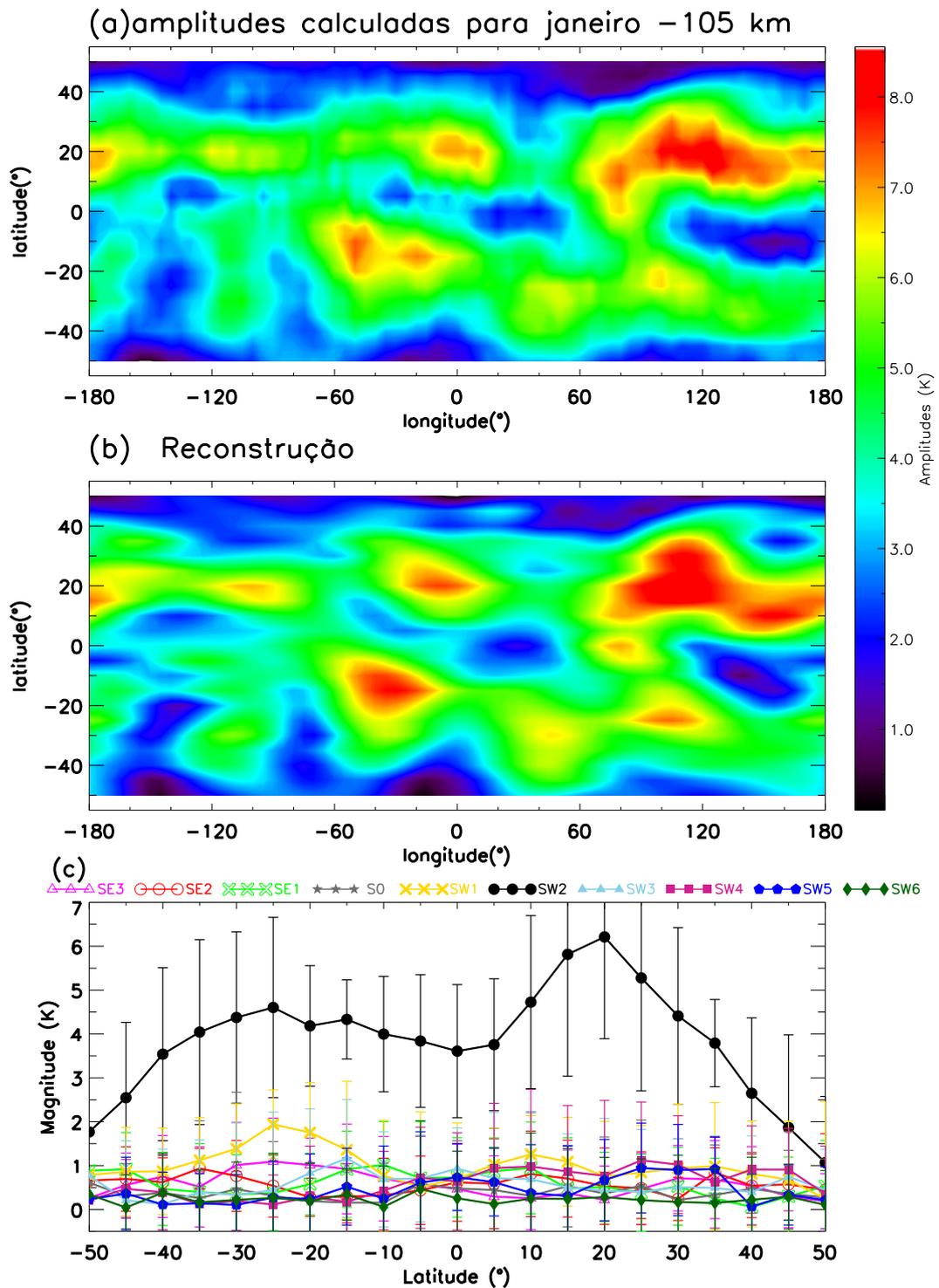


Figura 4.33 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para janeiro na altitude de 105 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE3, SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6 (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

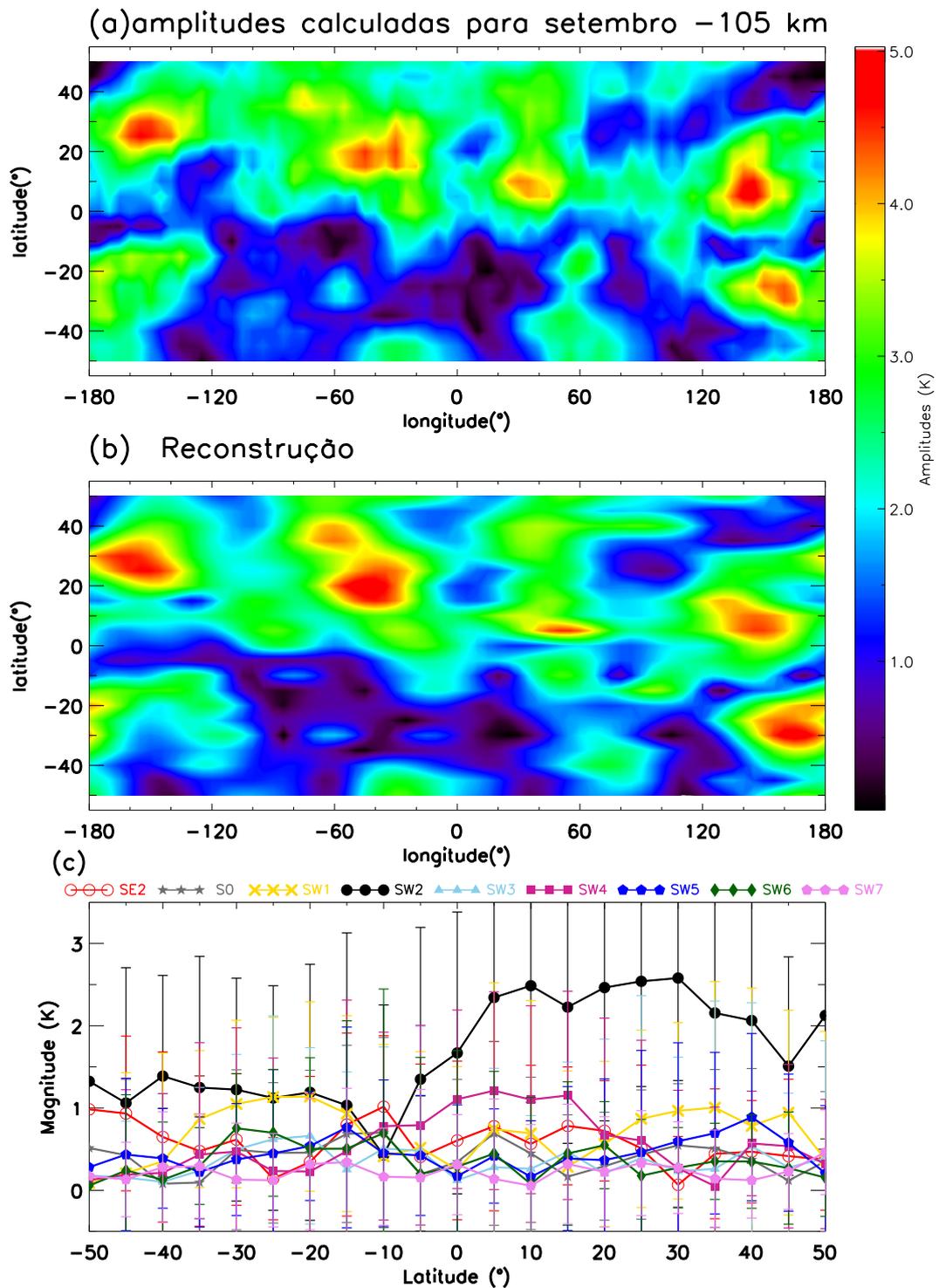


Figura 4.34 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 105 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE2, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5, SW6 e SW7 (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

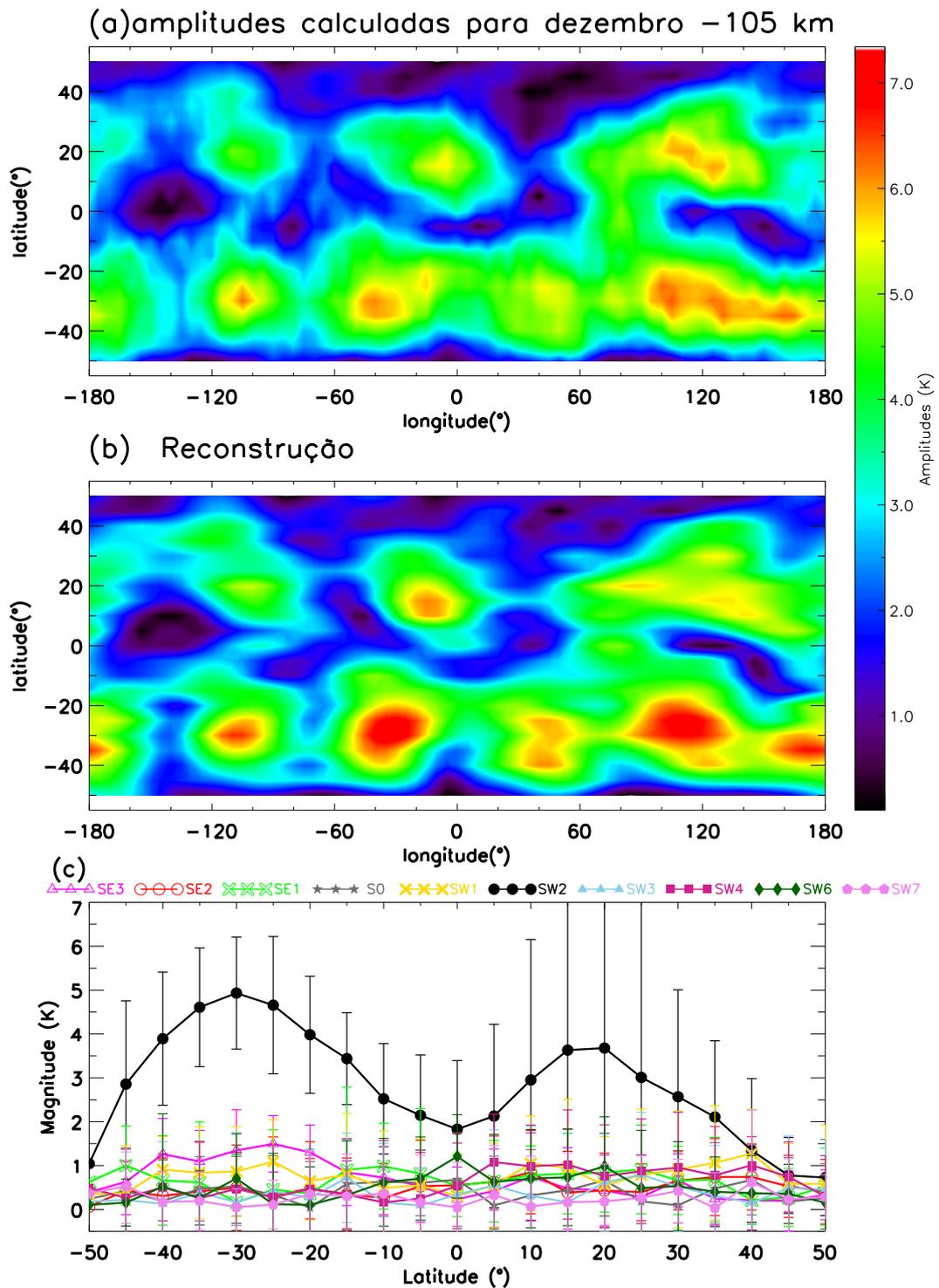


Figura 4.35 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para dezembro na altitude de 105 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE3, SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5, SW6 e SW7 (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

Na altitude de 108 km foram observadas estruturas semelhantes às mostradas nas figuras anteriores com padrões bem definidos nos meses de dezembro (já mostrado na [Figura 4.25](#)) e em setembro. Em setembro as estruturas estão localizadas no hemisfério norte, como pode ser visto no painel (a) da [Figura 4.36](#).

Analisando 20° N e 30° N na [Figura 4.36](#), verifica-se que em 20° N a componente SE2 é a componente não migrante ligeiramente dominante, enquanto que, em 30° N SW6 é ligeiramente dominante. A componente migrante é dominante em quase todas as latitudes e, mostra um comportamento assimétrico, com valores maiores no hemisfério norte.

Mais uma vez, no mês de setembro ([Figura 4.36](#)) são observadas as estruturas mais pronunciadas no hemisfério norte, enquanto que, em dezembro ([Figura 4.26](#)), para a mesma altitude, as estruturas estão presentes nos dois hemisférios.

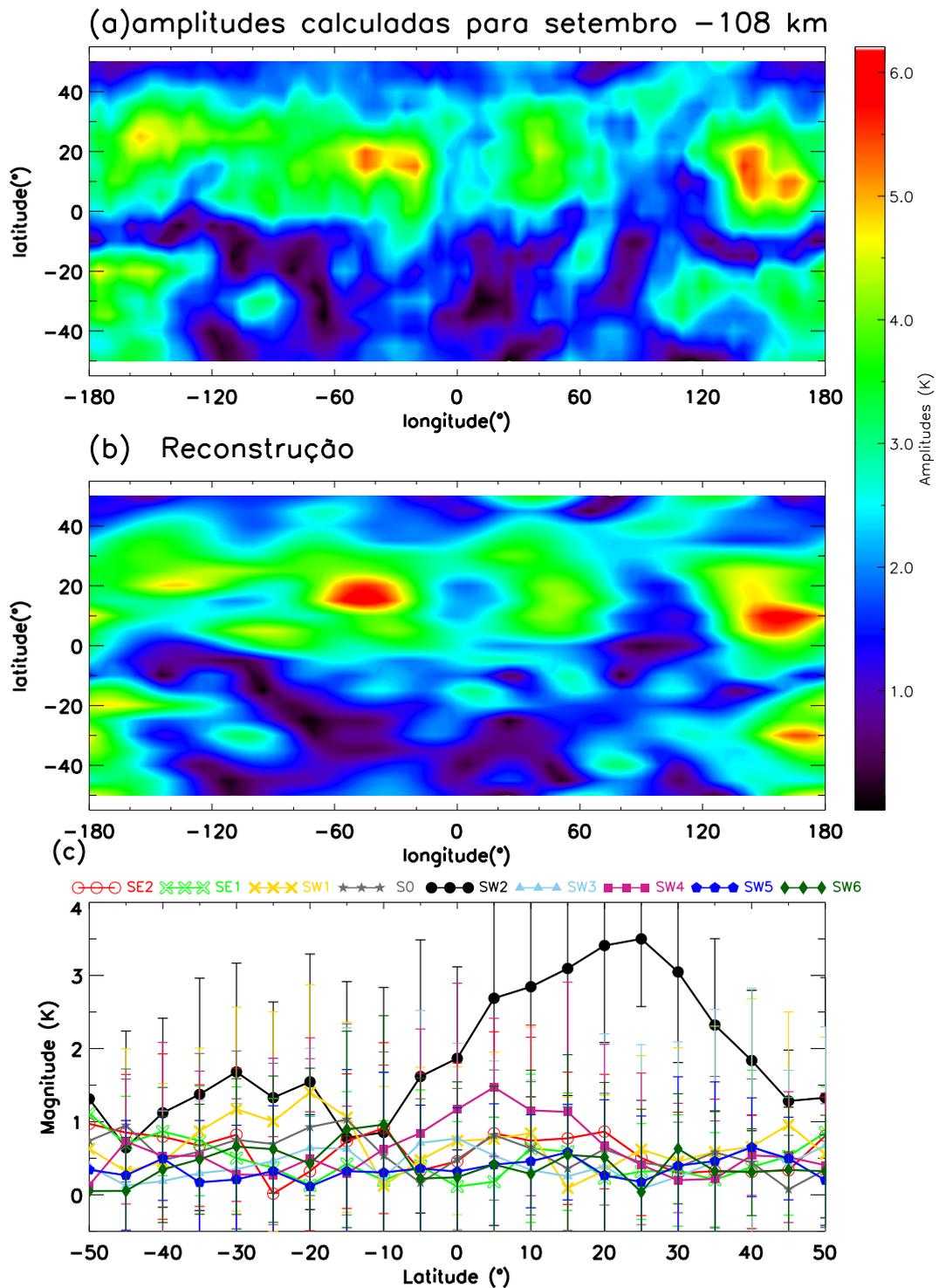


Figura 4.36 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 108 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6 (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

A [Figura 4.37](#) mostra as amplitudes calculadas para o mês de setembro em 111 km, no painel (a), onde podem ser observadas estruturas em ambos os hemisférios. A reconstrução desta figura foi feita com as componentes SE3, SE2, SE1, SW1, SW2, SW3, SW6 e SW7. Analisando o comportamento das componentes de maré na latitude de 20° N verifica-se uma leve dominância das componentes SW3 e SE2 em relação as demais componentes não migrantes. Em 30° S as componentes SE3 e SW1 são as componentes não migrantes dominantes, seguidas pelas componentes SW7, SE2, SE1, SW3 e SW6. A componente migrante é dominante no hemisfério norte e entre 20° e 30° S. Além disso, a componente SW2 apresenta um comportamento assimétrico com valores mais elevados no hemisfério norte.

Como é mostrado na [Figura 4.38](#), em dezembro, na altitude de 111 km, também podem ser vistos picos em relação à longitude. Analisando o comportamento das componentes utilizadas na reconstrução das estruturas, verifica-se que a componente migrante é dominante em todas as latitudes e as componentes não migrantes apresentam praticamente os mesmos valores, exceto entre 30° N e 50° N, onde a componente SW1 domina em relação às demais componentes não migrantes. Para reconstruir as estruturas observadas na amplitude neste mês, foram utilizadas a componente migrante e as componentes não migrantes SE2, SE1, S0, SW1, SW3, SW4, SW6. A componente migrante também apresenta um comportamento assimétrico mais moderado, sendo que as maiores amplitudes ocorrem no hemisfério sul.

Comparando as [Figuras 4.37](#) e [4.38](#) é possível perceber que as estruturas longitudinais nas amplitudes para o mês de setembro ([Figura 4.37](#)) são mais intensas no hemisfério norte, devido ao forte comportamento assimétrico da componente migrante neste mês. Já em dezembro ([Figura 4.38](#)), as estruturas de 3 picos são mais simétricas em relação ao equador porque a componente migrante é bem mais simétrica.

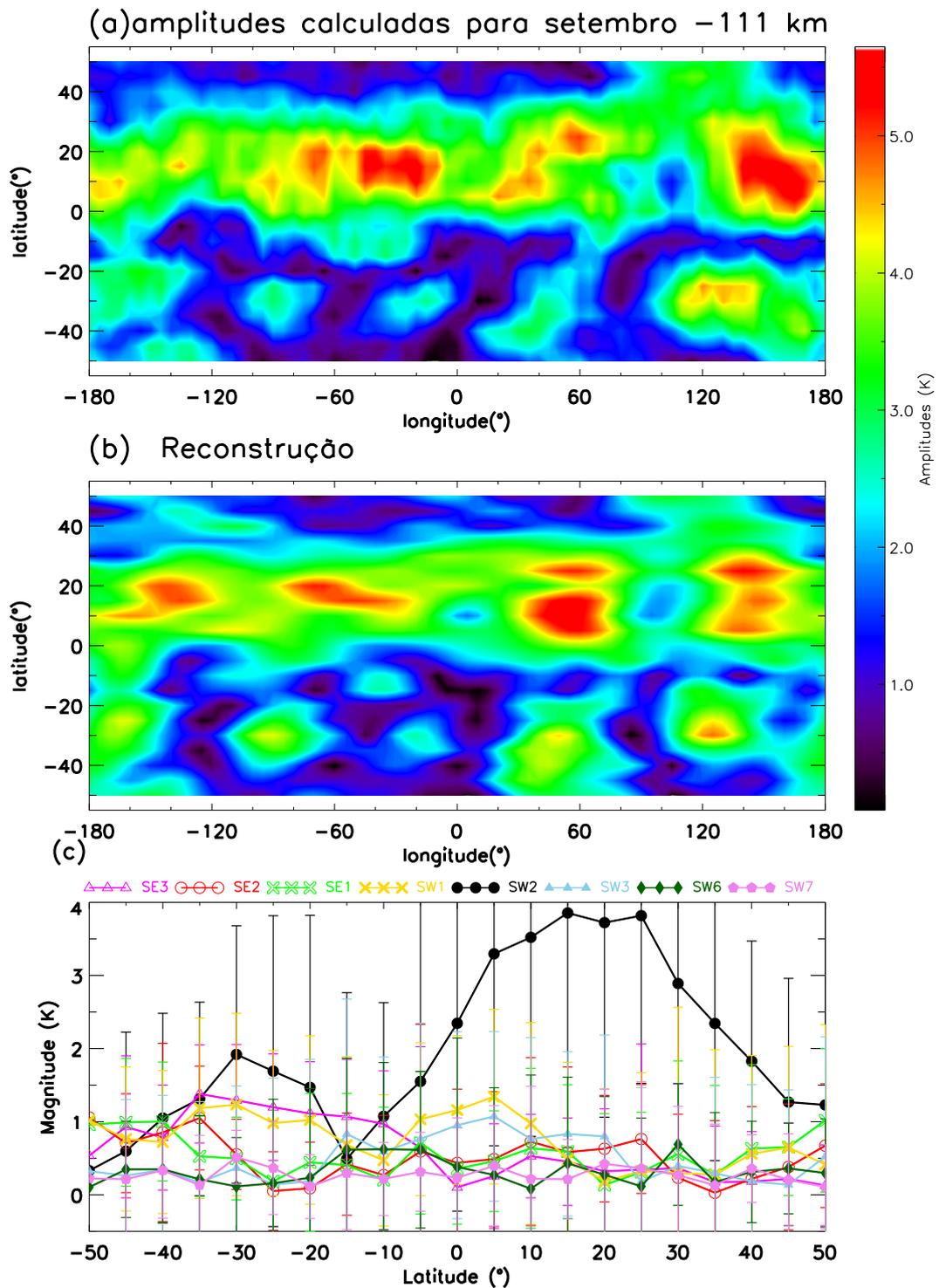


Figura 4.37 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 111 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE3, SE2, SE1, SW1, SW2, SW3, SW6 e SW7 (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

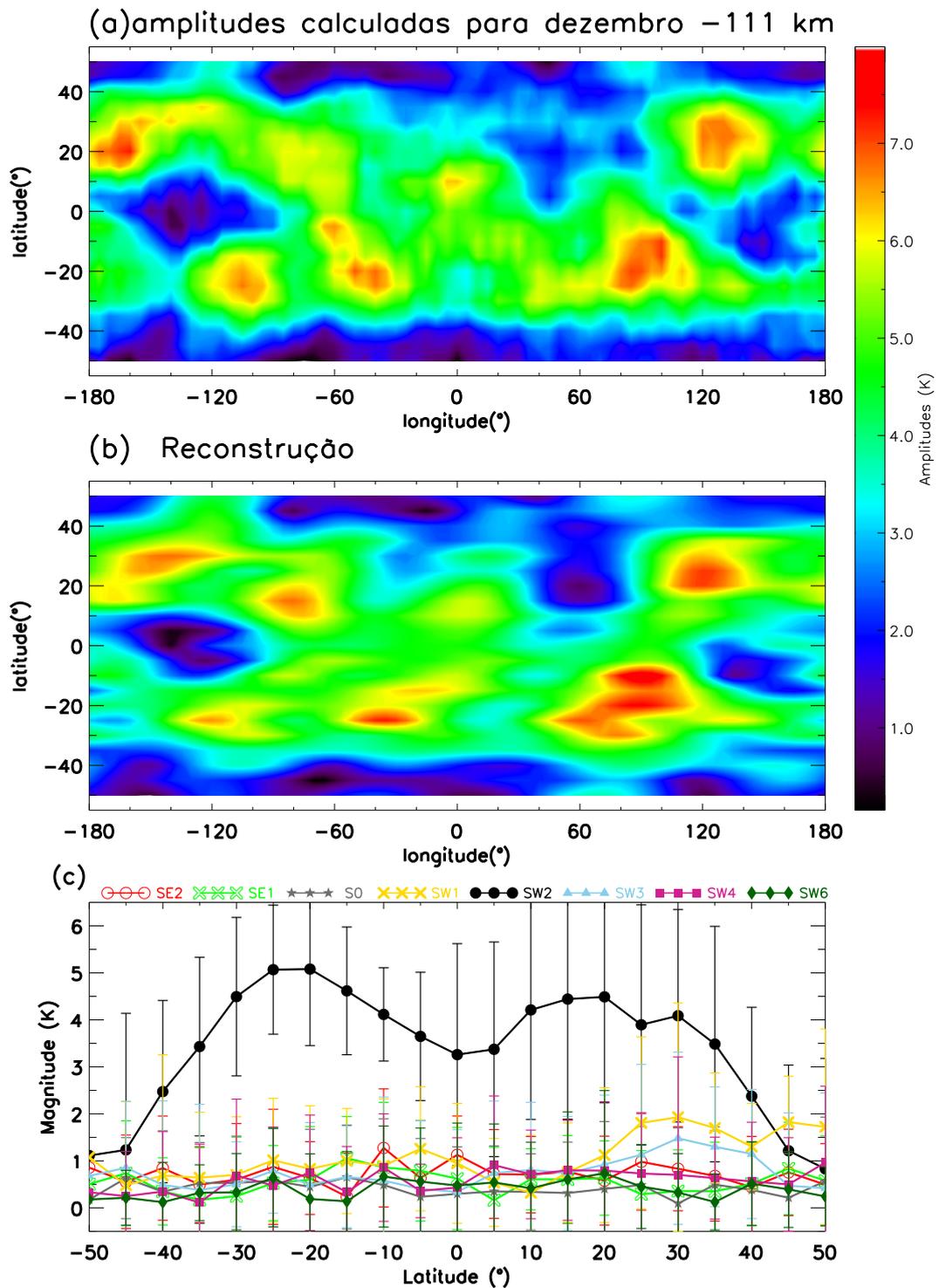


Figura 4.38 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para dezembro na altitude de 111 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, e SW6 (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

Na altitude de 114 km, no mês de setembro (Figura 4.39), algumas estruturas longitudinais com valores mais elevados são observadas na faixa de latitude em torno de 10° N. Porém, neste caso, as intensificações estão sobrepostas a uma intensificação que abrange praticamente todas as longitudes. Para reconstruir o padrão observado na Figura 4.39 foram utilizadas as componentes SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5, SW6 e SW7. A componente migrante mostra um comportamento assimétrico com valores mais elevados no hemisfério norte.

Já em dezembro, para essa altitude (ver Figura 4.40) as estruturas de 3 e 4 picos não são tão definidas. Porém algumas estruturas são observadas. A componente migrante é assimétrica com amplitudes mais elevadas no hemisfério sul. Para reconstruir as estruturas foram necessárias a componente migrante e as componentes não migrantes SE4, SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6. As componentes não migrantes variam entre 0 K e 2 K.

A partir desta altitude, como já foi mencionado anteriormente, as estruturas de 3-4 picos já não são mais tão evidentes. Isto indica que estas estruturas longitudinais são dominantes na amplitude da maré semidiurna lunar nas altitudes de 90 km a 110 km. Estas estruturas são produzidas pela combinação da componentes migrante com componentes não migrantes conforme explicitado nos resultados apresentados nas figuras citadas anteriormente.

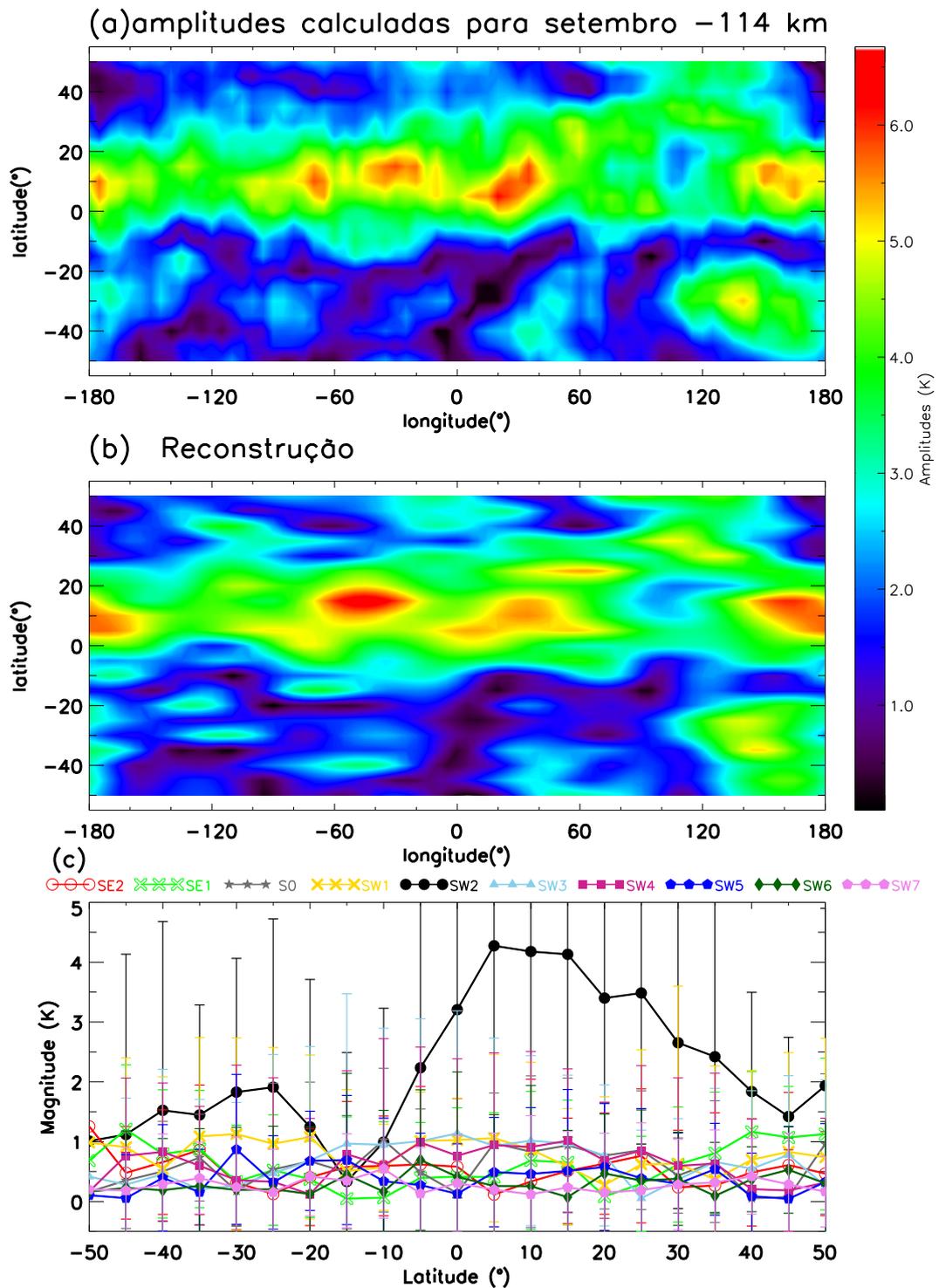


Figura 4.39 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para setembro na altitude de 114 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SSE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5, SW6 e SW7 (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

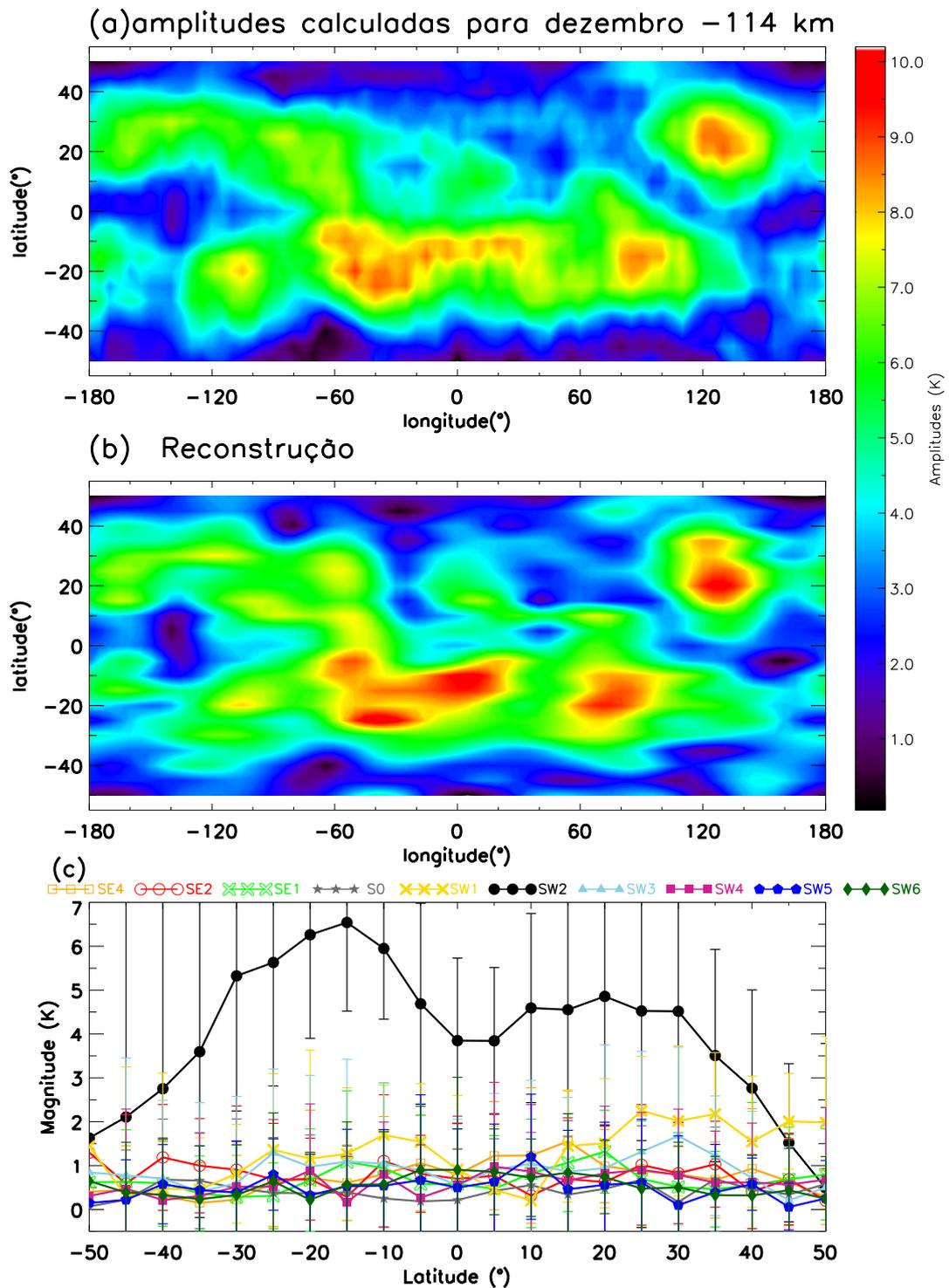


Figura 4.40 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para dezembro na altitude de 114 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE4, SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

A Tabela 4.3 mostra um resumo das principais componentes utilizadas em cada uma das figuras de reconstrução mostradas acima (Figuras 4.31 a 4.40), as quais apresentaram estruturas longitudinais de 3-4 picos na amplitude da maré semidiurna lunar. É possível perceber na Tabela 4.3 que as componentes S0, SW2, SW3 e SW6 foram utilizadas em todas as reconstruções mostradas. Estas componentes isoladas são capazes de produzir dois, zero, um e quatro picos, respectivamente, na estrutura longitudinal da amplitude da maré semidiurna lunar.

Tabela 4.3 - Resumo das componentes utilizadas para reconstruir as estruturas de 3-4 picos mostradas nas Figuras 4.31 - 4.40 . O símbolo ‘✓’ indica que a determinada componente foi utilizada na figura de reconstrução das respectiva altitude.

Componentes	90 km		105 km		108 km		111 km		114 km	
	set	dez	set	dez	set	dez	set	dez	set	dez
SE4	–	✓	–	–	–	–	–	–	–	✓
SE3	–	✓	–	✓	–	–	–	–	–	–
SE2	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SE1	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SW1	✓	✓	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓
SW2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SW3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SW4	✓	✓	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓
SW5	✓	–	✓	–	✓	✓	–	–	✓	✓
SW6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SW7	–	–	✓	✓	–	–	✓	–	–	–

Analisando cada mês separadamente pode-se ver que, para setembro, além das componentes S0, SW2, SW3 e SW6, as componentes SE2, SW1 e SW4 sempre foram necessárias para produzir os padrões da amplitude no processo de recuperação. Estas componentes são capazes de influenciar a geração de quatro, uma e duas estruturas na amplitude da maré semidiurna lunar.

Para o mês de dezembro, além das componentes citadas acima (S0, SW2, SW3 e SW6), a componente não migrante SE1 foi utilizada em todas as reconstruções das estruturas de amplitudes. Nota-se ainda que apenas para dezembro foram utilizadas as componentes SE4 (em 90 km e 114 km) e SE3 (90 km e 105 km) para reconstruir os padrões de amplitudes.

A teoria clássica de marés sugere que as componentes migrantes apresentem valores muitos maiores que as componentes não migrantes, ou seja, as componentes migrantes devem ser dominantes. Entretanto, os componentes não migrantes são capazes de gerar variações longitudinais, sendo assim, estas componentes devem ser importantes para a distribuição global desta maré. A existência das componentes não migrantes deve ser devida ao efeito da forcante da maré dos oceanos e da terra sólida que se propaga verticalmente ou devido à interação não linear entre ondas planetárias estacionárias e modos migrantes. [McLandress e Ward \(1994\)](#) sugeriram que marés não migrantes também podem ser geradas através da interação de uma distribuição zonalmente assimétrica de ondas de gravidade com marés migrantes.

[Sandford et al. \(2007\)](#) investigaram a estrutura longitudinal através do cálculo da diferença de fase entre Rothera (67,5° S; 68,0° W) e Davis (68,6° S; 78,0° E) no intervalo de altitude entre 87 km e 91 km. As duas localidades estão separadas por apenas 1,1° em latitude, porém, em relação à longitude estão separadas em 146°. Com este estudo, eles observaram a presença do número de onda zonal igual a 2 para oeste, que corresponde a maré migrante, e do número de onda zonal igual a 1 para leste, correspondente a uma componentes de maré não migrante. Além disso, verificaram que apenas em poucos meses a diferença de fase observada é equivalente ao esperado para a maré semidiurna lunar puramente migrante. Portanto, concluíram que raramente a maré lunar apresenta característica de uma onda composta por um número de onda migrante puro e que o comportamento desta oscilação é mais parecido ao de uma mistura de modos migrante e não migrante.

Na [Figura 4.41](#) e na [Figura 4.42](#) pode-se analisar o comportamento vertical da fase na região da MLT para as principais componentes migrante e não migrantes que foram utilizadas na reconstrução da amplitude nos meses de dezembro (20° N - painel (a) e 30° S - painel (b)) e setembro (20° N - painel (a) e 20° S - painel (b)).

Como pode ser visto na [Figura 4.41](#), para o mês de dezembro a componente migrante apresenta progressão de fase com o decréscimo da altitude para ambas as latitudes, exceto na altitude de 69 km em 30° S. Já para as componentes não migrantes na latitude de 20° N, SW1, SW4, SW6 e SE1 e em 30° S, SE2 e SE1 apresentaram progressão de fase com a altitude desde 70 km até 120 km. Na latitude de 30° S, SW1 e SE3 apresentaram progressão de fase a partir de 84 km. As componentes SE3 (85 km), SE2 (90 km), S0 (85 km) e SW5 (85 km) para 20° N e S0 (90 km), SW3 (90 km) e SW4 (90 km) apresentam mudança na direção de propagação.

No mês de setembro ([Figura 4.42](#)) a componente migrante também apresenta progressão de fase com a altitude para ambas as latitudes mostradas. Para as componentes não migrantes observa-se esse comportamento para SE3, SE2, SW3 e SW4 em 20° N e SE3, SE1, SW6, SW5 e SW4 em 20° S. Uma mudança da direção de propagação é vista em 20° N nas componentes SE1 (92 km), S0 (90km - 100 km), SW1 (90 km), SW5 (95 km), SW6 (85 km) e SW7 (90 km), enquanto que, para 20° S, este comportamento é verificado em SE2 (85 km - 100 km), S0 (94 km), SW1 (84 - 93 km) e SW7 (96 km).

Comparando os perfis de fase das componentes da maré semidiurna lunar mostrados nas [Figuras 4.41](#) e [4.42](#) com os perfis de fase da maré lunar no mês de dezembro ([Figuras 4.5](#) e [4.6](#)) e setembro ([Figura 4.7](#)) para as latitudes de 20° N (para dezembro e setembro), 30° S (para dezembro) e 20° S (para setembro) é possível verificar que nas altitudes entre 70 km e 120 km o comportamento da fase com a altitude para estes meses são semelhantes aos perfis da componente migrante e que as variações com a altitude nos perfis de fase ([Figuras 4.5](#), [4.6](#) e [Figura 4.7](#)) são devidas à dominância de diferentes componentes não migrantes em cada altitude.

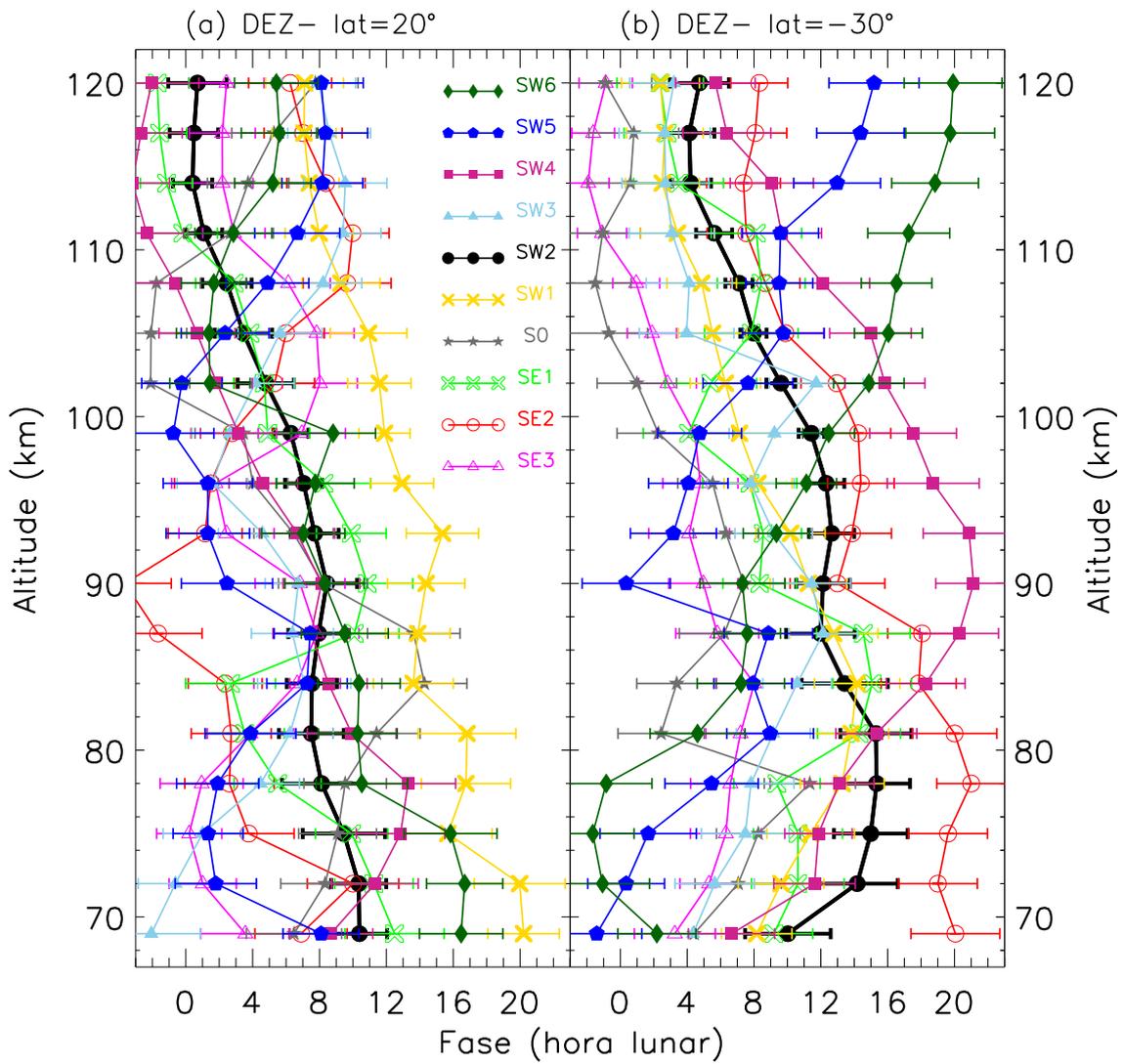


Figura 4.41 - Perfil vertical da componente migrante SW2 e das componentes não migrantes SE3, SE2, SE1, S0, SW1, SW3, SW4, SW5 e SW6 para as latitudes de 20° N (painel (a)) e 30° S (painel (b)) para o mês de dezembro no intervalo de altitude entre 70 km e 120 km.

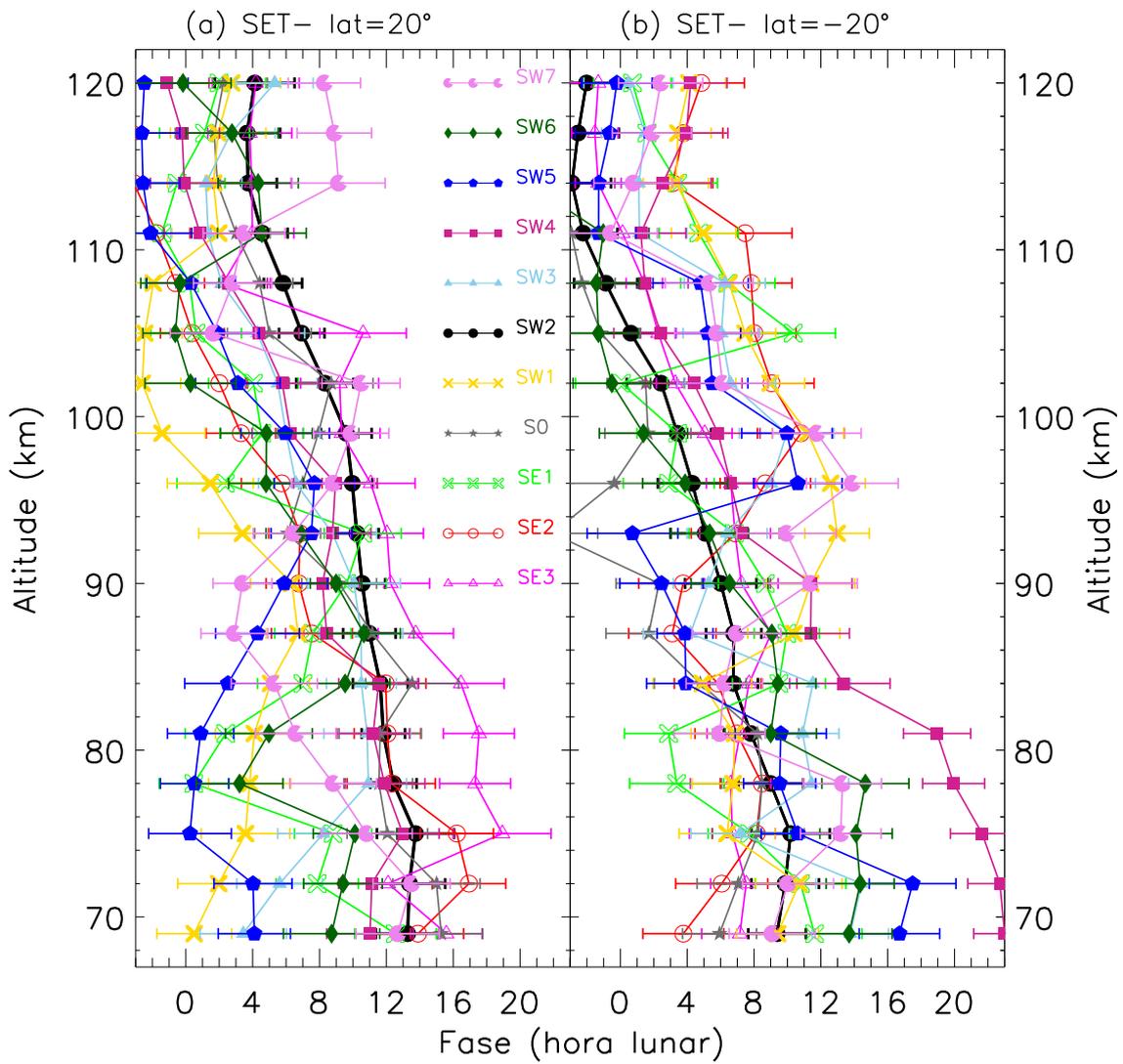


Figura 4.42 - Perfil vertical da componente migrante SW2 e das componentes não migrantes SE3, SE2, SE1, S0, SW1, SW3, SW4, SW5, SW6 e SW7 para as latitudes de 20° N (painel (a)) e 20° S (painel (b)) para o mês de setembro no intervalo de altitude entre 70 km e 120 km.

Haurwitz e Cowley (1970) sugeriram que, no caso da maré lunar observada na pressão da superfície, oscilações com número de onda diferente de 2 também podem ser em parte produzidas por cadeia de montanhas, diferentes propriedades de fricção das superfícies dos continentes e oceanos, pela distribuição desigual dos sistemas de temperatura e vento que podem modificar a resposta da atmosfera a função de excitação da maré lunar e pelas marés dos oceanos.

Espera-se que as componentes de maré produzidas apenas pelas marés dos oceanos e pela distribuição de continentes e oceanos devem ser geradas na baixa troposfera e se propagarem verticalmente, interagindo com a atmosfera. Foram construídos perfis verticais de fase para as componentes de maré estudadas neste trabalho de tese com o intuito de verificar se algumas dessas componentes apresentam característica de propagação vertical em toda a atmosfera. A Figura 4.43 e a Figura 4.44 mostram estes perfis os meses de dezembro e setembro. Nesta análise são exibidas apenas as componentes que mostraram condição de propagação desde 20 km até 120 km.

Na Figura 4.43 verifica-se que, no mês de dezembro a componente migrante para 20° N é praticamente constante até ~ 70 km e a partir desta altitude apresenta um perfil de uma onda propagante para cima. Já em 30° S no intervalo de altitude entre 20 km e 50 km a fase é propagante com a altitude, entre 50 km e 80 km a fase é praticamente constante com a altitude e nas altitudes superiores a 80 km verifica-se uma progressão de fase com o decréscimo da altitude.

Na latitude de 20° N (painel (a) da Figura 4.43) a propagação da fase com o decréscimo da altitude foi obtida para as componentes SE1 (linha contínua verde) e para SW1 (linha contínua amarela), com ambas as componentes mostrando mudança na hora do máximo. Nas altitudes inferiores a 35 km, o perfil para componente SE1 é variável, estas variações podem ocorrer devido a imprecisão na amplitude, a fase não foi bem resolvida. Isto também é observado para as componentes SE1 e SE2, em 30° S nas altitudes inferiores a 35 km. Na latitude de 30° S, em dezembro (painel (b) da Figura 4.43), a fase é propagante com o decréscimo da altitude para as componentes não migrantes SE1 e SE2, exceto entre 50 km e 65 km para a componente SE2 onde a fase é praticamente constante com a altitude. É possível notar que, para o mês de dezembro, as componentes SE1, SE2 e SW1, que possuem condições de propagação em toda a atmosfera, foram utilizadas para reconstruir as estruturas de amplitude da maré em todos os casos mostrados acima.

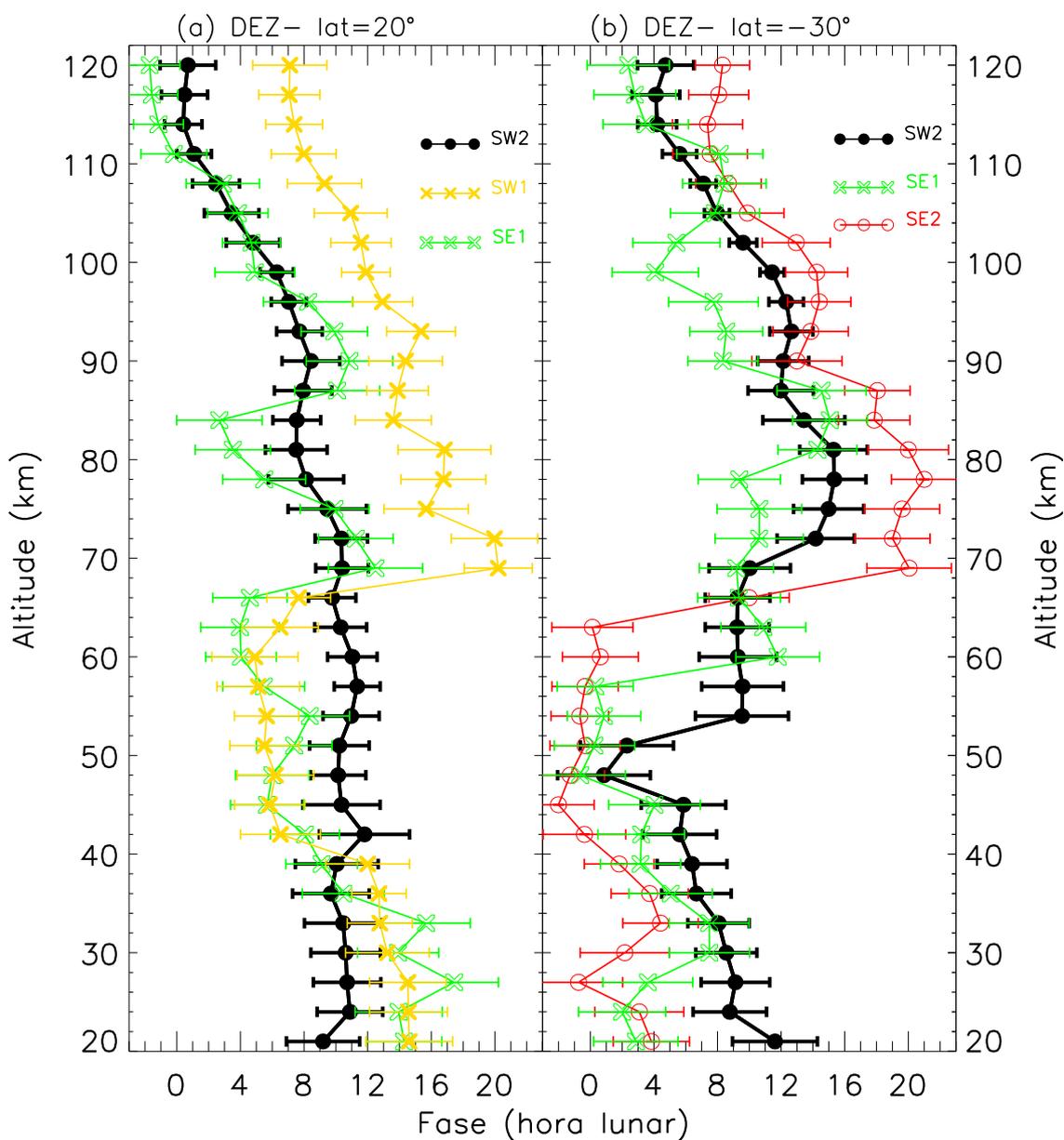


Figura 4.43 - Perfil vertical para o mês de dezembro no intervalo de altitude entre 20 km e 120 km para a componente migrante SW2 e para as componentes não migrantes SE1 e SW1 na latitude de 20° N (painel (a)), e no painel (b) SE2 e SE1 na latitude de 30° S.

Para o mês de setembro (Figura 4.44) a componente migrante para 20° N é praticamente constante nas altitudes inferiores a 40 km e entre 70 km e 78 km, para 20° S este comportamento é observado nas altitudes inferiores a 50 km. Nas altitudes superiores apresenta uma fase propagante com o decréscimo da altitude para ambas as latitudes. Em relação às componentes não migrantes, para as latitudes de 20° N apenas SW4 apresenta uma fase propagante, embora nas altitudes abaixo de 50 km a fase seja bem variável, o que pode ser devido à imprecisão na amplitude. No entanto, para 20° S a propagação da fase com o decréscimo da altitude é obtida para SE3, SE1 e SW4 e SW6. Porém, as componentes SE3, SE1 e SW6 apresentam regiões em que a fase é constante com a altitude. Além disso, a fase não foi bem resolvida para a componente SW6 nas altitudes inferiores a 55 km. Destas componentes que, de acordo com o perfil de fase, são capazes de se propagar verticalmente para todas as altitudes observadas, SE1, SW4 e SW6 foram necessárias para reconstrução dos padrões de amplitudes da maré semidiurna lunar.

As demais componentes não migrantes não apresentaram condições de propagação, sugerindo que podem ter sido geradas em diferentes altitudes da atmosfera através de outros mecanismos, como por exemplo, a interação não linear entre ondas atmosféricas.

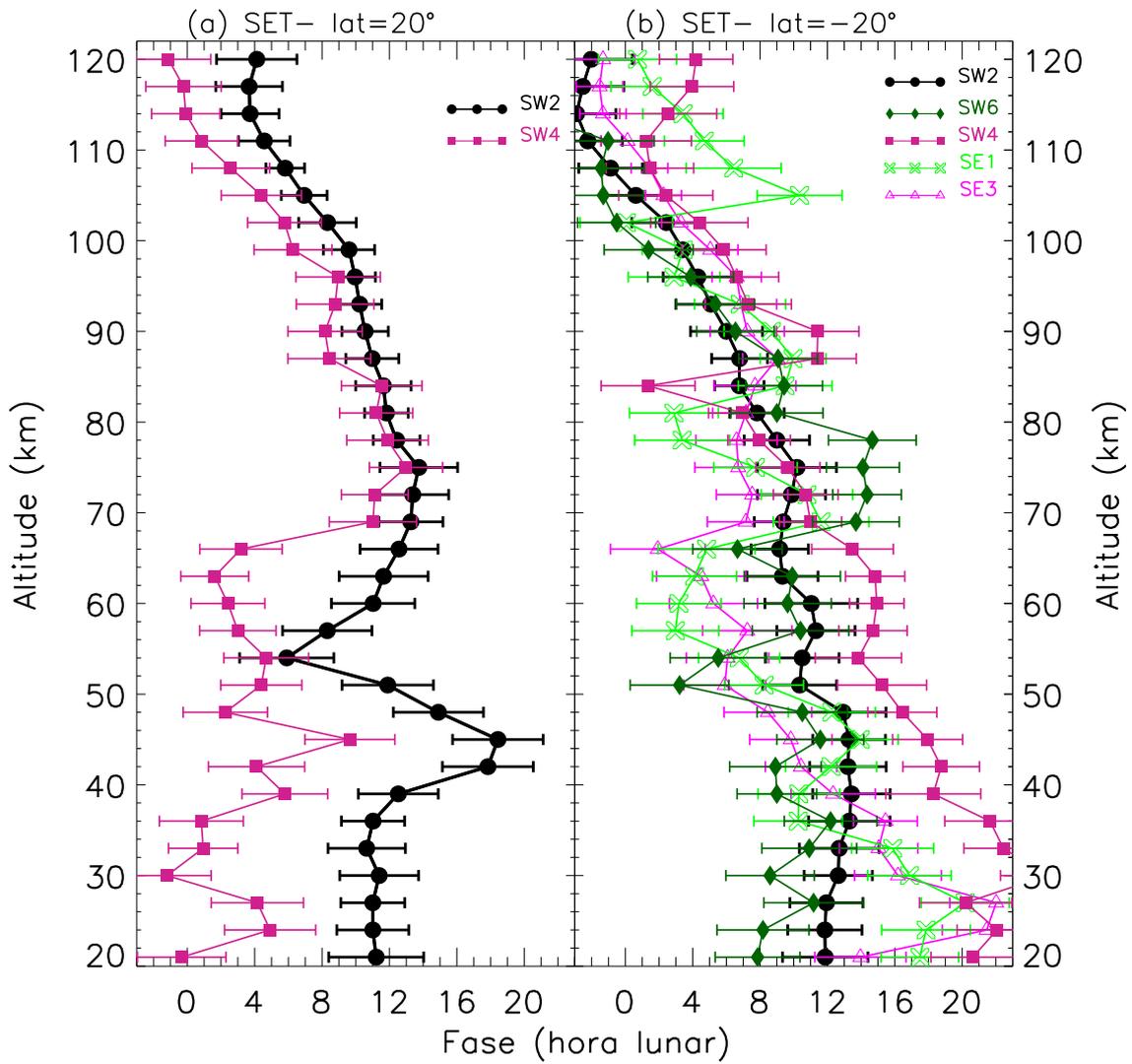


Figura 4.44 - Perfil vertical para o mês de setembro no intervalo de altitude entre 20 km e 120 km para a componente migrante SW2 e para as componentes não migrantes SW4 na latitude de 20° N (painel (a)), e no painel (b) SE3, SE1, SW4 e SW6 na latitude de 20° S.

4.4 Variação temporal

Outro aspecto da maré lunar que será analisado é a variabilidade ano-a-ano. Nesta seção serão apresentados alguns resultados da variação ano-a-ano da amplitude e fase da maré semidiurna lunar na temperatura. Esta característica foi observada nos estudos da maré lunar utilizando dados de vento na região da MLT (STENING et al., 2003; STENING; JACOBI, 2001; STENING et al., 1994) e de magnetômetro (STENING; RASTOGI, 2002). Alguns meses foram escolhidos arbitrariamente para mostrar que a maré semidiurna lunar pode mudar significativamente sua forma ao longo do tempo. Serão mostrados exemplos de variabilidade temporal em função da latitude, longitude e altitude. Esta análise também será estendida para as componentes migrante e não migrante da maré lunar

A variabilidade sazonal e latitudinal da maré semidiurna lunar com a altitude no mês de janeiro para os anos desde 2003 até 2012 é mostrada na [Figura 4.45](#). Muito embora a mesma estrutura, ou seja, dois picos de amplitude localizados em aproximadamente $\pm 20^\circ$, seja observada para todos os anos, exceto em 2006 que exibe dois picos apenas no hemisfério norte, existe uma clara variabilidade na intensidade relativa dos picos em relação aos dois hemisférios. Nos anos de 2003, 2005, 2011 e 2012 as amplitudes da maré lunar na temperatura são maiores no hemisfério sul. No entanto, nos anos de 2004, 2006, 2007 e 2010 as amplitudes são maiores no hemisfério norte. Nos anos de 2008 e 2009 as amplitudes apresentam praticamente os mesmos valores em ambos os hemisférios.

Na [Figura 4.46](#) é mostrada a variação sazonal da maré semidiurna lunar com a altitude para o mês de outubro, desde 2002 até 2011. Para este caso também verifica-se uma variabilidade de ano para ano, onde as estruturas mudam com o passar do tempo.

Nos anos de 2002, 2005 e 2006, mostrados na [Figura 4.46](#), observam-se estruturas semelhantes entre si com um pico de amplitude nas altitudes acima de 110 km, o qual se estende em direção ao hemisfério norte, sendo as amplitudes menores em 2006. Estruturas similares também são observadas nos anos de 2003 e 2004. Os anos de 2007 e 2008 apresentam um pico de amplitude aproximadamente centrado no equador. Nos anos de 2009, 2011 e 2012 observam-se maiores amplitudes no hemisfério norte.

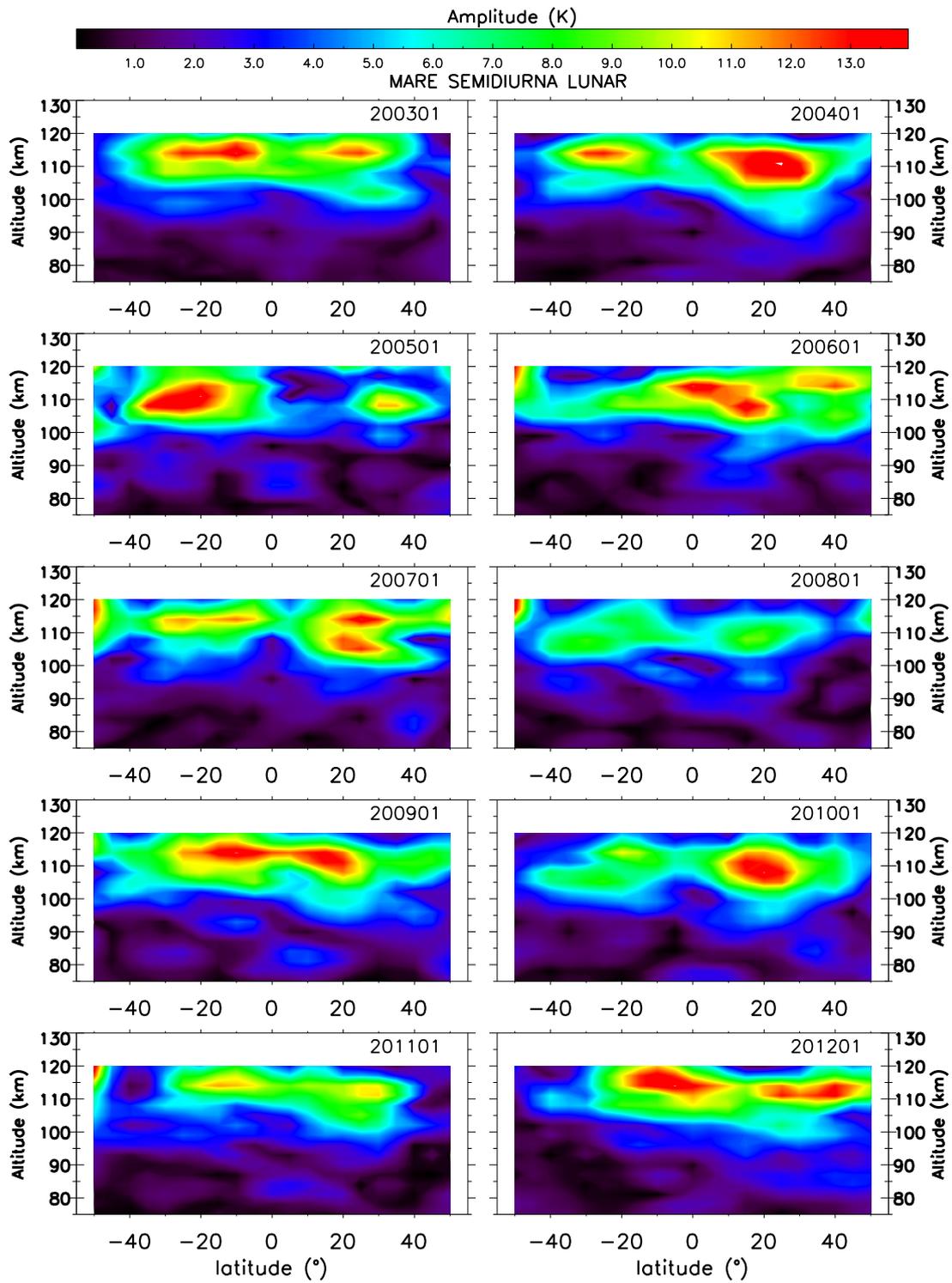


Figura 4.45 - Amplitude média zonal da maré semidiurna lunar para o mês de janeiro para diferentes anos (2003-2012).

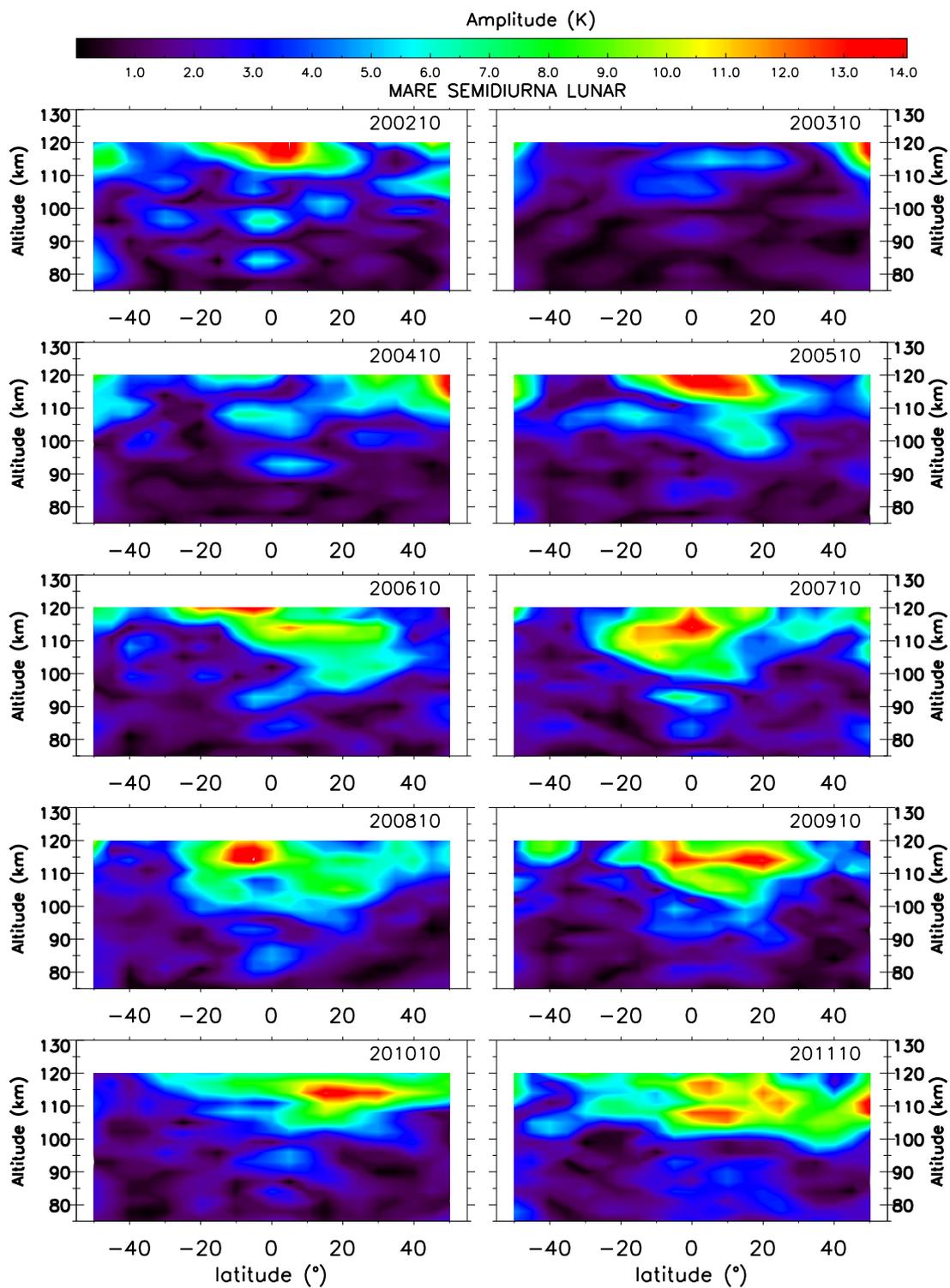


Figura 4.46 - Amplitude média zonal da maré semidiurna lunar para o mês de outubro para diferentes anos (2002-2011).

Com o intuito de ilustrar a variabilidade ano-a-ano da maré semidiurna lunar na região da MLT, a [Figura 4.47](#) exibe a amplitude mensal da maré semidiurna lunar para todos os meses entre fevereiro de 2002 até janeiro de 2012 para as altitudes fixas de 111 km [painel (a)], 99 km [painel (b)] e 90 km [painel (c)]. Nesta figura verifica-se, claramente, a variabilidade da amplitude da maré lunar de ano para ano. A maior amplitude para este período de análise na altitude de 111 km [[Figura 4.47](#) - painel (a)] ocorreu nos meses de dezembro de 2003 e janeiro de 2004, principalmente, para o hemisfério norte.

Nas altitudes de 111 km [painel (a) da [Figura 4.47](#)] e 99 km [painel (b)] a amplitude aumenta entre os meses de dezembro-janeiro para ambos os hemisférios. Contudo, em alguns anos, as amplitudes são maiores do que em outros. Além disso, no ano de 2005 o aumento ocorre apenas no hemisfério sul. Nestas altitudes a amplitude também sempre aumenta entre os meses de junho e julho sendo que, em 111 km este aumento é mais acentuado no hemisfério norte, exceto em 2006 em que é mais acentuado no hemisfério sul. Em 99 km de altitude o aumento de junho e julho nos anos de 2003, 2004, 2005, 2006 e 2012, acontece em ambos os hemisférios, enquanto que, em 2007 e 2008 ocorre apenas no hemisfério norte. No ano de 2010 o máximo em junho ocorre no equador.

Na altitude de 90 km [painel (c) da [Figura 4.47](#)] máximos na amplitude são observados em janeiro para os anos de 2003, 2004, 2006 e 2010 apenas no hemisfério norte. Em 2005 este máximo ocorre no equador, enquanto que em 2007, 2008, 2009 e 2011, ocorre em ambos os hemisférios. Nesta altitude o aumento observado entre junho e julho acontece nos anos de 2003, 2006 e 2011. Nos outros anos este aumento não é muito evidente.

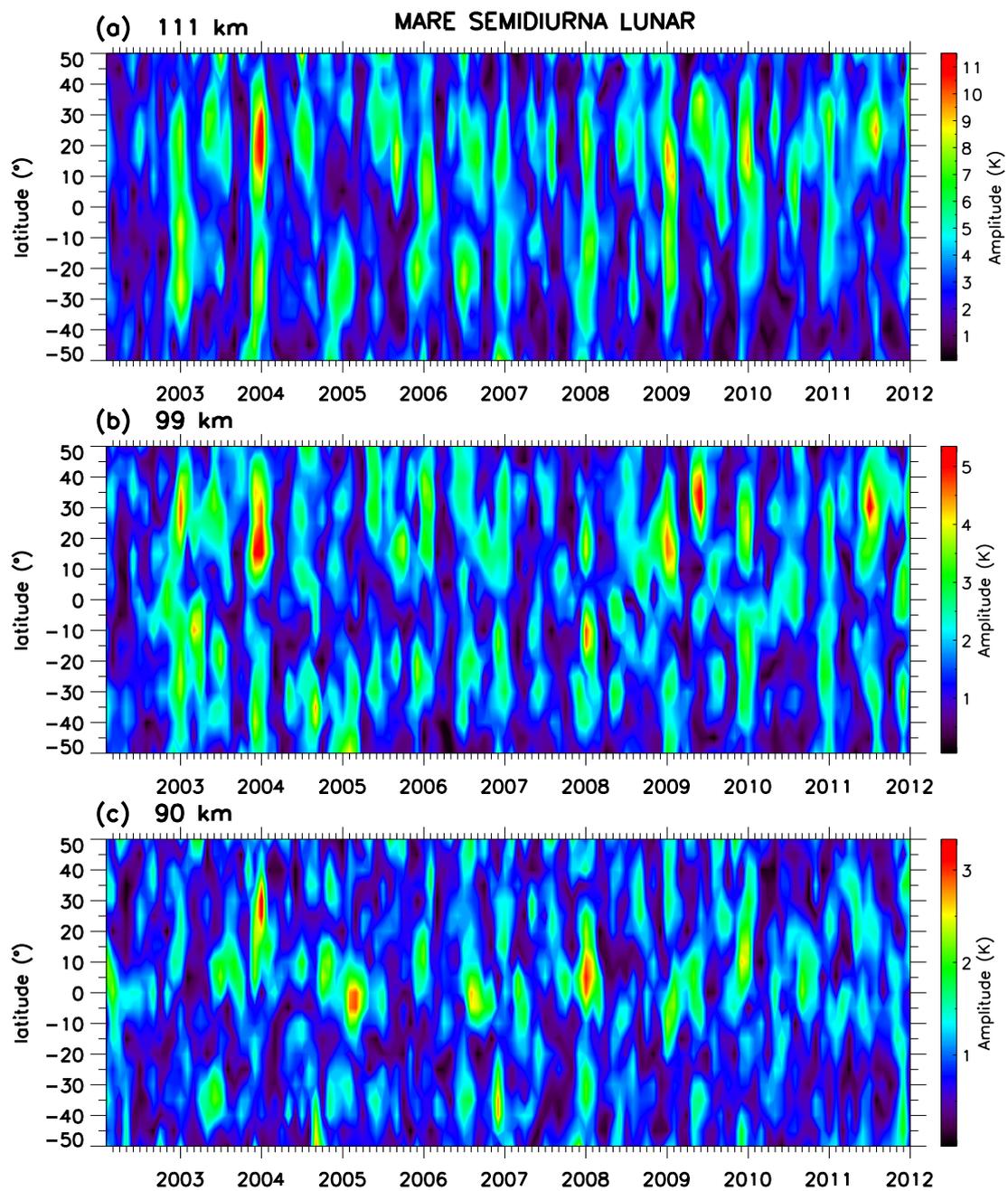


Figura 4.47 - Variação ano-a-ano da amplitude da maré semidiurna lunar com a latitude para as altitudes de 111 km (a), 99 km (b) e 90 (c) km.

Para verificar com mais detalhes a variação ano-a-ano com altitude e latitude, foi construído o gráfico desta variação para duas latitudes (20° N e 20° S), em função da altitude, como pode ser visto na Figura 4.48. Nesta figura é possível verificar que os aumentos na amplitude que ocorrem em dezembro-janeiro e junho-julho são bem evidentes em ambas as latitude, porém apresentam variações de um ano para o outro. Em alguns anos estes aumentos são mais intensos e, em outros anos, não acontecem. Além disso, a distribuição em altitude destes aumentos também varia de um ano para outro.

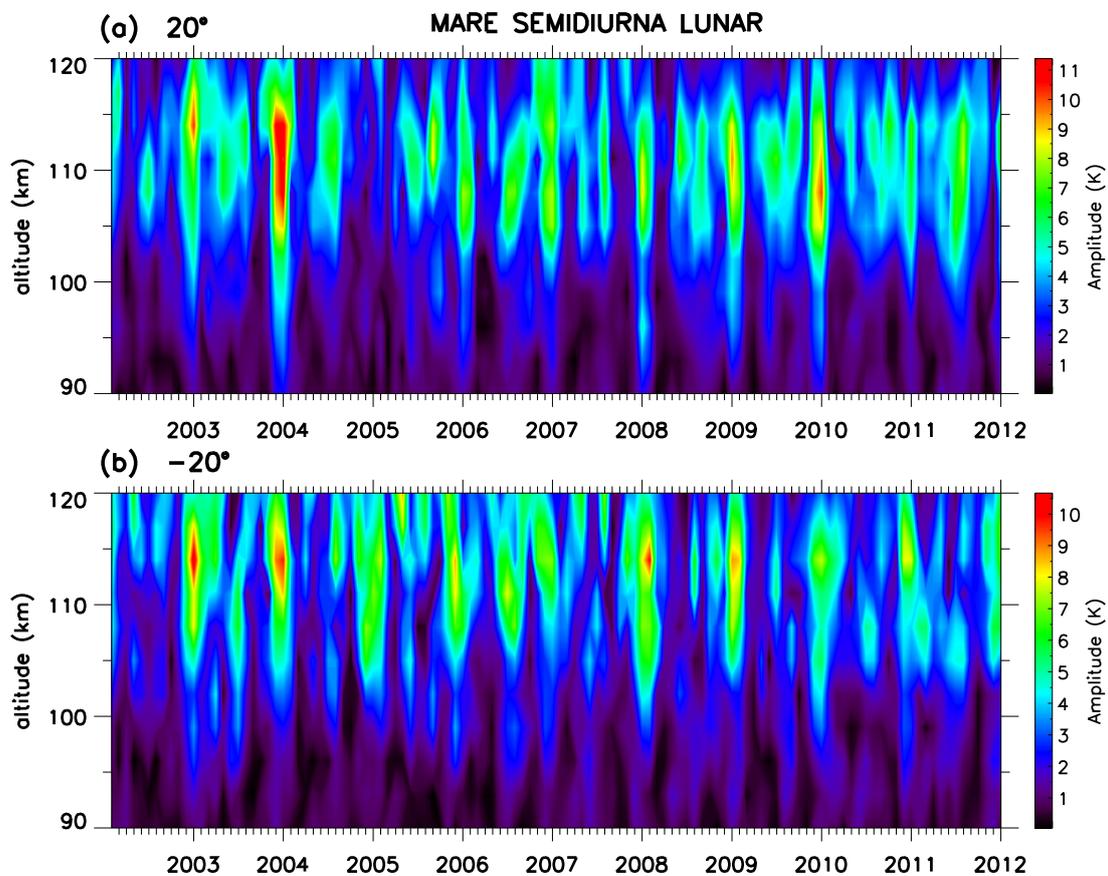


Figura 4.48 - Variação ano-a-ano da amplitude da maré semidiurna lunar com a altitude para as latitudes 20° N (a) e 20° S (b).

A Figura 4.49 mostra a variabilidade ano-a-ano da amplitude da maré lunar com relação a longitude para o mês de dezembro na altitude de 108 km. Pode ser vista uma clara variabilidade com os anos. Em 2004, por exemplo, picos de amplitude em relação a longitude são observados apenas no hemisfério sul. Já, em 2010, estas estruturas são observadas em ambos os hemisfério. Porém, em 2009, as variações longitudinais são mais pronunciadas no hemisfério norte.

Além disso, em alguns anos as estruturas de 3 picos são mais evidentes, enquanto que, em outros anos a estrutura de 4 picos também torna-se evidente. Baseado nos resultados mostrados acima é possível verificar que, embora a maré lunar apresente um padrão, como por exemplo os máximos que ocorrem em dezembro-janeiro, estes padrões mudam de ano para ano, ou seja, em alguns anos ocorrem com uma característica bem definida, já em outros anos não são observados.

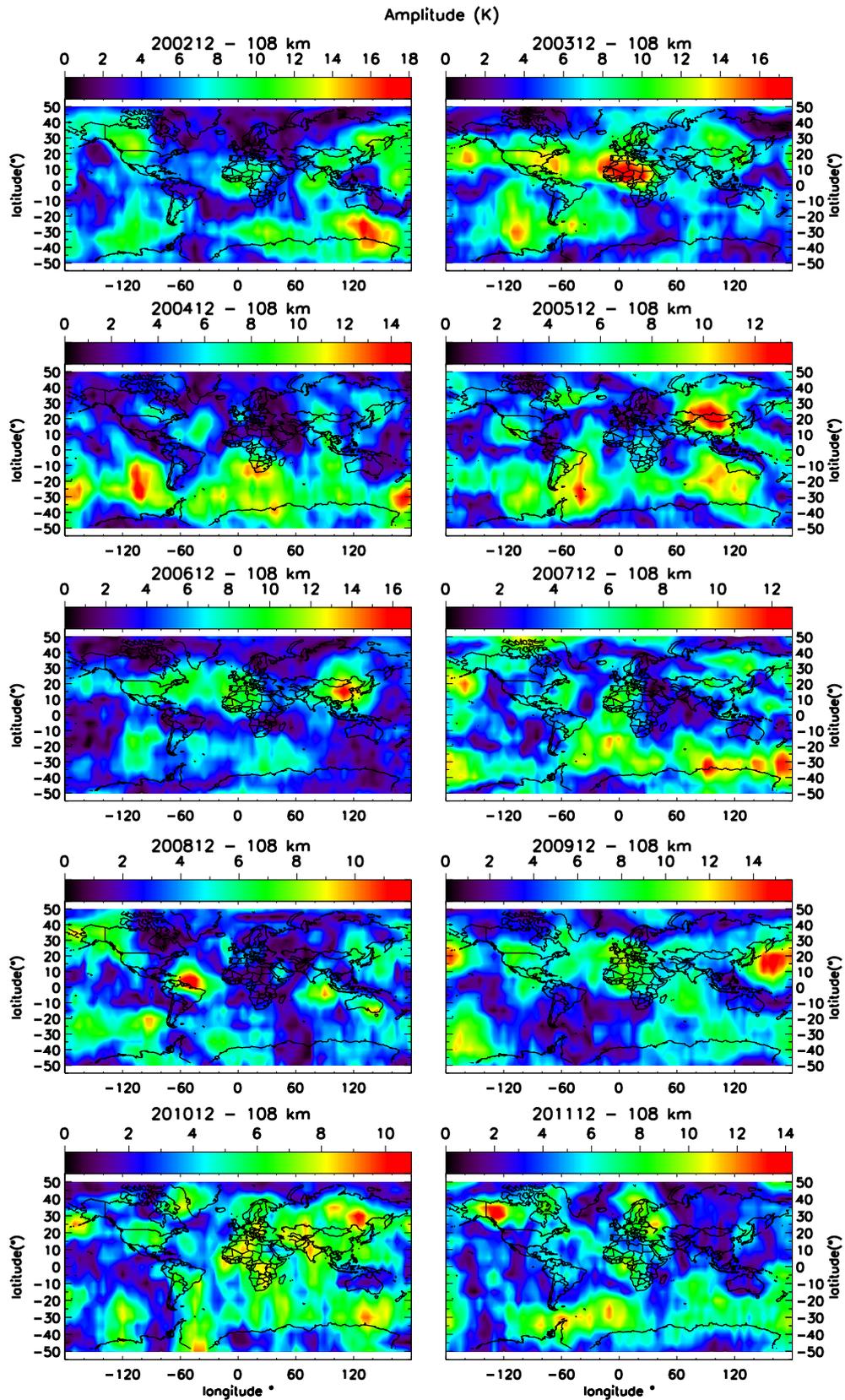


Figura 4.49 - Variação longitudinal da amplitude da maré semidiurna lunar para o mês de dezembro nos anos de 2002 a 2011 na altitude de 108 km.

Foi aplicado o processo de reconstrução de amplitudes da maré semidiurna lunar baseado na sobreposição das componentes migrante e não migrante desta oscilação para investigar a variabilidade temporal das componentes. A reconstrução foi aplicada para dois anos diferentes. A [Figura 4.50](#) mostra a reconstrução para o caso em que as variações longitudinais na amplitude da maré lunar são mais pronunciadas no hemisfério sul. No painel (a) é exibida a amplitude da maré semidiurna lunar para o mês de dezembro em 2004, no painel (b) a reconstrução realizada com base na sobreposição das componentes de maré e no painel (c) as componentes de maré utilizadas na reconstrução.

Neste caso, verifica-se que com a utilização da componente migrante SW2 e das componentes não migrantes SE2, SE1, S0, SW1, SW3, SW4 e SW6, as principais estruturas foram recuperadas. Assim como foi verificado para a análise climatológica, a componente migrante para apenas um ano também é assimétrica em relação ao equador e, neste caso, apresenta maiores amplitudes no hemisfério sul.

Como pode ser visto no painel (c), no hemisfério sul a componente migrante é dominante. Enquanto que, no hemisfério norte ou é da mesma ordem de magnitude ou apresenta valores menores que as componentes não migrantes. Na latitude de 30° S, região onde as estruturas em relação a longitude são mais pronunciadas, a componente não migrante SE2 seguida de SW3 apresentam maiores amplitudes. As componentes SW1 e SW6 apresentam a mesma magnitude, só que menores que SE2 e SW3. Para esta latitude S0 e SW5 apresentam as menores amplitudes. Além disso, vale destacar que a barra de desvio padrão utilizando apenas um ano de medida é bem menor do que as mostradas nas análises climatológicas ([Seção 4.3](#)).

Neste exemplo, as componentes não migrantes que são dominantes produzem estruturas de 1 e 4 picos em longitude. As demais componentes geram 3, 4, 2 e 3 picos, respectivamente.

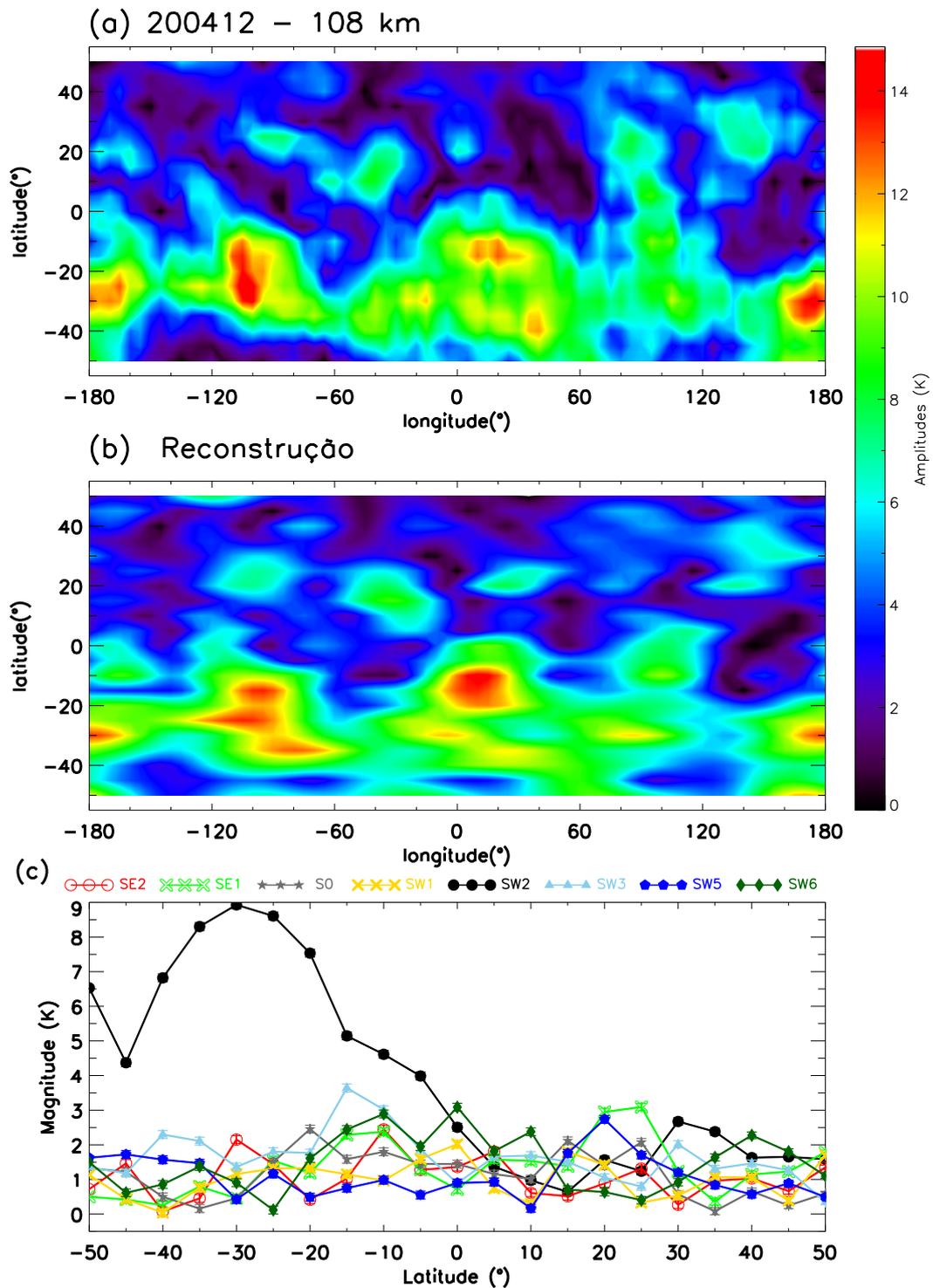


Figura 4.50 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para o mês de dezembro de 2004 na altitude de 108 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW5 e SW6. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

A Figura 4.51 mostra a reconstrução para o caso em que variações longitudinais são observadas em ambos os hemisférios. Neste exemplo, são observadas aproximadamente 4 estruturas em longitude no hemisfério norte (por volta da latitude de 20° N) e ± 2 estruturas no hemisfério sul. A componente migrante também apresenta um comportamento assimétrico, sendo que, as maiores amplitudes são obtidas no hemisfério norte. Além disso, a componente migrante é dominante em ambos os hemisférios.

Na latitude de 20° N, região em que os picos de amplitude em longitude são mais evidentes, a componente não migrante dominante é SW1. As componentes SW6, SE2, SW4 e SW5 apresentam amplitudes da mesma magnitude e são menores que SW1. S0 e SE1 apresentam as menores amplitudes. Já em 30° S, as componentes não migrantes dominantes são SE1 e SW4, seguidas pelas demais componentes que apresentam aproximadamente a mesma magnitude. A componente não migrante dominante pode gerar estruturas de 1 pico, seguida da contribuição de 4, 2, 3, 1, 2 e 3 estruturas, respectivamente.

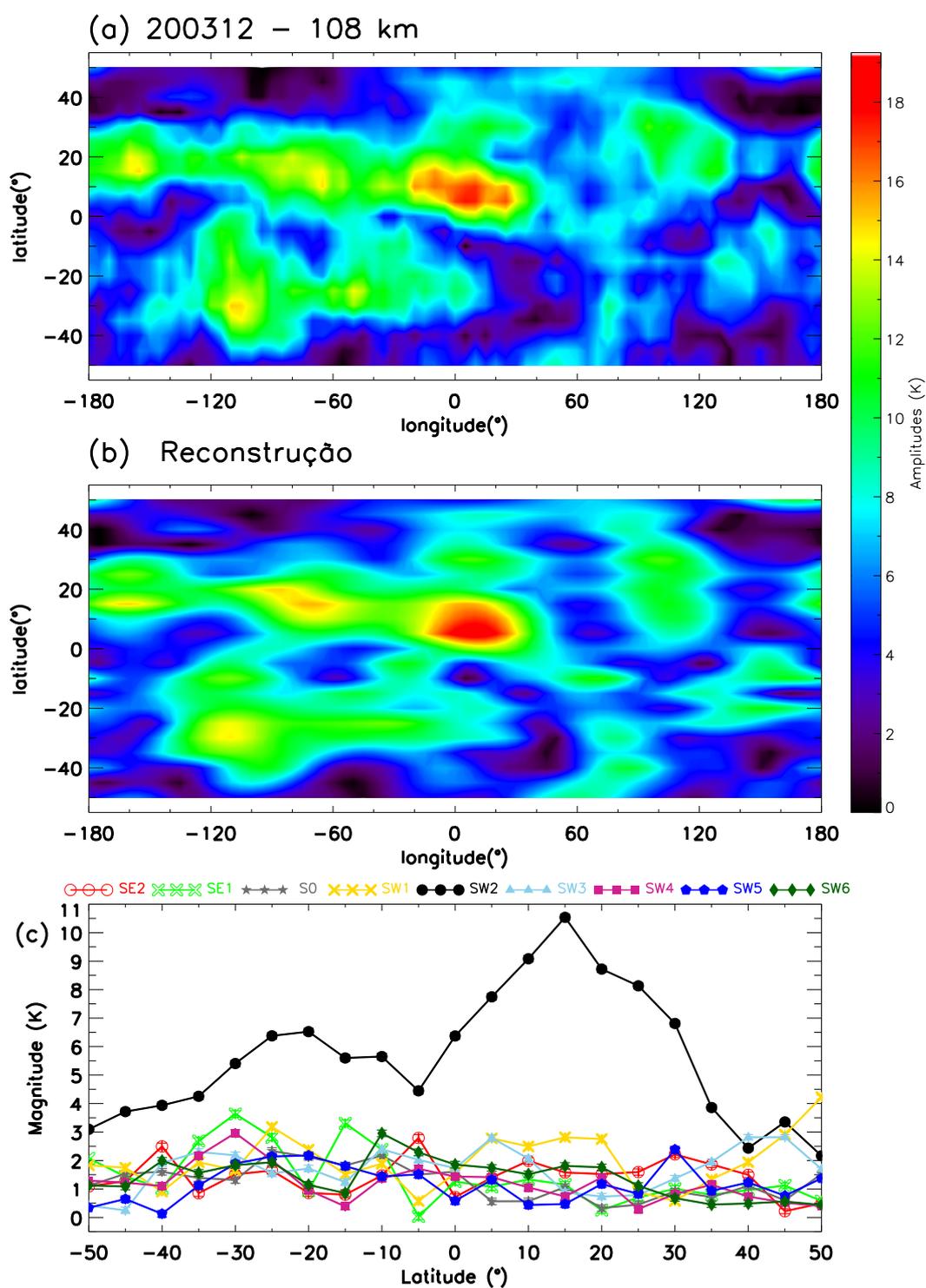


Figura 4.51 - (a) - Amplitude média mensal da maré semidiurna lunar para o mês de dezembro de 2003 na altitude de 108 km. (b) - Reconstrução da amplitude utilizando as componentes SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3, SW4, SW5 e SW6. (c) - Distribuição latitudinal das componentes migrante (linha contínua preta) e não migrantes (linhas coloridas).

As Figuras 4.52 e 4.53 mostram a variabilidade ano-a-ano das principais componentes não migrantes utilizadas na reconstrução da amplitude da maré lunar. A Figura 4.52 exibe a variação ano-a-ano para a latitude de 20° N das componentes não migrantes SE2 [painel (a)], SW6 [painel (b)], SE1 [painel (c)], SW5 [painel (d)], SW1 [painel (e)], SW3 [painel (f)], S0 [painel (g)] e SW4 [painel (h)]. A variabilidade ano-a-ano é bem evidente em todas as componentes de maré. Além disso, o comportamento ano-a-ano de cada componente é diferente. Por exemplo, as componentes SE2, SW6 e SW5 apresentam um aumento na amplitude em praticamente todos os anos entre junho e julho, no entanto, em SE1 esta característica já não é tão clara.

A Figura 4.53 ilustra a variabilidade ano-a-ano das componentes não migrantes na latitude de 30° S. Comparando a Figura 4.52 com a Figura 4.53, nota-se que a variabilidade de cada componentes também muda com a latitude. Nesta figura, a variabilidade ano-a-ano de cada componente também é bem evidente.

Como a fonte de excitação da maré lunar é previsível, a variabilidade temporal que foi mostrada nesta seção deve ser uma resposta de processo físicos e químicos que acontecem na atmosfera e que são capazes de modificar a estrutura e a dinâmica da mesma. Desta forma, a maré lunar responde a esses processo produzindo os padrões que foram mostrados. É importante destacar também que a complexidade dos processos físicos e químicos que podem produzir estes padrão é elevada e, portanto, uma explicação para esta variabilidade temporal ainda é objeto de pesquisas científicas.

Mudanças no vento básico e na temperatura da estratosfera e mesosfera podem afetar a maré lunar, à medida que esta se propaga para altitudes superiores. Desta maneira, eventos como o aquecimento estratosférico (que é um processo de grande escala que pode afetar o vento, a temperatura, a química e a atividade de ondas na média atmosfera) e a oscilação quase bienial (QBO, do inglês “Quasi-biennial oscillation”, que é uma oscilação de grande escala observada no escoamento zonal médio na estratosfera equatorial) podem ter um papel importante na geração da variabilidade ano-a-ano da maré lunar.

Através de simulação numérica, Stening et al. (1997) e Aso et al. (1981) mostraram que o aquecimento estratosférico e a oscilação quase-bienial podem afetar o comportamento da maré lunar. Trabalhos observacionais também já mostraram que aquecimentos estratosférico podem afetar a maré lunar (PAULINO et al., 2012; PARK et al., 2012; FEJER et al., 2011; FEJER et al., 2010).

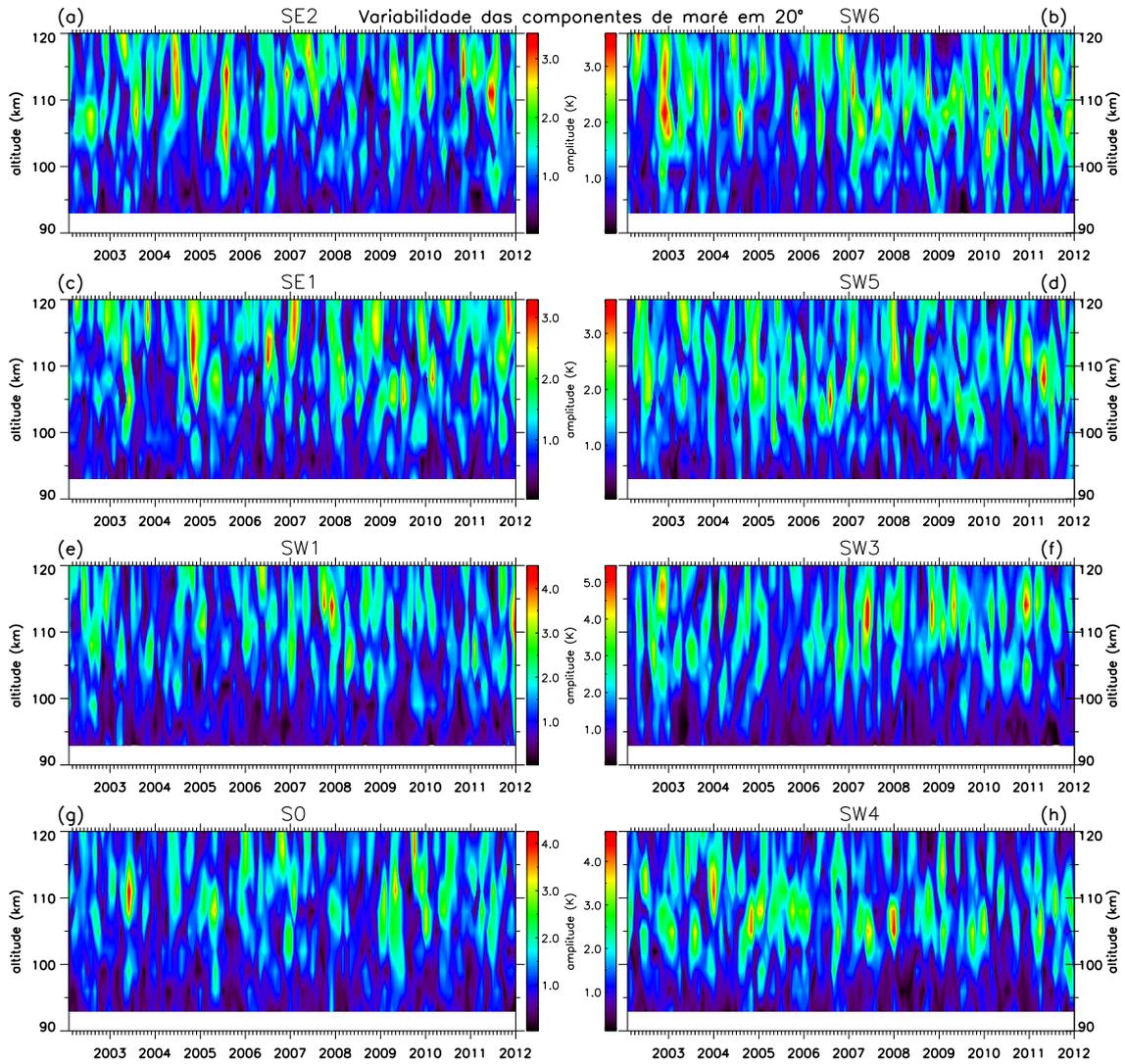


Figura 4.52 - Variação ano-a-ano da amplitude das principais componentes não migrantes SE2 (a), SW6 (b), SE1 (c), SW5 (d), SW1 (e), SW3 (f), S0 (g) e SW4 (h) da maré lunar nos anos de 2002 até 2012 e na latitude de 20° N.

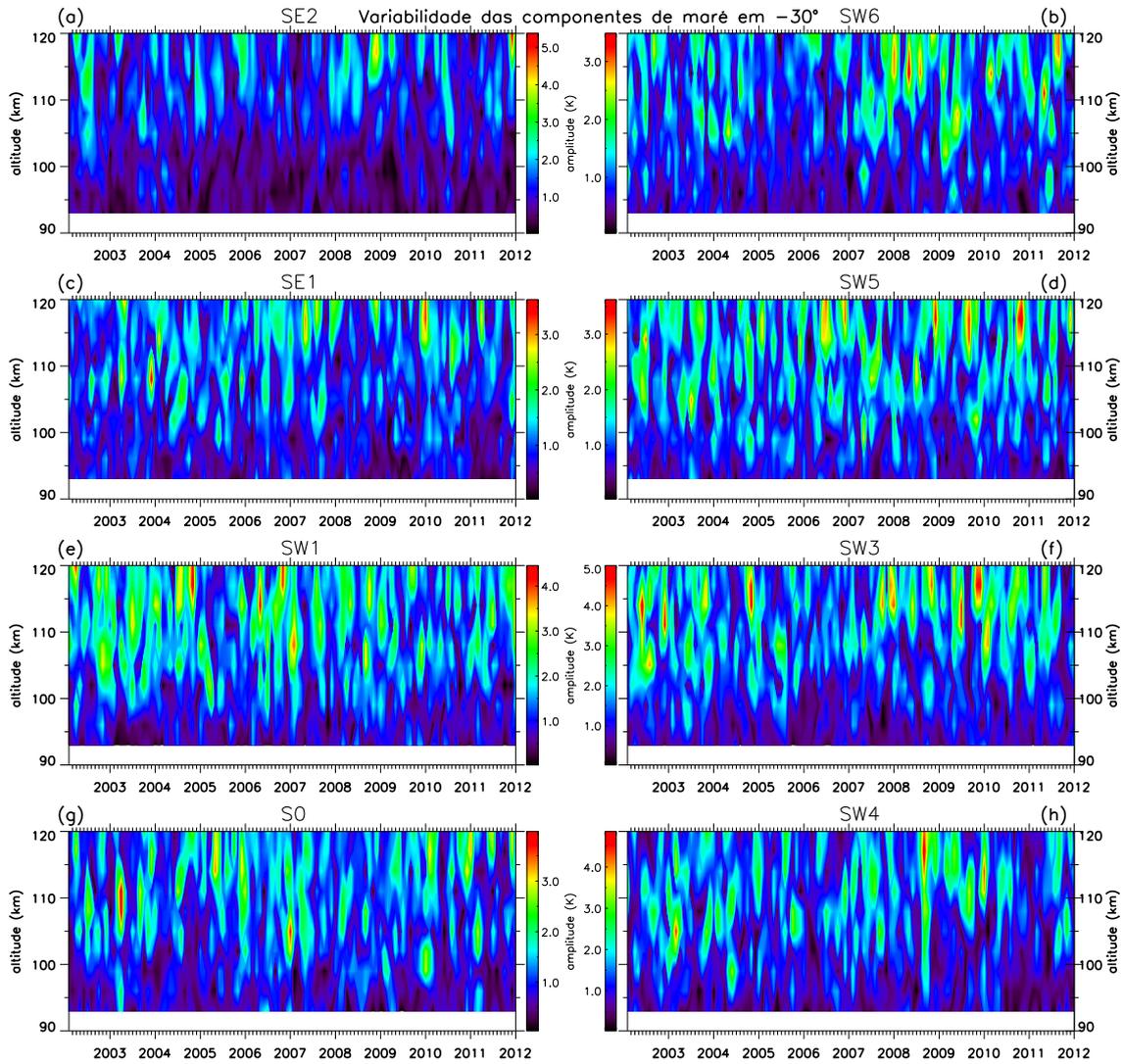


Figura 4.53 - Variação ano-a-ano da amplitude das principais componentes não migrantes SE2 (a), SW6 (b), SE1 (c), SW5 (d), SW1 (e), SW3 (f), S0 (g) e SW4 (h) da maré lunar nos anos de 2002 até 2012 e na latitude de 30° S.

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões deste trabalho de Tese e serão sugeridos alguns temas de pesquisa que poderão ser desenvolvidos utilizando as técnicas que foram desenvolvidas neste trabalho.

O presente estudo utilizou medidas de temperatura do instrumento SABER, que se encontra a bordo do satélite TIMED, com o intuito de analisar a estrutura global, da maré semidiurna lunar atmosférica. Para determinar a maré lunar numa perspectiva global foram utilizados dados de temperatura no intervalo de latitude de $\pm 50^\circ$, nas altitudes entre 20 km e 120 km e no período de fevereiro de 2002 a janeiro de 2012. Foram calculadas as amplitudes e as fases da maré semidiurna lunar utilizando 60 dias de medidas centradas em cada mês. Para estudar a climatologia desta oscilação no intervalo de 10 anos de dados, foram feitas médias vetoriais para cada mês, sobre todo o período. Também foram calculadas as contribuições das componentes migrante e não migrantes da maré semidiurna lunar nos mesmos intervalos especificados acima.

É possível concluir que a metodologia desenvolvida neste trabalho de tese pode ser utilizada para determinar a maré lunar em dados de satélite com um bom nível de confiança e observar o comportamento global desta oscilação em função da altitude e dos meses do ano.

Os resultados apresentados para a análise climatológica dos perfis verticais de amplitude e fase mostraram que, de uma maneira geral, a maré lunar possui características de uma onda verticalmente propagante para cima para praticamente todas as latitudes e meses abordados. A progressão da fase com o decréscimo da altitude é mais pronunciada na região em que a maré semidiurna lunar apresenta amplitudes mais elevadas. Esta oscilação se propaga através da mesosfera e alcança amplitudes máximas em altitudes próximas da região E da ionosfera. Nas altitudes superiores a 110 km, a amplitude da maré semidiurna lunar decresce rapidamente com a altitude para praticamente todos os dados analisados neste trabalho.

A maré semidiurna lunar na temperatura apresenta amplitudes mais elevadas nos meses de solstício, sendo que o solstício de dezembro possui valores maiores que o solstício de junho. Nos meses de equinócio foram observadas as menores amplitudes, mas no equinócio de março as amplitudes são menores do que no equinócio de setembro.

Um comportamento assimétrico em relação ao equador também foi observado na maré semidiurna lunar, o qual possui uma variação sazonal bem evidente. Este resultado sugere que os modos assimétricos contribuem significativamente com a propagação desta oscilação na atmosfera.

Este trabalho de tese confirmou que a maré semidiurna lunar apresenta variação longitudinal e, desta maneira, não é uma onda puramente migrante. Nas altitudes inferiores a 60 km a variação longitudinal possui um comportamento sazonal. Nas altitudes entre 90 km e 111 km foram observadas estruturas de 3-4 picos em longitude, principalmente nos meses de dezembro e setembro.

Através da análise de reconstrução da amplitude da maré, baseada na sobreposição de componentes, foi possível validar a observação das estruturas longitudinais da maré semidiurna lunar e eleger quais são as principais componentes não migrantes. A decomposição de componentes da maré lunar mostrou que a maré migrante é dominante e apresenta um comportamento assimétrico em relação ao equador para todo o período observado. Além disso, pode-se concluir que, embora as componentes não migrantes apresentem amplitudes pequenas em relação à componente migrante, elas são essenciais para geração das estruturas observadas na distribuição global da maré lunar. Sendo assim, as componentes não migrantes não podem ser desprezadas nos estudos da maré lunar.

As componentes de maré SE2, SE1, S0, SW1, SW2, SW3 e SW6 foram sempre utilizadas para reconstruir os padrões em longitude observados na amplitude da maré semidiurna lunar. As componentes SW2, SW1, SE1 e SE2 no mês de dezembro (20° N e 30° S) e SE3, SE1, SW2, SW4 e SW6 para o mês de setembro (20° N e 20° S) apresentaram uma progressão de fase com o decréscimo da altitude desde 20 km, indicando que a região da fonte dessas componentes encontra-se localizada abaixo desta altitude.

A já conhecida variabilidade ano-a-ano da maré semidiurna lunar também foi observada na amplitude, bem como nas componentes migrante e não migrantes no período analisado.

O presente trabalho também abre possibilidades para alguns trabalhos futuros que devem contribuir para o aprimoramento do conhecimento científico da maré semidiurna lunar na atmosfera. A seguir são listadas as sugestões de continuidade para este estudo:

- Decomposição de modos de Hough para a componente migrante da maré semidiurna com o objetivo de investigar quais modos de Hough podem explicar a assimetria na amplitude desta componente em relação ao equador, que foi observada e discutida neste trabalho;
- Verificar, por meio de simulações numéricas e observações, quais são os fenômenos que causam a variabilidade ano-a-ano da maré semidiurna lunar. Neste sentido, avaliar se a oscilação quase-bienial é mais efetiva que os aquecimentos estratosféricos para produzir esta variabilidade;
- Utilizar a metodologia adotada neste trabalho para estudar estruturas globais da maré lunar em outros campos atmosféricos, como por exemplo, na densidade medida pelo SABER, com dados de ventos medidos por outros satélites e instrumentos, com dados de Conteúdo Eletrônico total com uma resolução temporal maior que pode fornecer mais detalhes sobre as estruturas longitudinais;
- Verificar a resposta global da maré lunar atmosférica aos aquecimentos estratosféricos súbitos;
- Utilizar medidas globais de parâmetros ionosféricos obtidas por satélite para averiguar como os campos ionosféricos respondem à influência da maré lunar;
- Estender a metodologia empregada neste trabalho para tentar estudar as componentes diurna e terdiurna da maré lunar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABURROBB, M. F. K.; DUNFORD, E. A theoretical evaluation of the lunar tidal variations in the ionospheric F2-layer. **Planetary Space Science**, v. 23, p. 1071–1080, 1975. 29
- ASO, T.; NONOYAMA, T.; KATO, S. Numerical simulation of semidiurnal atmospheric tides. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, 1981. 2, 171
- BARTELS, J.; JOHNSTON, H. F. Geomagnetic tides in horizontal intensity at Huancayo. **Terr. Magnet. Atmos. Elec.**, v. 45, p. 269–308, 1940. 16
- BEVINGTON, P. R. **Data Reduction and error analysis for the physical sciences**. [S.l.]: McGraw-Hill Book Company, 1969. 67
- BROWN, R. A. Lunar tides in the equatorial sporadic-E layer. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 27, p. 855–870, 1965. 29
- CHAPMAN, S.; LINDZEN, R. S. **Atmospheric tides**. Newark, N. J.: Gordon and Breach, 1970. 1, 7, 14, 15, 16, 17, 55
- CHAPMAN, S.; WESTFOLD, K. C. A comparison of the annual mean solar and lunar atmospheric tides in barometric pressure, as regards their worldwide distribution of amplitude and phase. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 8, p. 1–23, 1956. 18, 117
- DOODSON, A. T. The harmonic development of the tide-generating potential. **Proc. Roy. Soc.**, p. 305–329, 1922. 15
- ECCLES, V.; RICE, D. D.; SOJKA, J. J.; VALLADARES, C. E.; BULLETT, T.; CHAU, J. L. Lunar atmospheric tidal effects in the plasma drifts observed by the Low-Latitude Ionospheric Sensor Network. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, 2011. Doi:10.1029/2010JA016282. 29
- EDWARDS, D. P.; LÓPEZ-PUERTAS, M.; LÓPEZ-VALVERDE, M. A. Non-LTE thermodynamic equilibrium studies of the 15- μm bands of CO_2 for atmospheric remote sensing. **J. Geophys. Res.**, v. 98, p. 14,955–14,977, 1993. 33
- FEJER, B. G.; OLSON, M. E.; CHAU, J. L.; STOLLE, C.; LUHR, H.; GONCHARENKO, L. P.; YUMOTO, K.; NAGATSUMA, T. Lunar-dependent equatorial ionospheric electrodynamic effects during sudden stratospheric warmings. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, 2010. 10.1029/2010JA015273. 2, 171

FEJER, B. G.; TRACY, B. D.; OLSON, M. E.; CHAU, J. L. Enhanced lunar semidiurnal equatorial vertical plasma drifts during sudden stratospheric warmings. **Geophysical Research Letters**, v. 38, 2011. 10.1029/2011GL049788. 2, 171

FORBES, J. M. Atmospheric tides 2. The solar and lunar semidiurnal components. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, p. A00G03–5252, 1982. 2, 20, 21, 22, 48, 91

FORBES, J. M.; GELLER, M. A. Lunar semidiurnal variation in OI (5577 Å) nightglow. **Journal of Geophysical Research**, v. 77, 1972. 29

FORBES, J. M.; GILLETE, D. F. **A compendium of theoretical atmospheric tidal structures**. [S.l.]: AFGL Tech. Report, 1982. 91

FORBES, J. M.; RUSSELL, J.; MIYAHARA, S.; ZHANG, X.; PALO, S.; MLYNCZAK, M.; MERTENS, C. J.; HAGAN, M. E. Troposphere-thermosphere tidal coupling as measured by the SABER instrument on TIMED during july-september 2002. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, 2006. 4

FORBES, J. M.; ZHANG, e. a. X. Lunar semidiurnal tide in the thermosphere under solar minimum conditions. **Journal of Geophysical Research**, 2013. 10.1029/2012JA017962. 3, 30, 41, 51, 101, 102

FRIEDMAN, J. S.; ZHANG, X.; CHU, X.; FORBES, J. M. Longitude variations of the solar semidiurnal tides in the mesosphere and lower thermosphere at low latitudes observed from ground and space. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, 2009. 4

GELLER, M. A. An investigation of the lunar semidiurnal tide in the atmosphere. **J. Atmos. Sci.**, v. 27, p. 202–218, 1970. 2

HANDA, S.; MAEDA, H. A numerical study of the lunar tide in the mid-latitude f_2 -region of the ionosphere-I. oscillations of the electron density. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 40, p. 395–404, 1978. 29

_____. A numerical study of the lunar tide in the mid-latitude F₂-region of the ionosphere-II. oscillations of the ion and neutral gas velocities. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 40, p. 405–408, 1978. 29

HAURWITZ, B.; COWLEY, A. D. The lunar barometric tide, its global distribution and annual variation. **Pure Appl. Geophys.**, v. 75, p. 1–29, 1970. 3, 19, 20, 101, 105, 117, 155

- HOLLINGSWORTH, A. The effect of Ocean and Earth tides on the semi-diurnal lunar air tide. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 28, p. 1021–1044, 1971. 2, 119
- HURUHATA, M. Lunar tidal effect on the Oxygen Green Line in the night Airglow. **Journal of Geophysical Research**, v. 70, 1965. 29
- KATO, S. Non-migrating tides. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 51, p. 673–682, 1989. 18
- KOTADIA, K. M. The equatorial sporadic-E layer and the electrojet. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 24, p. 211–218, 1962. 29
- LAMB, H. **Hydrodynamics**. New York: New York: Dover Publications, 1932. 15
- LÓPEZ-PUERTAS, M.; ZARAGOZA, G.; LÓPEZ-VALVERDE, M. A.; TAYLOR, F. W. Non local thermodynamic equilibrium (LTE) atmospheric limb emission at $4.6 \mu\text{m}$.1. An update of the CO_2 non-LTE radiative transfer model. **J. Geophys. Res.**, v. 103, p. 8499–8513, 1998. 34
- LUHR, H.; SIDDIQUI, T. A.; MAUSS, S. Global characteristics of the lunar tidal modulations of the equatorial electrojet derived from CHAMP observations. **Annales Geophysicae**, v. 30, p. 527–536, 2012. 10.5194/angeo-30-527-2012. 3, 30
- MARSHALL, B. T.; GORDLEY, L. L.; CHU, D. A. BANDPARK: Algorithms for modeling broadband transmission and radiance. **J. Quant. Spectrsc. Radiat. Transfer**, v. 52, p. 581–599, 1994. 33
- MATSUSHITA, S. Lunar effects on the equatorial Es. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 10, p. 163–165, 1956. 29
- _____. Lunar tides in the ionosphere. **Handb Phys.**, v. 49, p. 547–602, 1967. 103
- MATSUSHITA, S.; MAEDA, H. On the geomagnetic lunar daily variation field. **Journal of Geophysical Research**, v. 70, p. 2559–2578, 1965. 29
- MCLANDRESS, C.; WARD, W. E. Tidal/gravity wave interactions and their influence on the large-scale dynamics of the middle atmosphere: model results. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 8139–8156, 1994. 151
- MEEK, C. E.; MANSON, A. H.; DRUMMOND, J. R. Test of diurnal and semidiurnal tidal analysis of temperatures from SABER-like sampling of a realistic global model, CMAM-DAS. **Annales Geophysicae**, v. 29, p. 723–730, 2011. 4

MERTENS, C. J.; MLYNCZAK, M. G.; LÓPEZ-PUERTAS, M.; WINTERSTEINER, P. P.; PICARD, R. H.; WINICK, J. R.; GORDLEY, L. L.; III, J. M. R. Retrieval of mesospheric and lower thermospheric kinetic temperature from measurements of CO₂ 15 μm Earth limb emission under non-LTE conditions. **Geophysical Research letters**, v. 28, p. 1391–1394, 2001. 35, 37

_____. Retrieval of kinetic temperature and carbon dioxide abundance from non-local thermodynamic equilibrium limb emission measurements made by the SABER experiment on the TIMED satellite. **Proc. SPIE, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere VII**, p. 162–171, 2002. 33, 35

MISRA, R. K. Lunar tidal oscillations in the horizontal ionospheric drift at the equator. **Planetary Space Science**, v. 21, p. 1109–1114, 1973. 29

MLYNCZAK, M. G.; OLANDER, D. S.; LÓPEZ-PUERTAS, M. Rapid computation of spectrally integrated non-LTE limb emission. **J. Geophys. Res.**, v. 99, p. 25,761–25,772, 1994. 33

MUKHTAROV, P.; PANCHEVA, D.; ANDONOV, B. Global structure and seasonal and interannual variability of the migrating diurnal tide seen in the SABER/TIMED temperatures between 20 and 120 km. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 114, 2009. Doi:10.1029/2008JA013759. 4

NIU, X.; XIONG, J.; WAN, W.; NING, B.; LIU, L.; VINCENT, R. A.; REID, I. M. Lunar tidal winds in the mesosphere over Wuhan and Adelaide. **Advances in Space Research**, v. 36, p. 2218–2222, 2005. 25

OBERHEIDE, J.; WU, Q.; KILLEEN, T. L.; HAGAN, M. E.; ROBLE, R. G. Diurnal nonmigrating tides from TIMED Doppler Interferometer wind data: Monthly climatologies and seasonal variations. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, 2006. Doi:10.1029/2005JA011491. 4

PANCHEVA, D.; MUKHTAROV, P.; ANDONOV, B. Nonmigrating tidal activity related to the sudden stratospheric warming in the arctic winter of 2003/2004. **Annales Geophysicae**, v. 27, p. 975–987, 2009. 4

_____. Global structure, seasonal and interannual variability of the eastward tides SABER/TIMED temperatures (2002-2007). **Advances Space Research**, v. 46, p. 257–274, 2010. Doi:10.1016/j.asr.2012.03.026. 4, 18

PANCHEVA, D.; MUKHTAROV, P.; SMITH, A. K. Climatology of the migrating terdiurnal tide (TW3) in SABER/TIMED temperatures. **Journal of Geophysical Research**, v. 118, p. 1755–1767, 2013. 4

PARK, J.; LUHR, H.; KUNZE, M.; FEJER, B. G.; MIN, K. W. Effect os sudden stratopheric warming on lunar tidal modulation of the equatorial electrojet. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, 2012. 10.1029/2011JA017351. 2, 30, 171

PAULINO, A.; BATISTA, P.; CLEMESHA, R. Lunar tides in the mesosphere and lower thermosphere over Cachoeira Paulista (22.7°s; 45.0°w). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 78-79, n. 0, p. 31 – 36, 2012. ISSN 1364-6826. <ce:title>Structure and Dynamics of Mesosphere and Lower Thermosphere</ce:title>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682611001295>>. 2, 25, 51, 91

PAULINO, A. R.; BATISTA, P. P.; BATISTA, I. S. A global view of the atmospheric lunar semidiurnal tide. **Journal of Geophysical Research**, 2013. Submetido. 5

PAULINO, A. R.; BATISTA, P. P.; CLEMESHA, B. R.; BURITI, R. A.; SCHUCH, N. An enhancement of the lunar tide in the MLT region observed in the brazilian sector during 2006 SSW. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 2012. 10.1016/j.jastp.2011.12.015. 2, 3, 25, 26, 28, 171

PAULINO, A. R. d. S. **Maré lunar observada com radar meteórico em três latitudes no Brasil**. 97 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010-02-19 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2010/02.04.15.32>>. Acesso em: 14 out. 2013. 2, 54, 67

PEDATELLA, N. M.; FORBES, J. M. Global structure of the lunar tide in ionospheric total electron content. **Geophysical Research Letters**, v. 37, 2010. 10.1029/2010GL042781. 3, 29, 101, 119

PEDATELLA, N. M.; LIU, e. a. H. L. Atmospheric semidiurnal lunar tide climatology simulated by the Whole Atmosphere Community Climate Model. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, p. 117(A6): A06327, 2012. Doi:10.1029/2012JAO17792. 25, 66, 101, 119

_____. Simulations of solar and lunar tidal variability in the mesosphere and lower thermosphere during sudden stratosphere warmings and their influence on the low-latitude ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, 2012.

Doi:10.1029/2012JAO17858. 2, 25

RASTOGI, R. G.; CHANDRA, H.; SETHIA, G. Solar and lunar variations in TEC at low latitudes in India. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 47, p. 309–317, 1985. 29

RAY, R. D.; LUTHCKE, S. B. Tide model errors and GRACE gravimetry: towards a more realistic assessment. **Geophysical Journal International**, v. 167, n. 3, p. 1055–1059, 2006. 51

REMSBERG, E. E.; MARSHALL, B. T.; GARCIA-COMAS, M.; KRUEGER, D.; LINGENFELSER G. S. MARTIN-TORRES, J.; MLYNCZAK, M. G.; III, J. M. R.; SMITH, A. K.; ZHAO, Y.; BROWN C. GORDLEY, L. L.; LOPEZ-GONZALEZ, M. J.; LOPEZ-PUERTAS, M.; SHE, C.-Y.; TAYLOR, M. J.; THOMPSON, R. E. Assessment of the quality of the version 1.07 temperature-versus-pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, p. D17101, 2008. Doi:10.1029/2008JD010013. 67, 68, 69

RODGERS, C. D. Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation. **Rev. Geophys. Space Phys**, v. 14, p. 609–624, 1976. 34

SABINE, E. On the lunar atmospheric tide at St. Helena. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 137, p. 45–50, 1847. 19

SANDFORD, D. J.; MITCHELL, N. J. Lunar tides in the mesosphere over Ascension Island (8° S, 14.4° W). **Annales Geophysicae**, v. 25, p. 9–12, 2007. 1, 3, 26, 51, 91

SANDFORD, D. J.; MITCHELL, N. J.; VINCENT, R. A.; MURPHY, D. J. The lunar tides in the Antarctic mesosphere lower thermosphere. **Journal Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 69, p. 2219–2237, 2007. Doi:10.1016/j.jastp.2007.04.010. 1, 3, 26, 151

SANDFORD, D. J.; MULLER, H. G.; MITCHELL, N. J. Observations of lunar tides in the mesosphere and lower thermosphere at Arctic and middle latitudes. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, p. 4117–4127, 2006. 1, 26

- SAWADA, R. The atmospheric lunar tides and the temperature profile in the upper atmosphere. **Geophys. Mag.**, v. 27, p. 213–236, 1956. 17
- _____. The possible effect of Ocean on the atmospheric lunar tide. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 22, p. 636–643, 1965. 119
- SIEBERT, M. Atmospheric tides. **Advances in Geophysics**, v. 7, p. 105–182, 1961. 15
- STENING, R. J. The lunar tide in sporadic E. **Annales Geophysicae**, v. 17, p. 1344–1351, 1999. 29
- STENING, R. J.; AVERY, S. K.; TETENBAUM, D. Observations of lunar tides in upper atmosphere winds at Poker Flat, Alaska. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 52, p. 715–721, 1990. 25, 26
- STENING, R. J.; FEJER, B. G. Lunar tide in the equatorial F region vertical ion drift velocity. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, p. 221–226, 2001. 29
- STENING, R. J.; FORBES, J. M.; HAGAN, M. E.; RICHMOND, A. D. Experiments with a lunar atmospheric tidal model. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 13465–13471, 1997. 2, 23, 24, 72, 171
- STENING, R. J.; JACOBI, C. Lunar tidal winds in the upper atmosphere over Collm. **Annales Geophysicae**, v. 18, p. 1645–1650, 2001. 1, 3, 72, 91, 159
- STENING, R. J.; MANSON, A. H.; MEEK, C. E.; VINCENT, R. A. Lunar tidal winds at adelaide and saskatoon at 80 to 100 km heights. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 13273, 1994. 1, 25, 159
- STENING, R. J.; MEEK, C. E.; MANSON, A. H. Lunar tidal winds measured in the upper atmosphere (78-105 km) at Saskatoon, Canada. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 44, p. 1143–1151, 1987. 25, 91
- STENING, R. J.; RASTOGI, R. G. Variations of the lunar geomagnetic tide in the Indian region. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, p. 471–477, 2002. 159
- STENING, R. J.; TSUDA, T.; NAKAMURA, T. Lunar tidal winds in the upper atmosphere over Jakarta. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, 2003. Doi:10.1029/2002JA009528. 25, 51, 91, 159

- STENING, R. J.; VINCENT, R. A. A measurement of lunar tides in the mesosphere at Adelaide, South Australia. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, p. 10,121–10,129, 1989. 25, 51, 91
- TARPLEY, J. D.; MATSUSHITA, S. The lunar tide in fbEs. **Radio Science**, v. 6, p. 191–196, 1971. 29
- _____. Lunar influences on sporadic E. **Radio Science**, v. 7, p. 411–416, 1972. 29
- VIAL, F.; FORBES, J. M. Monthly simulations of the lunar semi-diurnal tide. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 56, p. 1591–1607, 1994. 2, 95, 100, 117
- WRIGHT, R. W.; SKINNER, N. J. Lunar tides in the sporadic E-layer at Ibadan. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 13, p. 217–221, 1959. 29
- ZHANG, J. T.; FORBES, J. M. Lunar tidal winds between 80 and 110 km from UARS/HRDI wind measurements. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 118, p. 5296–5304, 2013. Doi:10.1002/jgra.50420. 29
- ZHANG, X.; FORBES, J. M.; HAGAN, M. E.; III, J. M. R.; PALO, S. E.; MERTENS, C. J.; MLYNCZAK, M. G. Monthly tidal temperatures 20-120 km from TIMED/SABER. **Journal of Geophysical Research (Space Physics)**, v. 111, 2006. Doi:10.1029/2005JA011504. 122
- ZHU, X.; YEE, J.-H.; TALAAT, E. R.; MLYNCZAK, M.; GORDLEY, L.; MERTENS, C. An algorithm for extracting zonal mean and migrating tidal fields in the middle atmosphere from satellite measurements: Applications to TIMED/SABER - measured temperature and tidal modeling. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, p. D02105, 2005. Doi:10.1029/2004JD004996. 44