



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM FÍSICA
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA

Wellington Benevenuto de Lima

Investigações da maré atmosférica lunar na concentração de meteoros sobre o Brasil

Campina Grande, Paraíba, Brasil

26 de outubro de 2021

Wellington Benevenuto de Lima

Investigações da maré atmosférica lunar na concentração de meteoros sobre o Brasil

Dissertação realizada sob orientação do Prof. Dr. Igo Paulino da Silva e da Prof^a. Dr^a. Ana Roberta da Silva Paulino, apresentada à Unidade Acadêmica de Física em complementação aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Professor Dr. Igo Paulino da Silva

Coorientador: Professora Dr^a. Ana Roberta da Silva Paulino

Campina Grande, Paraíba, Brasil

26 de outubro de 2021

L273i Lima, Wellington Benevenuto de.
Investigações da maré atmosférica lunar na concentração de meteoros sobre o Brasil / Wellington Benevenuto de Lima. – Campina Grande, 2021.
86 f.: il. : color.

Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2021.
"Orientação: Prof. Dr. Igo Paulino da Silva; Coorientação: Prof.^a Dr.^a. Ana Roberta da Silva Paulino".
Referências.

1. Maré Lunar. 2. Radar Meteorológico. 3. Ondas Atmosféricas. I. Silva, Igo Paulino da. II. Paulino, Ana Roberta da Silva. III. Título.

CDU 551.466.7(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM FISICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

WELLINGTON BENEVENUTO DE LIMA

Investigações da maré atmosférica lunar na concentração de meteoros sobre o Brasil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Física.

Aprovada em: 31/08/2021

Igo Paulino da Silva
Presidente da Comissão e Orientador

Ana Roberta Paulino
Coorientadora

Ricardo Arlen Buriti da Costa
Examinador Interno

Christiano Garnett Marques Brum
Examinador Externo



Documento assinado eletronicamente por **IGO PAULINO DA SILVA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/09/2021, às 21:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Roberta da Silva Paulino, Usuário Externo**, em 15/09/2021, às 08:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **RICARDO ARLEN BURITI DA COSTA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 17/09/2021, às 16:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Christiano Garnett Marques Brum, Usuário Externo**, em 18/10/2021, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1698618** e o código CRC **E102A544**.

Aos meus pais, Maria do Socorro da Silva Lima e Reginaldo Benevenuto da Silva.

Agradecimentos

- Ao Professor Dr. Igo Paulino da Silva, pela orientação, conselhos e toda a disponibilidade para reuniões e retiradas de dúvidas. Agradeço imensamente a motivação, a paciência e por manter a empolgação pela pesquisa até o momento final desse processo.
- A professora Dr.^a Ana Roberta Paulino da Silva, pela co-orientação que recebi e recebo desde o início da graduação. Agradeço imensamente todo apoio, conselho, paciência e disponibilidade para reuniões e retiradas de dúvidas, mesmo em uma época tão difícil como esta.
- Ao professor Dr. Lourivaldo Mota Lima pelas aulas, apoio, disponibilidade e conselhos que vem desde a graduação. Ao professor Dr. Ricardo Arlen Buriti pelas aulas, ensinamentos e conversas agradáveis que sempre motivou. Ao professor Dr. João Rafael pelas agradáveis aulas de mecânica quântica e por sempre auxiliar nos tramites de documentos necessários para a conclusão deste curso.
- Aos meus pais: Reginaldo Benevenuto da Silva e Maria do Socorro da Silva Lima; aos meus irmãos e sobrinha: Washington Benevenuto de Lima, Erika Wanda Benevenuto de Lima e karen Rebeca Benevenuto. Aos quais sempre me motivaram e me apoiaram nos estudos.
- Aos meus colegas e amigos de curso que me apoiaram e me auxiliaram no desenvolvimento da pesquisa: Emerson Eduardo, Luiz Phillip e Wesley Barros.
- Aos colegas e amigos que diretamente e indiretamente me auxiliaram na construção desse trabalho em um momento tão difícil de pandemia: André Costa, Deiverson Reinan, Diego Oliveira, Erick Costa, Iago Renan, Jeffrey Tyrone, Rodrigo Rayton, Rinaldo Vieira e Victor Hugo.
- Ao amigo e ex-chefe Eudenio de Souza, que marcou o início dessa caminhada ao me aconselhar na persistência do caminho dos estudos.
- À CAPES pelo suporte financeiro.

“A ciência brasileira respira por aparelhos, mas não esmorece, nem deixa de dar demonstrações múltiplas do alto grau de competência e reconhecimento internacional de seus cientistas”.(Miguel Nicolelis)

Resumo

A atmosfera terrestre funciona como uma camada protetora e a todo momento é bombardeada por meteoroides. Quando esses meteoroides adentram a atmosfera começam a colidir com as moléculas encontradas e passam a se desintegrar. Em meio a esse processo de colisão, os meteoroides e as moléculas em seu caminho iniciam processo de vaporização, ao qual se formam trilhas ionizadas chamadas de meteoros. Estas trilhas aquecidas e ionizadas são bastantes importantes, pois têm a propriedade de refletir ondas de rádio, se tornando assim uma ferramenta fundamental nos estudos da dinâmica da atmosfera na região da Mesosfera e da baixa Termosfera (MLT). Usando dados coletados entre 2000 e 2020 por dois radares de meteoros localizados em Cachoeira Paulista ($22,7^\circ$ S; $45,0^\circ$ O) e São João do Cariri ($7,4^\circ$ S; $36,5^\circ$ O), as marés atmosféricas lunares diurna e semidiurna foram estudadas no pico de concentração dos meteoros e na largura da camada atmosférica. Para determinação do pico de concentração de meteoros, utilizou-se um ajuste gaussiano para as altitudes dos ecos determinados com uma janela móvel horária de três horas. Calculou-se um residual e retirou a influência das componentes solar dos mesmos. Em seguida foi feita a conversão para o tempo lunar e foi aplicado o método dos mínimos quadrados em meses compostos com todos os anos para cada localidade. O mesmo procedimento foi feito para o estudo da largura da camada, em que ao invés do uso do pico de concentração dos meteoros usou-se a largura total na metade do máximo (FWHM) do ajuste gaussiano feito na distribuição dos meteoros com a altitude. Os resultados obtidos revelaram a influência da maré lunar no pico de concentração de meteoros e na largura da camada. No pico da camada a componente diurna foi vista por dois meses em ambas as localidades nos solstícios, já a semidiurna foi vista por quase todo o ano composto, salvo os meses em que a componente diurna também foi detectada, suas maiores amplitudes ocorreram nos meses de equinócios. Nos dados da largura da camada, as marés lunares apresentaram menos influência do que no pico de concentração. As amplitudes da maré lunar tanto para o pico como para a largura da camada foram maiores para os dados de menor latitude em São João do Cariri.

Palavras-chave: Maré lunar; radar meteórico; ondas atmosféricas.

Abstract

The atmosphere works as a protector layer and all the time it is bombarded by meteoroids. When those meteoroids get in the atmosphere, they start to colliding with molecules and pass to disintegrate. This collision process, the meteoroids and the molecules found in its path produce vaporization, in which form ionized trails called meteors. These heated and ionized trails are quite important because they have the property to reflect radio waves, becoming a fundamental tool in the atmosphere dynamic studies in the Mesosphere and Low Thermosphere region (MLT). Using collected data between 2000 and 2020 by two meteor radars located in Cachoeira Paulista (22.7° S; 45.0° W) and Sao Joao do Cariri (7.4° S; 36.5° W), diurnal and semidiurnal lunar atmospheric tides were studied in their meteor concentration peak and in the atmospheric layer width. To the determination of the meteors concentration peak, a Gaussian adjustment was used for the altitudes of the determined echoes with a three hour movable hourly window. A residual was calculated and the influence of the solar components were removed from them. Then the conversion was made to the lunar time and it was applied a minimum squares method in compound months with every year to each location. The same procedure was made to the layer width study, which instead of the use of the meteors peak of concentration it was used the Full Width Half Maximum (FWHM) of the Gaussian adjustment made in the meteor distribution with altitude. The obtained results showed the influence of the moon tide in the meteors concentration peak and the layer width. In the layer peak, the diurnal component was seen by two months in both locations on the solstices, yet the semidiurnal was seen by almost all the compound year, except the months in which the diurnal component was also detected, their biggest amplitudes occurred in the equinoxes months. In the layer width data, the lunar tides showed less influence than the concentration peak. The lunar tide amplitudes were bigger for both peak and layer width were bigger to the data of less latitude in Sao Joao do Cariri.

Keywords: Lunar tide; meteoric radar; atmospheric waves.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – A estrutura de um cometa.	32
Figura 2.2 – Ilustração de interação de um meteoróide com a atmosfera: [1] Pré-aquecimento; [2] Ablação; [3] Voo obscuro do núcleo de meteoróide que restou da ablação; [4] Impacto do meteoróide com a superfície terrestre: meteorito.	34
Figura 2.3 – Rotação da Terra mostra que a direção de seu movimento orbital (ápex) corresponde sempre ao amanhecer de um observador.	36
Figura 3.1 – (a) Distribuição vertical da temperatura na homosfera e heterosfera; (b) Variação com a altura dos principais componentes na atmosfera.	37
Figura 3.2 – Representação das Fases da Lua. Nessa Figura, a órbita que a Lua descreve em torno da Terra visualizada por um observador externo olhando para o Polo Sul terrestre é representada ao longo da elipse. A outra parte da figura mostra a configuração da Lua visualizada por um observador no hemisfério Sul da Terra.	41
Figura 3.3 – Esquema de três Luas Novas consecutivas.	42
Figura 3.4 – Configuração da relação entre o tempo solar e lunar e do ângulo da fase lunar.	43
Figura 4.1 – Configuração para o radar biestático (<i>forward-scatter</i>).	46
Figura 4.2 – Configuração para o radar monoestático (<i>backscatter</i>).	46
Figura 4.3 – Esquema das antenas transmissora e receptora do radar SKiYMET.	47
Figura 4.4 – Esquema mostrando a altura do meteoro Z e o alcance R	49
Figura 4.5 – Abrangência dos dados em uma distribuição normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 1$	52
Figura 4.6 – FWHM de uma distribuição normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 1$	53
Figura 5.1 – Localização dos observatórios de São João do Cariri (7,4° S; 36,5° O), Cachoeira Paulista (22,7° S; 45,0° O)	55
Figura 5.2 – Processo de filtragem dos dados coletados pelo radar meteórico de Cachoeira Paulista no dia 03 de janeiro de 2000. O painel [a] mostra a retirada dos dados fora do ângulo zenital permitido (em vermelho). Painel [b] exhibe a retirada dos dados não ambíguos (azul).[c] Histograma da distribuição vertical de ocorrência de meteoros registrados a cada 2 km de altitude. [d] Gráfico boxplot dos meteoros. [e] Gráfico da distribuição normal dos meteoros.	56

Figura 5.3 – Fluxo horário (UT) de meteoros não ambíguos dos mesmos dados da Figura 5.2. Cada painel apresenta um histograma da distribuição vertical de ocorrência de meteoros registrados a cada 2 km de altitude. No eixo das abscissas tem-se a quantidade de meteoros não ambíguos e no eixo das ordenadas as altitudes em km. Na legenda tem-se a quantidade de dados (n°) daquele horário.	57
Figura 5.4 – Cada painel apresenta um histograma da distribuição vertical de ocorrência de meteoros registrados a cada 2 km de altitude para aquela hora composta. No eixo das abscissas tem-se a quantidade de meteoros não ambíguos e no eixo das ordenadas as altitudes em km. Na legenda tem-se a quantidade de dados (n°) daquele horário e o valor do pico (P) do ajuste de gaussiano (linha sólida vermelha) dos dados.	59
Figura 5.5 – Evolução das alturas horárias dos picos de meteoros (em preto) coletados pelo radar de Cachoeira Paulista [painel superior] e São João do Cariri [painel inferior]. Linha sólida em vermelho indica a média de duração de 30 dias.	60
Figura 5.6 – Ano composto para os dados médios diários dos picos de concentração de meteoros. Em preto os dados de Cachoeira Paulista e em vermelho os de São João do Cariri.	60
Figura 5.7 – Perfil residual horário dos dados de Cachoeira paulista [painel superior] e São João do Cariri [painel inferior].	61
Figura 5.8 – [a] Análise de Lomb-Scargle com frequências (ciclo por dia solar) entre 0,5 e 2,5 para os resíduos do pico da camada calculados do radar de Cachoeira Paulista. [b] Redução dos limites de frequência para maré lunar diurna M_1 . [c] Redução dos limites de frequência para maré lunar semidiurna M_2	62
Figura 5.9 – Análise de Lomb-Scargle para os resíduos do pico da camada calculados do radar de São João do Cariri. Mesma descrição da Figura 5.9	63
Figura 5.10–[a] Análise do dia composto lunar para o mês de junho de 2019 em Cachoeira Paulista [painel esquerdo] e São João do Cariri [painel direito]. A linha contínua azul representa o ajuste de mínimos quadrados para a maré lunar diurna.	64
Figura 5.11–[a] Análise do dia composto lunar para os meses de janeiro de 2000 em Cachoeira Paulista [painel esquerdo] e de julho de 2008 em São João do Cariri [painel direito]. A linha contínua vermelha representa o ajuste de mínimos quadrados para a maré lunar semidiurna.	65

Figura 5.12–Histograma da distribuição de altura de um total de 4510 meteoros ($\sum met$) registrados em 5 de janeiro de 2005 pelo radar de São João do Cariri, usando um bin de 2 km de altura. A curva gaussiana ajustada para a estimativa do Pico (linha tracejada em verde) e FWHM (linha tracejada em azul) é representada como uma linha sólida vermelha.	66
Figura 5.13–[a] Fluxo horário solar (UT) ajustado de meteoros não ambíguos do mesmo dia da Figura 5.12. Cada painel apresenta um histograma da distribuição vertical de ocorrência de meteoros registrados a cada 2 km de altitude para aquela hora composta. No eixo das abscissas tem-se a quantidade de meteoros não ambíguos e no eixo das ordenadas as altitudes em quilômetros. Na legenda tem-se a quantidade de dados (n°) daquele horário e o seu valor do pico (P) e FWHM (L) do ajuste gaussiano (linha sólida vermelha) dos dados.	67
Figura 5.14–Evolução das alturas horárias dos picos de meteoros (em preto) com o seu FWHM (área sombreada em vermelho) das observações do radar de meteoro localizado em Cachoeira Paulista [painel superior] e em São João do Cariri [painel inferior].	68
Figura 5.15–[a] Análise de Lomb-Scargle com frequências (ciclo por dia solar) entre 0,5 e 2,5 para os resíduos do FWHM calculados do radar de Cachoeira Paulista. [b] Redução dos limites de frequência para maré lunar diurna M_1 . [c] Redução dos limites de frequência para a maré lunar semidiurna M_2	69
Figura 5.16–[a] Análise de Lomb-Scargle para os resíduos do FWHM calculados do radar de São João do Cariri. Mesma descrição da Figura 5.15	69
Figura 6.1 – Ajustes de mínimos quadrados da componente diurna aos valores médios mensais horários dos resíduos do pico da camada. Cada painel apresenta o mês do ano composto com pontos médios horários e barras de erros verticais representando os desvios padrão. Os resultados são apresentados em quilômetros por horas lunares locais. As duas colunas da esquerda tem-se os dados de São João do Cariri (em azul) e a duas da direita os dados de Cachoeira Paulista (em vermelho). A linha tracejada em marrom é ajustada em 0 km.	72

Figura 6.2 – Ajustes de mínimos quadrados da componente semidiurna aos valores médios mensais horários dos resíduos do pico da camada. Cada painel apresenta o mês do ano composto com pontos médios horários e barras de erros verticais representando os desvios padrão. Os resultados são apresentados em quilômetros por horas lunares locais. As duas colunas da esquerda tem-se os dados de São João do Cariri (em roxo) e a duas da direita os dados de Cachoeira Paulista (em verde).A linha tracejada em laranja é ajustada em 0 km.	73
Figura 6.3 – [painel superior] amplitudes da componente diurna (linhas sólidas) e da semidiurna (linha tracejada) de Cachoeira Paulista (em preto) e São João do Cariri (em vermelho). [painel inferior] Respectivas fases das marés lunares.	74
Figura 6.4 – Mesma descrição da Figura 6.1 para os dados da largura da camada.	76
Figura 6.5 – Mesma descrição da Figura 6.2 para os dados da largura da camada.	77
Figura 6.6 – Mesma descrição da Figura 6.3 para os dados da largura da camada.	78

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Principais modos de marés	39
Tabela 4.1 – Parâmetros medidos pelo Radar Meteorico SKiYMET.	48

Lista de abreviaturas e siglas

a.C.	Antes de Cristo
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
FWHM	Largura total na metade do máximo, do inglês "Full-Width at Half-Maximum"
MLT	Região da mesosfera e baixa termosfera, do inglês "Mesosphere and Lower Thermosphere"
PPGF	Programa de Pós-Graduação em Física
PS	Polo Sul
PSD	Densidade espectral de potência, do inglês "Power Spectral Density"
TEC	Conteúdo total de elétrons, do inglês "Total Electron Content"
UT	Hora universal, do inglês "Universal Time"
UA	Unidade astronômica
UAF	Unidade Acadêmica de Física
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

Lista de símbolos

Ar	Argônio
c	velocidade da luz
C	Carbono
Ca	Cálcio
CH_3CN	Cianeto de metila
cm	centímetro
Fe	Ferro
$f(x)$	Função densidade de probabilidade
H	Hidrogênio
HCN	Ácido cianídrico
g	grama
h	hora
K	temperatura em Kelvin
kg	quilograma
km	quilômetro
kW	quilowatt
L	largura da camada
m	metro
MHz	megahertz
mm	milímetro
m/s	metros por segundo
M_1	maré lunar diurna
M_2	maré lunar semidiurna

N	Nitrogênio
Na	Sódio
N_2	maré lunar semidiurna elíptica
n°	número de meteoros
O	Oxigênio
P	Pico de concentração de meteoros
$P(S)$	Probabilidade de falso alarme no periodograma de Lomb-Scargle
R	alcance do meteoro
S_1	maré solar diurna
S_2	maré solar semidiurna
t	tempo solar
T	tempo para o pulso eletromagnético ir ao meteoro e voltar
Z	altura do meteoro
β	ângulo de chegada do meteoro
λ	Comprimento de onda
μ	média estatística da população
μs	microsegundos
σ	desvio padrão
τ	tempo lunar
ν	idade da Lua
ω	frequência
$^\circ$	grau
\sim	aproximadamente

Sumário

1	INTRODUÇÃO	27
2	METEOROS	31
2.1	Cometas	31
2.2	Asteroides	32
2.3	Meteoroides, meteoros e meteoritos	33
2.4	Variação diurna e sazonal de meteoros	35
3	MARÉS ATMOSFÉRICAS	37
3.1	Maré lunar atmosférica	38
3.2	Período lunar	40
4	INSTRUMENTAÇÕES E TÉCNICAS	45
4.1	Radar meteórico	45
4.2	Radar Meteórico SKiYMET	47
4.3	Periodograma de Lomb-Scargle	49
4.4	Distribuição gaussiana	50
5	METODOLOGIA	55
5.1	Pico de concentração dos meteoros	55
5.1.1	Periodograma de Lomb-Scargle nos dados	62
5.1.2	Identificação da maré lunar	63
5.2	Largura da camada	65
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
6.1	Pico da camada	71
6.2	Largura da camada	75
7	CONCLUSÕES	81
	REFERÊNCIAS	83

1 Introdução

A atmosfera em si é um grande laboratório natural, que existe em seu meio uma grande variedade de processos físicos e químicos. Por ser um fluido, ela comporta diversas oscilações periódicas. Uma das mais importantes periodicidades que ocorrem nesse meio são as marés atmosféricas, que são oscilações em escala global com períodos e subperíodos de um dia solar ou lunar (LINDZEN; CHAPMAN, 1969). As marés que ocorrem no período lunar são conhecidas como variação lunar ou, com mais frequência, de maré lunar (PEDATELLA; FORBES, 2010).

A relação da subida e descida do nível dos oceanos foi associada por Aristóteles (350 a.C.) com a passagem da Lua, mas os primeiros registros foram dados por Pytheas (320 a.C.), um famoso marinheiro de Marselha. As primeiras explicações das marés oceânicas vieram com Newton (1687) em seu *Princípios Mathematica*. Newton acreditou que a Lua também afetava a atmosfera, porém, concluiu que seria muito fraca para ser observada. Posteriormente, Laplace (1823), Bouvard (1827) e Eisenlohr (1843) também estudaram sobre a maré lunar atmosférica através de medidas de pressão obtidas por barômetros, mas falharam com a baixa resolução temporal dos dados [(SIEBERT, 1961), (PAULINO, 2013)]. Os primeiros resultados confiáveis foram feitos por Sabine (1847) na região tropical, com dados do observatório de Santa Helena, e por Chapman (1918) fora da região tropical, com dados de pressão obtidos em Greenwich (ver (CHAPMAN S.; LINDZEN, 1970) para maiores detalhes histórico sobre o estudo da maré lunar atmosférica).

As marés lunares são geradas, principalmente, pela atração gravitacional da Lua sobre as regiões mais baixas e densas da atmosfera (STENING; VINCENT, 1989) e, de forma secundária, pelo movimento terrestre e oceânico (STENING; JACOBI, 2000). As marés atmosféricas podem ser medidas como variações no vento, temperatura, densidade, pressão e variações geomagnéticas (DALIN et al., 2017). Essas oscilações são geradas na atmosfera inferior e se propagam para a região da mesosfera e baixa termosfera (MLT, do inglês “Mesosphere and Lower Thermosphere”) sujeitas às condições atmosféricas de fundo (KOUSHIK et al., 2020). É nessa região que as marés atmosféricas atingem grandes amplitudes (POKHOTELOV et al., 2018), principalmente em latitudes baixas (FORBES; WU, 2006).

São mais de 30 modos diferentes de marés atmosféricas, porém, a maioria com amplitudes pequenas (SANDFORD; MULLER; MITCHELL, 2006). O modo de maré lunar atmosférico mais importante e que atinge uma maior amplitude é o da semidiurna lunar, o chamado M_2 (CONTE et al., 2017). O modo de maré M_2 tem ganhado muito foco de estudo nas últimas décadas (exemplo:(PEDATELLA; LIU; RICHMOND, 2012), (PAULINO;

BATISTA; CLEMESHA, 2012), (PAULINO; BATISTA; BATISTA, 2013), (PAULINO et al., 2015), (PAULINO et al., 2017), (FORBES et al., 2013), (ZHANG; FORBES, 2013), (LIEBERMAN et al., 2015), (SATHISHKUMAR et al., 2017), (POKHOTELOV et al., 2018), (SIDDIQUI et al., 2018), (KOUSHIK et al., 2020) e respectivas referências) com contribuições secundárias para o modo de maré diurna (M_1) (exemplos: (PEDATELLA; FORBES, 2010), (PAULINO et al., 2017)). Esse foco é devido ao forçante da maré lunar ser bem conhecida e por ser modificado pelas condições atmosféricas básicas. Sendo assim, sua determinação ajuda na compreensão de como as condições da atmosfera média atuam sobre as marés enquanto se propagam por esta região (PAULINO et al., 2015).

Na região da MLT, ao qual tem-se a intensificação da amplitude das marés lunares, a utilização de radares tem contribuído para o entendimento das características dessas ondas (PAULINO; BATISTA; BATISTA, 2013). A utilização desses radares para o estudo dos meteoros já vem de longa data, porém, com a aposentadoria de alguns estudiosos e pela limitação de avanços da tecnologia e sua inadequação, teve-se uma diminuição do seu estudo na década de 1980 e início de 1990 (HOCKING; FULLER; VANDEPEER, 2001)] A altitude dos meteoros detectados pelos radares depende de suas características como: velocidade de entrada, da massa, da composição, do ângulo, [(BROWN et al., 2008), (KERO, 2008), (LIMA et al., 2015)] e da frequência do radar [(HOCKING; FULLER; VANDEPEER, 2001); (JONES; JONES, 2006), (STOBER et al., 2012), (STOBER; CHAU, 2015), (PIFKO et al., 2013)]. Mas também depende do estado em que a atmosfera se encontra, pois a densidade atmosférica tem influência na altura de ablação do meteoro, podendo ocorrer mais cedo ou mais tarde [(PELLINEN-WANNBERG et al., 2009), (LIMA et al., 2015), (YOUNGER et al., 2015)].

(CLEMESHA; BATISTA, 2006) utilizaram 5 anos de dados obtidos pelo radar de Cachoeira Paulista (22, 7° S; 45,0° O) e mostraram a presença de ondas planetárias no pico de concentração dos meteoros. (STOBER et al., 2012) também investigaram flutuações no pico de concentração de meteoros e encontraram uma onda de 16 dias. (LEE et al., 2016) usaram a informação da largura total na metade do máximo (FWHM, do inglês "Full-Width at Half-Maximum") da distribuição da altura dos dados de meteoros e apresentaram um novo método de estimar temperaturas perto da região da mesopausa. Assim, as alturas dos meteoros com o pico de suas concentrações e seu FWHM oferecem novas oportunidades para obter informações sobre a atmosfera neutra na região da MLT (LIU et al., 2017).

Portanto, o presente trabalho tem o objetivo de investigar a assinatura da maré lunar no pico de concentração dos meteoros, na largura da camada utilizando o FWHM da distribuição dos meteoros e estudar aspectos relevantes da interação desta oscilação com a atmosfera.

Além da Introdução (Capítulo 1) este trabalho possui mais seis capítulos, os quais

estão estruturados da seguinte forma:

- O [Capítulo 2](#) apresenta uma pequena explicação da origem dos meteoroides e os processos de sua interação com a atmosfera. Além de mostrar a definição dos meteoros, classificação, tipos de trilhas e seu comportamento diário e sazonal;
- O [Capítulo 3](#) tem o objetivo de definir as marés atmosféricas, apresentar as principais periodicidades causadas pelo potencial gravitacional do Sol e da Lua, além de abordar conceitos básicos relacionados com o estudo da maré lunar como, as fases da Lua e o tempo lunar;
- [Capítulo 4](#) apresenta as definições e tipos de radares, a descrição do radar meteorológico utilizado na coleta de dados da pesquisa e as técnicas de análise de dados utilizadas no trabalho;
- [Capítulo 5](#) exhibe detalhadamente a metodologia envolvida para a extração da maré lunar diurna e semidiurna nos dados de Cachoeira Paulista e São João do Cariri;
- No [Capítulo 6](#) dispõe dos resultados e suas discussões, em que consistem nas observações da maré lunar diurna e semidiurna no pico de concentração de meteoros e na largura da camada usando os dados de FWHM. Calculando as amplitudes e fases das marés para ambas as localidades brasileiras;
- No [Capítulo 7](#) são sumarizadas as principais conclusões do trabalho.

2 Meteoros

Este capítulo aborda, nas duas primeiras seções, alguns aspectos dos cometas e asteroides, aos quais são responsáveis pela origem dos meteoroides. Na seção seguinte serão apresentadas as interações dos meteoroides com a atmosfera, a criação, característica e classificação dos meteoros e suas trilhas. Na quarta e última seção será apresentada a variação diurna e sazonal dos meteoros.

2.1 Cometas

Desde a antiguidade (cerca de 11 séculos a.C.) se observam corpos celestes chamados de cometas (do grego, *cabeça com cabeleira*) a fim de conhecer as características do “mensageiro celeste”. São constituídos por materiais pesados como *Na*, *Ca* e *Fe*, por exemplo, no interior de seu núcleo, com temperaturas próximas a 100 K, estando assim no estado sólido (WHIPPLE, 1978). Já as superfícies dos cometas são constituídas por materiais em grande parte voláteis como: gelo d’água, gelo de CH_3CN ; gelo de *HCN* e radicais livres de *N*, *O*, *C* e *H* (CORRÊA, 2003).

Esse grande objeto frio é praticamente invisível ao estar longe do Sol e ao se aproximar da estrela começam a brilhar e apresentar três regiões: núcleo, coma, envelope de hidrogênio e cauda (SOBRINHO, 2012). O núcleo (~1 a 10 km) é constituído pelo material mencionado anteriormente e que interage com as partículas e radiações oriundas do Sol. Ao interagirem, gases constituintes de sua estrutura são ejetados por sublimação e formam ao seu redor o chamado coma (~ 10^5 a 10^6 km). A junção dessas duas partes é denominada de cabeça do cometa.

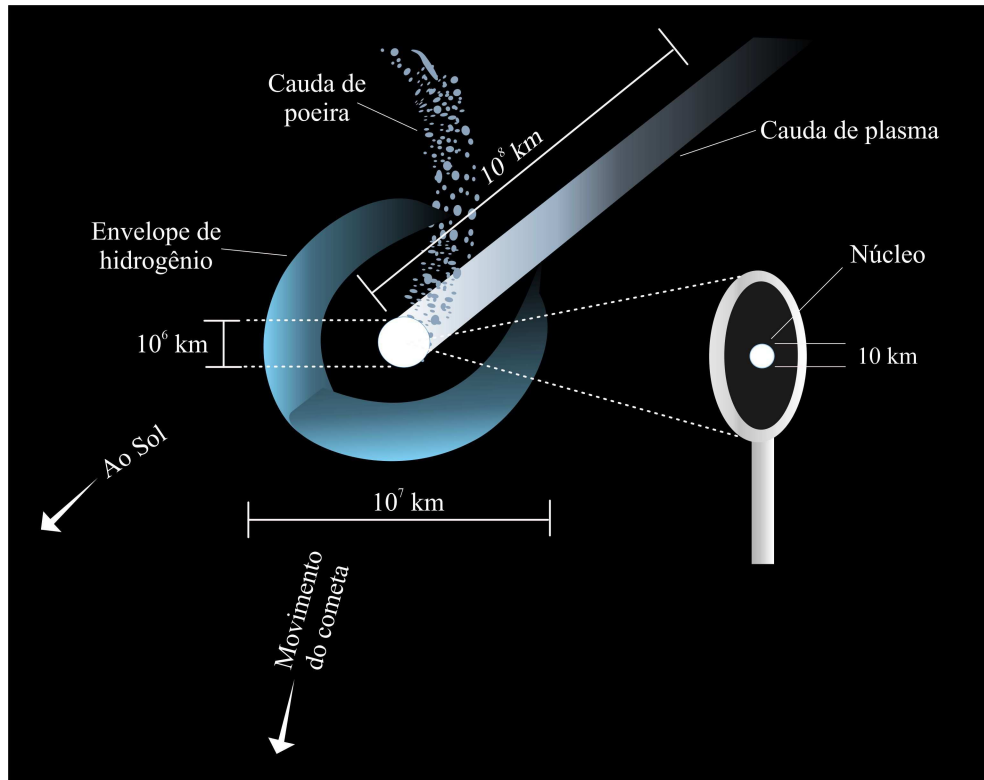
A cauda é formada pela constante interação da coma com o vento solar (gás e partículas carregadas proveniente do Sol) e com a pressão de radiação. A cauda de plasma é proveniente da interação com o vento solar e pode atingir extensões de até 2 UA¹ (Unidade astronômica) no periélio. Essa cauda segue na direção oposta do Sol enquanto o cometa segue em sua órbita. Já pela interação com a pressão de radiação vai ser formada a cauda de poeira, em que possui extensões de ~ 10^7 km e é constituída por grãos ejetados na sublimação nuclear, formando um rastro ao longo da órbita do cometa. A evolução dinâmica desta cauda de poeira é que forma os anéis ou feixes de meteoroides (CORRÊA, 2003).

Ainda pode existir um envelope de hidrogênio ao redor da cabeça do cometa devido

¹ A distância média Terra-Sol é 1 UA. Esta unidade é utilizada apenas para objetos do sistema solar. Seu valor é aproximadamente de 150 milhões de quilômetros.

à grande quantidade dessa substância na parte volátil. A ilustração do cometa e sua estrutura é vista na [Figura 2.1](#).

Figura 2.1 – A estrutura de um cometa.



Fonte: Adaptada de ([SOBRINHO, 2012](#))

2.2 Asteroides

No Sistema Solar nem todo corpo formou-se com dimensões planetárias. Os asteroides são corpos geralmente rochosos moldados por inúmeros impactos ao longo das eras que orbitam em torno do Sol ([TRIGO-RODRÍGUEZ; MADIEDO, 2013](#)). O primeiro asteroide encontrado foi Ceres em 1801, atualmente são conhecidos mais de 400 mil asteroides em que sua maioria está localizado no cinturão de asteroides entre Júpiter e Marte (2.1 UA – 3.5 UA) ([SOBRINHO, 2012](#)). Através de simulações acredita-se que esse cinturão são resquícios de um planeta que nunca se formou devido a força gravitacional de Júpiter ([CORRÊA, 2003](#)).

Os asteroides possuem tamanho médio entre ~100 m e ~500 km, com corpos menores denominando-se, atualmente, de meteoroides ([seção 2.3](#)). Pesquisas revelam que existem diversos tipos de asteroides e que nem todos são rochosos, sendo alguns caracterizados por possuírem densidades mais baixas e aparentemente compostos por gelo ([SOBRINHO, 2012](#)).

2.3 Meteoroides, meteoros e meteoritos

Os meteoróides são corpos sólidos oriundos de cometas ou asteroides que vagam pelo meio interplanetário com dimensões menores que uma centena de metros (SOBRINHO, 2012). Essas rochas, em média, navegam pelo espaço por vários milhões de anos (TRIGO-RODRÍGUEZ; MADIEDO, 2013) e carregam uma grande quantidade de energia cinética, em que são dissipadas através de colisões com a composição da atmosfera em alguns décimos de segundo (TAO, 2010). Esses meteoroides bombardeiam a atmosfera e sofrem um processo de ablação devido ao atrito com a atmosfera neutra. Em meio a esse processo, os meteoroides e as moléculas encontradas em seu caminho produzem vaporização, ao qual se forma trilhas ionizadas chamadas de meteoros [(HOCKING; THAYAPARAN; JONES, 1997); (CEPLECHA et al., 1998),(LIMA, 2004)].

Para conseguir-se ter a formação de meteoros, o meteoróide deve possuir uma massa igual ou maior que 10^{-6} g. Quando o meteoróide consegue adentrar a atmosfera e chegar ao solo, ele então é chamado de meteorito. Mas são a minoria que conseguem tal feito, pois a grande maioria dos meteoroides frequentes na atmosfera possuem dimensões entre 0,05 mm e 20 cm, não sendo suficiente (acima desses 20 cm) para ultrapassar a chamada região meteórica (localizada entre aproximadamente 70 e 110 km de altitude), portanto são pulverizados antes de chegar ao limite inferior dessa região em 70 km [(CEPLECHA et al., 1998),(PAULINO, 2010)].

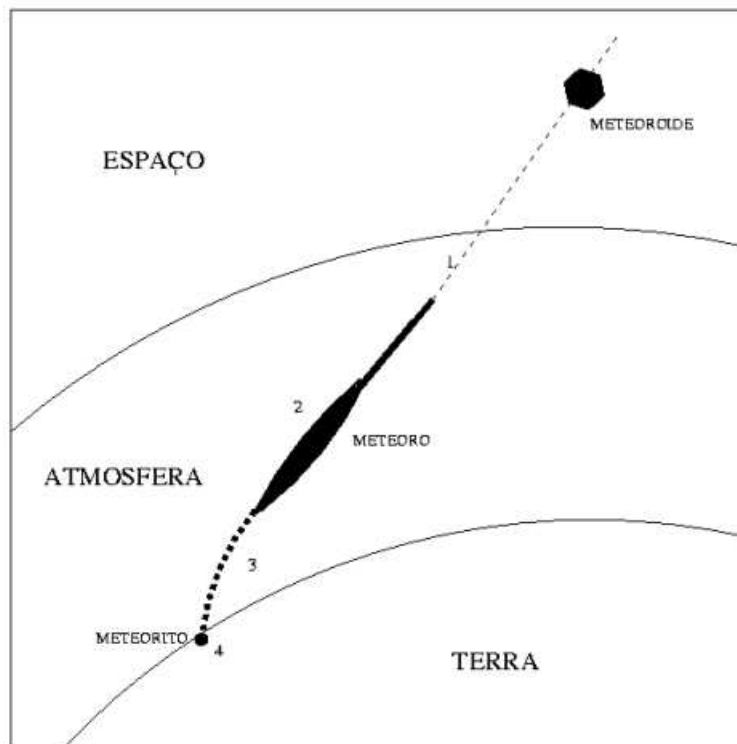
Segundo (CEPLECHA et al., 1998) a interação do meteoróide com a atmosfera pode ser dividida em quatro momentos, ilustrada na Figura 2.2 e descrita a seguir:

1. **Pré-aquecimento:** ocorre por causa das colisões que o meteoróide sofre com as moléculas encontradas na atmosfera. Como o próprio nome já diz, nessa etapa o meteoróide terá a suas superfícies aquecidas e sua temperatura crescendo exponencialmente, podendo chegar ~ 900 K. Entretanto, o seu interior praticamente não sofrerá alterações na temperatura, salvo pequenos grãos. Esse primeiro momento ocorre entre as alturas de 300 km e 100 km;
2. **Ablação:** Nessa etapa se inicia a decomposição da superfície do meteoróide a baixa temperaturas, produzindo pequenos fragmentos. No fim desse estágio ocorre a evaporação do meteoróide e de seus fragmentos ao atingirem temperaturas maiores ou iguais a 2200 K. É nessa etapa que se tem uma grande transferência de energia cinética do meteoróide para o meio, conseqüentemente, ocorre a desaceleração do mesmo;
3. **Voo obscuro:** Nesta fase o que restou do meteoróide após a ablação irá passar por um processo inverso ao do pré-aquecimento, ou seja, se terá um resfriamento muito rápido, com sua temperatura caindo exponencialmente, devido a não possuir energia

cinética suficiente para evaporar ou aquecer o meteoróide. A partícula sofre uma enorme desaceleração e sua velocidade cai para centenas de m/s (CORRÊA, 2003);

4. **Impacto:** Como o próprio nome indica é o momento do impacto do meteoróide (formação do meteorito), em geral esses impactos variam entre 10 m/s e 100 m/s para massas entre 10 g e 10 kg respectivamente. Os buracos formados são sempre maiores que a própria partícula que a causou. Caso o processo de ablação ocorra até esse choque na superfície, crateras enormes serão formadas devido a grande quantidade de energia cinética transferida ao solo por causa da desaceleração abrupta nesse momento.

Figura 2.2 – Ilustração de interação de um meteoróide com a atmosfera: [1] Pré-aquecimento; [2] Ablação; [3] Voo obscuro do núcleo de meteoróide que restou da ablação; [4] Impacto do meteoróide com a superfície terrestre: meteorito.



Fonte: (CORRÊA, 2003)

Os meteoros podem ser classificados como esporádicos ou chuvas conforme a distribuição dos meteoróides no meio interplanetário. As chuvas são causadas principalmente pela passagem da Terra através de anéis ou feixes de meteoróides que foram produzidos pela derivação de cometas por suas órbitas, principalmente quando se encontram no periélio [(WHIPPLE, 1950),(WHIPPLE, 1951)], ou por fragmentações causados pelas colisões sofridas pelos asteroides, que ocorre com maior eficiência no afélio (CORRÊA, 2003). Feixes de meteoróides possuem orbitas semelhantes à do corpo celeste que o originou devido a

composição da velocidade de ambos, com algumas diferenças em parâmetros orbitais entre os dois.

Já os esporádicos são decorrentes dos meteoroides que desprendem dos feixes, principalmente pela colisão entre os mesmos, devido a maior densidade de partículas esse processo ocorre com maior eficiência no periélio. Perturbações devido a radiação solar e perturbações gravitacionais causadas pela aproximação de planetas também provocam a saída dos meteoroides dos feixes (CORRÊA, 2003). Mesmo com tal nome, os meteoros esporádicos ocorrem constantemente, sendo responsáveis por $\frac{3}{4}$ dos meteoros que acontecem na Terra (CEPLECHA et al., 1998).

Uma trilha de meteoro pode atingir extensões entre 7 km e 20 km com um raio de aproximadamente 1 m dependendo de alguns fatores como velocidade, ângulo de incidência e estrutura do meteoróide. Essas trilhas podem ser dos tipos sub-densas, quando a densidade linear dos elétrons contidos na mesma é menor que $2,4 \cdot 10^{14}$ elétrons/m, ou dos tipos sobre-densas quanto a densidade é maior que esse valor (HUGHES, 1978). As ondas de rádio penetram livremente nas trilhas sub-densas, já na sobre-densa elas são refletidas e não conseguem a sua penetração devido a alta densidade [(CEPLECHA et al., 1998), (PAULINO, 2010)].

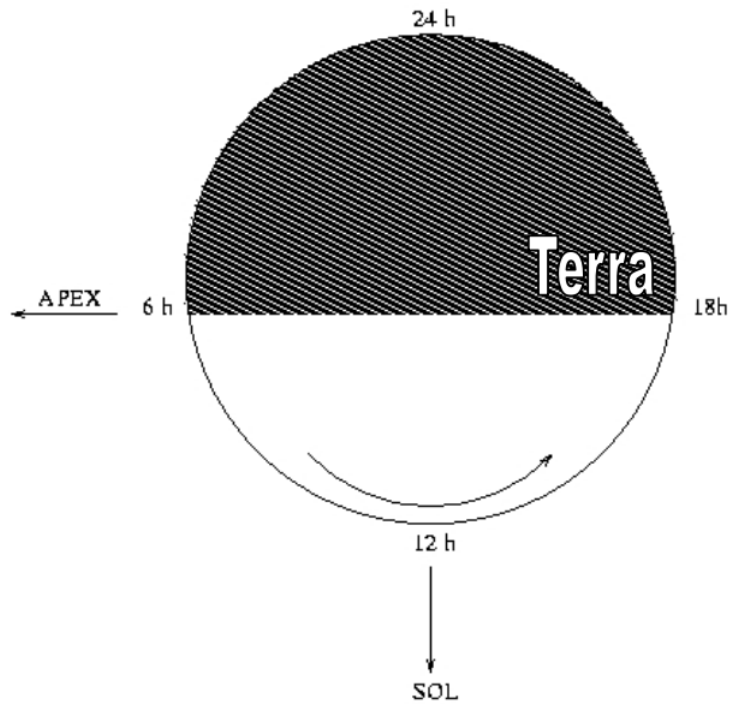
2.4 Variação diurna e sazonal de meteoros

O comportamento dos meteoros possui variações diárias e sazonais. Diariamente eles possuem uma maior incidência no turno da manhã do que a noite, a diferença é de cerca de 3 a 5 vezes maior. Essa maioria pela manhã ocorre até mesmo em épocas de chuvas de meteoros. Essa variação diária ocorre devido ao movimento de rotação e translação da Terra, com uma ocorrência máxima ao amanhecer em torno das 6 h, em tempo solar, e o mínimo ocorrendo 12 h depois, ou seja, no crepúsculo em torno das 18 h (ABELL, 1975). Explica-se tal comportamento porque ao amanhecer o lado iluminado da Terra está voltado para a direção de deslocamento orbital terrestre (o apéx). Sendo assim, levando em consideração uma distribuição isotrópica para os meteoroides no espaço, a chance da Terra colidir com essas partículas ao amanhecer é muito maior do que ao anoitecer (Figura 2.3) (CORRÊA, 2003).

Além da variação diária, também se tem uma variação da ocorrência de meteoros durante o ano. Alguns trabalhos como o de (MURAKAMI, 1955), (LIU et al., 2017) e (PREMKUMAR; REDDY; YELLAIAH, 2018) observaram com dados do hemisfério norte que se tinha uma variação anual na contagem dos meteoros, em que uma taxa mínima ocorreu nos primeiros meses do ano e um máximo no meio do ano. Já no hemisfério sul (WEISS, 1957) também notou uma variação anual, porém, seu comportamento foi oposto ao do outro hemisfério, sendo a taxa de contagem máxima ocorrendo no início do ano e

o mínimo no meio do ano. Esse comportamento é explicado através do fato que o ápex da Terra está acima do horizonte de um observador no Hemisfério Sul por mais tempo durante o mês de janeiro do que durante o mês de julho. O inverso ocorre no Hemisfério Norte, em que o ápex está acima do horizonte de um observador para tal hemisfério por mais tempo em julho do que em janeiro.

Figura 2.3 – Rotação da Terra mostra que a direção de seu movimento orbital (ápex) corresponde sempre ao amanhecer de um observador.

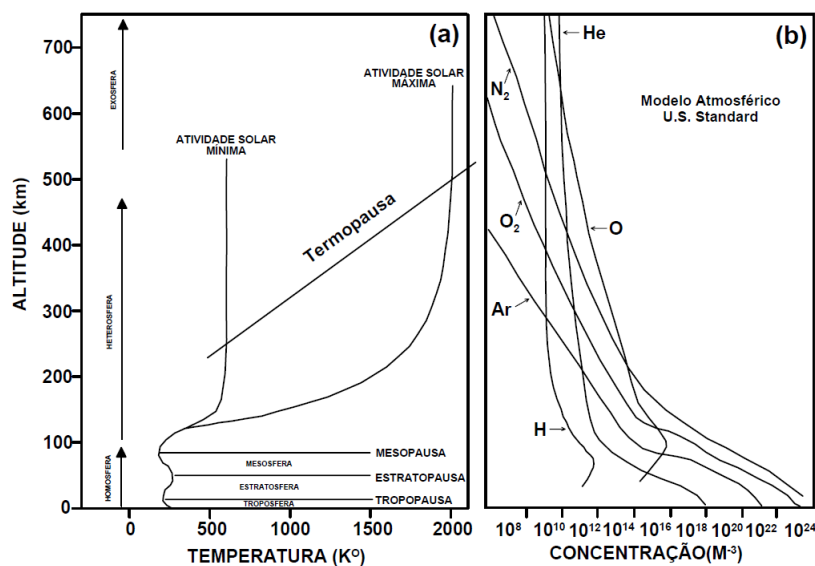


Fonte: Adaptado de (ABELL, 1975)

3 Marés atmosféricas

A atmosfera terrestre apresenta diferentes regiões cuja classificação é feita de acordo com as peculiaridades observadas frente à variação das características do meio, tais como: temperatura, composição atmosférica e também quanto ao escape dos gases atmosféricos (Figura 3.1 [a]). A atmosfera é uma mistura de gases onde o nitrogênio é o componente mais abundante. Essa mistura é praticamente constante na homosfera (região abaixo do limite denominado de turbopausa, a qual se encontra a aproximadamente 100 - 110 km de altitude), ou seja, nesta região a proporção de mistura de um certo constituinte em relação ao todo se mantém quase inalterada, mantendo uma proporcionalidade em torno de 78% de nitrogênio molecular (N_2), 21% de oxigênio molecular (O_2), seguidos pelo argônio (Ar), dióxido de carbono (CO_2), gases nobres e outros em proporções ainda menores. Em contraste com a camada inferior, a heterosfera apresenta o peso molecular médio do ar variando com a altitude e os gases separam-se sob o efeito da gravidade com suas próprias escalas de altura. A difusão molecular, por movimento aleatório de átomos e moléculas é considerada um processo de transporte importante para explicar a distribuição das espécies químicas nesta região da atmosfera terrestre. A Figura 3.1 [b] mostra a variação da concentração dos componentes atmosféricos mais importantes e abundantes em função da altitude (desde a superfície terrestre até aproximadamente 700 km) de acordo com o modelo padrão U.S Standard (BROWN et al., 2008).

Figura 3.1 – (a) Distribuição vertical da temperatura na homosfera e heterosfera; (b) Variação com a altura dos principais componentes na atmosfera.



Fonte: Adaptado de (BANKS P.M.; KOCKARTS, 1973) e (KIRCHHOFF, 1991)

Uma propriedade da atmosfera é a de comportar movimentos ondulatórios, em que tais movimentos possuem componentes com períodos que vão da ordem de segundos até a escala de anos. As ondas atmosféricas são geradas devido as perturbações que causam o desequilíbrio da atmosfera a partir de um estado básico, elas se propagam no tempo e no espaço e somente são possíveis graças às forças restauradoras, que reagem e provocam oscilações locais nas propriedades dos campos atmosféricos. Dependendo de suas características as ondas atmosféricas podem ter diferentes classificações, as que ocorrem devido às forças gravitacionais são chamadas de ondas de gravidade; as governadas pelas forças de compressibilidade do ar são as ondas acústicas; e as chamadas ondas planetárias Rossby, causadas pelas forças rotacionais. As principais ondas atmosféricas de interesse geofísico são as ondas de gravidade, as marés atmosféricas e as ondas planetárias (LIMA, 2004).

As marés atmosféricas estão entre os mais importantes movimentos na região da MLT. As variações, na circulação atmosférica, verificadas nessa região devem-se, em grande parte, à propagação de ondas que, em geral, são originadas por processos dinâmicos nas camadas mais baixas da atmosfera e se propagam na horizontal e ascendentemente, podendo atingir os níveis mais elevados (ALVES, 2012). As marés atmosféricas depositam suas energias e momento no fluxo médio e desempenham um importante papel na estrutura e na circulação global da média e alta atmosfera devido a sua quebra e/ou à sua dissipação (VINCENT, 1993).

As marés atmosféricas são oscilações de escala global causadas pelas ações da gravidade do Sol e da Lua ou pela ação térmica do Sol, cujos períodos são sub-harmônicos de um dia solar ou lunar (ABELL, 1975). As marés geradas pelo aquecimento diário do Sol são mais intensas do que as causadas pelas ações gravitacionais (LIMA, 2004). Existem diversos modos de marés atmosféricas (mais de 30), onde as principais oscilações geradas pelos potenciais gravitacionais lunar e solar são apresentados na Tabela 3.1, com seus respectivos períodos e frequências em ciclo por dia solar.

3.1 Maré lunar atmosférica

As marés lunares são originadas tanto da ação gravitacional da Lua na baixa atmosfera como também, de forma secundária, pelo movimento vertical dos oceanos [(CHAPMAN S.; LINDZEN, 1970), (FORBES, 1994)]. A maré lunar se propaga verticalmente, atingindo as maiores amplitudes na região da MLT devido a diminuição exponencial da densidade com a altitude (YAMAZAKI et al., 2017).

Foi visto na Tabela 3.1 que existem mais de um modo de maré lunar, isso ocorre porque a órbita da Lua em torno da Terra não é um círculo perfeito e não está no mesmo plano que o equador terrestre, caso tivesse tal estrutura, o potencial gravitacional

Tabela 3.1 – Principais modos de marés

Maré	Descrição	Período (horas)	Frequência (ciclo/dia)
O_1	Quase diurna lunar	25,82	0,930
M_1	Diurna lunar	24,84	0,966
P_1	Quase diurna solar	24,04	0,998
S_1	Diurna solar	24,00	1,000
N_2	Semidiurna lunar elíptica	12,66	1,896
M_2	Semidiurna lunar	12,42	1,932
S_2	Semidiurna solar	12,00	2,000
K_2	Semidiurna luni-solar	11,97	2,005

Fonte: Adaptado de (PAULINO, 2013)

geraria apenas a componente semidiurna. Mas como a órbita da Lua possui uma pequena excentricidade e um ângulo em relação ao equador, tal característica faz com que exista outros modos de mares lunares gerados por este potencial. Algo parecido ocorre com os modos gravitacionais causados pelo Sol em relação a Terra (KUSHIATOR et al., 2017). Esses diversos modos produzidos pelos potenciais gravitacionais lunares e solares foram calculados por (SIEBERT, 1961), ao qual foi baseado no trabalho feito por (DOODSON, 1921), que estudou detalhadamente o potencial gravitacional.

A maior e mais significante dos modos de maré lunar é a componente semidiurna M_2 , com período de 12,42 h e frequência de 1,9323 ciclos por dia. A componente diária M_1 que possui um período de 24,84 h e frequência de 0,966 ciclos por dia, geralmente detêm uma amplitude de cerca de 40 % da M_2 (SANDFORD; MULLER; MITCHELL, 2006). Outro modo de destaque é a N_2 , que possui um período de 12,66 h e possui uma frequência de 1,896, ao qual é muito próxima da M_2 . Ela surge da órbita elíptica da Lua, que varia a distância lunar da Terra durante um mês, sendo sugerido que sua amplitude é cerca de 19% da M_2 (SCHLAPP et al., 1996).

Mesmo as marés lunares possuindo amplitudes bem menores que as solares, as mesmas são bastantes interessantes devido ao seu conhecido forçante, ao qual é bastante regular, previsível e bem distribuído pela Terra (PAULINO et al., 2017). Seus estudos vêm ganhando espaço e ocorrendo há mais de um século. Tais estudos se diversifica utilizando dados de ventos [(STENING; TSUDA; NAKAMURA, 2003), (NIU et al., 2005) e (NIU et al., 2007), (PAULINO; BATISTA; CLEMESHA, 2012) e (PAULINO et al., 2015); (SANDFORD; MULLER; MITCHELL, 2006) e (SANDFORD et al., 2010), (CONTE et al., 2017)], dados de temperaturas [(FORBES et al., 2013), (PAULINO; BATISTA; BATISTA, 2013)], de magnetômetro [(SCHLAPP; MALIN, 1979), (STENING, 1992), (RASTOGI; VERMA, 1994), (STENING; RASTOGI, 2002)], de conteúdo total de elétrons (TEC, do inglês "Total Electron Content") [(PEDATELLA; FORBES, 2010), (PEDATELLA;

LIU; RICHMOND, 2012); (PEDATELLA; MAUTE, 2015), (PAULINO et al., 2017)], de ecos de verão da mesosfera polar [(DALIN et al., 2017)], além de encontrar influências no eletrojato equatorial [(SIDDQUI; STOLLE; LüHR, 2017), (SIDDQUI et al., 2018), (YAMAZAKI et al., 2017)], na região ionosférica E [(STENING, 2011)], na F [(CHAU; FEJER; GONCHARENKO, 2009), (ECCLES et al., 2011), (FEJER et al., 2010), (FEJER et al., 2011)] entre outros tipos de dados e meios que já são utilizados e que ainda contribuirão para o estudo dessas oscilações.

3.2 Período lunar

Para se criar um calendário foi necessário bastante discussão para se entrar em um consenso, pois as sociedades antigas se baseavam em sistemas focados nos movimentos do Sol e da Lua para a contagem de longos períodos. A dificuldade encontrada é devido o ano não ser múltiplo exato da duração de um dia ou de um mês. O ano solar é baseado no período em que a Terra dá uma volta completa no Sol, enquanto que os calendários lunares são baseados no período de 12 lunações (12 meses lunares), ou seja, ~354 dias. Com esse período de 12 lunações, para o Sol ocupar a mesma posição na eclíptica se faltava cerca de 10 dias, assim, as estações iriam ocorrer com uma diferença de cerca de 10 dias a cada ano. Tal situação complicaria a rotina dos povos que dependiam diretamente do conhecimento das estações para a pesca, plantio, caça, etc. Atualmente, o mundo ocidental utiliza o calendário solar, o chamado calendário Gregoriano, que tem como modificação a recolocação do Equinócio de Primavera no dia 20 de março, além da criação dos anos bissextos. O mesmo ainda possui aspectos do calendário lunar, pois os meses são inspirados nas 12 lunações (PAULINO, 2010).

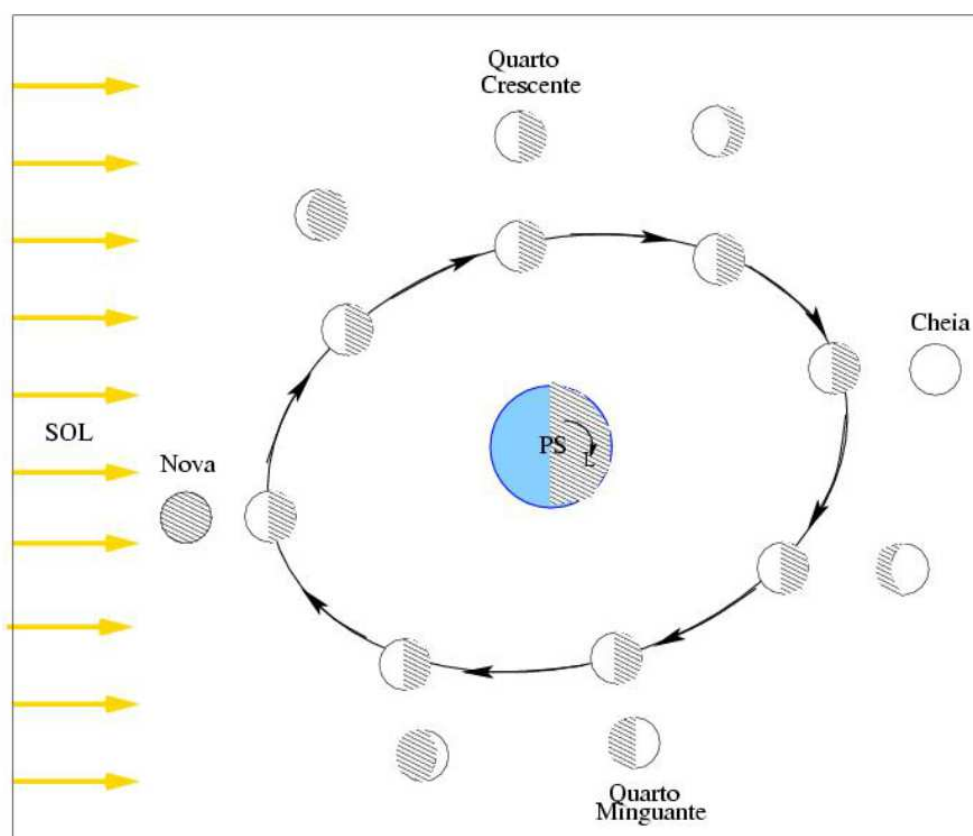
Um dia sideral é dado pelo tempo necessário para que ocorra duas passagens sucessivas de uma estrela pelo mesmo meridiano com referencial de estrelas fixas. O tempo necessário para que a Lua complete uma volta em torno da Terra no sistema de referência com as estrelas fixas é de aproximadamente 27,32 dias, é o período sideral. Mas também existe o mês Sinódico ou também chamado de mês lunar, que é dado pelo tempo em que as quatro fases da Lua ocorrem, sua duração é de aproximadamente 29,53 dias. A semana que conhecemos é de 7 dias, e as mesmas são baseadas pela média do intervalo entre as fases consecutivas, que variam entre 6 a 9 dias, mas a maioria entre 7 ou 8 dias (SILVEIRA, 2001).

A compreensão dessas fases da Lua vem da antiguidade, em que o grego Anaxágoras (~430 a.C.) já o entendia e Aristóteles (384 – 322 a.C.) registrou a sua explicação de que nada mais era que o resultado do fato da Lua não ser um corpo luminoso, mas sim um corpo iluminado pela luz do Sol (MANTELLATTO, 2012). Então, as fases da Lua estão relacionadas com o quanto o Sol irá ilumina-la. No movimento de translação da

Lua com a Terra, uma face da Lua se mantém sempre voltada para o Sol (face clara) e a outra voltada na direção oposta (face escura), assim, para um observador na Terra a sua aparência dependerá da posição relativa do sistema Sol-Lua-Terra. Vale ressaltar que a Lua sempre mostra a mesma face para a Terra (SARAIVA et al., 2007). Existem quatro fases da Lua, as quais são bem conhecidas: Lua Nova, Quarto Crescente, Lua Cheia e Quarto Minguante.

Na Figura 3.2 tem-se a ilustração das principais fases da Lua, onde ao longo da elipse representa toda a evolução da Lua em sua órbita ao redor da Terra vista por um observador que está olhando para o Polo Sul da Terra (PS), a parte externa demonstra a evolução da Lua vista por um observador no Hemisfério Sul da Terra e as setas representam os raios solares no mesmo plano do equador terrestre.

Figura 3.2 – Representação das Fases da Lua. Nessa Figura, a órbita que a Lua descreve em torno da Terra visualizada por um observador externo olhando para o Polo Sul terrestre é representada ao longo da elipse. A outra parte da figura mostra a configuração da Lua visualizada por um observador no hemisfério Sul da Terra.



Fonte: (SARAIVA et al., 2007)

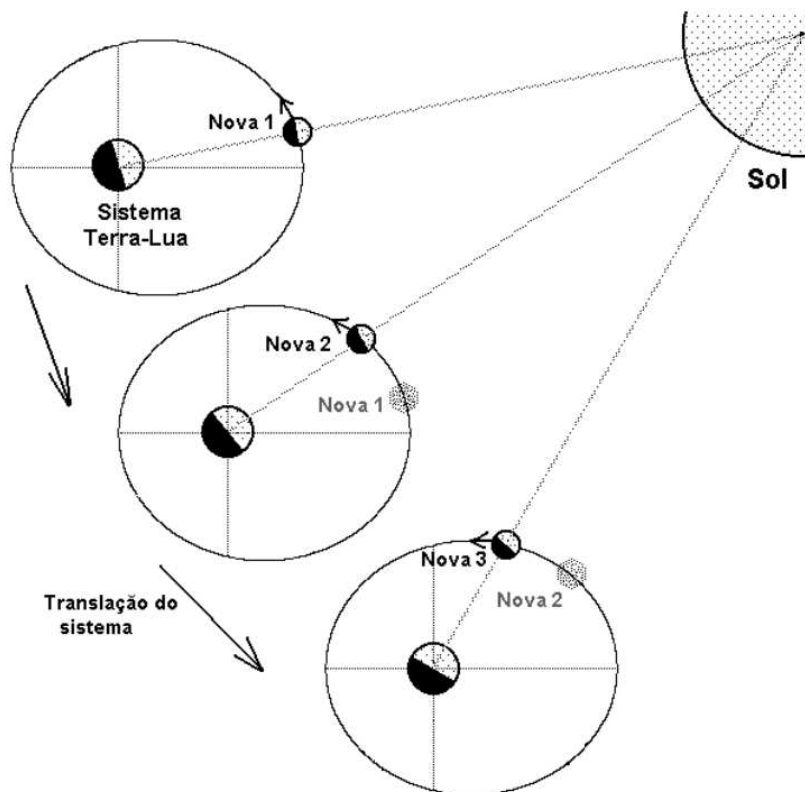
A Lua Nova ocorre quando a Lua e o Sol estão alinhados e a face visível da Lua não recebe luz, sendo assim, a face iluminada está oposta à Terra. A Figura 3.2 é representada pela esfera completamente escura. Em seguida é a fase Quarto Crescente, aqui ocorre

quando 50 % da parte iluminada está voltada para a Terra, vista pelo Hemisfério Sul sua aparência é semelhante à da letra C. Nessa fase, em relação à Terra, a Lua e o Sol formam um ângulo de 90° , assim a Lua está a leste do Sol, sendo iluminada em seu lado oeste (MANTELLATTO, 2012).

A fase posterior é a denominada Lua Cheia, em que a face iluminada da Lua está voltada completamente para a Terra e um observador a enxerga em forma de um disco. Na Figura 3.2 ela é representada pela esfera completamente em branco. Já a outra fase, chamada de Lua Minguante, ocorre posteriormente a Lua Cheia e anteriormente a Lua Nova. Nessa fase a Lua terá 50 % de sua face iluminada e formando um ângulo de 90° com o Sol, estando a oeste do mesmo ao qual a ilumina seu lado leste. Por um observador no Hemisfério Sul, a sua forma lembra a da letra D. Após essa fase, sua iluminação da face visível irá diminuir até se iniciar um novo ciclo (Lua Nova) (PAULINO, 2010).

Observa-se que na Figura 3.3 tem o período entre duas fases iguais de Lua Nova (mês sinódico), ao qual a Lua deslocou-se mais que uma volta completa em torno da Terra, assim, existindo uma diferença de aproximadamente 2,2 dias entre o mês sinódico e o mês sideral.

Figura 3.3 – Esquema de três Luas Novas consecutivas.



Fonte: (SILVEIRA, 2001)

Como um dia é dado pela passagem sucessiva sobre um meridiano local, um dia médio lunar é de aproximadamente 24 h 50,47 min. Para se estudar a maré lunar é

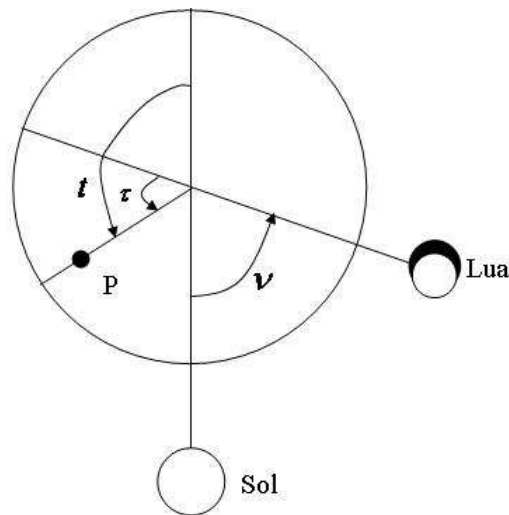
necessário fazer o mesmo que se faz com o estudo do modo solar, em que o tempo solar é calculado através de um Sol fictício, assim, o tempo lunar será calculado pelo movimento de uma Lua fictícia girando em torno da Terra.

Baseado na [Figura 3.4](#), o cálculo para o tempo lunar é dado pela seguinte expressão:

$$\tau = t - \nu \quad (3.1)$$

em que t é o tempo solar local e ν é a idade da Lua (termo cíclico que depende da fase da Lua e onde $\nu = 0$ é equivalente a Lua Nova). Neste trabalho é tomado como base o período lunar para a análise das marés lunares nos dados.

Figura 3.4 – Configuração da relação entre o tempo solar e lunar e do ângulo da fase lunar.



Fonte: ([CHAPMAN S.; LINDZEN, 1970](#))

4 Instrumentações e técnicas

Neste capítulo serão descritas as principais características do radar meteórico e os parâmetros que o mesmo coleta para construção dessa dissertação. Posteriormente, são retratadas as técnicas que auxiliaram na metodologia desse trabalho.

4.1 Radar meteórico

A palavra **RADAR** significa **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging (detecção e telemetria pelo rádio). É um dispositivo eletrônico capaz de detectar a altura, direção, distância e muito mais de objetos situados na atmosfera, na terra e no mar, mesmo em uma situação climatológica adversa em que a visão humana seria incapaz.

A alta atmosfera, acima de 80 km, começou a ser estudada pela ciência de radar em 1925. Porém, os estudos foram interrompidos pela Segunda Guerra Mundial, com os radares sendo utilizados para auxiliar os militares. Na época, muitos meteoros eram confundidos com aviões, mas foram distinguidos pelo tempo em que os ecos dos meteoros eram bem mais curtos que os originados pelos aviões, além de uma diferença enorme de suas alturas (SANTOS, 2010). As pesquisas foram retomadas normalmente após o fim da Segunda Guerra.

O radar é uma ferramenta muito poderosa por conseguir identificar rastros meteorológicos associados as menores partículas, com dimensões da ordem de 80 μm e massas de 10^{-6} g (HUGHES, 1978). Em resumo, um radar é composto por uma antena transmissora que emite ondas eletromagnéticas na faixa da frequência das ondas de rádio (radiofrequência - 3 kHz a 300 GHz), uma antena receptora e um sistema que processa os dados. Os pulsos transmitidos podem ser espelhados ou refletidos, aos quais vão depender do meio em que se propagam. Os ecos são os pulsos detectados pelo radar que foram refletidos de forma especular.

As técnicas básicas de radares podem ser do tipo: biestático (*forward-scatter*), com o seu transmissor situado a centenas de quilômetros de distância dos receptores, e do tipo monoestático (*backscatter*), em que se tem o transmissor no mesmo local dos receptores. Na Figura 4.1 tem-se a configuração do radar biestático, ele detecta meteoros com direções tangenciais a elipsóides com focos no transmissor e receptor. Já na Figura 4.2 mostra a configuração monoestático, nela são detectados os meteoros que estão contidos em planos que fazem 90° com a direção do pulso emitido pelo radar (CORRÊA, 2003).

Os radares meteorológicos são utilizados para medir parâmetros atmosféricos e astronômicos. Através dessas medidas adquiridas se tem a oportunidade de estudar o

comportamento dos meteoros, os ventos na alta atmosfera, a temperatura e assim, o comportamento das ondas atmosféricas.

Figura 4.1 – Configuração para o radar biestático (*forward-scatter*).

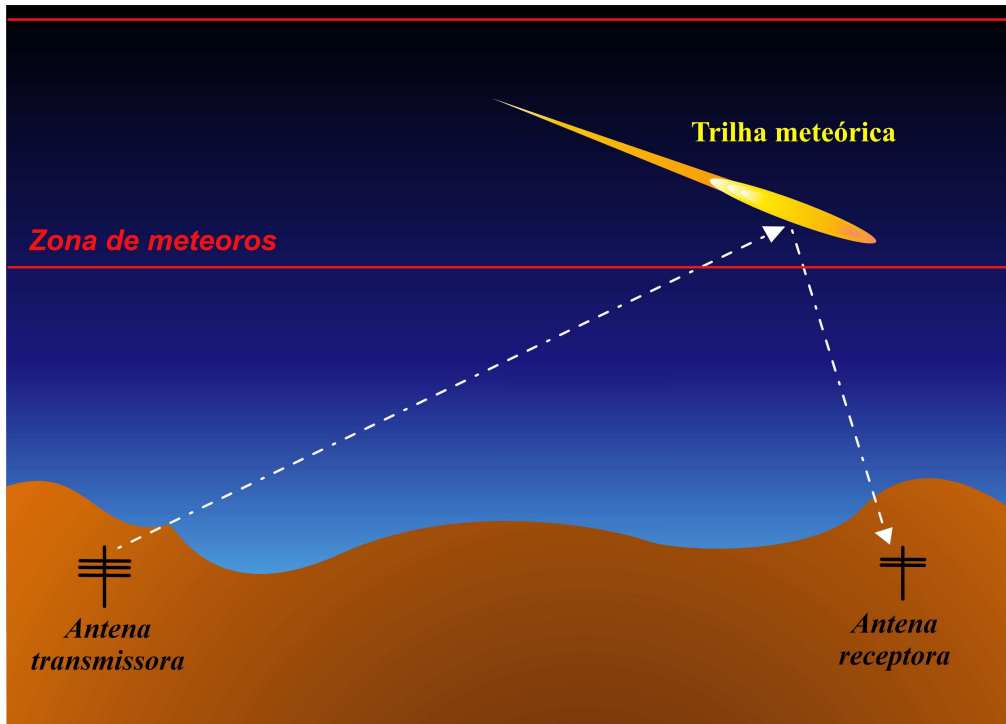
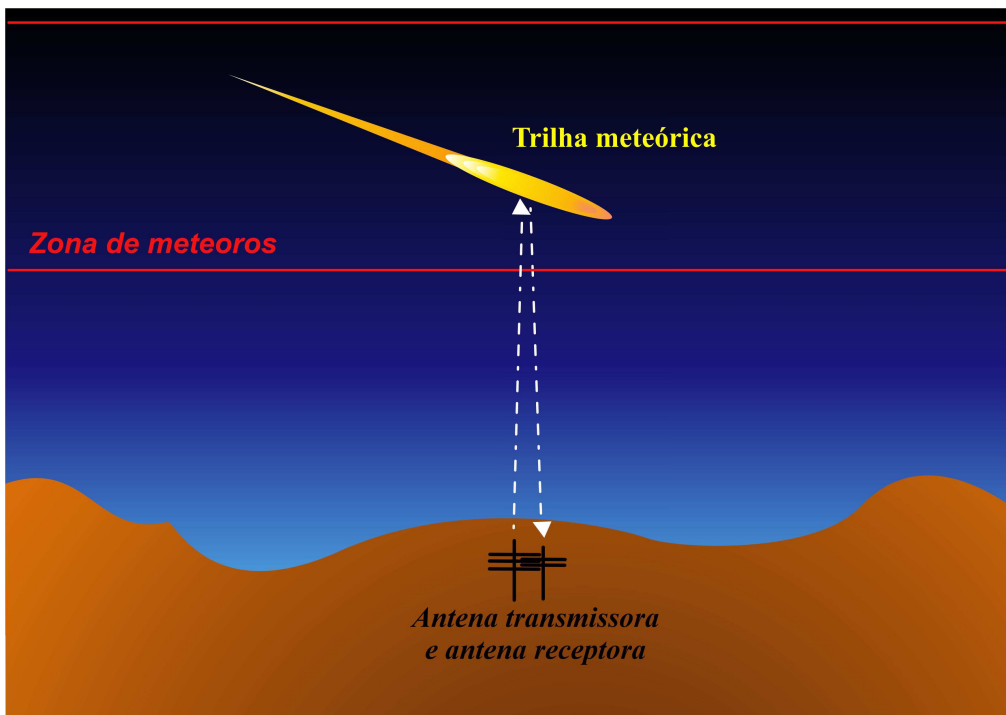


Figura 4.2 – Configuração para o radar monoestático (*backscatter*).

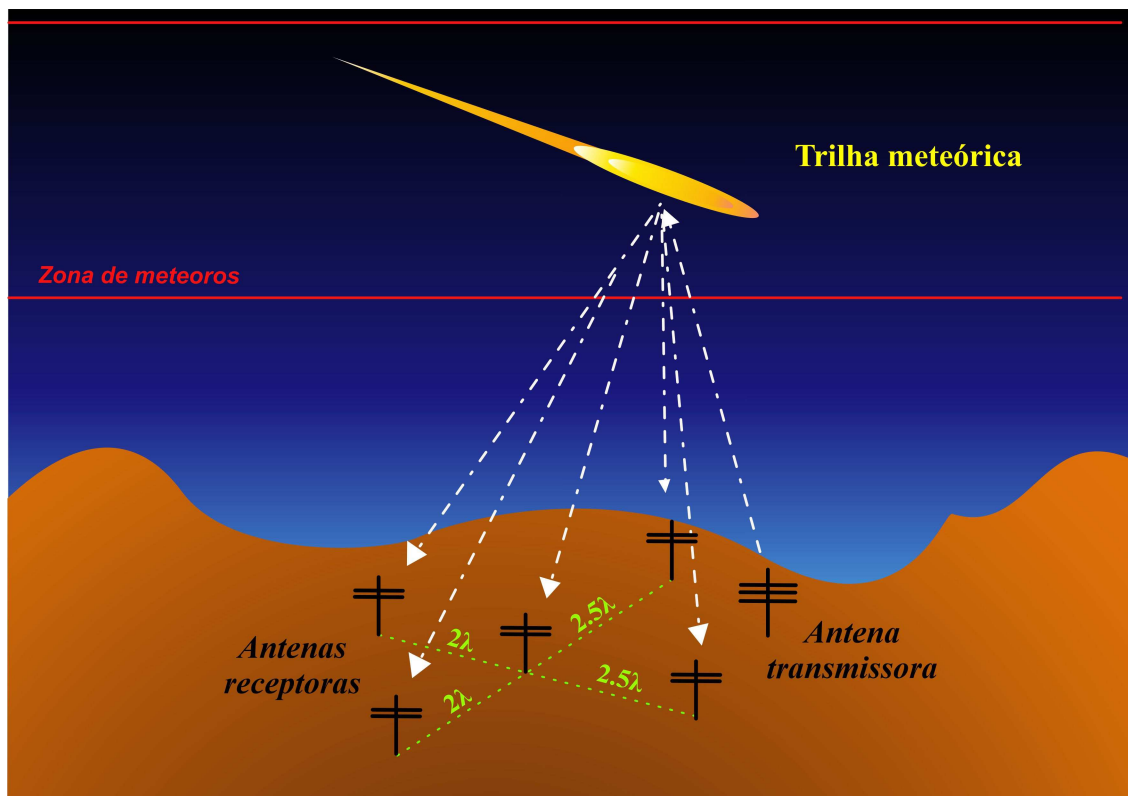


4.2 Radar Meteorológico SKiYMET

O radar comercial SKiYMET (*All-Sky Interferometric Meteor Radar*) da empresa MARDOC Inc, do Canadá, foi construído com o intuito de desenvolver um sistema capaz de adquirir dados na maior taxa possível e realizar muitas análises diferentes ao mesmo tempo. O radar é do tipo monoestático e o sistema foi projetado para empregar interferometria com antenas espaçadas idealmente, possibilitando a cobertura completa do céu acima do horizonte (HOCKING; FULLER; VANDEPEER, 2001).

Seu hardware é composto por antenas, cabos, transmissor e uma unidade receptora. O sistema é dado pela antena transmissora Yagi de três elementos que emite pulsos eletromagnéticos, ao qual interage com a trilha de plasma e é refletido para um arranjo de cinco antenas Yagis receptoras de dois elementos. A distribuição das antenas é de forma assimétrica com uma antena receptora quase centralizada cercada pelas outras a distâncias de 2λ e $2,5\lambda$ conforme a Figura 4.3 (MONTENEGRO et al., 2009). Em caso de sinal ruim do meteoro (levando a erros nas determinações de fase) o programa pode não decidir entre duas posições possíveis de meteoros no céu, assim é salvo ambas as posições e os meteoros recebem um nível de ambiguidade (HOCKING; FULLER; VANDEPEER, 2001). Por isso, tal configuração de arranjo reduz a ambiguidade do ângulo de chegada dos ecos meteorológicos (SANTOS, 2010).

Figura 4.3 – Esquema das antenas transmissora e receptora do radar SKiYMET.



Este radar tem o objetivo de operar 24 horas por dia com uma potência de pico de

12 kW (ARAÚJO et al., 2014). A transmissão de sinais opera com frequência de 35,24 MHz, transmitindo pulsos de 13 μ s, proporcionando uma resolução de 2 km com uma taxa de repetição de 2144 pulsos por segundo. Essa taxa de repetição produz réplicas (aliasing) com 70 km na amostragem dos alcances, impossibilitando a identificação se o meteoro tem uma altura de 65, 135 ou 205 km (LIMA, 2004). Porém, a limitação é solucionada através da combinação das medidas da posição angular e ao fato da ablação da maioria dos meteoros ocorrem entre 70 e 110 km de altura. O SKiYMET em perfeitas condições pode detectar entre 1000 e 5000 ecos úteis por dia (YOUNGER et al., 2009), suas principais medidas fornecidas são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros medidos pelo Radar Meteorico SKiYMET.

Dados	Descrição
Date	Data de detecção
Time	Hora de detecção
File	O nome do arquivo usado para salvar os dados brutos
Rge	O alcance da detecção
Ht	A altura corrigida acima do solo
Vrad	A velocidade radial da trilha em m/s
DelVr	O desvio da velocidade radial medida obtida pelos 5 pares de antenas no interferômetro
Theta	O ângulo zenital de detecção em graus
Phi	O ângulo azimutal de detecção em graus medido no sentido anti-horário do leste
Ambig	O número de posições angulares aceitáveis
Delphase	O pior erro de fase entre as antenas em graus
Ant-pair	O par de antena com o pior erro de fase
IREX	O canal receptor usado na análise da qualidade de teste. É sempre "1" durante a operação normal
amax	O valor de pico da amplitude do eco do radar meteorico
Tau	Tempo de decaimento em segundos
vmet	Velocidade de entrada do meteoro em km/s
snrdb	A relação sinal-ruído do meteoro

Fonte: (PAULINO, 2010)

Para saber a altura do meteoro detectado é necessário conhecer o seu alcance e seu ângulo zenital. Esse alcance R é fornecido pela equação:

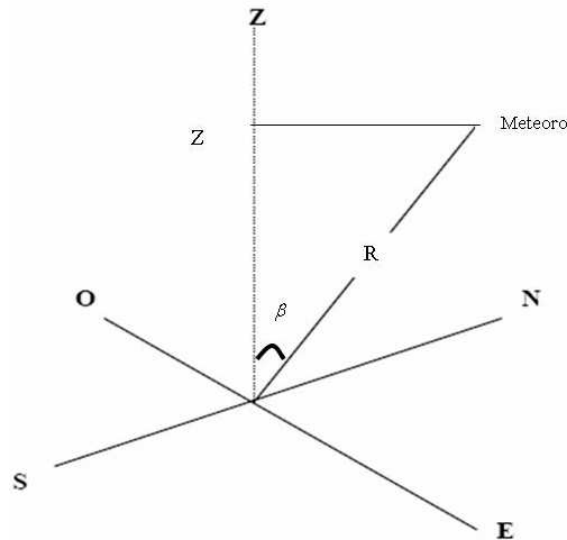
$$R = \frac{cT}{2} \quad (4.1)$$

em que c é a velocidade da luz, pois é um pulso eletromagnético que é emitido, e T é o tempo que o pulso leva para ir até o meteoro e voltar.

Com o valor do alcance do eco conhecido, de acordo com a [Figura 4.4](#), a altura Z é dada pela seguinte expressão:

$$Z = R \cos \beta \quad (4.2)$$

Figura 4.4 – Esquema mostrando a altura do meteoro Z e o alcance R .



Fonte: ([PAULINO, 2010](#))

O ângulo mencionado é dado a partir da direção de chegada (ou fase) da frente de onda refletida pela trilha meteórica, na prática isso é calculado através de um sistema interferométrica ([PAULINO, 2010](#)).

4.3 Periodograma de Lomb-Scargle

Muitas vezes é necessário analisar dados de fenômenos com periodicidade desconhecida. Quando se tem dados uniformemente espaçados, métodos como a transformada de Fourier estão disponíveis para seus estudos. Porém, na maioria dos trabalhos astronômicos baseados no solo, o espaçamento uniforme é praticamente impossível de ser alcançado, pois existem falhas instrumentais, períodos restritos a observações e até mesmo dentro do mesmo dia os dados raramente são igualmente espaçados ([LOMB, 1976](#)).

O espectro de um conjunto de dados não uniformes é muito mais complexo do que espectro de um conjunto de dados uniformes, para tais dados, o método mais comumente usado é a análise de periodograma ([LOMB, 1976](#)). A partir de um periodograma modificado para tratar amostras não igualmente espaçados, a estimativa da energia espectral é a mesma para o caso de espaçamento uniforme ([SCARGLE, 1982](#)).

O periodograma de Lomb-Scargle que tem como base os trabalhos de (LOMB, 1976) e (SCARGLE, 1982) já é bem conhecido na detecção e caracterização de periodicidade com amostragem irregular no amplo campo da comunidade astronômica (VANDERPLAS, 2018). O mesmo representa a Densidade de Potência Espectral (PSD, do inglês "Power Spectral Density") de cada componente de frequência sobre um segmento da série temporal analisada, gerando picos para representar o espectro em cada frequência ou período.

Para uma série temporal $X(T_j)$, onde $j = 1, 2, \dots, N_0$, a definição do periodograma $P(x)$ como uma função da frequência ω é:

$$P_X(\omega) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\left[\sum_{j=1}^{N_0} X \cos \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left[\sum_{j=1}^{N_0} X \sin \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right\} \quad (4.3)$$

o termo τ pode ser definido por:

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} \sin(2\omega t_j)}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos(2\omega t_j)} \quad (4.4)$$

Escolhendo τ , torna a estimativa do periodograma equivalente a um ajuste pelo método dos mínimos quadrados de uma função $h'(t)$, em que senos e cossenos em uma dada frequência ω (LOMB, 1976).

$$h'(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \quad (4.5)$$

Para a probabilidade de se observar picos com alturas maiores do que um nível de confiança Z , sendo consideradas M frequências independentes, é dada pela expressão (ALVES, 2012):

$$P(> Z) = 1 - (1 - e^{-Z})^M \quad (4.6)$$

$P(Z)$ é a probabilidade de falso alarme, ou seja, valores menores de $P(Z)$ indicam um sinal periódico significativo (LIMA, 2004).

4.4 Distribuição gaussiana

A distribuição normal, também é conhecida como distribuição gaussiana, cujo nome foi em homenagem ao matemático, astrônomo e físico alemão Carl Friedrich Gauss, a mesma tem inúmeras aplicações em diversas áreas da ciência (LIMA; CARVALHO; MORET, 2019). Ela foi estudada pela primeira vez no século XVII, em que físicos e matemáticos criaram uma função densidade de probabilidade para descrever erros experimentais obtidos

em medidas físicas causados por falhas dos instrumentos, dos sentidos humanos e de observações em geral.

No século XVIII, os matemáticos apenas consideravam essa distribuição como uma conveniente aproximação da distribuição binomial, que é um modelo probabilístico resultante do binômio de Isaac Newton (CAIRE, 2012). A primeira publicação, com essa aproximação, foi feita por Abraham de Moivre em um panfleto (*The Doctrine of Chances*) em 1733. O matemático, astrônomo e físico francês Pierre Simon Laplace obteve uma distribuição normal como uma aproximação da distribuição hipergeométrica em 1774. Posteriormente, ele dispôs a probabilidade integral. Já Gauss publicou sobre técnicas baseadas na distribuição normal em seus trabalhos nos anos de 1809 (*Theoria Motus Corporum Coelestium*) e 1816 (*Bestimmung der Genauigkeit der Beobachtungen, Zeitschrift Astronomi*), que tornaram métodos padrões usados no século XIX. Tais argumentos teóricos eram baseados no Teorema Central do Limite (CAIRE, 2012).

A distribuição gaussiana é definida a partir de dois parâmetros: a média e o desvio padrão dos valores retirados da amostra (HINES et al., 2006).

A curva normal tem as seguintes propriedades:

1. A curva é uma função de X , e o seu domínio estende-se de $-\infty$ a $+\infty$;
2. A curva é assintótica; nunca toca o eixo horizontal, portanto a função de X jamais se anula;
3. A área compreendida pela curva nesse intervalo é exatamente igual a 1;
4. A função tem um máximo, que corresponde ao seu ponto médio, ou seja, a média da distribuição;
5. A distribuição é simétrica em torno da média;
6. A curva gaussiana tem dois pontos de inflexão [Figura 4.5](#), simétricas em relação a média. Esses pontos de inflexão são desvio padrão da distribuição normal.

Uma variável aleatória gaussiana real é definida com uma função densidade de probabilidade, representada pela equação (LIMA; CARVALHO; MORET, 2019):

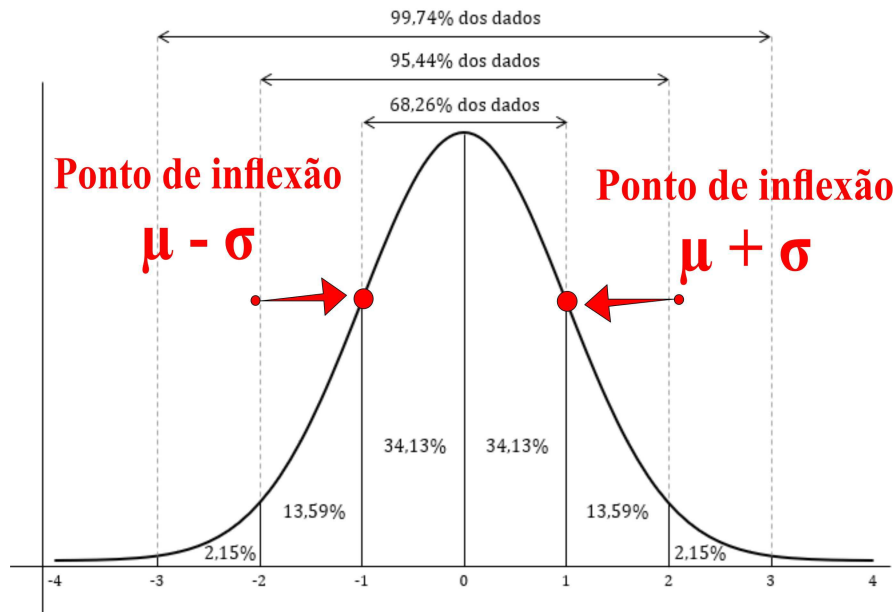
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4.7)$$

onde μ e σ são, respectivamente, a média aritmética estatística da população e desvio padrão (calculado pela equação [Equação 4.8](#)) de X .

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X - \mu)^2}{n}} \quad (4.8)$$

Um exemplo de curva normal para $\mu = 0$ e $\sigma = 1$ é mostrado na [Figura 4.5](#). A média posiciona o centro e o desvio padrão ao grau de dispersão. Nota-se que 68,26 % da área está a um desvio padrão da média, 95,44 % a dois desvios padrão e 99,74 % a três desvios padrão.

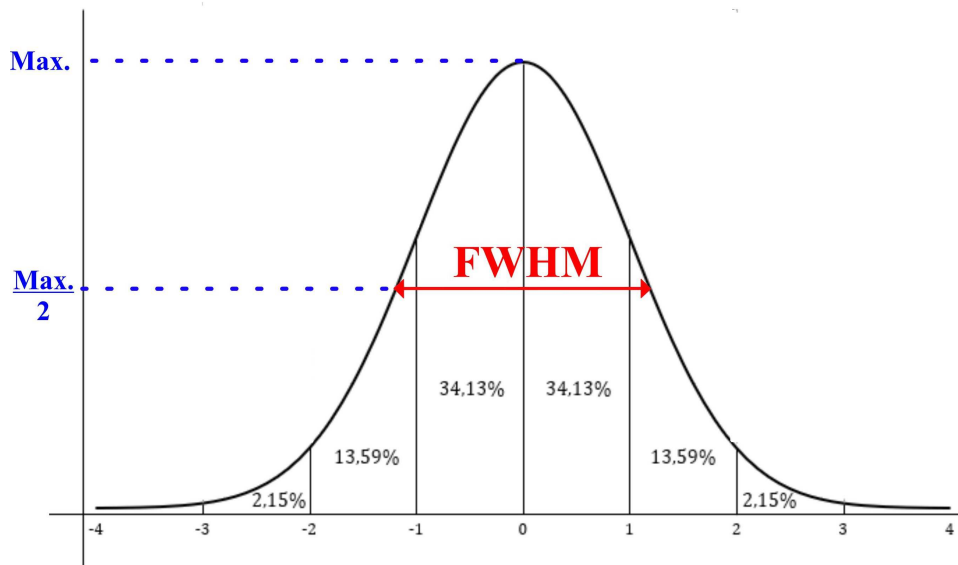
Figura 4.5 – Abrangência dos dados em uma distribuição normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 1$.



Fonte: Adaptada de ([CAIRE, 2012](#))

Outra característica utilizada de uma curva gaussiana é FWHM, do termo técnico Full-Width at Half-Maximum (largura total da metade do máximo). Muito utilizado em fenômenos de largura espectral de fontes em comunicações, resolução espectrômetros, duração de pulsos de ondas e estudos de imagens astronômicas. É utilizado com a finalidade de descrever a largura de uma curva, função, imagem ou objeto que não possuem bordas bem definidas. Graficamente é mostrado na [Figura 4.6](#), seu valor em função de desvio padrão é dado pela expressão:

$$FWHM = 2,355 \cdot \sigma \quad (4.9)$$

Figura 4.6 – FWHM de uma distribuição normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 1$.

Fonte: Adaptada de (CAIRE, 2012)

5 Metodologia

Neste capítulo é demonstrado, detalhadamente, o tratamento dos dados utilizados na pesquisa desse trabalho e seu comportamento, além de apresentar a metodologia desenvolvida para a determinação da maré lunar diurna e semidiurna no pico e largura da camada

5.1 Pico de concentração dos meteoros

A pesquisa desenvolvida neste trabalho teve como base observações da incidência de meteoros na atmosfera, as quais foram registrados a partir de dois radares meteorológicos operando em baixas latitudes no hemisfério Sul; um deles está localizado na região Nordeste em São João do Cariri ($7,4^{\circ}$ S; $36,5^{\circ}$ O) e outro na região Sudeste em Cachoeira Paulista ($22,7^{\circ}$ S; $45,0^{\circ}$ O). Os períodos de dados referentes a Cachoeira Paulista foram nos intervalos de tempo de janeiro de 2000 a julho de 2006, de setembro de 2007 a outubro de 2008 e de junho de 2012 a novembro de 2019. Enquanto que as medidas de São João do Cariri foram dos intervalos de janeiro de 2005 a abril de 2009 e de agosto de 2018 a maio de 2020. As localizações dos instrumentos podem ser vistas na [Figura 5.1](#).

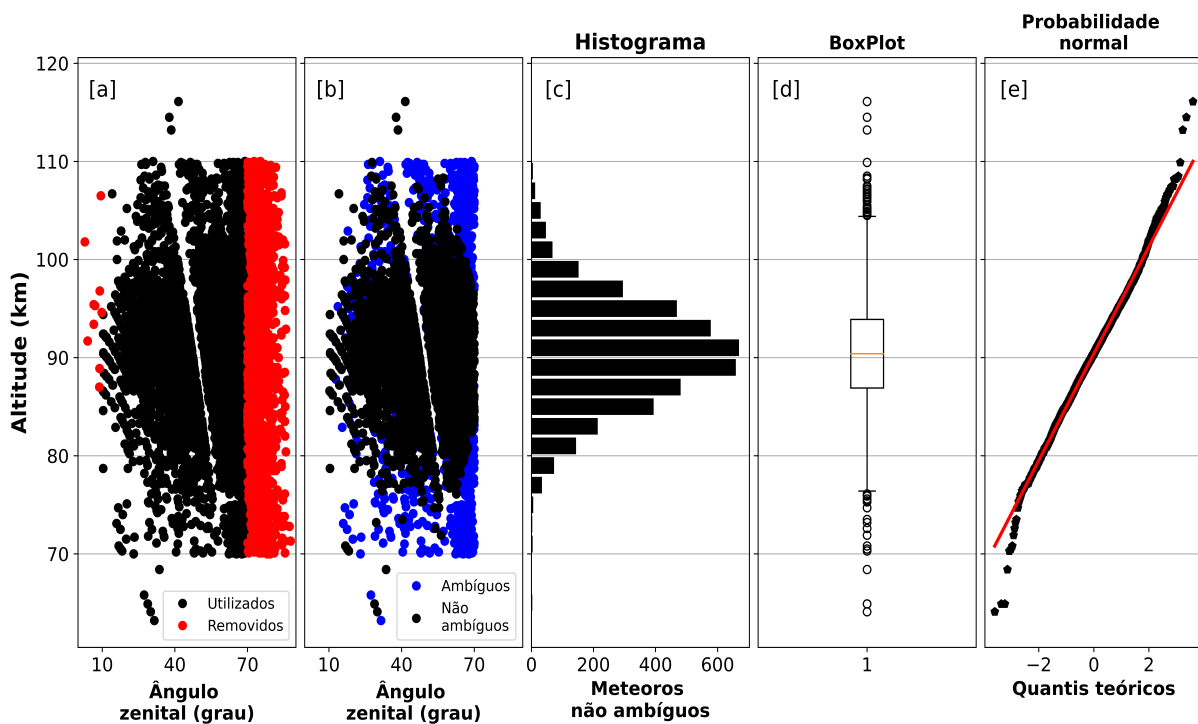
Figura 5.1 – Localização dos observatórios de São João do Cariri ($7,4^{\circ}$ S; $36,5^{\circ}$ O), Cachoeira Paulista ($22,7^{\circ}$ S; $45,0^{\circ}$ O) .



Para a utilização dos dados se faz necessário um processo de filtragem retirando os meteoros que possuem um ângulo zenital fora do intervalo admitido entre 10° e 70° (assim como foi feito por (PREMKUMAR; REDDY; YELLAIAH, 2018)). Além disso, foi removido os meteoros que possuem uma ambiguidade maior que um.

Na Figura 5.2 tem o exemplo das observações de ecos de meteoros do radar de Cachoeira Paulista em 03 de janeiro de 2000. No painel [a] tem-se a primeira filtragem em que são removidos os pontos em vermelho, ao qual estão fora do ângulo permitido. No painel [b] mostra-se os meteoros que são removidos (pontos em azul) por possuírem uma ambiguidade maior que um. Nesse dia foram observados 6754 dados, com as filtrações mencionadas restaram 4344 ecos úteis. Os dados que restaram (em preto) dessas filtrações são apresentados nos demais painéis.

Figura 5.2 – Processo de filtragem dos dados coletados pelo radar meteórico de Cachoeira Paulista no dia 03 de janeiro de 2000. O painel [a] mostra a retirada dos dados fora do ângulo zenital permitido (em vermelho). Painel [b] exibe a retirada dos dados não ambíguos (azul). [c] Histograma da distribuição vertical de ocorrência de meteoros registrados a cada 2 km de altitude. [d] Gráfico boxplot dos meteoros. [e] Gráfico da distribuição normal dos meteoros.

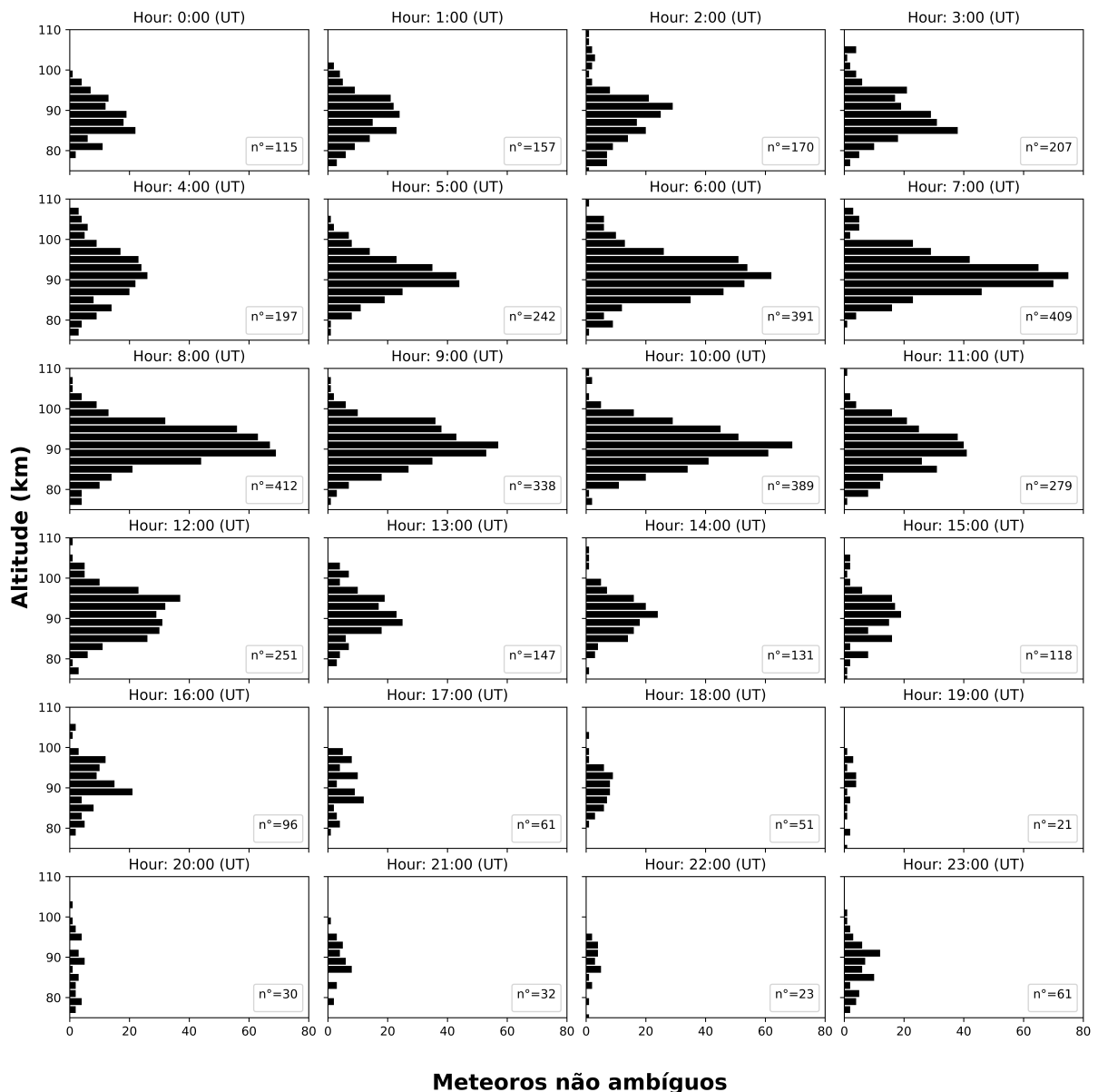


No painel [c] é apresentado um histograma com barras a cada 2 km de altitude, observa-se que a distribuição diária de ocorrência em altura de meteoros não ambíguos segue uma distribuição quase gaussiana com um pico em torno de 90 km [(LIMA et al., 2015), (STOBER et al., 2008)]. No painel [d] e [e] tem-se a representação dos dados em boxplot e distribuição de probabilidade normal, respectivamente, que confirmam essa

distribuição quase gaussiana prevista pela literatura na região meteórica (aproximadamente entre 70 e 110 km de altitude), com alguns valores discrepantes fora dela. Então, no presente trabalho também foram retirados os meteoros fora dessa região.

A taxa de ecos meteóricos por hora do mesmo dia é observada na [Figura 5.3](#). O comportamento horário solar (em hora universal) dos meteoros é mostrado em cada painel, onde são representados em forma de histograma de distribuição vertical de ocorrência por 2 km de altitude.

Figura 5.3 – Fluxo horário (UT) de meteoros não ambíguos dos mesmos dados da [Figura 5.2](#). Cada painel apresenta um histograma da distribuição vertical de ocorrência de meteoros registrados a cada 2 km de altitude. No eixo das abscissas tem-se a quantidade de meteoros não ambíguos e no eixo das ordenadas as altitudes em km. Na legenda tem-se a quantidade de dados (n°) daquele horário.



Na legenda é mostrado o número (n°) de dados coletados naquela hora. Observa-se que o fluxo de meteoros detectados apresenta uma variação durante o dia, notando-se a maior quantidade de dados observados pela manhã, com máximos em torno das 8 horas (5 h local), e uma redução de dados ao anoitecer, com mínimo em torno das 20 horas (17 h local).

A frequência de meteoros possui flutuações, mas geralmente tem um ciclo bem definido (BALLINGER et al., 2008). Essa variação diária é dada por consequência da geometria planetária e de seus movimentos de rotação e translação (seção 2.4), mencionado e discutido também por (HOCKING; FULLER; VANDEPEER, 2001), (CORRÊA, 2003) e (CLEMESH; BATISTA, 2006). Ao amanhecer em torno das 6 horas local, terá o máximo de incidência de meteoros porque a face iluminada da Terra está voltada a direção de deslocamento orbital terrestre, e com uma mínima de incidência em torno de 12 horas depois (18 horas local) (LIMA, 2004). Essa diferença do número de meteoros dos distintos turnos é de cerca de 3 a 5 vezes (CEPLECHA et al., 1998).

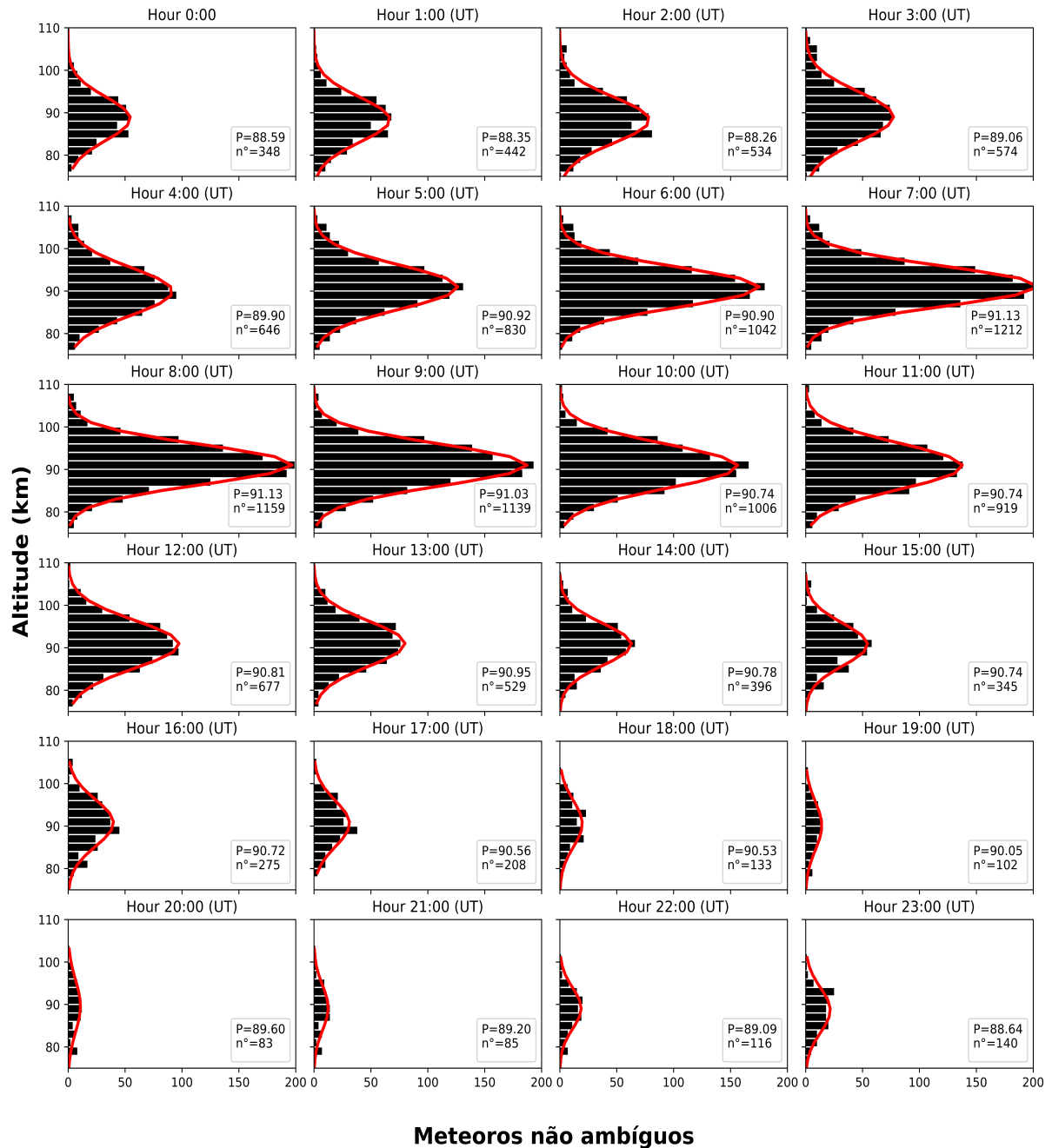
Para se estudar o comportamento da distribuição do pico de concentração de meteoros, como solução (HOCKING; THAYAPARAN; JONES, 1997) assume que se deve fazer um ajuste gaussiano para estimar o pico de concentração (feito também por: (STOBER; CHAU, 2015), (LIMA et al., 2015), (LIMA; BATISTA; PAULINO, 2018); (LEE et al., 2016)) para cada hora do dia (seção 4.3). Porém, como foi visto que existe uma variação diária no fluxo de meteoros, então a função gaussiana não tem uma boa resposta para as horas de mínima frequência do dia. Para corrigir tal problema, utilizou-se uma janela móvel horária com três horas de espessura, ou seja, pegou-se uma hora de dados futura e passada para representar os dados da hora centralizada.

A Figura 5.4 mostra os mesmos dados, em que cada painel tem a representação dos dados ajustados em forma de histograma em distribuição vertical de ocorrência de meteoros por 2 km de altitude, com seu respectivo ajuste gaussiano (linha vermelha) para cada hora composta do dia. Na legenda consta-se o novo número (n°) de dados para aquela hora e o seu valor de Pico (P) do ajuste gaussiano. Observa-se nas horas de fluxo mínimo uma melhora no comportamento dos dados.

Após obter os valores do pico, seu comportamento é mostrado na Figura 5.5. No painel superior tem-se os dados de Cachoeira Paulista e no painel inferior os dados de São João do Cariri. As alturas horárias dos picos são apresentadas (linha preta) com a média de 30 dias corridos (linha vermelha). Os gráficos indicam um padrão sazonal com os máximos no início do verão (dezembro e janeiro) e mínimos no início do inverno (junho e julho). Esse comportamento vai de acordo com a literatura (exemplo de comportamento oposto no Hemisfério Norte foi estudado por (STOBER; CHAU, 2015) com dados de 2005 a 2015 e (PREMKUMAR; REDDY; YELLAIAH, 2018) com dados de 2002 a 2013).

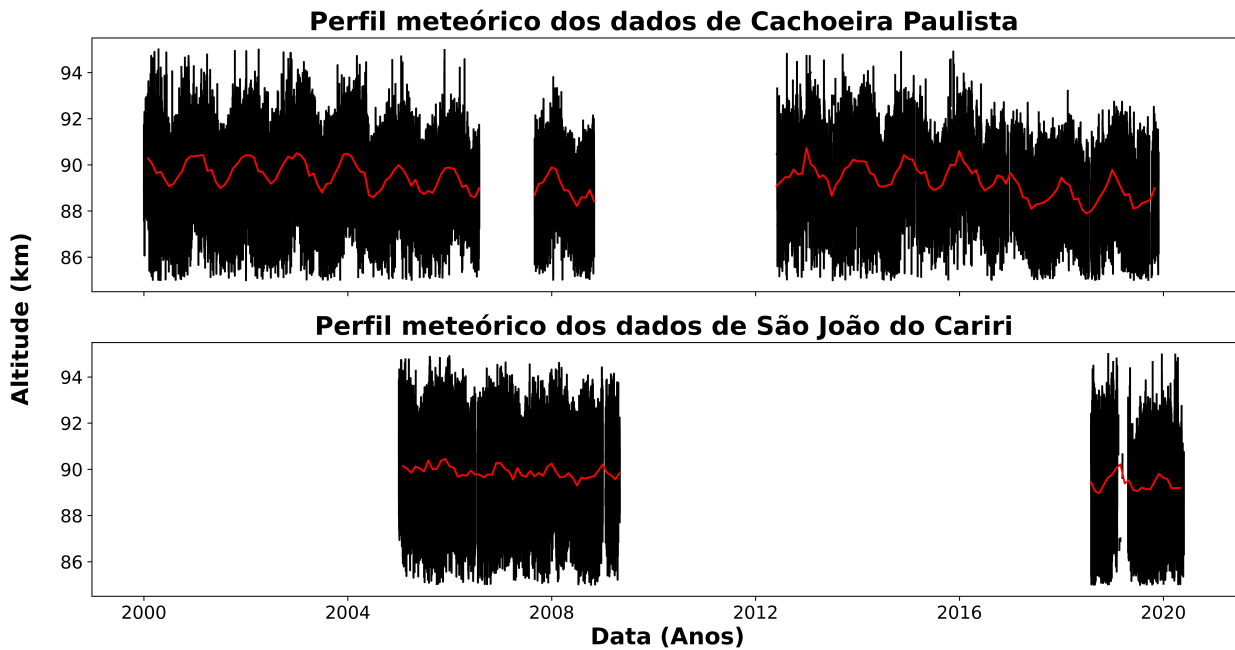
(LIMA et al., 2015) mostram em seu trabalho, também utilizando dados de

Figura 5.4 – Cada painel apresenta um histograma da distribuição vertical de ocorrência de meteoros registrados a cada 2 km de altitude para aquela hora composta. No eixo das abscissas tem-se a quantidade de meteoros não ambíguos e no eixo das ordenadas as altitudes em km. Na legenda tem-se a quantidade de dados (n°) daquele horário e o valor do pico (P) do ajuste de gaussiano (linha sólida vermelha) dos dados.



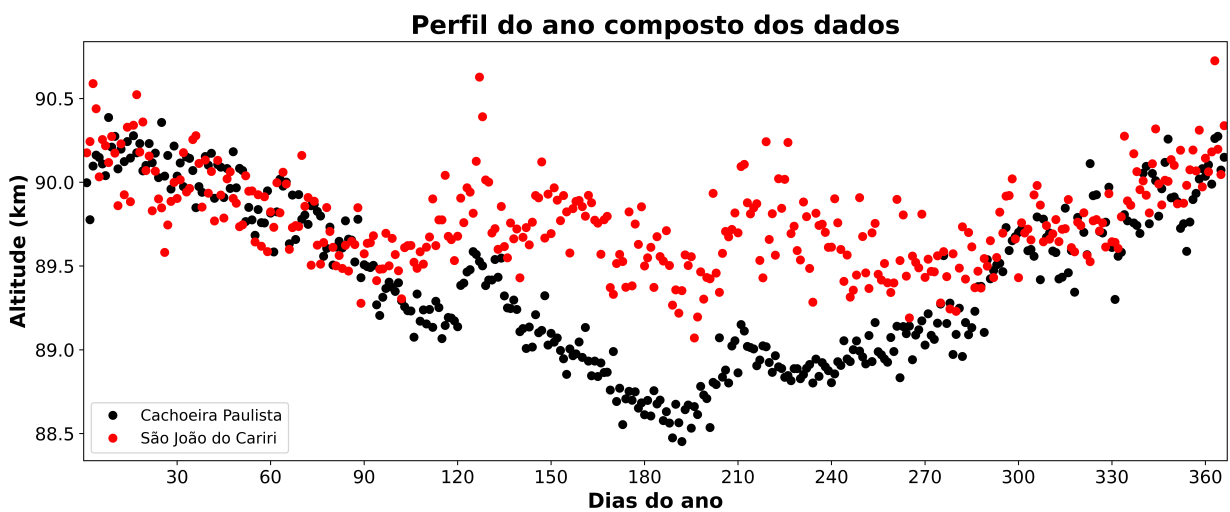
Cachoeira Paulista entre 1999 e 2008, que existe uma declividade a partir de 2002 devido à influência do Ciclo Solar 23, que vem a alterar a densidade da atmosfera, aqui nota-se a partir de 2003. A média da janela de 30 dias mostra um padrão melhor definido em Cachoeira Paulista, o mesmo não ocorre em São João do Cariri.

Figura 5.5 – Evolução das alturas horárias dos picos de meteoros (em preto) coletados pelo radar de Cachoeira Paulista [painel superior] e São João do Cariri [painel inferior]. Linha sólida em vermelho indica a média de duração de 30 dias.



A [Figura 5.6](#) mostra o pico diário dos meteoros para um ano composto, em que se utiliza a média daquele dia de todos os anos de dados. Os dados em vermelho são do radar de São João do Cariri e em preto de Cachoeira Paulista.

Figura 5.6 – Ano composto para os dados médios diários dos picos de concentração de meteoros. Em preto os dados de Cachoeira Paulista e em vermelho os de São João do Cariri.



Importante notar que ambos apresentam uma variação anual, com altura máxima

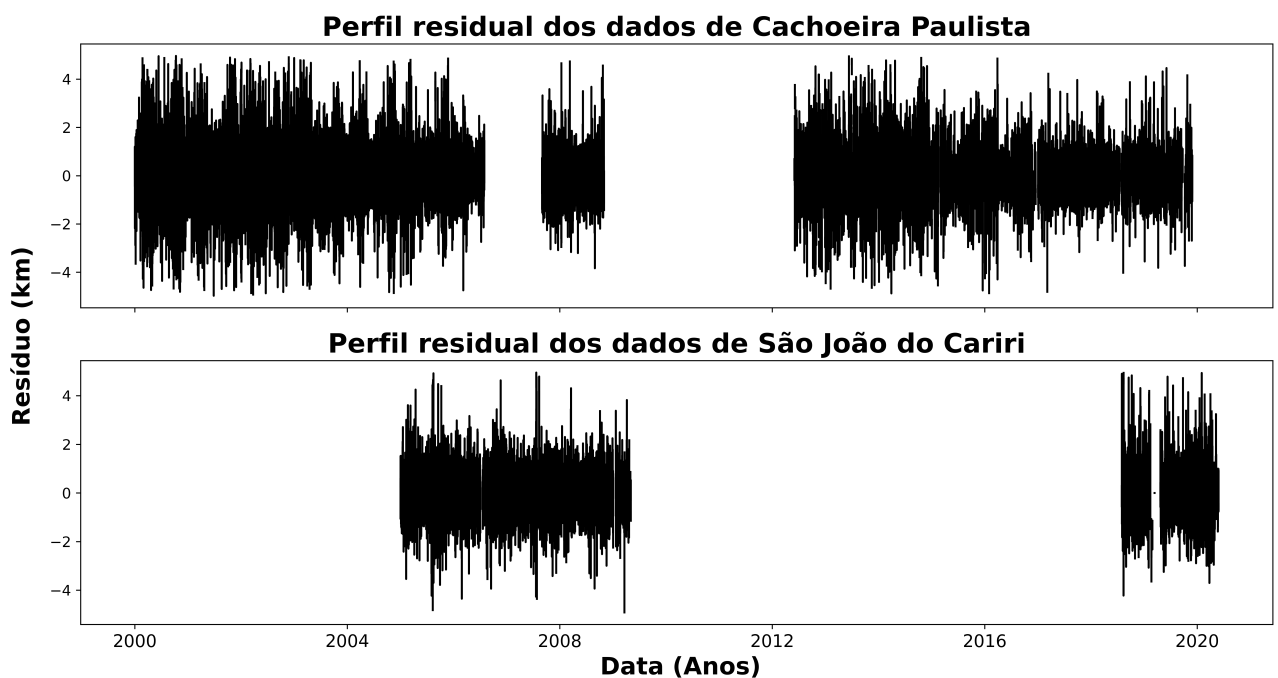
ocorrendo no verão, mas que também apresentam dois pequenos picos em torno dos dias 120 e 210. A variação maior ocorre em Cachoeira Paulista, em que a diferença entre mínimo e máximo é de quase 2 km, já em Cariri é de $\sim 1,5$ km. Obviamente se tem uma diferença latitudinal, pois no inverno (altura mínima) tem-se uma diferença de quase 1 km de altura entre as localidades.

Essa diferença de altitude também foi vista por (STOBER et al., 2012) no Hemisfério Norte, em que também utilizaram radares meteóricos de mesma frequência e obteve em Andenes ($69,3^\circ$ N; $16,0^\circ$ E) uma altura maior de ~ 2 km do que nos dados do radar de Juliusruh ($54,6^\circ$ N; $13,4^\circ$ E).

Como visto na Tabela 3.1, as principais oscilações geradas pelos potenciais gravitacionais lunares possuem períodos muito próximos à algum modo solar. Portanto, para estudar a maré lunar deve-se retirar a variação solar diária dos dados (MATSUSHITA, 1967). Para tal, é necessário um grande conjunto de dados para fornecer uma resolução espectral e conseguir separar as marés lunares e solares (PAULINO; BATISTA; BATISTA, 2013).

Assim, os dados horários foram distribuídos pela média horária mensal, obtendo o chamado aqui de resíduo. O resultado é mostrado na Figura 5.7, em que o resíduo de Cachoeira Paulista é apresentado no painel superior e de Cariri no inferior.

Figura 5.7 – Perfil residual horário dos dados de Cachoeira paulista [painel superior] e São João do Cariri [painel inferior].

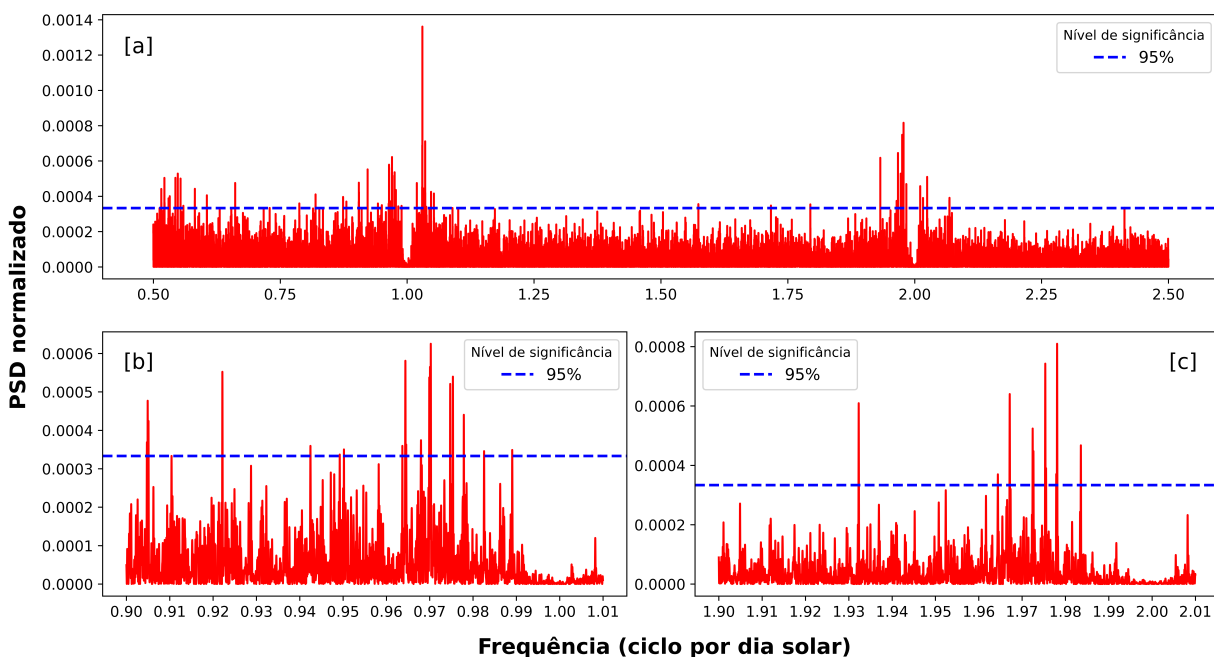


5.1.1 Periodograma de Lomb-Scargle nos dados

Para analisar se o conjunto de dados possui sinais de maré lunar, aplicou-se o periodograma de Lomb-Scargle (seção 4.3), processo também realizado por (SANDFORD; MULLER; MITCHELL, 2006) e (PAULINO; BATISTA; CLEMESHA, 2012).

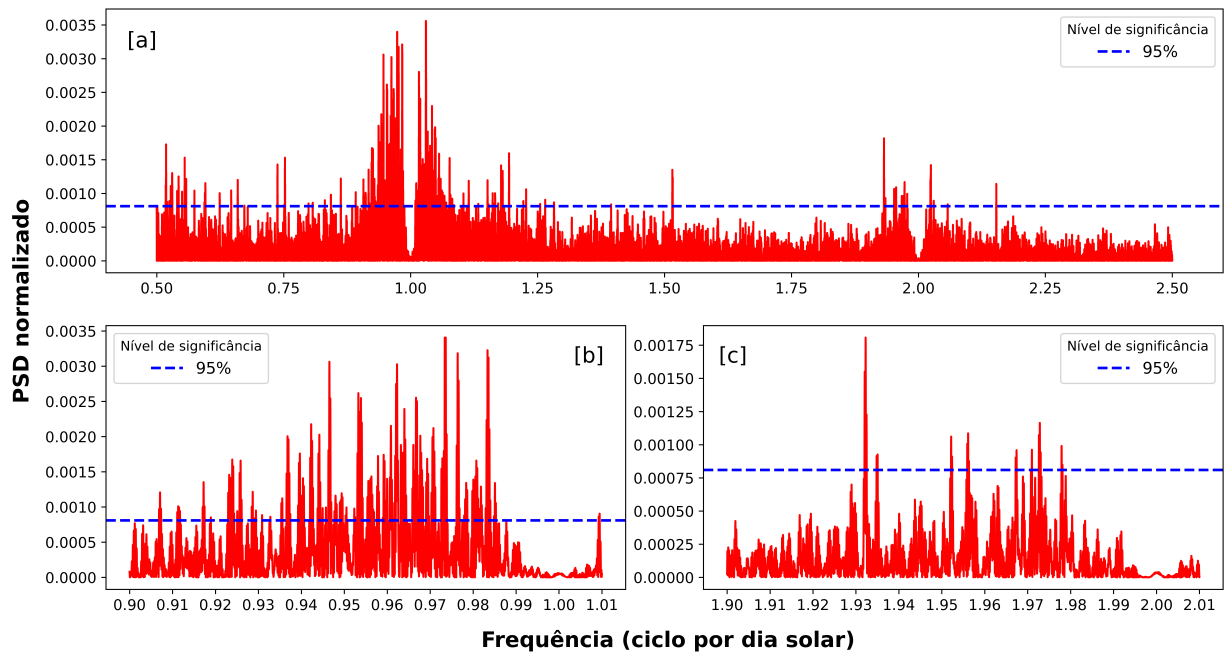
A Figura 5.8 tem o resultado do Lomb-Scargle para os dados de Cachoeira Paulista. O painel [a] mostra as frequências no intervalo de 0,5 a 2,5 ciclos por dia solar com um nível de confiança de 95 % (linha tracejada em azul). Nota-se diversos picos acima do nível de confiança, destacando-se para os próximos da M_1 e M_2 , além de enxergar o sucesso da retirada da influência da S_1 e S_2 dos dados. No painel [b] tem-se uma visão expandida para focar na periodicidade da componente diurna da Maré Lunar M_1 (24,848h), com frequências analisadas de 0,9 a 1,01 ciclos por dia. Existem alguns picos próximos da frequência da M_1 (0,966 ciclo por dia), que pode indicar a presença da mesma e alguns outros modos de marés muito próximos a ela. (SANDFORD; MULLER; MITCHELL, 2006) indicaram em seu trabalho que picos próximos a da maré lunar semidiurna podem ser explicados como resultados do periodograma de Lomb-Scargle a variação anual das amplitudes e fases da semidiurna, e aqui podendo estar ocorrendo o mesmo com a componente diurna. Para o painel [c] tem-se a expansão de frequências entre 1,9 e 2,01 ciclos por dia para enxergar a maré lunar semidiurna. Observa-se um pico bem definido em 1,932 (ciclo por dia solar) que dá uma forte evidência da M_2 .

Figura 5.8 – [a] Análise de Lomb-Scargle com frequências (ciclo por dia solar) entre 0,5 e 2,5 para os resíduos do pico da camada calculados do radar de Cachoeira Paulista. [b] Redução dos limites de frequência para maré lunar diurna M_1 . [c] Redução dos limites de frequência para maré lunar semidiurna M_2 .



O periodograma de Lomb-Scargle nos dados de São João do Cariri é mostrado na [Figura 5.9](#). Observa-se a retirada da influência da S_1 e S_2 em [a], em [b] tem-se um conjunto de picos próximos da frequência da M_1 e em [c] um pico bem definido para M_2 . Vamos considerar estes picos como fortes evidências de modos da maré lunar presente no conjunto de dados para ambas localidades.

Figura 5.9 – Análise de Lomb-Scargle para os resíduos do pico da camada calculados do radar de São João do Cariri. Mesma descrição da [Figura 5.9](#)



5.1.2 Identificação da maré lunar

Como as marés lunares não seguem o movimento do Sol e sim o movimento da Lua, elas não irão repetir o dia a dia com a mesma fase medida na hora local. Assim, deve-se aplicar uma análise em que relacione a fase da maré com a posição da Lua ([SANDFORD; MULLER; MITCHELL, 2006](#)). As análises serão feitas do dia composto lunar, sendo as medidas do tempo solar convertida para tempo lunar, em que 24h e 50min solar se refere ao tempo necessário para a Lua completar uma órbita em torno da Terra ([seção 3.2](#)), ou seja, correspondente a um dia lunar. A conversão é dada pela [Equação 3.1](#).

Os resíduos serão agrupados em um dia composto, ao qual significa agrupar as medidas realizadas de um intervalo de tempo como se tivesse medido em um único dia. A análise do dia composto lunar revela apenas características do número inteiro de ciclos do seu dia. Segundo ([PAULINO; BATISTA; BATISTA, 2013](#)) qualquer característica coerente que se repita com um período igual a “n” (número inteiro) vezes a frequência de trânsito lunar será evidente, ao mesmo tempo em que irá se auto cancelar qualquer

oscilação com frequência não relacionada ao trânsito lunar após um enorme número de ciclos.

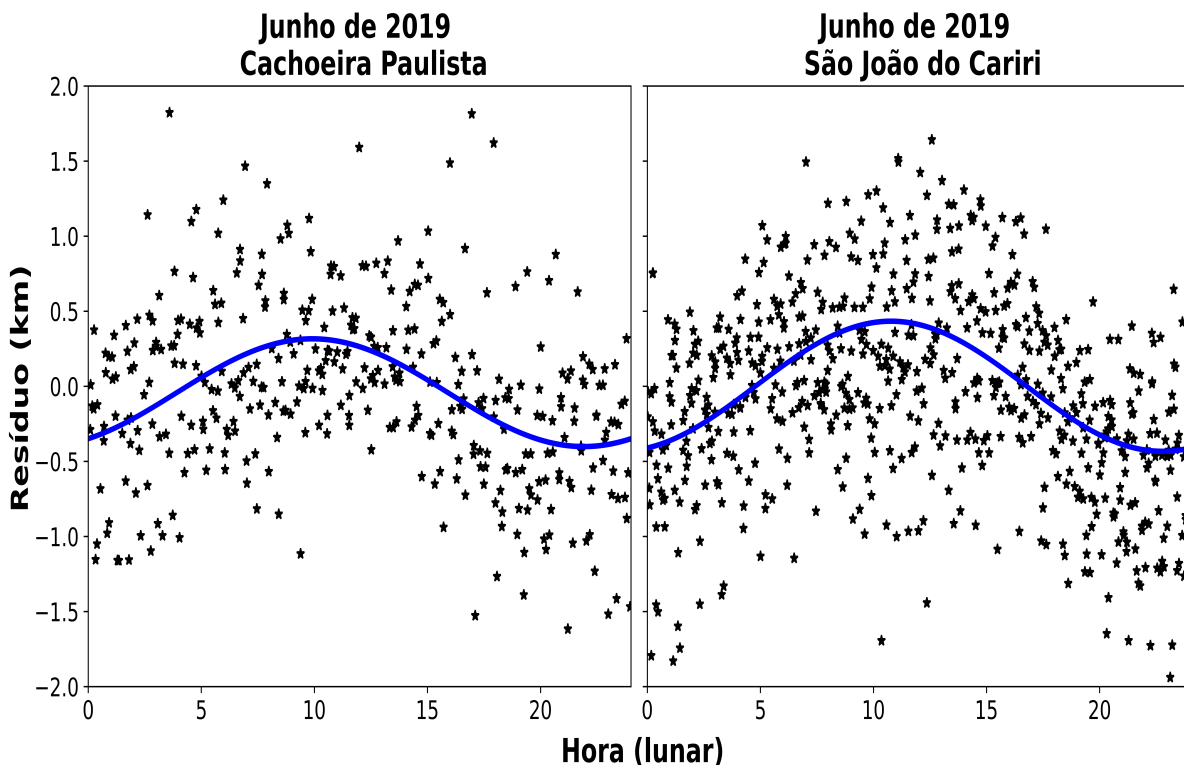
Para calcular as amplitudes e as fases das marés utilizou-se o método dos mínimos quadrados que segue a seguinte expressão:

$$y(\tau) = \sum_{n=0}^2 A_n \cos(n\tau + \phi_n) \quad (5.1)$$

onde τ é o tempo lunar e A_n e ϕ_n representam a amplitude e a fase, respectivamente, para n sub-harmônicos do dia lunar (24,848 h).

A [Figura 5.10](#) mostra um exemplo de dia lunar composto, com os dados de junho de 2019 para as localidades de Cachoeira Paulista [painel esquerdo] e São João do Cariri [painel direito]. Os símbolos representam as medidas de altura em hora lunar universal, a linha contínua representa o ajuste de mínimos quadrados para o período de 24 horas lunares, ou seja, a maré lunar diurna. Pode-se observar que a oscilação diurna é bem evidente pelo ajuste nesse conjunto de dados, atingindo amplitudes de ~400 m.

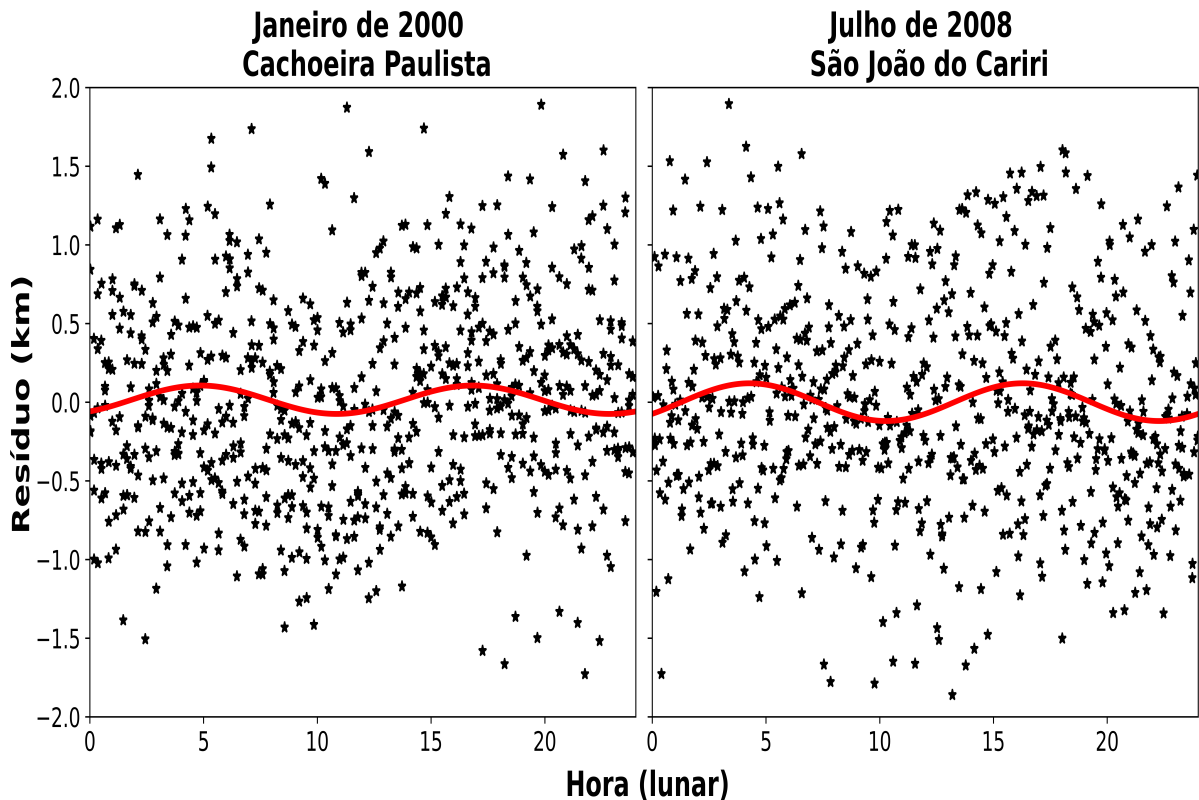
Figura 5.10 – [a] Análise do dia composto lunar para o mês de junho de 2019 em Cachoeira Paulista [painel esquerdo] e São João do Cariri [painel direito]. A linha contínua azul representa o ajuste de mínimos quadrados para a maré lunar diurna.



Na [Figura 5.11](#) o dia composto para os dados de janeiro de 2000 de Cachoeira

Paulista [Painel esquerdo] e julho de 2008 de São João do Cariri [painel direito]. Os símbolos representam os dados em hora lunar universal e a linha sólida em vermelho o ajuste para a maré lunar semidiurna M_2 (12 horas lunar), com amplitude de ~ 130 m.

Figura 5.11 – [a] Análise do dia composto lunar para os meses de janeiro de 2000 em Cachoeira Paulista [painel esquerdo] e de julho de 2008 em São João do Cariri [painel direito]. A linha contínua vermelha representa o ajuste de mínimos quadrados para a maré lunar semidiurna.



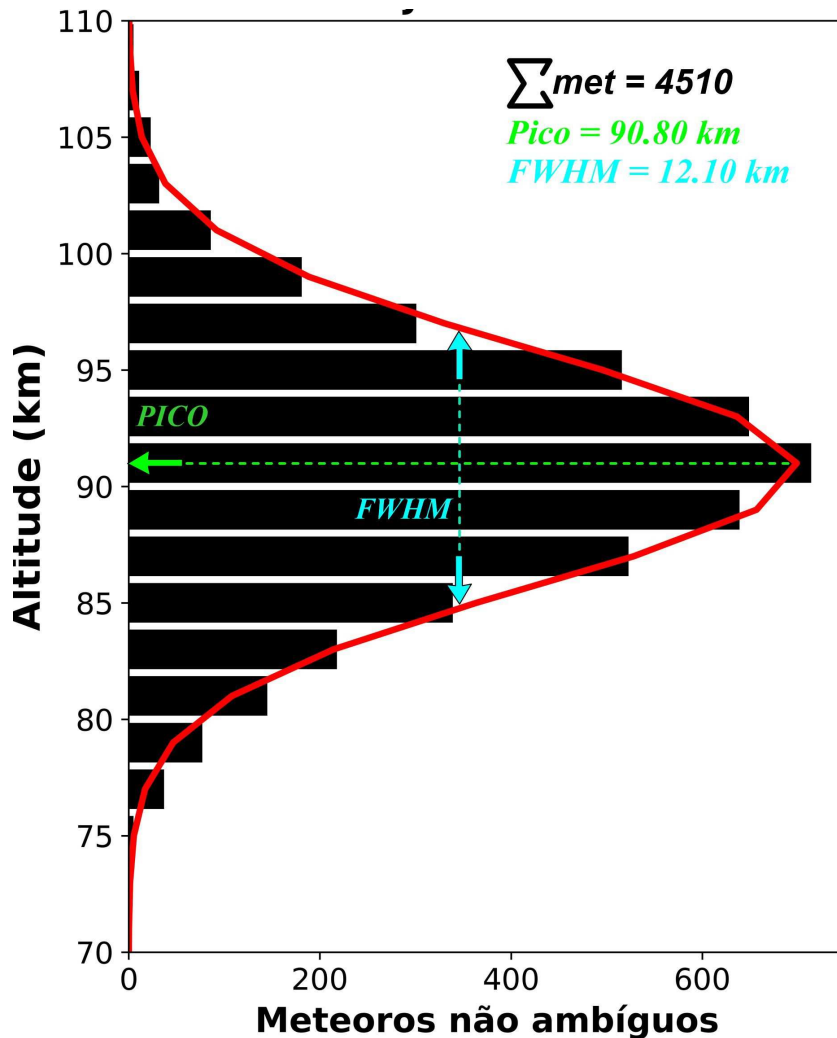
As análises de dia composto mostram claras evidências significativas de marés lunares nos dados. Como é necessário um grande conjunto de dados para fornecer uma boa resolução espectral, serão utilizados todos os anos de dados para calcular as marés em cada mês (seção 6.1).

5.2 Largura da camada

Com o intuito de analisar se as marés lunares afetam a espessura da camada, foi realizado o mesmo procedimento feito para a encontrar o pico de concentração dos meteoros (seção 5.1). A análise é feita utilizando o FWHM (seção 4.4) do ajuste gaussiano aplicado nos dados de meteoros. Como exemplo, a Figura 5.12 mostra a distribuição da altura dos meteoros observados pelo radar de São João do Cariri no dia 05 de janeiro de

2005. Tem-se o ajuste gaussiano (linha sólida vermelha) destacando o pico de concentração dos dados e seu FWHM.

Figura 5.12 – Histograma da distribuição de altura de um total de 4510 meteoros ($\sum met$) registrados em 5 de janeiro de 2005 pelo radar de São João do Cariri, usando um bin de 2 km de altura. A curva gaussiana ajustada para a estimativa do Pico (linha tracejada em verde) e FWHM (linha tracejada em azul) é representada como uma linha sólida vermelha.



O comportamento horário composto dos dados desse mesmo dia é apresentado na [Figura 5.13](#), em que se mostra uma melhoria na quantidade de meteoros (n°) de fluxo mínimo (~ 20 h universal) e uma boa representatividade do ajuste gaussiano (linha sólida vermelha) com seus valores de pico (P) e de seu FWHM (L).

Os valores horários do FWHM calculados (em vermelho) em torno dos valores de pico (em preto) a partir de observações de radares de meteoros são apresentados na [Figura 5.14](#). Com a remoção da influência solar nos dados, mesmo procedimento utilizado para o resíduo do pico de concentração, é aplicado o periodograma de Lomb-Scargle no resíduo encontrado.

Figura 5.13 – [a] Fluxo horário solar (UT) ajustado de meteoros não ambíguos do mesmo dia da Figura 5.12. Cada painel apresenta um histograma da distribuição vertical de ocorrência de meteoros registrados a cada 2 km de altitude para aquela hora composta. No eixo das abscissas tem-se a quantidade de meteoros não ambíguos e no eixo das ordenadas as altitudes em quilômetros. Na legenda tem-se a quantidade de dados (n°) daquele horário e o seu valor do pico (P) e FWHM (L) do ajuste gaussiano (linha sólida vermelha) dos dados.

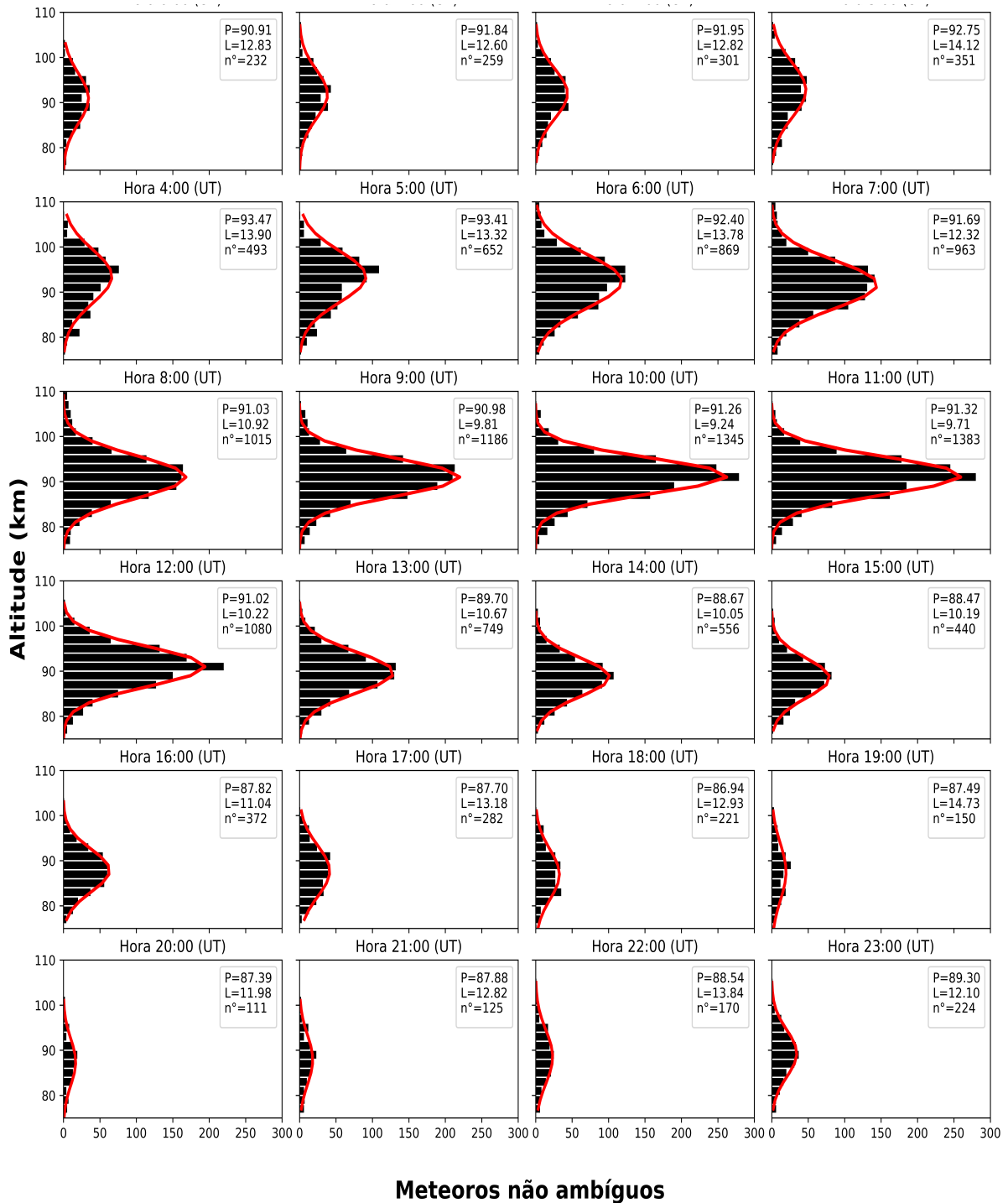
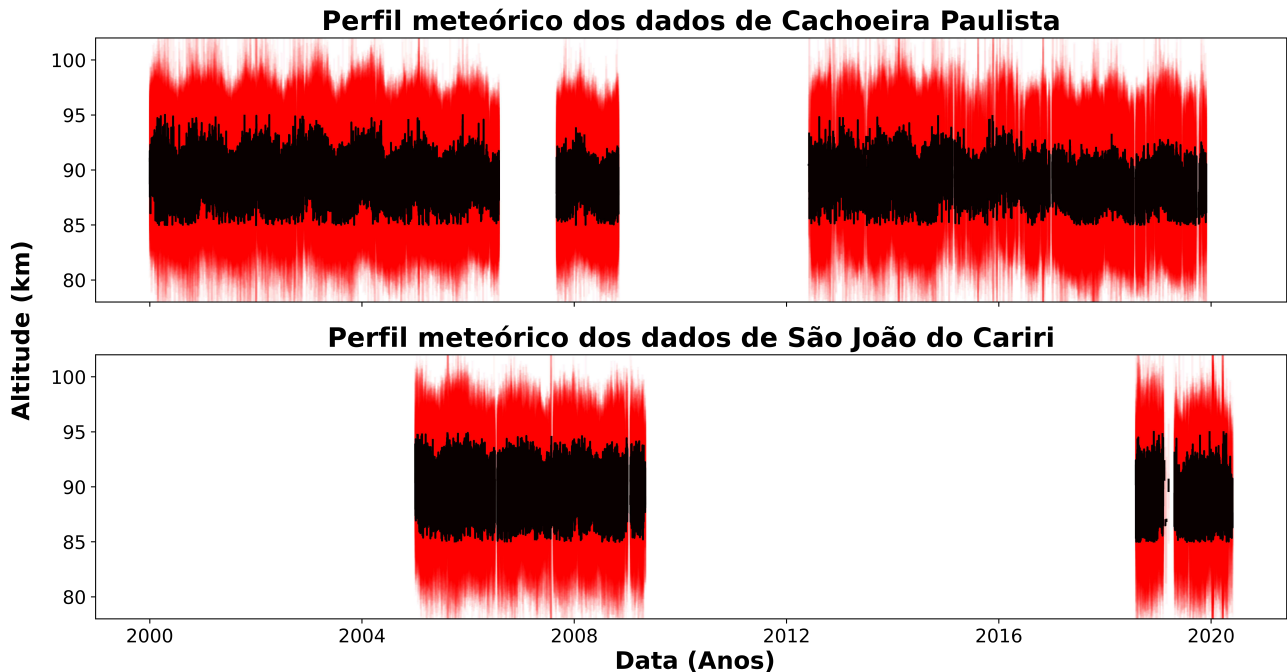


Figura 5.14 – Evolução das alturas horárias dos picos de meteoros (em preto) com o seu FWHM (área sombreada em vermelho) das observações do radar de meteoro localizado em Cachoeira Paulista [painel superior] e em São João do Cariri [painel inferior].



A [Figura 5.15](#) é o resultado do Lomb-Scargle para os dados de Cachoeira Paulista, em que se tem no painel [a] as frequências no intervalo de 0,5 a 2,5 ciclos por dia solar com um nível de confiança de 95% (linha tracejada em azul). Observa-se que não tem picos em 1 e 2 ciclos por dia, indicando assim, que a influência da S_1 e S_2 foi retirada com sucesso. No painel [b] tem a visão expandida para a focalização da periodicidade da M_1 , o pico de confiança encontrado é muito próximo (em 0,962 ciclos por dia) da componente diurna lunar. Já o painel [c] tem o objetivo de focar na frequência da M_2 , nota-se um pico bem definido em 1,929 que também é muito próximo da componente semidiurna lunar.

A aplicação do periodograma de Lomb-Scargle nos dados de São João do Cariri é vista na [Figura 5.16](#). O painel [a] confirma que se teve êxito na retirada da influência da S_1 e da S_2 . Painéis [b] e [c] são expansões para o foco da M_1 e M_2 respectivamente, se tem picos significativos muito próximos da M_1 e, diferentemente do que foi visto nos dados de Cachoeira Paulista, tem-se um pico bem definido referente a M_2 , inclusive é o único significativo nesse intervalo de 1,90 e 2,01 ciclos por dia.

Tais análises dão fortes indícios da presença da maré lunar na largura da camada, assim, os dados também serão convertidos para o tempo lunar ([Equação 3.1](#)) e aplicado o método dos mínimos quadrados ([Equação 5.1](#)) em dias compostos referentes a cada mês do ano utilizando os dados completos.

Figura 5.15 – [a] Análise de Lomb-Scargle com frequências (ciclo por dia solar) entre 0,5 e 2,5 para os resíduos do FWHM calculados do radar de Cachoeira Paulista. [b] Redução dos limites de frequência para maré lunar diurna M_1 . [c] Redução dos limites de frequência para a maré lunar semidiurna M_2 .

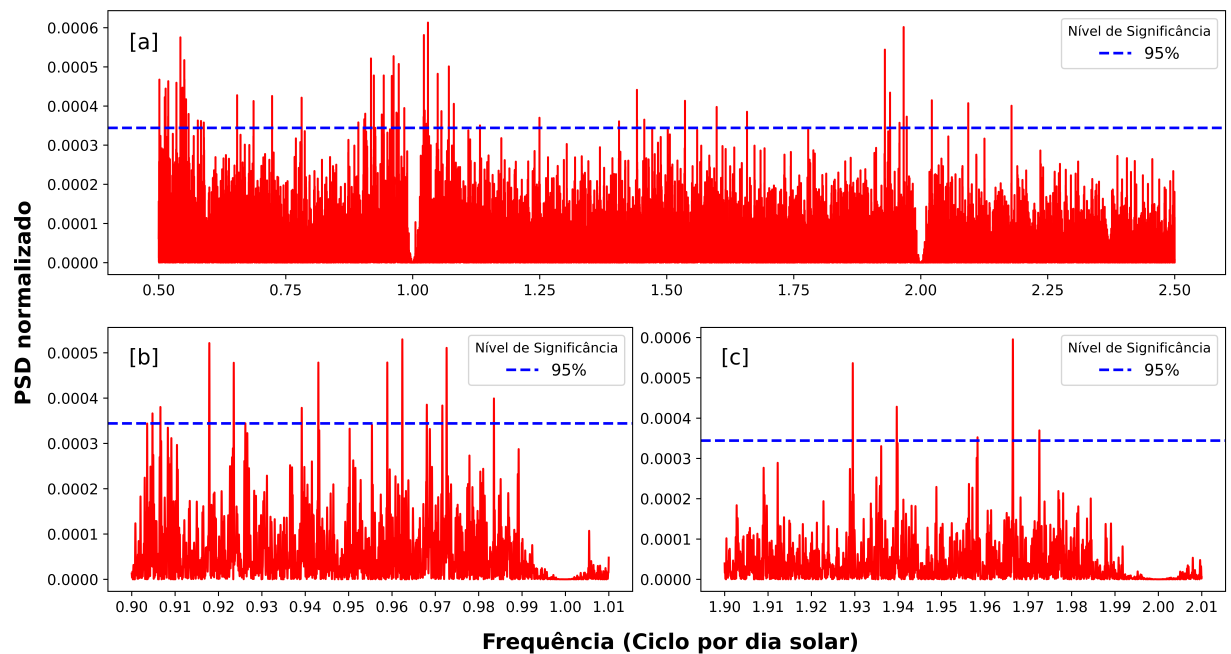
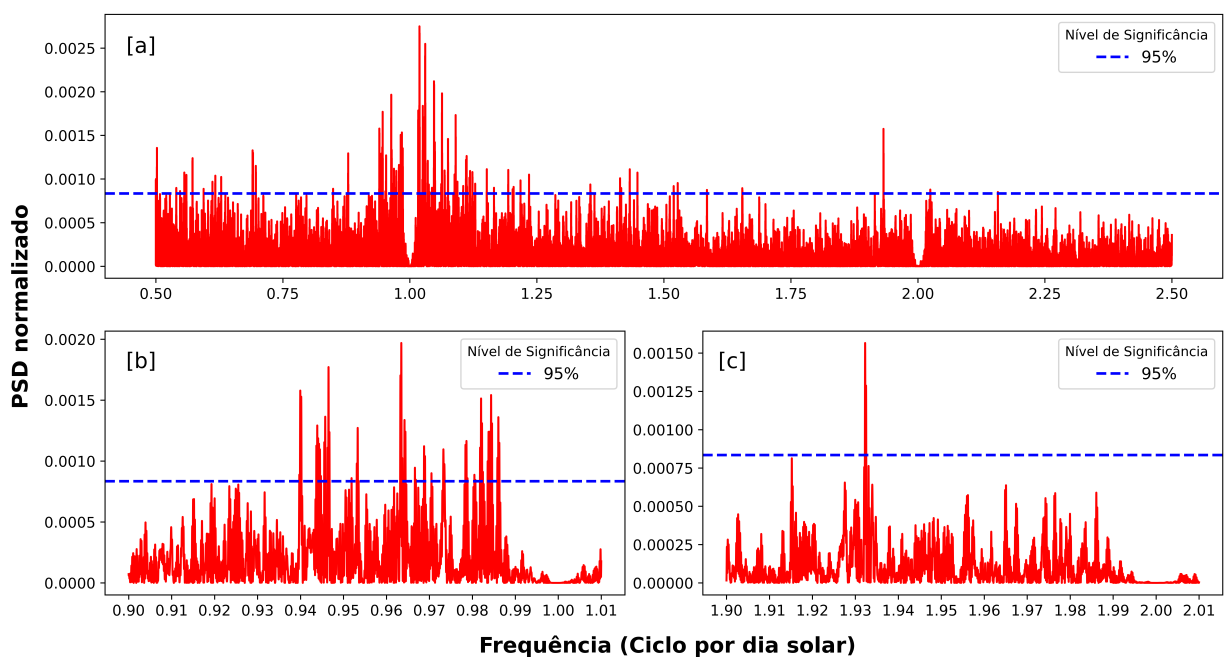


Figura 5.16 – [a] Análise de Lomb-Scargle para os resíduos do FWHM calculados do radar de São João do Cariri. Mesma descrição da [Figura 5.15](#)



6 Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da análise mês a mês composto da resposta do pico e largura da camada à forçante da maré diurna e semidiurna lunar nas localidades de Cachoeira Paulista e São João do Cariri.

6.1 Pico da camada

O método dos mínimos quadrados foi aplicado a todo resíduo para formar um ano composto. O resultado para a maré lunar diurna é apresentado na [Figura 6.1](#), apresentando em cada painel os dados do respectivo mês composto em hora lunar local em função do resíduo em quilômetros (variando de -0,26 km a 0,26 km). Os pontos são os valores médios em cada intervalo de tempo lunar de hora em hora, a linha tracejada mais espessa representa o ajuste para a componente diurna e a menos espessa (em marrom) indicando o ponto zero do resíduo, as barras verticais de erro o desvio padrão da média. Tem-se nas duas primeiras colunas os dados de São João do Cariri (linha tracejada em azul) e nas duas últimas colunas os dados de Cachoeira Paulista (linha tracejada em vermelho). O resultado revela que há boa concordância entre a oscilação (24 horas lunar) com os dados, em que as melhores ocorrem nos meses de solstícios, sendo eles em fevereiro para ambas localidades, além de julho em São João do Cariri e janeiro em Cachoeira Paulista. Nota-se que para o restante existe uma oscilação forte com dois máximos ocorrendo em seus pontos médios, dando indícios da predominância do modo M_2 nos dados.

Já o resultado para a componente semidiurna é mostrada na [Figura 6.2](#), apresentando em cada painel os dados do respectivo mês composto em hora lunar local em função do resíduo em quilômetros (variando de -0,2 km a 0,15 km). Se tem nas duas primeiras colunas os dados de São João do Cariri (linha tracejada em roxo) e nas duas últimas colunas os dados de Cachoeira Paulista (linha tracejada em verde), apresentando uma excelente concordância entre o ajuste (12 horas lunar) e os pontos de resíduos para todo o ano composto, salvo os meses de fevereiro em ambas localidades e janeiro nos dados de Cachoeira Paulista. Se percebe que esses meses foram os que demonstraram uma predominância da M_1 , menos o mês de julho na localidade de Cachoeira Paulista, pois o mesmo apresentou uma boa concordância para ambas as componentes.

As amplitudes (painel superior) e as fases (painel inferior) médias mensais da M_1 e M_2 de ambas localidades são apresentadas na [Figura 6.3](#). As linhas pretas representam as marés lunares dos dados de Cachoeira Paulista e as vermelhas apresentam os dados de São João do Cariri, sendo as sólidas para componente diurna e as tracejadas para a componente semidiurna, além de possuírem as barras verticais que indicam o erro de

Figura 6.1 – Ajustes de mínimos quadrados da componente diurna aos valores médios mensais horários dos resíduos do pico da camada. Cada painel apresenta o mês do ano composto com pontos médios horários e barras de erros verticais representando os desvios padrão. Os resultados são apresentados em quilômetros por horas lunares locais. As duas colunas da esquerda tem-se os dados de São João do Cariri (em azul) e a duas da direita os dados de Cachoeira Paulista (em vermelho). A linha tracejada em marrom é ajustada em 0 km.

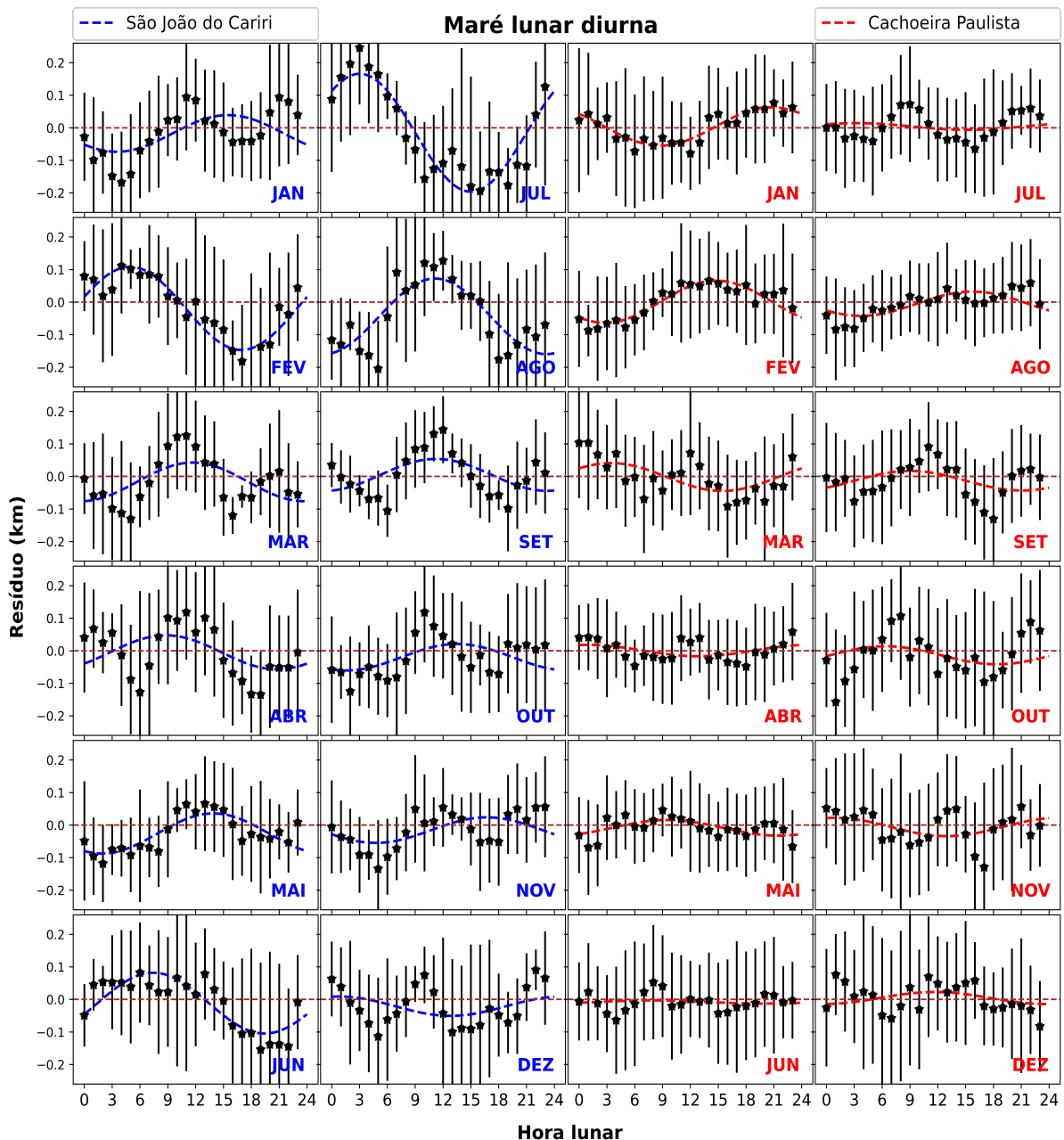
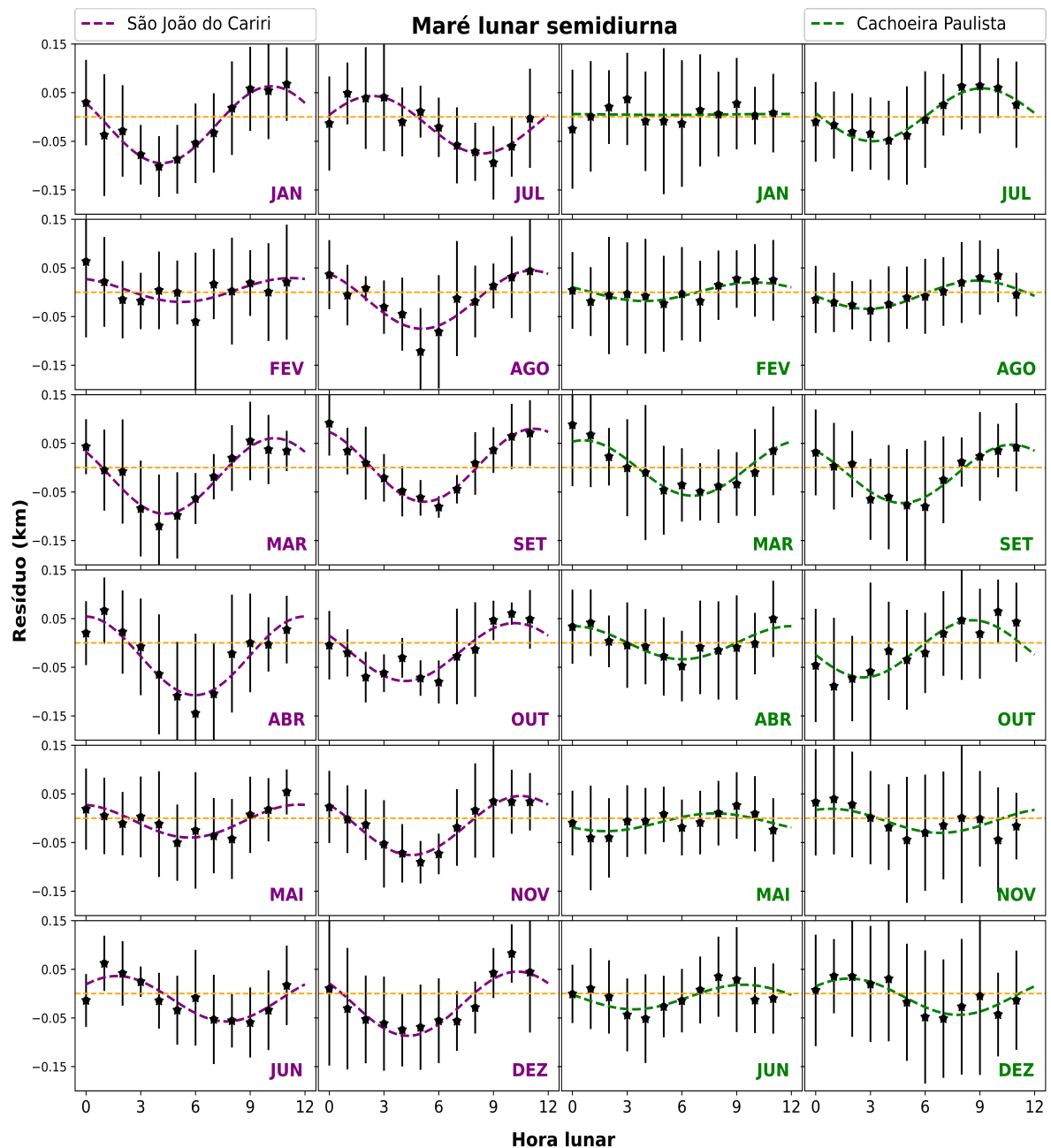
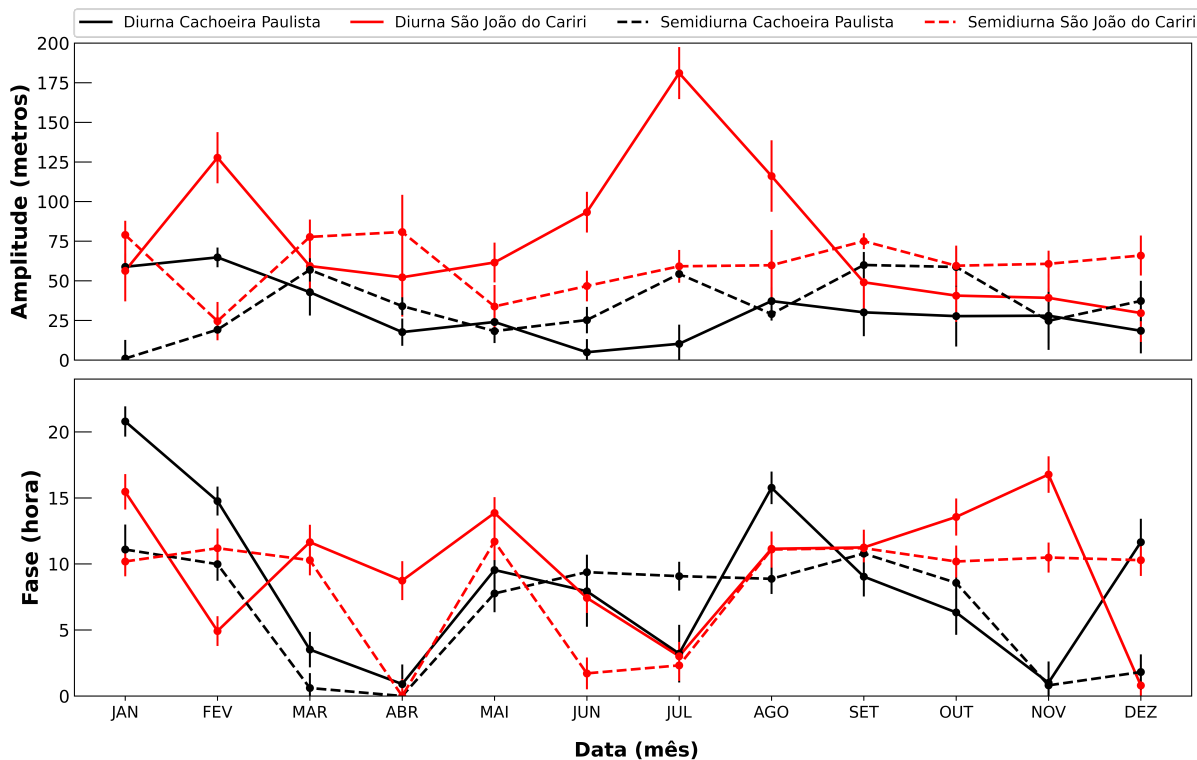


Figura 6.2 – Ajustes de mínimos quadrados da componente semidiurna aos valores médios mensais horários dos resíduos do pico da camada. Cada painel apresenta o mês do ano composto com pontos médios horários e barras de erros verticais representando os desvios padrão. Os resultados são apresentados em quilômetros por horas lunares locais. As duas colunas da esquerda tem-se os dados de São João do Cariri (em roxo) e a duas da direita os dados de Cachoeira Paulista (em verde). A linha tracejada em laranja é ajustada em 0 km.



desvio padrão dos parâmetros. As amplitudes das marés estão variando entre ~1 e 180 metros com suas fases (hora do máximo) ocorrendo durante todo o dia.

Figura 6.3 – [painel superior] amplitudes da componente diurna (linhas sólidas) e da semidiurna (linha tracejada) de Cachoeira Paulista (em preto) e São João do Cariri (em vermelho). [painel inferior] Respectivas fases das marés lunares.



Observa-se que as maiores amplitudes da componente diurna de Cachoeira Paulista ocorreram nos meses de solstício de verão com fases após às 14 horas, e as mínimas ocorrendo no solstício de inverno (junho e julho) com fases entre 4 e 10 horas. Já para os dados de São João de Cariri tem-se as amplitudes com máximas acontecendo nos meses de solstícios, entre 02 e 06 horas, e as mínimas ocorrendo nos equinócios geralmente entre 10 e 17 horas.

Para a maré lunar semidiurna, os dados de Cachoeira Paulista apresentando amplitudes máximas (~60 metros) ocorrendo nos meses de equinócios (março, setembro e outubro) e no mês de julho, com suas fases acontecendo entre 08 e 00 horas. Já o seu mínimo acontece no solstício de verão (janeiro e fevereiro) com fases entre 10 e 12 horas. Para os dados de São João do Cariri as amplitudes variam entre ~20 e 80 metros, com máximas nos meses de janeiro, março, abril e setembro entre as 10 e 00 horas, e para as mínimas nos meses de fevereiro, maio e junho entre as 10 e 02 horas.

Importante notar que a intensificação das amplitudes da M_1 não coincidiu com as da M_2 em ambas localidades, pois, quando as amplitudes máximas da componente

diurna ocorreram, teve-se baixas amplitudes da semidiurna. Assim, em algumas épocas as amplitudes da maré lunar diurna foram maiores que as amplitudes da maré lunar semidiurna, esse comportamento também foi observado com dados de TEC por (PEDATELLA; FORBES, 2010) e (PAULINO et al., 2017).

Em ambas localidades a maré lunar diurna teve um máximo em fevereiro, também relatado por (PEDATELLA; FORBES, 2010) para os 50 primeiros dias no Hemisfério Norte. Nessa época, vários trabalhos relacionaram o aumento da amplitude da maré lunar com o aquecimento estratosférico repentino [(ZHANG; FORBES, 2013), (PAULINO et al., 2012), (PEDATELLA; LIU; RICHMOND, 2012), (YAMAZAKI, 2013), (YAMAZAKI et al., 2017)]. (GONCHARENKO et al., 2013) discutem quatro possíveis mecanismos para o aquecimento estratosférico repentino, ao qual podem estar influenciando nesse aumento de amplitude da componente diurna.

Ressalta-se as amplitudes significativas da M_2 durante quase todo o ano, com máximas ocorrendo nos equinócios e solstício de inverno (em Cachoeira Paulista), porém, muitos trabalhos apresentaram comportamento contrário com dados de ventos e temperaturas, ou seja, amplitudes máximas ocorrendo no solstício de Verão [(STENING; JACOBI, 2000), (SANDFORD; MITCHELL, 2007), (SANDFORD et al., 2007), (PEDATELLA; FORBES, 2010), (PAULINO; BATISTA; CLEMESHA, 2012), (PAULINO; BATISTA; BATISTA, 2013)]. Ambas componentes apresentaram uma variação latitudinal de amplitude e fase, com maiores amplitudes ocorrendo em São João do Cariri, além da maioria ocorrer mais tarde nessa localidade.

6.2 Largura da camada

O resultado para o método dos mínimos quadrados com o intuito de estudar a largura da camada aplicada ao ano composto é apresentado nesta seção. O resultado para a maré lunar diurna é apresentado na Figura 6.4, apresentando em cada painel os dados do respectivo mês composto em hora lunar local em função do resíduo em quilômetros (variando de -0,5 km a 0,5 km).

O resultado revela que não se tem uma boa concordância entre a oscilação (24 horas) com os dados de Cachoeira Paulista, mas em São João do Cariri tem-se a maré lunar diurna é vista nos dados próximos ao inverno, em maio e junho. Assim como ocorreu nos dados de pico da camada, nota-se também existe uma oscilação forte com dois máximos ocorrendo nos meses compostos, dando indícios da predominância do modo M_2 .

O resultado para a componente semidiurna é mostrada na Figura 6.5, com os valores de amplitude do eixo das ordenadas variando entre -0,26 km a 0,26 km. Os dados de Cachoeira Paulista apresentam boas representatividades nos solstícios de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) e de inverno (julho e agosto), além de alguns meses de equinócios (abril

Figura 6.4 – Mesma descrição da Figura 6.1 para os dados da largura da camada.

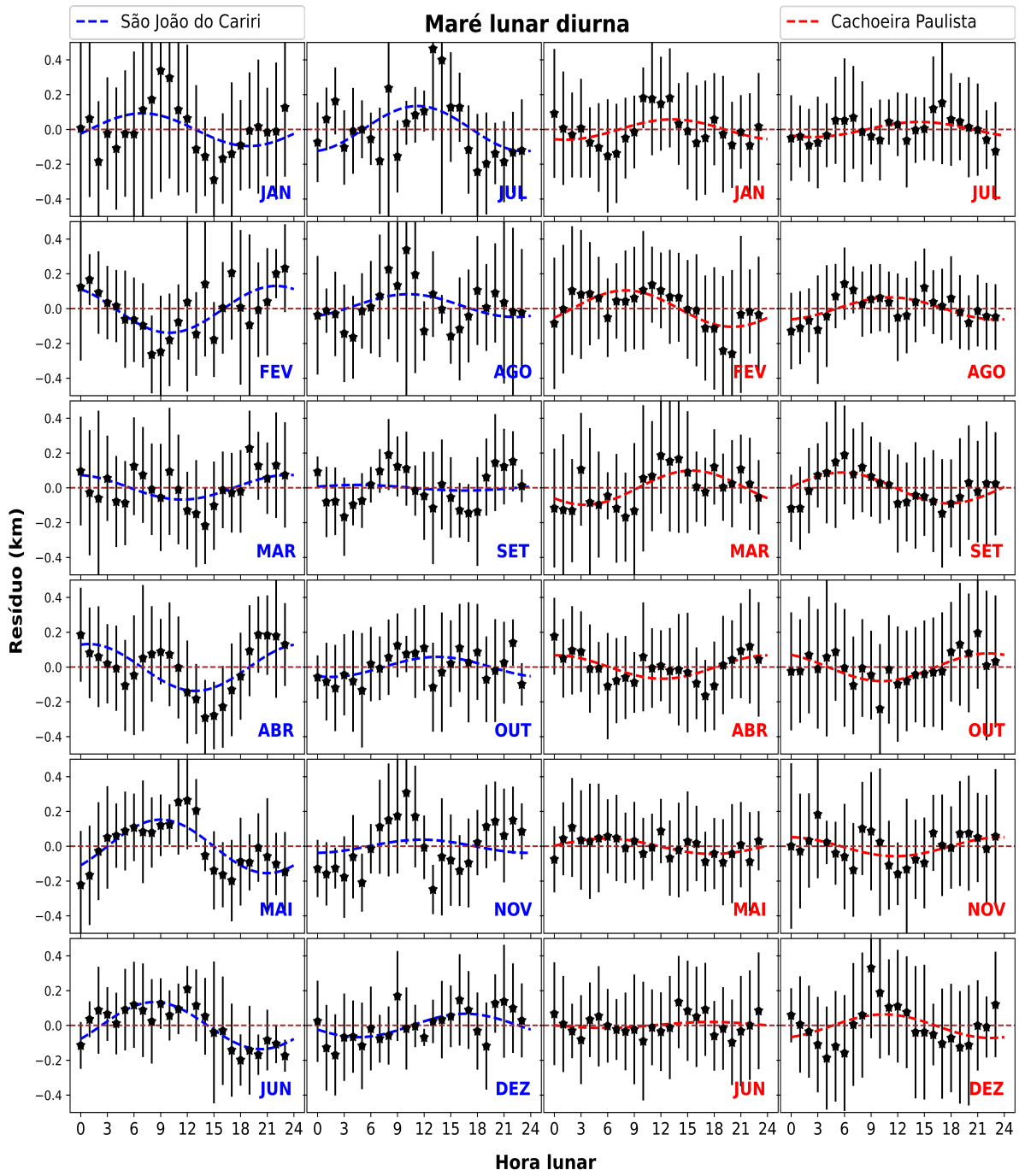
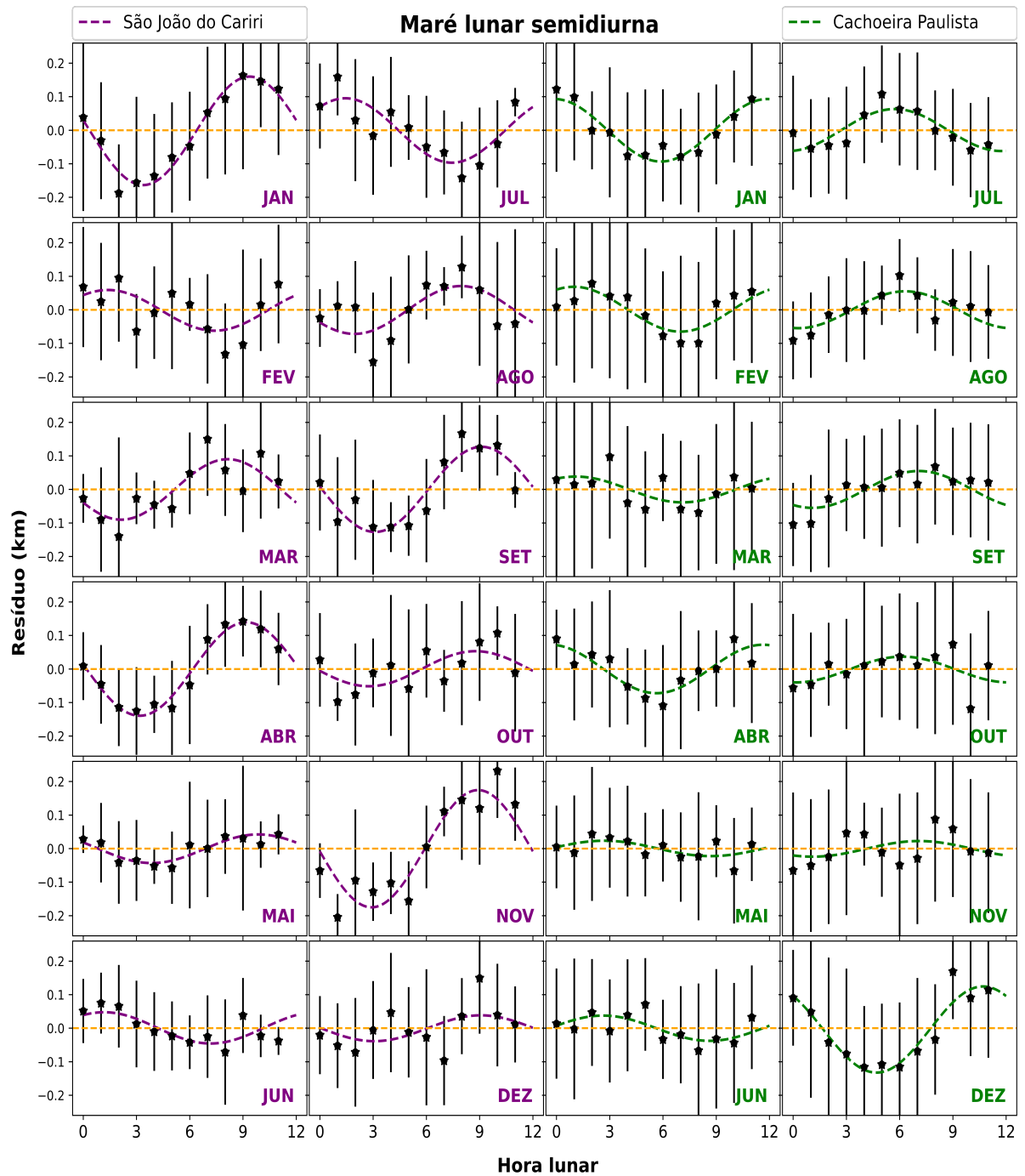


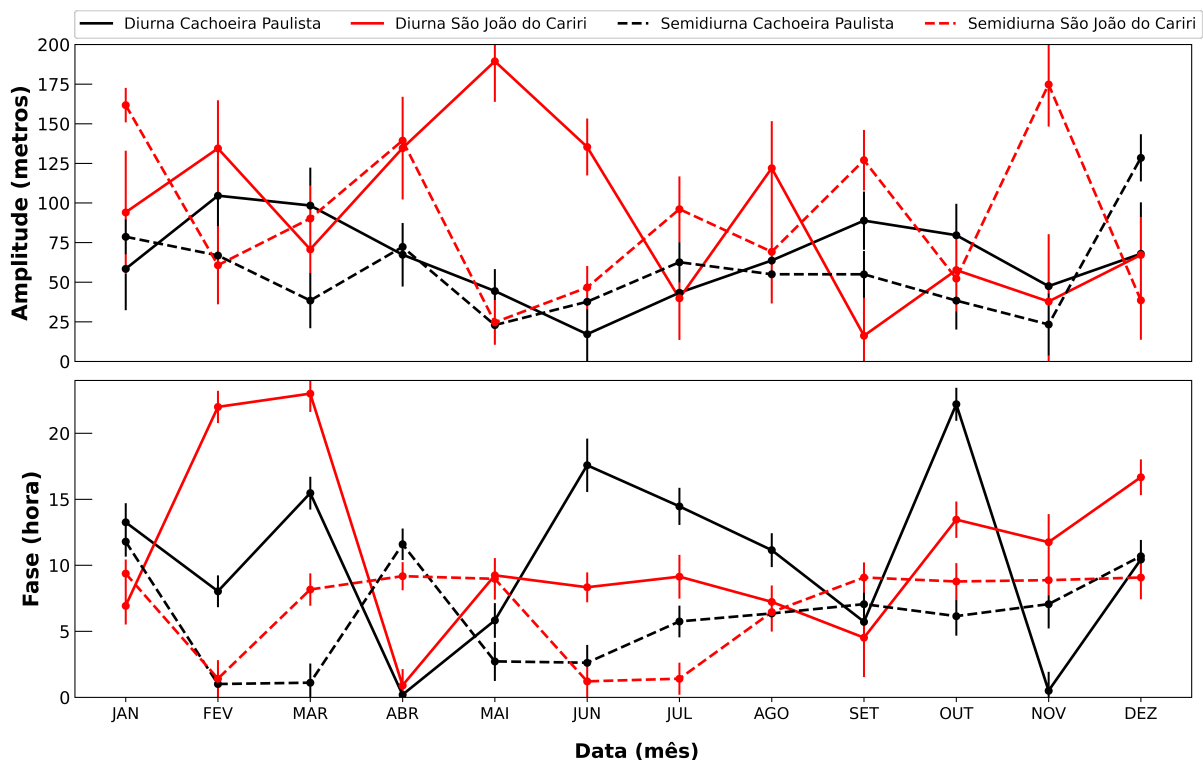
Figura 6.5 – Mesma descrição da Figura 6.2 para os dados da largura da camada.



e setembro). Já para os dados de São João do Cariri tem-se boas representatividades nos meses de janeiro, abril, julho, setembro e novembro. Identifica-se uma possível influência de um modo quarterdiurno nos meses de novembro, em Cachoeira Paulista, e de dezembro nos dados de São João do Cariri, o que pode ser explorado em trabalhos futuros.

As amplitudes e as fases médias mensais da M_1 e M_2 de ambas localidades para os dados da largura da camada são apresentadas na [Figura 6.6](#). As amplitudes da componente diurna (linhas sólidas) variaram entre 20 e 190 metros. As maiores amplitudes para os dados de Cachoeira Paulista ocorreram próximos aos equinócios (fevereiro, março, setembro e outubro) e o mínimo no solstício de inverno em junho, com sua fase variando durante todo o dia. Já os dados de São João do Cariri tiveram amplitudes acima de 100 metros ocorrendo em diversos meses (fevereiro, abril, junho e agosto), com a mais alta de ~190 metros ocorrendo no mês de maio. O mínimo ocorreu em setembro. Suas respectivas fases também variaram durante todo o dia.

Figura 6.6 – Mesma descrição da [Figura 6.3](#) para os dados da largura da camada.



Os resultados da semidiurna indicam que as suas amplitudes variaram entre 25 e 130 metros para os dados de Cachoeira Paulista, onde o seu máximo encontrado foi em dezembro com amplitude atingindo quase o dobro das demais. Tal comportamento pode estar relacionado com o aquecimento súbito estratosférico que ocorre principalmente nessa época ([YAMAZAKI et al., 2017](#)). A fase variou bastante para essa localidade. Para os meses dos dados de São João do Cariri as amplitudes da M_2 atingiram valores altos em

comparação com as de Cachoeira Paulista, destacando as maiores em janeiro, abril, julho, setembro e novembro, em que esse último atingiu ~175 metros. Esse máximo em novembro também foi detectado por (PAULINO et al., 2015) em dados de ventos para o norte nas localidades de Cachoeira Paulista e Santa Maria (-29,7° S; 53,7° O). Vale ressaltar que as fases desses meses ocorreram quase todas as 9 horas, menos a de julho que foi a ~1 hora.

Em comparação com o pico da camada, a M_1 teve boas representatividade ocorrendo em épocas diferentes, mas que se assemelham ao fato de que em sua presença não se teve tanta influência da componente semidiurna. Suas amplitudes máximas, tanto para o pico como para a largura, foram nos solstícios, o que difere com o que foi visto por (PAULINO et al., 2017) com dados de TEC, que ocorreram nos equinócios.

Os meses em que a M_2 teve uma boa concordância em ambas localidades foram em janeiro, abril, julho e setembro. As maiores amplitudes sucederam próximas ao fim do ano, dezembro e novembro para Cachoeira Paulista e São João do Cariri respectivamente. Nos dois tipos de medidas, pico e largura da camada, as maiores amplitudes foram registradas para a localidade de São João do Cariri, o que vai de acordo com a afirmativa que as marés atmosféricas na região da MLT atingem suas maiores amplitudes em baixas latitudes (FORBES; WU, 2006).

7 Conclusões

Utilizando medidas de meteoros detectados por dois radares do tipo SKiYMET localizados em Cachoeira Paulista e São João do Cariri, aplicou-se um ajuste gaussiano para uma janela móvel de três horas e retirou-se a informação do pico de concentração e o FWHM do mesmo. Com a técnica utilizada para o cálculo do resíduo, a retirada da influência das componentes solares S_1 e S_2 foram bem sucedidas. Sendo assim, a metodologia facilitou na detecção das componentes de marés lunares, tornando possível encontrar picos significativos na frequência da M_1 e M_2 com a utilização do periodograma de Lomb-Scargle.

Usando tais informações converteu-se os dados para o tempo lunar e aplicou-se o método dos mínimos quadrados para cada mês composto, chegando as principais conclusões:

1. Com a informação do pico de concentração da distribuição de meteoros é possível identificar assinaturas da maré lunar;
2. Com a informação do FWHM do ajuste gaussiano aplicado a distribuição de meteoros com a altitude também é possível investigar assinaturas da maré lunar;
3. Tanto para o pico quanto para a largura da camada, quando a M_1 tinha uma forte evidência a M_2 era menos significativa;
4. A componente diurna atingiu amplitudes maiores que a semidiurna em quase todo ano composto em ambas localidades para o pico e largura da camada;
5. O mês de máxima amplitude da M_1 ocorreu em fevereiro para a largura e pico da camada em Cachoeira Paulista. Para os dados de São João do Cariri também foram próximos, ocorrendo o máximo em maio para a largura e em julho para o pico da camada;
6. As maiores amplitudes da M_2 nos dados de pico da camada ocorreram nos equinócios: abril (Cachoeira Paulista) e setembro (São João do Cariri);
7. As maiores amplitudes da M_2 nos dados da largura da camada ocorreram próximos ao fim do ano composto: dezembro (Cachoeira Paulista) e novembro (São João do Cariri);
8. Tanto para o pico como para a largura da camada as maiores amplitudes da M_1 e M_2 ocorreram para a menor latitude em São João do Cariri.

Referências

- ABELL, G. O. Exploration of the universe. *New York: Holt Rinehart and Winston*, 1975. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 38.
- ALVES, E. O. *Influência em curta duração de ondas planetárias na dinâmica das marés atmosféricas observadas nos ventos meteóricos de São João do Cariri-PB*. Tese (Doutorado) — UFCG. Campina Grande -PB., 2012. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 50.
- ARAÚJO, L. R. et al. Planetary wave seasonality from meteor wind measurements at 7.4° s and 22.7° s. *Annales Geophysicae*, Copernicus GmbH, v. 32, n. 5, p. 519–531, may 2014. Citado na página 48.
- BALLINGER, A. et al. On the validity of the ambipolar diffusion assumption in the polar mesopause region. In: COPERNICUS GMBH. *Annales Geophysicae*. [S.l.], 2008. v. 26, n. 11, p. 3439–3443. Citado na página 58.
- BANKS P.M.; KOCKARTS, G. *Aeronomy*. *New york: Academic Press*, 1973. Citado na página 37.
- BROWN, P. et al. A meteoroid stream survey using the canadian meteor orbit radar. *Icarus*, Elsevier BV, v. 195, n. 1, p. 317–339, may 2008. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 37.
- CAIRE, E. *A história da origem da curva normal*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2012. Citado 3 vezes nas páginas 51, 52 e 53.
- CEPLECHA, Z. et al. Meteor phenomena and bodies. *Space Science Reviews*, Springer, v. 84, n. 3, p. 327–471, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 33, 35 e 58.
- CHAPMAN S.; LINDZEN, R. S. *Atmospheric tides*. [S.l.]: Newark, N. J.: Gordon and Breach, 1970. Citado 3 vezes nas páginas 27, 38 e 43.
- CHAU, J. L.; FEJER, B. G.; GONCHARENKO, L. P. Quiet variability of equatorial E \times B drifts during a sudden stratospheric warming event. *Geophysical Research Letters*, American Geophysical Union (AGU), v. 36, n. 5, mar 2009. Citado na página 40.
- CLEMESHA, B.; BATISTA, P. The quantification of long-term atmospheric change via meteor ablation height measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier BV, v. 68, n. 17, p. 1934–1939, dec 2006. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 58.
- CONTE, J. F. et al. Climatology of semidiurnal lunar and solar tides at middle and high latitudes: Interhemispheric comparison. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 122, n. 7, p. 7750–7760, jul 2017. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 39.
- CORRÊA, J. A. de S. *ESTUDO DE METEOROS E INVESTIGAÇÕES DE SEUS EFEITOS NA IONOSFERA COM DADOS DO RADAR SKiYMET E GPS*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos., 2003. Citado 6 vezes nas páginas 31, 32, 34, 35, 45 e 58.

DALIN, P. et al. Influence of solar and lunar tides on the mesopause region as observed in polar mesosphere summer echoes characteristics. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, American Geophysical Union (AGU), v. 122, n. 19, p. 10,369–10,383, oct 2017. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 40.

DOODSON, A. T. The harmonic development of the tide-generating potential. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, The Royal Society London, v. 100, n. 704, p. 305–329, 1921. Citado na página 39.

ECCLES, V. et al. Lunar atmospheric tidal effects in the plasma drifts observed by the low-latitude ionospheric sensor network. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 116, n. A7, p. n/a–n/a, jul 2011. Citado na página 40.

FEJER, B. G. et al. Lunar-dependent equatorial ionospheric electrodynamic effects during sudden stratospheric warmings. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 115, n. A8, p. n/a–n/a, aug 2010. Citado na página 40.

FEJER, B. G. et al. Enhanced lunar semidiurnal equatorial vertical plasma drifts during sudden stratospheric warmings. *Geophysical Research Letters*, American Geophysical Union (AGU), v. 38, n. 21, p. n/a–n/a, nov 2011. Citado na página 40.

FORBES, J. M.; WU, D. Solar tides as revealed by measurements of mesosphere temperature by the MLS experiment on UARS. *Journal of the Atmospheric Sciences*, American Meteorological Society, v. 63, n. 7, p. 1776–1797, jul 2006. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 79.

FORBES, J. M. et al. Lunar semidiurnal tide in the thermosphere under solar minimum conditions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 118, n. 4, p. 1788–1801, apr 2013. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 39.

FORBES, J. M. V. F. Monthly simulations of the lunar semi-diurnal tide. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 56, p. 1591–1607, 1994. Citado na página 38.

GONCHARENKO, L. P. et al. Wave signatures in the midlatitude ionosphere during a sudden stratospheric warming of january 2010. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 118, n. 1, p. 472–487, jan 2013. Citado na página 75.

HINES, W. et al. Probabilidade e estatística na engenharia. *LTC, São Paulo*, 2006. Citado na página 51.

HOCKING, W.; FULLER, B.; VANDEPEER, B. Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier BV, v. 63, n. 2-3, p. 155–169, jan 2001. Citado 3 vezes nas páginas 28, 47 e 58.

HOCKING, W. K.; THAYAPARAN, T.; JONES, J. Meteor decay times and their use in determining a diagnostic mesospheric temperature-pressure parameter: methodology and one year of data. v. 24, n. 23, p. 2977–2980, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 58.

HUGHES, D. W. Meteors. *Cosmic dust*, p. 123–185, 1978. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 45.

JONES, J.; JONES, W. Meteor radiant activity mapping using single-station radar observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press (OUP), v. 367, n. 3, p. 1050–1056, apr 2006. Citado na página 28.

KERO, J. *High-resolution meteor exploration with tristatic radar methods*. Tese (Doutorado) — Fysik, 2008. Citado na página 28.

KIRCHHOFF, V. *Introdução à geofísica espacial*. [S.l.]: São Paulo: Nova Stella, 1991. Citado na página 37.

KOUSHIK, N. et al. Meteor radar observations of lunar semidiurnal oscillations in the mesosphere lower thermosphere over low and equatorial latitudes and their variability during sudden stratospheric warming events. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 125, n. 9, aug 2020. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

KUSHIATOR, B. A. N. et al. *Observação da maré lunar nas medidas de luminescência atmosférica equatorial por fotômetro multicanal*. Dissertação (Mestrado) — UEPB, Campina Grande-PB, 2017. Citado na página 39.

LEE, C. et al. New method of estimating temperatures near the mesopause region using meteor radar observations. *Geophysical Research Letters*, American Geophysical Union (AGU), v. 43, n. 20, p. 10,580–10,585, oct 2016. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 58.

LIEBERMAN, R. et al. Global observations of thermospheric lunar tidal winds. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier BV, v. 136, p. 126–133, dec 2015. Citado na página 28.

LIMA, L. et al. Variations in meteor heights at 22.7°s during solar cycle 23. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier BV, v. 133, p. 139–144, oct 2015. Citado 3 vezes nas páginas 28, 56 e 58.

LIMA, L. M. *Observações de ondas planetárias na região da mesopausa equatorial e de baixas latitudes do hemisfério sul*. 245 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos., 2004. Citado 5 vezes nas páginas 33, 38, 48, 50 e 58.

LIMA, L. M.; BATISTA, P. P.; PAULINO, A. R. Meteor radar temperatures over the brazilian low-latitude sectors. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 123, n. 9, p. 7755–7766, sep 2018. Citado na página 58.

LIMA, M. S. de; CARVALHO, M. E. C. de; MORET, M. A. O ensino das distribuições gaussianas e q-gaussianas em cursos de graduação: Um exemplo baseado nos espectros binários de emissão de raios-x. *Latin-American Journal of Physics Education*, Instituto Politécnico Nacional, v. 13, n. 1, p. 7, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 51.

LINDZEN, R.; CHAPMAN, S. Atmospheric tides. *Space Science Reviews*, Springer Science and Business Media LLC, v. 10, n. 1, oct 1969. Citado na página 27.

- LIU, L. et al. Variations of the meteor echo heights at beijing and mohe, china. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 122, n. 1, p. 1117–1127, jan 2017. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 35.
- LOMB, N. R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and space science*, Springer, v. 39, n. 2, p. 447–462, 1976. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 50.
- MANTELLATTO, P. M. B. *As Influências da Lua na Terra e o Fenômeno das Marés*. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 42.
- MATSUSHITA, S. *Lunar tides in the ionosphere*. [S.l.]: 49(2), 547–602, 1967. Citado na página 61.
- MONTENEGRO, S. O. et al. Estrutura das marés atmosféricas na região meteórica sobre o cariri paraibano. *Physicae*, v. 8, n. 1, p. 27–32, 2009. Citado na página 47.
- MURAKAMI, T. On the annual variation of sporadic meteors, i. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, v. 7, p. 49, 1955. Citado na página 35.
- NIU, X. et al. Lunar tidal winds in the mesosphere over wuhan and adelaide. *Advances in Space Research*, Elsevier BV, v. 36, n. 11, p. 2218–2222, jan 2005. Citado na página 39.
- NIU, X. J. et al. A measurement of the lunar semidiurnal tide at wuhan (30°40'n, 114°30'e). *Earth, Planets and Space*, Springer Science and Business Media LLC, v. 59, n. 9, p. 991–997, sep 2007. Citado na página 39.
- PAULINO, A. et al. 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*, Elsevier BV, v. 90-91, p. 97–103, dec 2012. Citado na página 75.
- 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*, Elsevier BV, v. 78-79, p. 31–36, apr 2012. Citado 4 vezes nas páginas 28, 39, 62 e 75.
- PAULINO, A. et al. The lunar tides in the mesosphere and lower thermosphere over brazilian sector. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier BV, v. 133, p. 129–138, oct 2015. Citado 3 vezes nas páginas 28, 39 e 79.
- PAULINO, A. R. *Maré Lunas Observada com Radar Meteórico em Três Latitudes no Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos., 2010. Citado 6 vezes nas páginas 33, 35, 40, 42, 48 e 49.
- PAULINO, A. R.; BATISTA, P. P.; BATISTA, I. S. A global view of the atmospheric lunar semidiurnal tide. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, American Geophysical Union (AGU), v. 118, n. 23, p. 13,128–13,139, dec 2013. Citado 5 vezes nas páginas 28, 39, 61, 63 e 75.
- PAULINO, A. R. et al. Lunar tides in total electron content over brazil. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 122, n. 7, p. 7519–7529, jul 2017. Citado 5 vezes nas páginas 28, 39, 40, 75 e 79.

PAULINO, A. R. S. *Estudo global da maré lunar na média atmosfera através de medidas por satélite*. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos., 2013. Citado 2 vezes nas páginas [27](#) e [39](#).

PEDATELLA, N. M.; FORBES, J. M. Evidence for stratosphere sudden warming-ionosphere coupling due to vertically propagating tides. *Geophysical Research Letters*, American Geophysical Union (AGU), v. 37, n. 11, jun 2010. Citado 4 vezes nas páginas [27](#), [28](#), [39](#) e [75](#).

PEDATELLA, N. M.; LIU, H.-L.; RICHMOND, A. D. Atmospheric semidiurnal lunar tide climatology simulated by the whole atmosphere community climate model. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 117, n. A6, p. n/a–n/a, jun 2012. Citado 3 vezes nas páginas [27](#), [40](#) e [75](#).

PEDATELLA, N. M.; MAUTE, A. Impact of the semidiurnal lunar tide on the midlatitude thermospheric wind and ionosphere during sudden stratosphere warmings. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 120, n. 12, dec 2015. Citado na página [40](#).

PELLINEN-WANNBERG, A. et al. The solar cycle effect on the atmosphere as a scintillator for meteor observations. *Proceedings of the International Astronomical Union*, Cambridge University Press (CUP), v. 5, n. S263, p. 249–252, aug 2009. Citado na página [28](#).

PIFKO, S. et al. The meteoroid input function and predictions of mid-latitude meteor observations by the MU radar. *Icarus*, Elsevier BV, v. 223, n. 1, p. 444–459, mar 2013. Citado na página [28](#).

POKHOTILOV, D. et al. Seasonal variability of atmospheric tides in the mesosphere and lower thermosphere: meteor radar data and simulations. *Annales Geophysicae*, Copernicus GmbH, v. 36, n. 3, p. 825–830, jun 2018. Citado 2 vezes nas páginas [27](#) e [28](#).

PREMKUMAR, B.; REDDY, K. C.; YELLAIAH, G. Variation of the meteor count rate and echo height during solar cycle 23 and 24. *Proceedings of the International Astronomical Union*, Cambridge University Press (CUP), v. 13, n. S340, p. 73–74, feb 2018. Citado 3 vezes nas páginas [35](#), [56](#) e [58](#).

RASTOGI, R.; VERMA, S. Failure of lunar dynamo ionospheric current system during winter months along indian longitude sector. NISCAIR-CSIR, India, 1994. Citado na página [39](#).

SANDFORD, D. et al. The lunar tides in the antarctic mesosphere and lower thermosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier BV, v. 69, n. 17-18, p. 2219–2237, dec 2007. Citado na página [75](#).

SANDFORD, D. J. et al. Dynamics of the antarctic and arctic mesosphere and lower thermosphere—part 1: Mean winds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Copernicus GmbH, v. 10, n. 21, p. 10273–10289, 2010. Citado na página [39](#).

SANDFORD, D. J.; MITCHELL, N. J. Lunar tides in the mesosphere over ascension island (8° s, 14.4° w). *Annales Geophysicae*, Copernicus GmbH, v. 25, n. 1, p. 9–12, feb 2007. Citado na página [75](#).

- 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*, Copernicus GmbH, v. 6, n. 12, p. 4117–4127, sep 2006. Citado 4 vezes nas páginas 27, 39, 62 e 63.
- SANTOS, P. V. dos. *Medidas da temperatura mesosférica obtida por radar meteórico na região de São João do Cariri (7,4° S; 36,5° W)*. Dissertação (Mestrado) — UFCG, Campina Grande, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 47.
- SARAIVA, M. de F. O. et al. As fases da lua numa caixa de papelão. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, n. 4, p. 9–26, 2007. Citado na página 41.
- SATHISHKUMAR, S. et al. Long term variabilities and tendencies of mesospheric lunar semidiurnal tide over tirunelveli (8.7°n, 77.8°e). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier BV, v. 163, p. 46–53, oct 2017. Citado na página 28.
- SCARGLE, J. D. Studies in astronomical time series analysis. ii-statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *The Astrophysical Journal*, v. 263, p. 835–853, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 50.
- SCHLAPP, D. et al. N2 and m2 lunar tides: Atmospheric resonance revisited. In: COPERNICUS GMBH. *Annales Geophysicae*. [S.l.], 1996. v. 14, n. 8, p. 826–836. Citado na página 39.
- SCHLAPP, D. M.; MALIN, S. R. C. Some features of the seasonal variation of geomagnetic lunar tides. *Geophysical Journal International*, Oxford University Press (OUP), v. 59, n. 1, p. 161–170, oct 1979. Citado na página 39.
- SIDDIQUI, T. A. et al. On the variability of the semidiurnal solar and lunar tides of the equatorial electrojet during sudden stratospheric warmings. *Annales Geophysicae*, Copernicus GmbH, v. 36, n. 6, p. 1545–1562, nov 2018. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 40.
- SIDDIQUI, T. A.; STOLLE, C.; LÜHR, H. Longitude-dependent lunar tidal modulation of the equatorial electrojet during stratospheric sudden warmings. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 122, n. 3, p. 3760–3776, mar 2017. Citado na página 40.
- SIEBERT, M. Atmospheric Tides. In: *Advances in Geophysics*. [S.l.]: Elsevier, 1961. p. 105–187. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 39.
- SILVEIRA, F. L. d. As variações dos intervalos de tempo entre as fases principais da lua. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 23, p. 300–307, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 42.
- SOBRINHO, J. L. G. Planetas anões, asteroides e cometas. *Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira*, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 33.
- STENING, R. What do lunar geomagnetic variations tell us about the lunar tide in the lower thermosphere? *Advances in Space Research*, v. 12, n. 6, p. 267–270, 1992. ISSN 0273-1177. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/027311779290070E>>. Citado na página 39.

- STENING, R.; RASTOGI, R. Variations of the lunar geomagnetic tide in the indian region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier BV, v. 64, n. 4, p. 471–477, mar 2002. Citado na página 39.
- STENING, R. J. Lunar tide in the equatorial electrojet in relation to stratospheric warmings. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 116, n. A12, p. n/a–n/a, dec 2011. Citado na página 40.
- STENING, R. J.; JACOBI, C. Lunar tidal winds in the upper atmosphere over collm. *Annales Geophysicae*, Copernicus GmbH, v. 18, n. 12, p. 1645–1650, dec 2000. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 75.
- STENING, R. J.; TSUDA, T.; NAKAMURA, T. Lunar tidal winds in the upper atmosphere over jakarta. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 108, n. A5, may 2003. Citado na página 39.
- STENING, R. J.; VINCENT, R. A. A measurement of lunar tides in the mesosphere at Adelaide, South Australia. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 94, n. A8, p. 10121–10129, aug 1989. Citado na página 27.
- STOBER, G.; CHAU, J. L. A multistatic and multifrequency novel approach for specular meteor radars to improve wind measurements in the MLT region. *Radio Science*, American Geophysical Union (AGU), v. 50, n. 5, p. 431–442, may 2015. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 58.
- STOBER, G. et al. Meteor radar temperatures over collm (51.3 n, 13 e). *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 42, n. 7, p. 1253–1258, 2008. Citado na página 56.
- STOBER, G. et al. Neutral air density variations during strong planetary wave activity in the mesopause region derived from meteor radar observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier BV, v. 74, p. 55–63, jan 2012. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 61.
- TAO, D. *Experimental study of the influences of background atmospheric electron density on radar backscatter from meteor trails*. Dissertação (Mestrado) — Leibniz Institute of Atmospheric Physics (IAP)Kühlungsborn, Germany, 2010. Citado na página 33.
- TRIGO-RODRÍGUEZ, J. M.; MADIEDO, J. M. Asteroides y cometas: cuerpos progenitores de meteoritos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, v. 21, n. 3, p. 293–293, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- VANDERPLAS, J. T. Understanding the lomb–scargle periodogram. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, IOP Publishing, v. 236, n. 1, p. 16, 2018. Citado na página 50.
- VINCENT, R. Long-period motions in the equatorial mesosphere. *Journal of atmospheric and terrestrial physics*, Elsevier, v. 55, n. 7, p. 1067–1080, 1993. Citado na página 38.
- WEISS, A. The distribution of the orbits of sporadic meteors. *Australian Journal of Physics*, CSIRO Publishing, v. 10, n. 1, p. 77–102, 1957. Citado na página 35.
- WHIPPLE, F. *Comets*. In “*Cosmic Dust*”(ed McDonnell JAM) 1–73. [S.l.]: John Wiley and Sons, New York, 1978. Citado na página 31.

- WHIPPLE, F. L. The theory of micro-meteorites: Part i. in an isothermal atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, National Academy of Sciences, v. 36, n. 12, p. 687, 1950. Citado na página 34.
- WHIPPLE, F. L. The theory of micro-meteorites: Part ii. in heterothermal atmospheres. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, National Academy of Sciences, v. 37, n. 1, p. 19, 1951. Citado na página 34.
- YAMAZAKI, Y. Large lunar tidal effects in the equatorial electrojet during northern winter and its relation to stratospheric sudden warming events. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 118, n. 11, p. 7268–7271, nov 2013. Citado na página 75.
- YAMAZAKI, Y. et al. Longitudinal variation of the lunar tide in the equatorial electrojet. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, American Geophysical Union (AGU), v. 122, n. 12, p. 12,445–12,463, dec 2017. Citado 4 vezes nas páginas 38, 40, 75 e 78.
- YOUNGER, J. P. et al. A southern hemisphere survey of meteor shower radiants and associated stream orbits using single station radar observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press (OUP), v. 398, n. 1, p. 350–356, sep 2009. Citado na página 48.
- YOUNGER, J. P. et al. A method for estimating the height of a mesospheric density level using meteor radar. *Geophysical Research Letters*, American Geophysical Union (AGU), v. 42, n. 14, p. 6106–6111, jul 2015. Citado na página 28.
- 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*, American Geophysical Union (AGU), v. 118, n. 8, p. 5296–5304, aug 2013. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 75.