



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL – PPGCTA
MESTRADO**

DISSERTAÇÃO

DÉLIS OTILDES RODRIGUES

**ESTUDO DO VENTO NA REGIÃO DA MESOSFERA E BAIXA TERMOSFERA
UTILIZANDO MEDIDAS DE INSTRUMENTOS DE SOLO E A BORDO DE SATÉLITE**

**CAMPINA GRANDE
2023**

DÉLIS OTILDES RODRIGUES

**ESTUDO DO VENTO NA REGIÃO DA MESOSFERA E BAIXA TERMOSFERA
UTILIZANDO MEDIDAS DE INSTRUMENTOS DE SOLO E A BORDO DE SATÉLITE.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA) da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Linha de pesquisa: Qualidade de Sistemas Ambientais.

Orientadora: Prof^ª. Dra Ana Roberta da Silva Paulino

**CAMPINA GRANDE
2023**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

R696e Rodrigues, Delis Otildes.

Estudo do vento na região da mesosfera e baixa termosfera utilizando medidas de instrumentos de solo e a bordo de satélite. [manuscrito] / Delis Otildes Rodrigues. - 2023.

67 p. : il. colorido.

Digitado.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.

"Orientação : Profa. Dra. Ana Roberta da Silva Paulino, Coordenação do Curso de Física - CCT. "

1. Medidas de vento. 2. Mesosfera. 3. Baixa termosfera. I.

Título

21. ed. CDD 577.22

DÉLIS OTILDES RODRIGUES

**ESTUDO DO VENTO NA REGIÃO DA MESOSFERA E BAIXA TERMOSFERA
UTILIZANDO MEDIDAS DE INSTRUMENTOS DE SOLO E A BORDO DE SATÉLITE.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA) da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Linha de pesquisa: Qualidade de Sistemas Ambientais.

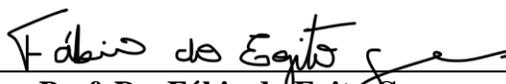
Orientadora: Prof^a. Dra Ana Roberta da Silva Paulino

Aprovada em 30/08/2023

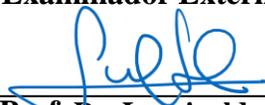
BANCA EXAMINADORA



Prof.ª Dra. Ana Roberta da Silva Paulino
Orientadora –UEPB



Prof. Dr. Fábio do Egito Gomes
Examinador Externo - UFCG



Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima
Examinador Interno-UEPB



Prof.ª Dra. Luciana Rodrigues de Araújo
Examinadora Interna - UEPB

DEDICATÓRIA

“Pois estou prestes a realizar algo novo. Vejam, já comecei! Não percebem? Abrirei um caminho no meio do deserto, farei rios na terra seca.” (Isaías 43:19)

Dedico este trabalho a Deus por ter colocado em minha vida as pessoas certas no momento certo.

Dedico também a minha família e amigos que sempre me apoiou nos momentos mais difíceis de minha vida, em especial a minha mãe Maria Rosânia de Otildes.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por dar-me saúde, força, coragem e determinação para superar as obstáculos e dificuldades e concluir mais uma etapa da minha vida.

A minha orientadora Prof.^a Dra. Ana Roberta da Silva Paulino pela orientação e contribuição na elaboração e conclusão deste trabalho.

A Prof.^a Dra. Raimunda de Fátima Neves Coelho pela orientação durante o estágio docência agradeço pelos ensinamentos.

Aos Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima, Prof. Dr. Valderi Duarte Leite, Prof.^a Dra. Luciana Rodrigues de Araújo e ao Prof. Dr. Fábio do Egito Gomes pela grande contribuição dada a este trabalho e pelos inúmeros momentos de motivação e atenção que me foi dado, muito obrigada!

Aos professores da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), durante o cumprimento das disciplinas do curso.

A Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pela oportunidade de realizar o estágio docência no Campus de Cajazeiras – PB.

Ao Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) pela disponibilização dos dados de vento obtidos a partir das medidas por radar meteorológico em São João do Cariri - PB.

Ao Programa de Pós – Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental – PPGCTA, pelo compromisso e dedicação ao trabalho.

A toda minha família pelo carinho, amor, apoio e compreensão.

Aos meus amigos pelo companheirismo, dedicação, apoio e compreensão.

E a todos que de alguma maneira, contribuíram para o término desta dissertação.

RESUMO

O estudo da região equatorial da mesosfera e baixa termosfera - MLT, compreendida entre 80 e 110 km de altitude permite entender a dinâmica da atmosfera. Este trabalho estuda a região da MLT através de dados de ventos obtidos por um radar meteorológico instalado em São João do Cariri (7,4°S; 36,5°O) e pelo instrumento TIMED Doppler interferometer - TIDI que encontra-se a bordo do Satélite – Termosfera – Ionosfera – Mesosfera Energética e Dinâmica – TIMED. Neste estudo foram utilizados dados no período entre janeiro de 2005 e dezembro de 2006. Com o desenvolvimento do trabalho foi possível analisar o comportamento dos ventos médios, componente zonal e meridional, e avaliar duas técnicas diferentes dos instrumentos utilizados. Os ventos médios meridionais de São João do Cariri - PB apresentaram característica com ventos inicialmente para o sul entre março e final de setembro mudando a direção do vento para o norte do início de outubro até a metade de março. Os ventos médios zonais de São João do Cariri – PB se dirigiram para leste até início de janeiro de 2005. De forma geral, os ventos zonais são basicamente para oeste, exceto nos solstícios, e os valores decrescem com a altitude. Uma característica importante é que, em geral, os ventos médios zonais apresentam valores mais intensos do que os ventos médios meridionais na região da alta mesosfera, com um ciclo anual que descreve um escoamento com direção do pólo de verão para o de inverno. Os ventos médios meridionais obtidos do TIDI instrumento foram calculados usando todos os dias dentro dos meses em função da altitude. É nítida a presença de oscilação diurna propagando-se com a diminuição da altitude em maioria dos meses. Durante alguns meses, principalmente no outono e inverno, as oscilações semidiurnas aparecem dominantes em altos níveis. Os ventos médios zonais têm amplitudes menores que os meridionais. Da mesma forma, a oscilação diurna é mais forte durante o verão, enquanto as semidiurnas aparecem esporadicamente para algumas altitudes. A componente zonal, durante quase todos os meses, as amplitudes dos ventos zonais são maiores que os do radar de meteoros. Estruturas diurnas são dominantes, mas estruturas de períodos mais curtos aparecem praticamente durante todo o ano. A partir do vento recuperado por essas duas técnicas e os resultados mostraram boa concordância.

PALAVRAS-CHAVE: Medidas de vento; Mesosfera e Baixa Termosfera; Dinâmica da alta termosfera.

ABSTRACT

The study of the equatorial region of the mesosphere and lower thermosphere - MLT, between 80 and 110 km altitude, allows us to understand the dynamics of the atmosphere. This work studies the MLT region using wind data obtained by a meteoric radar installed in São João do Cariri (7.4°S; 36.5°W) and by the TIMED Doppler Interferometer - TIDI instrument which is on board of the Satellite - Thermosphere – Ionosphere – Mesosphere Energy and Dynamics - TIMED. In this study, data from the period between January 2005 and December 2006 were used. With the development of the work, it was possible to analyze the behavior of average winds, zonal and meridional components, and evaluate two different techniques of the instruments used. The average meridional winds of São João do Cariri - PB presented characteristics with winds initially to the south between March and the end of September, changing the wind direction to the north from the beginning of October to mid-March. The average zonal winds of São do Cariri – PB headed east until the beginning of January 2005. In general, the zonal winds are basically westward, except at the solstices, and values decrease with altitude. An important characteristic is that, in general, the mean zonal winds present more intense values than the mean meridional winds in the upper mesosphere region, with an annual cycle that describes a poleward flow from summer to winter. The mean meridional winds obtained from the TIDI instrument were calculated using all days within the months as a function of altitude. The presence of diurnal oscillation is clear, propagating with the decrease in altitude in most months. During some months, mainly in autumn and winter, semidiurnal oscillations appear dominant at high levels. The mean zonal winds have smaller amplitudes than the meridional ones. Likewise, the diurnal oscillation is stronger during the summer, while semi-diurnal oscillations appear sporadically at some altitudes. The zonal component, during almost all months, the amplitudes of the zonal winds are greater than those of the meteor radar. Diurnal structures are dominant, but shorter period structures appear practically throughout the year. From the wind recovered by these two techniques, the results showed good agreement.

KEYWORDS: Wind measurements; Mesosphere and Lower Thermosphere; Dynamics of the upper thermosphere.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AO	- Oscilação Anual.
CCD	- Detector.
CLP	- Camada Limite Planetária.
CLIO	- Dispositivo óptico de imagem de círculo para linha.
EEJ	- Eletrojato Equatorial.
FPI	- Interferômetro Fabry-Perot.
GUIV	- Global Ultraviolet Imager.
GWs	- Gravity Waves - Ondas de Gravidade Atmosfera.
ICON	- Ionospheric Connection Explorer.
LOS	- Linha de Visão dos Ventos
MLT	- Mesosfera e Baixa Termosfera.
MLTI	- Mesosfera e Baixa Termosfera/ Ionosfera.
MF	- Radar de Média Frequência.
MIGHTI	- Michelson Interferometer for Global High-resolution Thermospheric Imaging.
MR	- Radar Meteorológico.
MWRs	- Radar de Vento de Meteoros.
OLAP	- Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba.
PRFs	- Sistema que opera em uma repetição muito alta de pulsos.
PWs	- Ondas Planetárias.
QBO	- Oscilação Quase Bienal.
SABER	- The Atmosphere Probing using Broadband Emission Radiometry
SAD	- Deriva de Antenas Espaçadas.
SAO	- Oscilação Semestral.
SEE	- Solar Extreme Ultraviolet Experiment.
TIDI	- TIMED Doppler Interferometer.
TIMED	- Termosfera – Ionosfera – Mesosfera Energética e Dinâmica.
UARS	- Upper Atmosphere Research Satellite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Localização de São João do Cariri – PB (74°S; 365°O) (a), Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba – OLAP, com visão das antenas receptoras (b), e uma antena transmissora (c) em São João do Cariri - PB.....	25
Figura 2: Trilha de Meteoro	28
Figura 3: Imagem ilustrativa: chuva de meteoros	28
Figura 4: Esquema de distribuição da antena transmissora e receptoras do Radar Meteorológico.....	30
Figura 5: Representação da geometria utilizada para medir a velocidade do vento radial com o deslocamento Doppler	30
Figura 6: Concepção artística do satélite TIMED em órbita na Terra.....	32
Figura 7: Missão do satélite TIMED em órbita.....	32
Figura 8: Layout esquemático do TIDI	34
Figura 9: Ilustração do telescópio TIDI.....	34
Figura 10: Configuração óptica do TIDI.....	34
Figura 11: Arquivos com o sufixo D010_R01	37
Figura 12: Arquivo csv.....	38
Figura 13: O arquivo .csv em dois arquivos .txt	39
Figura 14: Dados zonais.....	39
Figura 15: Dados meridionais	39
Figura 16: Arquivo de média.....	40
Figura 17: Ventos meridionais observados em São João do Cariri-PB no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2005. Os ventos (-) sopram para o sul e os ventos (+) para o norte	44
Figura 18: Ventos meridionais observados em São João do Cariri-PB no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2006. Os ventos (-) sopram para o sul e os ventos (+) para o norte	45
Figura 19: Ventos zonais observados em São João do Cariri-PB no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2005. Os ventos (-) sopram para o oeste e os ventos (+) para o leste.....	47
Figura 20: Ventos zonais observados em São João do Cariri-PB no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2006. Os ventos (-) sopram para o oeste e os ventos (+) para o leste.....	48

Figura 21: Ventos meridionais obtidos do TIDI a bordo do Satélite TIMED no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2005.....	50
Figura 22: Ventos meridionais obtidos do TIDI a bordo do Satélite TIMED no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2006.....	51
Figura 23: Ventos zonais obtidos do TIDI a bordo do Satélite TIMED no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2005.....	53
Figura 24: Ventos zonais obtidos do TIDI a bordo do Satélite TIMED no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2006.....	54
Figura 25: Evolução temporal do vento meridional calculado a 90 km para o Radar SKIYMET (azul) e do TIDI (vermelho). As linhas contínuas representam as medições do radar e do TIDI entre janeiro a dezembro de 2005.....	55
Figura 26. Evolução temporal do vento zonal calculado a 90 km para o Radar SKIYMET (azul) e do TIDI (vermelho). As linhas contínuas representam as medições do radar e do TIDI entre janeiro a dezembro de 2005.....	56
Figura 27. Evolução temporal do vento meridional calculado a 90 km para o Radar SKIYMET (azul) e do TIDI (vermelho). As linhas contínuas representam as medições do radar e do TIDI entre janeiro a dezembro de 2006.....	56
Figura 28. Evolução temporal do vento zonal calculado a 90 km para o Radar SKIYMET (azul) e do TIDI (vermelho). As linhas contínuas representam as medições do radar e do TIDI entre janeiro a dezembro de 2006.....	57

TABELA 1: Parâmetros TIDI	33
--	-----------

LISTA DE SÍMBOLOS

g - Aceleração da gravidade

z - Altura

x - Altura reduzida

C_p - Calor específico do gás à pressão constante

C_v - Calor específico do gás a volume constante

R - Constante do gás

d - Distância entre as antenas receptoras

R_R - Distância radial do meteoro

f_R - Frequência do Radar

f_d - Frequência Doppler do sinal

f - Frequência normalizada

T_R - Intervalo de tempo entre a transmissão e recepção do sinal pelo radar

t - Tempo

c - Velocidade da Luz

\mathbf{V} - Velocidade do vento

V_R - Velocidade radial do meteoro

h - Altura do traço meteórico

ρ_0 - Densidade no estado básico

φ - Latitude (positiva para o norte)

Φ - Geopotencial

λ - Longitude (positiva para o leste)

θ - Colatitude

ρ_1 - Perturbação na densidade

γ - Razão entre C_p e C_v

ρ - Distância azimutal

χ - Divergente da velocidade

λ_z - Comprimento de onda vertical

λ_r - Comprimento de onda do sinal do radar

δ - Ângulo de profundidade do meteoro

β - Ângulo zenital do meteoro

φ - Fase da antena receptora

- δ - ângulo azimutal
- ϕ - Fase do sinal que chega à antena receptora
- α - Número de onda vertical.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	16
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Justificativa.....	18
1.2 Obetivos.....	20
1.2.1 Objetivo Geral.....	20
1.2.2 Objetivos Específicos.....	20
CAPÍTULO 2.....	21
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 A Região da Mesosfera e Baixa Termosfera – MLT.....	21
2.2 Medidas de Ventos na Região da Mesosfera e Baixa Termosfera – MLT.....	22
CAPITULO 3.....	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1 Obtenções de Dados.....	25
3.1.1 Técnicas de Medidas de Ventos Neutros.....	26
3.1.2 Radar Meteorico.....	27
3.1.2.1 O Radar Meteorico Modelo SKiYMET.....	27
3.1.2.2 Meteoros.....	28
3.1.2.3 A Região Meteorica.....	29
3.1.2.4 Determinação dos Ventos por Medidas de Radar.....	30
3.2 Satélite TIMED.....	31
3.2.1 Método de Processamento de Dados TIDI.....	36
3.2.1.1 Ventos TIDI.....	36
3.2.2 Obtenção de Dados de Ventos do TIDI.....	37
3.2.2.1 Primeira Parte – Preparando Os Dados Para Plot.....	37
3.2.2.2 Segunda Parte – Plotando os Dados.....	39
3.2.3 Análise de Dados TIDI.....	41
CAPÍTULO 4.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1 Ventos Médios Meridionais Registrados pelo Radar SKIYMET Localizado em São João do Cariri – PB entre Janeiro de 2005 a Dezembro de 2006.....	43

4.2 Ventos Médios Zonais Registrados pelo Radar SKIYMET Localizado em São João do Cariri – PB entre Janeiro de 2005 a Dezembro de 2006	46
4.3 Ventos Médios Meridionais Obtidos do TIDI A Bordo do Satélite TIMED no Período Compreendido entre Janeiro de 2005 a dezembro de 2006.	49
4.4 Ventos Médios Zonais Obtidos do TIDI A Bordo do Satélite TIMED no Período Compreendido entre Janeiro de 2005 a Dezembro de 2006.	52
4.5 Resultados e Discussão	55
CAPÍTULO 5	59
5. CONCLUSÃO.....	59
REFERÊNCIAS	60
APÊNDICE.....	67

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Atmosfera terrestre corresponde a uma camada de ar que envolve todo o planeta Terra e auxilia na manutenção da vida. A atmosfera é mantida em torno da Terra através da ação da força gravitacional, que proporciona a existência da vida no planeta. É composta por gases que não se dissipam, mantendo-se por meio da gravidade. A compreensão da atmosfera da terra em grande medida depende da compreensão da energética e dinâmica da atmosfera média e alta (McLandress, 1994). Com base no critério da dinâmica da temperatura, a atmosfera terrestre divide-se em camadas.

A camada mais baixa é a troposfera que se estende entre o solo e aproximadamente 15 km de altura. A tropopausa é a zona de transição entre a troposfera e a próxima camada atmosférica, a estratosfera. A estratosfera se estende entre 15 e 50 km de altura. A estratopausa é a zona de transição entre a estratosfera e a próxima camada atmosférica, a mesosfera. A mesosfera está localizada entre 50 e 90 km de altura. A mesopausa é a zona de transição entre a mesosfera e a próxima camada atmosférica, a termosfera. A termosfera é localizada entre 90 e 400 km de altura. A termopausa é a zona de transição entre a termosfera e a próxima camada atmosférica, a exosfera. A exosfera, situada acima de 400 km, é a camada mais externa da atmosfera.

Na troposfera à medida que a altitude aumenta, a temperatura nessa camada apresenta queda, e varia verticalmente. Na estratosfera, diferente do que ocorre na troposfera, a temperatura eleva-se à medida que a altitude aumenta. Diferentemente do que ocorre na estratosfera, a temperatura da mesosfera apresenta queda à medida que a altitude aumenta. É considerada a mais fria entre as camadas da atmosfera. A termosfera é também chamada de ionosfera. Diferentemente do que acontece na mesosfera, a temperatura na termosfera volta a elevar-se à medida que há aumento da altitude, podendo chegar a 1500° C em seu limite superior. As temperaturas na exosfera permanecem elevadas, superando os 1000° C. E nas zonas de transição entre as camadas a temperatura permanece constante.

Além deste aquecimento diferencial em altura, a atmosfera também está sujeita aos movimentos de rotação e translação da terra, que produzem o acúmulo de energia em pontos diferentes da atmosfera. Isto gera oscilações complexas na atmosfera. As principais oscilações são os ventos médios, as ondas de gravidade, as ondas planetárias e as marés

atmosféricas (Tokumoto, 2002).

O estudo destas oscilações permite o mapeamento climatológico da atmosfera. Este mapeamento é feito por modelos de circulação geral, onde são previstas as características particulares de cada região atmosférica. Particularmente a região, entre 80 e 100 km, de altura possui um fluxo muito grande de partículas meteóricas que se movimenta sob a ação dos ventos neutros (Tokumoto, 2002).

Os ventos podem ser obtidos através dos parâmetros fornecidos por radares meteóricos, os quais permitem estudar os parâmetros atmosféricos, como temperatura, velocidade de vento, entre outros, a partir do movimento dos traços ionizados dos meteoros. As medidas de ventos médios em baixas latitudes do hemisfério sul têm sido escassas e concentradas em poucas localidades. Um panorama diferente das regiões de latitudes médias e altas do hemisfério norte, onde as medidas têm sido realizadas sistematicamente há vários anos. Porém, mesmo com as poucas observações, pode-se avaliar o comportamento da dinâmica de ventos e destacar suas características e compará-las com as de outras latitudes mais altas (Tokumoto, 2002).

Existem vários meios diferentes para obter o vento atmosférico e as marés na região da mesosfera e da termosfera inferior (MLT), incluindo medições de vento via elementos químicos ou com foguete de sondagem (Widdel, 1990; Chu et al., 2007), método de deriva de antena espaçada (SAD) para radar MF de reflexão parcial para detectar ecos parcialmente refletidos de manchas de densidade eletrônica (ou irregularidades) (Vincent e Lesicar, 1991; Roettger et al., 1979), método de feixe Doppler para radar de dispersão coerente para observar ecos retroespalhados de irregularidades de refração na escala de Bragg (Vincent e Reid, 1983), instrumentos espaciais a bordo de satélites para detectar remotamente a região MLT (Killeen et al., 1999), instrumentos ópticos ativos/passivos (por exemplo, fotômetro ou interferômetro de Fabry-Perot) para detectar emissões de fótons de vários constituintes atmosféricos com capacidade Doppler (Rees et al., 1990; Takahashi et al., 1999), e o uso da técnica de interferometria por radar terrestre para analisar ecos especulares (Nakamura et al., 1991; Kuong et al., 2003; Das et al., 2013) e trilhas de meteoros não especulares (Oppenheim et al., 2009; Li et al., 2012; Oppenheim et al., 2014).

Entre esses meios, apenas o radar de meteoros terrestre pode medir continuamente os perfis verticais do vento médio e das marés com resoluções de altura e tempo suficientemente finas em um local designado por um período relativamente longo, mesmo em uma condição atmosférica nublada ou fraca que dificulte as medições de vento feitas com instrumentos ópticos baseados em terra. Devido a essa vantagem, o radar de meteoros tem sido amplamente

utilizado pela comunidade científica para medir e estudar o vento e as marés na região MLT por mais de cinco décadas (Elford e Robertson, 1953; Hines, 1959; Nakamura et al., 1991; Kuong et al., 2003; Hibbins et al., 2011; Xiao et al., 2013).

O satélite Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) foi lançado em órbita circular a uma altitude nominal de 625 km com uma inclinação de $\sim 74^\circ$ em dezembro de 2001, com o objetivo de investigar e entender a energética da região MLT. O Interferômetro TIMED Doppler (TIDI) na espaçonave fornece medições de vento neutro de 80 a 300 km de altitude. Abrange uma ampla faixa de latitude que pode se estender para o pólo norte ou sul, dependendo do ângulo beta solar e da estação (Killeen et al., 1999, 2006; Niciejewski et al., 2006; Skinner et al., 2003). Extensos estudos utilizaram os ventos vetoriais para investigar as características das marés migrantes e não migrantes, incluindo a distribuição global, propagação, variações de longo prazo (mensal, sazonal, anual, etc.) e acoplamento com a ionosfera (por exemplo, Oberheide et al., 2006, 2009, 2011; Singh et al., 2018; Q. Wu et al., 2008a, 2008b; Xu et al., 2009). Além disso, devido à ampla cobertura de latitudes, mais detalhes das ondas planetárias e das ondas de gravidade foram revelados (por exemplo, Chang et al., 2014; Gu et al., 2013, 2021; Liu et al., 2009; Ortland & Alexander, 2006). Os ventos neutros na MLT são importantes para entender o acoplamento entre as atmosferas superior e inferior.

1.1 Justificativa

A dinâmica e a circulação na mesosfera e baixa termosfera (MLT) são importantes para o transporte global de importantes espécies de traços químicos (Smith et al., 2011; Kvissel et al., 2012), incluindo o transporte de NO_x na estratosfera polar de inverno que pode afetar o ozônio estratosférico e o clima da superfície (Thurairajah et al., 2013; Siskind et al., 2018). Trata-se do acoplamento entre as várias camadas atmosféricas, ou seja, uma exerce influência na outra em maior ou menor grau, dependendo do fenômeno envolvido. Os ventos neutros na MLT também podem ter efeitos de primeira ordem nos impactos do clima espacial na atmosfera ionizada (Jackson et al., 2019; Sassi et al., 2019).

Os ventos na mesosfera e baixa termosfera também são muito importantes na compreensão de padrões de circulação, oscilações na atmosfera média e na redistribuição de constituintes químicos (Fuller-Rowell et al., 1995). Atualmente, existem Radares Meteorológicos

operando em todo o mundo, fornecendo uma grande quantidade de dados de ventos e temperatura na mesosfera e baixa termosfera. Estes dados têm sido amplamente usados para investigar os ventos médios, marés e ondas planetárias na MLT.

Os ventos neutros desempenham um papel crucial no sistema termosfera-ionosfera. Eles são monitorados com instrumentos terrestres e via satélite. Instrumentos terrestres típicos (radar de meteoros, radar de média frequência, radar de dispersão incoerente, lidar, interferômetro de Fabry-Perot (FPI), etc.) fornecem observações de ventos neutros com uma variedade de resoluções e coberturas temporais. Esses instrumentos são esparsamente distribuídos em posições geofísicas fixas e fornecem dados quase contínuos em uma latitude e longitude fixas durante um período específico. Os satélites, por outro lado, orbitam ao redor da Terra e, ao longo de um dia, podem fornecer observações globais ou quase globais do vento, permitindo estudos de dinâmica em larga escala, dependendo de várias suposições.

Comparações entre medições de ventos por MR e TIDI são úteis para o entendimento do processo dinâmico na MLT. Os ventos neutros desempenham um papel muito importante na dinâmica da alta atmosfera (Fuller-Rowell, 1995; Fuller-Rowell et al., 2007). O MR e o TIDI são dois tipos de instrumentos para detectar efetivamente os ventos na alta atmosfera.

Uma das razões para o crescente interesse científico no entendimento dos processos que ocorrem na região MLT, está relacionada com o fato de a sociedade ter se tornado cada vez mais dependente das tecnologias que tem como base o uso de satélites e sistemas de navegação. Os sinais que são transportados via satélite são distorcidos quando atravessam as camadas atmosféricas e a parte ionizada da porção superior da atmosfera terrestre. Portanto, o conhecimento preciso da estrutura da alta atmosfera é muito importante para assegurar bom desempenho no uso desses sistemas (Liu e Roble et al, 2005). Daí a necessidade de estudos que contribuam para a melhor compreensão da região através da identificação, caracterização e classificação de movimentos periódicos de pequena e de larga escala.

Compreendendo duas décadas de coleta de dados na região MLT, as medições TIDI são um recurso valioso para a comunidade estudar a dinâmica do sistema termosfera-ionosfera, especialmente as variações de longo prazo. No entanto, poucos estudos completos de validação de dados foram realizados. Isso se deve em parte à falta de conjuntos de dados adequados na região da MLT ser difícil de medir.

As comparações entre as medições do vento por Radar Meteorológico SKIYMET e TIMED Doppler Interferometer (TIDI) que se encontra a bordo do satélite Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) possibilita compreender a dinâmica na MLT.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar o vento na Região da Mesosfera e Baixa Termosfera utilizando medidas de instrumento de bordo de satélite, e solo instalado em São João do Cariri – PB, utilizando os dados para os anos de 2005 e 2006.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar os dados do Radar Meteorológico SKiYMET instalado em São João do Cariri - PB e o Instrumento TIDI que se encontra a bordo do satélite TIMED;
- Comparar as medidas e vento na mesosfera e baixa termosfera derivado do TIMED Doppler Interferômetro (TIDI) e do radar meteorológico SKiYMET instalado em São João do Cariri – PB;
- Analisar as variações dos ventos na mesosfera e baixa termosfera derivado do TIMED Doppler Interferômetro (TIDI) e do radar meteorológico SKiYMET instalado em São João do Cariri – PB.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Região da Mesosfera e Baixa Termosfera - MLT

A busca do entendimento das mudanças em escala global devido ao impacto da presença humana proporcionou um crescente interesse pela compreensão dos processos dinâmicos e químicos na média e alta atmosfera, especialmente na região da mesosfera, bem como pelos fatores envolvidos na variabilidade de seus parâmetros, uma vez que essa região é bastante sensível às mudanças, principalmente relacionadas com o Clima Espacial, ou seja, resposta da atmosfera à influência do Sol e está diretamente relacionada ao balanço de energia na atmosfera (Lima, 2004).

A mesosfera e Baixa Termosfera é uma região atmosférica que marca a transição entre a dinâmica neutra da atmosfera média e os processos ionizados na termosfera e ionosfera acima (Smith et al., 2011, 2017; Jackson et al., 2019; Sassi et al., 2019). As características únicas desta região diferenciam a MLT de outras camadas atmosféricas (Smith et al, 2012), incluindo as temperaturas mais frias que ocorrem naturalmente na mesopausa polar do verão, enorme variabilidade dinâmica local devido às marés atmosféricas e ondas planetárias (PWs), e uma circulação que é de primeira ordem impulsionada por ondas de gravidade atmosférica (GWs) de pequena escala. A MLT também é onde o impacto das marés solares nos ventos neutros é maior. O aquecimento solar direto da estratosfera abaixo faz com que as marés se propaguem para cima e cresçam exponencialmente em amplitude, levando a inversões de vento na MLT que podem ser de até 100 m/s^{-1} ao longo de um dia (Jacobi et al., 1999; Mitchell et al., 2002; Murphy et al., 2006; Vincent et al, 2015).

Um aspecto fundamental da MLT é sua forte resposta ao forçamento devido às ondas de gravidade atmosférica (GWs) que resulta no aparecimento na atmosfera média sobre o pólo de verão e no aparecimento sobre o pólo de inverno (Soloman e R. et al, 1987; Vargas et al., 2015). Essas condições adiabáticas de resfriamento e aquecimento afastam a estrutura térmica da atmosfera daquela esperada sob equilíbrio radiativo, levando a uma circulação residual pólo a pólo em escala global do pólo de verão para o pólo de inverno (Houghton et al, 1978; Holton et al, 1983).

Desenvolvimentos de modelos avançados empregando parametrizações realistas de

influências de ondas de gravidade em escala de sub-rede e observações de alta cadência de ventos, ondas e marés neutras são importantes para compreender os processos dinâmicos na MLT. As observações de satélite podem fornecer uma imagem global, mas não têm a cadência de amostragem para restringir com precisão a variabilidade de escala de tempo curta dos processos de ondas de gravidade. Os radares de vento de meteoros (MWRs), no entanto, oferecem um dos melhores métodos para medir os ventos neutros na MLT. Ao medir o deslocamento radial Doppler de pulsos de rádio refletidos de trilhas de meteoros ionizados perto de 90 km de altitude, os MWRs podem derivar medições contínuas dos ventos neutros na MLT (Hocking et al. 2001).

2.2 Medidas de Ventos na Região da Mesosfera e Baixa Termosfera – MLT

As medições de vento na região MLT são obtidas principalmente a partir de sondagens de foguetes, radares como MF e radares de vento de meteoros (Vincent et al, 1984; Alan son et al., 1991; Kumar et al., 2007b), e satélites (Huanget al., 2006). Os ventos derivados do radar (MR) do meteoro interferométrico All-Sky (SKiYMET) nas proximidades da eletrojato equatorial (EEJ) são discutidos. Como Thumba (8,5° N, 77° E; mergulho lat. 0,5° N) está sob o cinturão EEJ, tem havido algum debate sobre a confiabilidade dos ventos derivados do radar de meteoros perto da região de altura EEJ. A este respeito, são comparadas as variações diurnas compostas dos perfis zonais de vento na região da mesosfera-termosfera inferior (MLT) derivadas do interferômetro Doppler TIMED (TIDI) e do radar de meteoros em Thumba. Neste estudo, é dada ênfase à verificação das observações do radar de meteoros na região de 98 km de altura, especialmente durante o horário de pico da EEJ (11h às 14h LT) (Jonh et al., 2011).

Os ciclos diurnos compostos de ventos zonais sobre Thumba são construídos durante quatro estações do ano de 2006 usando TIDI e observações de radar de meteoros, que apresentou boa concordância especialmente durante os horários de pico da EEJ, garantindo assim a confiabilidade das medições do radar de meteoros de ventos neutros próximos à região de altura da EEJ. É evidente a partir do presente estudo que em escalas sazonais, as medições do radar não são influenciadas pela EEJ. A importância do presente estudo reside na validação da técnica de radar de meteoros sobre Thumba localizada no equador magnético (Jonh et al., 2011).

Os ventos neutros na região da mesosfera e da termosfera inferior (MLT) são medidos

por um sistema de detecção de trilha de meteoros recém-instalado ou radar de meteoros em Chung-Li, Taiwan, para o período de 10 a 25 de novembro de 2012, que inclui a chuva de meteoros Leonidas. Neste estudo foi utilizado as irregularidades de plasma alinhadas em campo de 3 m na E esporádico (E_s) região em combinação com o modelo do Campo de Referência Geomagnética Internacional para calibrar os desvios de fase do sistema, de modo que as verdadeiras posições das trilhas de meteoros possam ser determinadas corretamente com a técnica de interferometria. Os ventos dos meteoros foram estimados a partir das velocidades radiais em combinação com os ângulos de chegada das trilhas dos meteoros de acordo com o método dos mínimos quadrados. Uma comparação mostra que são encontradas grandes discrepâncias nas magnitudes das velocidades do vento entre a medição do radar e a previsão do HWM07, especialmente uma discrepância de até um fator de 5 acima de 100 km (Su et al., 2014).

As decomposições dos componentes das marés das séries temporais dos ventos medidos por radar e previstos pelo HWM07 na faixa de altura de 82 a 100 km indicam que tanto as amplitudes das marés semidiurnas e terdiurnas medidas pelo radar quanto às previstas pelo HWM07 mostram uma tendência semelhante para crescer com a altura. No entanto, as variações de altura nos ventos médios e nas marés diurnas entre eles mostram tendências muito diferentes. Além do HWM07, os ventos neutros da MLT medidos pelo TIDI também foram comparados com os ventos do radar meteórico. Ele mostra que o padrão geral da distribuição composta de altura e tempo local dos ventos de meteoros de radar é consistente com o do vento TIDI, independentemente de alguma discordância nas velocidades locais do vento entre eles (Su et al., 2014).

A descrição detalhada da variabilidade da maré diurna na temperatura na faixa de 20–100 km e nos ventos próximos à mesopausa usando observações do SABRE e do TIDI entre 2002 a 2007, mostrou as variações de marés com periodicidades semestrais (SAO), anuais (AO) e quase bienais (QBO). E a comparação entre o vento calculado a partir dos dados de temperatura do SABRE e os dados de vento do TIDI. E observações de vento de radar de meteoro em Maui (20,75°N, 156,43°W) também foram usadas na comparação. Os dados de temperatura e pressão atmosférica e densidade do TIMED/SABRE também foram utilizados para calcular o vento de fundo e suas marés. As variações sazonias e quase bienais na maré diurna migrante observada pela Termosfera, Ionosfera, Mesosfera, Energética e Dinâmica (TIMED) foi possível verificar variações periódicas da maré diurna migrante entre 2002 a 2007 (Xu et al., 2009).

Existem fortes oscilações quase bienais (QBO) na amplitude da temperatura diurna das marés na região tropical e no vento próximo de $\pm 20^\circ$. O período da maré diurna QBO é de cerca de 24-25 meses na mesosfera, mas é bastante variável com a altitude na estratosfera. Em toda a mesosfera, a amplitude da maré diurna atinge o máximo durante março/abril dos anos em que a QBO do vento estratosférico inferior está na fase leste. Como a maré mostra amplificação apenas durante um período limitado do ano, ainda não existem dados suficientes para determinar se a variação da maré é verdadeiramente bienal (período de 24 meses) ou quase bienal. As oscilações semestrais (SAO) e anuais (AO) na maré diurna apoiam descobertas anteriores: a amplitude das marés é maior em torno dos equinócios (sinal SAO) e é maior durante o equinócio vernal (sinal AO). A comparação entre os cálculos e as observações do TIMED/TIDI e do radar de meteoros indica concordância qualitativa, mas também existem algumas diferenças (Xu et al., 2009).

Neste estudo, os ventos da linha de visão (LOS) de telescópios individuais são comparados com as medições do instrumento Michelson Interferometer for Global High-resolution Thermospheric Imaging (MIGHTI) do Ionospheric Connection Explorer (ICON) de 90 a 100 km de altitude durante 2020. Com os ventos vetoriais MIGHTI projetados na direção LOS de cada telescópio TIDI, são encontradas coincidências dos dois conjuntos de dados. Os quatro telescópios têm desempenho diferente e o desempenho depende da configuração do satélite e do ângulo zenital solar local. As medições dos telescópios do lado frio, Telescópio 1 (Tel1) e Telescópio 2 (Tel2), estão melhor correlacionadas com os ventos MIGHTI, com o Tel2 tendo coeficientes de correlação mais elevados em todas as condições (Wu et al. 2023).

O desempenho do Tel1 é comparável ao do Tel2 durante o voo para trás, ao mesmo tempo em que mostra erros sistemáticos maiores que a velocidade média do vento durante o voo para frente. Os ventos LOS do lado quente do Telescópio 3 (Tel3) e do Telescópio 4 (Tel4) variam amplamente em magnitude, especialmente no lado noturno. Em comparação com os ventos MIGHTI, as medições do Tel4 têm a correlação mais fraca, enquanto o desempenho do Tel3 é comparável ao dos telescópios do lado frio durante a fase ascendente, mas deteriora-se durante a fase descendente. As coincidências dos ventos TIDI e MIGHTI LOS são distribuídas principalmente de $\sim -20^\circ$ a $\sim 50^\circ$ de latitude, com mais eventos no lado diurno do que no lado noturno (Wu et al. 2023).

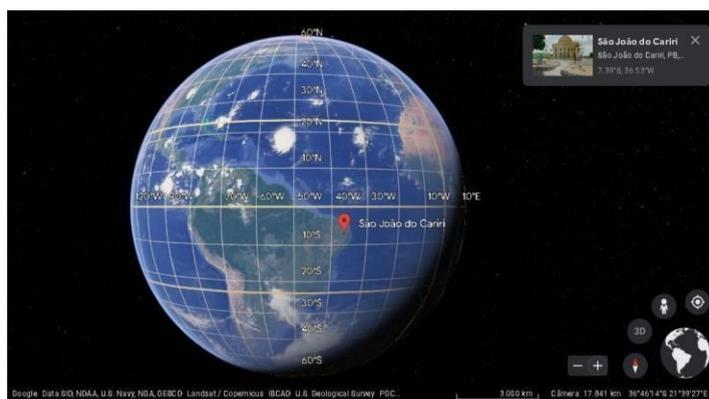
CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Obtenções de Dados

O estudo do vento na Região da Mesosfera e Baixa Termosfera será realizado através das análises dos dados obtidos do Instrumento TIDI que se encontra a bordo do satélite TIMED e do Radar Meteorológico SKiYMET instalado em São João do Cariri – PB, utilizando os dados de 2005 e 2006. A Figura 1 é mostrada a localização e distribuição das antenas receptoras que se encontra na cidade de São João do Cariri – PB.

FIGURA 1 – Localização de São João do Cariri – PB (74°S; 365°O) (a), Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba – OLAP, com visão das antenas receptoras (b), e uma antena transmissora (c) em São João do Cariri - PB.



(a)

Fonte: Google Earth



(b)



(c)

Fonte: <http://aerolumedf.ufcg.edu.br/>.

3.1.1 Técnicas de Medidas de Ventos Neutros

Diversas técnicas têm sido empregadas para a observação do vento neutro na MLT. Estas técnicas se utilizam dos fenômenos que ocorrem na atmosfera provocada pelos elementos dinâmicos, como o vento e as ondas, por exemplo. Na região entre 70 e 110 km de altura há a presença de partículas, os meteoróides, que se desintegram devido o atrito com o ar e produzem longos traços ionizados que podem ser também captados por radares meteorológicos.

Existem também as técnicas baseadas em satélites meteorológicos associadas a medidas de instrumento de solo para determinar os perfis atmosféricos. Os ventos podem ainda ser medidos por imageadores Doppler e interferométricos, baseados no satélite UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) (Fleming et al. 1996).

As técnicas baseadas em instrumentos de solo podem ser ópticas ou de radio frequência. As primeiras utilizam sistemas ópticos para fazer suas medidas, como por exemplo, um imageador CCD ou um radar de laser. O imageador CCD é um sistema óptico passivo composto de um sistema óptico que registra as variações na luminescência, que está presente nas camadas mais altas da atmosfera, e o radar de laser que é um sistema óptico ativo, onde o transmissor emite um feixe de laser e o receptor capta a radiação retro espalhada pelas moléculas e partículas da atmosfera (Tokumoto, 2002). As técnicas baseadas em radiofrequência utilizam-se radares como o MF e os meteorológicos. Segundo Muller et al (1974), de todas as técnicas utilizadas no estudo de ventos na alta atmosfera, apenas as que utilizam radares e, em particular, radares meteorológicos, permitem o estudo contínuo em longos períodos.

A técnica do radar meteorológico é baseada na determinação da velocidade média dos ventos neutros, a partir da velocidade radial dos traços meteorológicos, descritas a seguir. Ao penetrar na atmosfera em alta velocidade, entre 11 e 72 km/s, as partículas cósmicas sofrem ablação e produzem longas colunas ionizadas, denominadas de traços ionizados, que são transladados pelos ventos neutros e podem ser detectados por técnicas visuais ou de radiofrequência. A distribuição de meteoros se apresenta de forma desigual, com altura mínima em torno de 70 km e máxima em torno de 110 km, com concentração maior entre 90 e 100 km, o que implica que nesta faixa a precisão das medidas é melhor. No intervalo entre 80 e 100 km o efeito do campo magnético sobre a dinâmica das partículas pode ser desprezado e, desta forma, os traços meteorológicos se movimentam devido à ação dos ventos neutros. A translação dos elétrons produz um deslocamento Doppler no sinal refletido pelo traço meteorológico. A partir deste deslocamento pode-se determinar a velocidade radial da trilha

meteórica e por consequência, a posição, a velocidade e direção do vento que o transportou (Tokumoto, 2002).

3.1.2 Radar Meteórico

O Radar meteórico é um instrumento bastante utilizado no estudo de vento na região meteórica. Ele usa as trilhas meteóricas para determinar o vento nesta região. O instrumento trata-se de um transceptor composto por uma antena transmissora, cinco antenas receptoras e módulos de transmissão, recepção, aquisição e processamento de dados.

3.1.2.1 O Radar Meteórico Modelo SKiYMET

O SKiYMET é um radar meteórico, desenvolvido pela Genesis Software Pty e MARDOC Inc, do Canadá utiliza a técnica interferométrica. É um sistema instrumental de pesquisa científica utilizada para observar meteoros e objetos artificiais, que penetram na atmosfera terrestre. Este sistema opera em uma repetição muito alta de pulsos (PRFs), acima de 2000 Hz.

Esta taxa mais alta de pulsação é útil, pois permite a determinação de parâmetros não acessíveis aos sistemas mais antigos, como, por exemplo, a velocidade de entrada do meteoro (Tokumoto, 2002).

O Radar meteórico SKiYMET instalado em São João do Cariri-PB opera em frequência de 35,24 MHz, uma taxa de repetição de pulsos de 2144 pps e um pico de potência de 12 kW. Os cálculos realizados com os ecos detectados fornecem muitas informações sobre a natureza do meteoro e sua velocidade de entrada na atmosfera, detectando os ecos durante 24 horas. Esse radar meteórico utiliza uma antena transmissora que detecta meteoros ao longo de todo o céu e cinco antenas receptoras funcionando como interferômetro. O ângulo de chegada é determinado pelas diferenças de fases entre as cinco antenas.

O alcance do eco é determinado pelo intervalo de tempo que o pulso transmitido leva para ir até o meteoro e voltar (T_R) dividido por dois. Como se trata de um pulso eletromagnético, a velocidade do pulso é igual à velocidade da luz (c), assim, o alcance (A) é expresso matematicamente da seguinte forma:

$$R_R = \frac{cT_R}{2} \quad (3.1)$$

Utilizando o alcance do eco e o ângulo zenital pode-se determinar a altura do meteoro (Paulino, 2012).

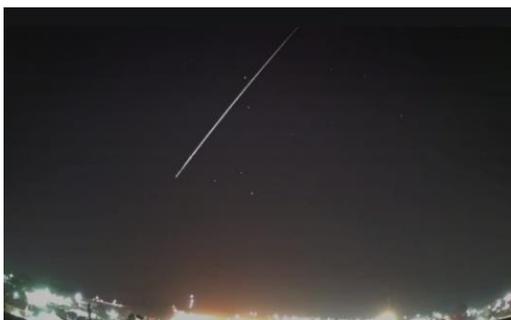
Este sistema é capaz de detectar uma faixa de 3000 a 6000 meteoros por dia e possibilita a determinação de ventos da média atmosfera (80 – 100 km de altura), de temperaturas e da velocidade de entrada dos meteoros; além do mapeamento dos riantes dos meteoros em condições de chuvas de meteoros. Os detalhes deste sistema encontram-se no endereço <http://www.gsoft.88.com.au/skiymet.html>, que é a página oficial da empresa Genesis Software e no trabalho de Hocking et al. (2001).

3.1.2.2 Meteoros

A região do nosso interesse para o estudo do vento está situada entre os limites aproximados de 70 km e 110 km de altitude. Está é uma região que, diariamente, é atingida por milhões de partículas de poeiras interplanetária, os chamados meteróides ou detritos espaciais. Estes meteróides pentram na atmosfera da terra, sendo vaporizado, deixando para trás um rastro ionizado, sofrendo um processo de ablação.

Os meteoros para os aeroluminista é um fenômeno que se caracterizam por riscos rápidos e brilhantes no céu, ditos as estrelas cadentes, e tem como causa, a entrada de um pequeno objeto, chamado meteoróide, na atmosfera terrestre. Estes meteoróides quando chegam à superfície da terra são chamados de meteoritos. A Figura 2 mostra a trilha de meteoro e a Figura 3 mostra uma imagem ilustrativa de uma chuva de meteoros.

FIGURA 2: Trilha de Meteoro



Fonte: G1.globo.com (Carolina Fernandes), 2021.

FIGURA 3: Imagem ilustrativa: chuva de meteoros



Fonte: Observatório Heller & Jung/Reprodução

Os meteoros são classificados de acordo com a distribuição dos meteróides no meio

interplanetário, podendo incidir de duas maneiras na atmosfera, uma aleatoriamente na forma de meteoróides esporádicos e outra de forma organizada e periódica na forma de chuva de meteoros.

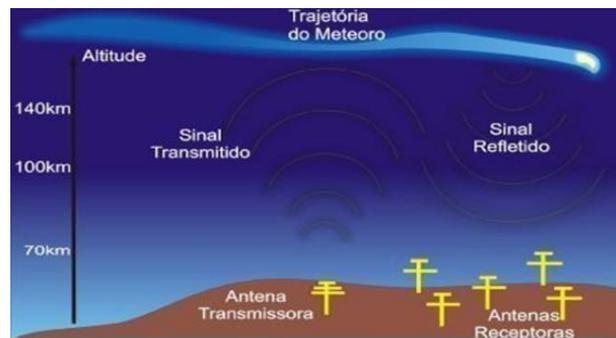
Os meteoros originam-se, em maior proporção, dos cometas e em menor proporção, dos asteróides, que são corpos sólidos do meio interplanetário com extensões maiores que algumas dezenas de metros e menores do que 1000 km. Devido à interação de um meteoróide com a atmosfera, inicia-se o processo de ablação que causa perda de massa do meteoróide por colisões de partículas da atmosfera, as quais são capturadas durante o movimento de rotação da terra. Os subprodutos da ablação podem ser fragmentos sólidos ou gás quente contendo átomos ionizados. Dessa forma, os meteoros são trilhas de plasma geradas na atmosfera.

3.1.2.3 A Região Meteórica

A região meteórica é a região da atmosfera terrestre entre ~70 e 110 km de altitude, a qual é atingida diariamente por uma grande quantidade de partículas de poeira (meteoróides) vindas do meio interplanetário. Ao ingressarem na atmosfera terrestre, essas partículas sofrem um processo de ablação devido ao atrito com a atmosfera neutra produzindo uma trilha ionizada chamada de trilha meteórica ou traço meteórico. Como nessas altitudes os efeitos do campo magnético sobre a dinâmica das partículas podem ser desprezados, os traços meteóricos se movimentam, principalmente, devido à ação dos ventos neutros.

O sinal refletido pelo traço meteórico sofre um deslocamento Doppler causado pelo movimento de translação dos elétrons. Então, a partir desse deslocamento Doppler, pode-se determinar a velocidade radial da trilha meteórica. A distância radial da trilha é calculada a partir do tempo de viagem do sinal eletromagnético e a localização horizontal da trilha meteórica é obtida usando a configuração interferométrica das antenas receptoras (Paulino, 2010). As antenas estão dispostas de forma a aperfeiçoar a detecção de meteoros. A Figura 4 mostra a região meteórica e pode ser visto um esquema da distribuição da antena transmissora e receptoras do radar meteórico.

FIGURA 4: Esquema de distribuição da antena transmissora e receptoras do Radar Meteórico.

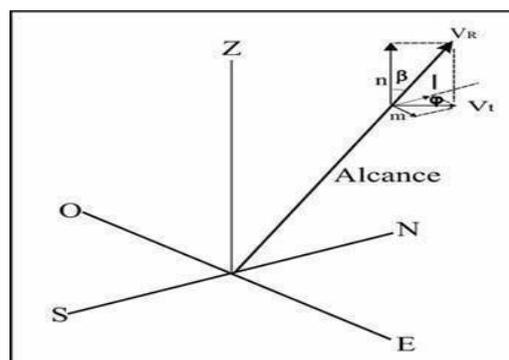


Fonte: Jair Stefanini Pereira Ataíde – 2007.

3.1.2.4 Determinação dos Ventos por Medidas de Radar

Os trabalhos pioneiros na utilização de medidas de parâmetros meteóricos para o cálculo de ventos neutros foram realizados por Manning et al. (1950). Assume-se a existência de ventos uniformes em toda a atmosfera superior com a mesma direção e velocidade. É estabelecido, então, um sistema de coordenadas polares esféricas com o eixo z na direção vertical. A velocidade do vento é dada por V_r , onde V_z é sua componente vertical, V_x , a componente na direção leste-oeste (zonal) e V_y , a componente norte-sul (meridional), o ângulo azimutal é definido por ζ e o ângulo zenital, por β . A figura 5 mostra a representação da geometria utilizada para medir a velocidade do vento radial com o deslocamento Doppler.

FIGURA 5: Representação da geometria utilizada para medir a velocidade do vento radial com o deslocamento Doppler.



Fonte: Montenegro, 2007.

Pode-se relacionar a velocidade radial do meteoro, V_R , com a velocidade do vento, \vec{V} através da expressão:

$$V_R = \vec{V} \cdot \hat{R}_R \quad (3.2)$$

$$\text{Onde } \hat{R}_R = \hat{x} \cos \zeta + \hat{y} \sin \zeta \text{ sen } \beta + \hat{z} \cos \beta \text{ e } \vec{V} = \hat{x} V_x + \hat{y} V_y + \hat{z} V_z \quad (3.3)$$

Pode-se escrever a Equação (3.2) desta forma:

$$V_R = (V_x \cos \zeta + V_y \sin \zeta) \sin \beta + V_z \cos \beta \quad (3.4)$$

Dividindo-se ambos os membros por $\sin \beta$, obtém-se:

$$\frac{V_R}{\sin \beta} = V_x \cos \zeta + V_y \sin \zeta + V_z \cot \beta \quad (3.5).$$

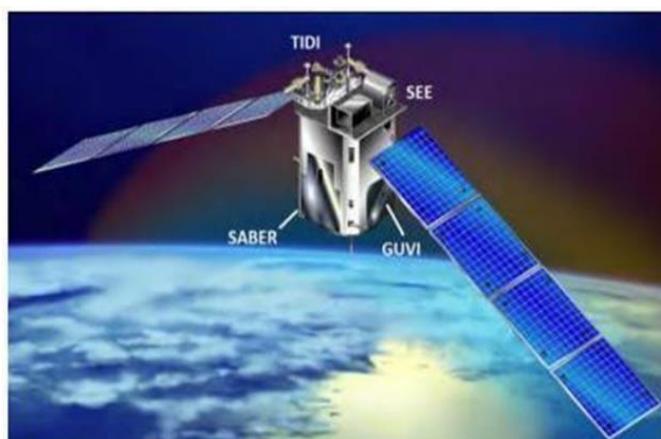
A determinação dos valores das componentes, V_x , V_y e V_z é feita pela regressão múltipla de $\frac{V_R}{\sin \beta}$ em relação a $\cos \zeta$, $\sin \zeta$ e $\cot \beta$. Uma forma equivalente a esta e que pode ser utilizada para se determinar o vento horizontal nas direções x e y é efetuada plotando-se $\frac{V_R}{\sin \beta}$ versus ζ . Ajusta-se uma senóide entre os pontos, o pico da curva fornece a amplitude e a direção do vento.

O radar faz a correlação das informações coletadas pelos cinco canais do receptor e calcula a velocidade radial, os ângulos zenitais e azimutais, o alcance do alvo, a altura e os atrasos entre os sinais transmitido e recebido. Estes cálculos são registrados em tabelas e gravados em arquivos de dados brutos (terminação: .mpd) e de ventos. Estes arquivos ficam disponíveis para o acesso remoto. Os arquivos de terminação mpd podem ser processados de forma a fornecer os valores das componentes de vento (Tokomuto, 2002).

3.2 Satélite TIMED

O Instrumento Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER) foi lançado a bordo do satélite Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) no dia 07 de dezembro de 2001, porém, as observações começaram em janeiro de 2002. O satélite TIMED é composto por quatro instrumentos: Solar Extreme Ultraviolet Experiment (SEE); TIMED Doppler Interferometer (TIDI); Global Ultraviolet Imager (GUVI); SABER. A figura 6 mostra o Satélite TIMED e os seus quatro componentes.

FIGURA 6: Concepção artística do satélite TIMED em órbita na Terra.

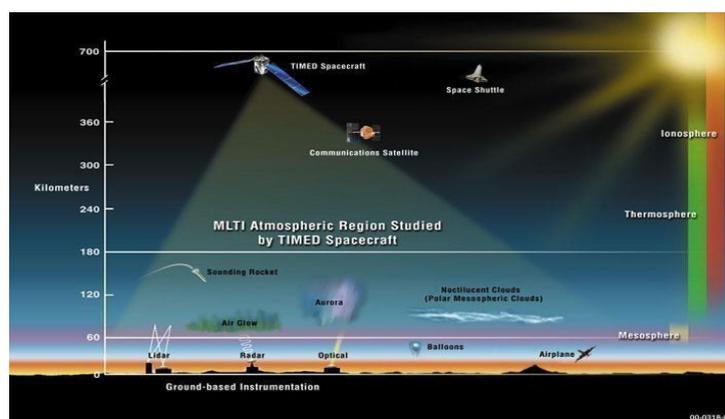


Fonte: [http:// www.timed.jhuapl.edu/WWW/gallery/imagens/art/ Concepts/with.jpg](http://www.timed.jhuapl.edu/WWW/gallery/imagens/art/Concepts/with.jpg).

O instrumento SEE mede radiação solar entre 60 e 180 km, o TIDI mede perfis de vento e temperatura na região entre 60 e 180 km, o GUVI mede composição, temperatura e entrada de energia, e o SABER mede emissões atmosféricas em um amplo intervalo espectral e de altitude.

O satélite TIMED descreve uma órbita circular de 625 km de altitude e $74,1^\circ$ de inclinação, realizando 14 voltas em torno da Terra por dia. A missão TIMED está estudando as influências do sol e dos seres humanos sobre a região menos explorada e compreendida da atmosfera da Terra - a Mesosfera e a Baixa Termosfera/Ionosfera (MLTI). O TIMED está focado numa porção desta região situada aproximadamente de 60 a 180 km acima da superfície da Terra (TIMED WEB SITE, 2009). O objetivo científico da missão TIMED é estudar pressão, temperatura e ventos básicos, da região MLTI, os quais resultam da transferência de energia para dentro e para fora desta região. A figura 7 mostra o TIMED em órbita.

FIGURA 7: Missão do satélite TIMED em órbita.



Fonte: NASA.gov.

A missão TIMED está estudando as influências do sol e dos seres humanos sobre a região menos explorada e compreendida da atmosfera da Terra - a Mesosfera e a Baixa Termosfera/Ionosfera (MLTI) e osatélite TIMED são úteis para a compreensão da dinâmica na MLT. Embora existam trabalhos publicados sobre o tema, o entendimento da dinâmica na região da mesosfera e baixa termosfera ainda é bastante escasso, o que demonstra a necessidade de mais estudos que possam contribuir para a sua melhor compreensão.

O instrumento TIDI foi desenvolvido e construído pela Universidade de Michigan (Killeen apoud, 1999). O TIDI mede ventos neutros realizando varreduras de membros de várias camadas de brilho aéreo da atmosfera superior e monitorando a mudança Doppler das emissões de airglow induzidas por ventos neutros.

TABELA 1: Parâmetros TIDI

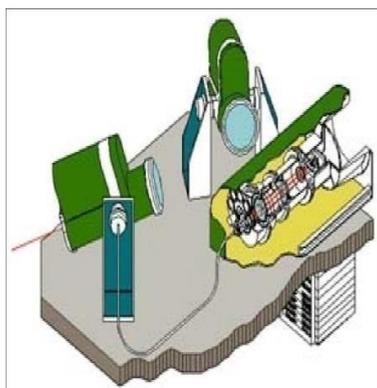
Parâmetro	Valor
Altitude da nave espacial	625 quilômetros
Inclinação orbital	74, 1-
Tempo para processar 24 horas de hora local	120 dias
Massa do instrumento	41,8 kg
Energia elétrica	19,32 watts (média da órbita)
Taxa de dados	2494 bits/s
Resolução de altitude	2 km
Faixa espectral	550-900 nm
Temperatura operacional para perfilador	20 ± 5 °C
Temperatura operacional para detector	-80°C
Temperatura operacional para telescópios	-20°C a -40°C
Material da placa	Silica fundida
Postar material	Zerodur
Diâmetro da placa	10,5 cm
Diâmetro da área revestida	8,6 cm
Espessura da lacuna	2,2 cm
Tamanho do CCD	2000 – 800
Tamanho do pixel	15 - 15 microns
Tipo de telescópio	Gregoriano fora do eixo
Abertura clara	7,5 cm
Comprimento focal	17,0 cm
Campo de visão horizontal nominal	2,5 graus

Campo de visão vertical nominal Alcance de Varredura	0,05 graus \pm 5 graus
Fibra ótica	Sílica fundida, poly Micro Inc.
Diâmetro do núcleo	40 microns
Diâmetro do revestimento	56 microns
Abertura numérica	0,22
Número de fibras por campo	-390

Fonte: TIMED WEB SITE, (2007).

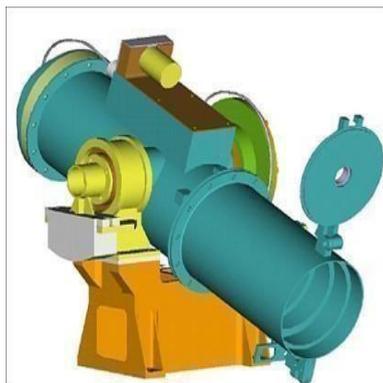
O TIMED Doppler Interferometer (TIDI) está investigando a dinâmica e a energética da mesosfera e da baixa termosfera da Terra. As medições do TIDI nos permitem obter uma descrição global dos campos dos ventos, bem como informações importantes sobre ondas de gravidade, densidades de espécies, taxas de emissão de auroras e brilho aéreo e nuvens noctilucentes.

FIGURA 8: Layout esquemático do TIDI



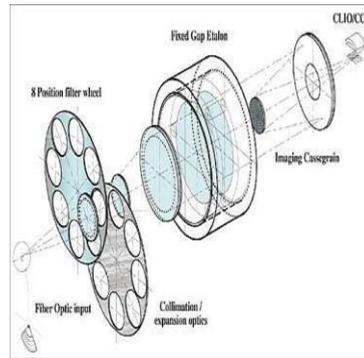
Fonte: Universidade de Michigan.

FIGURA 9: Ilustração do telescópio TIDI



Fonte: UCAR

FIGURA 10: Configuração óptica do TIDI



Fonte: UCAR.

A figura 8 mostra os 4 telescópios do TIDI. O TIDI compreende três subsistemas principais: quatro telescópios idênticos, um interferômetro Fabry-Perot com um detector CCD e uma caixa eletrônica. A luz das regiões selecionadas da atmosfera é coletada pelos telescópios e acoplada por fibra óptica de detecção. Os quatro campos de visão são codificados junto com uma entrada de campo de calibração e convertidos em uma matriz de cinco cunhas circulares concêntricas. Esta entrada então passa por um filtro selecionado, então por um Fabry-Perot etalon, e é finalmente fotografada em um CCD por meio de um dispositivo óptico de imagem de círculo para linha (CLIO). É um instrumento de visualização de membros que realiza medições de sensoriamento remoto da temperatura e vetor ventos, observando a linha Doppler e as características da banda das emissões atmosféricas na região MLTI.

A Figura 9 mostra a ilustração do telescópio TIDI. Os quatro telescópios TIDI são orientados ortogonalmente, permitindo que o instrumento meça vetores de vento neutros em ambos os lados da trajetória do satélite. Os dois telescópios que observam o mesmo lado observam os mesmos locais com um atraso de 9 minutos à medida que a espaçonave avança. As direções de visualização desses dois telescópios são perpendiculares entre si. Assumindo que os ventos neutros não mudam durante o curto período de tempo, então as amostragens nas duas direções podem ser usadas para formar o vetor vento neutros em termos dos componentes meridional e zonal (Killeen, 2004).

A Figura 10 apresenta a configuração esquemática óptica do TIDI. Cada varredura vertical consiste em vistas com resolução angular de $2,5^\circ$ (horizontal, ao longo do membro) x $0,05^\circ$ (vertical, normal ao membro) ou em resolução espacial de $125,0 \text{ km} \times 2,5 \text{ km}$. O tamanho do passo de altitude varia de $2,5 \text{ km}$ na mesosfera a $25,0 \text{ km}$ na termosfera. Cada ciclo de aquisição para cima/para baixo leva cerca de 100-200s para ser concluído, resultando em um espaçamento horizontal nominal entre os perfis de aproximadamente 750 km ao longo da trajetória da órbita.

3.2.1 Métodos Processamento de Dados TIDI

O TIDI mede ventos neutros através da varredura de diferentes altitudes usando várias emissões de airglow. Atualmente, o instrumento TIDI mostra uma faixa de altitude de 70 a 120 km durante o dia de 80 a 103 km à noite (Killeen et al., 2006).

A recuperação dos ventos do TIDI é realizada através de um ajuste não linear de um modelo direto às medições. Os parâmetros do modelo direto incluem os perfis atmosféricos de vento, temperatura, taxa de emissão de volume e fundo disperso Rayleigh que são recuperados simultaneamente como parte do processamento de dados padrão, e também vários parâmetros que descrevem o estado do instrumento (Killeen et al., 2006).

3.2.1.1 Ventos - TIDI

Existem dois esquemas para calcular os ventos vetoriais a partir das medições do TIDI. Como foi mencionado anteriormente, o TIDI exhibe dois lados do satélite. Para cada lado, os dois telescópios irão mostrar o mesmo local a 9 minutos de distância. O satélite se move ao longo de sua órbita a 625 km de altitude. Mais importante, os dois telescópios visualizam a mesma região de direções quase ortogonais, o que permite que as medições de duas direções de visualização sejam decompostas em componentes de vento meridional e zonal. Uma maneira de calcular o vetor é simplesmente emparelhar os locais de amostragem de um telescópio com os vizinhos mais próximos do outro telescópio. A distância entre os dois locais de amostragem deve ser inferior a 500 km. O par de amostras é então usado para calcular os componentes do vento meridional e zonal no primeiro local de amostragem do telescópio. Se nenhuma amostra de emparelhamento puder ser encontrada, nenhum vento vetorial será calculado.

A segunda maneira de calcular os ventos vetoriais é a seguinte. Em primeiro lugar, as amostras de cada telescópio são interpoladas linearmente em pontos de grade de ângulo de trilha uniformemente espaçadas. Em seguida, os ventos meridional e zonal são calculados nesses pontos de grade de ângulo de pista uniformemente espaçados. Os dados de ventos neutros fornecidos pelo centro de processamento de dados NCAR/HAO (<http://timed.hao.ucar.edu/tidi>) usam o método anterior, enquanto o centro de processamento de dados da Universidade de Michigan (<http://tidi.engin.umich.edu>) usa o último. O software de produção para decompor os ventos do TIDI é chamado de VEC-TORTL (Killeen et al.,

2006).

3.2.2 Obtenção dos Dados de Ventos do TIDI

Os dados foram obtidos a partir da base disponibilizada pela Universidade de Michigan que é responsável por manter o projeto. A base foi baixada via protocolo FTP pelo link: <ftp://tidi.engin.umich.edu/tidi/vector/>.

Os dados foram obtidos a partir de duas partes, uma responsável por ler os arquivos VEC e convertê-los em um csv pré-processado. Essa parte pode ser observada no jupyter notebook `preparing_data_to_plot.ipynb`. A segunda parte diz respeito à leitura dos arquivos pré-processados e execução e plot dos gráficos dos ventos médios meridionais e zonais. Essa parte é evidenciada pelo jupyter notebook `tidi_plot.ipynb`.

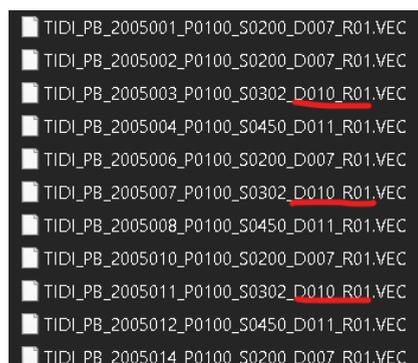
3.2.2.1 Primeira Parte – Preparando Os Dados Para O Plot

Inicialmente obtemos os dados das coordenadas de São João Cariri - PB e filtramos apenas os dados que estão na latitude e longitude da região. Uma grade de ± 10 graus de latitude e longitude centrada em São João do Cariri foi usado para calcular os ventos médios do TIDI, que têm resolução de 2,5 km de altitude a partir de 80 km até 100 km de altitude.

Foram considerados para a análise somente os dados da versão D010_R01, que é uma das versões do algoritmo de ajuste espectral que possui mais dias mapeado.

A seguir são apresentados os exemplos marcados são de arquivos com o sufixo D010_R01 que foram considerados para a realização do trabalho:

FIGURA 11: Arquivos com o sufixo D010_R01



Fonte: Acervo do autor.

Os campos considerados para a análise foram:

- **'ascending': [Obs.: informação não foi utilizada para o cálculo]**
- **'alt_retrieved':** altitude registrada
- **'ut_date':** marcação do ano e dia
- **'UT_time':** horário do registro convertido em horas
- **'lat':** latitude
- **'lon':** longitude
- **'data_ok':**
- **'u':** velocidade zonal
- **'var_u':** variância da velocidade zonal
- **'v':** velocidade meridional
- **'var_v':** variância da velocidade meridional

Depois disso salvamos os dados das medições diárias dos anos de 2005 a 2006 para csv. A seguir um exemplo de arquivo csv:

FIGURA 12: Arquivo csv

<u>na</u> <u>lts</u>	<u>ny</u> <u>ec</u>	<u>asc</u> <u>ending</u>	<u>alt</u> <u>_retrieved</u>	<u>ut</u> <u>_date</u>	<u>UT</u> <u>_time</u>	<u>lat</u>	<u>lon</u>	<u>data</u> <u>_ok</u>	<u>u</u>	<u>var</u> <u>_u</u>	<u>v</u>	<u>var</u> <u>_v</u>
4	448	b'F	80.0	b'2005001'	7.584722222222222	-13.928479	315.54437	b'T'				
4	964	b'T	80.0	b'2005001'	16.3225	-10.331198	322.62607	b'T'	-12.295723	559.0333	-78.536606	459.26843
4	965	b'T	80.0	b'2005001'	16.358611111111111	-3.0482023	324.57245	b'T'	-27.740772	874.9862	-90.49597	538.84644
4	1044	b'T	80.0	b'2005001'	17.977222222222224	-11.78036	331.24957	b'T'				
4	1045	b'T	80.0	b'2005001'	18.013055555555557	-4.329226	332.63715	b'T'				
5	244	b'F	82.5	b'2005001'	4.2375	-0.630256	328.00845	b'T'				
5	245	b'F	82.5	b'2005001'	4.273055555555556	-8.046699	329.51636	b'T'				
5	246	b'F	82.5	b'2005001'	4.308888888888889	-15.527763	330.80066	b'T'				
5	448	b'F	82.5	b'2005001'	7.584722222222222	-13.928479	315.54437	b'T'				
5	964	b'T	82.5	b'2005001'	16.3225	-10.331198	322.62607	b'T'	-18.252918	506.04907	-51.82612	447.36417
5	965	b'T	82.5	b'2005001'	16.358611111111111	-3.0482023	324.57245	b'T'	-37.583786	767.43604	-80.42148	475.36847
5	1044	b'T	82.5	b'2005001'	17.977222222222224	-11.78036	331.24957	b'T'	-13.946257	353.0026	-8.672956	458.59717
5	1045	b'T	82.5	b'2005001'	18.013055555555557	-4.329226	332.63715	b'T'	-12.211397	593.9559	-7.388207	666.62286
6	244	b'F	85.0	b'2005001'	4.2375	-0.630256	328.00845	b'T'				
6	245	b'F	85.0	b'2005001'	4.273055555555556	-8.046699	329.51636	b'T'				
6	246	b'F	85.0	b'2005001'	4.308888888888889	-15.527763	330.80066	b'T'				
6	448	b'F	85.0	b'2005001'	7.584722222222222	-13.928479	315.54437	b'T'				

Fonte: Acervo do autor.

Apesar do arquivo já estar em um formato de apresentação compreensível, é preciso converter esses dados para um formato mais acessível para realizar o plot dos gráficos. O formato utilizado possui os seguintes atributos:

- **tempo decorrido:** marcação da hora da marcação
- **marcação da velocidade(u/v) para cada altitude de 70km a 100km para o tempo**

decorridomarcado

- **marcação do desvio padrão (raiz do var_u e var_v) para cada altitude de 70km a 100km para o tempo decorrido marcado.**

Em outras palavras, dividimos o arquivo.csv em dois arquivos .txt com os dados das altitudes de 70km a 100km, um com as velocidades meridionais(v) e o outro arquivo com as velocidades zonais(u).

Exemplos dos dois arquivos são apresentados abaixo:

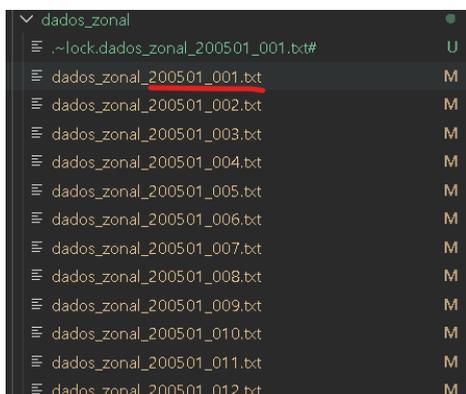
FIGURA 13: O arquivo CSV em dois arquivos. Txt.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
tempo_decorrido	70.0km	72.5km	75.0km	77.5km	80.0km	82.5km	85.0km	87.5km	90.0km	92.5km	95.0km	97.5km	100.0km	std_70.0km	std_72.5km	std_75.0km	std_77.5km	std_80.0km
4.2375								-29.443619	-91.668465	-58.01477	-31.098606	-6.627021	16.407536					
4.273055555555556																		
4.308888888888889																		
7.584722222222222																		
16.3225					-12.285723	-18.252918	-12.7073145	-15.544464	-21.889604	-13.053576	30.25003	55.933044	28.889711					23.643885044
16.359611111111111					-27.740772	-37.583786	-34.80297	-54.68547	-36.028278	-18.078068	-16.80974	-23.97808	-67.841286					29.580165652
17.977222222222224					-13.946257	10.700877	11.786418	18.648472	6.321148	-11.248838	-7.031294	0.13635635						

Fonte: Acervo do autor.

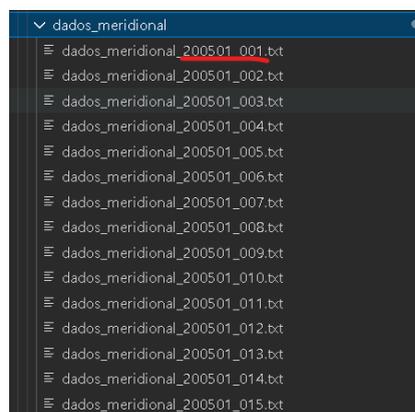
As Figuras 14 e 15 representam o resultado da separação dos dados zonais e meridionais do arquivo csv. Está marcado para cada arquivo o ano, mês e dia do ano. Ex.: 200501_001 (2005 é o ano, 01 é o mês de janeiro e _001 é o primeiro dia do ano, podendo variar de 1 a 365).

FIGURA 14: Dados zonais



Fonte: Acervo do autor.

FIGURA 15: Dados meridionais



Fonte: Acervo do autor.

3.2.2.2 Segunda Parte – Plotando Os Dados

Antes de começarmos a plotagem dos gráficos fazemos um último pré-processamento nos dados. Como pôde ser visto nos dados anteriores, para um mesmo dia, temos várias medições. O nosso objetivo é plotar um gráfico de contorno representando o comportamento médio dos ventos meridionais e zonais. Para isso convertemos os arquivos dos dias que representam um mês em um único arquivo que representa todo o mês, ou seja, temos um conjunto de dias composto para um mês. E para determinar os ventos médios mensais calculamos uma média diária para as componentes zonal e meridional, analisando o que ocorre ao longo de um dia, e para isso foi preciso fazer uma dia composto, ou seja, calculamos todos os dias dentro dos meses em função da altitude. O que fazemos aqui é calcular a média das velocidades de cada arquivo e salvamos em um único arquivo as médias das medições de cada dia do mês. Abaixo temos um exemplo de arquivo de média:

FIGURA 16: Arquivo de média

1	tempo	80	82.5	85	87.5	90	92.5	95	97.5	100 dia
2	11.134444	-84.516288	-37.077191	-29.181674	3.617037	27.323490	38.639939	38.184168	17.465549	-5.056134 001
3	10.204833	-88.016905	-10.356659	11.352427	13.532518	17.962179	21.346305	25.940079	14.404904	-7.691143 002
4	10.186806	10.661430	-31.390949	-31.417763	-25.918412	-11.070759	35.731642	74.042580	61.411755	28.630177 003
5	7.730243	-20.461229	8.525717	10.817472	23.654989	25.056604	11.831165	3.119202	-1.331916	3.729986 004
6	9.857623	-10.134791	-40.760205	-51.577233	-44.353715	-39.192305	-21.282287	3.305036	27.452075	30.195835 005
7	8.090486	NaN	14.268007	14.411061	18.768271	47.118648	82.853950	102.547112	98.082140	22.268653 006
8	9.738413	-135.540117	-65.636459	-46.625375	-28.703849	-34.152752	-30.427284	-26.511411	-18.116641	9.467645 007
9	9.835938	29.719336	16.418852	-14.747579	-23.244248	-18.869264	3.507708	40.698946	64.720828	58.571542 008
10	8.906000	20.666161	10.303945	-0.346234	-5.410332	8.333408	2.729219	-25.433571	-39.967194	-39.806151 009
11	9.455432	1.491302	-3.427210	-12.930375	-9.600188	-7.721404	16.315602	45.348337	56.331283	21.306685 010
12	7.739653	-2.794852	-1.691392	-15.144296	-14.969339	-17.615390	-30.811165	-34.773666	-21.487849	-1.788876 011
13	8.558426	29.356441	24.796352	19.012756	2.758629	5.666323	9.877600	27.069588	23.808058	14.798421 012
14	6.791771	NaN	12.005069	-1.458478	-19.642186	-13.782025	-32.026837	-60.172556	-61.496475	-40.750456 013
15	7.051343	181.969400	70.741948	25.107543	13.477065	12.056382	15.746405	24.240451	24.013969	10.334883 014
16	8.324931	-10.539773	20.901491	29.416004	37.132590	67.043553	73.992495	27.194958	-3.534441	-4.592565 015
17	6.895895	-8.974996	-19.465507	-21.167451	-27.830577	-30.056682	-9.134929	15.079756	10.940274	-4.865149 016
18	8.897569	-12.978514	1.524888	13.523699	21.985692	33.730605	52.749538	50.621386	32.165432	40.288179 017
19	7.349877	-27.601914	2.192948	-27.859140	-34.152023	-36.469003	-18.562735	15.546868	29.225492	27.582961 018
20	6.818306	25.349837	3.358541	-9.729787	-15.306275	1.054611	38.691619	74.890265	86.506081	70.108917 019
21	5.587083	-41.701940	9.880286	-3.893396	-30.064957	-31.143019	-16.853374	8.774770	48.082479	55.448050 020
22	4.943889	-25.749078	-31.719065	-23.738989	-19.792372	-13.231890	-4.468979	10.299000	32.465295	77.884343 021
23	7.025035	-1.568279	8.491584	-8.779289	-39.305421	-33.471553	-11.933694	7.480755	22.229586	47.487512 022
24	4.704167	NaN	12.873030	5.722042	30.607006	74.501959	95.120025	67.587730	-0.474170	-31.424670 023
25	12.880741	-61.740891	-17.275709	6.780081	-43.021825	-29.774317	-23.396458	-0.328429	28.369523	19.796520 024
26	15.551111	-133.601659	4.755945	36.169026	10.433566	25.875724	48.492528	59.802214	44.106826	28.264793 025
27	7.941230	-57.241005	-26.589686	-19.871556	-16.197882	-32.553435	-43.812410	-35.166379	-44.242844	-54.934804 026
28	8.954472	45.954470	-11.998618	-1.769807	13.564885	15.124328	17.172918	-3.527917	-25.094480	-43.513259 027
29	12.184846	-5.421025	0.269290	-12.797764	-2.336961	12.375108	21.681465	29.758209	21.172956	-6.068835 028
30	13.261080	68.987663	-2.692327	-5.354926	-11.829416	-2.191387	6.260382	10.255178	81.910624	59.415169 029
31	5.831167	NaN	26.593859	6.006748	-13.974649	-15.356619	-13.345063	-12.483039	-9.166069	1.071901 030

Fonte: Acervo do autor.

Essa imagem é um exemplo do arquivo das médias do mês de janeiro para os dados meridionais, existe um equivalente do mês de janeiro para os dados zonais. Fizemos também mais duas alterações, removemos os dados de desvio padrão e consideramos apenas as altitudes a partir de 80 km.

Após isso, fazemos a plotagem dos gráficos de contornos meridionais e zonais para

cada mês dos anos de 2005 e 2006. Utilizamos como paleta de cores o `jet_r`.

3.2.3 Análise de Dados TIDI

O procedimento de processamento de dados compreende três etapas. Na primeira etapa, os dados do TIDI são mesclados com as informações orbitais da espaçonave para formar os dados espectrais. Os dados espectrais são processados para remover os vários fundos e então normalizados para unidades físicas de Rayleigh/cm^{-1} para cada canal espectral. Os ventos na linha de visão são calculados sem qualquer algoritmo de inversão. Na segunda etapa, os dados espectrais são invertidos em altitude para formar ventos invertidos na linha de visão. Na etapa final, os ventos de linha de visão invertida de diferentes telescópios são combinados para formar vetores de vento neutros em termos de componentes meridional e zonal (Killeen et al., 2006).

O TIDI possui quatro telescópios orientados ortogonalmente e, portanto, pode observar o vento em ambos os lados da trilha do satélite. O lado voltado para o sol é chamado de -lado quente e o lado não voltado para o sol é chamado de -lado frio. Além disso, o vento neutro do lado quente observado pelo TIDI é um vento zonal e o vento neutro do lado frio é um vento meridional. O TIDI pode medir dados de vento em quatro horários solares locais diferentes em um determinado dia. A taxa de precessão do satélite TIMED determina que a trilha de amostragem TIDI cubra 24 horas no horário local a cada 60 dias, que é o período de guinada de um satélite (Sun, 2023).

À medida que a espaçonave cruza o terminador dia/noite (nave espacial $SZA = 90^\circ$), o TIDI alterna as operações entre os modos diurno e noturno. Como o TIDI é operado nos modos diurno e noturno durante porções iguais de cada órbita, as medições para os telescópios do lado quente (lado do Sol) e do lado frio (lado anti-sol) são divididas em uma proporção aproximada de 50/50 em distintas zonas de observações diurnas e noturnas. A mudança entre os modos diurno e noturno cria alguma sobreposição espacial nas observações diurnas e noturnas nas proximidades do crepúsculo, porque as duas vistas da mesma região, ao longo da mesma trajetória pelos telescópios dianteiros e traseiros, são separadas por cerca de 7 minutos, e nesse intervalo a espaçonave cruza a fronteira dia/noite e o instrumento muda de modo (Killeen et al., 1999).

É muito importante compreender a distinção entre a hora local no local de medição e o modo de operação do instrumento TIDI no momento em que a medição é feita. Perto do

crepúsculo, as quatro visualizações do telescópio abrangem o terminador dia/noite, enquanto o instrumento funciona no modo diurno ou noturno (conforme determinado pelo ângulo zenital solar da nave espacial). Para algumas visualizações, haverá uma incompatibilidade entre a hora local da visualização (dia/noite) e o modo que está sendo executado (noite/dia). Nos casos em que a localização do ponto tangente está no lado "errado" do terminador dia/noite para corresponder ao modo do instrumento que está sendo executada, a varredura de altitude para essa localização do ponto tangente será de uso limitado, na melhor das hipóteses. A maioria dessas medições incompatíveis cairá dentro dos limites definidos do crepúsculo, mas algumas ocorrerão fora dos limites do crepúsculo (Killeen et al., 1999).

O satélite TIMED realizará manobras de guinada (rotações da espaçonave do voo para frente para o voo para trás) uma vez a cada 60 dias quando o ângulo beta solar se aproximar de 0. A espaçonave será inclinada para frente enquanto o ângulo beta solar for positivo e girará para voo para trás quando o ângulo beta se torna negativo. Essas manobras de guinada evitam que o lado -frio da espaçonave fique voltado para o sol (Killeen et al., 1999).

Considerando os pares de telescópios TIDI nos lados quente e frio da espaçonave, a manobra de guinada inverte qual par olha para o lado norte e qual para o lado sul da trajetória da órbita do satélite, cada vez que a espaçonave se vira. No voo direto, a trilha das observações do lado quente fica ao norte da trilha orbital, enquanto a trilha lateral fria fica ao sul da trilha orbital. O voo para frente à região polar norte pode ser vista apenas pelos telescópios do lado quente, e a região polar sul é vista apenas pelo lado frio. Para ângulos betas negativos pólo norte é observado pelo lado frio e o pólo sul pelo lado quente. Vê-se que os padrões ovais distintos das medidas dos lados quentes e frios são invertidos em torno do equador para o ângulo beta positivo versus negativo. Observe que a visão que se estende até o pólo em um hemisfério atinge uma latitude de "reviravolta" de cerca de 58°C no hemisfério oposto (Killeen et al., 1999).

A órbita TIMED precede lentamente e leva mais de 60 dias para completar uma cobertura completa de 24 horas da hora local. O TIDI estima o vento do airglow dentro de 2,5° horizontalmente durante uma única sondagem, para as medições do TIDI, foi considerada a altitude entre 80 e 100 km e uma grade de ± 10 graus de latitude e longitude, centrada em São João do Cariri – PB ao longo de 60 dias centrados em cada mês de 2005 e 2006.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados e a discussão da comparação dos dados de ventos médios meridionais e zonais que foram detectados através do radar meteórico instalado em São João do Cariri - PB e do instrumento TIMED Doppler Interferometer (TIDI), entre o período de Janeiro de 2005 a dezembro de 2006.

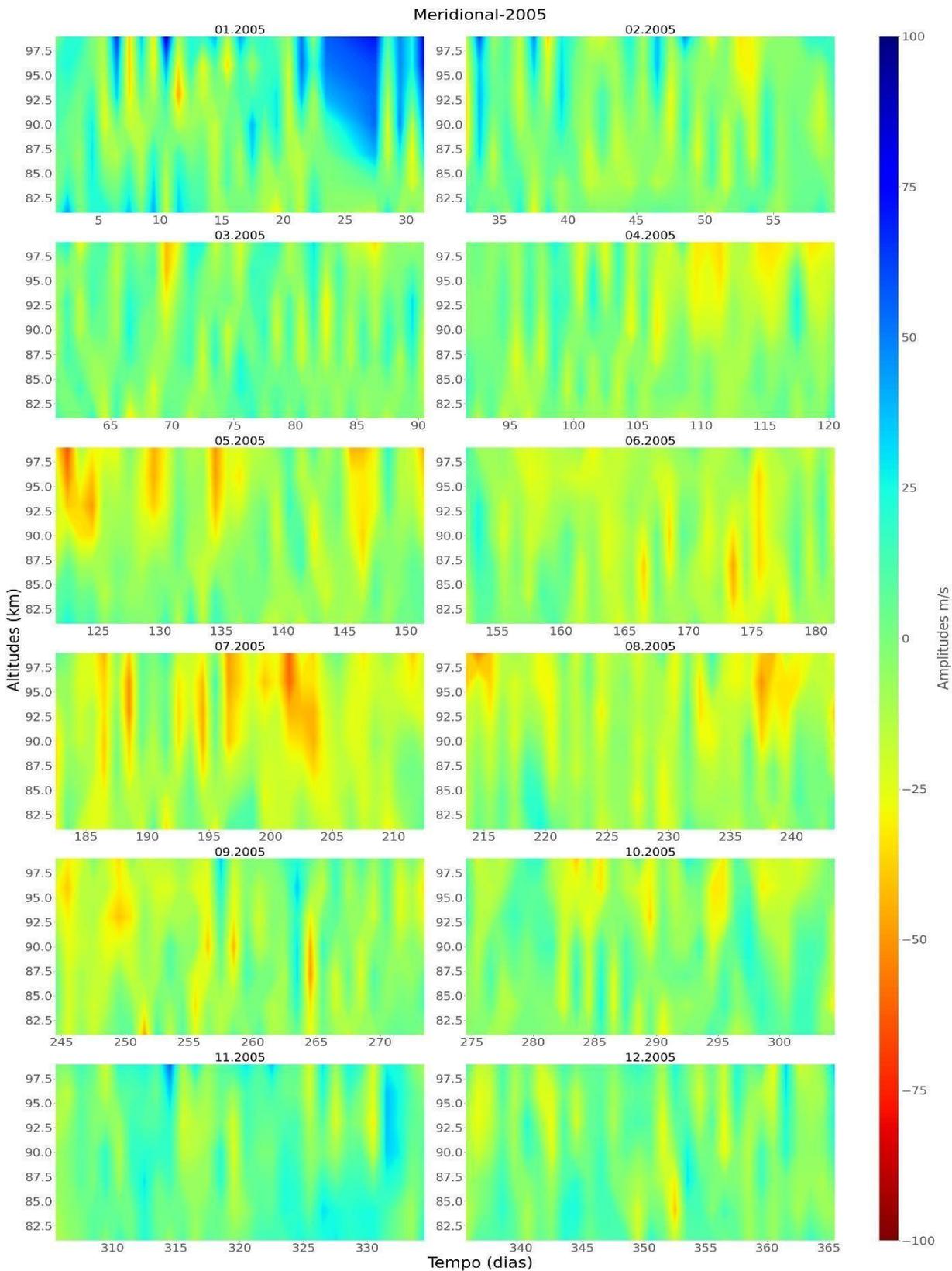
Através dos dados obtidos pelo radar meteórico SKiYMET instalado no OLAP, entre o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2006, entre as altitudes de 80 a 100 km, analisamos o comportamento dos ventos médios, além disso, comparamos com o vento fornecido pelo TIDI.

Os ventos médios foram calculados para o intervalo entre 80 e 100 km de altitude, foram montadas séries temporais para altitudes com 4 km de espessura, com sobreposição de 0,5 km na base e na parte superior, centradas em 81, 84, 87, 90, 93, 96 e 99 km. Os resultados dos ventos médios serão comparados com os resultados dos ventos neutros do TIDI.

4.1 Ventos Médios Meridionais Registrados Pelo Radar SKiYMET Localizado em São João do Cariri – PB em 2005 e 2006.

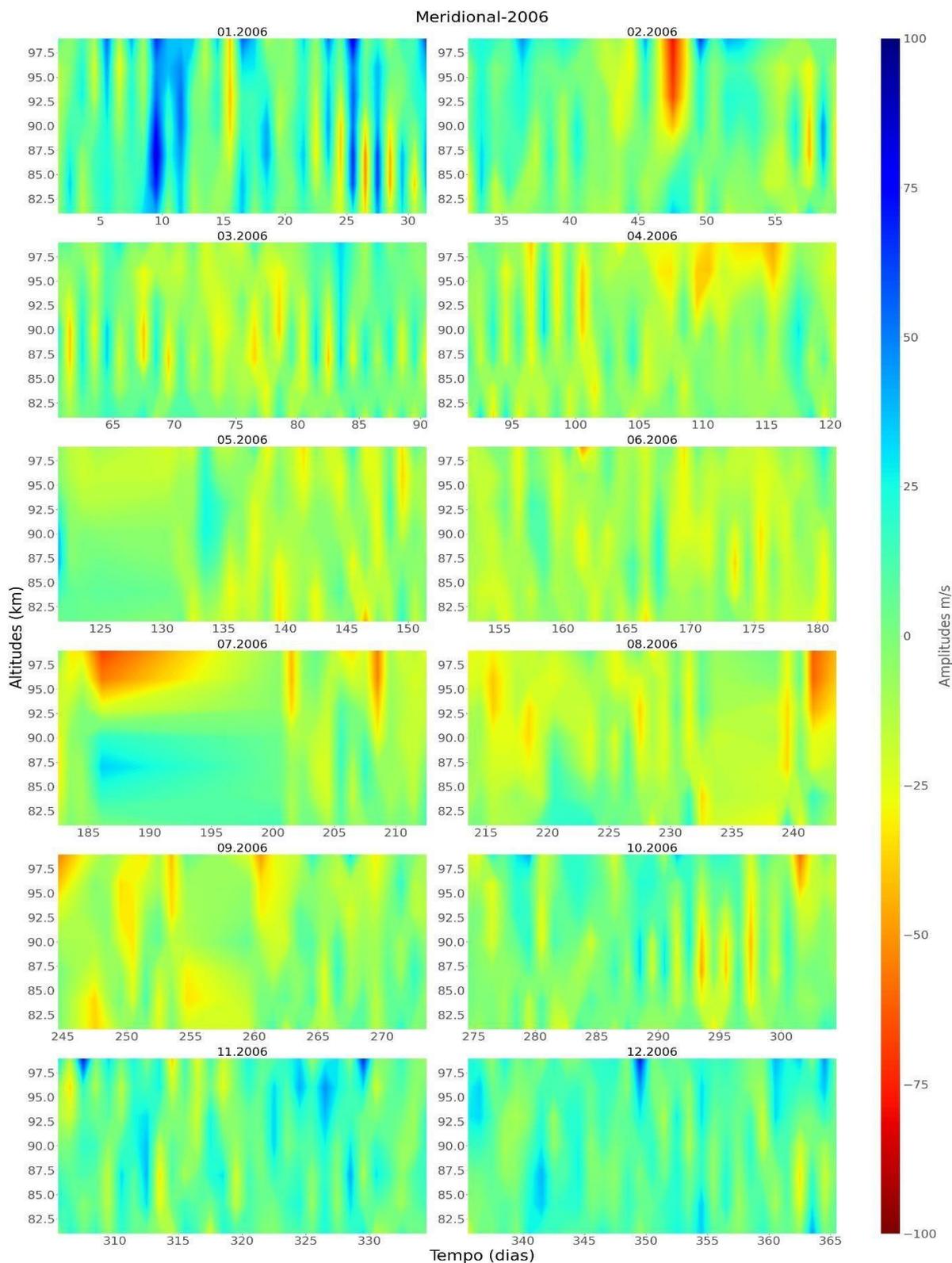
A Figura 17 representa os ventos médios meridionais observados em São João do Cariri- PB, no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2005. A Figura 18 representa o vento médio meridional observado em São João do Cariri – PB entre janeiro a dezembro de 2006. Os valores negativos indicam ventos seguindo para o sul e os valores positivos ventos seguindo para o norte.

FIGURA 17: Ventos meridionais observados em São João do Cariri-PB no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2005. Os ventos (-) sopram para o sul e os ventos (+) para o norte.



Fonte: Acervo do autor.

FIGURA 18: Ventos meridionais observados em São João do Cariri-PB no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2006. Os ventos (-) sopram para o sul e os ventos (+) para o norte.



Fonte: Acervo do autor.

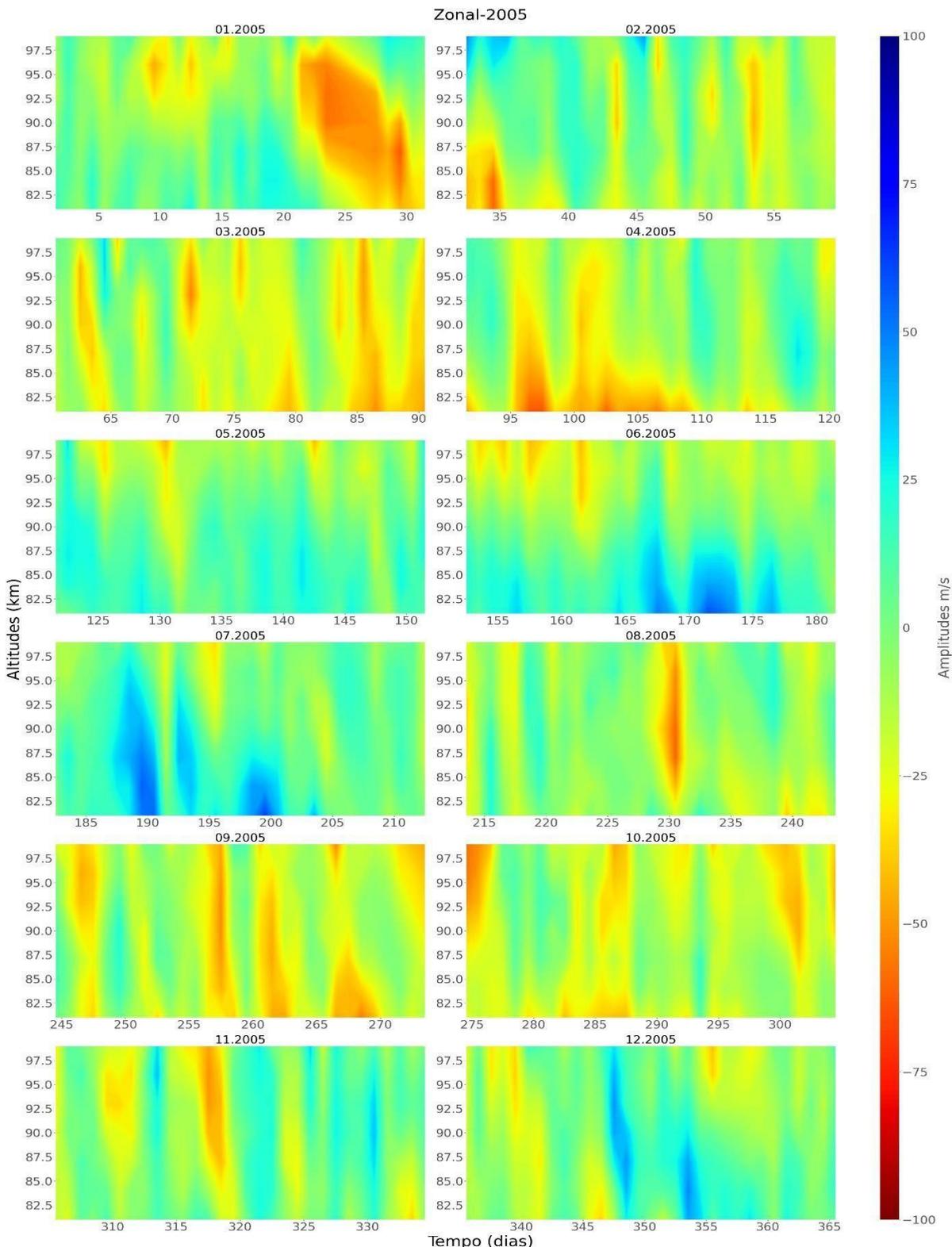
Entre o início de janeiro até o final de março de 2005 e entre o início de outubro de 2005 até o final de fevereiro de 2006 o vento médio está para o norte, com valores máximos de 9 m/s^{-1} em 81 km e de 12 m/s^{-1} em 87 km, respectivamente. Nos demais meses os ventos médios dirigem-se para o sul com intensidades que variam de 3 a 30 m/s^{-1} .

O regime dos ventos de São João do Cariri para a componente meridional está de acordo com os ventos observados por Montenegro (2007) em São João do Cariri – PB. Os dados observados dos ventos médios meridionais também apresentam característica com ventos inicialmente para o sul entre março e final de setembro mudando a direção do vento para o norte do início de outubro até a metade de março. E Tokumoto (2002) em Cachoeira Paulista ($22,7^{\circ}\text{S}$; 45°O), que também apresenta um regime semelhante dos ventos, diferindo apenas na intensidade dos ventos médios que foram mais intensos no Cariri. De acordo com Tokumoto (2002), o valor máximo do vento médio meridional em Cachoeira Paulista nos ventos tanto para o sul quanto para o norte é de 10 m/s^{-1} , enquanto, no Cariri os ventos médios meridionais mostraram um máximo do vento em direção para o sul de 30 m/s^{-1} e para o norte de 12 m/s^{-1} . É possível observar um decréscimo da intensidade do vento com a altitude tanto nos dados observados quanto no modelo.

4.2 Ventos Médios Zonais Registrados Pelo Radar SKYMET Localizado em São João do Cariri – PB em 2005 e 2006.

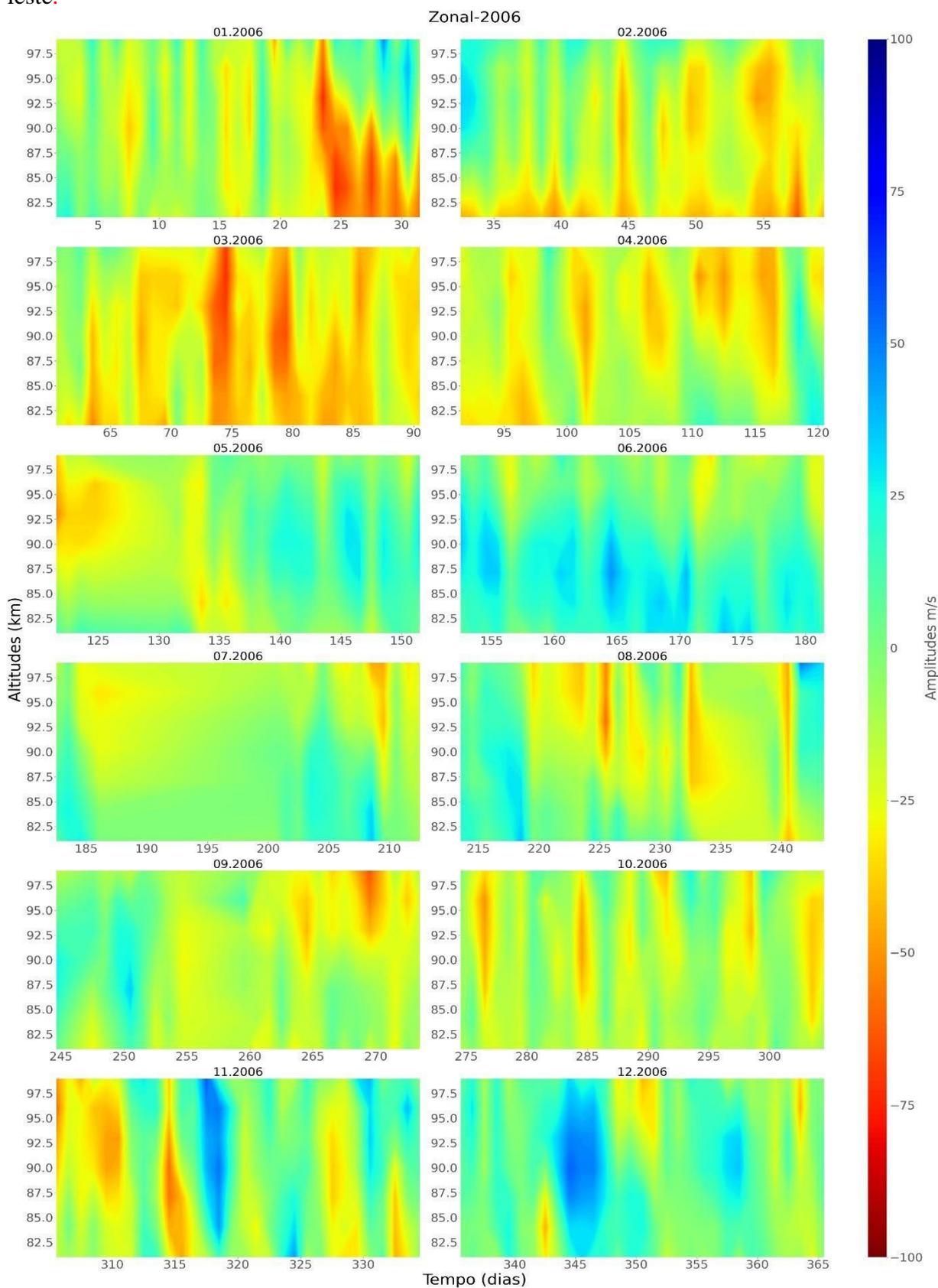
A Figura 19 representa os ventos médios zonais observados em São João do Cariri - PB, no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2005. A Figura 20 representa o vento médio zonal em São João do Cariri – PB, no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2006. Os valores negativos indicam ventos seguindo para o oeste e os valores positivos ventos seguindo para o leste.

FIGURA 19: Ventos zonais observados em São João do Cariri-PB no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2005. Os ventos (-) sopram para o oeste e os ventos (+) para o leste.



Fonte: Acervo do autor.

FIGURA 20: Ventos zonais observados em São João do Cariri-PB no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2006. Os ventos (-) sopram para o oeste e os ventos (+) para o leste.



Fonte: Acervo do autor.

Estes ventos médios se dirigem para leste até início de janeiro de 2005, com intensidade máxima de 9m/s^{-1} em 90 km, entre maio e final de julho de 2005, com máximo de 24m/s^{-1} em 81 km, o mesmo pode ser observado em novembro de 2005 com o máximo de 3m/s^{-1} e entre maio e final de julho de 2006 com máximos valores de 27m/s^{-1} , em 87 km. De forma geral, os ventos zonais são basicamente para oeste, exceto nos solstícios, e os valores decrescem com a altitude. Uma característica importante é que, em geral, os ventos médios zonais apresentam valores mais intensos do que os ventos médios meridionais na região da alta mesosfera, com um ciclo anual que descreve um escoamento com direção do pólo de verão para o de inverno. Tokumoto (2002) mostrou uma variação semi-anual no vento médio zonal em Cachoeira Paulista, entre 80 e 90 km de altitude e, acima de 90 km, apresenta uma característica anual.

4.3 Ventos Médios Meridionais obtidos do TIDI a bordo do satélite TIMED no período compreendido entre janeiro 2005 a dezembro de 2006.

A Figura 21 representa os ventos médios meridionais obtidos do TIDI a bordo do satélite no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2005. A Figura 22 representa os ventos médios meridionais obtidos do TIDI a bordo do satélite no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2006.

O vento médio meridional foi calculado usando todos os dias dentro dos meses em função da altitude. Pode-se observar que os ventos meridionais variam aproximadamente entre -120 a 100m/s , onde as grandes amplitudes foram observadas nos meses de verão. É nítida a presença de oscilação diurna propagando-se com a diminuição da altitude na maioria dos meses.

As oscilações semidiurnas não estão claras, pois há poucos dados ao longo do dia. Essa variabilidade anual das marés diurnas e semidiurnas são bem conhecidas na região equatorial (por exemplo, Lima e outros, 2007). Como o vento calculado pelos dados do radar de meteoros é calculado em média no tamanho da caixa de tempo de uma hora, nenhum tempo curto ($< 2\text{h}$) 100 oscilações foi observado claramente.

FIGURA 21: Ventos meridionais obtidos do TIDI a bordo do Satélite TIMED no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2005.

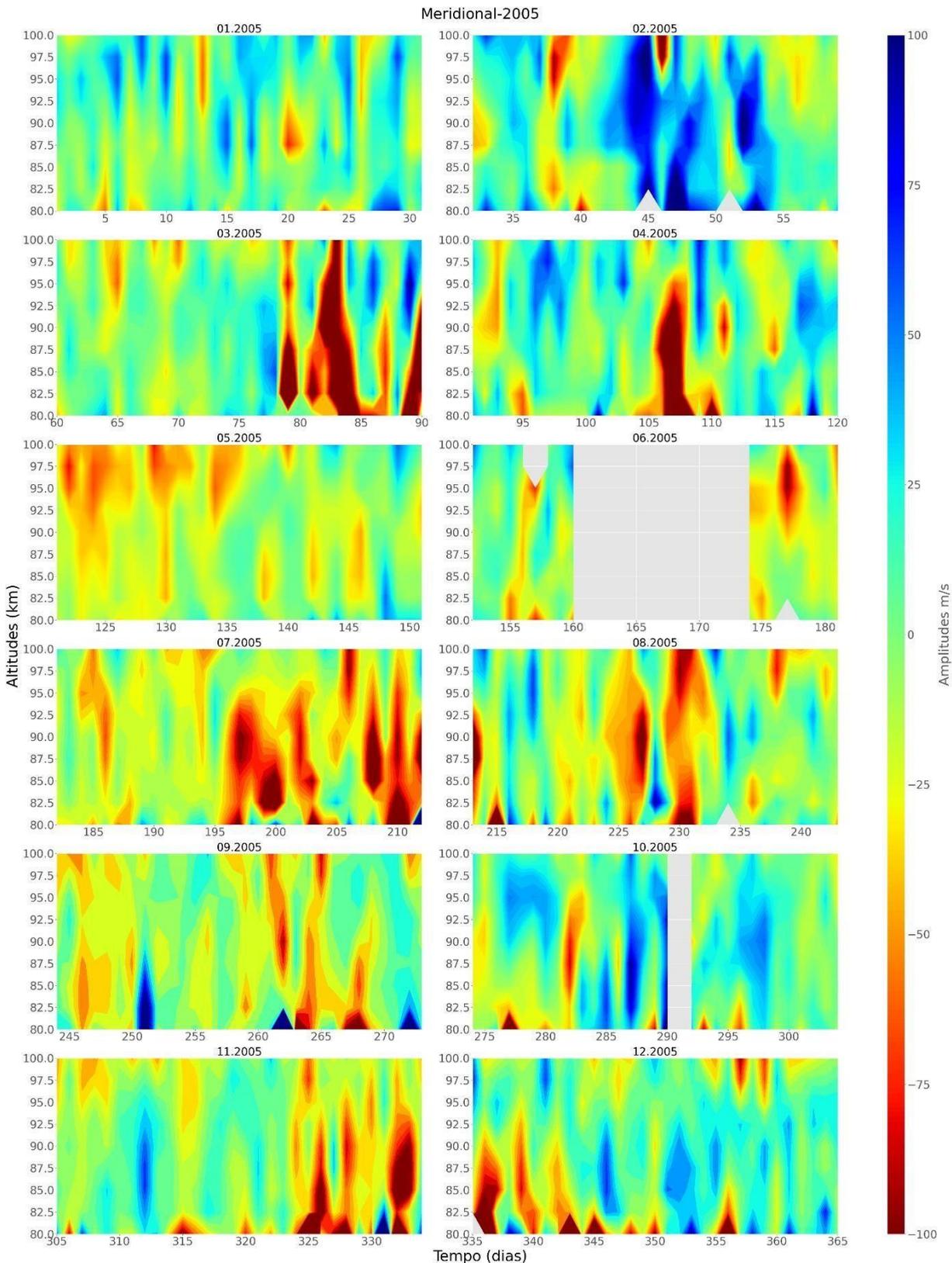
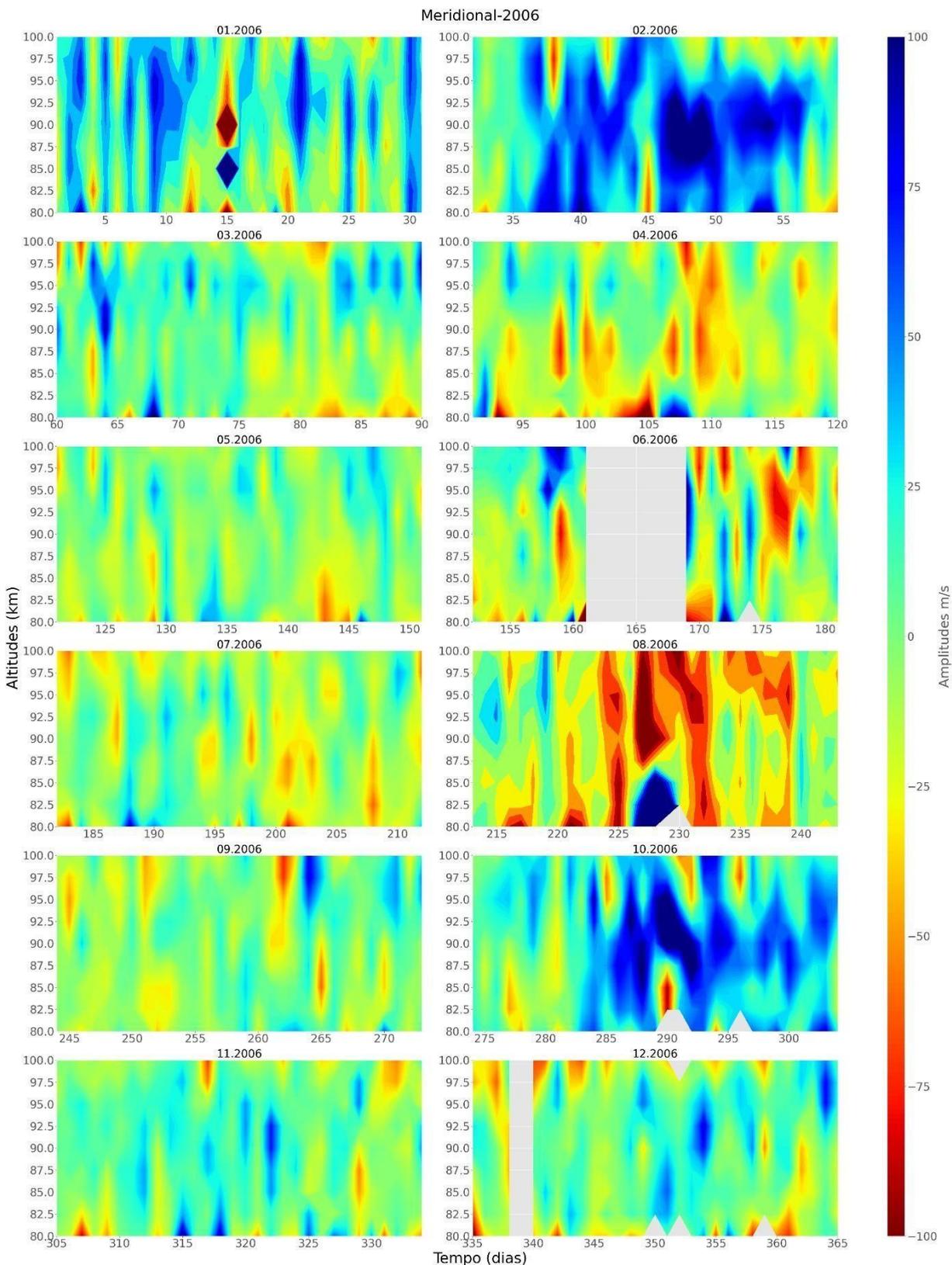


FIGURA 22: Ventos meridionais obtidos do TIDI a bordo do Satélite TIMED no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2006.



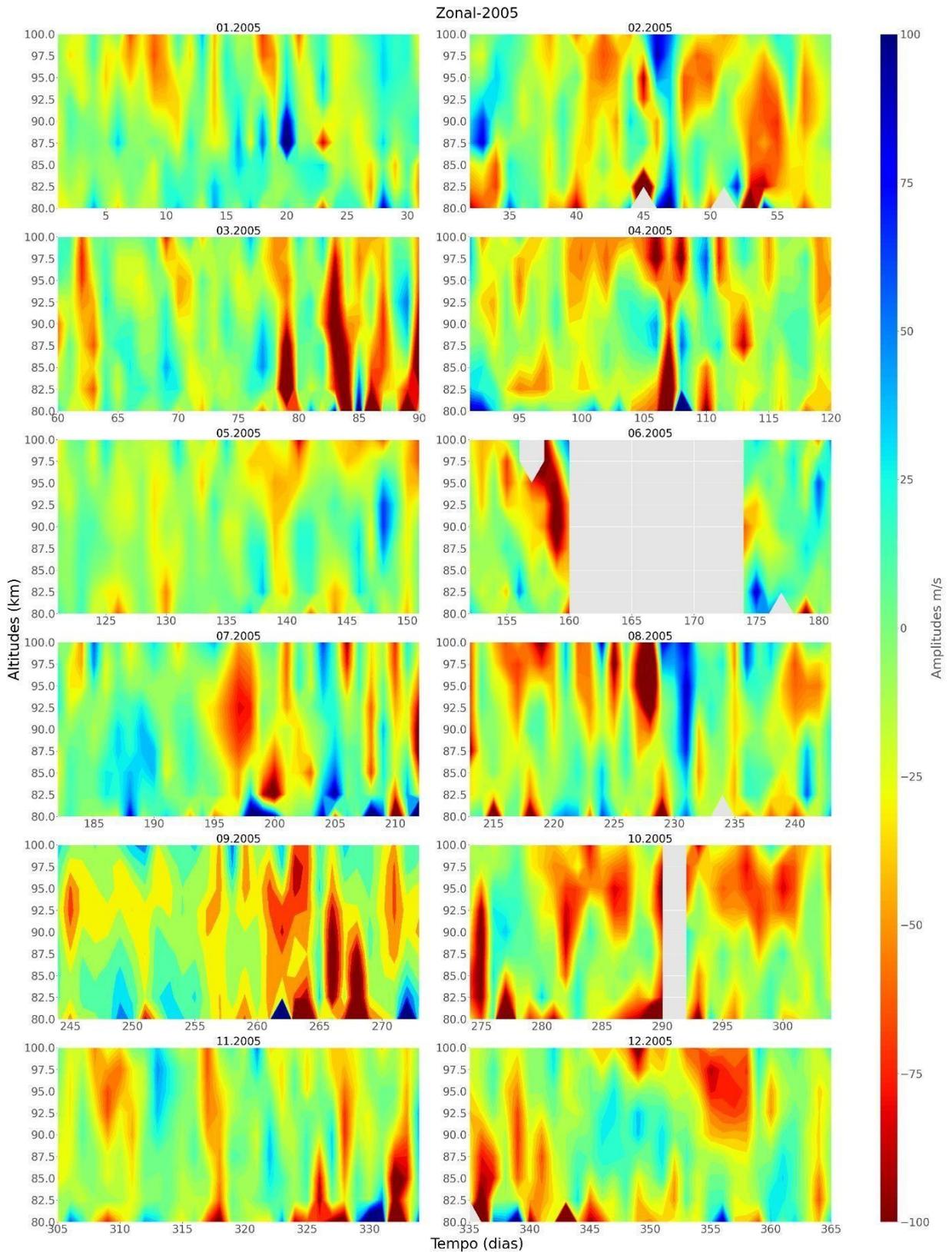
Fonte: Acervo do autor.

4.4 Ventos Médios Zonais obtidos do TIDI a bordo do satélite TIMED no período compreendido entre janeiro 2005 a dezembro de 2006.

A Figura 23 representa os ventos médios zonais obtidos do TIDI a bordo do satélite no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2005. A Figura 24 representa os ventos médios zonais obtidos do TIDI a bordo do satélite no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2006.

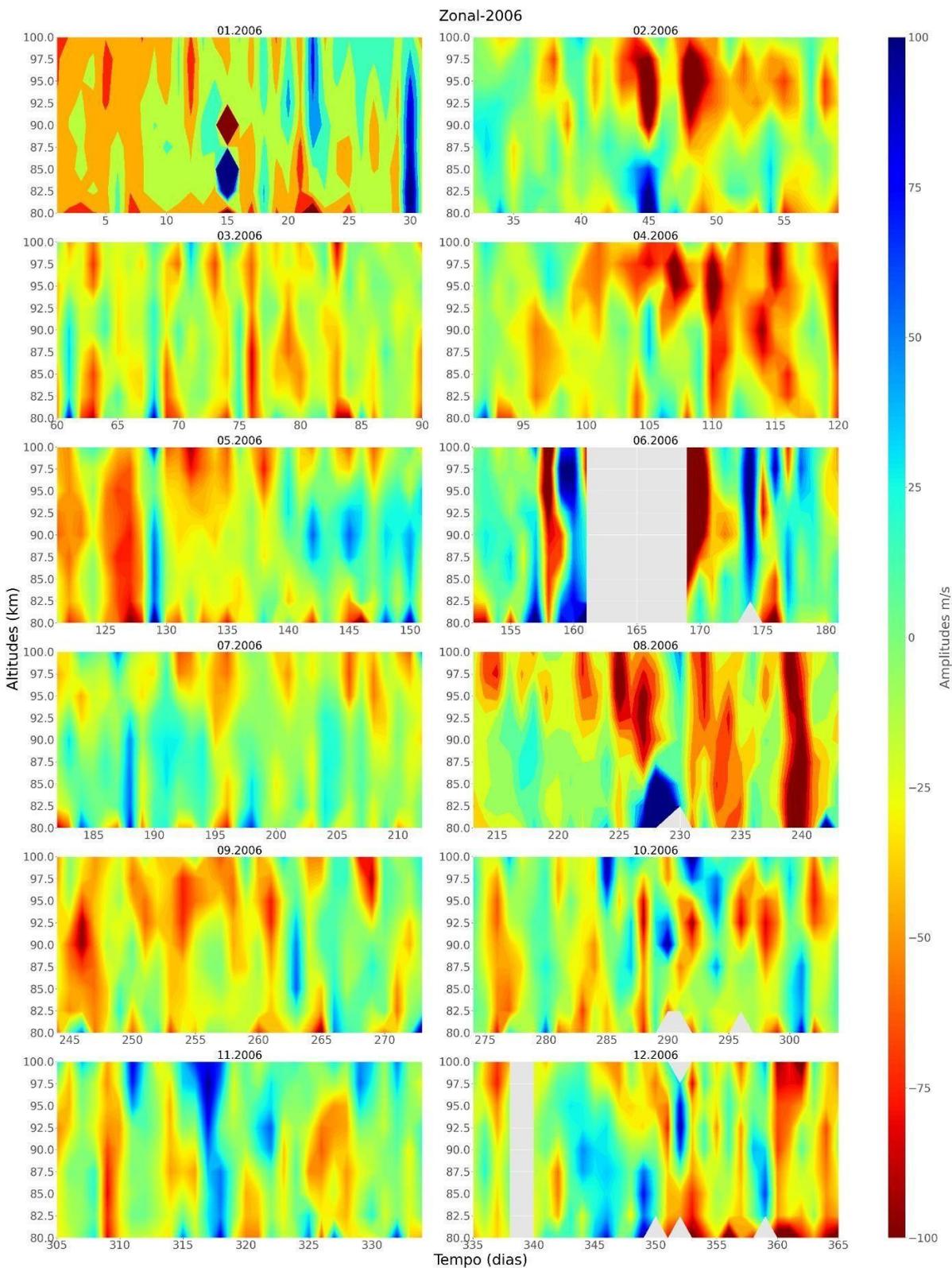
Os ventos zonais têm amplitudes menores que os meridionais. Da mesma forma, a oscilação diurna é mais forte durante o verão, enquanto as semidiurnas aparecem esporadicamente para algumas altitudes.

FIGURA 23: Ventos zonais obtidos do TIDI a bordo do Satélite TIMED no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2005.



Fonte: Acervo do autor.

FIGURA 24: Ventos zonais obtidos do TIDI a bordo do Satélite TIMED no período compreendido entre janeiro a dezembro de 2006.

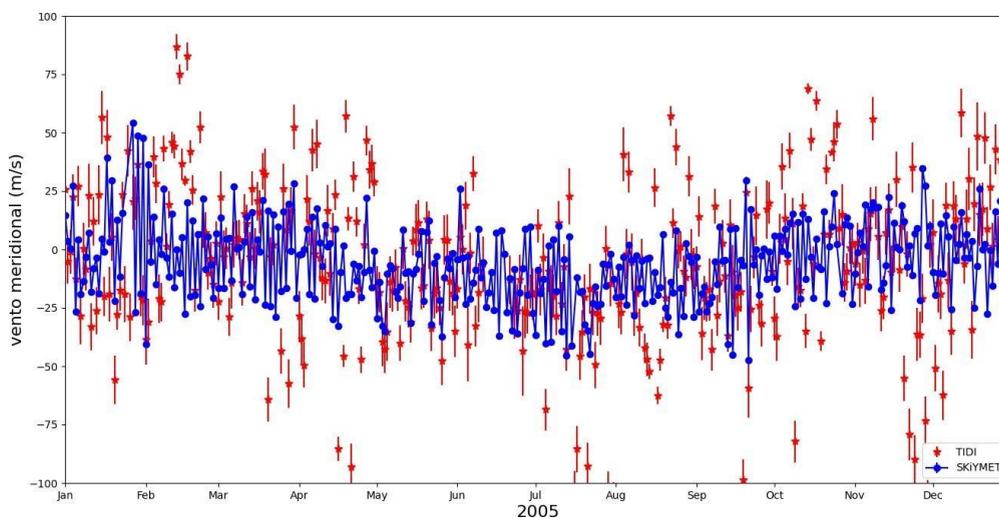


Fonte: Acervo do autor

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

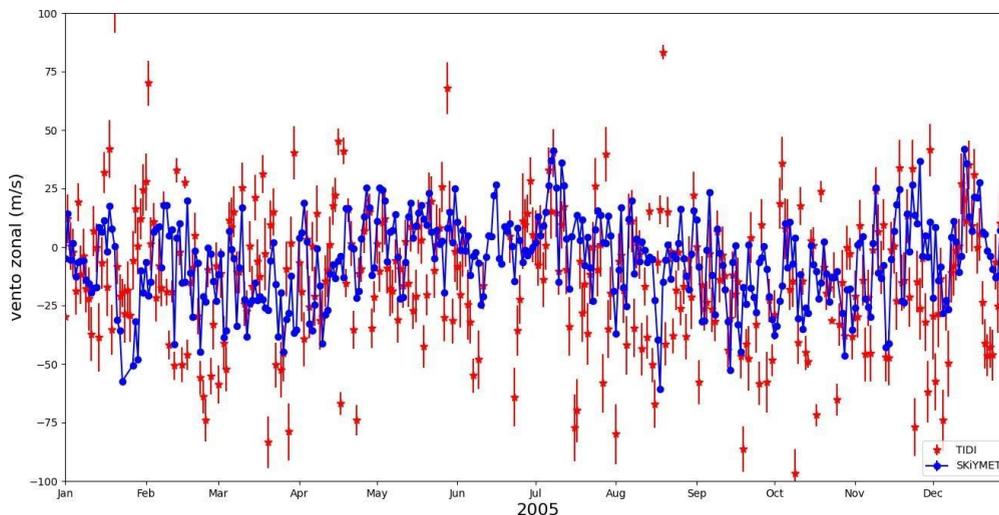
As Figuras 25, 26, 27 e 28 mostram a evolução temporal do vento meridional e zonal para o Radar SKIYMET (azul) e do TIDI (vermelho). Os ventos médios do radar de meteoros foram obtidos para altitude de 90 km as 12:00 UT, enquanto os ventos do TIDI foram medidos para o horário em que o satélite cruzou a janela sobre São João do Cariri – PB. As linhas contínuas representam as medições do radar e do TIDI de 2005 e 2006.

Figura 25. Evolução temporal do vento meridional calculado a 90 km para o Radar SKIYMET (azul) e do TIDI (vermelho). As linhas contínuas representam as medições do radar e do TIDI entre janeiro a dezembro de 2005.



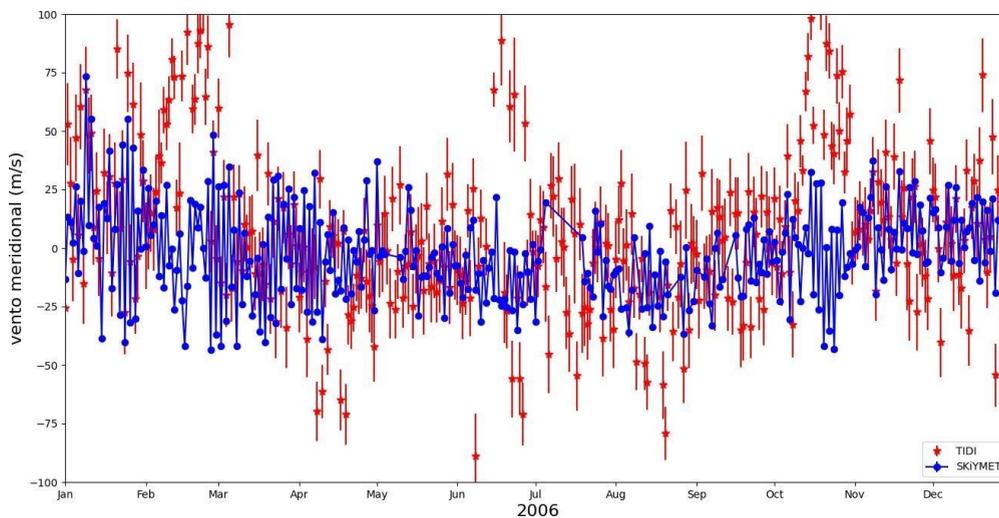
Fonte: Acervo do autor

Figura 26. Evolução temporal do vento zonal do Radar SKIYMET (azul) e do TIDI (vermelho). As linhas contínuas representam as medições do radar e do TIDI entre janeiro a dezembro de 2005.



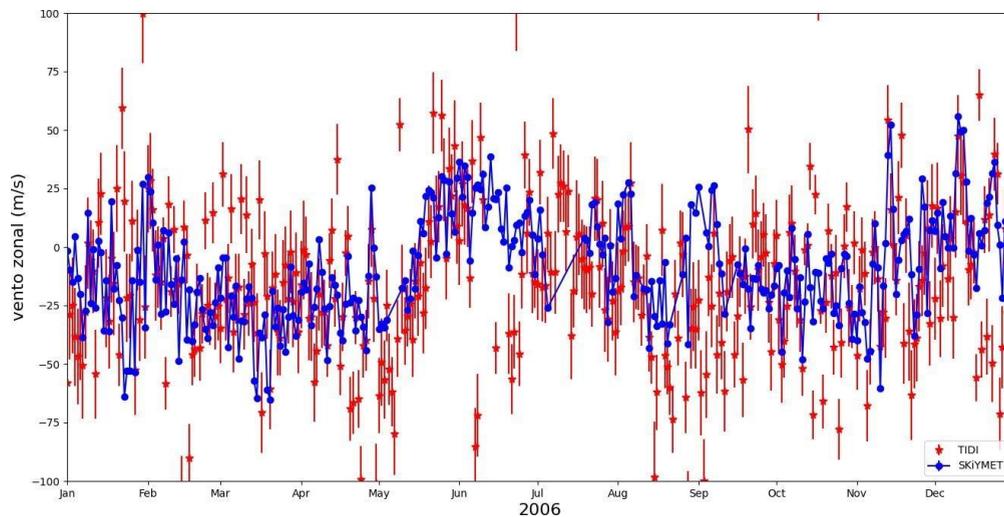
Fonte: Acervo do autor.

Figura 27. Evolução temporal do vento meridional do Radar SKIYMET (azul) e do TIDI (vermelho). As linhas contínuas representam as medições do radar e do TIDI entre janeiro a dezembro de 2006



Fonte: Acervo do autor.

Figura 28. Evolução temporal do vento zonal do Radar SKIYMET (azul) e do TIDI (vermelho). As linhas contínuas representam as medições do radar e do TIDI entre janeiro a dezembro de 2006.



.Fonte: Acervo do autor.

O cálculo dos ventos médios do radar de meteoros usa o tamanho da caixa de uma hora computando todos os meteoros dentro de seu campo de visão. Por outro lado, o TIDI estima o vento do airglow dentro de $2,5^\circ$ horizontalmente durante uma única sondagem (Killeen et al., 2006). Portanto, os perfis de vento dos dois instrumentos podem ser muito diferentes. Outra coisa que chama a atenção é que as medidas TIDI são bem diferentes, mesmo dentro de um intervalo de tempo de 4 minutos. É bem conhecido que o vento na MLT pode mudar rapidamente (por exemplo, Clemesha et al., 1981; Kishore Kumar et al., 2018), principalmente, como resposta à passagem de ondas de gravidade nesta região (Baumgarten et al., 2018). No entanto, como mostrou John e outros. (2011), se um intervalo maior como 2-3 h for levado em consideração, os perfis ficarão próximos o suficiente.

Os resultados demonstram que as medições de satélite são mais confiáveis para investigar a propagação de ondas de gravidade e sua interação com a atmosfera de fundo. Por exemplo, ventos medidos por radar têm sido usados para avaliar a condição de fundo da atmosfera na criação de dutos Doppler na MLT (Fechine et al., 2009; Bageston et al., 2011; Carvalho et al., 2017, e.g.), que são condições necessárias para a propagação de ondas canalizadas na MLT (Dewan e Picard, 1998). De fato, o uso do vento TIDI para estudos de caso das frentes da mesosfera poderia produzir mais resultados confiáveis. Outra contribuição importante para os estudos de ondas de gravidade canalizadas é a interação delas com a atmosfera de fundo que pode produzir instabilidades convectivas ou dinâmicas (Fritts e Rastogi, 1985).

A maioria dos meses apresentou a oscilação diurna, porém estruturas de curto período

são mais evidentes para os ventos meridionais TIDI. Talvez a presença das pequenas oscilações ao longo do dia possa mascarar a propagação vertical das fases diurnas da maré. O pequeno número de sondagens do satélite dentro da janela escolhida pode não ser suficiente para calcular a média da variação de tempo curto. John e outros. (2011) compararam o vento dentro do vento temporal de três meses e atingiram bons acordos sobre Thumba (8,5° N, 77° E), que também é a região equatorial.

A componente zonal, durante quase todos os meses, as amplitudes dos ventos zonais são maiores que os do radar de meteoros. Estruturas diurnas são dominantes, mas estruturas de períodos mais curtos aparecem praticamente durante todo o ano. Embora, o vento zonal médio calculado a partir do TIDI seja favorável às medições do radar de meteoros, existem várias estruturas curtas que podem estar associadas à oscilação de curto período na MLT como gravidade ondas, por exemplo.

Su et al. (2014) fez uma comparação desses dois tipos de medições durante a chuva de meteoros Leonidas em 2012 e observaram concordância razoável, mas estruturas de tempo curto também foram apresentadas no vento TIDI. As oscilações quase bienal (QBO), semestral e anual têm sido apontadas como responsáveis pela variabilidade de longo prazo da migração diurna da maré (por exemplo, Xu et al., 2009).

O vento meridional do radar meteórico apresenta uma oscilação anual com máximo durante o verão e uma variação intrasazonal forte oscilação de janeiro a maio. Mesmo o vento zonal do TIDI apresentando pontos de dispersão ao longo do ano, os pontos mostra o comportamento geral das medições do radar, mas para a componente zonal, que tem uma oscilação semestral mais acentuada e outras oscilações curtas ao longo do ano. Novamente, os ventos TIDI seguem os ventos do radar de meteoros.

Xu et al. (2009) comparou a amplitude da maré diurna calculada a partir do vento recuperado por essas duas técnicas e os resultados mostraram boa concordância também. Isso sugere que, para estudos de observação de longo período, essas medições convergem.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÃO

Este trabalho é o resultado das observações na região da MLT através de dados de ventos obtidos por um radar meteorológico instalado em São João do Cariri (7,4°S; 36,5°O) e dados fornecidos pelo instrumento TIDI a bordo do Satélite TIMED. O período de análise foi entre janeiro de 2005 e dezembro de 2006. Foi observado o comportamento dos ventos médios, componente zonal e meridional e as respostas das duas técnicas.

Os ventos médios meridionais apresentaram comportamento anual ao longo de todas as altitudes, por outro lado, os ventos médios zonais apresentaram uma oscilação semianual predominante em todas as altitudes com um fluxo na maior parte do tempo na direção leste-oeste. Outra característica observada é que os ventos zonais se apresentaram bem mais intensos que os ventos meridionais.

Medições quase simultâneas dos perfis verticais do vento zonal e meridional podem ser substancialmente diferentes comparando as medições do TIDI e do radar meteorológico. Isso acontece porque o TIDI mede um vento instantâneo na MLT, enquanto que os dados do radar meteorológico foram utilizados dentro intervalo de uma hora para calcular o vento médio.

Olhando para o comportamento diário dos ventos zonais e meridionais calculados usando as medidas do TIDI para cada mês, há acordos qualitativos com os cálculos de vento do radar meteorológico. No entanto, os cálculos do radar meteorológico para cada mês são comparados suavemente com os do TIDI. Os comportamentos aproximam-se; ambas as medições respondem satisfatoriamente às oscilações de longo período (sazonal, semestral e anual) e poderia ser comparável a estudos de dinâmica de longo prazo da MLT.

As medidas de ventos também evidenciam a importância do uso do radar meteorológico na coleta contínua dos dados. Este instrumento permite, de forma contínua e sistemática, durante 24 horas, por dia, a aquisição em tempo real de dados. Estes dados, em conjunto com os dados coletados por satélites, e outros instrumentos de medidas de ventos, possibilitam a elaboração do mapeamento climatológico das regiões mais altas da atmosfera.

REFERÊNCIAS

- ALVES, E. O., **Identificação de Ondas Atmosféricas ultra-rápidas de Kelvin nos Ventos Meteoricos sobre São João do Cariri-PB (7,4°S; 36,5°O)**. 2007. 94p. Dissertação de Mestrado em Meteorologia – UFCG, Campina Grande – PB, 2007.
- ANDREWS, D. G.; HOLTON, J. R.; LEOVY, C. B. **Middle atmosphere dynamics**. Orlando: Academic press, inc, 1987. v. 489p.
- Batista, P. P.; Clemesha, B. R.; Tokumoto, A. S.; Lima, L. M. Structure of the mean winds and Tides in the meteor region over Cachoeira Paulista, Brazil (22.7oS, 45oW) and its comparison with models. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, n. 6-9, p. 623 – 636, doi:10.1016/j.jastp.2004.01.014, 2004.
- Becker, E.: Dynamical Control of the Middle Atmosphere , **Space Science Reviews**,168, 283-314, <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9841-5>, 2012.
- BEVIS, M.; BUSINGER, S.; HERRING, T. A.; ROCKEN, C.; ANTHES, R. A.;WARE, R.H. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D14, p. 15787-15801, doi:10.1029/92JD01517, 1992.
- Brasseur, G.; Solomon, S. **Aeronomy of the middle atmosphere**. Dordrecht, Holanda: Ridel Publishing, 1986.
- BURITI, R. A. **Estudo de parâmetros de ondas de gravidade por medidas simultâneas de radar MU e fotômetro em Shigaraki (35°N, 136°E) Japão**. 231p. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos CamposSP, 1997.
- Chang, LC , Yue, J. , Wang, W. , Wu, Q. , & Meier, R. (2014). Variabilidade relacionada a ondas de quase dois dias na dinâmica de fundo e composição da mesosfera/termosfera e da ionosfera . **Journal of Geophysical Research: Space Physics** , **119** (6), 4786 – 4804 .<https://doi.org/10.1002/2014ja019936>
- CÔRREA, J. A. de S., **Estudo de meteoros e investigações de seus efeitos na ionosfera com dados do radar SKiYMET e GPS**, 151p. Tese de Doutorado em Astrofísica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, 2003.
- Eckermann, S. D.; Vincent, R. A. 1st observations of intraseasonal oscillations in the equatorial mesosphere and lower thermosphere. **Geophys. Res. Lett.**, v. 21, n. p. 265– 268, doi:10.1029/93GL02835, 1994.
- Eckermann, S.D.; Rajopadhyaya, D.K.; Vincent, R.A. Intraseasonal wind variability in the equatorial mesosphere and lower thermosphere: long term observations from the central Pacific. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 59, no. 6, p. 603- 627, 1997.
- Elford, W. G., and D. S. Robertson (1953), Measurements of winds in the upper atmosphere by through drifting meteor trails II, *J. Atmos* Fleming, E.L.; Chandra, S.; Burrage, M.D.; Skinner, W.R.; Hays, P.H.; Solheim, B.H.; Shepherd, G.G. Climatological mean wind

Observations from the UARS high – resolution Doppler imager and wind imaging interferometer: Comparison with current reference models. **Journal of Geophysical Research**, v 101, no. D6, p. 10455-10473, apr, 1996.

Fritts, D. C.; Isler, J. R. Mean motions and tidal and two – day structure and variability the mesosphere and lower thermosphere over Hawaii. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 51, n. 14, p. 2145–2164, 1994.

Fuller-Rowell, T. J. (1995), **The dynamics of the lower thermosphere, in Upper Mesosphere and Lower Thermosphere: A Review of Experiment and Theory**, edited by R. M. Johnson and T. L. Killeen, pp. 23–36, AGU, Washington, D. C.

Gu, S.-Y. , Li, T. , Dou, X. , Wu, Q. , Mlynchzak, MG , & Russell, JM (2013). Observações de onda de quase dois dias por TIMED/SABRE e TIMED/TIDI . *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , **118** (4), 1624 – 1639 <https://doi.org/10.1002/jgrd.50191>.

Gu, S.-Y. , Teng, C.-K.-M. , Li, N. , Jia, M. , Li, G. , Xie, H. , et al. (2021). Análise multivariada das respostas ionosféricas às ondas planetárias durante o evento Antártico SSW de 2019 . *Journal of Geophysical Research: Space Physics* , **126** (3), e28588. <https://doi.org/10.1029/2020JA028588>

Hibbins, R. E., M. P. Freeman, S. E. Milan, and J. M. Ruohoniemi (2011), Winds and tides in the mid-latitude Southern Hemisphere upper mesosphere recorded with the Falkland Islands Super DARN radar, **Ann. Geophys.**, **29**, 1985–1996.

Hocking, W.K.; Fuller, B.; Vandeppeer, B. Real time determinations of meteor related parameters utilizing modern digital technology. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 63, no. 2-3, p. 155-169, 2001

Holton, J.R. **The dynamical meteorology of the stratosphere and mesosphere**, New York: Meteorological Monographs, v. 15, n. 37, 216p., 1975.

Holton, JR: A geração de ondas planetárias mesosféricas por quebra de onda gravitacional zonalmente assimétrica, **Journal of the Atmospheric Sciences**, 41, 3427- 3430, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)041<3427:tgompw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1984)041<3427:tgompw>2.0.co;2), 1984.

Houghton, J.T. The stratosphere and mesosphere. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 104, p. 1-29, 1978.

Jacobi, C., Portnyagin, Y., Solovjova, T., Hoffmann, P., Singer, W., Fahrutdinova, A., Ishmuratov, R., Beard, A., Mitchell, N., Muller, H., Schminder, R., Kürschner, D., Manson, A., e Meek, C.: Climatologia da maré semidiurna a 52–56°N a partir da medição do vento por radar terrestre surements 1985-1995, **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 61, 975-991, [https://doi.org/10.1016/s1364-6826\(99\)00065-6](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(99)00065-6), 1999.

John, S. R., Karanam Kishore Kumar, Subrahmanyam, K. V., Manju, G., and Wu, Q.: Medições de radar de meteoros de ventos MLT perto da região equatorial de jato de eletro sobre Thumba (8,5° N, 77° E): comparação com observações TIDI, **Ann. Geophys.**, 29, 1209–1214, <https://doi.org/10.5194/angeo-29-1209-2011>, 2011.

Killeen, TL , Skinner, WR , Johnson, RM , Edmonson, CJ , Wu, Q. , Niciejewski, RJ , et al. (1999). Interferômetro Doppler temporizado (TIDI) . Em *Técnicas espectroscópicas ópticas e instrumentação para pesquisa atmosférica e espacial III* (Vol. **3756** , pp. 289 – 301).

Killeen, T. L., Skinner, W. R., Johnson, R. M., Edmonson, C. J., Wu, Q., Niciejewski, R. J., Grassl, H. J., Gell, D. A., Hansen, P. E., Harvey, J. D., and Kafkalidis, J. F.: **TIMED Doppler Interferometer (TIDI)**, Proc. SPIE, 3756, 289–301, 1999.

KILLEEN, T.L. TIMED Doppler interferometer: Overview and recent results. **Jornal of Geophysical Researd**, vol 111, P 1 e 19, september, 2006.

Killeen, TL , Wu, Q. , Solomon, SC , Ortland, DA , Skinner, WR , Niciejewski, RJ , & Gell, DA (2006). Interferômetro TIMED Doppler: Visão geral e resultados recentes . *Journal of Geophysical Research: Space Physics* , **111** (A10), A10S01. <https://doi.org/10.1029/2005JA011484>

Khattatov, B. V., M. A. Geller, V. A. Yudin e P. B. Hays (1997), Maré migratória diurna vista pelo Doppler imageador de alta resolução/UARS: 2. Velocidades zonais e verticais globais médias mensais, pressão, temperatura e dissipação inferida, *J. Geophys. Res.*, 102, 4423–4436, doi:[10.1029/96JD03654](https://doi.org/10.1029/96JD03654).

Kuong, R. M., Y. H. Chu, S. Y. Su e C. L. Su (2003), The Chung-Li VHF radar as a meteor radar: System phase bias estimation and experimental results, **Terr. Sci.**, 14, 113– 132.

Li, G., B. Ning, L. Hu, Y.-H. Chu, I. M. Reid, e B. K. Dolman (2012), A comparison of lower thermospheric winds derived from range spread and specular meteor trail echoes, *J. Geophys. Res.*, 117, A03310, doi:[10.1029/2011JA016847](https://doi.org/10.1029/2011JA016847).

Lima, L. M.; Batista, P. P.; Clemesha, B. R.; Takahashi, H. The 6.5-day Oscillations Observed in Meteor Winds Over Cachoeira Paulista (22.7 S). **Advances in Space Research**, v. 36, n. 11, p. 2212-2217, doi:[10.1016/j.asr.2005.06.005](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.06.005), Dec. 2005.

Lima, L. M.; Batista, P. P.; Takahashi, H.; Clemesha, B. R. Quasi-two-day wave observed by meteor radar at 22.7° S. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, n. 6-9, p. 529-537, doi:[10.1016/j.jastp.2004.01.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.01.007), 2004.

LIMA, L. M.; ALVES, E. O.; MEDEIROS, A. F.; BURITI, R. A.; BATISTA, P. P.; Clemesha, R. B.; Takahashi, H. 3-4 day Kelvin waves observed in the MLT region at 7.4° S, Brazil. **Geofísica Internacional**, v. 47, n. 3, p. 153-160, 2006.

LIMA, L. M.; BATISTA, P. P.; TAKAHASHI, H.; CLEMESHA, B. R. Quasi-two- day wave observed by meteor radar at 22.7oS. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial. Physics**, v. 66, n. 6-9, p. 529-537, doi: [10.1016/j.jastp.2004.01.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.01.007), 2004.

Liu, HL , Marsh, DR , She, CY , Wu, Q. , & Xu, J. (2009). Equilíbrio do momento e forçamento das ondas de gravidade na mesosfera e na baixa termosfera . *Cartas de pesquisa geofísica* , **36** (7), L07805. <https://doi.org/10.1029/2009GL037252>

LIU, H.-L.; TALAAT, E. R.; ROBLE, R. G.; LIEBERMAN, R. S.; RIGGIN, D. M.; YEE, J., H. The 6.5-day wave and its seasonal variability in the middle and upper atmosphere. **J. Geophys. Res.**, v. 109, n. D21, p. D21112, doi:10.1029/2004JD004795, 2004/11/12

Liu, H.-L., and R. G. Roble (2005), Dynamical coupling of the stratosphere and mesosphere in the 2003 southern hemisphere major stratospheric sudden warming, **Geophys. Res. Lett.**, 32, L13804, doi:10.1029/2005GL022939

Manning, L.A.; Villard, O.G.; **Petersons, A.M. Meteoric echo study of upper atmosphere winds.** Proceedings of the I.R.E, v. 38, no. 8, p. 877-883, 1950.

MATSUNO, T., 1971. **A Dynamical Model of the Stratospheric Sudden Warming.** J. Atmos Sci, doi:10.1175/1520-0469(1971)028<1479:ADMOTS>2.0.CO;2. Murgatroyd, R. J. Dynamical modelling of the stratosphere and mesosphere. In: Fiocco, G. ed. **Mesospheric models and related experiments.** Dordrecht: D.Reidel Publishing Company, 1970, . p. 105-121.

MCLANDRESS, C. On the importance of gravity waves in the middle atmosphere and their parameterization in general circulation models. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 60, n. 14, p. 1357-1383, Sept. 1994.

MOTENEGRO, S. O. **Estrutura dos Ventos Médios e das Marés Atmosféricas na Região Meteorica sobre o Cariri Paraibano.** 2007. 132 p. Dissertação de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, 2007.

MULLER, H. G. Observations of 7-d planetary waves with MLT radars and the UARSHRDI instrument. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. 811, p. 1217-1228, May 1974.

Nakamura, T., T. Tsuda, M. Tsutsumi, K. Kita, T. Uehara, S. Kato e S. Fukao (1991), Meteor wind observations with the MU radar, *Radio Sci.*, **26**, 857–869, doi:[10.1029/91RS01164](https://doi.org/10.1029/91RS01164).

Niciejewski, R. , Wu, Q. , Skinner, W. , Gell, D. , Cooper, M. , Marshall, A. , et al. (2006). Interferômetro Doppler cronometrado no satélite de energia e dinâmica da mesosfera da ionosfera da termosfera: Visão geral do produto de dados . *Jornal de Pesquisa Geofísica* , **111** (A11), A11S90.<https://doi.org/10.1029/2005ja011513>.

Oberheide, J. , Wu, Q. , Killeen, TL , Hagan, ME , & Roble, RG (2006). Marés diurnas não migratórias de dados de vento TIMED Doppler Interferometer: climatologias mensais e variações sazonais . *Journal of Geophysical Research: Space Physics* , **111** (A10), A10S03.<https://doi.org/10.1029/2005JA011491>

Oppenheim, M. M., S. Arredondo e G. Sugar (2014), Ventos intensos e cisalhamentos na termosfera equatorial inferior medidos por radar meteoro não especular de alta resolução, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 2178– 2186, doi:[10.1002/2013JA019272](https://doi.org/10.1002/2013JA019272).

Pancheva, D., Mukhtarov, P., Mitchell, N. J., Andonov, B., Merzlyakov, E., Singer, W., Murayama, Y., Kawamura, S., Xiong, J., Wan, W., Hocking, W., Fritts, D., Riggan, D., Meek, C., & Manson, A., 2008. Latitudinal wave coupling of the stratosphere and mesosphere during the major stratospheric warming in 2003/2004. **Annales Geophysicae**, 26(3), 467–483. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-467->

2008.

PANCHEVA, D., Mukhtarov, P., Andonov, B., Mitchell, N. J., & Forbes, J. M., 2009. Planetary waves observed by TIMED/SABER in coupling the stratosphere– mesosphere– lower thermosphere during the winter of 2003/2004: Part 2—Altitude and latitude planetary wave structure. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 71(1), 75–87. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.09.027>

PEDATELLA, N. M., Chau, J. L., Schmidt, H., Goncharenko, L. P., Stolle, C., Hocke, K., Harvey, V. L., Funke, B., Siddiqui, T. A., 2018. **How Sudden Stratospheric Warming Affects the Whole Atmosphere**. EOS, 99. <https://doi.org/10.1029/2018EO092441>.

PAULINO, A. R. S. **Maré Lunar Observada com Radar Meteórico em Três Latitudes no Brasil**. 2010. 101 p. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2010.

Qian Wu¹, RD Gablehouse¹ RJ Niciejewski, SJ Franke TL Killeen, RM Johnson¹ DA Orland², WR Skinner, SC Salomão, 2004, **TIMED Doppler Interferometer (TIDI) Observações de Migração Diurna e Marés semi-diurnas**. Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação Universidade de Illinois, Urbana, IL 61802.

Rees, D., A. Aruliah, T. J. Fuller-Rowell, V. B. Wickwar, and R. J. Sica (1990), Winds in the upper mesosphere at mid-latitude: First results using an imaging Fabry-Perot interferometer, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1259– 1262, doi:[10.1029/GL017i009p01259](https://doi.org/10.1029/GL017i009p01259).

RODRIGUES, C. E. **Efeitos na Dinâmica da Mesosfera no Setor Brasileiro Durante Eventos de Aquecimento da Estratosfera Polar**. 2017. 66 p. Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologia Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2017.

Roettger, R., P. K. Rastogi, and R. F. Woodman (1979), Observações de radar VHF de alta resolução de estruturas turbulentas na mesosfera, *Geophys. Res. Lett.*, 6, 617– 620, doi:[10.1029/GL006i007p00617](https://doi.org/10.1029/GL006i007p00617).

SANTOS, P. V. **Medidas da Temperatura Mesosferica obtida por Radar Meteórico na Região de São João do Cariri – PB (7,4° S ; 36,5° W)**. 2010. 89 p. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

Salby, M.L.; Hartmann, D.L.; Bailey, P.L.; Gille, J.C. Evidence for equatorial Kelvin waves in Nimbus-7 LIMS. **Journal of Atmospheric Science**, v. 41, no. 2, p. 220-235, 1984.

SILVA, I. P. **Estudo da propagação de ondas de gravidade na Termosfera – Ionosfera**. 2012. 275 p. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.

Smith, A. K. Global Dynamics of the MLT. **Surveys in Geophysics**, doi: 10.1007/s10712-012-9196-9, 2012 TOKUMOTO, A. S. Vento na Região de 80 – 100 km de Altura sobre Cachoeira Paulista (22, 7° S; 45° W) Medidas por Radar Meteórico. 2002. 134 p. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2002.

Smith, AK, Garcia, RR, Marsh, DR, e Richter, JH: simulações WACCM da circulação média e transporte de espécies-traço na mesosfera de inverno, **Journal of Geophysical Research**, 116, <https://doi.org/10.1029/2011jd016083>, 2011.

Su, C.L., H.C.Chen, Y.H.Chu, M.Z.Chung, R. M. Kuong, T. H. Lin, K. J. Tzeng, C. Y. Wang, K. H. Wu e K. F. Yang (2014), Vento de radar de meteoros sobre Chung-Li (24.9°N, 121°E), Taiwan, para o período 10–25 de novembro de 2012, que inclui Chuva de meteoros leônidas: Comparação com modelo empírico e satélite Medidas Rádio Sci., 49, 597–615, DOI:10.1002/2013RS005273

TIMED WEB SITE. **Timed – a mission to explore one of the last frontiers in Earth’s atmosphere.** Washington: NASA. Disponível em: <<http://www.timed.jhuapl.edu>>, acesso em 15 de dezembro de 2009.

Vargas, F., Swenson, G., e Liu, A.: Evidência de força de onda gravitacional de alta frequência na circulação residual meridional na mesopausa região, **Advances in Space Research**, 56, 1844-1853, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.07.040>, 2015

VIANELLO, R. L., ALVES, A.R., **Meteorologia Básica e Aplicações.** Minas Gerais: UFV. Editora da Universidade Federal de Viçosa: UFV, 2004.

Vincent, R. A. Long-period motions in the equatorial mesosphere. **Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics**, v. 55, n. p. 1067–1080, doi:10.1016/0021-9169(93)90098-J, 1993.

Vincent, R. A., e D. Lesicar (1991), Dinâmica da mesosfera equatorial: primeiros resultados com um radar de reflexão parcial de nova geração, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 825– 828, doi:10.1029/91GL00768.

Vincent, R. A.; Lesicar, D. Dynamics of the equatorial mesosphere: First results with a new generation partial reflection radar. **Geophysical Research Letters**, v. 18, p. 825- 828, 1991.

Vincent, RA: A dinâmica da mesosfera e da termosfera inferior: uma breve revisão, **Progress in Earth and Planetary Science**, 2, <https://doi.org/10.1186/s40645-015-0035-8>, 2015.

Xu, J., A. K. SILVA, H.-L. Liu, W. Yuan, Q. Wu, G. Jiang, M. G. Mlynczak, J. M. Russell III e S. J. Franke (2009), Variações sazonais e quase bienais na maré diurna migratória observadas pela Termosfera, Ionosfera, Mesosfera, Energética e Dinâmica (TIMED), **J. Geófitas. Res.**, 114, D13107, DOI:10.1029/2008JD01129

Widdel, H.-U. (1990), Foil chaff cloud as a tool for in-situ measurements of atmospheric motions in the middle atmosphere: Their flight behavior and implications for radar tracking, *J. Atmos.*

WRASSE, C. M. **Observação da temperatura rotacional da hidroxila através da aeroluminescência na região da mesosfera terrestre.** 125 p. (INPE-8003-TDI/751). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

Xiao, C., H. Xiong, A. K. Smith, X. Qingchen e X. Chen (2013), Variabilidade de curto prazo e médias de verão-2009 do vento médio e marés na mesosfera e termosfera inferior sobre Langfang, China (39,4°N, 116,7°E), *J. Atmos.*

Xu, J. , Smith, AK , Liu, HL , Yuan, W. , Wu, Q. , Jiang, G. , et al. (2009). Variações sazonais e quase bienais na maré diurna migratória observadas por Termosfera, Ionosfera, Mesosfera, Energética e Dinâmica (TIMED) . *Jornal de Pesquisa Geofísica: Atmosferas* , **114** (D13), D13107.<https://doi.org/10.1029/2008JD011298>

Yu, T., C. Xia, X. Zuo, C. Huang, T. Mao, L. Liu e Z. Liu (2016), Uma comparação de ventos mesosféricos e de baixa termosfera medidos por interferômetro e meteoró de Fabry-Perot radar sobre a China central, **J. Geophys. Res. Física Espacial**, 121,10.037– 10.051, doi:10.1002/2016JA022997.

YUAN, T. , CY Ela , J. Forbes , X. Zhang , D. Krueger e S. Reising (2010), Um estudo colaborativo sobre a temperatura da maré diurna na região da mesopausa de latitude média (41°N, 105°W) com Observações Na lidar e TIMED/SABER , **J. Atmos. Sol. Terr. Física**, **72**.

