



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
MESTRADO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

JULIANA CARDOSO HERCULANO

**COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA OBTIDA POR RADAR
METEÓRICO NA REGIÃO TROPICAL DURANTE O CICLO SOLAR 23**

CAMPINA GRANDE

2015

JULIANA CARDOSO HERCULANO

**COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA OBTIDA POR RADAR
METEÓRICO NA REGIÃO TROPICAL DURANTE O CICLO SOLAR 23**

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

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

CAMPINA GRANDE

2015

É expressamente proibida 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 da dissertação.

H539c Herculano, Juliana Cardoso.

Comportamento da temperatura obtida por radar meteórico na região tropical durante o ciclo solar 23 [manuscrito] / Juliana Cardoso Herculano. - 2014.

54 p. : il. color.

Digitado.

Dissertação (Mestrado Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental".

1. Temperatura. 2. Variação de temperatura. 3. Fluxo solar.
4. Ciclo solar 23. I. Título.

21. ed. CDD 551.525

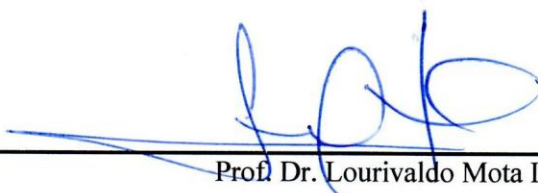
JULIANA CARDOSO HERCULANO

**COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA OBTIDA POR RADAR
METEÓRICO NA REGIÃO TROPICAL DURANTE O CICLO SOLAR 23**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, em cumprimento aos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Aprovada em 27/05/2015.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima

(Orientador – Universidade Estadual da Paraíba - UEPB)



Prof. Dra. Ana Roberta Paulino

(Examinadora Interna – Universidade Estadual da Paraíba - UEPB)



Prof. Dr. Carlos Antônio Costa dos Santos

(Examinador Externo – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

A meus pais Ana Maria da Silva e Jose Cardoso da
Silva e a meu filho amado Luiz Guilherme Cardoso

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me apoiaram e me ajudaram a vencer mais esta etapa da minha vida.

Ao meu orientador Dr. Lourivaldo Mota Lima pelos conhecimentos compartilhados, pela orientação e apoio na realização deste projeto e por acreditar na minha capacidade de fazê-lo.

A CAPES pelo auxílio financeiro de dois anos de bolsa.

A UEPB (Universidade Estadual da Paraíba) pela oportunidade e utilização de suas instalações.

Aos colegas Sebastiao Nascimento, Ana Roberta Paulino, Sergiana L. de Almeida, Professor Dr. Edvaldo de Oliveira (Mará) pela paciência, companheirismo e amizade durante a realização desse trabalho.

Ao meu filho, Luiz Guilherme Cardoso, pelo amor, carinho, companheirismo e por sempre me apoiar e incentivar.

A meus pais Ana Maria da Silva e José Cardoso, a minha querida irmã Janaina Cardoso, e toda minha família pelo amor, carinho, compreensão e apoio que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

A todos muito obrigada!

RESUMO

Valores da temperatura em torno de 90 km de altura foram usados para investigar uma possível relação entre as variações da temperatura e o fluxo solar durante o ciclo solar 23. Os dados de temperatura foram obtidos a partir do tempo de decaimento do sinal meteórico em Cachoeira Paulista (22,7°S, 45,0°O). Para encontrar uma possível tendência de longo prazo e variações induzidas pela atividade solar nas médias anuais das temperaturas, as séries de dados foram submetidas à análise de regressão linear múltipla. Observou-se que ao longo do tempo as temperaturas obtidas através dos 2 métodos apresentam variações. A variação mostra-se mais notória para as temperaturas obtidas pelo método do gradiente, em que as amplitudes são maiores, assim como os respectivos desvios padrão. Para analisar o comportamento da temperatura durante o ciclo solar 23, as médias anuais dessazonalizadas, após a eliminação da influência da atividade solar, foram utilizadas e a tendência linear foi estimada. A temperatura média calculada pelo modelo de pressão tende a aumentar cerca de 0,035 K/ano quando todo o período de observação é considerado. Contudo, para o período compreendido entre máximo e o mínimo solar a temperatura média anual apresenta uma tendência de aumento de 0,166 K/ano. Os resultados mostram que as médias anuais das temperaturas dessazonalizadas após a remoção dos efeitos devido ao fluxo solar, obtidas pelo método do gradiente, seriam mais elevadas do que as originais para o período de declínio solar. Verifica-se que as temperaturas anuais dessazonalizadas praticamente não mudam quando a tendência temporal é removida, o que pode indicar que as temperaturas anuais dessazonalizadas obtidas pelo método do gradiente são fortemente afetadas pelo fluxo solar.

Palavras Chave: 1-Temperatura, 2-Ciclo Solar 23, 3- Variação de Temperatura

ABSTRACT

Temperature values around 90 km height were used to investigate a possible relationship between the variations of temperature and solar flux during the solar cycle 23. The temperature data were obtained from the meteoric signal decay time in Cachoeira Paulista (22.7 ° S, 45.0 ° W). To find a possible long-term trend and variations induced by solar activity in annual average temperatures, the data sets were analyzed by multiple linear regression. It was observed that over time the temperature obtained by the two methods show variations. The variation appears to be most pronounced for the temperatures obtained by the gradient method, in which the amplitudes are larger, as well as the respective standard deviations. To analyze the behavior of temperature during solar cycle 23, the seasonally adjusted annual averages, after eliminating the influence of solar activity, they were used and the linear trend was estimated. The average temperature calculated by the model pressure tends to increase about 0.035 K / year when the entire period of observation is considered. However, for the period between maximum and solar minimum the average annual temperature has a tendency of increase of 0.166 K / year. The results show that the annual average temperature of seasonally adjusted after removal of the effects due to solar flux obtained by the gradient method would be higher than the original period for the solar decline. It is noted that the annual temperature seasonally adjusted virtually no change when the time trend is removed, which may indicate that the annual temperature deseasonalized obtained by the gradient method are strongly affected by the solar flux.

Keywords: 1-temperature, Solar 2-Cycle 23, 3- Temperature Range

LISTA DE FIGURA

FIGURA 2.1: ESTRUTURA VERTICAL ANUAL MÉDIA DA TEMPERATURA ADAPTADO PARA O PORTUGUÊS DE AHRENS, C.D.: METEOROLOGY TODAY 9TH EDITION.....	15
FIGURA 3.1 - ESQUEMA DE ANTENAS TRANSMISSORA E RECEPTORAS DO RADAR SKIYMET.	26
FIGURA 3.2 – ILUSTRAÇÃO DO HARDWARE DO RADAR SKIYMET E OS CABOS ALIMENTADORES (A), E O SISTEMA DE ANTENAS RECEPTORAS DE SINAL (B).	27
FIGURA 3.5 – DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DE OCORRÊNCIAS DE METEOROS NÃO AMBÍGUOS, REGISTRADOS PELO RADAR METEÓRICO DE SÃO JOÃO DO CARIRI NO DIA 02 DE JANEIRO DE 2006.	30
FIGURA 4.1 – VALORES MÉDIOS MENSIS DO FLUXO DE RÁDIO SOLAR 10.7 CM PARA O CICLO 23.	33
FIGURA 4.2 - TEMPERATURAS DIÁRIAS NA ALTURA DO PICO DE METEOROS (4.2A) E NA ALTURA DE 90 KM (4.2B), OBTIDAS DURANTE OS PERÍODOS DE MARÇO DE 1999 A JULHO DE 2006 E DE SETEMBRO DE 2007 A OUTUBRO DE 2008 EM CACHOEIRA PAULISTA.	34
FIGURA 4.3 – MÉDIAS MENSIS DAS TEMPERATURAS OBTIDAS PELO MÉTODO DO GRADIENTE (A), PELO MÉTODO DA PRESSÃO COM OS DADOS DO NRLMSISE00 (B). OS DESVIOS PADRÃO SÃO REPRESENTADOS PELAS BARRAS DE ERRO E OS AJUSTES LINEARES PELAS LINHAS TRACEJADAS EM VERMELHO.	35
FIGURA 4.4 – MÉDIAS MENSIS (A) DAS TEMPERATURAS DESSAZONALIZADAS OBTIDAS PELO MÉTODO DO GRADIENTE (B) OS RESPECTIVOS RESÍDUOS DAS TEMPERATURAS.....	37
FIGURA 4.5 – MÉDIAS MENSIS (A) DAS TEMPERATURAS DESSAZONALIZADAS OBTIDAS PELO MÉTODO DA PRESSÃO OBTIDA A PARTIR DO MÉTODO DA PRESSÃO COM OS DADOS DO NRLMSISE00 (B) OS RESPECTIVOS RESÍDUOS DAS TEMPERATURAS.....	38
FIGURA 4.6 - RESÍDUOS DAS TEMPERATURAS OBTIDAS PELO MÉTODO DO GRADIENTE APÓS A REMOÇÃO DO EFEITO DO FLUXO DE RADIAÇÃO SOLAR, JUNTAMENTE COM O AJUSTE LINEAR EM AZUL.	39
FIGURA 4.7 - RESÍDUOS DAS TEMPERATURAS OBTIDAS PELO MÉTODO DO GRADIENTE APÓS A REMOÇÃO DA TENDÊNCIA NO TEMPO, JUNTAMENTE COM O AJUSTE LINEAR EM AZUL.	39
FIGURA 4.8 - RESÍDUOS DAS TEMPERATURAS OBTIDAS PELO MÉTODO DE PRESSÃO (NRLMSISE00) APÓS A REMOÇÃO DO EFEITO DO FLUXO DE RADIAÇÃO SOLAR, JUNTAMENTE COM O AJUSTE LINEAR EM AZUL.	40
FIGURA 4.9 - RESÍDUOS DAS TEMPERATURAS OBTIDAS PELO MÉTODO DE PRESSÃO (NRLMSISE00) APÓS A REMOÇÃO DA TENDÊNCIA DO TEMPO, JUNTAMENTE COM O AJUSTE LINEAR EM AZUL.	41
FIGURA 4.10 - MÉDIAS ANUAIS NORMALIZADAS DAS TEMPERATURAS NA ALTURA DE 90 KM OBTIDAS PELO MÉTODO DO GRADIENTE (LINHA SOLIDA PRETA), E PELO MÉTODO DA PRESSÃO USANDO DADOS DO NRLMSISE00 (LINHA SOLIDA AZUL), JUNTAMENTE COM OS VALORES MÉDIOS ANUAIS NORMALIZADOS DO FLUXO SOLAR EM 10.7CM TAMBÉM SÃO REPRESENTADOS (LINHA TRACEJADA VERMELHA).....	44
FIGURA 4.11 - MÉDIAS ANUAIS DAS TEMPERATURAS DESSAZONALIZADAS NA ALTURA 90 KM (LINHA SÓLIDA PRETA) OBTIDAS COM O MÉTODO DO GRADIENTE E OS RESPECTIVOS VALORES APÓS A TENDÊNCIA, DEVIDA À ATIVIDADE SOLAR, TER SIDO REMOVIDA (LINHA SÓLIDA VERMELHA). A LINHA AZUL TRACEJADA REPRESENTA O AJUSTE LINEAR PARA TODO O PERÍODO.....	44
FIGURA 4.12 –TEMPERATURA MÉDIA ANUAL (PRETO) E OS RESPECTIVOS VALORES APÓS REMOÇÃO DA TENDÊNCIA (VERMELHO) EM FUNÇÃO DO FLUXO SOLAR DE RÁDIO EM 10.7 CM.	45
FIGURA 4.13 - MÉDIAS ANUAIS DAS TEMPERATURAS DESSAZONALIZADAS NA ALTURA 90 KM (PRETO) OBTIDAS COM O MÉTODO DA PRESSÃO E OS RESPECTIVOS VALORES APÓS A	

TENDÊNCIA, DEVIDA À ATIVIDADE SOLAR, TER SIDO REMOVIDA (VERMELHO). A LINHA AZUL REPRESENTA O AJUSTE LINEAR PARA TODO O PERÍODO. 46

FIGURA 4.14 – TEMPERATURA MÉDIA ANUAL (PRETO) E OS RESPECTIVOS VALORES APÓS REMOÇÃO DA TENDÊNCIA (VERMELHO) EM FUNÇÃO DO FLUXO SOLAR DE RÁDIO EM 10.7 CM. 46

FIGURA 4.15 – PRESSÃO MÉDIA ANUAL (PRETO) E OS RESPECTIVOS VALORES APÓS REMOÇÃO DA TENDÊNCIA (VERMELHO) EM FUNÇÃO DO FLUXO SOLAR DE RÁDIO EM 10.7 CM. 48

SUMÁRIO

ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURA	10
1.INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 ESTRUTURA BÁSICA DA ATMOSFERA	14
2.2 VÁRIAS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO PARA O MESOPAUSA.....	18
2.2.1 TEMPERATURA ROTACIONAL DA HIDROXILA	18
2.2.2 SISTEMAS LIDAR	19
2.2.3 ESFERAS CADENTES	20
2.2.4 MISSÕES ESPACIAIS	20
2.3 METEORO, METEORÓIDE E METEORITO.....	21
2.4 TRILHA METEÓRICA.....	22
2.5 VANTAGENS DO RADAR DE METEÓRICO	22
2.6 DIFUSÃO DA TRILHA DE METEOROS.....	23
2.7 O CICLO SOLAR 23	24
2.8 O ÍNDICE DE FLUXO SOLAR 10.7 CM	24
3.1 MEDIDAS DOS PARÂMETROS METEÓRICOS	26
3.2 DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA A PARTIR DE MEDIDAS POR RADAR METEÓRICO.....	28
3.3 RELAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO AMBIPOLAR COM A PRESSÃO E A TEMPERATURA	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 ANÁLISE DA TEMPERATURA	33
4.2 TEMPERATURAS DESSAZONALIDAS E RESIDUAIS MENSAIS	36
4.2.1 TEMPERATURAS MENSAIS: DISCUSSÕES	41
4.3 TEMPERATURAS ANUAIS	43
5. CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento do clima é essencial para a compreensão do sistema terrestre e sua influência sobre a saúde humana, a segurança e o bem-estar. Embora as mudanças observadas no clima terrestre sejam bem documentadas, ainda se faz necessário a realização de estudos para melhorar o conhecimento acerca do que poderá ocorrer no futuro e como essas mudanças afetarão as sociedades e a economia tanto de países desenvolvidos como aqueles em desenvolvimento.

O conhecimento sobre os impactos causados pelas mudanças climáticas aponta para ameaças relacionadas com o aumento da temperatura média da superfície, degeneração de regiões pantanosas, redução de florestas, desertificação, aumento na frequência de eventos extremos, dentre outros.

Estudos sobre mudanças climáticas são pautados em medidas obtidas à superfície. Entretanto, investigações sobre o comportamento das regiões da média e da alta atmosfera podem ser usadas para melhor compreender as variações climáticas bem como um indicador de alterações, uma vez que estudos apontam que o aumento dos gases de efeito estufa resulta em um esfriamento da estratosfera e da mesosfera.

Na região da mesopausa (em torno de 80 a 100 km), a quantidade de dióxido de carbono é muito pequena para impedir a perda de radiação terrestre no espectro do infravermelho, contudo ainda assim é capaz de absorver energia devido às colisões com o gás ambiente. No entanto, parte dessa energia absorvida acaba sendo irradiada para o espaço. Conseqüentemente, à medida que os níveis de dióxido de carbono aumentam na alta atmosfera a temperatura na região da mesopausa deverá diminuir (LAŠTOVIČKA et al., 2008).

As pesquisas e o monitoramento das camadas superiores da atmosfera podem proporcionar uma melhor compreensão do sistema atmosférico como um todo, de modo a contribuir para o entendimento dos processos de acoplamento entre as camadas atmosféricas, uma vez que variações de longo prazo que ocorrem na porção inferior da atmosfera têm potencial para induzir variações de longo prazo na porção superior da atmosfera.

Neste trabalho, os dados de tempo de decaimento do sinal meteórico serão usados para estimativa da temperatura da mesopausa equatorial a partir de uma adaptação dos métodos propostos por Hocking et al. (1997), Hocking (1999) e Dyrlund et al. (2010).

A pesquisa teve como objetivo estudar uma possível relação entre a temperatura estimada a partir do tempo de decaimento do sinal de radar meteórico e o fluxo solar, durante o ciclo solar 23 usando dados de temperatura da região da alta atmosfera. Para tanto, observações de parâmetros da região próxima à mesopausa, obtidos via radar meteórico em Cachoeira Paulista (22,7°S; 45,0°O), foram utilizadas nesta pesquisa.

Na investigação, uma variante dos métodos propostos por Hocking et al. (1997) e Hocking (1999) foi desenvolvida para estimar a temperatura a partir do tempo de decaimento do sinal meteórico, em que os valores para a pressão foram obtidos a partir de um modelo baseado nos dados de temperatura e de densidade de massa fornecidos pelo MRLMSISE-00.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ESTRUTURA BÁSICA DA ATMOSFERA

A Terra formou-se há aproximadamente 5 milhões de anos e acredita-se que a atmosfera tenha se originado da liberação dos gases do seu interior. Na atmosfera primitiva os gases mais abundantes eram provavelmente o gás carbônico, o vapor de água e o hidrogênio, liberados por erupções vulcânicas. A única fonte de produção de oxigênio era a dissociação do vapor de água pela radiação solar, sendo este rapidamente consumido em outras reações, especialmente com rochas de superfície, oxidando os materiais nelas presentes (KIRCHHOFF, 1991).

A atmosfera terrestre consiste de uma mistura formada por partículas sólidas, massas líquidas e elementos gasosos, que lhe conferem características peculiares. Somente sob algumas circunstâncias especiais os gases se combinam entre si e, na alta atmosfera, sob altas temperaturas, concentram quantidades extraordinárias de energia através de um outro estado da matéria: o plasma (VIANELLO, 2004).

A atmosfera possui uma estrutura vertical extremamente variável quanto a aspectos tais como: composição, temperatura, umidade, pressão, etc. Para fins de estudo a atmosfera é dividida em várias camadas, sendo que cada uma delas possui características próprias embora não sejam homogêneas.

A atmosfera da Terra é descrita como uma série de camadas definidas a partir de suas características térmicas (Figura 2.1) representada pela linha sólida vermelha. Especificamente, cada camada é uma região onde a temperatura muda com relação à altitude, apresentando uma dada declividade (aumento ou decréscimo). As camadas são chamadas de “esferas” e os contornos de “pausas”.

É a camada inferior, a troposfera, (Figura 2.1) que recebe aquecimento da superfície e a mais próxima dela. Nesta camada está concentrado quase todo o vapor de água da atmosfera. O aquecimento na troposfera se dá basicamente por condução entre o ar e a superfície aquecida pelo Sol. A absorção direta da radiação solar no visível e no infravermelho contribui para o balanço radiativo e influenciam também na determinação da temperatura (WRASSE, 2000).

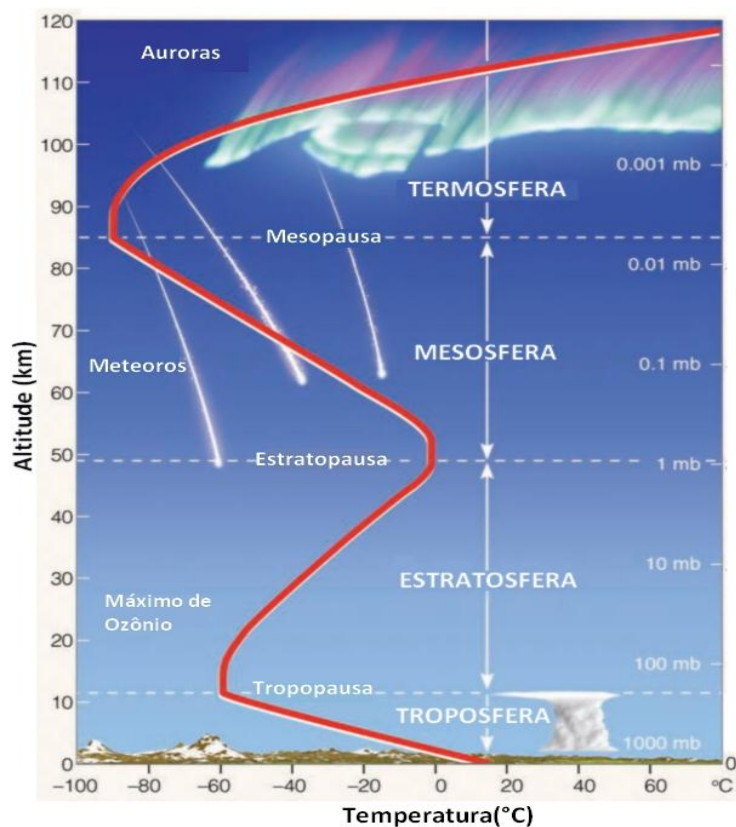


Figura 2.1: Estrutura vertical anual média da temperatura Adaptado para o português de AHRENS, C.D.: Meteorology Today 9th Edition

A tropopausa é o nome dado à camada intermediária entre a troposfera e a estratosfera, (Figura 2.1) situada a uma altura média em torno de 17 km no Equador. A distância da tropopausa em relação ao solo varia conforme as condições climáticas da troposfera, da temperatura do ar, da latitude, entre outros fatores.

Estendendo-se desde a tropopausa até 50 km de altitude, na estratosfera a temperatura aumenta com a altura, ou seja, o gradiente de temperatura é positivo. O principal mecanismo que contribui para esse aumento de temperatura é a liberação de energia na formação do ozônio. A estratosfera é muito estável, praticamente sem convecção ou qualquer dos fenômenos violentos que se observam na troposfera. Apresenta pequena concentração de vapor d'água e se caracteriza pelos movimentos do ar em sentido horizontal.

Separando a estratosfera da mesosfera, na região chamada estratopausa, encontra-se a maior parte do ozônio atmosférico, mas é na mesosfera que ocorrem os fenômenos de luminescência atmosférica e essa camada separa a região da atmosfera que tem massa molecular constante daquela com massa molecular variável. Sua espessura vai de 50 a 90 km de altitude. O

gradiente de temperatura nesta região é negativo, principalmente pela baixa concentração de moléculas e pela diminuição do calor proveniente da estratosfera.

A mesopausa é a região da atmosfera que determina o limite entre uma atmosfera com massa molecular constante e outra onde predomina a difusão molecular.

Na termosfera encontra-se uma região de interesse especial em geofísica e nas telecomunicações: a ionosfera. Nesta camada ocorre a ionização dos átomos pela absorção de radiação solar na região do extremo ultravioleta e dos raios-x. São os fótons de alta energia que ionizam os constituintes da alta atmosfera e ao mesmo tempo contribuem para aquecer a termosfera. Situa-se além dos 90 km de altura e é a camada mais externa da atmosfera terrestre. Nesta região há um contínuo aumento da temperatura com a altura, que pode oscilar entre o dia e a noite várias centenas de graus Celsius e a densidade de moléculas é tão pequena que raramente elas se chocam entre si (BRAESSUR & SOLOMON, 1986).

A atmosfera também pode ser classificada segundo os seus processos físicos em homosfera, heterosfera e exosfera. Na homosfera a mistura dos gases é praticamente constante, isto é, a proporção de mistura de um certo gás em relação a outro se mantém. Essa camada estende-se desde a superfície terrestre até 100 km de altitude. A heterosfera é a camada entre 100 e 500 km, onde predomina a difusão molecular e não existe mais uma mistura homogênea dos gases. Cada constituinte distribui-se conforme sua própria altura de escala $H = kT/mg$, onde k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura atmosférica, m é a massa molecular e g é a aceleração da gravidade. Acima dos 500 km de altitude encontra-se a exosfera, onde as colisões entre os átomos e moléculas são pouco frequentes. As partículas neutras deslocam-se em órbitas balísticas no campo gravitacional da Terra e as mais leves, tais como o H e He, são constantemente perdidas para o meio interplanetário (WALLACE & HOBBS, 1977; BRAESSUR & SOLOMON, 1986).

A estrutura da atmosfera segundo sua composição iônica é caracterizada pela ionosfera e a magnetosfera. A ionosfera é a camada onde ocorre uma ionização parcial dos constituintes atmosféricos. A densidade de íons e elétrons é suficiente para afetar a propagação de ondas eletromagnéticas. Os limites da ionosfera não estão bem definidos, mas estima-se que esteja localizada entre 60 e 500 km de altitude. A magnetosfera se situa acima da ionosfera e é a região onde a colisão entre partículas é tão pequena que quase não ocorre à interação entre as partículas energeticamente carregadas e os constituintes neutros da atmosfera. Esta região age como um obstáculo ao vento solar, que flui em sua volta, composto por partículas energeticamente carregadas que se precipitam dentro da magnetosfera (BANKS & KOCKARTS, 1973).

A influência da atividade solar no comportamento dos parâmetros atmosféricos tem recebido atenção da comunidade científica através da publicação de vários artigos em periódicos especializados (FRASER, 1990; NAMBOOTHIRI et al., 1994; JACOBI ET AL., 1997; JACOBI, 1998; MIDDLETON et al., 2002; BAUMGAERTNER et al., 2005).

O ciclo solar de quase 11 anos encontra-se bem documentado através dos registros do número de manchas solares, as quais datam desde 1755 até os dias atuais e se constitui na mais longa série temporal feita pelo homem (USUSKIN E MURSULA, 2003). O período médio com que o Sol gira em torno do seu próprio eixo é de ~25 dias em relação a posição das estrelas ou de ~27 dias quando observada a partir da terra, a qual se move em torno do Sol uma vez por ano.

Em geral, entende-se que o aumento da luminosidade dos ciclos do Sol mais fortes, que ocorreram durante os últimos 100 anos, pode ter contribuído para o aquecimento global. Contudo, os resultados mostram-se secundários em relação às contribuições decorrentes dos efeitos de aquecimento dos gases estufa, principalmente devido ao dióxido de carbono e metano (SOLOMON al., 2010).

A radiação emitida pelo Sol apresenta variações num vasto intervalo de tempo, refletindo a sua falta de homogeneidade devido à presença ou ausência de regiões ativas no disco solar. A irradiação solar é um importante parâmetro que afeta o clima e sua variabilidade em algumas regiões do espectro veem sendo enfatizadas em decorrência de suas influências na química e dinâmica da atmosfera terrestre. Embora a variação da irradiância solar total seja de aproximadamente 0,1% entre o máximo e o mínimo do ciclo de atividade solar de ~11 anos (BALDWIN E DUNKERTON, 2005), a irradiância na região do ultravioleta (UV) varia entre 6 e 8% ou mais (LEAN et al., 1997). Por sua vez, as variações na irradiância solar UV podem induzir efeitos significativos na atmosfera através de mudanças na temperatura e ozônio da estratosfera em latitudes baixas (HAIGH, 2003). Fröhlich (2009) notou que a irradiância solar total para o período calmo entre os ciclos 23 e 24 foi $0,2 \text{ W/m}^2$ menor do que o respectivo valor para o período calmo entre os ciclos 22 e 23. Este resultado tem implicações de longo período com relação ao papel da variabilidade solar na mudança do clima, ou seja, esfriamento global, dada a uma prolongada atividade de solar mínimo (AGEE et al., 2010).

Parte da variabilidade observada na região MLT (*Mesosphere and Lower Thermosphere*) região compreendida entre a alta mesosfera e a baixa termosfera, tem sido atribuída a efeitos do ciclo solar de 11 anos. Estudos usando série de dados de ventos da região MLT obtidos sobre a Europa central indicaram variações associadas a efeitos solar (JACOBI E KÜRSCHNER, 2006; KEUER et al., 2007), em que os efeitos foram mais evidentes nos meses de verão do que nos de

inverno, visto que a região da média atmosfera (entre 50 e 100 km) é mais perturbada durante o inverno, e essencialmente consiste num jato mesosférico intenso durante o máximo solar.

Os vários processos que ocorrem no Sol devido aos diferentes graus de atividade se propagam através do meio interplanetário e produzem perturbações as quais podem ser detectadas na magnetosfera, na ionosfera e até mesmo na superfície terrestre. Labitzke e van Loon (1988) sugeriram uma associação entre o ciclo solar de 11 anos e parâmetros estratosféricos, como altura geopotencial e a temperatura. Friis-Christensen e Lassen (1991) apontaram uma surpreendente relação entre a temperatura da superfície no hemisfério norte e da variação do comprimento do ciclo solar ao longo de 130 anos. Reid (1991) encontrou similaridade entre anomalias da temperatura da superfície do mar e a média móvel de 11 anos do número de manchas solares.

Os aspectos teóricos, bem como as suposições usadas no método para determinação da temperatura da atmosfera a partir de ecos meteóricos foram discutidos em vários trabalhos (Mckinley, 1961; Chilson et al., 1996; Cervera e Reid 2000; Holdsworth et al., 2006). Importante passo para obtenção da temperatura a partir de ecos meteóricos sem o uso da pressão foi proposto por Hocking (1998; 2011). Este modelo não necessita da informação da pressão para estimar a temperatura na altitude de maior ocorrência de meteoros (~90 km), porém, requer uma aproximação para o gradiente médio da temperatura na mesopausa (dT/dZ). Hocking et al. (2004) usaram uma aproximação para o gradiente médio de temperatura na altitude de máxima ocorrência de meteoros, a qual é baseada em dados experimentais e de modelos (LIMA, 2010).

2.2 VÁRIAS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO PARA O MESOPAUSA

Nas últimas décadas, uma série de diferentes técnicas de sensoriamento remoto têm sido desenvolvidos para medir a temperatura na região da mesopausa, cada um com suas próprias vantagens individuais e desvantagens. Algumas das técnicas mais utilizadas irão ser discutidas abaixo, incluindo missões espaciais e o radar meteoro.

2.2.1 Temperatura rotacional da hidroxila

Uma das técnicas ópticas mais antigas aplicadas para medir o perfil de temperatura na atmosfera são as medidas de temperatura rotacional da hidroxila (OH). A temperatura é obtida

através da observação das intensidades relativas das linhas espectrais da aeroluminescência OH (SIGERNES, et al., 2003).

A camada de emissão da aeroluminescência do OH está localizada na região da mesosfera, com um pico de emissão em torno de 87 km. As observações da aeroluminescência mesosférica fornecem informações sobre os processos dinâmicos e fotoquímicos da mesosfera superior. A aeroluminescência das emissões de hidroxila tem sido usada há pelo menos três décadas para inferir o movimento de ondas de gravidade e marés atmosféricas que se propagam na região da alta atmosfera. Observações contínuas são imperativas para o estudo do regime de ondas, que têm períodos entre 5 min a 12 horas na região da mesosfera superior. Além disso, a temperatura rotacional do OH é calculada baseando-se nas intensidades relativas das linhas rotacionais, que são dependentes dos valores de temperatura.

No entanto, existem algumas incertezas quanto à precisão da técnica. Algumas medições mais antigas usam filtros de interferência de olhar para as linhas espectrais. Estes filtros são conhecidos por ter estabilidade pobres a longo prazo e, assim, tornar os dados mais inadequados para estudos de tendência (BEIG, et al., 2003).

2.2.2 Sistemas LIDAR

Dentre as técnicas usadas para a determinação da temperatura da região compreendida entre 80 e 100 km de altitude, destacam-se os métodos que usam o radar de laser (LIDAR).

A sintonia do laser de acordo com as características espectrais dos constituintes usando uma técnica como o LIDAR, permite fazer medidas remotas destes traços de constituintes na atmosfera superior da Terra. A interação do feixe de laser com a atmosfera é, em princípio, dominado por todos os comprimentos de ondas através do processo elástico, que é o espalhamento Rayleigh de moléculas de gases atmosféricos e o espalhamento Mie devido a partículas esféricas. Também há o espalhamento Raman, que é um processo onde a luz espalhada tem comprimento de onda diferente da luz incidente. A diferença corresponde às transições entre estados vibracionais ou rotacionais de uma molécula.

O pulso de 589,189 nm passa por dois espelhos e um expensor de diâmetro de feixe antes de ser emitido para a atmosfera. Na atmosfera esse feixe sofrerá um espalhamento que ao retornar, será refletido para outro espelho e encaminhado para os fotomultiplicadores. Finalmente o sinal será mandado para uma unidade de controle e aquisição de dados, onde estes

dados serão registrados em disco rígido. Através do espalhamento Rayleigh é possível medir a densidade e temperatura dos principais constituintes atmosféricos.

2.2.3 Esferas cadentes

A Técnica de Esferas Cadentes consiste na ejeção de esferas na região em torno de 110 km de altitude a partir de um foguete. Após a ejeção, as esferas se tornam balões inflados, que posteriormente são rastreados por radares de alta precisão a fim de determinar o perfil de densidade atmosférica.

Claramente, uma das maiores desvantagens da técnica é que as medições são esporádicas no tempo. Outro ponto fraco deste método é que a integração requer o conhecimento das condições iniciais, quando da ejeção das esferas (LÜBKEN, et al., 1994).

2.2.4 Missões espaciais

O SABER (*Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry*) é um instrumento destinado a medir vários parâmetros atmosféricos entre 10 e 180 km de altitude. Ele foi lançado em dezembro de 2001 a bordo do satélite TIMED (*Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics*) da NASA. O SABER é um radiômetro multiespectral para medir a radiação vinda do horizonte. O perfil de temperatura da atmosfera entre 10 e 105 km com resolução de 2km é obtido através da medida da intensidade da emissão do CO_2 em $15\mu\text{m}$ e $4.3\mu\text{m}$, aplicando análise de transferência radiativa (MERTENS et al., 2004).

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. O TIMED é a primeira missão a realizar um estudo global compreensivo da MLTI, incluindo se: sua estrutura básica e equilíbrio térmico; o acoplamento da Mesosfera à Termosfera/Ionosfera; como a região de MLTI está acoplada ao espaço; como a MLTI está

acoplada a baixa atmosfera; e como a energia é transportada verticalmente e horizontalmente através desta região. Essa missão está estabelecendo uma linha básica diante da qual estudos futuros de mudanças dentro desta região poderão ser comparados e analisados (TIMED WEB SITE, 2009).

O instrumento SABER é apenas um dos quatro instrumentos lançados a bordo do satélite TIMED e consiste de um radiômetro multi-espectral operando no infravermelho próximo, entre 1,27 e 17 μm capaz de medir perfis verticais de emissões de vários gases da atmosfera terrestre. Através de uma visada de limbo o SABER é capaz de sondar continuamente a atmosfera terrestre durante o dia e a noite, permitindo assim o estudo da variabilidade diária dos principais parâmetros atmosféricos, dentro de uma cobertura global. O TIMED também tem fornecido uma cobertura geográfica sem precedentes para o estudo e determinação das ondas e marés na região MLT.

A principal vantagem dos satélites é a cobertura global, ao contrário de estações terrestres que só fazem medidas em regiões logo acima de sua localização. Infelizmente, os satélites têm vida limitada devido à instabilidade orbital, falhas de sistema e limitações de combustível. Isso torna difícil para fornecer medidas contínuas necessárias para estudos de longo prazo. De fato, muitas missões de satélites têm vida útil mais curta do que um ciclo solar, que dura cerca de 11 anos.

2.3 METEORO, METEORÓIDE E METEORITO

A palavra meteoro tem origem grega (meteoron) e era empregada para designar qualquer fenômeno associado à atmosfera terrestre. Contudo, na atualidade o termo é usado para designar fenômenos caracterizados por riscos rápidos e brilhantes no céu, também conhecidos como estrelas cadentes.

Os meteoros se formam quando partículas sólidas provenientes do meio interplanetário (meteoróides ou detritos espaciais) ingressam na atmosfera terrestre e sofrem o processo de ablação. A maior parte da radiação emitida por um meteoro provém da região próxima à cabeça do meteoro, que corresponde a um ponto brilhante em movimento. Dependendo da energia cinética da partícula, pode-se formar atrás da cabeça do meteoro um rastro, comumente denominado trilha do meteoro, que pode durar frações de segundo ou até dias (MCKINLEY, 1961).

Meteoróide é a matéria que gira ao redor do Sol ou qualquer objeto no espaço interplanetário que seja muito pequeno para ser chamado asteróide ou cometa. Até mesmo partículas menores são chamadas micrometeoróides, ou grãos de pó cósmicos, que incluem qualquer material interestelar que eventualmente entre em nosso sistema solar.

Um meteorito é um meteoróide que alcança a superfície da Terra sem ser vaporizado completamente.

2.4 TRILHA METEÓRICA

Quando os meteoróides entram na atmosfera da terra, um aquecimento aerodinâmico intenso é desenvolvido, eles deixam uma trilha de plasma ionizada que possui forma aproximadamente cilíndrica, as quais possuem tempo de vida tipicamente de centésimo de segundos a segundos (HOCKING, 1999). A trilha de plasma produzida pela interação dos meteoróides com as moléculas presentes na atmosfera pode ser utilizada para refletir ondas de rádio emitidas a partir de radares de alta frequência (HF- *High Frequency*), frequências muito alta (VHF- *Very High Frequency*) e frequência ultra alta (CUHF- *Ultra High Frequency*)

O mecanismo de reflexão das ondas de rádio com a trilha meteórica depende da densidade de elétrons livres presentes na trilha de plasma. Assim, quando a densidade linear de elétrons em uma trilha ionizada é suficientemente alta, o meteoro é dito sobredenso, e quando a densidade linear de elétrons livres é baixa, o meteoro é dito subdenso (TSUTSUMI, 1995).

Após a sua formação, a trilha começa a se dissipar, e vários são os fatores responsáveis pela dissipação. Entre eles destacam-se: o processo de difusão ambipolar, recombinação, e reações químicas. Entretanto, é comumente aceito que o processo denominado de difusão ambipolar é o principal responsável pelo estágio de crescimento da trilha, e assim, determina a redução na intensidade do eco para trilhas subdensas nas alturas próximas a região da mesopausa.

2.5 VANTAGENS DO RADAR DE METEÓRICO

As limitações dos instrumentos ópticos são os fatores quem favorecem a utilização do radar meteórico para análise de series de dados. O radar meteórico não precisa de céu claro, e

pode ser executado durante todo o ano com muito pouca manutenção e supervisão. A taxa de operação do radar permite a investigação das variações dos parâmetros da região MLT tanto de curto período (como marés) como de longo prazo. Uma vantagem do radar meteórico em relação a observações de luminescência atmosférica é que o radar mede a altura e a temperatura simultaneamente.

O radar é relativamente barato em comparação com outros sistemas, além de possibilitar a estimativa de outros parâmetros científicos valiosos, tais como velocidade do vento e fluxo de meteoros. Uma rede de radares meteóricos poderia funcionar ininterruptamente por um tempo muito longo e produzir boa cobertura espacial.

A principal desvantagem do radar meteórico na estimativa da temperatura é que ele depende de outros parâmetros, como valores de pressão.

2.6 DIFUSÃO DA TRILHA DE METEOROS

Há mais de 80 anos que as técnicas de radar são usadas em observações de meteoros (Elford, 2001). As primeiras observações foram usadas predominantemente para propósitos astronômicos no estudo das chuvas de meteoros e para estimar a velocidade de entrada dos meteoróides. Entretanto, o uso das técnicas de radar evoluiu para a investigação da dinâmica da região entre 80 e 100 km de altitude, através de medições da velocidade de deriva da trilha ionizada.

A partir de meados da década de 90, os traços meteóricos foram utilizados no estudo das flutuações e na determinação da temperatura média da mesosfera (Tsutsumi et al., 1994; Jones, 1995; Hocking, 1999). A técnica utiliza o tempo de decaimento do sinal de ondas de rádio em frequências típicas que é refletido pela trilha ionizada que é formada quando da rápida passagem de um meteoróide na atmosfera.

O mecanismo de reflexão depende da densidade de elétrons livres na trilha meteórica e do seu raio em relação ao comprimento de onda do radar. Após a sua formação, inicia-se a dissipação da trilha ionizada por vários processos, dentre os quais a difusão ambipolar é o fator dominante nos estágios iniciais da dissipação da trilha e, portanto, determina a intensidade do eco para as trilhas subdensas nas altitudes próximas a mesopausa (McKinley, 1961; Chilson et al, 1996). Considerando que a temperatura é a mesma na trilha ionizada, tem-se que a velocidade

térmica dos elétrons é maior do que a dos íons, produzindo uma difusão diferencial entre estas espécies, que por sua vez acarretará num desequilíbrio entre as densidades das cargas. Como consequência, o novo campo elétrico estabelecido na trilha ionizada atuará diferentemente no transporte de cada espécie, de modo que a difusão de elétrons e íons passe a ocorrer na mesma taxa. A difusão resultante é denominada de difusão ambipolar.

2.7 O CICLO SOLAR 23

Embora os cientistas sabiam sobre a existência de pontos “imperfeitos” no Sol desde o início do século 17, foi somente no século 19 que a comunidade científica percebeu que a atividade solar varia ao longo de um ciclo solar de 11 anos.

A máxima duração de ciclo solar foi de 13 anos e 8 meses e pertence ao ciclo 4 (desde setembro de 1784 a maio de 1798). O ciclo solar de menor duração foi o número 2 com 9 anos exatos (desde junho de 1766 a junho de 1775).

Os ciclos solares estão relacionados com o aparecimento das manchas solares ao longo do ciclo, o máximo solar esta é registrado o aparecimento das manchas solares e p mínimo solar as manchas não aparecem.

O ciclo solar 23 teve início no mês de outubro de 1996 e teve fim em meados de 2008. Logo após iniciou-se o ciclo solar 24 (o qual estamos atualmente). O ciclo solar 23 apresentou ápice em 2001 e 2002 (máximo solar) e declínio máximo em 2008 e 2009 (mínimo solar).

O sol é a única estrela, que podem ser estudadas em grandes detalhes e, portanto, pode ser considerado como um substituto para estudos de outras estrelas. A existência de atividade solar é um enigma para a física solar Alguns experimentos terrestres e espaciais estão sendo realizados para saber mais sobre a variabilidade solar como Vitinsky et ai. (1986); Wilson (1998); Letfus (1999); Svalgaard (2012). Portanto, estudar e modelar a atividade solar pode aumentar o nível de nossa compreensão sobre a natureza e sua influência nas variações climáticas do planeta.

2.8 O ÍNDICE DE FLUXO SOLAR 10.7 cm

O fluxo de rádio solar em 10,7 centímetros (2800 MHz) é um excelente indicador da atividade solar. Muitas vezes chamado de índice de F10.7, é um dos mais longos registros que indicam a atividade solar.

O F10.7 correlaciona-se bem com o número de manchas solares, bem como a emissão solar no ultravioleta (UV) e registros de irradiação solar visível. Medido em "unidades de fluxo solar ", (SFU), o F10.7 pode variar desde valores abaixo de 50 SFU, até maiores do que 300 SFU, ao longo de um ciclo solar.

Há pelo menos duas fontes de 10,7 cm de fluxo livre: o plasma coronal e a emissão giromagnética das regiões ativas (TAPPING, 1987) este índice é uma boa medida da quantidade do nível de atividade solar, que relaciona-se om as manchas solares.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Na pesquisa proposta foram utilizados dados de temperatura estimados a partir das medidas realizadas pelo radar meteórico VHF de Cachoeira Paulista (22,7°S; 45°O), no período compreendido entre março de 1999 a outubro de 2008.

3.1 MEDIDAS DOS PARÂMETROS METEÓRICOS

O radar meteórico, denominados de SKiYMET Meteor Radar System, é um sistema comercial que opera na frequência de 35,24 MHz. O sistema é constituído de uma antena transmissora do tipo Yagi de três elementos, com cinco antenas receptoras dispostas no solo formando uma cruz assimétrica

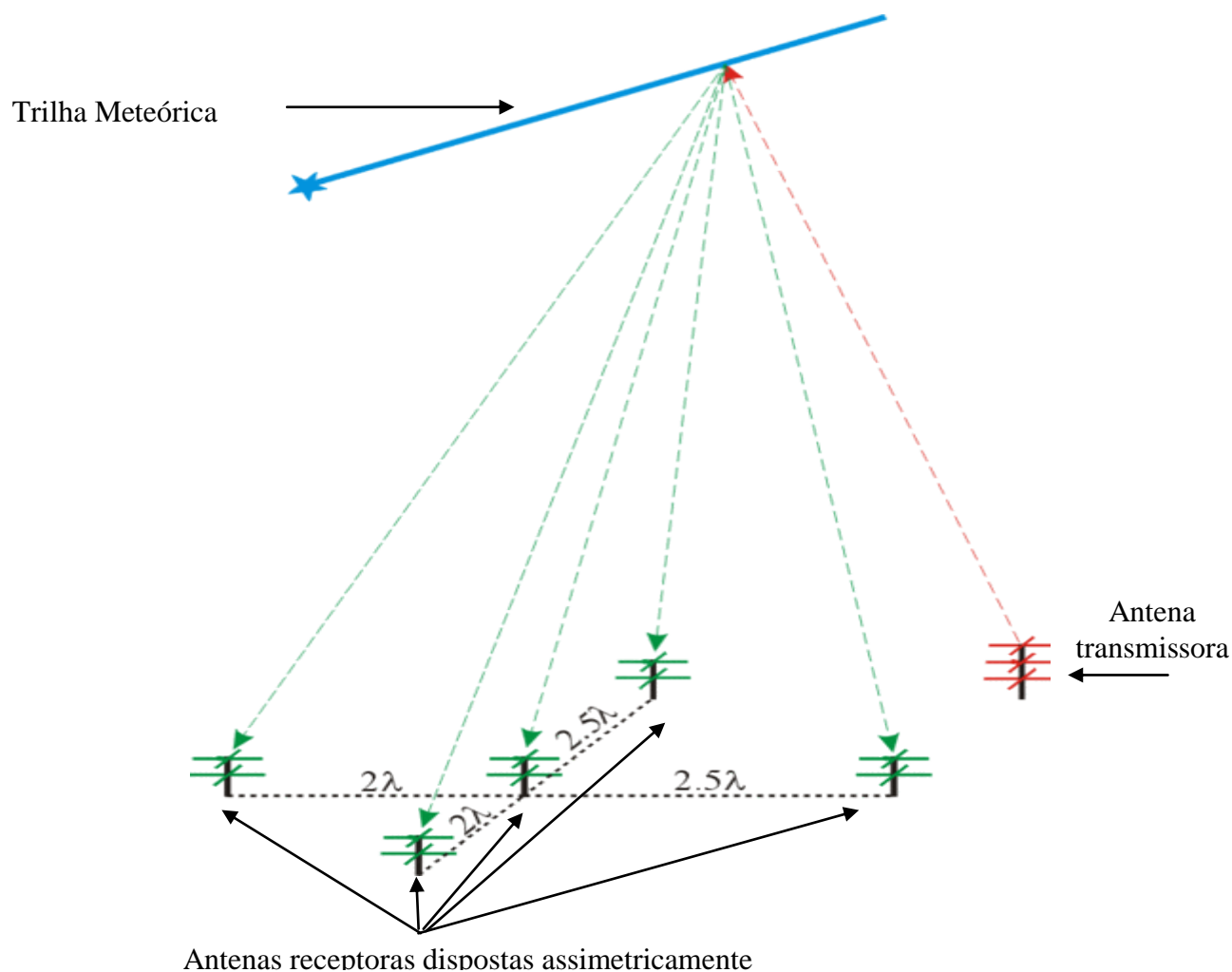


Figura 3.1 - Esquema de antenas transmissora e receptoras do radar SKIYMET.

. Na Figura 3.1 é apresentado o esquema de antenas transmissora e receptora do radar SKIYMET. As distâncias entre os dois pares de antenas das extremidades e a antena central medem $2,0 \lambda$ e $2,5 \lambda$, respectivamente. Este arranjo interferométrico possibilita a cobertura de todo o céu acima de $\pm 40^\circ$ do horizonte (*all-sky system*), permitindo também determinar a localização angular do objeto detectado a partir das informações das fases em cada uma das antenas receptoras. O tempo de decaimento do sinal refletido, τ , é determinado a partir das funções de correlação cruzada dos receptores do radar meteórico.

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

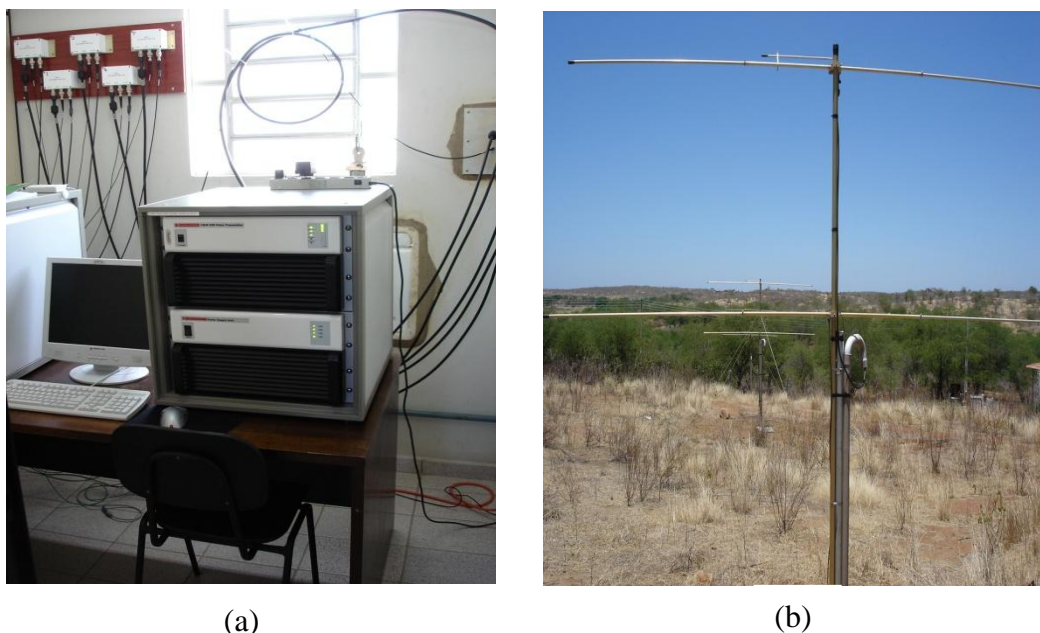


Figura 3.2 – Ilustração do hardware do radar SKIYMET e os cabos alimentadores (Figura a), e o sistema de antenas receptoras de sinal (Figura b).

O hardware do radar SKiYMET consiste de duas partes: os cabos alimentadores e o próprio sistema de radar (Figura 3.2a) o sistema de antenas transmissora e receptoras, (Figura 3.2b). O restante do radar meteórico está contido em dois gabinetes compactos, em que está incluso, um transmissor operando em modo pulsado, 5 canais receptores, unidades de síntese de frequência e controle de ganho. O sistema de aquisição de dados é composto de cinco *buffers* de

memória e de digitalização de alta velocidade; temporizadores e controladores de hardware (HOCKING; FULLER B.; VANDEPEER, 2001).

O sistema executa vários cálculos em tempo real sobre os meteoros detectados. Os resultados dos cálculos podem fornecer várias informações sobre esses meteoros. Parâmetros como: velocidade dos ventos, coeficiente de difusão ambipolar, temperatura e velocidade de entrada de meteoros podem ser obtidos a partir das medidas realizadas pelo radar meteórico SKiYMET.

3.2 DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA A PARTIR DE MEDIDAS POR RADAR METEÓRICO

Para a detecção do meteoro os seguintes processos são realizados: primeiro é feito a identificação do potencial do sinal, via análise de fase e quadratura. Na segunda etapa, esses sinais são examinados detalhadamente e confirmados como sendo um sinal meteórico ou não. Esse radar é capaz de fazer a detecção entre 2.000 e 20.000 ecos meteóricos por dia. O número de detecção apresenta variação com a época do ano, e das atividades de meteoros no local.

Hocking et al., (1997) e Hocking (1999) propuseram dois métodos para determinar a temperatura usando dados de radar meteórico. No primeiro, Hocking et al., (1997) utilizaram a relação de Einstein para o coeficiente de difusão ambipolar, discutida por Chilson et al., (1996), dada por:

$$\frac{T}{P^{1/2}} = \sqrt{\frac{q_e}{2k} \left(\frac{273,16}{1,013 \times 10^5 K_0} \right) \left(\frac{\lambda^2 \ln(2)}{16\pi^2 \tau_{1/2}} \right)} \quad (3.1)$$

A estimativa da temperatura obtida através da Eq. 3.1 requer valores da pressão. Hocking et al., (1997) usaram dados de pressão do modelo COSPAR International Reference Atmosphere (CIRA-86). Contudo, o modelo fornece perfis verticais mensais fixos da pressão atmosférica, para distintas latitudes em ambos os hemisférios. Deste modo, ao considerar os valores de pressão fornecidos pelo modelo CIRA-86 na Eq. 3.1, os resultados apresentarão sérias limitações para representarem as variações de curto período das temperaturas diárias.

O segundo método proposto por Hocking (1999) usa o fato do $\log_{10}(1/\tau)$ ser dependente do $\log_{10}(P)$ e, que P varia com a altitude de acordo com a escala de altura, a qual depende da temperatura, para demonstrar que a inclinação (S_m) do gráfico da altitude (Z) em função de

$\log_{10}(1/\tau)$ está relacionada com a temperatura média na altitude de maior ocorrência de meteoros. O método requer um número expressivo de dados e cada temperatura diária é estimada a partir de um ajuste de S_m .

A estimativa da temperatura a partir do tempo de decaimento do sinal é feita através da seguinte expressão (LIMA, 2010):

$$T = S_m \left[\frac{dT}{dZ} + \frac{Mg}{k} \log_{10} e \right] \quad (3.2)$$

onde M é a massa molecular média do ar, (dT/dZ) é o gradiente da temperatura na mesopausa e g é a aceleração da gravidade da região de máxima detecção dos meteoros, ou seja, na altitude de 90 km. O método requer um número expressivo de dados e cada temperatura diária é estimada a partir de um ajuste de S_m .

Na Figura 3.5 está representado o número de eventos meteóricos detectados sem ambiguidade pelo radar meteórico de São João do Cariri no dia 2 de janeiro de 2006. O número de meteoros detectados apresenta variação diária e anual. Da Figura 3.5 nota-se que o número de eventos meteóricos segue uma gaussiana e apresenta o máximo em torno de 90 km de altura. A variação diária de meteoros pode ser explicada via efeitos de geometria. Devido ao seu movimento orbital, da ordem de 30 km/s, a face da Terra na vanguarda da órbita está invadindo a nuvem de meteoros esporádicos, o que ocorre em torno das 6:00 horas (tempo local), e dessa forma, verifica-se a máxima observação de eventos meteóricos. A observação mínima ocorre 12 h após a máxima. Normalmente a razão é de 5 para 3, e espera-se que seja maior na região equatorial e menor nos pólos (MCKINLEY, 1961); (CEPLECHA et al., 1998).

Este modelo do gradiente de temperatura não necessita da informação da pressão para estimar a temperatura na altitude de maior ocorrência de meteoros (~90 km), porém, requer uma aproximação para o gradiente médio da temperatura na mesopausa (dT/dZ) . Hocking et al., (2004) usam uma aproximação para o gradiente médio de temperatura na altitude de máxima ocorrência de meteoros, a qual é baseada em dados experimentais e de modelos.

Com a temperatura estimada para a altitude próxima de 90 km, é possível obter a pressão para a mesma altitude.

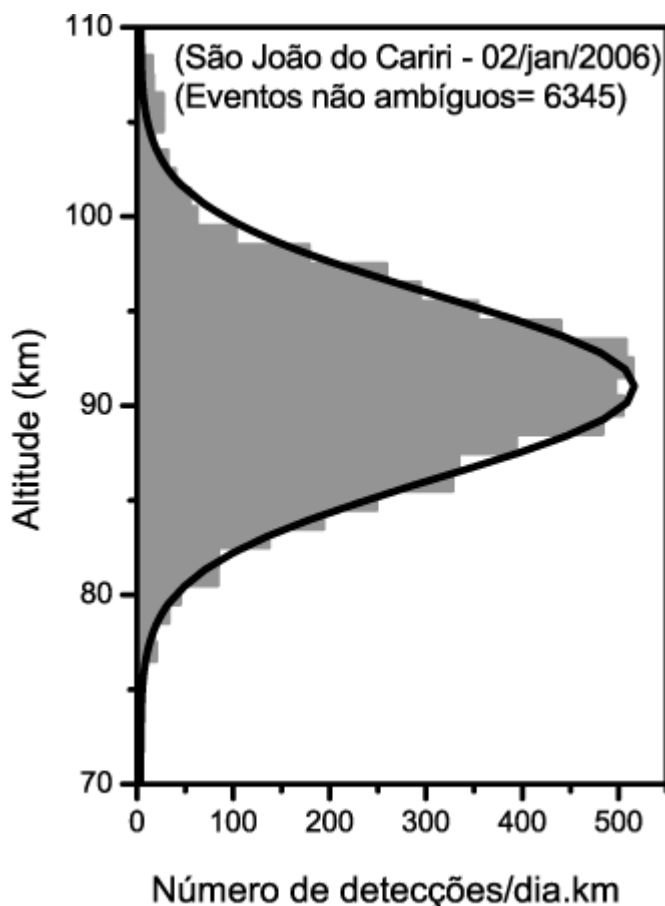


Figura 3.5 – Distribuição vertical de ocorrências de meteoros não ambíguos, registrados pelo radar meteórico de São João do Cariri no dia 02 de janeiro de 2006.

Na presente investigação, uma variante dos métodos propostos por Hocking et al. (1997) e Hocking (1999) foi desenvolvida para estimar a temperatura a partir do tempo de decaimento do sinal meteórico, em que os valores para a pressão foram obtidos a partir de um modelo baseado nos dados de temperatura e de densidade de massa fornecidos pelo NRLMSISE00, os quais podem ser baixados no endereço eletrônico http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html.

As siglas **NRL** representa o Laboratório de Pesquisa Naval dos EUA. **MSIS** significa Mass Spectrometer e Incoherent Scatter Radar, respectivamente, as duas fontes de dados primários foram usados para o desenvolvimento de versões anteriores do modelo. **E** indica que o modelo se estende a partir do solo por meio de exosfera e **00** é o ano de lançamento, referente a 2000.

3.3 RELAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO AMBIPOLAR COM A PRESSÃO E A TEMPERATURA

Quando um meteoróide entra na atmosfera e sofre o processo de ablação, o material deixado na trilha é reduzido às velocidades térmicas por colisões com as moléculas atmosféricas.

A taxa de difusão da coluna ionizada é determinada principalmente pela temperatura e pela pressão ambiente, bem como pelos constituintes iônicos da trilha. A amplitude do sinal espalhado por uma trilha subdensa decresce de acordo com a expressão:

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{16\pi^2 D_a t}{\lambda^2}} \quad (3.3)$$

Em que λ é o comprimento de onda da onda emitida pelo radar, D_a é o coeficiente de difusão ambipolar, e t é o tempo. $A(t)$ é a amplitude do sinal num tempo t e A_0 é o valor em $t_0=0$ (momento em que a trilha é detectada).

Considerando que o tempo necessário para que a amplitude do sinal meteórico caia pela metade do seu valor máximo, seja ($\tau_{1/2}$), tem-se que:

O tempo para a amplitude decair pela metade é dado por:

$$A(t) = \frac{A_0}{2} \quad (3.4)$$

Igualando a equação (3.3) com (3.4), obtém-se:

$$\frac{1}{2} = e^{-\frac{16\pi^2 D_a \tau_{1/2}}{\lambda^2}} \quad (3.5)$$

Aplicando o logaritmo natural em ambos os membros da equação, temos:

$$\ln 1 - \ln 2 = -\frac{16\pi^2 D_a \tau_{1/2}}{\lambda^2} \quad (3.6)$$

Tendo $\ln 1 = 0$, equação (3.6) resulta em:

$$D_a = \frac{\lambda^2 \ln 2}{16\pi^2 \tau_{1/2}} \quad (3.7)$$

Estudos teóricos (JONES; JONES, 1990); (JONES, 1995) têm mostrado que o coeficiente de difusão ambipolar é proporcional ao quadrado da temperatura e inversamente proporcional a pressão ($D_a \propto T^2/P$). O coeficiente de difusão ambipolar também pode ser escrito como sendo:

$$D_a = \frac{2KT}{q_e} \frac{T}{273,16} \frac{1,013 \cdot 10^5}{P} K_0 \quad (3.8)$$

Em que κ é a constante de Boltzmann, q_e é a carga elementar, e T e P são a temperatura e a pressão do gás neutro, respectivamente. A quantidade K_0 é uma constante que está relacionada com a natureza do plasma. Considerando os principais constituintes iônicos como sendo íons metálicos (M^+) e que (N^2) seja a principal espécie neutra, ($2,5 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1}$) (HOCKING et al., 1997). Assim, obtém-se:

$$\frac{T}{(P)^{1/2}} = \frac{q_e}{2K} \frac{273,16}{1,013 \cdot 10^5 K_0} \frac{\lambda^2 \ln 2}{16\pi^{2\tau_1/2}} \quad (3.9)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma vez que o presente trabalho tem como objetivo o estudo da relação entre a temperatura da região em torno de 90 km de altitude, observada em Cachoeira Paulista-SP, e fluxo solar durante o ciclo solar 23, a Figura 4.1 apresenta os valores médios mensais do índice de fluxo de rádio solar F10.7 cm para o período considerado.

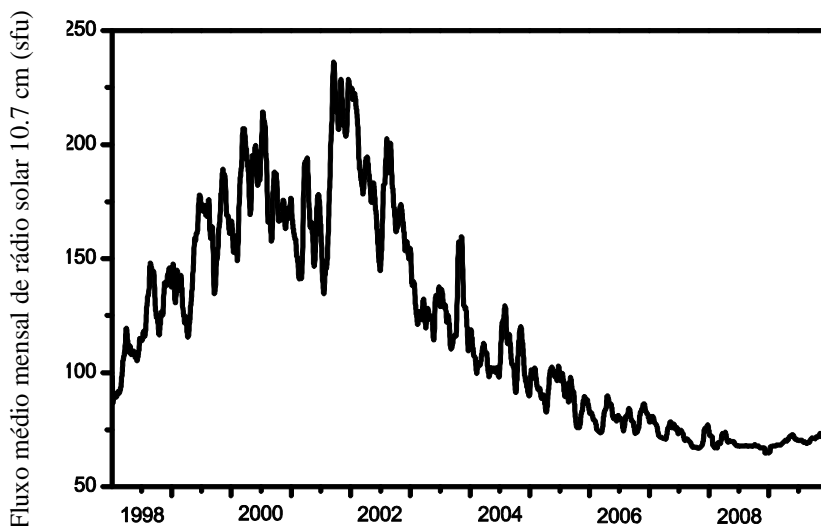


Figura 4.1 – Valores médios mensais do fluxo de rádio solar 10.7 cm para o ciclo 23.

O ciclo solar 23 teve início no mês de outubro de 1996 e teve fim em meados de 2008. O período de declínio teve início em 2002, e sua duração foi significativamente mais longa do que as correspondentes fases dos dois ciclos anteriores.

De acordo com Labitzke et. al (2002), diferenças estatisticamente significativas são observadas para a temperatura da região da estratosfera inferior e na média troposfera com o ciclo solar de 11 anos, sendo mais alta no máximo solar, a qual é atribuída ao fluxo solar devido a variância na faixa do ultravioleta. No que segue, são apresentados os resultados para a temperatura na região de 90 km de altitude.

4.1 ANÁLISE DA TEMPERATURA

Os valores das temperaturas diárias referentes à altura de ocorrência máxima de meteoros, obtidas durante os períodos de março de 1999 a julho de 2006 e de setembro de 2007 a

outubro de 2008 em Cachoeira Paulista, são representados na Figura 4.2a. Na figura 4.2b são representadas as temperaturas para 90 km de altura.

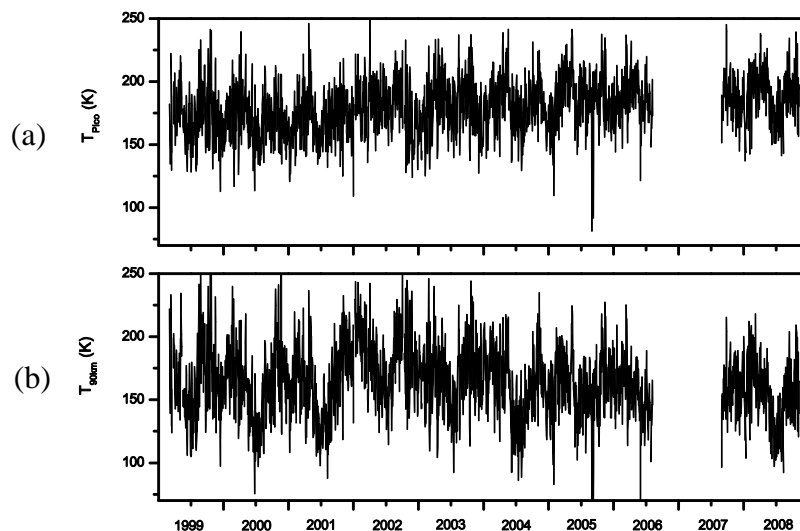


Figura 4.2 - Temperaturas diárias na altura do pico de meteoros (Figura a) e na altura de 90 km (Figura b), obtidas durante os períodos de março de 1999 a julho de 2006 e de setembro de 2007 a outubro de 2008 em Cachoeira Paulista.

Na Figura 4.3 estão representadas as médias mensais das temperaturas obtidas pelo método do gradiente (Figura a), pelo método da pressão com os dados do modelo NRLMSISE00 (Figura b). O modelo de pressão foi concebido a partir das densidades numéricas dos constituintes fornecidas pelo modelo NRLMSISE00. As barras de erro representam os respectivos desvios padrão enquanto as linhas tracejadas vermelhas representam os ajustes lineares para cada caso.

O espaço em branco entre 2006 e meados de 2007 representado na Figura 4.2 apresenta uma ausência de dados, devido a problemas técnicos no radar neste intervalo de tempo, o que impossibilitou a continuidade das análises.

Observa-se que ao longo do tempo as temperaturas obtidas através dos 2 métodos apresentam variações. A variação mostra-se mais notória para as temperaturas obtidas pelo método do gradiente (Figura 4.3a), em que as amplitudes são maiores, assim como os respectivos desvios padrão. As amplitudes das variações das temperaturas, e os desvios padrão, estimadas através do método que usa os valores de pressão obtidos do modelo NRLMSISE00 (Figura 4.3b). Vale ressaltar que as escalas utilizadas são distintas, uma vez que o espalhamento é maior no caso das temperaturas obtidas com o método do gradiente (Figura 4.3a).

As temperaturas obtidas pelo modelo do gradiente de temperatura, obtidas através do método dos mínimos quadrados, apresentam uma tendência de queda de $-0,09$ K/mês para todo o período analisado ilustrado na (Figura 4.3a), enquanto as temperaturas calculadas com o uso do modelo de pressão NRLMSISE00 mostra tendência de aumento de $0,04$ K/mês (Figura 4.3b).

A partir do ano de 2002, quando tem início o período de declínio da atividade solar no ciclo solar 23 observa-se que as temperaturas obtidas com o método do gradiente apresentam uma taxa de queda de $-0,2$ K/mês (quase o dobro da taxa para todo o período observado), acompanhando o declínio da atividade solar para esse período. Para a temperatura estimada com o uso do NRLMSISE00, verifica-se uma taxa de crescimento de $0,02$ K/mês (1,7 vezes menor do que a taxa encontrada para todo o período).

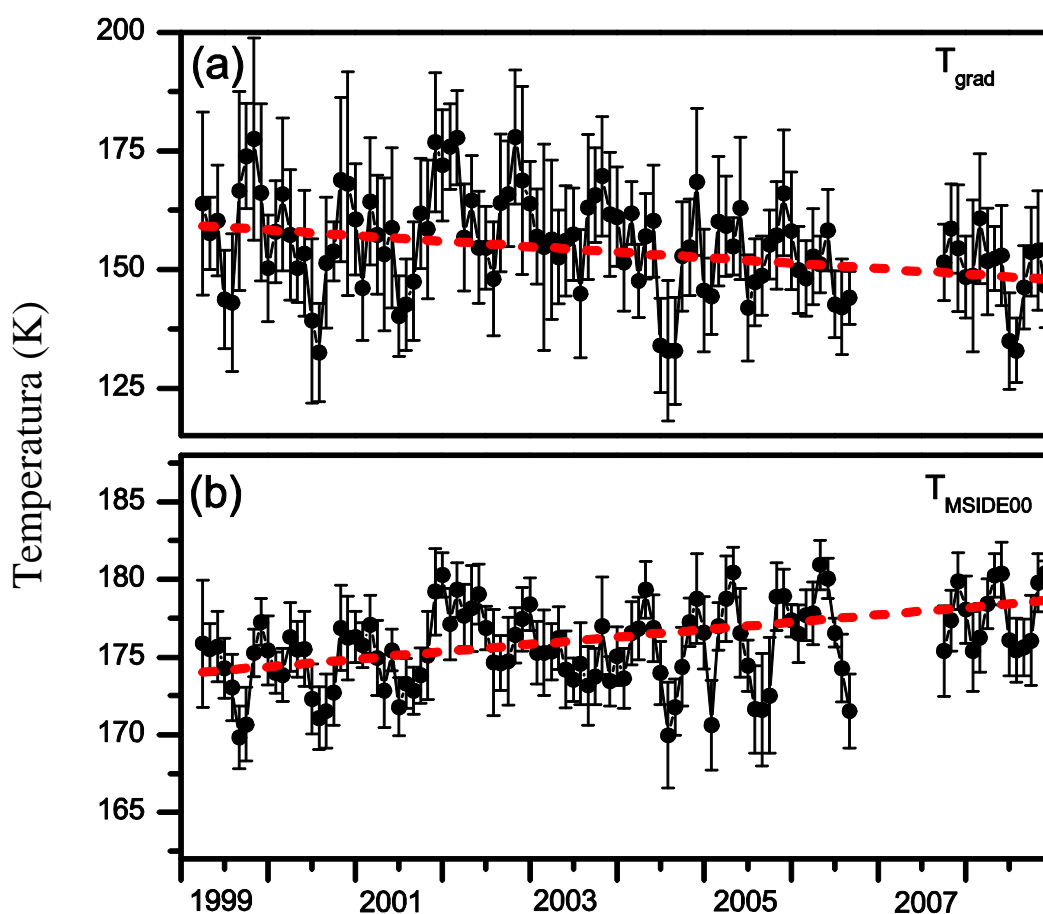


Figura 4.3 – Médias mensais das temperaturas obtidas pelo método do gradiente (Figura a), pelo método da pressão com os dados do NRLMSISE00 (Figura b). Os desvios padrão são representados pelas barras de erro e os ajustes lineares pelas linhas tracejadas em vermelho.

4.2 TEMPERATURAS DESSAZONALIDAS E RESIDUAIS MENS AIS

Antes de analisar os dados com a finalidade de estudar possíveis tendências e influência da atividade solar nas temperaturas, se fez necessário dessazonalizar as medidas diárias com a finalidade de retirar da série as influências sazonais presentes em cada ano. Para tanto, as séries de dados foram submetidas à análise espectral para identificar as periodicidades presentes, as quais foram subtraídas das respectivas séries através do ajuste:

$$T_{ajuste} = \langle T \rangle + \sum_{i=1}^n A_i \cos\left(\frac{2p}{W_i}(t - t_{max})\right) \quad (4.1)$$

em que $\langle T \rangle$ é a média da temperatura, A_i é a amplitude da i -enésima componente com período W_i e t_{max} é o tempo em que a função é máxima.

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam as médias mensais das temperaturas e dos respectivos resíduos, obtidas a partir das medidas diárias dessazonalizadas. As linhas vermelhas representam o ajuste linear.

As temperaturas dessazonalizadas calculadas pelo modelo do gradiente (Figura 4.4a) registra uma taxa de queda de -0,11 K/mês para todo o período analisado, enquanto que a taxa de queda para os seus resíduos (Figura 4.4b) é de apenas -0,01 K/mês. O ajuste feito para o período de declínio solar, ou seja, após 2002, remete a uma taxa de queda de -0,17 K/mês para as temperaturas dessazonalizadas e uma taxa de crescimento de apenas 0,008 K/mês para os resíduos.

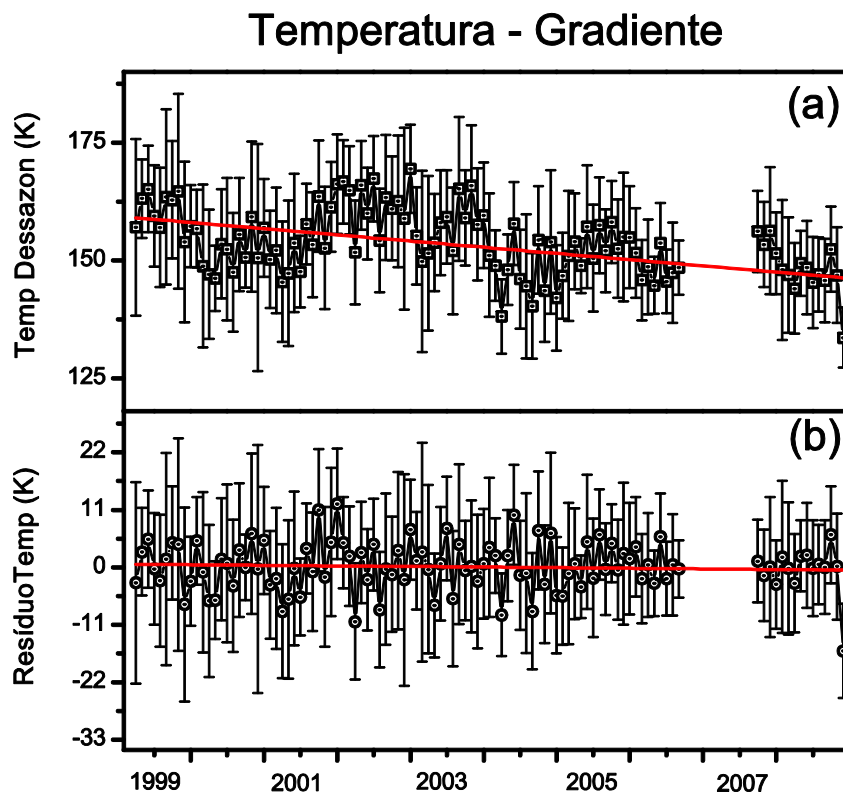


Figura 4.4 – Médias mensais (Figura a) das temperaturas dessazonalizadas obtidas pelo método do gradiente (Figura b) os respectivos resíduos das temperaturas.

As temperaturas dessazonalizadas calculadas pelo modelo de pressão NRLMSISE00 (Figura 4.5a) registra um aumento de 0,03 K/mês para todo o período analisado, enquanto que a taxa de crescimento é praticamente nulo para os seus resíduos (Figura 4.5b) apenas de 4×10^{-4} K/mês. O ajuste feito para o período de declínio solar, ou seja, após 2002, remete a um aumento 0,02 K/mês para as temperaturas dessazonalizadas e uma taxa de crescimento de apenas 0,003 K/mês para os resíduos.

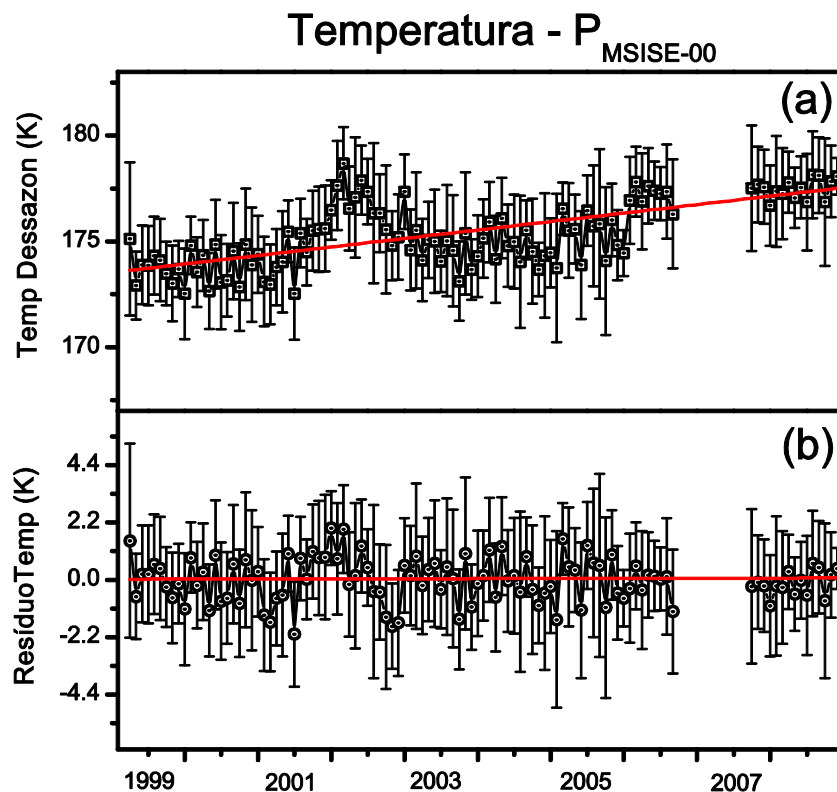


Figura 4.5 – Médias mensais (Figura a) das temperaturas dessazonizadas obtidas pelo método da pressão obtida a partir do método da pressão com os dados do NRLMSISE00 (Figura b) os respectivos resíduos das temperaturas.

Para encontrar possíveis tendências e influência da atividade solar nas médias anuais das temperaturas, as séries de dados foram submetidas à análise de regressão linear múltipla:

$$T_{90km} = a + b \times Ano + c \times F_{10.7}$$

em que $F_{10.7}$ é o fluxo solar em 10.7 cm e T_{90km} é a temperatura em 90 km de altura.

Considerando todo o período, o residual da temperatura obtida pelo método do gradiente, após a remoção do efeito solar (Figura 4.6), apresenta uma tendência praticamente nula de crescimento com o tempo ($2,27 \times 10^{-4}$ K/mês ou 0,03 K em uma década). Analisando apenas o período de declínio do fluxo solar, os resíduos tendem a decrescer numa taxa de 0,02 K/mês, ou seja, uma queda de 1,2 K entre 2002 e 2008.

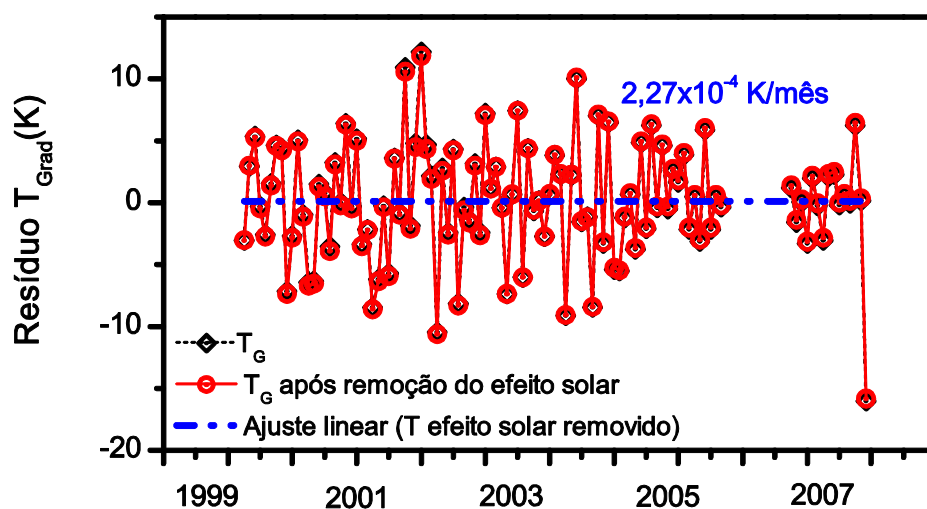


Figura 4.6 - Resíduos das temperaturas obtidas pelo método do gradiente após a remoção do efeito do fluxo de radiação solar (círculo cortado vermelho), juntamente com o ajuste linear (linha tracejada em azul).

Observando todo o período, o residual da temperatura, após a remoção da tendência (Figura 4.7), apresenta uma taxa de crescimento de 0,35 K/100sfu. Considerando apenas o período de declínio do fluxo solar, os resíduos tendem a decrescer numa taxa de 0,64 K/100sfu, entre 2002 e 2008.

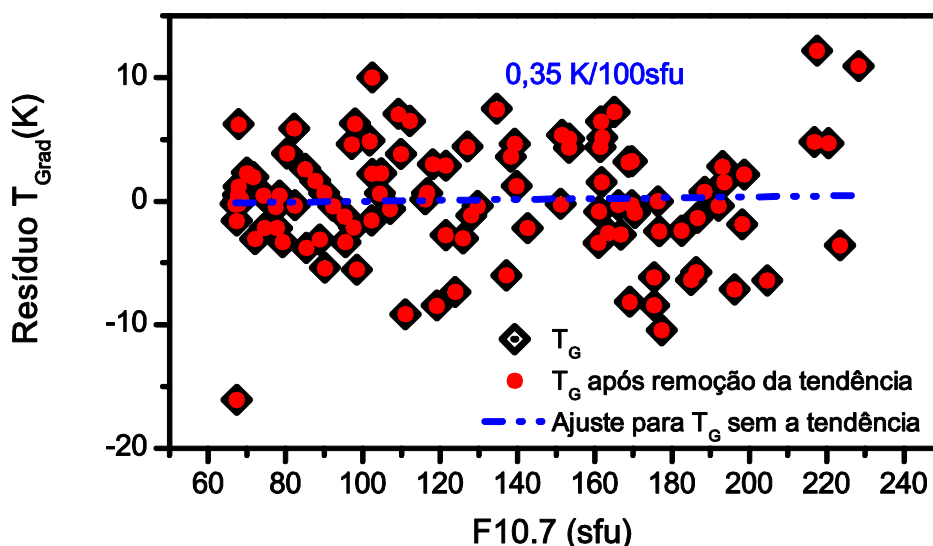


Figura 4.7 - Resíduos das temperaturas obtidas pelo método do gradiente após a remoção da tendência no tempo (quadrado cheio vermelho), juntamente com o ajuste linear (linha tracejada azul).

Tomando todo o período para o residual das temperaturas obtidas pelo método de pressão (NRLMSISE00), após a remoção do efeito solar (Figura 4.8), apresenta uma tendência praticamente nula de crescimento com o tempo ($2,76 \times 10^{-4}$ K/mês ou 0,033 K em uma década). Considerando apenas o período de declínio do fluxo solar, os resíduos tendem a decrescer numa taxa de 0,07 K/mês, ou seja, uma queda de 5,1 K entre 2002 e 2008.

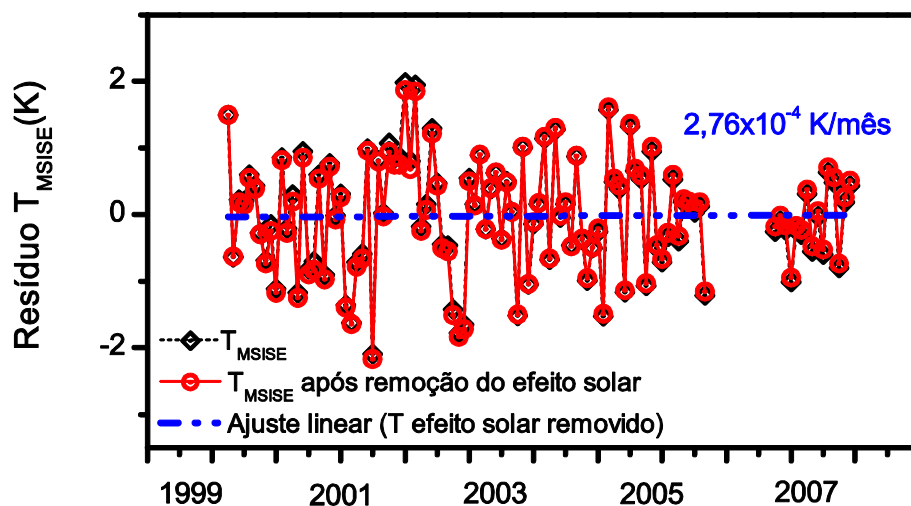


Figura 4.8 - Resíduos das temperaturas obtidas pelo método de pressão (NRLMSISE00) após a remoção do efeito do fluxo de radiação solar (círculo cortado vermelho), juntamente com o ajuste linear (linha tracejada azul).

Considerando todo o período, o residual das temperaturas obtidas pelo método de pressão (NRLMSISE00), após a remoção da tendência (Figura 4.9), apresenta uma taxa de crescimento de 0,1 K/100sfu. Analisando apenas o período de declínio do fluxo solar, os resíduos tendem a decrescer numa taxa de 0,29 K/100sfu, entre 2002 e 2008.

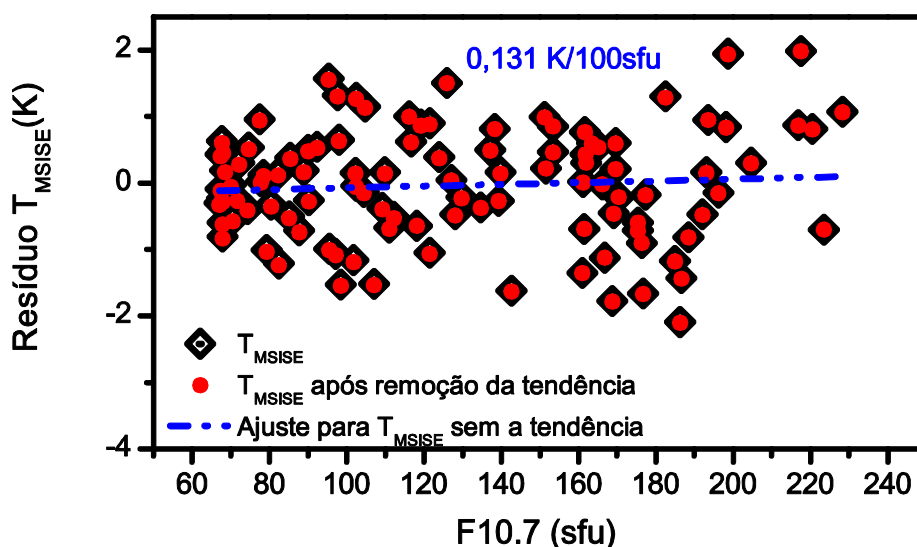


Figura 4.9 - Resíduos das temperaturas obtidas pelo método de pressão (NRLMSISE00) após a remoção da tendência do tempo (círculo cheio vermelho), juntamente com o ajuste linear (linha tracejada azul).

4.2.1 TEMPERATURAS MENSAIS: DISCUSSÕES

A tendência na temperatura calculada pelo modelo do gradiente de temperatura apresenta uma queda em relação a todo o período e para o período de declínio do fluxo solar, entre 2002 e 2008, também mostra uma queda das temperaturas. Já as temperaturas calculadas pelo modelo de pressão do NRLMSISE00 contradiz o primeiro método, pois apresenta uma tendência de aumento para ambos os casos, ou seja, quando todo período de observação é considerado e para o período de declínio solar.

Após dessazonalizadas, as médias diárias da temperatura calculadas pelo modelo do gradiente registram uma queda durante o período considerado, bem como os respectivos resíduos. Já as temperaturas dessazonalizadas e seus os resíduos obtidas com o uso da pressão RLMSISE00 registraram um leve aumento. Assim como no caso das temperaturas originais, as temperaturas dessazonalizadas e os respectivos resíduos, obtidos com o modelo de pressão do RLMSISE00, apresentam comportamentos distintos em relação ao modelo do gradiente.

Considerando agora as temperaturas dessazonalizadas após a remoção da tendência do efeito do fluxo solar, verifica-se que para todo o período as mesmas apresentam uma taxa praticamente nula com o tempo. No período de declínio do fluxo de radiação solar, uma redução é observada.

Os residuais das temperaturas estimadas pelo método do gradiente, após a remoção da tendência do efeito do fluxo solar, para todo o período considerado, apresentam uma taxa praticamente nula de crescimento durante o tempo, já no período compreendido entre 2002 e 2008 referente ao período de declínio do fluxo de radiação solar, nota-se uma pequena queda.

Para os mesmos resíduos das temperaturas calculadas pelo modelo do gradiente após a remoção da tendência temporal, é observado que, para todo o período, apresentam estabilidade com o tempo, ou seja, taxa de variação praticamente nula. Analisando somente o período de declínio da atividade solar se nota uma queda.

Os resíduos das temperaturas calculadas pelo modelo do RLMSISE00, após a remoção da tendência do efeito do fluxo solar, para todo o período, apresentam uma taxa de crescimento praticamente nula o tempo. Já no período compreendido entre 2002 e 2008 (período de declínio do fluxo de radiação solar), nota-se uma queda.

Para os mesmos resíduos das temperaturas calculadas pelo modelo do RLMSISE00 após a remoção da tendência temporal, é observado para todo o período que os mesmos apresentam uma taxa de crescimento. Analisando somente o período de declínio da atividade solar se nota uma queda, resultado este que se compara ao calculado pelo método do gradiente.

Para os resíduos obtidos pelos dois métodos obtivemos resultados semelhantes mais sem nenhuma relação efetiva para fins comparativos.

Roble e Dickinson (1989) estimaram os efeitos hipotéticos futuros de aumentos nas concentrações de gases de efeito estufa sobre a estrutura média global e previram esfriamento considerável na mesosfera e termosfera. Sobre este tempo, uma série de observações de temperatura de longo prazo na região da mesopausa (80-110 km) foram iniciadas em locais do hemisfério norte com emissões passivas da OH e sondas ativas, tais como Lidar e esferas cadentes.

Estas observações, juntamente com observações realizadas no hemisfério sul via emissão OH, bem como a longa série de medições de foguetes russos e emissões de OH cerca de 1960 e 1995 ao longo de uma ampla gama de latitudes apresentam uma tendência de esfriamento medidos na região da mesopausa que variam de zero a aproximadamente 10K/década, sugerindo que, após duas décadas, a tendência observada permanece incerta (Beig, 2006).

Revisões substanciais subsequentes sobre as tendências termosféricas, Laštovicka et al. (2012) e Cnossen (2012), incluem alguns estudos sobre as temperaturas da atmosfera neutras. Relatórios observacionais recentes sobre as tendências de temperatura na região da mesopausa

para altas latitudes foram feitas por Hall et al. (2012), com base em conjuntos de dados de aproximadamente 10 anos. Offermann et al. (2010) utilizaram as temperaturas médias anuais de emissão de OH entre 1988 e 2008, para Wippertal (51°N, 7°E) e relatou uma tendência de longo prazo em 87 quilômetros de $-2,3 \pm 0,6\text{K/década}$ em temperaturas; Hall et al. (2012) fazem uso de temperaturas obtidas via radar meteórico entre outubro de 2001 e outubro de 2012 em Svalbard (78°N, 16°E) calibrado por meio de medições de satélite e relataram uma tendência da temperatura em 90 Km de $-4 \pm 2\text{K/década}$.

As tendências de temperaturas encontradas pelo modelo do gradiente de temperatura são consistentes com as tendências relatadas recentemente por (OFFERMANN et al, 2010) e (HALL et al, 2012) para altas latitudes.

Não foi possível fazer outras comparações usando outros métodos como as temperaturas do OH ou outras temperaturas obtidas via satélite, como, por exemplo, o SABER, para validar e comparar as temperaturas obtidas via radar meteórico. Para baixas latitudes, principalmente no hemisfério sul, poucos estudos foram realizados referentes à região da alta atmosfera.

4.3 TEMPERATURAS ANUAIS

As médias anuais normalizadas das temperaturas dessazonalizadas na altura de 90 km obtidas pelo método do gradiente (linha sólida preta, círculo aberto), e pelo método da pressão usando dados do NRLMSISE00 (linha sólida azul, quadrado aberto) são representadas na Figura 4.10. Os valores médios anuais normalizados do fluxo solar em 10,7 cm são também representados (linha tracejada vermelha, quadrado sólido). Como pode ser visto desta figura, os valores anuais da temperatura obtida pelo método do gradiente decrescem durante a fase de declínio do ciclo solar 23, ou seja, a partir de 2002 até 2008, enquanto a temperatura obtida pelo método da pressão apresenta uma queda de 2002 para 2003 e cresce após este ano.

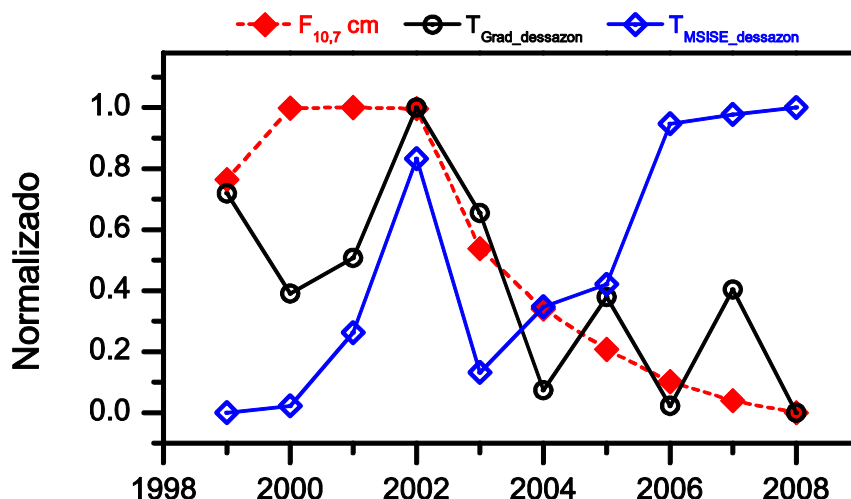


Figura 4.10 -Médias anuais normalizadas das temperaturas na altura de 90 km obtidas pelo método do gradiente (linha sólida preta), e pelo método da pressão usando dados do NRLMSISE00 (linha sólida azul), juntamente com os valores médios anuais normalizados do fluxo solar em 10.7cm também são representados (linha tracejada vermelha).

Para analisar o comportamento da temperatura durante o ciclo solar 23, as médias anuais dessazonalizadas, após a eliminação da influência da atividade solar, foram utilizadas e a tendência linear foi estimada. Os resultados são apresentados na Figura 4.11. A temperatura média tende a aumentar cerca de 0,03 K/ano quando todo o período de observação é considerado. Contudo, para o período compreendido entre máximo e o mínimo solar a temperatura média anual apresenta uma tendência de aumento de 0,16 K/ano.

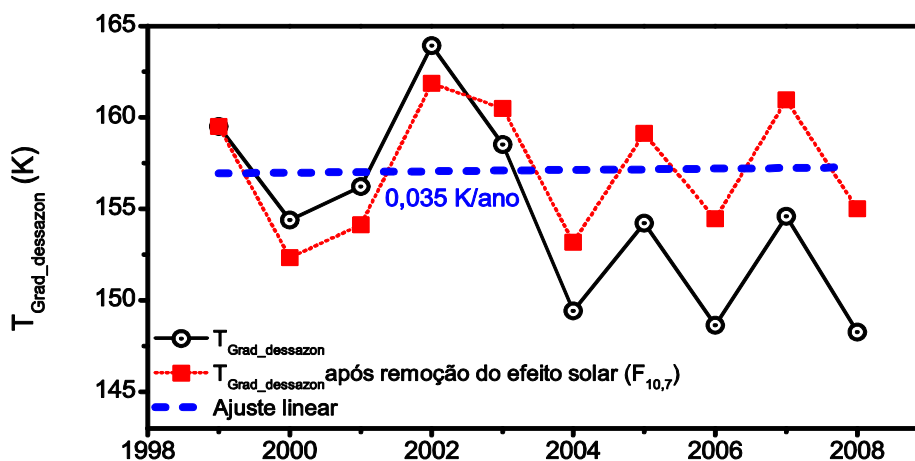


Figura 4.11 -Médias anuais das temperaturas dessazonalizadas na altura 90 km (linha sólida preta) obtidas com o método do gradiente e os respectivos valores após a tendência, devida à atividade solar, ter sido removida (linha sólida vermelha). A linha azul tracejada representa o ajuste linear para todo o período.

Na Figura 4.12 são representadas as temperaturas médias anuais dessazonalizadas como uma função do fluxo solar de rádio em 10,7 cm (em preto). Em azul os valores das temperaturas após a remoção da tendência juntamente com um ajuste linear. Existe correspondência entre as duas sequências e a tendência linear de 7,88 K/100 sfu indica um decréscimo de 6,7 K para todo o período de observação e de 18 K durante o período de decréscimo do fluxo solar, ou seja, entre 2002 e 2008.

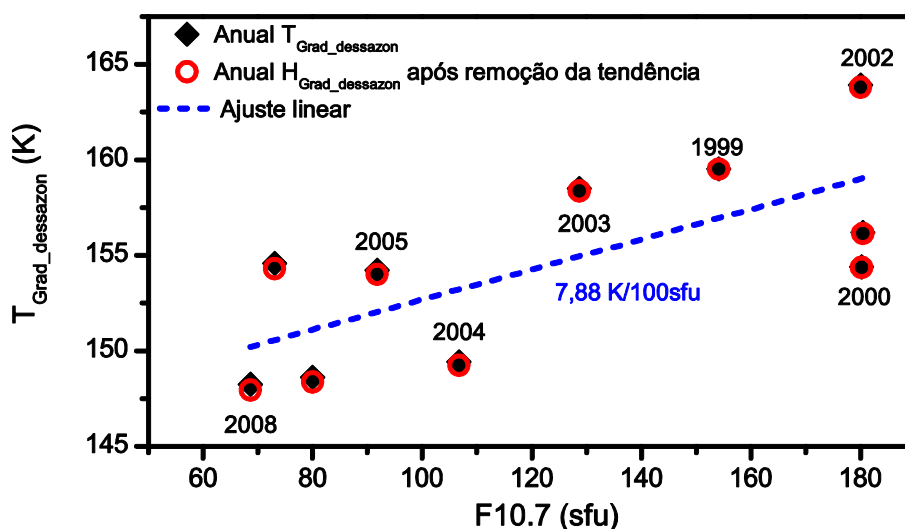


Figura 4.12 Temperatura média anual (quadrado cheio preto) e os respectivos valores após remoção da tendência (círculo aberto vermelho) em função do fluxo solar de rádio em 10,7 cm.

Os resultados da Figura 4.11 mostram que as médias anuais das temperaturas dessazonalizadas após a remoção dos efeitos devido ao fluxo solar, obtidas pelo método do gradiente, seriam mais elevadas do que as originais para o período de declínio solar. Da Figura 4.12 verifica-se que as temperaturas anuais dessazonalizadas praticamente não mudam quando a tendência temporal é removida, o que pode indicar que as temperaturas anuais dessazonalizadas obtidas pelo método do gradiente são fortemente afetadas pelo fluxo solar.

As temperaturas dessazonalizadas anuais obtidas com o uso do modelo de pressão na altura de 90 km (em preto) e os respectivos valores após remoção a tendência devida ao ciclo solar (em azul), são representados na Figura 4.13. A temperatura média tende a aumentar cerca de 0,667 K/ano para todo o período de observação. Para o período de declínio solar a temperatura média anual apresenta uma tendência de aumento de 1,17 K/ano.

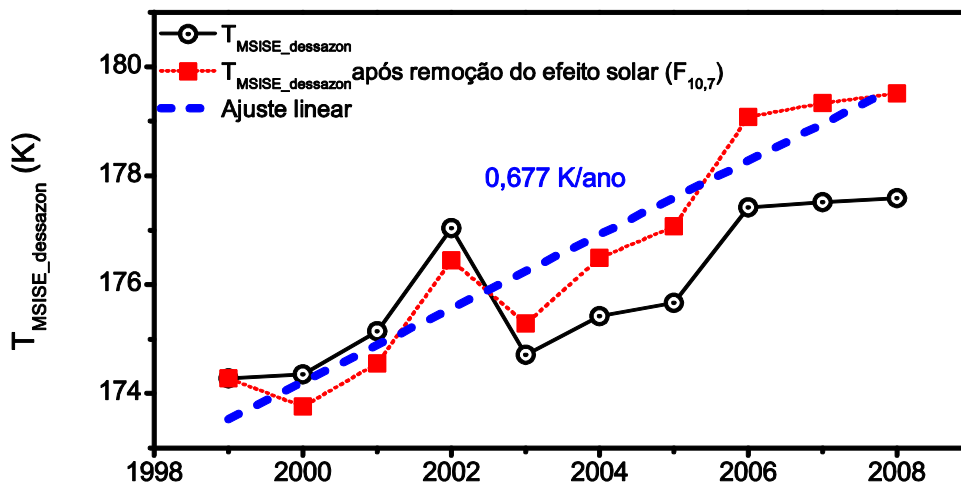


Figura 4.13 Médias anuais das temperaturas dessazonalizadas na altura 90 km (círculo aberto preto) obtidas com o método da pressão e os respectivos valores após a tendência, devida à atividade solar, ter sido removida (quadrado fechado vermelho). A linha azul tracejada representa o ajuste linear para todo o período.

Na Figura 4.14 são representadas as temperaturas médias anuais dessazonalizadas, obtidas com o modelo de pressão, como uma função do fluxo solar de rádio em 10,7 cm (em preto). Em azul os valores das temperaturas após a remoção da tendência juntamente com um ajuste linear. A tendência linear de 2,24 K/100 sfu indica um decréscimo de 2,1 K para todo o período de observação e de 5,6 K durante o período de decréscimo do fluxo solar, ou seja, entre 2002 e 2008.

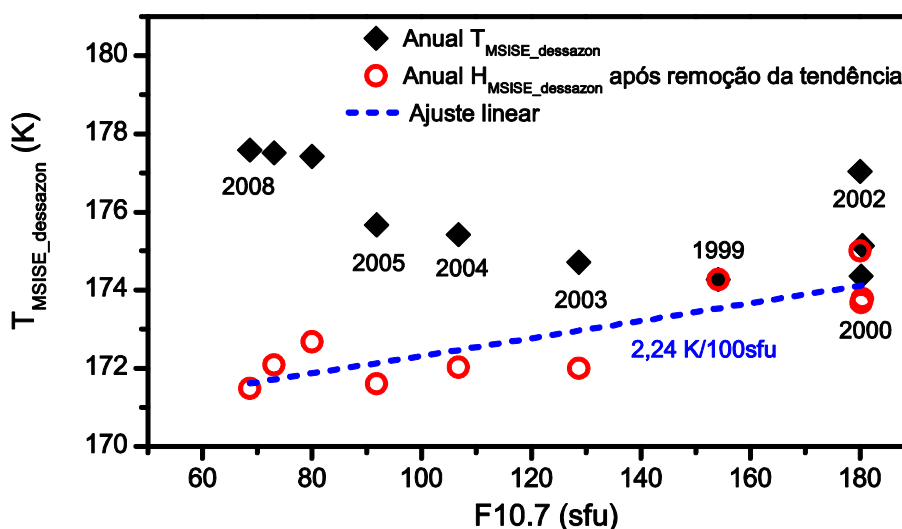


Figura 4.14 Temperatura média anual (quadrado cheio preto) e os respectivos valores após remoção da tendência (círculo aberto vermelho) em função do fluxo solar de rádio em 10,7 cm.

As médias anuais das temperaturas dessazonalizadas após a remoção dos efeitos devido ao fluxo solar, obtidas pelo método da pressão, também seriam mais elevadas do que as originais para o período de declínio solar, como mostrado na Figura 4.13. No caso das temperaturas anuais dessazonalizadas com a tendência temporal removida, as temperaturas tendem a crescer com o fluxo solar, diferentemente das temperaturas originais que apresenta um comportamento contrário. Portanto, as temperaturas anuais dessazonalizadas obtidas pelo método da pressão são menos afetadas pelo fluxo solar.

Uma vez que as temperaturas, obtidas a partir do tempo de decaimento do sinal do eco meteórico, apresentaram comportamentos distintos para os dois métodos usados, os resultados deste estudo devem ser vistos com cautela. O método que emprega o gradiente da temperatura na mesopausa para determinar a temperatura usando as medidas por radar meteórico, ainda não havia sido usado para estudar possíveis efeitos do fluxo solar no comportamento da temperatura em torno de 90 km de altitude. Por outro lado, a pressão obtida com o emprego do modelo NRLMSISE00, para a latitude considerada, exibe um comportamento em que a pressão aumenta entre o máximo solar em 2002 e a o mínimo solar em 2008.

De acordo com o estudo de Solomon et al. (2010), a densidade termosférica sofreu redução entre 2002 e 2008. Estudos usando a altura de máxima ocorrência de meteoros (H_{met}) a partir de medidas por radar propõem que as variações de H_{met} podem ser convertidas em variações da densidade em torno de 90 km de altitude (STOBER et al., 2012; 2014).

Uma vez que as variações H_{met} representam bem as variações na densidade atmosférica, as mesmas podem ser convertidas em variações da pressão atmosférica em torno de 90 km de altitude. Na Figura 4.15 estão representadas as médias anuais das pressões obtidas com o emprego das densidades numéricas dos constituintes atmosféricos fornecidos pelo modelo NRLMSISE00 (em preto), e a das pressões obtidas a partir das variações de H_{met} (em vermelho), para Cachoeira Paulista. De acordo com a figura, o comportamento da pressão obtida pela conversão das variações de H_{met} ao longo do tempo, está em acordo com os estudos que apontam para uma redução da densidade (pressão) com a redução do fluxo solar.

Mediante esta análise, estudos adicionais devem ser realizados com a finalidade de validar o melhor método para estimativa da temperatura obtida a partir das medidas por radar meteórico.

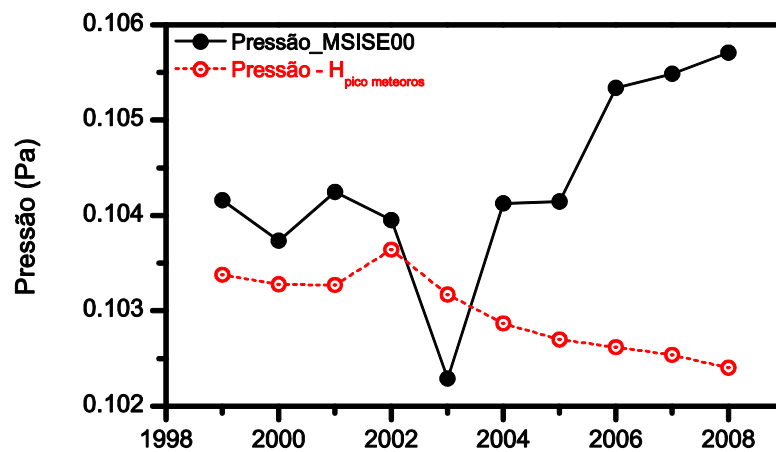


Figura 4.15 – Pressão média anual (preto) e os respectivos valores após remoção da tendência (vermelho) em função do fluxo solar de rádio em 10,7 cm.

5. CONCLUSÕES

No presente estudo, os dados de temperatura obtidos a partir de medidas por radar meteorológico em Cachoeira Paulista-SP foram usados para investigar uma possível relação entre as variações desses parâmetros mesosféricos e o fluxo solar durante o ciclo solar 23 no período compreendido entre março de 1999 a outubro de 2008.

As médias mensais de temperaturas dessazonalizadas calculadas pelo método do gradiente apresentam uma taxa de queda para todo o período analisado, enquanto as médias das temperaturas dessazonalizadas calculadas pelo modelo de pressão NRLMSSE00 mostra um aumento para todo o período.

Os resíduos das temperaturas mensais obtidos pelo método do gradiente após a remoção de efeito do fluxo de radiação solar apresentam taxa de crescimento praticamente nula, o mesmo acontece com os resíduos das temperaturas obtidas pelo modelo de pressão NRLMSSE00. Após a remoção da tendência temporal os resíduos calculados pelo método do gradiente apresentam uma taxa de crescimento, assim como os resíduos de temperaturas calculados pelo modelo de pressão NRLMSSE00. Para os resíduos obtidos pelos dois métodos resultados semelhantes foram obtidos, mas sem nenhuma relação efetiva para fins comparativos.

As tendências de temperaturas encontradas pelo modelo do gradiente de temperatura são consistentes com as tendências relatadas recentemente por (OFFERMANN et al, 2010) e (HALL et al, 2012) para altas latitudes.

As médias anuais normalizadas das temperaturas dessazonalizadas pelo método do gradiente apresentam um decréscimo durante a fase do declínio solar 23, ou seja, a partir de 2002 até 2008, enquanto as temperaturas obtidas pelo método de pressão NRLMSSE00 apresenta uma queda de 2002 a 2003 e cresce após este ano.

Após a remoção da influência da atividade solar durante o período analisado as temperaturas médias calculadas pelo método do gradiente, apresentam uma tendência de aumento quando todo o período é observado e nota-se uma tendência de queda na fase de declínio solar, já as temperaturas médias obtidas pelo modelo de pressão NRLMSSE00 apresentam um crescimento quando analisado para todo o período e mostra uma tendência de aumento durante a fase de declínio solar.

Quando removida a tendência temporal na série de dados das médias anuais normalizadas das temperaturas dessazonalizadas, calculadas pelo método do gradiente, nota-se um crescimento

de temperatura para todo o período analisado e um aumento, ainda maior, para o período de declínio da atividade solar. Para as médias anuais normalizadas das temperaturas dessazonalizadas, calculadas pelo modelo de pressão NRLMSSE00, observa-se um decréscimo para todo o período e um decréscimo também na fase do declínio ciclo solar 23. Portanto, as temperaturas anuais dessazonalizadas obtidas pelo método de pressão NRLMSSE00 são menos afetadas pelo fluxo de rádio solar.

O método que emprega o gradiente de temperatura na mesopausa para determinar a temperatura a partir das medidas por radar meteórico, ainda não havia sido usado para estudar possíveis efeitos do fluxo solar no comportamento da temperatura em torno de 90 km de altitude. Por outro lado, a pressão obtida com o emprego do modelo NRLMSISE00, para a latitude considerada, exhibe um comportamento em que a pressão aumenta entre o máximo solar em 2002 e a o mínimo solar em 2008.

Diante dos resultados aqui apresentados, sugere-se que estudos adicionais devem ser realizados com a finalidade de validar o melhor método para estimativa da temperatura obtida a partir das medidas por radar meteórico.

REFERÊNCIAS

AGEE, Ernest M., EMILY CORNETT, Kandace Gleason: An Extended Solar Cycle 23 with Deep Minimum Transition to Cycle 24: Assessments and Climatic Ramifications. **J. Climate**, 23, 6110–6114. doi:10.1175/2010JCLI3831.1,2010.

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)*. 2007. 94p. Dissertação de Mestrado em Meteorologia–UFCG, Campina Grande–PB, 2007.

BALDWIN, M. P.; DUNKERTON, T. J.: The solar cycle and stratosphere–troposphere dynamical coupling. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**. 67, 71–82, 2005.

BANKS, P. M.; KOCKARTS, G. *Aeronomy–Part A*: **New York: Academic**, 1973. 430 p.

BAUMGAERTNER, A. J. G., MCDONALD, A. J., FRASER, G. J., and Plank, G. E.: Long-term observations of mean winds and tides in the upper mesosphere and lower thermosphere above Scott Base, Antarctica, **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, 67, 1480–1496, doi:10.1016/j.jastp.2005.07.018, 2005.

BEIG, G., KECKHUT, P., LOWE, R. P., ROBLE, R. G., MLYNCZAK, M. G., SCHEER, J., FOMICHEV, V. I., OFFERMAN, D., FRENCH, W. J., SHEPHERD, M. G., SEMENOV, A. I., REMSBERG, E. E., SHE, C. Y., LÜBKEN, F.-J., BREMER, J., CLEMESHA, B. R., STEGMAN, J., SIGERNES, F. and FADNAVIS, S. . Review of mesospheric temperature trends. *Rev. Geophys.*, 41. doi:10.1029/2002RG000121. 2003

BEIG, G.: Trends in the mesopause region temperature and our present understanding – an update, **Phys. Chem. Earth**, 31, 3–9, 2006.

BRAESSUR, G.; SOLOMON, S. *Aeronomy of the middle atmosphere*. Dordrecht, **Holanda: D. Reidel**, 1986, 441 p.

CEPLECHA, Z., BOROVICKA, J., ELFORD, W. G., REVELLE, D. O., HAWKES, R. L., PORUBCAN, V. and SIMEK, M. Scattering of radio wave from meteor trails, Meteor phenomena and bodies. **Space Sci. Rev.**, 8J, 327-471. 1998.

CERVERA, M. A., and I. M. REID , Comparison of atmospheric parameters derived from meteor observations with CIRA, **Radio Sci.**, 35(3), 833–843. 2000.

CHILSON, P.B., P. CZECHOWSKY, AND G. SCHMIDT, A comparison of ambipolar diffusion coefficients in meteor trains using VHF radar and UV lidar, **Geophysical Research Letters**, **23** (20), 2745-2748, 1996.

CNOSSEN, I.: Climate Change in the upper atmosphere, Chap. 15, Greenhouse Gases – Emission, Measurement and Mangement, edited by: Liu, G., ISBN 978-953-510323-3, available at: <http://www.intechopen.com/books/greenhouse-gases-emission-measurement-and-management/climate-change-in-the-upper-atmosphere>,2012.

COSBY, P. C. and SLANGEr, T. G.. OH spectroscopy and chemistry investigated with astronomical sky spectra. **Can. J. Phys**, 85, 77–99. doi:10.1139/P06-088. 2007

DYRLAND, M. E., HALL, C. M. MULLIGAN, F. J. TSUTSUMI, M.AND SIGERNES, F. Improved estimates for neutral air temperatures at 90 km and 78°N using satellite and meteor radar data, **Radio Sci.**,45, RS4006, doi:10.1029/2009RS004344. 2010.

FRASER, G. J.: Long-term variations in mid-latitude southern hemisphere mesospheric winds, **Adv. Space Res.**, 10, 247–250, 1990.

FRISS-CHISTENSEN E; LASSEN, K. Length of solar cycle: na indicator of solar activity closely associated with climate. **Science**, 254, 698700. 1991.

FRÖHLICH, C.; Evidence of a long-term trend in solar irradiance. **Astron. Astrophys.**, 501, L27–L30, doi:10.1051/0004-6361/200912318. 2009

HAIGH, J. D.: The effects of solar variability on the Earth’s climate. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, 361A, 95–111. 2003.

HALL, C. M.; DYRLAND, M. E.; TSUTSUMI, M.; MULLIGAN,F. J.: Temperature trends at 90 km over Svalbard, Norway (78°N 16°E), seen in one decade of meteor radar observations, **J. Geophys. Res.**,117, D08104, doi:10.1029/2011JD017028. 2012.

HICKING, W. K. A review of, Mesosphere-Statosphere-Trosposphere (MST) radar developments omd studis, Cira 1997-2008. **J.Atmos. Sol. Terra. Phys**, 73, 848-882, Doi: 10.1016/j.jastp.2010.12.009.2011.

HOCKING, W. K. Temperatures using radar-meteor decay times. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 21, p. 3297-3300, Nov. 1999.

HOCKING, W. K., THAYAPARAN, T., JONES, J., Meteor Decay Times and their use in determining a Diagnostic mesospheric temperature-pressure parameter: methodology and one year of data. **Geophysical Research Letters**, v.24, n.23, p. 2977- 2980, 1997.

HOCKING, W., FULLER, B., VANDEPEER, B. Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics** 63 (2–3), 155–169. 2001

HOLDSWORTH, D.A; MORRIS, R.J; MURPHY,D.J; REID,I.M; BURNS,G.B; and FRENCH, W.J.R. Antarctic mesospheric temperature estimation using the Davins MST radar, **J. Geophys. Res.**, 111, D05108, Doi : 10.1029/2005JD006589. 2006.

JACOBI, C. and KURSCHNER, D. Long-term trends of MLT region winds over central Europe, *phys. Chem. Earth*, 31.16-21. 2006.

JACOBI, Ch., SCHMINDER, R., KÜRSCHNER, D., BREMER, J., GREISIGER, K. M., HOFFMANN, P., and SINGER, W.: Long-term trends in the mesopause wind field obtained from LF D1 wind measurements at Collm, Germany, **Adv. Space Res.**, 20, 11, 2085–2088, 1997.

JACOBI, Ch.: On the solar cycle dependence of winds and planetary waves as seen from mid-latitude D1 LF mesopause region wind measurements, **Ann. Geophys.**, 16, 1534–1543, 1998.

KEUER, D.; HOFFMANN, P.; SINGER, W.; BREMER, J.: Long-term variations of the mesospheric wind field at mid-latitudes. **Annales Geophysicae**, 25, 1779-1790. 2007.

KIRCHHOFF, V. W. J .H, *Introdução à Geofísica Espacial*. São Paulo: Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: **FAPESP**,1991.

LABITZKE, K, AUSTIN, J ,BUTCHART, N, KNIGHT, J, TAKAHASHI, M., NAKAMOTO, M., NAGASHIMA, T., HAIGH, J., WILLIAMS, V.: The global signal of the 11-year solar cycle in the stratosphere: observations and models. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, 64, 203-210,. 2002.

LABITZKE, K., VAN LOON, H. Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. I. The troposphere and stratosphere in the northern hemisphere in winter. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics** 50, 197–206. 1988.

LAŠTOVIČKA, J., AKMAEV, R. A., BEIG, G., BREMER, J., EMMERT, J. T., JACOBI, C., JARVIS, M. J., NEDOLUHA, G., PORTNYAGIN, YU. I., AND ULICH, T.: Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere, **Ann. Geophys.**, 26, 1255-1268, doi:10.5194/angeo-26-1255-2008, 2008.

LAŠTTOVIČKA, J., SOLOMON, S. C., and Qian, L.: Trend in the neutral and ionized upper atmosphere, **Space Sci. Rev.**, 168, 113–145, doi:10.1007/s11214-011-9799-3, 2012

LEAN, J. L.; ROTTMAN, G. J.; KYLE, H. L.; WOODS, T. N.; HICKEY, J. R.; PUGA, L. C.: Detection and parameterization of variations in solar mid- and near-ultraviolet radiation (200–400 nm). **Journal of Geophysical Research**. 102, 29939–29956. 1997.

LIMA, L. M.; SANTOS, K.; ALVES, E. O.; BATISTA, P. P.; CLEMESHA, B. R. Estimativa da temperatura da mesopausa equatorial a partir de medidas por radar meteorológico. **Revista Brasileira de Geofísica**, 28 (1), 99-107, doi.org/10.1590/S0102261X2010000100008. 2010.

LÜBKEN, F. -J., HILLERT, W., LEHMACHER, G., VON ZAHN, U., BITTNER, M., OFFERMAN, D., SCHMIDLIN, F. J., HAUCHECORNE, A., MOURIER, M. and CZECHOWSKY, P. Intercomparison of density and temperature profiles obtained by lidar, ionization gauges, falling spheres, datasondes and radiosondes during the DYANA campaign. **J. Atmos. Solar-Terr. Physics**, 56 (13-14), 1969-1984. Doi:10.1016/0021-9169(94)90023-X. 1994.

MCKINLEY, D. W. R. Meteor science and engineering. New York: McGraw-Hill, 1961.

MERTENS, C. J., SCHMIDLIN, F. J., GOLDBERG, R. A., REMSBERG, E. E., PESNELL, W. D., RUSSELL, J. M., MLYNCZAK, M. G., LÓPEZ-PUERTAS, M., WINTERSTEINER, P. P., PICARD, R. H., WINICK, J. R., GORDLEY, L. L., SABER observations of mesospheric temperatures and comparisons with falling sphere measurements taken during the 2002 summer MaCWAVE campaign, **Geophysical Research Letters**, v.31, p. 3105–3110, 2004.

MIDDLETON, H. R., MITCHELL, N. J., and MULLER, H. G.: Mean winds of the mesosphere and lower thermosphere at 52 N in the period 1988–2000, **Ann. Geophys.**, 20, 81–91, 2002.

NAMBOOTHIRI, S. P.; MEEK, C. E.; MANSON, A. H.: Variations of mean winds and solar tides in the mesosphere and lower thermosphere over time scales ranging from 6 months to 11 yr: Saskatoon, Canada, 52N, 107W. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 56, n. p. 1313-1325, 1994.

OFFERMANN, D., P. HOFFMANN, P. KNIELING, R. KOPPMANN, J. Oberheide, and W. Steinbrecht, Long-term trends and solar cycle variations of mesospheric temperature and dynamics, **J. Geophys. Res.**, 115(D18), D18127, doi:10.1029/2009JD013363. 2010

REID, G.C. Solar Forcing of global climate change since the mid-17 th century. **Climatic Change**, 37, 391405. 1991.

ROBLE, R.G; and DICKINSON, How will changes in carbon dioxide and methane modify the near structure of the mesosphere and thermosphere?. **Geophys. Res. Letts**; 16, 1441-1444, Doi: 10.1029/GL016io 12PO1441. 1989.

SIGERNES, F., N. SHUMILOV, C. S. DEEHR, K. P. NIELSEN, T. SVENOE, and O. Havnes, The Hydroxyl rotational temperature record from the Auroral Station in Adventdalen, Svalbard (78°N, 15°E), **J. Geophys. Res.**, 108, doi:10.1029/2001JA009023. 2003.

SOLOMON, S. C., WOODS, T. N., DIDKOVSKY, L. V., EMMERT, J. T., and Qian, L.: Anomalous low solar extreme-ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum, **Geophys. Res. Lett.**, 37, L16103, doi:10.1029/2010GL044468, 2010.

STOBER, G., JACOBI, C., MATTHIAS, V., HOFFMANN, P., GERDING, M., Neutral air density variations during strong planetary wave activity in the mesopause region derived from meteor radar observations. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys**, 74, 55-63, doi:10.1016/j.jastp.2011.10.007. 2012.

STOBER, G.; MATTHIAS, V.; BROWN, P.; CHAU, J. L., Neutral density variation from specular meteor echo observations spanning one solar cycle. **Geophysical Research Letters**. doi: 10.1002/2014GL061273, 2014.

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](http://www.timed.jhuapl.edu)> ,acesso em 15 de dezembro de 2009.

TSUTSUMI, M. A study of atmospheric dynamics near the mesopause using radio meteor echos. [S.l.: s.n.]. Kyoto: PhD Thesis - **Radio Atmospheric Science Center**. 38, 39.1995

USOSKIN, I.G., MURSULA, K.K. Long-term solar cycle evolution: review of recent developments. **Solar Phys**. 218, 319–343, 2003.

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

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. Atmospheric Science – An introductory survey. **New York:Academic**, 1977. 470 p.

WINICK, J. R., WINTERSTEINER, P. P., PICARD, R. H., ESPLIN, D., MLYNCZAK, M. G., RUSSEL III, J. M. and GORDLEY, L. L). OH layer characteristics during unusual boreal winters of 2004 and 2006. **J. Geophys. Res.**, 114, A02303. doi:10.1029/2008JA013688. 2009

WRASSE, C. M., *Observação da temperatura rotacional da hidroxila através da aeroluminescência na região da mesosfera terrestre*, 2000. 125 p. Dissertação de mestrado em Geofísica Espacial–INPE, São José dos Campos, SP –2000.