



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA**  
**PRO - REITORIA DE PÓS - GRADUAÇÃO E PESQUISA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**  
**MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**VINICIUS MATIAS DINIZ**

**CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DA REGIÃO DA MESOSFERA DURANTE  
O VERÃO AUSTRAL: OBSERVAÇÕES E SIMULAÇÕES**

**CAMPINA GRANDE-PB**

**2019**

**VINICIUS MATIAS DINIZ**

**CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DA REGIÃO DA MESOSFERA DURANTE  
O VERÃO AUSTRAL: OBSERVAÇÕES E SIMULAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Mestrado de Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento às exigências parciais para obtenção do título de mestre.

**ORIENTADOR: Prof. Dr. LOURIVALDO MOTA LIMA**

**CO-ORIENTADORA: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> ANA ROBERTA DA SILVA PAULINO**

**CAMPINA GRANDE**

**2019**

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.

D585c Diniz, Vinícius Matias.  
Características dinâmicas da região da mesosfera durante o verão Austral [manuscrito] : observações e simulações / Vinícius Matias Diniz. - 2019.  
52 p. : il. colorido.  
Digitado.  
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.  
"Orientação : Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima, Departamento de Física - CCT."  
"Coorientação: Profa. Dra. Ana Roberta da Silva Paulino, Departamento de Física - CCT."  
1. Atmosfera terrestre. 2. Ondas atmosféricas. 3. Mesosfera. 4. MUAM. I. Título

21. ed. CDD 551.515

**VINICIUS MATIAS DINIZ**

**CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DA REGIÃO DA MESOSFERA  
DURANTE O VERÃO AUSTRAL: OBSERVAÇÕES E SIMULAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Mestrado de Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento às exigências parciais para obtenção do título de mestre.

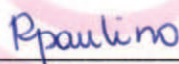
Aprovada em 28 de fevereiro de 2019.

**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima

(Orientador – Universidade Estadual da Paraíba)



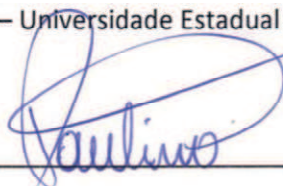
Prof. Dra. Ana Roberta da Silva Paulino

(Co-Orientadora – Universidade Estadual da Paraíba)



Dra. Luciana Rodrigues de Araújo

(Examinador Interno – Universidade Estadual da Paraíba)



Prof. Dr. Igo Paulino, da Silva

(Examinador Externo – Universidade Federal de Campina Grande)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter me dado forças de chegar até aqui, A minha família que sempre me apoiou em minhas escolhas. A minha filha e a minha esposa que me ajudaram a tornar-me quem sou hoje, e que tiveram que aguentar o meu estresse e a minha ausência durante esses dois anos de mestrado.

Aos meus colegas de curso que sempre estiveram presentes e que ajudaram direta e indiretamente em muitos pontos do trabalho.

Ao Professor Lourivaldo pela paciência e a ajuda na elaboração do projeto; A professora Ana Roberta e ao grupo de Pesquisa em Física Atmosférica pelo apoio. Ao saudoso Professor Mará pelas conversas casuais e pelo apoio durante o decorrer do projeto.

Agradeço também ao Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) pela disponibilização dos dados de vento, e a Universidade Estadual da Paraíba por ter me liberado em tempo parcial para a realização do Mestrado.

## RESUMO

Utilizamos o modelo de circulação geral da média e alta atmosfera – MUAM, para simular as condições de vento para os verões de 2004/2005, 2005/2006 e 2006/2007 e comparamos os resultados obtidos com os dados de vento obtidos por radar meteorológico de São João do Cariri (7,4° S, 35° S), Cachoeira Paulista (22,7° S, 45,0° O) e Santa Maria (29,7° S, 53,7° O). Os resultados mostraram uma relação existente entre os ventos zonais observados nestas localidades, com os ventos zonais observados na região polar do hemisfério norte, durante os eventos de SSW, entretanto não foi possível descrevê-lo como a principal causa deste fenômeno. Também foi possível observar que o modelo retrata bem estas características, apesar de não retratar tão bem os picos encontrados nos eventos de SSW.

**Palavras-chave:** MUAM, Dinâmica da Atmosfera, Radar Meteorológico, SSW

## ABSTRACT

We used the Middle and upper atmosphere model of atmospheric general circulation (MUAM) to simulate the wind conditions for the summers of 2004/2005, 2005/2006 and 2006/2007 and compared the results obtained with wind data obtained by meteoric radar from São João do Cariri (7,4 ° S, 35 ° S), Cachoeira Paulista (22.7 ° S, 45.0 ° W) and Santa Maria (29.7 ° S, 53.7 ° W). The results showed a relationship between the zonal winds observed in these localities, with the zonal winds observed in the polar region of the northern hemisphere during SSW events, although it was not possible to describe it as the main cause of this phenomenon. It was also possible to observe that the model portrays these characteristics well, although it does not portray the peaks found in SSW events as well.

**Palavras-chave:** MUAM, Atmospheric Dynamics, Meteor Radar, SSW

## ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Perfil vertical anual médio da temperatura e da pressão em 20° S, e nomenclatura das camadas atmosféricas. ....	15
Figura 2 - Exemplo de ondas transversas. ....	18
Figura 3 - Exemplo de ondas longitudinais. ....	19
Figura 4 - Localização dos radares meteóricos cujos dados foram utilizados nesta pesquisa. ....	24
Figura 5 - Radar Meteórico – SKiYMET em São João do Cariri. Em Sentido horário: Antena transmissora Yagi de três elementos; Arranjo das cinco antenas receptoras Yagi de dois elementos; Sala de Equipamentos. ....	25
Figura 6 - Ventos Zonais para 81 km (vermelho), 84km (azul) e 87 km (magenta) sobre São João do Cariri, Cachoeira Paulista e Santa Maria. O vento zonal (preto) e temperatura (cinza) para 10 hPa na latitude de 60° N também são representados em cada gráfico. Dados dos meses de janeiro e fevereiro de 2005. ....	31
Figura 7 - Seções transversais em latitude e altura do vento zonal médio representativo do mês de janeiro de 2005, segundo o modelo MUAM, para situação sem ondas planetárias (esquerda) e com ondas planetárias estacionárias (direita). ....	32
Figura 8 - Seções transversais em latitude e altura da aceleração do vento zonal médio devido a ondas de gravidade representativo do mês de janeiro de 2005, segundo o modelo MUAM, para situação sem ondas planetárias (esquerda) e com ondas planetárias estacionárias (direita). ....	33
Figura 9 - Ventos Zonais para 81 km (vermelho), 84km (azul) e 87 km (magenta) sobre São João do Cariri, Cachoeira Paulista e Santa Maria. O vento zonal (preto) e temperatura (cinza) para 10 hPa na latitude de 60° N também são representados em cada gráfico. Dados dos meses de janeiro e fevereiro de 2006. ....	35
Figura 10 - Seções transversais em latitude e altura do vento zonal médio representativo do mês de janeiro de 2006, segundo o modelo MUAM, para situação	



com ondas planetárias (esquerda) e com essas ondas amplificadas em 20% (direita).  
.....37

Figura 11 - Seções transversais em latitude e altura da aceleração do vento zonal médio devido a ondas de gravidade representativo do mês de janeiro de 2006, segundo o modelo MUAM, para situação com ondas planetárias (esquerda) e com as ondas amplificadas em mais 20% (direita). .....38

Figura 12 - Ventos Zonais para 81 km (vermelho), 84km (azul) e 87 km (magenta) sobre São João do Cariri, Cachoeira Paulista e Santa Maria. O vento zonal (preto) e temperatura (cinza) para 10 hPa na latitude de 60° N também são representados em cada gráfico. Dados dos meses de janeiro e fevereiro de 2008. ....40

Figura 13 - Seções transversais em latitude e altura do vento zonal médio representativo do mês de fevereiro, segundo o modelo MUAM, para situação com ondas planetárias (esquerda) e com essas ondas amplificadas em 20% (direita)...41

## LISTA DE SIGLAS

**COMMA-LIM** - Cologne Model of the Middle Atmosphere-Leipzig Institute for Meteorology (Modelo de Colônia da média atmosfera – Instituto de Meteorologia de Leipzig);

**HN** - Hemisfério Norte;

**HS** - Hemisfério Sul;

**INPE** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais;

**MATPLOTLIB** – Biblioteca que facilita a plotagem de gráficos utilizando Python;

**MLT** - Upper Mesosphere and low Thermosphere region (Região da alta Mesosfera e baixa Termosfera);

**MUAM** - Middle and upper atmosphere model of atmospheric general circulation (Modelo de circulação geral da média e alta atmosfera);

**NCDF** – Biblioteca do R para acesso a dados guardados em formato NETCDF;

**NUMPY** – Biblioteca para cálculos numéricos no Python;

**QTDW** – Quasi-Two Day Wave (Onda de quase dois dias);

**SAO** - Semi-Annual Oscillation (Oscilação semianual);

**TPW** – Transient Planetary Waves (Ondas Planetárias Transientes);

**SPW** – Stationary Planetary Waves (Ondas Planetárias Estacionárias);

**SSW** - Sudden Stratospheric Warming (Aquecimento Abrupto da Atmosfera);

**WAM** - The Wave Model(O modelo de Onda);

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	10
1.1. Objetivos .....	13
1.1.1. Objetivo Geral .....	13
1.1.2. Objetivos Específicos .....	13
1.2. Justificativa .....	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO .....	14
2.1. Estrutura da atmosfera terrestre .....	14
2.2. Ondas Atmosféricas.....	17
2.3. Dinâmica da mesosfera .....	20
2.4. Modelagem de dados.....	21
2.5. Estado da Arte .....	21
2.6. Modelo de circulação geral da atmosfera média e superior .....	22
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1. Radares Meteorológicos.....	24
3.2. Instalação e Adequação do MUAM .....	26
3.3. Parâmetros Utilizados .....	28
3.4. Análise dos dados .....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	30
4.1. Verão de 2004/2005.....	30
4.2. Verão de 2005/2006.....	34
4.3. Verão de 2007/2008.....	38
4.4. Impacto das ondas atmosféricas na dinâmica da região MLT .....	42
5. CONCLUSÕES.....	43
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
4. ANEXOS .....	49
4.1. Observações anteriores a instalação do MUAM.....	49
4.2. Guia para a Instalação do MUAM.....	50
4.3. Como utilizar o MUAM.....	52

## 1. INTRODUÇÃO

A atmosfera terrestre é a camada gasosa que envolve a terra, devido a ação da gravidade, 99% da massa gasosa se encontra entre a superfície e a altitude de 30 km. Existem diversas maneiras de se classificar as regiões que formam a atmosfera. Em Física da Atmosfera geralmente o modelo de divisão utilizado é de acordo com as mudanças no perfil vertical da temperatura, sendo a troposfera a camada entre a superfície e cerca de 12 km, a qual apresenta alta instabilidade e é onde ocorre o nosso clima.

A tropopausa é uma fina região localizada no topo da troposfera e separa a troposfera da estratosfera, nessa região a temperatura permanece praticamente constante. A camada da estratosfera está situada acima da tropopausa e se estende até cerca de 50 km e é onde se situa a camada de ozônio. A temperatura do ar aumenta lentamente com a altura na estratosfera, devido a absorção da luz solar na faixa do ultravioleta pelo ozônio. Em decorrência da estratificação da temperatura, há pouca convecção e mistura na estratosfera, portanto as camadas de ar são bastante estáveis. A estratopausa também é uma fina camada de atmosfera homogênea a qual separa a estratosfera da mesosfera. (ANDREWS, 2010)

A região da mesosfera está situada entre 50 e 80 km de altitude. Nessa região a temperatura decresce com a altitude até alcançar a mesopausa, a qual se encontra em torno de 80-90 km e tem uma temperatura de aproximadamente  $-90^{\circ}\text{C}$ . O saldo de energia na região da mesosfera é causado pelo fato da absorção de radiação de ondas curtas ser menor do que a emissão na faixa do infravermelho. O déficit no balanço de energia é compensado pela energia das ondas que se propagam ascendentemente a partir das regiões mais baixas da atmosfera.

A dinâmica da região da mesosfera é composta por uma variedade de oscilações periódicas de períodos curtos, que abrangem um largo espectro de frequências, e que estão superpostas no estado básico (vento, temperatura, pressão, altura geopotencial). Além das oscilações citadas, existem os ventos médios, que são oscilações de períodos longos, quase estacionários, e que compõem a atmosfera de fundo (vento básico). (BORGES, 2010)

Neste contexto as ondas atmosféricas são movimentos que podem transmitir energia e momentum sem transportar material e são causadas por perturbações que provocam o desequilíbrio do ar a partir de um estado básico, e são possíveis graças às forças restauradoras, as quais, por oposição às perturbações, comportam oscilações locais nas propriedades dos campos atmosféricos. (LIMA et al., 2004)

Dentre os diversos tipos de ondas atmosféricas, será dada ênfase neste trabalho as ondas planetárias, que são ondas com grande estrutura horizontal e com períodos superiores a um dia, e que podem possuir comprimento de onda horizontal (ou seja números de onda zonal baixos) com milhares de quilômetros. Estas ondas tipicamente assumem períodos próximos a 2, 4, 5, 10 e 16 dias. Uma das características marcantes da dinâmica da região MLT, durante o solstício de verão, é a presença regular da onda de quase dois dias (Quasi two day wave – QTDW). Porém, as ondas de quase 2 dias também são observadas no hemisfério de inverno em algumas ocasiões, bem como em outras épocas do ano em baixas latitudes (GURUBARAN et al., 2001; LIMA et al., 2004). Em geral, as oscilações com períodos de 6-7 dias na região MLT do hemisfério sul (HS), são mais intensas nas semanas que antecedem o outono e a primavera (ARAÚJO et al., 2014; LIMA et al., 2005). Estudos sobre as oscilações de 16 dias revelaram um comportamento sazonal em que as maiores amplitudes são observadas durante a estação de inverno e menores amplitudes no verão (LIMA et al., 2006; LUO et al., 2002).

Eventualmente na estação de inverno do hemisfério norte, a configuração da circulação da estratosfera é rompida e é acompanhada por um aquecimento abrupto da estratosfera conhecido na literatura por SSW (Sudden Stratospheric Warming).

Este aquecimento é desencadeado pela perturbação do vórtice polar estratosférico originada por um forçamento dinâmico devido à propagação ascendente de ondas planetárias desde a troposfera, e a interação não linear destas ondas com o fluxo zonal médio na estratosfera superior (MATSUNO, 1971, p.1492).

LIMPASUVAN et al. (2004), observou que quando a intensidade do vórtice polar, cujo vetor vento aponta para leste, sofre uma diminuição abrupta em um período de poucos dias durante o inverno, ele tem sua simetria distorcida gerando um aquecimento de baixa intensidade ou “*minor warming*”. Também observou que

quando o mesmo ocorre de forma mais intensa e ocasiona a inversão do seu sentido apresentando a quebra do vórtice, é gerado um aquecimento de alta intensidade ou “*major warming*”, nessas circunstâncias a temperatura estratosférica pode aumentar subitamente em várias dezenas de graus em um período de poucos dias.

Durante eventos de aquecimento abrupto da estratosfera nas latitudes altas do hemisfério norte, verifica-se um aumento da atividade de ondas planetárias transientes que se propagam verticalmente a partir da baixa atmosfera em médias latitudes do hemisfério norte e sua interação com o escoamento zonal médio. Observa-se também que essas ondas se propagam na direção do equador e podem produzir forçamento significativos capazes de influenciar a dinâmica da região equatorial e em baixas latitudes do hemisfério sul, como foi sugerido por (LIMA et al. 2012, p. 1).

LASKAR et al. (2014) demonstraram que o acoplamento vertical na atmosfera depende da intensidade dos eventos de SSW, da atividade solar, e da interação entre marés e ondas planetárias.

Resultados de estudos usando modelos (POGORELTSEV, 1999) enfatizam o papel das ondas atmosféricas como fonte de variações na dinâmica da estratosfera e mesosfera. Durante a última década, foram publicados vários estudos com base em observações, realizadas a partir de instrumentos no solo e a bordo de satélites, focando o papel das ondas de escala planetária na região da alta mesosfera e baixa termosfera, referida como upper mesosphere and lower thermosphere ou MLT Region (DAY et al., 2011; LIMA et al., 2006; MANSON et al., 2005).

Os estudos desses fenômenos possibilitarão entendermos melhor a variação climática que ocorre anualmente em todo o nosso hemisfério, fazendo com que as previsões de clima sejam mais eficazes, resultando em um melhor aproveitamento dos recursos naturais. Para tanto, iremos realizar simulações utilizando o modelo de circulação geral da média e alta atmosfera (MUAM), e analisar os dados gerados em comparação com os dados obtidos pelos radares meteorológicos do INPE presentes em São João do Cariri-PB (7,4°S;36,5°O), Cachoeira Paulista-SP (22,7°S; 45,0°O), e Santa Maria (29,7°S, 53,7°O) nos verões de 2004/2005, 2005/2006 e 2006/2007 e procurar achar uma relação entre as alterações dinâmicas observadas, com os modelos já existentes de ondas de quase dois dias.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Simular a resposta dinâmica da mesosfera para os verões de 2004/2005, 2005/2006, e 2007/2008 utilizando o modelo de circulação geral da média e alta atmosfera (MUAM) e comparar com as observações realizadas nas medidas de ventos por radar meteorológico em São João do Cariri (7,4° S, 35° S), em Cachoeira Paulista (22,7° S, 45,0° O) e em Santa Maria (29,7° S, 53,7° O).

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Instalar e ajustar o modelo a ser utilizado e documentar os passos necessários para a execução do mesmo;
- Identificar e caracterizar os movimentos de escala planetária nos ventos médios para as três latitudes;
- Realizar simulações para diferentes situações usando o MUAM e comparar os resultados obtidos com as observações realizadas nas medidas de ventos;
- Examinar uma possível relação entre a atividade das ondas planetárias na região da mesosfera de baixas latitudes do hemisfério sul e os eventos de aquecimento abrupto da estratosfera polar;

## **1.2. Justificativa**

A dinâmica da média atmosfera no hemisfério norte, já é bem estudada e conhecida, entretanto, a do hemisfério sul ainda é pouco conhecida. Dentre os vários fenômenos presentes em ambos os hemisférios, alguns exibem maior intensidade em um hemisfério, enquanto outros são observados em apenas um deles. A dinâmica da região da Mesopausa terrestre de médias e altas latitudes, principalmente do hemisfério norte, encontra-se bem estabelecida, ao passo que

pouca atenção tem sido dispensada aos processos dinâmicos da região equatorial, bem como a de regiões de baixas latitudes, particularmente do hemisfério sul.

Essa falta de atenção deve-se ao fato de que os maiores centros de estudos referentes ao tema em questão encontram-se no hemisfério norte, tendo a China, a Rússia, a Alemanha e os Estados Unidos como os países que mais dedicam recursos aos estudos nesta área.

Estudos envolvendo os ventos observados em duas das três latitudes, consideradas nesta pesquisa, revelaram discordâncias com os dados de ventos fornecidos pelos principais modelos disponíveis (BATISTA et al., 2004; LIMA et al., 2006). Recentemente, os dados de ventos obtidos a partir de medidas por radar meteorológico em São João do Cariri - PB e Cachoeira Paulista - SP foram usados para estudar a dinâmica da região MLT nas latitudes de 7,4°S e 22,7°S (ARAÚJO et al., 2014). Além de analisar o caráter transiente das ondas planetárias com períodos de 2 a 20 dias, o estudo permitiu elaborar a sazonalidade da atividade destas oscilações.

Utilizando os dados da cidade de Santa Maria, que não haviam sido utilizados em estudos anteriores, em conjunto com as simulações geradas pelo modelo a ser utilizado, iremos realizar uma nova análise destes dados, buscando comparar com os dados obtidos nas pesquisas anteriores, bem como tentar realizar novos testes que possam corroborar para a observação de novos resultados, com a inclusão de novas variáveis no modelo que já foi previamente utilizado.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

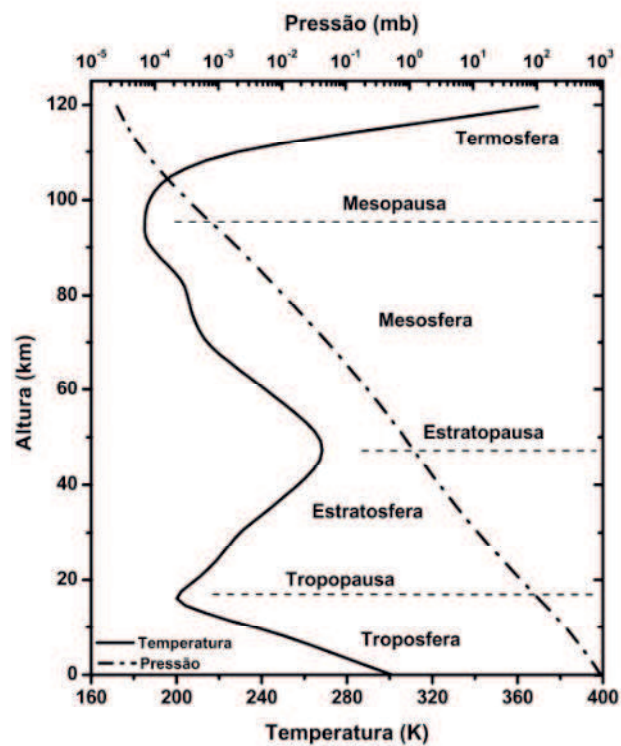
### **2.1. Estrutura da atmosfera terrestre**

Até cerca de 100 km de altura a partir do nível do mar, a atmosfera terrestre tem como uma de suas características uma mistura de gases quase que constante, dada a predominância da difusão turbulenta. Esta região atmosférica conhecida normalmente como Homosfera, é composta basicamente de uma mistura de Nitrogênio molecular ( $N_2$ , ~78%), de Oxigênio molecular ( $O_2$ , ~20,95%) e o Argônio, (Ar, ~0,93 %). (BANKS; KOCKARTS G, 1973)



Também são encontrados, em quantidades pouco abundantes o dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), o vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), e o Ozônio ( $\text{O}_3$ ), elementos muito importantes, dada a capacidade de absorver radiação solar direta, ajudando na manutenção das condições ideais para a vida na atmosfera. O Vapor de água não se apresenta uniformemente distribuído, uma vez que sua presença depende não só de uma superfície que forneça água, mas também de uma série de outros fatores.

Figura 1 - Perfil vertical anual médio da temperatura e da pressão em 20° S, e nomenclatura das camadas atmosféricas.



Fonte: (LIMA, 2004)

A Figura 1 ilustra o gradiente de temperatura relacionado ao aumento da altitude e pressão presente nas diversas regiões da atmosfera. De acordo com o comportamento vertical do gradiente de temperatura, a estrutura da atmosfera terrestre é convencionalmente dividida em camadas, as quais são separadas por regiões de transição referidas como pausas.

É na camada inferior, troposfera, onde ocorrem os fenômenos de interesse meteorológico. Nesta camada a temperatura decresce com a altitude a partir de aproximadamente 290 K à superfície, numa taxa quase constante em torno de 6,5 K/km, até atingir cerca de 220 K em torno de 11 km nas regiões polares, e de 16 km na região equatorial, dependendo da estação do ano. O decréscimo em altura da temperatura é resultado da radiação solar que atinge a Terra, que por sua vez, aquece o ar acima dela. Como o aquecimento da superfície terrestre não é uniforme e o ar aquecido tende a subir, enquanto o ar mais frio tende a descer, processos convectivos e turbulentos são gerados nesta camada. A absorção da radiação solar direta pela superfície terrestre é o principal processo de aquecimento na troposfera, tendo como contribuição secundária, o aquecimento causado pela absorção da radiação no infravermelho pelos gases: dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), vapor d'água ( $H_2O$ ) e outros. (LIMA, 2004)

No final da troposfera, encontra-se a tropopausa, que é um nível de inversão que não possui uma altitude constante no espaço e no tempo, estando o mesmo relacionado com a temperatura e a pressão no nível do mar. (BARRY; CHORLEY, 2012)

A camada acima da Tropopausa é chamada de Estratosfera, nela a temperatura aumenta com a altitude, atingindo cerca de 270 K em torno de 50 km, resultado da absorção da radiação ultravioleta solar pelo ozônio. A absorção da radiação aumenta o nível de agitação das moléculas de ozônio promovendo o aumento da temperatura de sua vizinhança. Esta camada é de extrema importância para o planeta, pois ela auxilia na manutenção do balanço de calor, impedindo que ocorra uma queda exagerada da temperatura, bem como ajuda a reduzir a quantidade de radiação ultravioleta que alcança a superfície terrestre. (LIMA, 2004)

Acima da Estratosfera, até cerca de 90km de altitude, encontra-se a Mesosfera, cuja densidade é bastante reduzida e sua temperatura diminui com a altitude, chegando a até aproximadamente 180K. Essa diminuição ocorre em função da diminuição gradativa da absorção seletiva ocorrida na alta estratosfera, chegando a atingir o seu valor mínimo na Mesopausa, onde permanece quase constante para logo a seguir aumentar com a altura na Termosfera. Na região da mesosfera a

energia depositada pela radiação solar direta é pouca se comparada com as camadas vizinhas. (ANDREWS, 2010)

Na Mesosfera as principais fontes de energia são devidas a absorção da radiação ultra violeta solar pelo ozônio nas bandas de Hartley, entre 242 e 310 nm; desativação colisional (quenching) do oxigênio atômico, O (<sup>1</sup>D), geradas por fotólise do O<sub>3</sub> e O<sub>2</sub>; liberação de quantidade significativa de energia potencial química armazenada devido a recombinação de 3 corpos do O<sub>2</sub> e a reação exotérmica do hidrogênio (H), e O<sub>3</sub>; interações dinâmicas nas quais ondas de gravidade e marés são dissipadas; e aquecimento devido a movimentos verticais, dentre os quais aqueles relacionados às marés. Já o resfriamento mesosférico decorre dos processos radiativos que envolvem óxido nitroso (NO), O, O<sub>3</sub> e do CO<sub>2</sub>, sendo que este último desempenha um papel dominante. (LIMA, 2004)

A última camada de nossa atmosfera chama-se Termosfera, nela a temperatura volta a crescer com a altitude, devido principalmente ao fato de estarmos na camada mais externa da atmosfera, a qual recebe a incidência direta dos raios solares. Na baixa Termosfera, as principais fontes de energia são a absorção do componente do ultravioleta extremo pelo oxigênio molecular, precipitação de partículas magnetosféricas aurorais, e a dissipação de correntes elétricas na ionosfera local. Dada a alta variabilidade da componente ultravioleta extremo do fluxo solar, podem ocorrer situações em que a baixa termosfera possa ser dominada por energia vinda do Sol, da magnetosfera, ou das camadas atmosféricas inferiores. Em altas latitudes, os processos magnetosféricos muitas vezes dominam. (HARGREAVES, 1992)

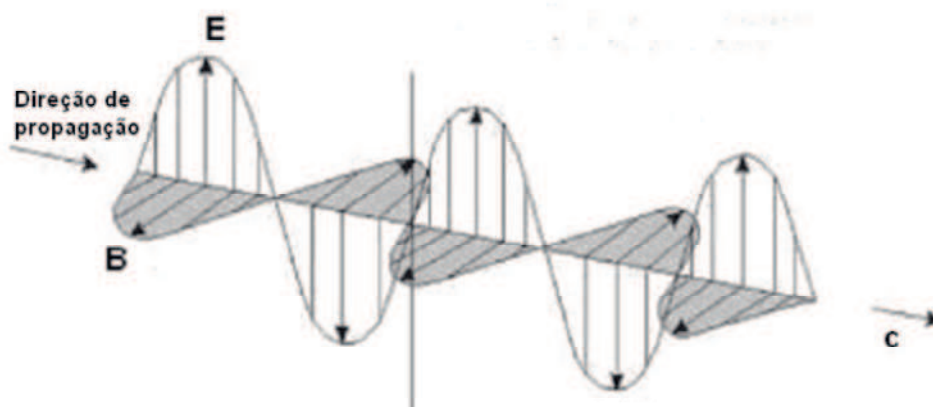
## **2.2. Ondas Atmosféricas**

Fisicamente, movimentos que se repetem em intervalos regulares de tempo são chamados de periódicos ou oscilatórios. A atmosfera terrestre pode suportar um vasto espectro desses movimentos oscilatórios com períodos que podem variar em escala de segundos até milhares de anos, afetando o clima local de qualquer região do planeta, influenciando inclusive a dinâmica em escala global (VOLLAND, 1988). Tais movimentos oscilatórios, que são denominados ondas atmosféricas, são causados pelo desequilíbrio de forças restauradoras que atuam na atmosfera,

opondo-se às perturbações, comportando oscilações locais nas propriedades dos campos atmosféricos, em outras palavras, as ondas atmosféricas são geradas quando uma parcela de ar é perturbada do seu equilíbrio. As perturbações podem ser de origem mecânica, por exemplo, quando uma parcela de ar se desloca sobre uma elevação terrestre; ou térmica, por convecção. O movimento dessas ondas na atmosfera comunica a influência de uma região para a outra, através da transferência de energia e momentum (SALBY, 1996).

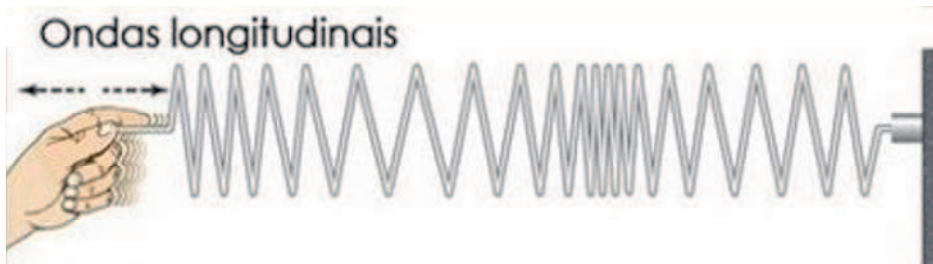
As ondas atmosféricas apresentam fase e evolução diferentes em sua passagem pela atmosfera devido à sua natureza de propagação e de deslocamento, podendo ser dividida em três classes: ondas verticais transversas, são ondas que se propagam horizontalmente cujo deslocamento é vertical (caso das ondas de gravidade); ondas horizontais transversas, são ondas que se propagam horizontalmente com deslocamento horizontal perpendicular à direção de propagação (caso das ondas de Rossby); e ondas longitudinais, são ondas cujo deslocamento está na mesma direção de propagação (ondas acústicas). Para tanto, o movimento das ondas atmosféricas pode ser pensado como uma combinação destes três tipos de ondas (BEER, 1974). Exemplos destas ondas podem ser vistos nas figuras 02 e 03.

Figura 2 - Exemplo de ondas transversas.



Fonte: SANTOS (2015)

Figura 3 - Exemplo de ondas longitudinais.



Fonte: SANTOS (2015)

Na atmosfera terrestre, as ondas devido à força da gravidade são ditas ondas de gravidade, essas ondas se propagam com período e comprimento de ondas curtas, e velocidade de fase baixa, sua existência é, principalmente, devida ao empuxo (flutuabilidade), resultante do desbalanço entre força de gradiente de pressão e a força de gravidade. As marés atmosféricas são ondas de grande escala (global) geradas pela absorção da radiação solar, principalmente pelo ozônio e pelo vapor d'água. As ondas devido às forças rotacionais são ondas de escala planetária, essas ondas possuem períodos maiores do que um dia com comprimento de milhares de quilômetros, são chamadas ondas de Rossby devido à variação do efeito da força de Coriolis com a latitude que age sobre a atmosfera como uma força externa (ALVES, 2007). Todas essas ondas possuem diferentes escalas de tempo e de espaço e são superpostas aos ventos médios da atmosfera (BAGESTON, 2010).

Neste trabalho iremos dar ênfase as ondas de quase dois dias (QTDW – Quasi-two day waves). MONGSTAD & ESPY (2013), descrevem a onda de quase dois dias como sendo uma família de ondas planetárias, com diversos tipos de modo de onda e períodos próximos a dois dias e que apresentam números de onda 3 e 4. FRÖHLICH (2005) enfatiza que diversos estudos observaram que estas ondas podem ter um período entre 45 e 53 horas, e que as mesmas podem ser observadas em ambos os hemisférios, com diferenças no período e na intensidade de suas amplitudes, que são mais fortes no hemisfério sul do que no hemisfério norte.

Segundo HOLTON (2012), essa alteração da dinâmica entre os continentes pode estar relacionada ao fato de que uma porcentagem maior da superfície coberta

pelos continentes, está disposta no hemisfério norte, fazendo com que as massas de ar presentes acima do mesmo recebam uma quantidade maior de energia proveniente da irradiação do solo.

### **2.3. Dinâmica da mesosfera**

A dinâmica da estratosfera e da mesosfera, de acordo com SANDFORD(2008), pode ser considerada como um simétrico fluxo sazonal, sobre várias perturbações de ondas atmosféricas. Categoricamente estas ondas podem ser, em parte, em termos de uma força restauradora que age nas parcelas do ar para se opor a um deslocamento vertical (exemplo, ondas de Gravidade) ou pela força de Coriolis, como também se opõe à uma força horizontal (exemplo, ondas inerciais e ondas de Rossby). Tais ondas atmosféricas podem ser reveladas a partir de suas propriedades fundamentais, ao considerarmos sua relação de dispersão. A relação de dispersão é uma relação entre a função de número de ondas e a frequência para uma onda harmônica que expressam as condições em que uma onda pode se propagar.

A presença de oscilações de grandes amplitudes e longos períodos, juntamente com vários processos dinâmicos que ocorrem na média atmosfera terrestre, caracteriza a circulação zonal média, com escoamento zonal médio na região da baixa mesosfera e alta estratosfera apresentando uma oscilação anual (AO) em médias e altas latitudes, enquanto que no Equador e na região de baixas latitudes os ventos são caracterizados por uma oscilação quase bianual (QBO) na estratosfera e por uma oscilação semianual – SAO acima de 35 km de altura (ANDREWS; HOLTON; LEOVY, 1987; HOLTON; HAKIM, 2012).

A região da estratosfera e mesosfera apresenta uma oscilação semianual na variação da temperatura média zonal devido aos processos dinâmicos associados à circulação zonal que estão confinados às latitudes equatoriais, causada segundo LINDZEN et al. (1968) pela interação entre fluxos de ventos médios. O Sol ao cruzar o equador gera uma oscilação semianual através da advecção de momentum do Hemisfério de verão para aquele de inverno e postula-se que as ondas planetárias comandem as oscilações equatoriais na estratosfera, mas não afetem significativamente a dinâmica da mesosfera superior (SANTOS, 2010). Vários

estudos evidenciam a presença da SAO na temperatura mesosférica para diversas latitudes, utilizando técnicas de fotometria (ZHAO et al., 2007), Interferômetro imageador de ventos (SHEPHERD et al., 2007) ou instrumento TIMED/SABER (HUANG et al., 2006) por exemplo. Na região da estratosfera o primeiro relato da existência de SAO foi relatado por REED (1962).

## **2.4. Modelagem de dados**

Um modelo pode ser definido como uma representação das relações dos componentes de um sistema, sendo considerada como uma abstração, no sentido em que tende a se aproximar do verdadeiro comportamento do sistema. (CHWIF, 1999). Em geral os modelos tendem a apresentar uma forma simplificada do sistema, visto que nem sempre todas as variáveis envolvidas no processo são importantes para a pesquisa a ser realizada.

No estudo científico em geral, a modelagem e a observação são algumas das técnicas mais utilizadas para o estudo de um determinado fenômeno, trazendo ao nosso contexto, onde lidamos com variáveis que não são facilmente observáveis, além destas duas técnicas, utilizamos do advento da simulação para repetir algum experimento e buscar a explicação dos fenômenos ocorridos em decorrência dele, que em algumas ocasiões não se encontram plenamente explicados. Desta forma podemos utilizar destas simulações para gerar um ambiente controlável, onde podemos observar as variáveis em estudo mais facilmente, além de podermos nos utilizar de filtros e da inserção de variáveis externas, para buscarmos atingir o comportamento necessário da amostra.

## **2.5. Estado da Arte**

Estudos como os de JACOBI et al. (2017), QIAN et al. (2011) e POGORELTSEV et al. (2007), utilizaram com sucesso a simulação através de modelos em suas pesquisas, buscando explicar melhor o comportamento da dinâmica da mesosfera, comparando os dados dos ventos coletados em radares atmosféricos ao redor do mundo, com modelos previamente existentes na literatura científica. No estudo das ondas atmosféricas os modelos mais utilizados são o WAM (*Wave Model*, mantido pela *Helmholtz Association of German Research Centres*), o

MUAM (*Model of Upper and Middle Atmosphere*, mantido pela Universidade de Leipzig), O CMAM (*Canadian Middle Atmosphere Model*, mantido pelo governo do Canadá), o TIME-GCM (*Thermosphere Ionosphere Mesosphere Electrodynamics General Circulation Model*, mantido pelo Centro Nacional de Pesquisas Atmosféricas dos Estados Unidos – NCAR) e o WACCM (*Whole Atmosphere Community Climate Model*, mantido pela Universidade do Colorado). Iremos utilizar o MUAM em nossas simulações, pelo fato do mesmo ser uma biblioteca que se utiliza de diversos modelos atmosféricos para montar um modelo final, com as melhores características de cada um dos modelos contidos no mesmo. Além do fato de que este modelo já fora utilizado com sucesso por outras pesquisas do grupo de física da atmosfera, do qual este trabalho faz parte.

## **2.6. Modelo de circulação geral da atmosfera média e superior**

Desenvolvido tomando como base o modelo COMMA-LIM do instituto de meteorologia de Leipzig, o MUAM (Modelo de circulação geral da média e alta atmosfera), é um modelo 3D mecanicista não linear da circulação atmosférica (LILIENTHAL et al., 2015), mantido pela Universidade de Leipzig em parceria com a Universidade de Hidro meteorologia de St. Pittsburgh (RSHU). O MUAM possui uma resolução horizontal (latitude / longitude) de  $5 \times 5,625^\circ$ , e até 60 níveis de altura espaçados uniformemente através da pressão logarítmica. O limite superior corresponde à Altura geopotencial de 300-400 km dependendo da temperatura térmica (FRÖHLICH et al., 2003).

O MUAM constitui-se de um conjunto de bibliotecas escritas em Python, utilizando como base as bibliotecas matemáticas desenvolvidas em Fortran do COMMA-LIM, e utiliza-se de scripts shell, para a execução e manipulação de arquivos através de um terminal Linux. Estes códigos utilizam-se de modelos previamente existentes para buscar formar um modelo complexo da união dos resultados de cada um deles:

- Modelo de Escala de Onda Global - GSWM (HAGAN; FORBES; VIAL, 1995);
- Eletrodinâmica da Termosfera, Ionosfera e Mesosfera – TIME-GCM (ROBLE; RIDLEY, 1994);



- Modelo da atmosfera neutra e ionizada de Hamburgo - HAMMONIA;
- Modelo Canadense para a média atmosfera – CMAM;

Ao final do processamento o MUAM gera um arquivo do tipo NETCDF (Network Common Data Form) com extensão '.NC'. Este formato de arquivo funciona como um grande array multidimensional, com padrão aberto, com isso o mesmo pode ser facilmente importado em diversos softwares, como o IDL ou o R para a geração dos gráficos. O MUAM através de uma integração com a biblioteca NUMPY e a MATPLOTLIB, além de scripts Python que foram desenvolvidos por diversos pesquisadores com o passar do tempo, pode também gerar estes gráficos de forma independente, mas com certas limitações da biblioteca, e sem alguns recursos presentes nas outras ferramentas.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

Para o desenvolvimento do trabalho proposto, serão utilizadas como base as medidas de vento, as quais serão estimadas a partir das informações registradas pelos radares meteorológicos que operam em São João do Cariri - PB (7,4°S;36,5°O), em Cachoeira Paulista - SP (22,7°S; 45,0°O), e em Santa Maria - SC (29,7°S, 53,7°O), no período dos verões (meses de dezembro, janeiro e fevereiro), de 2004/2005, 2005/2006 e 2007/2008. Este período foi escolhido pelo fato de que no verão de 2005/2006 houve um evento de SSW Major, por isso iremos fazer o comparativo deste ano com o ano posterior e o anterior ao mesmo.

Os radares meteorológicos foram adquiridos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, e os dados têm sido compartilhados e se encontram à disposição do Grupo de Física da Atmosfera do Departamento de Física da UEPB, dos quais este trabalho faz parte. A Figura 4 contém um mapa marcando a localização dos radares que serão utilizados em nosso projeto, que demonstra que os pontos estão bem espalhados fisicamente pelo território de nosso país, dando uma boa margem de precisão devido a ampla cobertura atingida.

Figura 4 - Localização dos radares meteorológicos cujos dados foram utilizados nesta pesquisa.



Fonte: Adaptado de Google Maps.

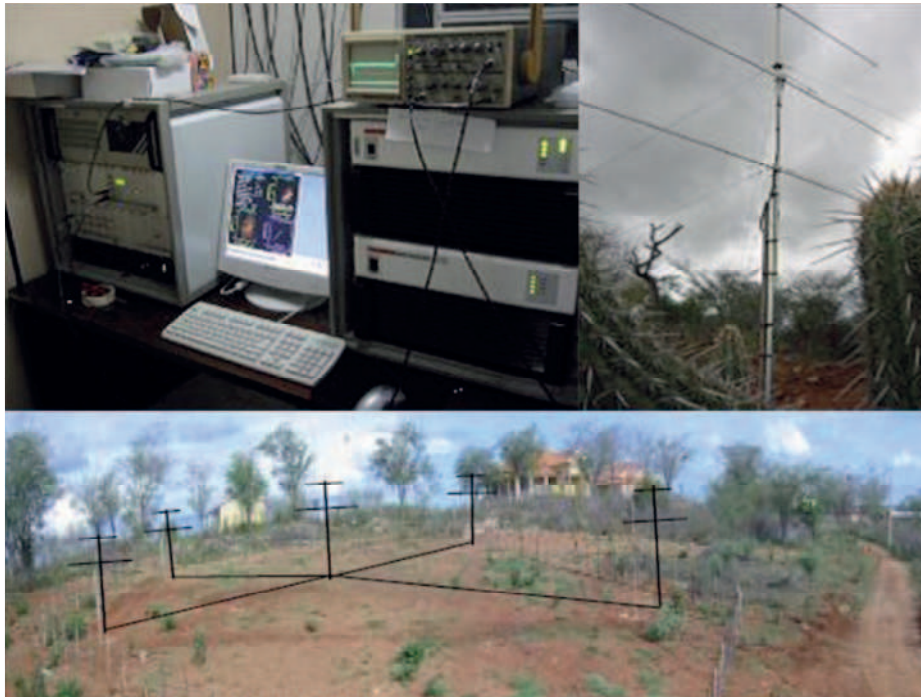
Para as etapas de processamento dos dados e análise dos mesmos, serão utilizadas as dependências e equipamentos pertencentes ao Grupo de Física da Atmosfera, para tanto um computador que ficará dedicado apenas para este processamento foi selecionado, nele foi instalado o sistema operacional UBUNTU, bem como todos os softwares adicionais e bibliotecas necessárias para o pleno funcionamento de todas as funções do MUAM.

### 3.1. Radares Meteorológicos

Para a captura dos dados que serão analisados nas três localidades, serão utilizados radares meteorológicos, estes radares são sistemas comerciais denominados de SKiYMET, os quais possuem visada de todo céu e foram projetados para operar em alta taxa de repetição de pulso, registrando meteoros, bem como objetos feitos pelo homem, e utilizando de algoritmos próprios para determinar quais objetos devem ser tratados. Em cada radar é utilizado uma única antena transmissora Yagi de três elementos, com cinco antenas receptoras dispostas no solo formando uma cruz assimétrica. Esta configuração interferométrica permite a determinação da trilha meteórica no céu, reduzindo a ambiguidade no ângulo de chegada (HOCKING et al.,

2001). A Figura 5 contém fotos do radar meteorológico de São João do Cariri, um dos radares utilizados na pesquisa.

Figura 5 - Radar Meteorológico – SKiYMET em São João do Cariri. Em Sentido horário: Antena transmissora Yagi de três elementos; Arranjo das cinco antenas receptoras Yagi de dois elementos; Sala de Equipamentos.



Fonte: Adaptado de ALVES (2012).

O sistema opera numa frequência de 35,24 MHz, transmitindo radiação com pulso de 13  $\mu$ s, proporcionando uma resolução de 2 km, numa taxa de repetição de 2144 pps (pulsos por segundo). O pico de potência transmitida é 12 kW.

Nos casos de não continuidade dos dados, ou seja, nos períodos em que forem encontradas interrupções nas séries de dados a serem analisadas, os dados ausentes serão preenchidos utilizando os seguintes critérios:

- Para Intervalos entre um e dois dias será empregada a técnica de interpolação linear.
- Para Intervalos superiores a dois dias, será considerado os valores médios de cada um dos intervalos de tempo dos dias imediatamente anteriores e posteriores às lacunas.

As variações atmosféricas de escala planetária ocorrem em geral como manifestações transitórias de atividades de ondas durante determinados intervalos de tempo que podem se prolongar por meses. Consequentemente se faz necessário avaliar a distribuição temporal do espectro de frequências. Neste sentido, o emprego da transformada de ondaletas mostra-se uma ferramenta útil na análise de séries não estacionárias (TORRENCE; COMPO, 1998). Dada a simplicidade de sua aplicação, já que ela pode ser facilmente inserida nos códigos a serem utilizados durante o processamento, a transformada de ondaletas de Morlet tem sido utilizada na investigação de perturbações ondulatórias observadas nos ventos neutros da região próxima a mesopausa (LIMA et al., 2005), a qual será empregada no presente trabalho. O uso de ondaletas também é eficiente na análise de processos com períodos variados, e se constituiu numa das mais utilizadas ferramentas para análises de séries temporais.

### **3.2. Instalação e Adequação do MUAM**

Por ter sido desenvolvido tomando como base um modelo escrito nos anos 80, com bibliotecas em Python que foram adicionadas posteriormente, parte do código do Modelo foi otimizado para uma melhoria na facilidade de uso ao sistema, reduzindo as configurações iniciais no que se refere a configuração das pastas para o funcionamento do mesmo, agora o sistema automaticamente verifica a pasta onde está sendo executado e se todos os arquivos necessários estão presentes, caso estejam, ele já começa a execução sem que nenhuma outra configuração seja necessária.

Também foram realizadas modificações no MUAM para que o mesmo fosse capaz de operar utilizando apenas ferramentas Open Source, isto é, sem depender de nenhum módulo, biblioteca ou compilador de caráter comercial. O MUAM inicialmente foi criado para utilizar-se do compilador Comercial IFort (Intel Fortran Compilers), além da biblioteca `scientific.IO NET-CDF`, componente presente na suíte Intel Parallel Studio da qual o IFort faz parte. No intuito de utilizarmos apenas ferramentas abertas, parte do código do modelo foi modificado para suportar a utilização do compilador opensource GFORTRAN, além do módulo `python-netcdf4` responsável por gerar os arquivos '.NC', retirando as dependências comerciais do mesmo.

No entanto essa alteração nos trouxe um problema que não era esperado, como o GFORTRAN não possui a opção `--fpe0`, que funciona substituindo o valor das divisões por 0 pelo número 0, o mesmo estava gerando diversas entradas NaN(Not a Number) no array de dados, produzindo entradas inválidas para o restante do processo. Diante desta dificuldade e pelo fato da Intel disponibilizar uma versão gratuita do parallel studio XE para fins não comerciais, resolvemos voltar a usar o IFort como o compilador Fortran do projeto.

Também foram executadas alterações para tornar possível a execução do mesmo em sistemas que utilizam a mais nova versão do Python, o Python 3, com essas alterações foi percebida uma sensível melhoria de performance no mesmo, onde inicialmente eram gastos entre 2 e 3 dias para a realização de uma bateria de testes, contudo, após essas alterações o mesmo encontra-se executando a mesma bateria de testes em um computador equipado com um processador core-i5 3330, e 8gb de memória RAM, em cerca de 7h.

Após diversos testes, verificamos que a geração de arquivos no formato netcdf4, estava ocasionando algumas inconsistências em relação aos dados obtidos anteriormente, por conta desse problema, resolvemos utilizar o formato 'NETCDF3\_CLASSIC', onde a biblioteca NETCDF4 gera dados seguindo o padrão NETCDF3, nesta abordagem a biblioteca não se mostrou tão eficiente, como quando produz arquivos NETCDF4, utilizando uma grande quantidade de memória no processo. Como os arquivos '.DX' temporários gerados pelo modelo utilizam em torno de 10GB de espaço em disco, foi necessário alocar uma quantidade de memória superior a esta para que o processo não fosse encerrado pelo sistema por falta de memória. Para isso, utilizamos os mesmos 8gb de memória já presentes em nosso computador, mas alocamos 4GB para a memória SWAP (Memória de trabalho utilizada em sistemas UNIX, que auxilia a memória RAM nos casos de falta de memória), e com isso o sistema foi executado a contento, mas para uma maior performance, recomendamos a utilização de pelo menos 12GB de memória RAM neste contexto. Ressaltamos que o problema de falta de memória ocorre apenas quando da utilização da biblioteca NETCDF4 em modo de compatibilidade com o formato 'NETCDF3\_CLASSIC'.

Algumas bibliotecas em Python para a geração de gráficos foram incluídas no modelo de forma que após o término da execução dos dados, diversos gráficos já estivessem à disposição de quem estivesse operando o modelo, adequamos todos eles para a utilização do Python3 e para que as imagens fossem geradas diretamente em .PNG, pois boa parte destas bibliotecas, geravam as imagens em .PDF.

Um passo a passo para a instalação do mesmo em um computador utilizando o Sistema Operacional Ubuntu, ou qualquer outro baseado em Debian, pode ser encontrado nos anexos do trabalho. Ao final do trabalho também será disponibilizado um tutorial para utilização do mesmo, para que possa facilitar a utilização do mesmo por outros pesquisadores.

### **3.3. Parâmetros Utilizados**

Para a geração dos modelos no MUAM foram utilizados os dados referentes aos verões de 2004-2005, 2005-2006 e 2006-2007, pelo fato de que no ano de 2006 houve um evento de SSW Major, e queríamos comparar os dados de um ano antes e um ano depois para que pudéssemos verificar a diferença entre um ano em que ocorreu este fenômeno e alguns anos em que não ocorreram o mesmo. Também utilizamos os meses de dezembro e fevereiro em cada uma das análises, pois buscamos encontrar e evolução do fenômeno com o tempo.

Para os dados de lower boundary (limites inferiores) necessários para a execução do MUAM, foram utilizados os dados disponibilizados pelo ECMWF (Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo) através da página <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>

Iremos gerar os modelos para todos os meses propostos com todas as ondas habilitadas (ondas de 2, 3, 10, 11, 12, 13, 21 e 23 dias), com todas as ondas desabilitadas, e com as ondas habilitadas e amplificadas em 20%. Estes parâmetros serão inseridos no arquivo `muam_model_clear.txt` para que o modelo possa inserir estas características de forma automática.

### **3.4. Análise dos dados**

Já em posse dos dados coletados através dos radares meteorológicos iremos iniciar a etapa de filtragem e separação. Nesta fase serão aplicados filtros passa banda que irão separar períodos específicos destas oscilações. As amplitudes e as estruturas de fases referentes a estas oscilações serão obtidas através de análise harmônica que serão realizadas nos períodos selecionados anteriormente.

Após a separação dos dados que serão efetivamente trabalhados, serão gerados gráficos demonstrativos utilizando de bibliotecas em Python, com a cinética destas oscilações, estes gráficos serão comparados e analisados, utilizando-se o aplicativo HDFView, um aplicativo Open Source que permite a leitura de arquivos NETCDF diretamente no Linux, ele também permite a extração direta de dados e a cópia dos mesmos para arquivos de texto.

Em seguida iremos fazer a comparação dos dados reais obtidos pelos radares meteorológicos com os dados e gráficos obtidos através do MUAM utilizando o modelo proposto por HOFFMANN & JACOBI (2012), e utilizando como parâmetros os modelos para as ondas de 2 dias. Este processamento será realizado nos computadores do Laboratório de Física Atmosférica, localizado no Centro de Ciências e Tecnologia da UEPB.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de entender como se dá o acoplamento entre os eventos intensos de aquecimento abrupto da estratosfera em altas latitudes do hemisfério norte e perturbações presentes na mesosfera de baixas latitudes, incluindo a região equatorial, os dados de ventos de radares meteorológicos, juntamente com os dados de ventos e temperatura da estratosfera polar foram analisados. As respostas dinâmicas obtidas por simulações foram usadas para discutir as possíveis causas do acoplamento.

Durante o trabalho foram gerados mais de 200 gráficos referentes aos verões dos anos citados nas três hipóteses previstas. Verificamos que não seria necessário incluir todas elas em nosso trabalho, e optamos por incluir apenas as que serão discutidas nas conclusões acerca do trabalho, mas todas as imagens geradas, bem como o modelo utilizado e as instruções para instalação e utilização do mesmo, encontram-se disponíveis em <http://viniciusmatias.com.br/mestrado>.

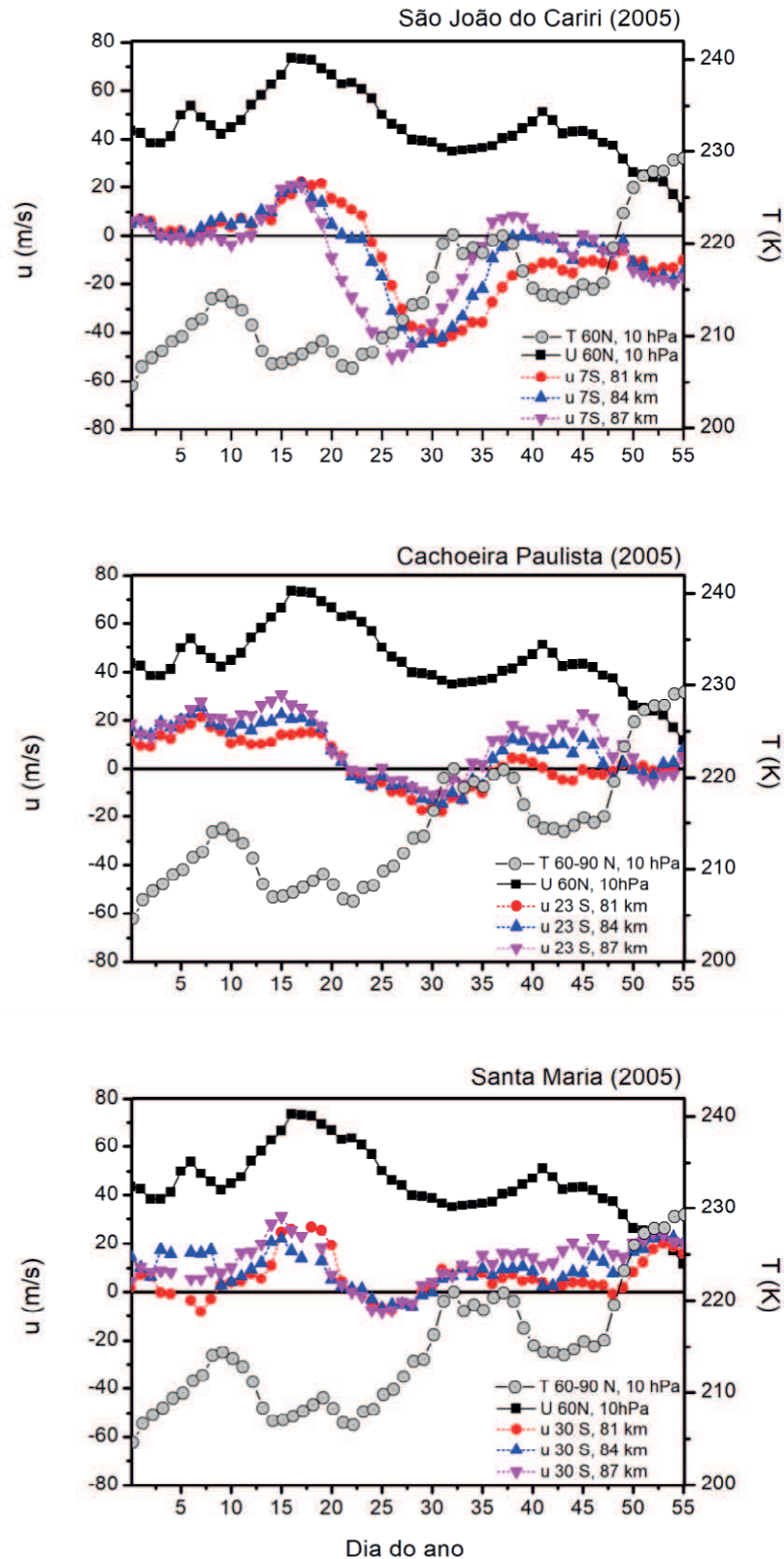
### 4.1 Verão de 2004/2005

Durante o verão de 2004/2005 não foi registrado evento de aquecimento abrupto da estratosfera polar no hemisfério norte sendo, portanto, interessante analisar o comportamento dos ventos da região MLT obtidas pelos radares na ausência de SSW.

Na Figura 6 são mostrados os ventos zonais para 81 km (vermelho), 84km (azul) e 87 km (magenta) para São João do Cariri (topo), Cachoeira Paulista (meio) e Santa Maria (embaixo), juntamente com o vento zonal (preto) e temperatura (cinza) para 10 hPa na latitude de 60° N, referentes aos meses de janeiro e fevereiro de 2005.



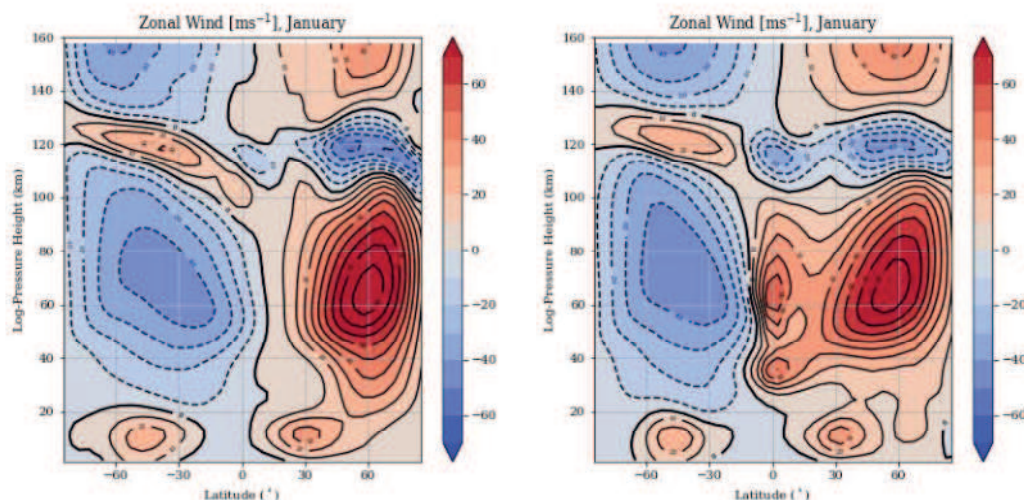
Figura 6 - Ventos Zonais para 81 km (vermelho), 84km (azul) e 87 km (magenta) sobre São João do Cariri, Cachoeira Paulista e Santa Maria. O vento zonal (preto) e temperatura (cinza) para 10 hPa na latitude de 60° N também são representados em cada gráfico. Dados dos meses de janeiro e fevereiro de 2005.



Os ventos zonais da região entre 81 km e 87 km de altitude sobre as três localidades, apresentam um comportamento em que sua velocidade de 20 m/s (para leste) começa a decrescer após o dia 15 de janeiro, invertendo para oeste após o dia 20 de janeiro, para depois do dia 30 retornar sua direção para leste. Essas mudanças no vento zonal coincidem com a amplificação da onda de quase 2 dias, a qual ocorre tipicamente durante janeiro de cada ano. Em janeiro de 2005 a onda de quase 2 dias apresentou amplificações entre os dias 5 e 10 e entre os dias 20 e 31 de janeiro, sendo mais intensa sobre São João do Cariri, cujos resultados foram reportados por ARAÚJO et al. (2014).

As estruturas verticais e latitudinais das médias zonais do vento zonal para o mês de janeiro de 2005, obtidas a partir do modelo MUAM, estão representadas na Figura 7, para a situação em que ondas planetárias não estão presentes (esquerda) e para o caso em que as ondas planetárias estacionárias estão ativadas no modelo.

Figura 7 - Seções transversais em latitude e altura do vento zonal médio representativo do mês de janeiro de 2005, segundo o modelo MUAM, para situação sem ondas planetárias (esquerda) e com ondas planetárias estacionárias (direita).

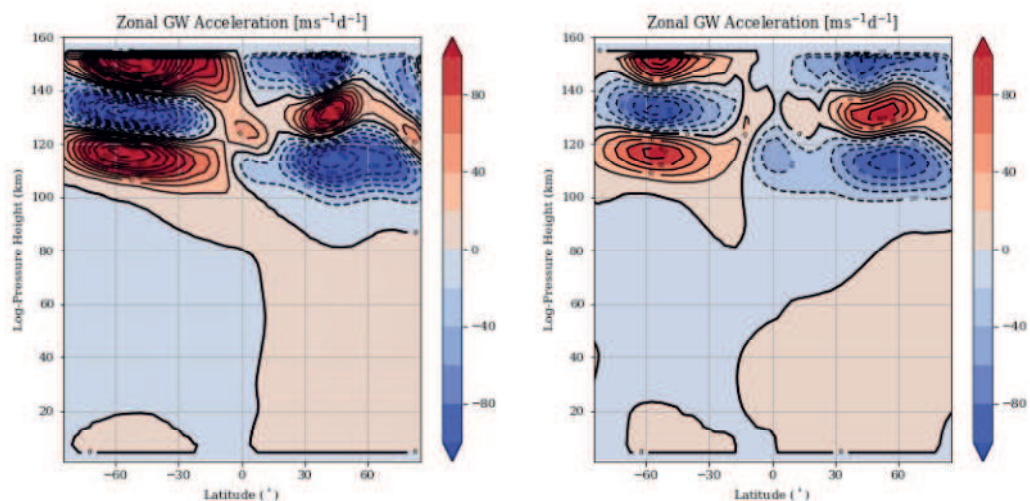


Comparando-se os gráficos é possível perceber que os ventos entre 20 e 100 km de altura são afetados na presença de ondas planetária, as quais se constituem em uma característica do inverno do hemisfério norte. Quando as ondas são

ativadas no modelo, surgem dois pequenos jatos de vento para leste em torno do equador (35 km e 65 km), enquanto o jato para oeste em 115 km torna-se mais intenso. Outra característica interessante que é observada, diz respeito ao alargamento latitudinal do regime de vento para leste da região entre 20 e 100 km de altura, o qual chega a invadir o hemisfério de verão, comprimindo assim o jato de vento para oeste da mesosfera do hemisfério sul.

Para avaliar o impacto devido as ondas de gravidade no comportamento do vento da região MLT do hemisfério sul, a aceleração do vento zonal médio devido a essas ondas foi estimada a partir dos dados do modelo e os resultados são apresentados na Figura 8, para o caso em que o modelo MUAM foi executado sem ondas planetárias (esquerda) e com ondas planetárias (direita).

Figura 8 - Seções transversais em latitude e altura da aceleração do vento zonal médio devido a ondas de gravidade representativo do mês de janeiro de 2005, segundo o modelo MUAM, para situação sem ondas planetárias (esquerda) e com ondas planetárias estacionárias (direita).



Conforme pode ser observado, as contribuições das ondas de gravidade para a aceleração do vento zonal são significativas para as altitudes acima de 100 km. Também é possível perceber que na presença de ondas de gravidade as contribuições para a aceleração do vento zonal são menores do que o fornecido pelo modelo básico sem ondas planetárias. Verifica-se ainda que entre 80 e 100 km

(região MLT) praticamente não se observa a aceleração do vento zonal devido as ondas de gravidade no modelo.

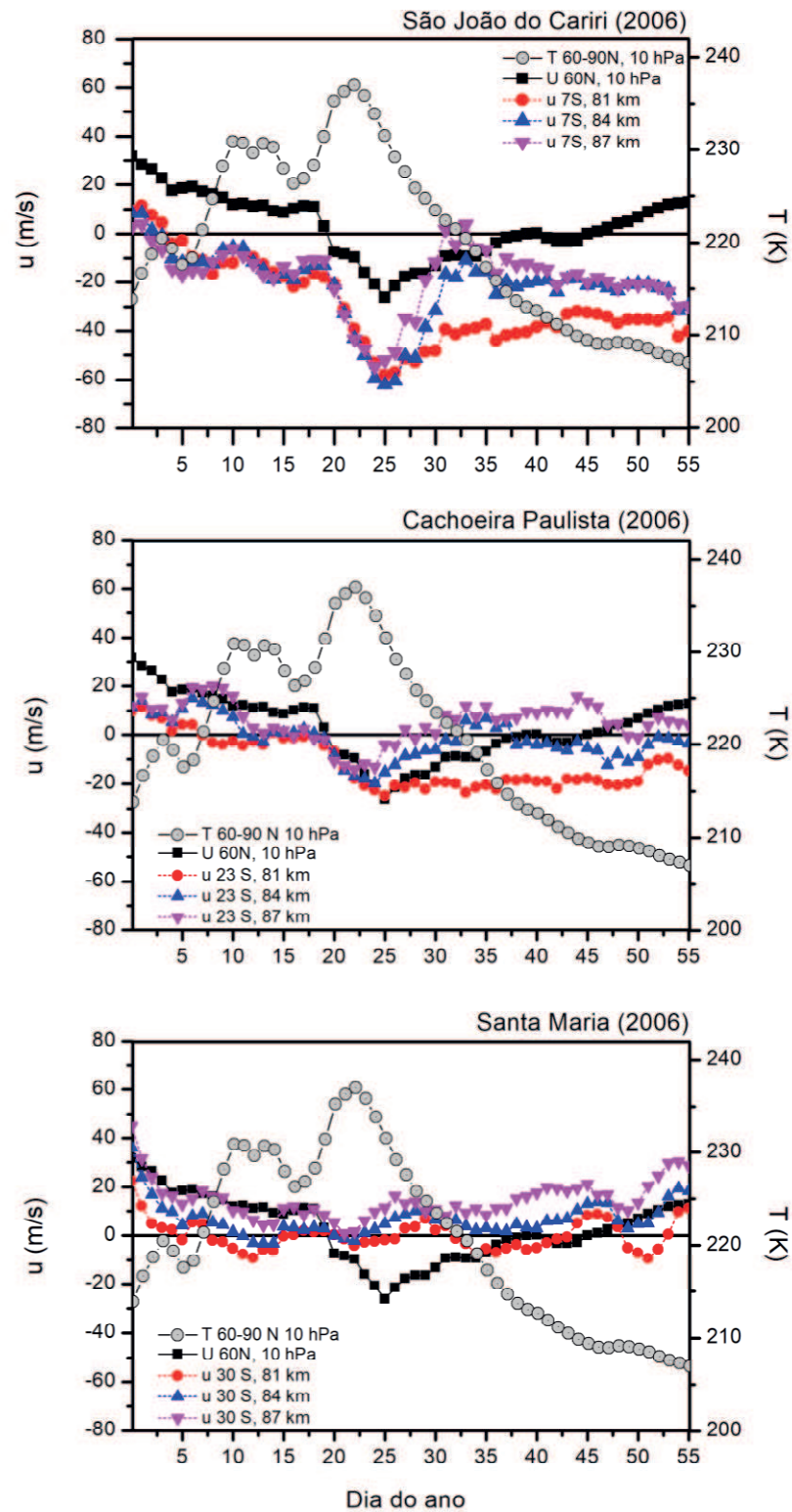
Diante desses resultados, tem-se que as mudanças verificadas no vento zonal durante o mês de janeiro de 2005, quando o vento para leste enfraqueceu e mudou de direção, provavelmente não ocorreu devido a deposição de energia devida as ondas de gravidade e, uma vez que tal comportamento coincidiu com a presença da onda de quase 2 dias, a mudança experimentada pelo vento zonal da região MLT no hemisfério sul, deveu-se a deposição de energia e momentum devidas a quebra da onda de quase 2 dias, a qual se propaga para oeste, de modo que a deposição de energia e momentum causa uma aceleração para oeste nos ventos dessa região.

## **4.2 Verão de 2005/2006**

No verão de 2005/2006 foram registrados eventos de aquecimento abrupto da estratosfera polar no hemisfério norte. Dentre os eventos SSW, o ocorrido em meados de janeiro foi classificado como intenso (Major SSW).

Os ventos zonais para 81 km (vermelho), 84km (azul) e 87 km (magenta) para São João do Cariri (topo), Cachoeira Paulista (meio) e Santa Maria (embaixo), juntamente com o vento zonal (preto) e temperatura (cinza) para 10 hPa na latitude de 60° N, referentes aos meses de janeiro e fevereiro de 2006, são representados na Figura 9.

Figura 9 - Ventos Zonais para 81 km (vermelho), 84km (azul) e 87 km (magenta) sobre São João do Cariri, Cachoeira Paulista e Santa Maria. O vento zonal (preto) e temperatura (cinza) para 10 hPa na latitude de 60° N também são representados em cada gráfico. Dados dos meses de janeiro e fevereiro de 2006.



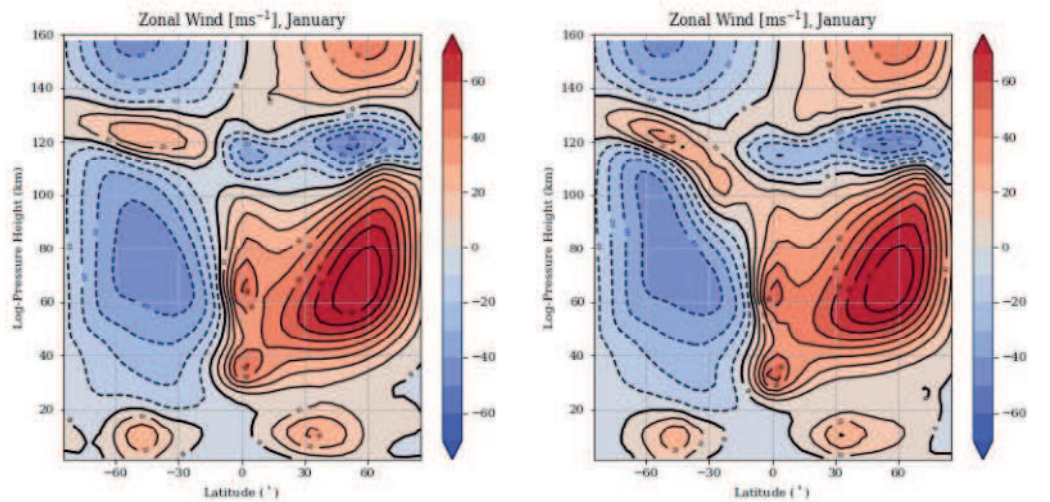
Os ventos zonais da região entre 81 km e 87 km de altura sobre as três localidades, entre o dia 1° e o dia 20 de janeiro seguem o mesmo comportamento observado no vento zonal em 10 hPa na latitude de 60°N. Os ventos sobre São João do Cariri decrescem de 10 m/s (para leste) em 1° de janeiro alcançando -15 m/s (para oeste) no dia 5, permanecendo assim até o dia 20 de janeiro, quando experimenta uma aceleração (para oeste) de -8 m/s.dia entre os dias 20 e 25. O vento zonal em 10 hPa e 60°N tem direção para leste até o dia 20 quando muda para oeste, permanecendo assim até o dia 8 de fevereiro (dia 38), registrando uma aceleração de -4 m/s.dia entre os dias 20 e 25 de janeiro. Os ventos zonais sobre Cachoeira Paulista registraram uma aceleração de -2,6 m/s.dia entre os dias 20 e 24, enquanto sobre Santa Maria verificou-se uma aceleração (para leste) de +2.1 m/s.dia entre os dias 22 e 27 de janeiro.

A onda de quase 2 dias foi ativa durante todo o mês de janeiro evanescendo após o dia 30, em que as amplitudes alcançaram valores maiores do que 70 m/s (Araújo et al., 2014). As altas amplitudes da onda de quase 2 dias durante o mês de janeiro de 2006 parecem indicar uma conexão com o SSW intenso, conforme foi reportado por LIMPASUVAN e WU (2009) e LIMA et al. (2012). Análises da evolução das ondas de quase 2 dias no verão austral de 2006 por MCCORMACK et al. (2009) usando o modelo NOGAPS-ALPHA (US Navy Operational Global Atmospheric Prediction System-Advanced Level Physics, High Altitud), indicaram que a combinação da advecção do momentum horizontal incrementada pela circulação meridional residual e circulações inercialmente instáveis, relacionadas à quebra de ondas planetárias no inverno estratosférico subtropical do hemisfério norte, favoreceu as condições de instabilidade na região tropical e, portanto, proporcionaram à amplificação anormal da onda de 2 dias durante esse período.

É interessante notar que as mudanças nos ventos zonais sobre São João do Cariri e Cachoeira Paulista ocorrem antes mesmo da onda de quase 2 dias evanescer e que o comportamento dos ventos zonais mais se assemelham com o vento zonal em 10 hPa e 60°N, indicando assim uma conexão entre os ventos da região MLT em latitudes baixas do hemisfério sul e o vento zonal em 10 hPa e 60°N.

As estruturas verticais e latitudinais das médias zonais do vento zonal para o mês de janeiro de 2006, obtidas a partir do MUAM, estão representadas na figura 10.

Figura 10 - Seções transversais em latitude e altura do vento zonal médio representativo do mês de janeiro de 2006, segundo o modelo MUAM, para situação com ondas planetárias (esquerda) e com essas ondas amplificadas em 20% (direita).

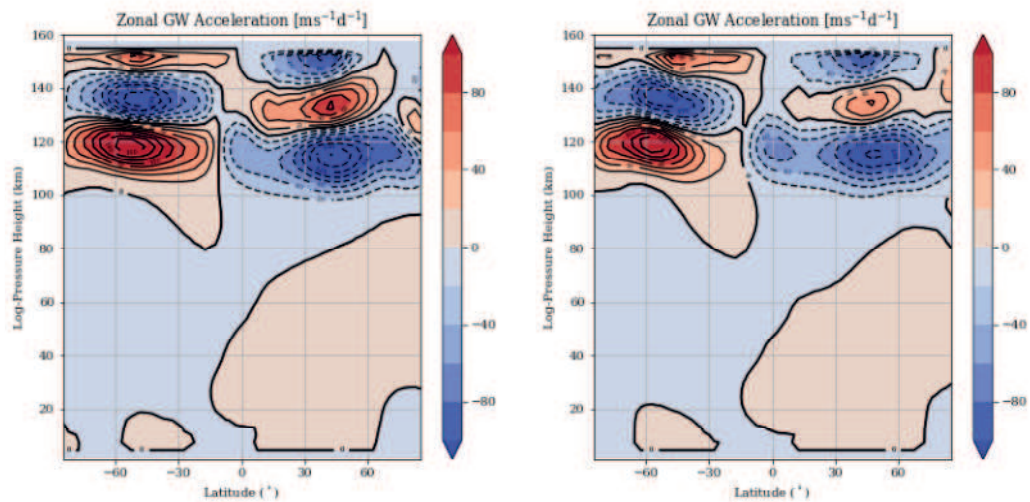


A estrutura vertical e latitudinal dos ventos médios modelados para janeiro de 2006, com as ondas planetárias ativadas, muito se assemelha a aquela referente a janeiro de 2005. Contudo, para o caso em que as ondas planetárias foram amplificadas em mais 20% (gráfico à direita da Figura 10), verifica-se que o jato de vento zonal para oeste da mesosfera de verão (hemisfério sul) é distorcido, sugerindo assim maior instabilidade, o que pode acarretar em uma maior amplificação da onda de quase 2 dias. Além disso, observa-se ainda uma continuidade do regime de vento zonal para leste entre os hemisférios norte e sul nas altitudes acima de 90 km até 30°S. Este fato favorece a invasão de ondas planetárias desde o hemisfério de inverno (norte) para o de verão (sul).

O impacto devido as ondas de gravidade no comportamento do vento da região MLT do hemisfério sul, pode ser visto a partir da aceleração do vento zonal médio devido a essas ondas estimada a partir dos dados do modelo, em que os resultados são representados na Figura 11, para o caso em que o modelo MUAM foi

executado com ondas planetárias (esquerda) e com ondas planetárias amplificadas em 20% (direita).

Figura 11 - Seções transversais em latitude e altura da aceleração do vento zonal médio devido a ondas de gravidade representativo do mês de janeiro de 2006, segundo o modelo MUAM, para situação com ondas planetárias (esquerda) e com as ondas amplificadas em mais 20% (direita).



Conforme pode ser visto nos gráficos, assim como para janeiro de 2005, os ventos zonais da região MLT do hemisfério sul não parecem ser impactados pelas ondas de gravidade, de acordo com o modelo MUAM, em ambos os casos, ou seja, quando o modelo foi executado com ondas planetárias e com essas ondas amplificadas em 20%.

### 4.3 Verão de 2007/2008

Os ventos zonais para 81 km (vermelho), 84km (azul) e 87 km (magenta) para São João do Cariri (topo), Cachoeira Paulista (meio) e Santa Maria (embaixo), juntamente com o vento zonal (preto) e temperatura (cinza) para 10 hPa na latitude de 60° N, referentes aos meses de janeiro e fevereiro de 2008, são representados na Figura 12.

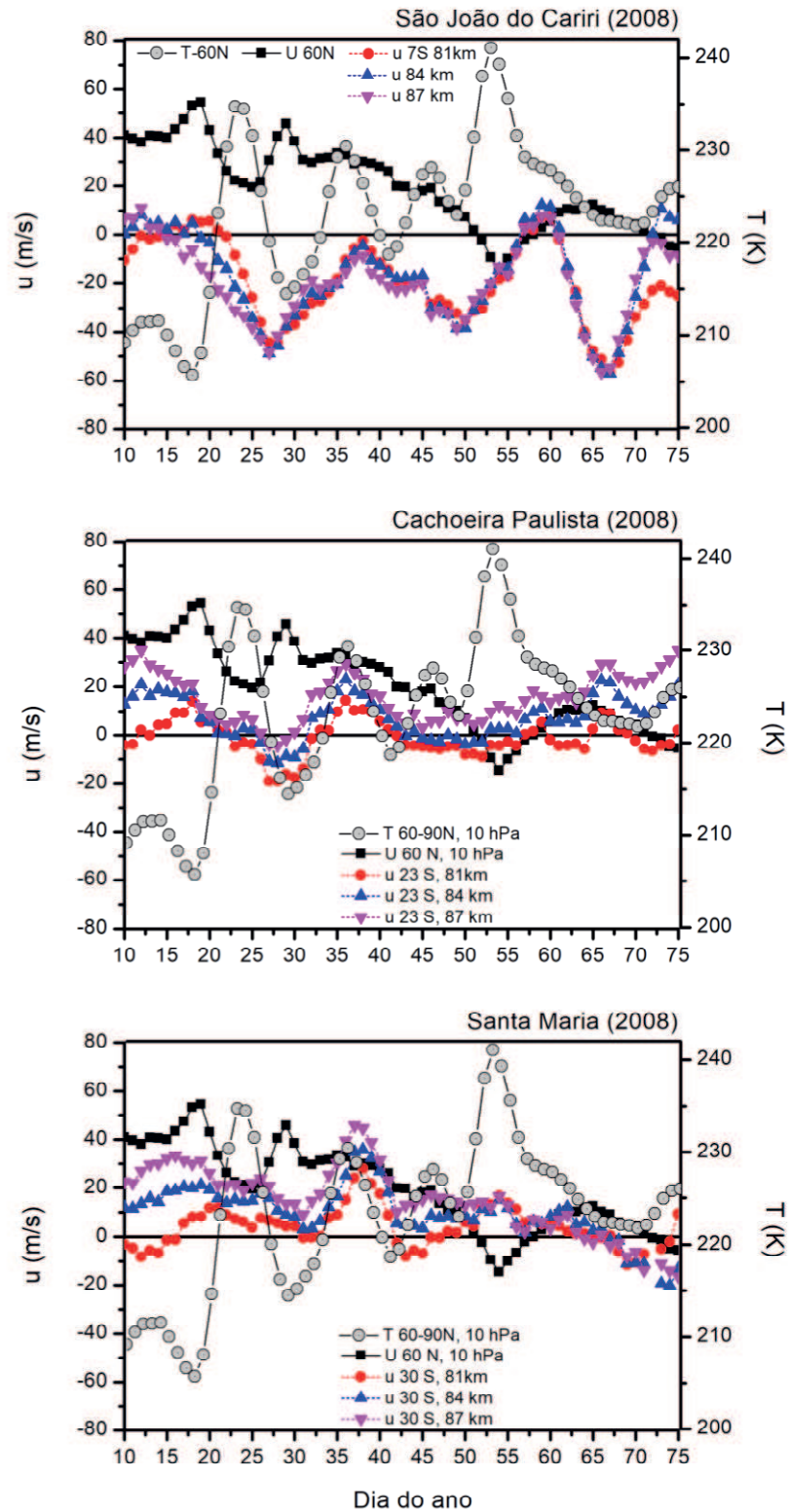
No verão de 2007/2008 foram registrados eventos de aquecimento abrupto da estratosfera polar no hemisfério norte entre os meses de janeiro e fevereiro. A partir



do dia 18 a temperatura da estratosfera polar norte aumentou bruscamente de 205 K para 235 K no dia 23 de janeiro, o que foi acompanhado por uma desaceleração do vento zonal (-8 m/s.dia) em 10 hPa e 60°N, contudo o vento permaneceu na direção para leste. Outros dois SSWs menores (minor) foram registrados na sequência, em torno dos dias 5 e 15 de fevereiro, respectivamente (dias 36 e 46). Em torno do dia 22 de fevereiro (dia 53) um SSW intenso (major) ocorreu, em que o vento zonal da estratosfera polar norte mudou a direção para oeste entre os dias 21 e 27 de fevereiro (dias 52 e 58).

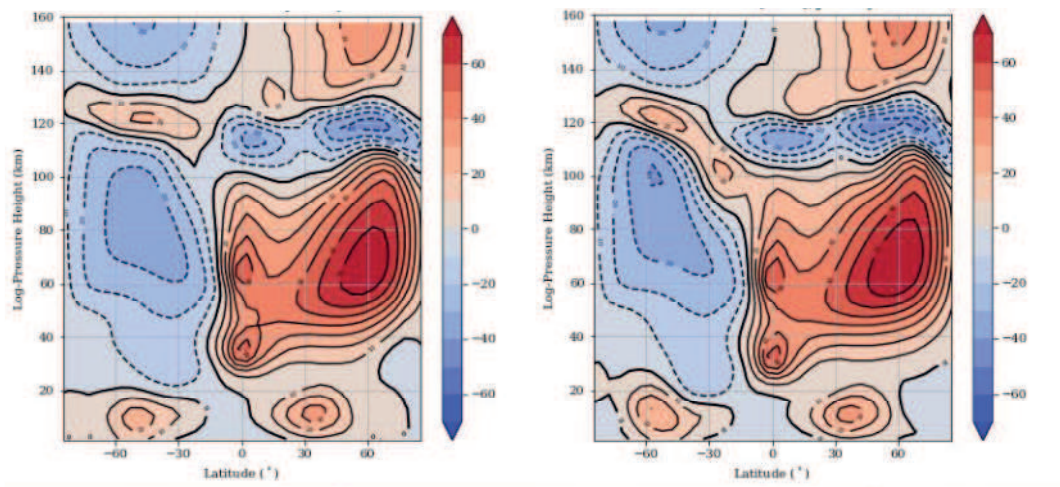
Durante os meses de janeiro e fevereiro de 2008 a onda de quase 2 dias apresentou dois momentos de amplificação, o primeiro entre os dias 5 e 20 de janeiro e o segundo entre os dias 4 e 9 de fevereiro (dias 35 e 40). Durante o primeiro episódio os ventos zonais da região MLT sobre as três localidades apresentaram comportamentos distintos uns dos outros, contudo, após o dia 20 de janeiro os ventos zonais da região MLT apresentaram uma taxa de decrescimento (aceleração para oeste) nas três localidades, sendo que em Santa Maria a taxa foi menor. Durante a segunda amplificação da onda de 2 dias os ventos zonais diminuíram suas velocidades a partir do dia 5 de fevereiro, coincidindo com o segundo SSW menor (minor). Durante o evento SSW intenso, os ventos zonais da região MLT apresentaram comportamentos distintos uns dos outros, porém, o vento zonal em São João do Cariri registrou uma taxa de aceleração para oeste de -10,5 m/s.dia entre os dias 1° e 8 de março (dias 60 e 67), ou seja, após o aquecimento intenso.

Figura 12 - Ventos Zonais para 81 km (vermelho), 84km (azul) e 87 km (magenta) sobre São João do Cariri, Cachoeira Paulista e Santa Maria. O vento zonal (preto) e temperatura (cinza) para 10 hPa na latitude de 60° N também são representados em cada gráfico. Dados dos meses de janeiro e fevereiro de 2008.



As estruturas verticais e latitudinais das médias zonais do vento zonal para o mês de fevereiro, obtidas a partir do modelo MUAM, estão representadas na Figura 13, para a situação em que ondas planetárias estão presentes (esquerda) e para o caso em que as ondas planetárias estacionárias foram incrementadas em 20% (direita).

Figura 13 - Seções transversais em latitude e altura do vento zonal médio representativo do mês de fevereiro de 2008, segundo o modelo MUAM, para situação com ondas planetárias (esquerda) e com essas ondas amplificadas em 20% (direita).



As estruturas verticais em latitudes dos ventos zonais obtidas com o modelo MUAM para o mês de fevereiro apresentam as mesmas características daquelas obtidas para o mês de janeiro de 2006 (Figura 10), porém os ventos de fevereiro são mais fracos do que os de janeiro.

Os ventos zonais da região MLT do hemisfério sul para o mês de fevereiro também não parecem ser impactados pelas ondas de gravidade simuladas com o modelo MUAM, em ambos os casos.

#### **4.4 Impacto das ondas atmosféricas na dinâmica da região MLT**

Durante o mês de janeiro a configuração do vento zonal entre 20 e 100 km de altura, apresenta jatos em ambos os hemisférios, em que no hemisfério de inverno (norte) a direção do vento aponta para leste, enquanto no hemisfério de verão (sul), a direção do vento zonal aponta para oeste, os quais são reproduzidos pelo modelo MUAM.

Nessas condições, ondas planetárias geradas na baixa atmosfera do hemisfério sul não alcançam a região MLT, uma vez que o vento no jato da alta estratosfera e baixa termosfera aponta para oeste, portanto, as ondas planetárias que se propagam para oeste são “absorvidas” pelo vento estratosférico e não mais se propagam verticalmente. Por outro lado, as ondas de gravidade que alcançam as altitudes mais elevadas, são aquelas que se propagam para leste, uma vez que o vento estratosférico para oeste se constitui em uma região de bloqueio para ondas de gravidade que se propagam na mesma direção. Nesse caso, as ondas de gravidade que se propagam para leste atingem altitudes mais elevadas e a quebra dessas ondas provocam aceleração do vento zonal para leste, fato esse que é reproduzido pelo modelo MUAM (Figuras 8 e 11).

Diante disso, é necessário verificar outras possibilidades com potencial para explicar a taxa de mudança para oeste no vento zonal da região MLT em baixas latitudes do hemisfério sul durante o verão, e o incremento observado durante os eventos de SSW's.

Analisando a estrutura vertical em latitude do vento zonal dos meses de janeiro e fevereiro obtidos com o modelo MUAM (Figuras 7, 10 e 13), observa-se que o regime de vento zonal para leste da região entre 20 e 100 km no hemisfério de inverno (norte), invade o hemisfério de verão (até cerca de 15°S) quando o modelo é executado com as ondas planetárias ativadas. Nota-se ainda que no caso em que as ondas planetárias são intensificadas no modelo (amplificadas em mais 20% do valor típico do modelo), observa-se uma conexão entre o vento para leste da mesosfera do hemisfério norte com o vento para leste da termosfera do hemisfério sul, fazendo com que o vento entre 80 e 100 km do hemisfério sul também aponte para leste.

Essa configuração permite que as ondas planetárias, como também ondas de gravidade, que se propagam para oeste no hemisfério norte, e na região em torno do equador, invadam o hemisfério de verão na porção superior da mesosfera. A deposição de momentum devido à quebra dessas ondas, que se propagam para oeste, fornece a força para o vento mudar na direção oposta, ou seja, acelera para oeste.

Verifica-se que as mudanças no vento zonal da região MLT do hemisfério sul são mais evidentes em São João do Cariri do que em Cachoeira Paulista, enquanto que os ventos sobre Santa Maria não exibem mudanças perceptíveis entre situações com ou sem eventos de SSW.

## 5. CONCLUSÕES

A pesquisa realizada teve como objetivo simular a resposta dinâmica da mesosfera para os verões de 2004/2005, 2005/2006 e 2007/2008 utilizando o modelo de circulação geral da média e alta atmosfera (MUAM), para entender as mudanças ocorridas nas observações realizadas nas medidas de ventos por radar meteorológico em São João do Cariri (7,4°S, 35°S), em Cachoeira Paulista (22,7°S, 45,0°O) e em Santa Maria (29,7°S, 53,7°O).

O comportamento dos ventos da região MLT sobre as três localidades é caracterizado por uma taxa de mudança para oeste em meados de janeiro, contudo, essa taxa de mudança (aceleração para oeste) é incrementada quando ocorre aquecimento abrupto da estratosfera polar no hemisfério de inverno (norte). Na tentativa de explicar o incremento na taxa de mudança do vento zonal da região MLT do hemisfério sul, o modelo MUAM foi executado em 3 diferentes casos: sem ondas planetárias, com as ondas planetárias ativadas e com as ondas planetárias amplificadas em 20%.

A partir da análise da estrutura vertical em latitude do vento zonal dos meses de janeiro e fevereiro modelados pelo MUAM, tem-se que o vento zonal para leste na região entre 20 e 100 km no hemisfério norte, invade o hemisfério de verão até aproximadamente 15°S quando as ondas planetárias ativadas estão ativadas no

modelo e, no caso em que as ondas planetárias são intensificadas, a conexão entre o vento para leste da mesosfera do hemisfério norte com o vento para leste da termosfera do hemisfério sul, entre 80 e 100 km do hemisfério sul, permite que as ondas planetárias, como também ondas de gravidade, invadam o hemisfério de verão na região MLT.

Uma vez que a deposição de momentum devido à quebra das ondas que se propagam para oeste, acelera o vento da região MLT na direção para oeste, é possível sugerir que as mudanças no vento zonal da região MLT do hemisfério sul são decorrentes da invasão inter-hemisférica das ondas planetárias e de gravidade desde o hemisfério de inverno para o hemisfério de verão, seguindo o guia de onda proporcionado pelo vento zonal para leste.

Por se tratar de uma área com uma dinâmica bem complexa, não podemos afirmar que as razões observadas são as únicas razões para que ocorram essas alterações na dinâmica da MLT, principalmente pelo fato de que o modelo utilizado tem a limitação de processar no máximo um ano de dados, além de não suportar a inclusão da QBO, que poderia ajudar a chegar a uma resposta mais significativa.

## 6. REFERÊNCIAS

ALVES, E. O. **Identificação de Ondas Atmosféricas ultra-rápidas de Kelvin nos Ventos Meteóricos sobre São João do Cariri-PB (7,4°S;36,5°O)**. Campina Grande - PB, 2007.

ALVES, E. O. **Influência em curta duração de ondas planetárias na dinâmica das mares atmosféricas observadas nos ventos meteóricos de São João do Cariri-PB**. Campina Grande - PB. UFCG, 2012.

ANDREWS, D. G. **An introduction to atmospheric physics**. [s.l.]. Cambridge University Press, 2010.

ANDREWS, D. G.; HOLTON, J. R.; LEOVY, C. B. **Middle Atmosphere Dynamics**. Orlando - FL: Academic Press, 1987.

ARAÚJO, L. R. et al. **Planetary wave seasonality from meteor wind measurements at 7.4° S and 22.7° S**. *Annales Geophysicae*, v. 32, n. 5, p. 519–531, 2014.

BAGESTON, J. V. **Caracterização de ondas de gravidade mesosférica na estação antártica comandante Ferraz**. São José dos Campos - SP. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2010.

BANKS, P. M.; KOCKARTS G. **Aeronomy [by] P. M. Banks [and] G. Kockarts**. [s.l.]. Academic Press New York, 1973.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, Tempo e Clima**. 9 ed ed. [s.l.] Bookman Editora, 2012.

BATISTA, P. P. et al. **Structure of the mean winds and tides in the meteor region over Cachoeira Paulista, Brazil (22.7°S,45°W) and its comparison with models**. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 66, n. 6–9, p. 623–636, abr. 2004.

BEER, T. **Atmospheric Waves**. London - UK: Adam Hilger, 1974.

BORGES, F. B. **Variações nas mares atmosféricas e nos ventos meteóricos observados em São João do Cariri – PB e em Cachoeira Paulista – SP**. Campina Grande - PB. UEPB, 2010.

CHWIF, L. **Redução de Modelos de Simulação de Eventos Discretos na sua Concepção: Uma Abordagem Causal**. São Paulo - SP. USP, 1999.

DAY, K. A.; HIBBINS, R. E.; MITCHELL, N. J. **Aura MLS observations of the westward-propagating s=1, 16-day planetary wave in the stratosphere, mesosphere and lower thermosphere**. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 11, n. 9, p. 4149–4161, 2011.

FRÖHLICH, K. **The Quasi Two-Day Wave - Its Impact on the zonal mean circulation and wave-wave interactions in the middle atmosphere.** [s.l.] Universität Leipzig, 2005.

FRÖHLICH, K.; POGORELTSEV, A.; JACOBI, C. **The 48 Layer COMMA-LIM Model.** Leipzig. Universität Leipzig, 2003.

GURUBARAN, S. et al. **The mesospheric quasi-2-day wave over Tirunelveli (8.7°N).** Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 63, n. 10, p. 975–985, jul. 2001.

HAGAN, M. E.; FORBES, J. M.; VIAL, F. **On modeling migrating solar tides.** Geophysical Research Letters, 1995.

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment : an introduction to geospace--the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere.** [s.l.] Cambridge University Press, 1992.

HOCKING, W. K.; FULLER, B.; VANDEPEER, B. **Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modem digital technology.** Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 63, p. 155–169, 2001.

HOFFMANN, P.; JACOBI, C. **Simulation of sudden stratospheric warmings with the Middle and Upper Atmosphere Model.** Leipzig. Universität Leipzig, 2012.

HOLTON, J. R.; HAKIM, G. J. **An introduction to dynamic meteorology.** 5th Edition ed. [s.l.] Academic Press, 2012.

HUANG, F. T. et al. **Stratospheric and mesospheric temperature variations for the quasi-biennial and semiannual (QBO and SAO) oscillations based on measurements from SABER (TIMED) and MLS (UARS).** Annales Geophysicae, v. 24, p. 2131–2149, 2006.

JACOBI, C. et al. **El Niño influence on the mesosphere/lower thermosphere circulation at midlatitudes as seen by a VHF meteor radar at Collm (51.3° N, 13° E).** Adv. Radio Sci, v. 15, p. 1–8, 2017.

LASKAR, F. I.; PALLAMRAJU, D.; VEENADHARI, B. **Vertical coupling of atmospheres: dependence on strength of sudden stratospheric warming and solar activity.** Earth, Planets and Space, v. 66, n. 1, p. 94, 2014.

LILIENTHAL, F. et al. **MUAM Documentation.** St. Petersburg, 2015.

LIMA, L. M. **Observação de ondas planetárias na região da mesopausa equatorial e de baixas latitudes do hemisfério sul.** São José dos Campos - SP. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2004.

LIMA, L. M. et al. **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, 2004.



- LIMA, L. M. et al. **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, 2005.
- LIMA, L. M. et al. **First observation of the diurnal and semidiurnal oscillation in the mesospheric winds over São João do Cariri-PB, Brazil**. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, 2006.
- LIMA, L. M. et al. **Sudden stratospheric warming effects on the mesospheric tides and 2-day wave dynamics at 7°S**. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 78–79, p. 99–107, 2012.
- LIMPASUVAN, V. et al. **The Life Cycle of the Northern Hemisphere Sudden Stratospheric Warmings**. *Journal of Climate*, v. 17, n. 13, p. 2584–2596, 2004.
- LIMPASUVAN, V.; WU, D. L. **Anomalous two-day wave behavior during the 2006 austral summer**. *Geophysical Research Letters*, v. 36, n. 4, p. L04807, 28 fev. 2009.
- LINDZEN, R. S. et al. **A Theory of the Quasi-Biennial Oscillation**. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 25, n. 6, p. 1095–1107, 1 nov. 1968.
- LUO, Y. et al. **The 16-day planetary waves: multi-MF radar observations from the arctic to equator and comparisons with the HRDI measurements and the GSWM modelling results**. *Annales Geophysicae*, v. 20, n. 5, p. 691–709, 2002.
- MANSON, A. H. et al. **Wave activity (planetary, tidal) throughout the middle atmosphere (20-100km) over the CUJO network: Satellite (TOMS) and Medium Frequency (MF) radar observations**. *Annales Geophysicae*, v. 23, n. 2, p. 305–323, 2005.
- MATSUNO, T.; MATSUNO, T. **A Dynamical Model of the Stratospheric Sudden Warming**. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 28, n. 8, p. 1479–1494, 1971.
- MCCORMACK, J. P.; COY, L.; HOPPEL, K. W. **Evolution of the quasi 2-day wave during January 2006**. *Journal of Geophysical Research*, v. 114, n. D20, p. D20115, 2009.
- MONGSTAD, E.; ESPY, P. J. **Variability of the Quasi Two-Day Wave in the Mesosphere**. *Institutt for fysikk*, 2013.
- POGORELTSEV, A. **Simulation of planetary waves and their influence on the zonally averaged circulation in the middle atmosphere**. *Earth, Planets and Space*, v. 51, n. 7–8, p. 773–784, 1999.
- POGORELTSEV, A. I. et al. **Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere**. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 69, n. 17, p. 2083–2101, 2007.
- QIAN, L. et al. **Variability of thermosphere and ionosphere responses to solar flares**. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 116, n. A10, p. n/a-n/a,

2011.

REED, R. J.; REED, R. J. **Some features of the annual temperature regime in the tropical stratosphere.** Monthly Weather Review, v. 90, n. 6, p. 211–215, 1962.

ROBLE, R. G.; RIDLEY, E. C. **A thermosphere-ionosphere-mesosphere-electrodynamics general circulation model (time-GCM): Equinox solar cycle minimum simulations (30–500 km).** Geophysical Research Letters, 1994.

SALBY, M. L. **Fundamentals of atmospheric physics.** [s.l.] Academic Press, 1996.

SANDFORD, D. J. **Dynamics of the Stratosphere, Mesosphere and Thermosphere.** University of Bath, 2008.

SANTOS, P. V. **Medidas da temperatura mesosférica obtida por radar meteórico na região de São João do Cariri -PB ( 7,4° S; 36,5° W).** Campina Grande - PB. UFCG, 2010.

SHEPHERD, M. G. et al. **Stratospheric warming effects on the tropical mesospheric temperature field.** Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 69, n. 17–18, p. 2309–2337, 2007.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. **A Practical Guide to Wavelet Analysis.** Bulletin of the American Meteorological Society, v. 79, n. 1, p. 61–78, jan. 1998.

VOLLAND, H. **Atmospheric Tidal and Planetary Waves.** Dordrecht: Springer Netherlands, 1988.

ZHAO, Y. et al. **Seasonal oscillations in mesospheric temperatures at low-latitudes.** Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 69, n. 17–18, p. 2367–2378, 2007.

## 4. ANEXOS

### 4.1. Observações anteriores a instalação do MUAM

Durante o trabalho foi executado o MUAM em diversos computadores, com configurações distintas, foi observado que a utilização de computadores com processadores Intel se mostrou como sendo a opção mais acertada devido a presença de algumas instruções que melhoram a performance do compilador Fortran que também foi desenvolvido pela companhia.

Observou-se também que o MUAM não consegue trabalhar com múltiplos núcleos de processamento simultaneamente, mas que o mesmo tem um ganho de performance de acordo com a frequência do processador, sendo assim, um processador que possuir uma quantidade inferior de núcleos, mas um clock maior, terá um desempenho superior a um com uma grande quantidade de núcleos, mas o clock mais baixo.

Na configuração que utilizamos no projeto é obrigatória, a utilização de um sistema com pelo menos 12GB de memória de trabalho disponível, podendo ser apenas de memória RAM, ou o conjunto de memória RAM + SWAP.

Não foi observado um ganho de performance consistente com a utilização de memória para armazenamento do tipo SSD na máquina de trabalho, tendo o maior impacto apenas no momento da geração do arquivo NETCDF.

Por fim, não recomendamos a utilização do MUAM em máquinas virtuais, houve uma perda significativa de performance, aumentando em quase 100% o tempo gasto para a realização das tarefas.

## 4.2. Guia para a Instalação do MUAM

### Passo a Passo para a Instalação do MUAM

- Instalar o Ubuntu, de preferência a versão mais atualizada que estiver disponível.
- Atualizar a lista de arquivos dos repositórios e os pacotes disponíveis, através dos seguintes comandos
  - `sudo apt-get update`
  - `sudo apt-get upgrade`
- Em seguida instale as dependências necessárias, executando o seguinte comando:
  - `sudo apt-get install python-pip python-numpy python-scipy python-matplotlib python3-pip python3-numpy python3-scipy python3-matplotlib python3-netcdf4`
- O próximo passo é a instalação do Parallel Studio XE da intel, para isto, vá até o site <https://software.intel.com/en-us/qualify-for-free-software/student>
- Selecione a distribuição que será utilizada, no caso deste tutorial a versão Linux, em seguida preencha os dados necessários para receber sua chave para utilização acadêmica e efetue o download do mesmo.
- Após o download extraia o conteúdo do arquivo para uma pasta entre nesta pasta através do terminal, e execute o seguinte comando `sudo bash install-GUI.sh`
- Após isso irá abrir uma janela de instalação, siga os passos indicados para a instalação padrão e todo o conteúdo necessário será instalado.
- O próximo passo é ir na pasta `/home/usuário` (onde usuário é o nome do seu usuário no Ubuntu), Clicar com o botão direito do mouse dentro da pasta e selecionar a opção “Abrir Terminal Aqui”.
- Já no terminal digite o seguinte comando:
  - `Nano .bashrc`

- No arquivo aberto, navegue até a última linha e digite o seguinte comando:
  - `source /<install-dir>/bin/compilervars.sh -arch <arch> -platform <platform>`, onde `install-dir` é o diretório onde o `parallel-studio` foi instalado, geralmente `/opt/intel`, `arch` é a arquitetura, na maioria dos casos `intel64`, e `platform` é a plataforma que no caso é `Linux`.
- Em seguida baixe o conteúdo do MUAM no seguinte endereço <http://viniciusmatias.com.br/mestrado>
  - Extraia o arquivo baixado
  - Copie pasta do MUAM para o diretório de sua preferência
  - Entre na pasta `mak` presente na raiz do MUAM, clique com o botão direito do mouse dentro da pasta e selecione a opção “Abrir Terminal Aqui”.
- Digite no terminal o seguinte comando:
  - `Sudo chmod +x *.sh`

### 4.3. Como utilizar o MUAM

- Entre no diretório onde o MUAM está instalado, dentro da pasta do MUAM, procure o diretório MAK, e entre no mesmo.
- Dentro desta pasta existirão dois arquivos, o `muam_month.sh` é o responsável pela execução do muam como um todo, e o `imake48.sh` é o responsável pela compilação do executável do muam pelo Fortran e é carregado automaticamente pelo `muam_month.sh`, não recomendamos fazer nenhuma alteração neste arquivo.
- Para alterar o Mês a ser processado, abra o arquivo `muam_month.sh` em um editor de sua preferência e edite as linhas referentes ao mês e o ano.
- Em seguida, clique com o botão direito do mouse dentro da pasta MAK e selecione a opção “Abrir Terminal Aqui”.
- Digite no terminal o seguinte comando:
  - `bash muam_month.sh`
- Para alterar alguma variável como por exemplo, quais ondas serão utilizadas ou qual a amplitude das mesmas, é necessário alterar o arquivo `muam_mod_clear.txt` que está presente na pasta RUN. É recomendado sempre manter uma cópia do arquivo original, para o caso de querer retornar ao estágio padrão.