



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

## VARIABILIDADE TEMPORAL DO CONTEÚDO INTEGRADO DE OZÔNIO NO SUL DO BRASIL

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
PIBIC/INPE - CNPq/MCT

PROCESSO Nº 101534/2006 - 0

Caroline Bertagnolli (UFSM, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)

E-mail: [caroline@lacesm.ufsm.br](mailto:caroline@lacesm.ufsm.br)

Rafael Silveira Peres (UFSM, Bolsista Substituído)

E-mail: [peres@lacesm.ufsm.br](mailto:peres@lacesm.ufsm.br)

Dr. Nelson Jesus Ferreira (CPTEC/INPE - MCT, Orientador)

E-mail: [nelson@cptec.inpe.br](mailto:nelson@cptec.inpe.br)

Dr. Nelson Jorge Schuch (CRSPE/INPE - MCT, Co-Orientador)

E-mail: [njschuch@lacesm.ufsm.br](mailto:njschuch@lacesm.ufsm.br)

Dra. Damaris Kirsch Pinheiro (LACESM/CT - UFSM, Co-Orientadora)

E-mail: [damaris@lacesm.ufsm.br](mailto:damaris@lacesm.ufsm.br)

Santa Maria, Julho de 2006

## DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

**Título:** VARIABILIDADE TEMPORAL DO CONTEÚDO INTEGRADO DE OZÔNIO NO SUL DO BRASIL

**Processo CNPq N°:** 101534/2006 - 0

**Bolsista:**

Caroline Bertagnolli

Curso de Engenharia Química

Centro de Tecnologia - CT/UFSM

Curso de Meteorologia

Centro de Ciências Naturais e exatas - CCNE/UFSM

Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT - UFSM

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

**Orientador:**

Nelson Jesus Ferreira

Divisão de Operações - DOP/CPTEC/INPE - MCT

Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE - MCT

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE/MCT

**Co-Orientadores:**

Dr. Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRSPE/INPE - MCT

Dr<sup>a</sup>. Damaris Kirsch Pinheiro

Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT - UFSM

**Colaboradores:**

Rafael Silveira Peres - UFSM

**Local de Trabalho/Execução do projeto:**

Laboratório de Troposfera, Estratosfera, Radiação Ultravioleta e Ozônio Atmosférico - CRSPE/INPE - MCT

Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE - MCT

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCT - UFSM, através do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT/UFSM.

## **AGRADECIMENTOS**

O bolsista gostaria de agradecer em primeiro lugar a Deus pelo dom da vida, da perseverança e do amor, e aos seus pais, Carlos e Marcia, pelo constante apoio e incentivo nos estudos.

Ao Dr. José Carlos Becceneri, Coordenador do programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT, por ter acreditado no seu potencial para realizar este Projeto Científico.

Ao orientador Dr. Pesquisador Nelson Jesus Ferreira, da Divisão de Operação - DOP/CPTEC/INPE - MCT, em Cachoeira Paulista, SP pela atenção e orientação que dedicou ao bolsista durante o período de Projeto, apesar da distância.

Em especial ao Co-Orientador Dr. Nelson Jorge Schuch, Coordenador da Ação de Implantação do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais CRSPE/INPE - MCT, em Santa Maria, RS, pela confiança depositada, pela orientação pessoal/profissional e acadêmica e pelo constante incentivo, sempre indicando a direção a ser tomada nos momentos de maior dificuldade.

A Co-Orientadora Dr<sup>a</sup>. Damaris Kirsch Pinheiro, Diretora do Laboratório de Ciência Espaciais de Santa Maria, por toda atenção, apoio ao desenvolvimento do projeto, paciência, orientação e estímulo à vida acadêmica.

Aos colegas do Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico, em especial ao acadêmico Rafael Silveira Peres, pela ajuda e atenção na continuidade do Projeto.

Aos funcionários do LACESM/CT - MCT e da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, em especial ao Luis Fermino Nascimento e Francisco Almeida pelo apoio ao longo do Projeto.

Agradeço ao todos os funcionários do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRSPE/INPE - MCT, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE e do Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE - MCT, que de alguma forma contribuíram para a realização deste Projeto, em especial as secretárias Egídia e

Angelita, a Sr<sup>a</sup> Maria Célia pelo constante apoio e atenção às necessidades dos alunos/estagiários do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é, através da análise com wavelets, caracterizar as diversas escalas de variabilidade temporal do conteúdo integrado de ozônio no Sul do Brasil. O Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico, desenvolvido através da Parceria entre o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria da Universidade Federal de Santa Maria – LACESM/CT - UFSM e o Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRSPE/INPE - MCT, vem monitorando desde 1992 a coluna total de ozônio no Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE – MCT (29,42°S, 53,87°O), em São Martinho da Serra, usando Espectrofotômetros Brewer MKIV (1992 – 2000), MKII (2000 – 2002) e MKIII (2002 –2004). Nesta análise são utilizados, além dos dados dos Brewers, dados da coluna total de ozônio obtidos do instrumento TOMS, a bordo de satélite da NASA. O Espectrofotômetro Brewer mede a coluna total de ozônio usando os comprimentos de onda 306,3; 310,1; 313,5; 316,8 e 320,1 nm, enquanto o TOMS mede a coluna total de ozônio, usando dois comprimentos de onda específicos 317,5 e 331,2 nm. Inicialmente foi realizado um estudo detalhado da teoria das wavelets, testes e adaptações para escolha do software que melhor apresentasse a variabilidade do ozônio através de wavelets, chegando a um programa computacional desenvolvido em IDL no qual, posteriormente, foram gerados espectros de potência para o período de janeiro de 1997 a dezembro de 2005. Os dados da coluna total de ozônio do espectrofotômetro Brewer apresentam descontinuidades devido a nebulosidade, pois em dias nublados ou com chuva, o espectrofotômetro não consegue coletar medidas válidas de DS (Direct Sun), e ainda há períodos de ausência de dados devido a trocas de equipamento. A maioria dessas descontinuidades foi completada com dados de ozônio da coluna total do TOMS para a mesma latitude do Observatório Espacial do Sul. Verificou-se claramente, analisando os resultados, a variabilidade anual do ozônio com máximos na primavera e mínimos no outono. Observaram-se picos no espectro de potência nas escalas de poucos dias que não apresentam regularidade e possivelmente estão associados a sistemas frontais. Os ciclos semianual, intra-sazonal e quase-bianual são marcantes, este último composto por harmônicos com períodos de 1,7 e 2,4 anos. Outra característica bem definida são interações, em alguns anos, entre os ciclos semianual e intra-sazonal com o anual.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	8
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	10
CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS .....	11
2.1 Objetivos do Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico (PMOA) .....	11
2.1 Objetivos Específicos do Projeto .....	11
CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO TEÓRICO.....	13
3.1 Camadas da Atmosfera .....	13
3.1.1 Troposfera .....	14
3.1.2 Estratosfera .....	14
3.1.3 Mesosfera .....	15
3.1.4 Termosfera.....	15
3.1.5 Exosfera .....	15
3.2 Ozônio .....	15
3.3 Variabilidade Temporal do Conteúdo Total de Ozônio .....	16
3.3.1 Oscilação Quase-Bianual (QBO).....	17
3.3.2 El Niño Oscilação Sul .....	18
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA .....	20
4.1 Equipamentos utilizados na análise .....	20
4.1.1 Espectrofotômetro Brewer .....	20
4.1.2 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) .....	24
4.2 Análise das Wavelets .....	25
4.2.1 Concepção de Frequência e Escala .....	25
4.2.2 Análise Tempo-Frequência .....	26
4.2.3 Transformada Wavelet .....	27
4.2.3.1 Função Wavelet Simétrica ou Assimétrica.....	28
4.2.3.2 Função Wavelet Ortogonal ou Não Ortogonal .....	28
4.2.3.3 Função Wavelet Complexa ou Real .....	29
4.2.4 Cone de Influência (COI) .....	29
4.2.5 Intervalo de Confiança.....	30
CAPÍTULO 5 - ATIVIDADES DESENVOLVIDAS PELO BOLSISTA .....	30
5.1 Visitas Técnicas ao Observatório Espacial do Sul .....	30
5.1.1 Calibração do Espectrofotômetro Brewer .....	30
5.1.2 Manutenção Preventiva dos Equipamentos.....	32
5.1.2.1 Troca da Sílica Gel .....	32
5.1.2.2 Limpeza e Polimento .....	32
5.1.3 Coleta de Dados.....	33
5.1.4 Redução de Dados .....	33

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E ANÁLISES .....	34
6.1 Análise e correção dos dados da Coluna Total de Ozônio do Brewer .....	34
6.2 Adaptação do Software para construção das Wavelets .....	34
6.3 Descontinuidade dos dados de Ozônio .....	35
6.4 Variabilidades Temporais do Conteúdo Total de Ozônio no OES/CRSPE/INPE - MCT....	36
6.5 Caracterização da evidência do buraco de ozônio em 30°S por meio de Wavelets .	39
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E ATIVIDADES FUTURAS .....	43
CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	44
CAPÍTULO 9 - TRABALHOS PUBLICADOS E APRESENTADOS .....	47
APÊNDICE A .....	50
Descrição do script para Matlab .....	50

## LISTA DE FIGURAS

3.1- Esquema ilustrativo das camadas da atmosfera com o detalhe do perfil de temperatura.....	13
4.1- Possíveis posicionamentos do prisma e caminhos percorridos pela luz até chegar ao prisma nos Brewers MKII e MKIV.....	22
4.2 - Elementos ópticos do Espectrofotômetro Brewer MK III.....	23
4.3 - Espectrofotômetro Brewer MK III # 167 atualmente instalado no Observatório Especial do Sul, OES/CRSPE/INPE - MCT.....	24
4.4 - Esquema de decomposição do plano tempo-frequência usando diferentes bases: (a) Padrão, (b) Fourier, (c) Fourier Janelada e (d) Wavelet.....	26
4.5 - (a) Wavelet de Morlet, de largura e amplitude arbitrárias. (b) Construção da wavelet de Morlet (linha azul tracejada) como uma curva seno (linha verde) modulada por uma Gaussiana (em vermelho).....	29
6.1 - Comparação entre a coluna total de ozônio fornecida pelos equipamentos Espectrofotômetro Brewer (em azul) e pelo sensor TOMS (em preto) no período de 01/01/1997 a 31/12/2005 para São Martinho da Serra, RS.....	36
6.2 - Série temporal diária do conteúdo total de ozônio (em Unidades Dobson) no Observatório Espacial do Sul, utilizando-se dados obtidos pelo espectrofotômetro Brewer e pelo sensor TOMS, durante o período de 01/01/1997 a 31/12/2005.....	37
6.3 - Espectro global de potência sobreposto pelo diagrama de escalas (Transformada Ondeleta) do conteúdo total de ozônio no Observatório Espacial do Sul, período de 01 de janeiro de 1997 a 31 de dezembro de 2005.....	38
6.4 - Espectro contínuo mostrando o comportamento das oscilações de maior frequência do conteúdo total de ozônio no Observatório Espacial do Sul, período de 01 de janeiro de 1997 a 31 de dezembro de 2005.....	38
6.5 - Série temporal diária do conteúdo total de ozônio (em Unidades Dobson) no Observatório Espacial do Sul, utilizando-se dados obtidos pelo espectrofotômetro Brewer e pelo sensor TOMS, durante o ano de 2000.....	40
6.6 - Espectro contínuo mostrando o comportamento das oscilações de maior frequência do conteúdo total de ozônio no Observatório Espacial do Sul, durante o ano de 2000, destaque para as oscilações de 2 e 3,5 dias.....	40

- 6.7 - Imagens mostrando diminuição de ozônio na região do Observatório Espacial do Sul devido aos efeitos secundários do Buraco de Ozônio Antártico, para os dias 08, 09 e 10 de outubro de 2000.....41
- 6.8 - Imagens mostrando diminuição de ozônio na região do Observatório Espacial do Sul devido aos efeitos secundários do Buraco de Ozônio Antártico, para os dias 21 e 22 de outubro de 2000.....42

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

O Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico - PMOA vem sendo realizado desde 1992 no sul do Brasil em Santa Maria - RS, através da Parceria entre o Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais do Instituto Nacional Pesquisas Espaciais - CRSPE/INPE - MCT e o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria - LACESM/CT - UFSM. Neste período, diversos equipamentos foram instalados no Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE - MCT, dentro da parceria entre o INPE/MCT e a UFSM e da Cooperação Internacional em Ciências Espaciais e Atmosféricas Brasil - Japão. Cooperação esta desenvolvida no Brasil pelo CRSPE/INPE - MCT em conjunto com LACESM/CT - UFSM.

No Laboratório de Troposfera, Estratosfera, Radiação Ultravioleta e Ozônio Atmosférico do CRSPE/INPE - MCT, onde é desenvolvido o Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico, existe uma série de equipamentos que monitoram continuamente a Radiação Ultravioleta Tipo A e Tipo B, a Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) e a Coluna Total de Ozônio Atmosférico.

O declínio do ozônio global e do Buraco de Ozônio Antártico resultou em um crescente interesse da comunidade científica sobre a variabilidade do ozônio. Este trabalho pesquisa a variabilidade temporal do conteúdo de ozônio no Sul do Brasil sob o ponto de vista das wavelets, o período de 1997 a 2005, foi amplamente pesquisado.

## **CAPÍTULO 2**

### **OBJETIVOS**

#### **2.1 Objetivo do Programa de Monitoramento de Ozônio Atmosférico (PMOA)**

O PMOA, desenvolvido dentro do Programa de Cooperação Técnico-Científica entre o CRSPE/INPE - MCT e o LACESM/CT - UFSM, executado em Convênio com o Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, Convênio: MMA - UFSM, em Cooperação com o Laboratório de Ozônio do INPE/MCT, no âmbito da Parceria INPE/MCT - UFSM e Convênio Agência Espacial Brasileira - Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência - Convênio: AEB/PR - FATEC/UFSM. Esta cooperação objetiva proceder o monitoramento, as análises estatísticas e comportamentais da Camada de Ozônio, na latitude de 30° Sul, acompanhando e estudando a expansão do fenômeno “Buraco de Ozônio Antártico” e seus efeitos secundários na latitude de Santa Maria/São Martinho da Serra, bem como a correlação com o monitoramento sistemático da Radiação Ultravioleta, de partículas de radiação cósmica, de gases traçadores atmosféricos, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, com dados físicos e meteorológicos obtidos através de sondagens troposféricas e estratosféricas e correlação com os fenômenos da Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS, junto ao Observatório Espacial do Sul do CRSPE/INPE - MCT, em São Martinho da Serra, RS.

#### **2.2 Objetivos Específicos do Projeto**

- Organização dos dados da coluna total de ozônio obtidos do instrumento TOMS/NASA e observações terrenas do espectrofotômetro Brewer no OES/CRSPE/INPE - MCT;
- Estudo e entendimento da Teoria das Wavelets para aplicação em sinais geofísicos;
- Adaptação e testes utilizando softwares sobre Wavelets;

- Análise de dados do sensor TOMS e do Espectrofotômetro Brewer;
- Caracterização das diversas escalas de variabilidade temporal do conteúdo integrado ozônio no Sul do Brasil.

## CAPÍTULO 3

### DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

#### 3.1 Camadas da Atmosfera

Uma das classificações mais conhecidas da divisão das camadas da Atmosfera Terrestre é quanto ao perfil de temperatura. A atmosfera está estruturada em três camadas relativamente quentes, separadas por duas camadas relativamente frias. Os contatos entre essas camadas são áreas de descontinuidade e recebem o sufixo "pausa", após o nome da camada subjacente. Um esquema ilustrativo das camadas da atmosfera pode ser visto na Figura 3.1.

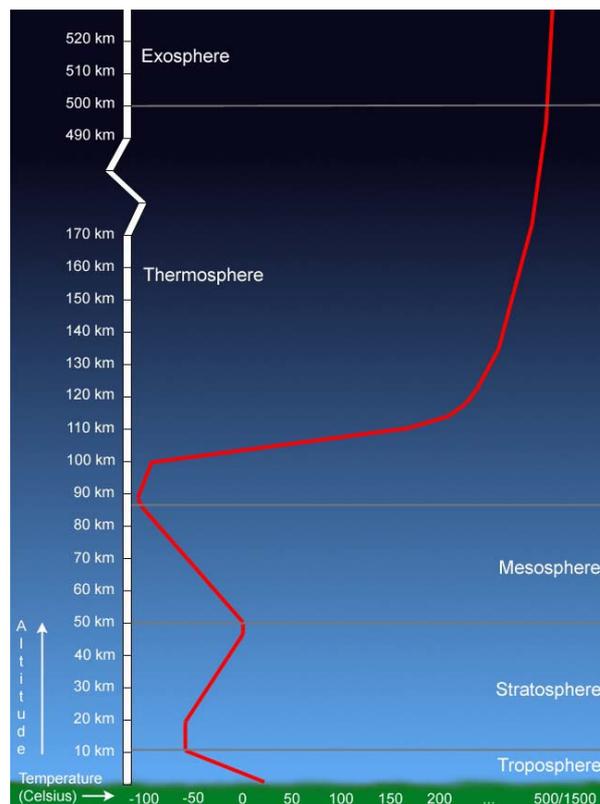


Fig. 3.1- Esquema ilustrativo das camadas da atmosfera com o detalhe do perfil de temperatura. Fonte: <http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/earth/Atmosphere/overview.html>

### 3.1.1 Troposfera

Estende-se da superfície da Terra até a base da estratosfera, 20 km do solo no equador e até 10 km nos pólos. É nela que ocorrem os mais importantes fenômenos meteorológicos tais como: chuva, trovoadas, relâmpagos, arco-íris, nuvens, ventos, etc... Esta camada responde por oitenta por cento do peso atmosférico, sendo que em sua composição tem, entre outros gases, oxigênio, dióxido de carbono e vapor de água, permitindo assim a vida na superfície terrestre. Na troposfera a temperatura diminui com a altitude em média cerca de 6°C por cada 1000 metros. Diversos gases-traço, tais como ozônio, dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio e os aerossóis também estão presentes nesta camada da atmosfera. O ozônio troposférico é extremamente oxidante e por este motivo é considerado um forte poluente, é um gás fotoquimicamente instável, por isso é comum o ozônio desta camada reagir com o radical oxidrila (OH) muito abundante na Troposfera e principal agente “limpador” desta região atmosférica. A troposfera termina quando ocorre uma inflexão do perfil da temperatura com a altitude, passando esta a aumentar com a altitude. Essa região onde ocorre a inflexão é conhecida como tropopausa, a qual marca o início da estratosfera.

### 3.1.2 Estratosfera

Situa-se entre 10 ou 20 km até cerca de 50 km de altitude aproximadamente, sendo a segunda camada da atmosfera compreendida entre a troposfera e a mesosfera. A temperatura nesta camada parte dos -70°C e aumenta gradativamente devido a absorção da radiação ultravioleta. É nesta camada que se encontra a maior concentração do gás ozônio e, portanto é a região onde se encontra a chamada Camada de Ozônio. Na estratosfera encontram-se além do gás ozônio, diversos outros gases, entre eles, dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e os aerossóis.

A estratosfera tem como limite superior a estratopausa onde está outro ponto de inflexão da temperatura, quando a temperatura começa novamente a decair com a altitude.

### **3.1.3 Mesosfera**

Está situada entre 50 e 90 km de altitude com a estratopausa em sua parte inferior e mesopausa em sua parte superior. É muito fria, com temperaturas abaixo de 100°C negativos. A parte inferior é mais quente porque absorve calor da estratosfera. Nesta camada a temperatura diminui com a altitude. Na mesosfera ocorrem os fenômenos de aeroluminescência com as emissões de gases como oxigênio, sódio, hidroxila, etc. A mesopausa fica entre a mesosfera e a termosfera, e é a região da atmosfera que determina o limite entre uma atmosfera com massa molecular constante de outra onde predomina a difusão molecular.

### **3.1.4 Termosfera**

O topo da termosfera fica a cerca de 450 km acima da Terra. É a camada mais quente, uma vez que as raras moléculas de ar absorvem a radiação do Sol. As temperaturas no topo chegam a 2.000°C.

### **3.1.5 Exosfera**

A camada superior da atmosfera fica a mais ou menos 900 km acima da Terra. O ar é muito rarefeito e as moléculas de gás "escapam" constantemente para o espaço. Por isso é chamada de exosfera (parte externa da atmosfera).

## **3.2 Ozônio**

O ozônio foi descoberto em 1840 pelo químico suíço C. F. Schönbein (Whitten e Prasad, 1985), sendo uma molécula constituída por três átomos de oxigênio e sua maior concentração ocorre na estratosfera. Nesta região, a temperatura começa a aumentar com a altitude porque, ao absorver radiação ultravioleta, o ozônio libera energia na forma de calor. Isso influencia decisivamente na estrutura da atmosfera. A existência dessa maior concentração de ozônio na Estratosfera determina a inversão do perfil de temperatura na Tropopausa e o máximo secundário na Estratopausa, sendo uma fonte de calor que alimenta diversos processos dinâmicos e contribui para o sistema de circulação atmosférica global (Whitten e Prasad, 1985; Brasseur e Solomon, 1986). A

região entre 15 e 35 km de altitude é conhecida como camada de ozônio devido a maior abundância desse gás, cerca de 90% do ozônio total encontra-se nesta região.

O ozônio é produzido na estratosfera através de uma série de reações que iniciam com a fotodissociação do oxigênio molecular. O mecanismo básico de produção de ozônio pode ser representado pelas seguintes expressões:



Este mecanismo de produção de ozônio é contrabalançado por vários mecanismos de perda, sendo os principais a recombinação do ozônio com o oxigênio e ciclos catalíticos envolvendo H, NO<sub>x</sub> e Cl (Whitten e Prasad, 1985; Brasseur e Solomon, 1986), além da absorção de radiação solar pelo ozônio nas suas bandas de absorção, apresentada na expressão 3.3:



Esta reação ocorre nas bandas de absorção molecular do ozônio de Hartey (200 a 310 nm) e Hugging (310 a 350 nm).

A combinação desses mecanismos de perda e de produção resulta na formação da camada de ozônio. A altura de máxima concentração de ozônio na atmosfera varia de acordo com a latitude geográfica, por influência da distribuição latitudinal de radiação solar que influi tanto na criação quanto na dissociação do ozônio (Whitten e Prasad, 1985; Brasseur e Solomon, 1986).

### 3.3 Variabilidade Temporal do Conteúdo Total de Ozônio

O ozônio age como uma proteção natural da biosfera contra os danos da radiação ultravioleta. Apresenta uma grande variabilidade no espaço e no tempo, especialmente na troposfera onde seu tempo de residência é curto. A variabilidade do ozônio estratosférico pode ser analisada em escala diária, sazonal, de ano para ano e por um longo período de tempo.

A variabilidade diária ou semanal do ozônio está relacionada aos sistemas atmosféricos, já que os valores altos e baixos de ozônio são correspondentes aos sistemas atmosféricos (baixa pressão corresponde a altos valores de ozônio e vice-versa) (Dobson, 1968; André, 2001; NASA/TOMS, 2002; Gurney et al, 1993).

André (2001) avaliou o comportamento diário do ozônio estratosférico na América do Sul e no setor Ocidental da Antártida, identificando as relações da variabilidade do ozônio estratosférico e a dinâmica atmosférica, no período de 11 a 20 de outubro de 2000 e concluiu que os sistemas atmosféricos encontrados nas altas latitudes da América do Sul, demonstraram significativas relações nas variações diárias do ozônio estratosférico.

A descoberta do declínio global de ozônio (Solomon, 1999; Herman et al., 1993) e da influência do buraco de ozônio em baixas latitudes durante a primavera, período que deveria possuir o valor máximo (Kirchhoff et al., 1996) despertaram um crescente interesse da comunidade científica e social sobre a variabilidade temporal do ozônio. Um dos primeiros trabalhos enfocando a variabilidade espacial e temporal do ozônio estratosférico foi feito por Stanford et al. (1996), analisando o comportamento dos dados TOMS para o período 1979-1991, utilizando-se a análise espectral, e apresentou uma climatologia dessa variável. Shiotani (1992) também utilizando dados do TOMS, diagnosticou diversos tipos de periodicidades (por exemplo, anual, quase-bianual, etc) na região equatorial. Kayano (1997) concluiu, em sua análise do conteúdo total de ozônio do TOMS, que as principais componentes da variabilidade mensal de ozônio global estão associados com extremos da Oscilação do Sul. Conexões das oscilações quase-bianual e quase-tri-anual com o vento zonal na região equatorial e a temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico foram propostas por Kane e Sahai (1998). Ambrizzi et al. (1998) mostraram a ligação da variabilidade interanual com o padrão ENSO de onda 1 nos extratropicos do Hemisfério Sul.

### **3.3.1 Oscilação Quase-Bianual (QBO)**

A oscilação quase-bianual (QBO) foi descoberta por Reed et al. (1961) e Veryard e Ebdon (1961), e é uma oscilação observada na estratosfera tropical onde os ventos

zonais mudam seu sentido de leste para oeste, com um período irregular geralmente um pouco superior a dois anos.

A QBO é uma oscilação interanual na qual sua fase de origem leste é associada com fortes ventos leste na estratosfera inferior, produzindo um grande cisalhamento vertical do vento. Esta fase persiste geralmente por 12 a 15 meses e inibe a formação de furacões. Já sua fase de origem oeste exibe fracos ventos leste na estratosfera inferior e fraco cisalhamento vertical do vento. Esta fase, que dura tipicamente entre 13 e 16 meses, é associada ao acréscimo em tempestades e furacões, sendo estes muito mais intensos com relação à fase leste.

As propagações leste e oeste têm transmissões e absorções características que diferem na QBO. O conteúdo de ozônio na região Antártica é fortemente relacionado com ventos equatoriais (Garcia e Solomon, 1987), onde o vórtice polar sofre distúrbios maiores durante a fase de origem leste, a qual implica na intensificação do movimento diabático, do que durante a fase de origem oeste, a qual é mais próxima de uma simetria zonal e do equilíbrio radioativo deixando o vórtice polar isolado.

### **3.3.2 El Niño Oscilação do Sul (ENSO)**

“*El Niño Southern Oscillation*” (ENSO) é o mais importante fenômeno de interação oceano-atmosfera, o qual causa variabilidades climáticas ou interanuais na escala de tempo em todo o globo, tais como: secas, enchentes, altas temperaturas, etc. A Oscilação Sul foi definida como a diferença de pressão atmosférica entre localidades no Pacífico tropical oeste e leste (Moran et al., 1994), quando a pressão atmosférica estava alta no Tahiti (17°S e 150°W), em Darwin (12°S e 130°E) estava baixa, e vice-versa. O termo El Niño é derivado do espanhol, e refere-se à presença de águas quentes que todos os anos aparecem na costa norte do Peru na época de Natal. Os pescadores do Peru e Equador chamaram a esta presença de águas mais quentes de corrente de El Niño em referência ao Menino Jesus.

Uma explicação para a relação entre a Oscilação Sul e o El Niño sugere a suposição que, para a temperatura da superfície do mar mudar em associação com a Oscilação Sul, elas

são parte de uma resposta do oceano às variações dos ventos superficiais. Durante os anos em que ocorre La Nina, os intensos ventos alísios carregam as águas aquecidas da superfície do oceano Pacífico em direção à parte oeste deste oceano, fazendo com que a temperatura da superfície do mar fique abaixo do normal, ou seja, ocorre a ressurgência de águas frias na parte central e leste do oceano Pacífico. Em contrapartida, durante a ocorrência do El Nino, observa-se o aquecimento das águas do Pacífico central e leste devido ao enfraquecimento e posterior inversão na direção dos ventos alísios (Philander, 1985). A duração do El Niño pode variar entre 12 a 18 meses, enquanto que a ocorrência do fenômeno se dá em intervalos irregulares de 2 anos até uma década (Big, 1990). É válido ressaltar que há períodos em que o ENSO é mais intenso do que em outros, ou seja, o fenômeno possui característica considerada não cíclica.

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGIA

#### 4.1 Equipamentos utilizados na análise

Os dados sobre a coluna total de ozônio atmosférico utilizados nesta análise foram obtidos através dos Espectrofotômetros Brewer modelo MKIV, MKII e MKIII, instalados no Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE - MCT (29,4 °S; 53,8°O; 488,7m), e pelo Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) que esteve a bordo dos satélites Nimbus-7, Meteor-3 e atualmente está a bordo do satélite Earth Probe da National Aeronautics and Space Agency (NASA).

##### 4.1.1 Espectrofotômetro Brewer

Os Espectrofotômetros Brewer são uma família de instrumentos científicos que realizam medidas da Radiação Ultravioleta no espectro solar, examinando a absorção diferencial de comprimentos de onda selecionados no espectro da radiação ultravioleta do tipo B (UV-B), além de inferir as colunas totais dos gases O<sub>3</sub> e SO<sub>2</sub>. Este equipamento foi instalado no Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE - MCT, em Martinho da Serra, a partir de um convênio entre a UFSM e o INPE/MCT, durante o período de 1992 – 2000 o equipamento MKIV #081, de 2000 – 2002, o equipamento MKII #056 e de 2002 até o momento opera o equipamento MKIII # 167.

Os dois primeiros Espectrofotômetros Brewer são compostos por um monocromador e um detector para observar e medir um espectro de radiação. O monocromador é essencialmente constituído de um elemento de dispersão e dispositivos para controle da largura da faixa de comprimentos de onda desejados. A fonte de energia a ser analisada deve fornecer um espectro contínuo, no caso do Espectrofotômetro Brewer esta é o Sol. Os elementos de dispersão podem ser prismas de vidro ou quartzo e redes de difração, sendo para o Espectrofotômetro Brewer o meio atenuador a coluna atmosférica acima do instrumento.

Uma porção da energia radiante emitida pela fonte passa por uma fenda de entrada e vai incidir sobre o elemento de dispersão. A radiação é dispersa, dando um espectro contínuo dentro dos limites correspondentes à fonte utilizada. Por meio de uma fenda de saída, pode-se isolar uma faixa mais ou menos estreita da radiação. O comprimento de onda médio da faixa que atravessa a fenda de saída é controlado mediante a variação da posição do prisma ou da rede de difração.

O Espectrofotômetro Brewer é um instrumento óptico projetado para medir a intensidade da atenuação da radiação solar ultravioleta incidente em cinco comprimentos de onda, de 306 a 320 nm, no espectro de absorção do ozônio e dióxido de enxofre atmosféricos. O Brewer mede também a intensidade da radiação UVB global incidente na superfície (de 290 a 325 nm, modelos MKII e MKIV) através de varreduras do espectro.

O Brewer é formado por um espectrofotômetro e por um sistema de rastreamento do Sol, acoplados a um microcomputador o qual, através de software próprio, realiza a aquisição, redução e armazenamento de dados e o controle do instrumento (testes de desempenho geral, medidas). O equipamento pode ser programado para trabalhar sozinho através do uso de esquemas de medidas previamente elaborados pelo usuário.

A luz solar pode entrar no aparelho pelo domo de UV ou através de uma janela de quartzo inclinada, sendo direcionada ao prisma diretor o qual seleciona a luz de céu zênite (ZS), direto ao Sol (DS), do domo de UV ou das lâmpadas de calibração; a forma de entrada da luz dependerá do tipo de medida que se quer realizar.

Uma lâmpada de mercúrio fornece uma fonte padrão para calibração do comprimento de onda do Espectrofotômetro e uma lâmpada alógena fornece uma fonte de luz bem regulada para monitorar a resposta espectral relativa do espectrômetro.

Uma grade espectrométrica dispersa a luz ultravioleta para um plano focal; 6 fendas de saída estão posicionadas ao longo do plano focal nos comprimentos de onda de operação, sendo que uma delas é utilizada somente para a calibração do micrômetro através da lâmpada de mercúrio (teste HG).

As medidas DS objetivam a obtenção da coluna total de ozônio e dióxido de enxofre, sendo utilizados para isso cinco comprimentos de onda 306,3; 310,1; 313,5; 316,8; 320,1 nm, com resolução aproximada de 0,5 nm para ozônio.

Quando as medidas de radiação ultravioleta são realizadas, a radiação UV-B proveniente do Sol e do céu, respectivamente radiação direta e difusa, atingem o domo de onde a radiação é direcionada para o prisma, o qual está voltado para o interior do equipamento. A radiação solar medida pelo instrumento passa por um conjunto de lentes, filtros atenuadores e seccionadores de radiação, colimadores, fendas seletoras, espelhos e rede de difração para incidir no cátodo de um tubo fotomultiplicador que transforma o feixe de luz de comprimento de onda  $\lambda$  num sinal elétrico interpretado como pulso pela cadeia eletrônica Brewer. As diferentes posições do prisma e os percursos que a luz executa até atingi-lo, para depois entrar na íris, estão ilustrados na Figura 4.1.

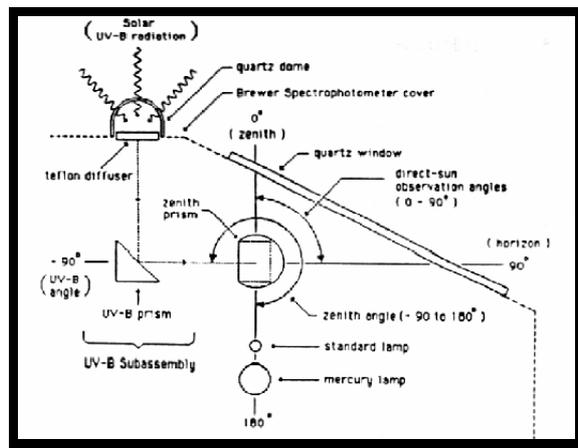


Fig. 4.1 - Possíveis posicionamentos do prisma e caminhos percorridos pela luz até chegar ao prisma nos Brewers MKII e MKIV. Fonte: Manual de Operação do Espectrofotômetro Brewer MK II.

O modelo MKIII #167 difere dos dois espectrofotômetros citados anteriormente por possuir a faixa de medida da radiação espectral mais ampla, compreendendo de 286,5 nm a 363,0 nm, também com resolução de 0,5 nm, e por apresentar um duplo sistema

óptico, este sistema oferece uma maior confiabilidade no isolamento dos comprimentos de onda selecionados.

A luz, após incidir na máscara, SL1, é direcionada para baixo e refletida sob outro espelho esférico, SM2, que faz o feixe de luz incidir sobre uma segunda grade de difração, GR2, e só então que o feixe de luz vai para a fotomultiplicadora, PM1, conforme ilustrado na Figura 4.2.

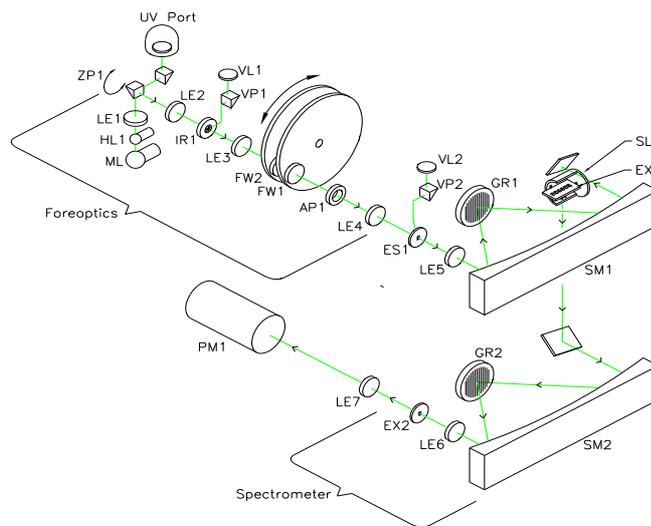


Fig. 4.2 – Elementos ópticos do Espectrofotômetro Brewer MK III. Fonte: Manual do Espectrofotômetro Brewer MK III.

O Espectrofotômetro Brewer instalado no Observatório Espacial do Sul é mostrado na Figura 4.3, onde observa-se em detalhe o tripé, o sistema de rastreamento do Sol (tracker), a janela de entrada do feixe de luz solar, para medida dos gases atmosféricos, e o domo, acima da janela, para medida da radiação ultravioleta.

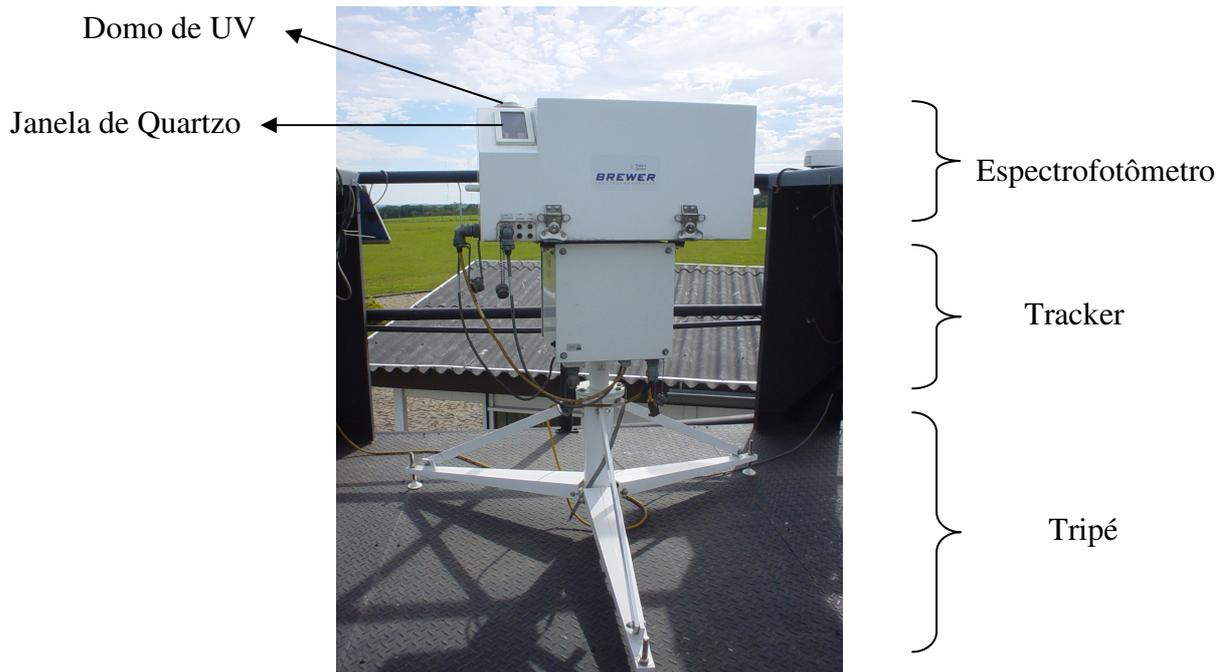


Fig. 4.3 - Espectrofotômetro Brewer MK III # 167 atualmente instalado no Observatório Especial do Sul - OES/CRSPE/INPE - MCT, em São Martinho da Serra, RS.

#### 4.1.2 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS)

Outra fonte de aquisição de dados para esta análise foi através do Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) que é um instrumento desenvolvido pela National Aeronautics and Space Agency (NASA) e mede ozônio diariamente fornecendo mapas globais de alta resolução de ozônio total contido na atmosfera. Esse instrumento existe desde 1978, iniciando suas medidas com o lançamento do satélite Nimbus-7, continuando de 1991 a 1994 a bordo do satélite Meteor-3 e desde 1996 a bordo do Earth Probe o qual opera até os dias de hoje.

O TOMS utiliza a técnica Backscatter Ultraviolet (BUV), um método de medida que determina ozônio indiretamente pelo mapeamento da luz ultravioleta emitida pelo Sol e retroespalhada pela atmosfera terrestre na direção do satélite. Ele faz amostragem da radiação UV retroespalhada em 6 comprimentos de onda, que sofrem absorção diferencial pelo ozônio. Comparando essas medidas entre si com as medidas provenientes do Sol, o algoritmo do TOMS calcula a coluna total de ozônio.

Os dados de ozônio do TOMS utilizados neste trabalho são do algoritmo processado versão 8, disponíveis no site da NASA e freqüentemente correlacionados com as medidas do Espectrofotômetro Brewer a fim de verificar a acuracidade dos dados.

## **4.2 Análise das Wavelets**

Análise por Wavelets (ondeletas) é uma ferramenta contemporânea importante para estudos em estatística, processos estocásticos, certas áreas da matemática como processamento de sinais, codificação e compressão de imagens, turbulência, música, estudo de fenômenos geofísicos entre outros. Segundo Meyers (1993), sua história passa por pesquisadores como Fourier em 1807, Haar em 1910, Calderón em 1960, Grossmann e Morlet em 1980. A análise de wavelets focaliza-se no processamento de sinais, localizados no tempo (ou espaço), o que as torna ideais para analisar sinais não-estacionários contendo estruturas tipo fractais e transitoriedades. As wavelets analisam a decomposição de uma série temporal dentro do espaço tempo-freqüência simultaneamente, podendo-se determinar a variação desta amplitude em relação ao tempo. Ao contrário das bases de Fourier, os coeficientes de wavelets caracterizam o comportamento local de um sinal, enquanto os coeficientes de Fourier caracterizam o comportamento global.

### **4.2.1 Concepção de Freqüência e Escala**

Freqüência é um atributo físico de um processo ou sinal, como por exemplo, a característica de propagação de um meio que depende da freqüência de viagem da onda. Já o entendimento de Escala no contexto geofísico, segundo Bloschl e Sivapalan (1995), apresenta duas perspectivas: “escala de processo” a qual envolve a escala natural do fenômeno exibido, é caracterizada em termos de tempo de duração, período e correlação de extensão do processo; e “escala de observação” a qual depende da escolha de forma de medida do fenômeno, sendo caracterizada em termos da cobertura ou extensão temporal ou espacial, espaço entre dados ou integração do volume de dados.

#### 4.2.2 Análise Tempo-Frequência

Uma característica marcante da transformada de wavelets é apresentar boas propriedades de localização nos domínios de tempo e frequência através da possibilidade de obtenção de expansão de bases ortogonais.

O Princípio da Incerteza, segundo o qual não se pode ganhar simultaneamente em resolução no domínio do tempo e da frequência, aplica-se à transformada de wavelet. Por meio da Figura 4.4 observa-se o uso de diferentes bases cada qual favorecendo tempo ou frequência. Quando a transformada de wavelet é a base (Figura 4.4(d)) altas frequências podem ser bem localizadas no tempo, porém a incerteza na localização da frequência aumenta com o aumento da frequência, ou seja, grandes escalas bem resolvidas no domínio da frequência implicam em incerteza em sua localização. Assim, como exemplificado pela Figura 4.4, o plano tempo-frequência é predeterminado pela função base.

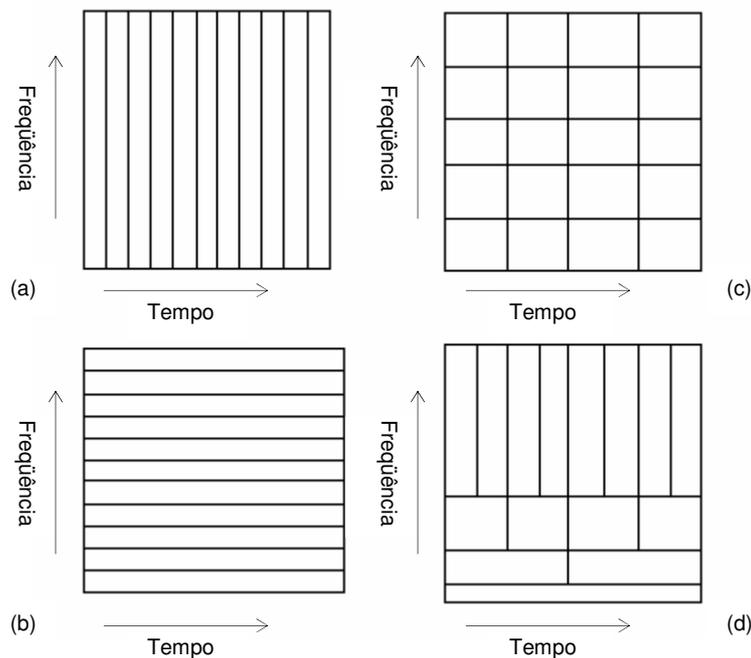


Fig. 4.4 - Esquema de decomposição do plano tempo-frequência usando diferentes bases: (a) Padrão, (b) Fourier, (c) Fourier Janelada e (d) Wavelet. Fonte: Kumar P. e Foufoula-Georgiou, 1997, pg 389, com modificações.

### 4.2.3 Transformada Wavelet

A análise por wavelets tem como base a convolução do sinal de interesse com sucessivas funções, representativas de escalas diferentes que são as funções wavelets. A idéia tanto na análise de Fourier quanto na análise usando wavelets (ou em qualquer outra base) é aproximar uma função por uma combinação linear de senos e cossenos ou ondeletas, respectivamente. Funções com descontinuidades e picos necessitarão menos ondeletas do que senos e cossenos, para uma aproximação comparável.

A transformada de wavelets de uma função  $f(t)$ , que representa a série de dados a ser analisada, é definida como a transformada da integral

$$Wf(\lambda, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \overline{\psi_{\lambda, t}}(u) du \quad \lambda > 0, \quad (4.1)$$

onde

$$\psi_{\lambda, t}(u) \equiv \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \psi\left(\frac{u-t}{\lambda}\right) \quad (4.2)$$

representa um família de funções chamadas ondeletas,  $\lambda$  é o parâmetro de escala,  $t$  o parâmetro de localização (corresponde aos diferentes instantes ao longo do tempo) e  $\overline{\psi_{\lambda, t}}(u)$  o complexo conjugado de  $\psi_{\lambda, t}(u)$ . Mudando o valor de  $\lambda$  tem-se o efeito de dilatação ( $\lambda > 1$ ) ou contração ( $\lambda < 1$ ) da função  $\psi(t)$ , e mudando  $t$  tem-se a análise da função  $f(t)$  ao longo de diferentes pontos. A transformada de wavelet promove uma flexibilidade na janela tempo-escala, funcionando como um zoom, onde se reduz para características de pequena escala e amplia-se quando foco é de larga escala. É importante notar ainda, que  $\psi_{\lambda, t}(t)$  tem a mesma forma para todos os valores de  $\lambda$ . A transformada de wavelet expressada em (4.1) é chamada Transformada Wavelet Contínua (CWT), pode ser obtida de diversos parâmetros  $\lambda$  e  $t$  diferentes para uma mesma função; é uma transformada linear onde a transformada de wavelet da soma de dois sinais é a soma da transformada de wavelet individual de cada sinal; e também a transformada de wavelet de uma função vetor é um vetor cujos elementos são a transformada de wavelet dos componentes do vetor.

O termo  $\sqrt{\lambda}$  no denominador da equação (4.2) corresponde a um fator de normalização da energia de cada wavelet  $W(\lambda, t)$ , onde a função  $\psi(t)$  tem a mesma energia para todas as escalas. A equação (4.1) apresentada possibilita transformar uma série temporal num espaço a dois parâmetros  $(\lambda, t)$  que traduz a medida local da amplitude relativa de variabilidade com escala “ $\lambda$ ” no instante “ $t$ ”.

A transformada de wavelet inversa, apresentada a seguir na expressão (4.3), pode ser vista como uma reconstrução  $f(t)$ , uma vez que  $Wf(\lambda, t)$  é escrito como a superposição de ondeletas  $\psi_{\lambda,t}(u)$ .

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \lambda^{-2} Wf(\lambda, u) \psi_{\lambda,t}(t) d\lambda du \quad (4.3)$$

onde  $C_{\psi}$  é constante, dependendo do tipo de wavelet escolhida.

Com isso, existem muitas possibilidades de escolha usando diferentes funções como wavelets. A escolha da função ondeleta depende de diversos fatores como, por exemplo, simetria e assimetria, wavelet contínua ou discreta, complexa ou real entre outros. A seguir são discutidos alguns parâmetros:

#### 4.2.3.1 Função Wavelet Simétrica ou Assimétrica

A magnitude da transformada de ondeleta usando uma wavelet simétrica é grande em fronteiras de transição, enquanto que usando wavelet assimétrica é grande no centro de transição.

#### 4.2.3.2 Função Wavelet Ortogonal ou Não Ortogonal

Em uma análise ortogonal, o número de convoluções em cada escala é proporcional à largura da wavelet base desta escala. A análise de algumas séries temporais com mudanças aperiódicas produz um espectro diferente. Neste caso, uma análise não ortogonal é altamente redundante em largas escalas, onde o espectro em tempos adjacentes é altamente correlacionado.

#### 4.3.2.3 Função Wavelet Complexa ou Real

Uma wavelet complexa retorna informações sobre amplitude e fase, além de ser melhor para capturar o comportamento oscilatório. Já a wavelet real retoma somente componentes simples e pode ser usada para isolar picos ou discontinuidades.

Uma ondeleta popular é a Morlet (Figura 4.5), utilizada nesta análise por ser uma função complexa e possuir características tais como simetria ou assimetria, e variação temporal brusca ou suave (Torrence e Compo, 1998), expressa na equação

$$\psi(t) = \pi^{1/4} e^{iw_0 t} e^{-t^2/2} \quad (4.4)$$

Esta wavelet é a multiplicação de uma onda seno por uma gaussiana, onde a primeira exponencial do produto da equação corresponde a onda exponencial complexa e a segunda exponencial corresponde a parte gaussiana. A ondeleta pode ser representada pela parte real de seu coeficiente, na qual é capaz de descrever tanto a intensidade quanto a fase do sinal (Weng e Lau, 1994).

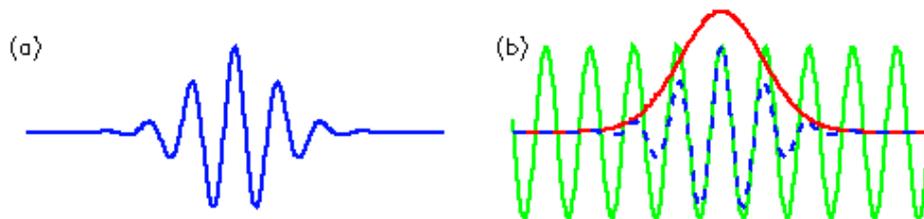


Fig. 4.5 - (a) Wavelet de Morlet, de largura e amplitude arbitrárias. (b) Construção da wavelet de Morlet (linha azul tracejada) como uma curva seno (linha verde) modulada por uma Gaussiana (em vermelho). Fonte: Torrence e Compo, 1998.

#### 4.2.4 Cone de Influência (COI)

O cone de influência é a região do espectro de Wavelet onde os efeitos de borda tornam-se importantes. Como as séries temporais são finitas, erros irão ocorrer no começo e no fim do espectro da Wavelet, pois a Transformada de Fourier assume que o dado é cíclico. Uma solução é incluir zeros nos extremos da série e depois removê-los,

limitando assim os efeitos de borda e aumentando a eficiência do cálculo da Transformada de Fourier.

#### **4.2.5 Intervalo de Confiança**

É definido como a probabilidade que a verdadeira potência da wavelet em um determinado local e escala se encontra dentro de um determinado intervalo sobre a potência estimada da wavelet.

## **CAPÍTULO 5**

### **ATIVIDADES DESENVOLVIDAS PELO BOLSISTA**

#### **5.1 Visitas Técnicas ao Observatório Espacial do Sul**

Um grupo de integrantes do Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico desloca-se semanalmente ao Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE - MCT, em São Martinho da Serra - RS, com a finalidade de verificar o funcionamento dos equipamentos, calibração e manutenção preventiva, coleta de dados e limpeza de equipamentos, conforme citado a seguir.

##### **5.1.1 Calibração do Espectrofotômetro Brewer**

O Espectrofotômetro Brewer, por ser um equipamento bastante delicado, em parte devido à sua grande complexidade e precisão, precisa ser calibrado quinzenalmente de forma a atenuar possíveis imprecisões de suas medidas provenientes de desajustes naturais. Um kit composto por uma fonte ajustável de precisão, um multímetro, um suporte para as lâmpadas e as lâmpadas padrão fornecidas pelo fabricante é utilizado para calibração.

As lâmpadas possuem um espectro de radiação conhecido e são testadas em laboratório pelo fabricante do equipamento. Estas lâmpadas são instaladas em um anteparo apropriado que é acoplado sobre o domo de UV-B. Através de uma seqüência de comandos dados no programa de controle do Brewer, este ajusta a rede de difração e faz a leitura da irradiância da lâmpada, medindo a potência em alguns comprimentos de onda, da mesma forma como se estivesse executando uma medida do tipo UV. Em cada calibração podem ser utilizadas de uma a três lâmpadas, sendo que para cada lâmpada acoplada entra-se com a linha de comandos de calibração no programa do Brewer. As medidas que o Brewer faz das lâmpadas são gravadas em um arquivo de nome XLdddyy.167, onde ddd representa o dia Juliano e yy o ano.

Cada lâmpada possui um arquivo contendo a sua irradiância medida em laboratório. São arquivos do tipo LAMP $nnn$ .IRR, onde  $nnn$  representa o número da lâmpada. Pela comparação das medidas obtidas pelo Brewer e originárias dos arquivos de irradiância padrão das mesmas, é gerado um arquivo de resposta no formato UVR $dddyy$ .167, onde  $ddd$  é o dia Juliano da calibração,  $yy$  é o ano e 167 é o número do equipamento. Esse arquivo é gerado no Software UVBrewer 2.1.

A calibração serve para observar as respostas do aparelho à irradiância emitida pela lâmpada. As curvas de calibração originárias são guardadas no arquivo UVR, que é o arquivo de resposta do espectrofotômetro.

## **5.1.2 Manutenção Preventiva dos Equipamentos**

### **5.1.2.1 Troca da Sílica Gel**

Todo equipamento eletrônico é bastante vulnerável à ação da umidade, principalmente suas partes ópticas, tais como filtros a base de sílica. Assim, a maioria dos equipamentos pertencente os PMOA possui um compartimento interno próprio para sílica gel. Esta sílica é trocada frequentemente a fim de se ter um controle da umidade no interior dos equipamentos e conseqüentemente medidas mais confiáveis.

### **5.1.2.2 Limpeza e Polimento**

A limpeza dos equipamentos se faz necessária não somente por questões estéticas, mas principalmente para diminuir a interferência de poeira, por exemplo, na absorção de energia solar. Todos os detectores são de cor branca, o que aumenta o albedo dos corpos. Sendo assim, a energia incidente nos equipamentos é mínima exceto nos domos de quartzo, onde a radiação é transmitida para o interior do equipamento. Essa refletividade da radiação evita o superaquecimento, o que implicaria em alterações nas medidas. No caso do Brewer, este é ainda polido com uma cera especial evitando ao máximo que a radiação seja absorvida por partes que não sejam o domo ou a janela de quartzo.

### **5.1.3 Coleta de Dados**

Visitas freqüentes ao OES/CRSPE/INPE – MCT são necessárias para que sejam coletados dados. O equipamento Biômetro 501-A funciona com datalogger, sendo de extrema importância a coleta periódica dos dados, pois possui um sistema de aquisição com tempo limitado. Os Radiômetros e o Espectroradiômetro, que até o início de 2005 encontravam-se acoplados a dataloggers, atualmente funcionam com laptops permitindo um período maior de armazenamento. Mesmo assim, fazem-se necessárias visitas semanais para que os dados dos equipamentos citados e também do GUV e Brewer, ligados a computadores, sejam copiados e trazidos ao CRSPE/INPE - MCT para redução e análise.

### **5.1.4 Redução de Dados**

Para se trabalhar com os dados dos equipamentos é necessário que estes sejam previamente reduzidos. Esta redução é feita a partir de programas como UVBrewer versão 2.1, Origin e Excel. Uma vez reduzidos, os dados estão prontos para serem analisados. São efetuadas diversas análises, tais como correlações e comparações dependentes do tipo de variável em questão, tais como irradiância total, ponderada com espectros de ação específicos, eritema, índice de UV, etc. Comparações entre equipamentos são normalmente feitas para verificar o seu funcionamento. Demais análises visam o monitoramento da Radiação UV na região central do Rio Grande do Sul.

## **CAPÍTULO 6**

### **RESULTADOS E ANÁLISES**

A partir dos dados da coluna total de ozônio, foi feita a análise da variabilidade temporal do conteúdo integrado de ozônio para a Região Central do Sul do Brasil. Para tanto se fez necessário refino nos dados de ozônio obtidos pelo Brewer. Simultaneamente a análise e o aprendizado da Teoria da Wavelets foram desenvolvidos durante todo projeto, juntamente com o aperfeiçoamento dos softwares utilizados.

#### **6.1 Análise e Correção dos Dados da Coluna Total de Ozônio do Brewer**

Os dados da coluna total de ozônio do Brewer, utilizados nesta análise, provêm das medidas DS, por serem mais precisas. Primeiramente, o teste diário de calibração SL (Standard Lamp) do Brewer é verificado para cada dia da análise. Este teste de calibração é feito com a finalidade de garantir a boa performance do Brewer em suas medidas de ozônio ao longo da banda operacional espectral utilizada, realizado diariamente. Ao final de um dia, a partir dos resultados médios das calibrações diárias, é gerada uma constante que é comparada com a constante de referência do Brewer. Dias com valores distantes da referência não foram usados, visto que podem indicar problemas com o equipamento ou fontes de energia elétrica.

#### **6.2 Adaptação do Software para Construção das Wavelets**

Muitos pacotes computacionais disponíveis atualmente calculam e geram wavelets a partir de uma base de dados. Neste estudo, inicialmente, foi utilizado o script proposto por Torrence e Campo (1998) com adaptações para o programa Matlab e posteriormente a comparação dos espectros obtidos com os gerados no site (<http://ion.researchsystems.com/IONScript/wavelet/>). As modificações no script e dos parâmetros disponíveis na página são apresentadas no Apêndice A e correspondem às atividades realizadas pelo bolsista substituído Rafael Peres. Depois de alguns testes, o programa IDL passou a ser utilizado para geração dos espectros devido a sua melhor visualização dos dados.

### 6.3 Descontinuidade dos Dados de Ozônio

Nos dados da coluna total de ozônio do Espectrofotômetro Brewer observaram-se descontinuidades devido principalmente aos seguintes fatores:

- **Nebulosidade:** em dias muito nublados ou com chuva, o espectrofotômetro não consegue coletar medidas válidas de DS, esta é substituída pela medida ZS (Céu Zênite), que é mais imprecisa. As medidas ZS não foram utilizadas neste trabalho.
- **Períodos de trocas de equipamento:** houve duas trocas de equipamentos, uma em 1999 e a segunda em 2002, resultando em ausência significativa de dados nesses períodos.

A maioria dessas descontinuidades foi completada com dados de ozônio da coluna total do TOMS para a mesma latitude do Observatório Espacial do Sul, de forma a obter-se um arquivo com o mínimo de falhas possível. A utilização de dados de ozônio do TOMS para completar falhas do Brewer é possível, pois os equipamentos apresentam uma boa correlação entre seus dados, conforme mostra a Figura 6.1, onde se visualiza as descontinuidades; em azul são os valores encontrados pelo Brewer e em preto pelo TOMS. Pode-se observar a boa correlação entre os dados.

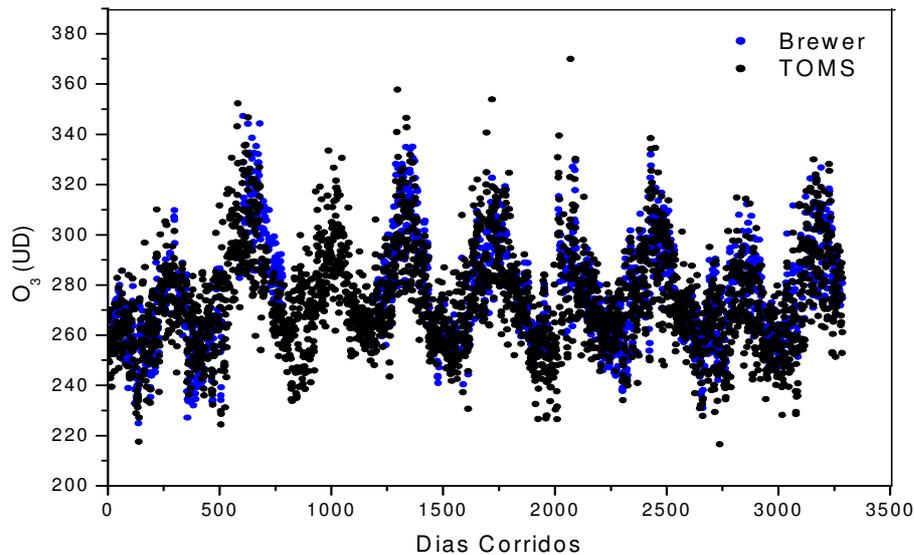


Fig. 6.1 - Comparação entre a coluna total de ozônio fornecida pelos equipamentos Espectrofotômetro Brewer (em azul) e pelo sensor TOMS (em preto) no período de 01/01/1997 a 31/12/2005 para o Observatório Especial do Sul - OES/CRSPE/INPE - MCT, em São Martinho da Serra, RS.

#### 6.4 Variabilidades Temporais do Conteúdo Total de Ozônio no OES/CRSPE/INPE - MCT

O ozônio possui uma variabilidade relacionada com escalas temporais, como por exemplo, diária, semanal, sazonal, anual, interanual, entre outras. Estas podem ser muito bem visualizadas através da análise com wavelets. A variabilidade do conteúdo total de ozônio no Observatório Especial do Sul, em São Martinho da Serra, durante o período de 01 de janeiro de 1997 a 31 de dezembro de 2005, é apresentada na Figura 6.2, onde se observa claramente o ciclo anual com máximos durante a primavera e mínimos no outono.

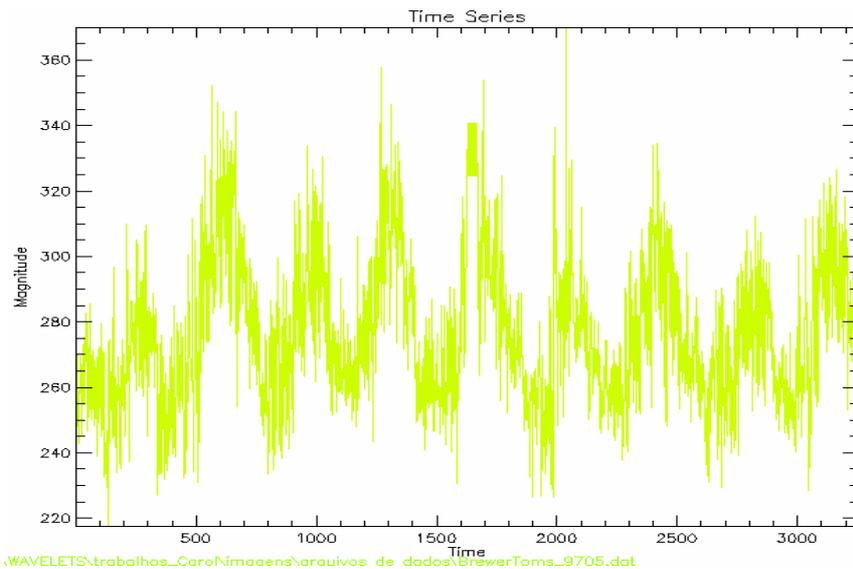


Fig. 6.2 - Série temporal diária do conteúdo total de ozônio (em Unidades Dobson) no Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE - MCT, em São Martinho da Serra, RS, utilizando-se dados obtidos pelo espectrofotômetro Brewer e pelo sensor TOMS, durante o período de 01/01/1997 a 31/12/2005.

O espectro global de potência e o espectro contínuo de ondeletas são apresentados nas Figuras 6.3 e 6.4, respectivamente, para o Observatório Espacial do Sul, através das quais é possível identificar as variabilidades do ozônio. Os resultados foram obtidos integrando o espectro de escalas ao longo de todos os dias do período considerado. Podem-se observar na Figura 6.3 picos no diagrama de escalas em torno de poucos dias, por volta de seis dias, e harmônicos dominantes em 27, 83 e 187 dias e em 1, 1,7 e 2,4 anos.

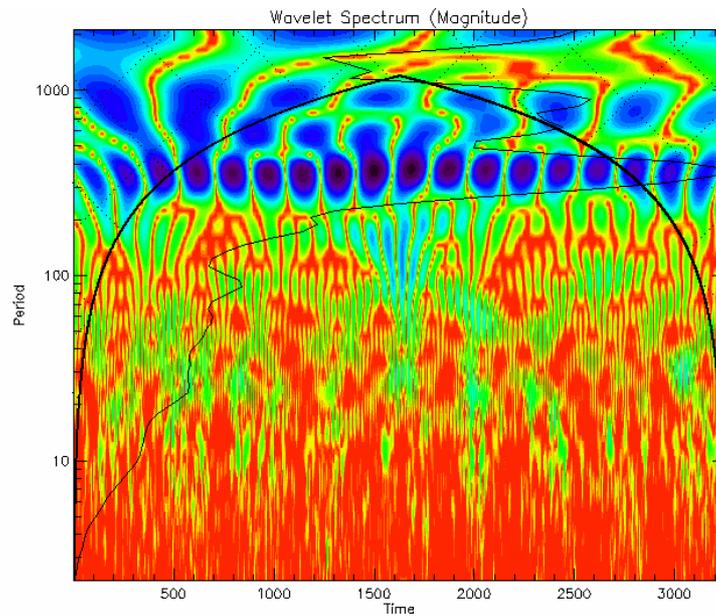


Fig. 6.3 - Espectro global de potência sobreposto pelo diagrama de escalas (Transformada Ondeleita) do conteúdo total de ozônio no Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE - MCT, em São Martinho da Serra, RS, período de 01 de janeiro de 1997 a 31 de dezembro de 2005.

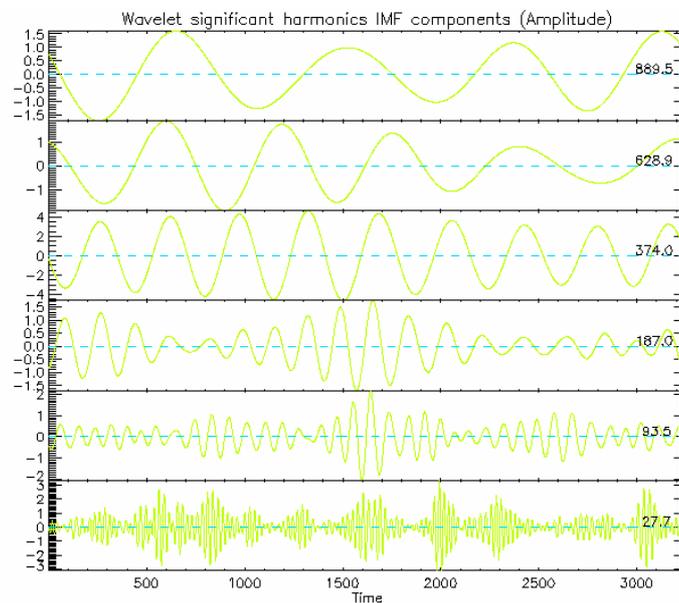


Fig. 6.4 - Espectro contínuo mostrando o comportamento das oscilações de maior frequência do conteúdo total de ozônio no Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE - MCT, em São Martinho da Serra, RS, período de 01 de janeiro de 1997 a 31 de dezembro de 2005.

Os picos no espectro de potência nas escalas de poucos dias não apresentam regularidade e possivelmente estão associados à passagem de sistemas frontais pela região. Nestes casos, a tropopausa pode ficar mais baixa ou alta, e a quantidade de ozônio aumentar ou diminuir (Vigliarolo, et al., 2001). A variabilidade diária do ozônio é modulada por eventuais interações entre a circulação atmosférica tropical e extratropical. Além disso, ela também pode ser afetada por causas naturais, como erupções vulcânicas, ou atividade humana.

A variabilidade nas escalas de 27 e 83 dias correspondem à presença de oscilações intra-sazonais, conforme mostra a Figura 6.4, a qual é mais evidente em alguns anos do período considerado. Por outro lado, o ciclo anual, semianual e a oscilação quase-bianual estão bem caracterizados, destacando-se que essas componentes também variam com o tempo, apresentando inclusive forte interação de escalas em alguns anos, entre os ciclos semianual e intra-sazonal com o anual. Os processos físicos que possibilitam essas interações ainda não são bem conhecidos. O ciclo QBO dos ventos equatoriais na estratosfera é marcante constituído por dois harmônicos com períodos de 1,7 e 2,4 anos.

### **6.5 Caracterização da Evidência do Buraco de Ozônio em 30°S por Meio de Wavelets**

Fenômenos de pequena escala temporal, como o efeito secundário do Buraco de Ozônio em baixas latitudes, apresentada por Kirchoff et al. (1996), podem ser visualizadas através das wavelets. Para isso foi feita uma análise preliminar para o ano de 2000, apresentada na Figura 6.5, gerando o espectro contínuo de ondeletas, mostrado na Figura 6.6, onde se observa variabilidades na escala de 2 e 3,5 dias, com oscilações principalmente entre os dias julianos 200 e 300, período que compreende a primavera com os maiores valores de ozônio na região do Observatório Espacial do Sul.

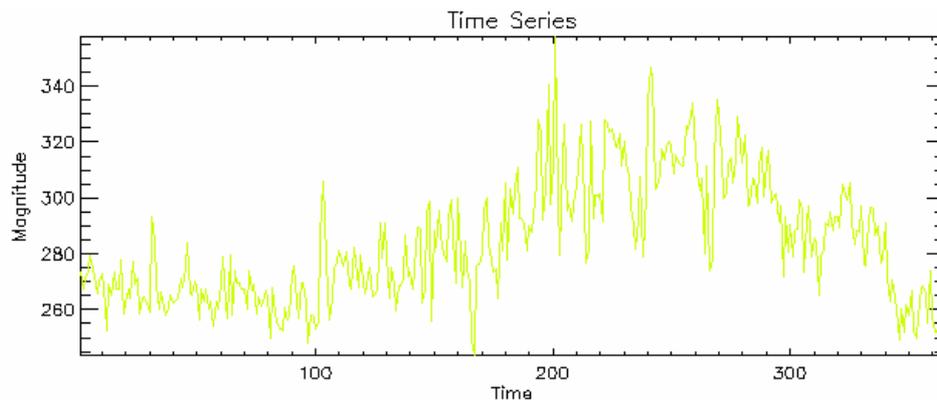


Fig. 6.5 - Série temporal diária do conteúdo total de ozônio (em Unidades Dobson) no Observatório Espacial do Sul, utilizando-se dados obtidos pelo espectrofotômetro Brewer e pelo sensor TOMS, durante o ano de 2000.

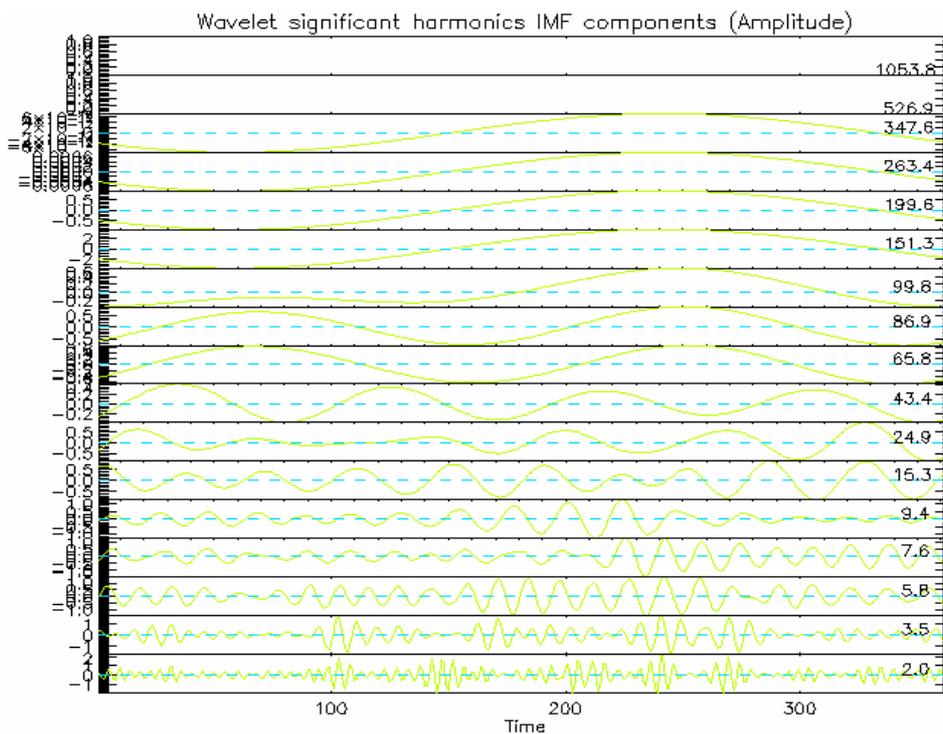


Fig. 6.6 - Espectro contínuo mostrando o comportamento das oscilações de maior frequência do conteúdo total de ozônio no Observatório Espacial do Sul, durante o ano de 2000, destaque para as oscilações de 2 e 3,5 dias.

Este período do ano 2000 foi escolhida para análise porque foi um dos anos onde a região foi mais atingidas pelos efeitos secundários do Buraco de Ozônio Antártico,

como pode ser visualizado nas Figuras 6.7 e 6.8, que apresentam imagens do conteúdo total de ozônio do TOMS, onde se observam massas de ar podres em ozônio provenientes do buraco da Antártica sobre o Estado, com duração de dois a três dias, entre a chegada até a sua passagem.

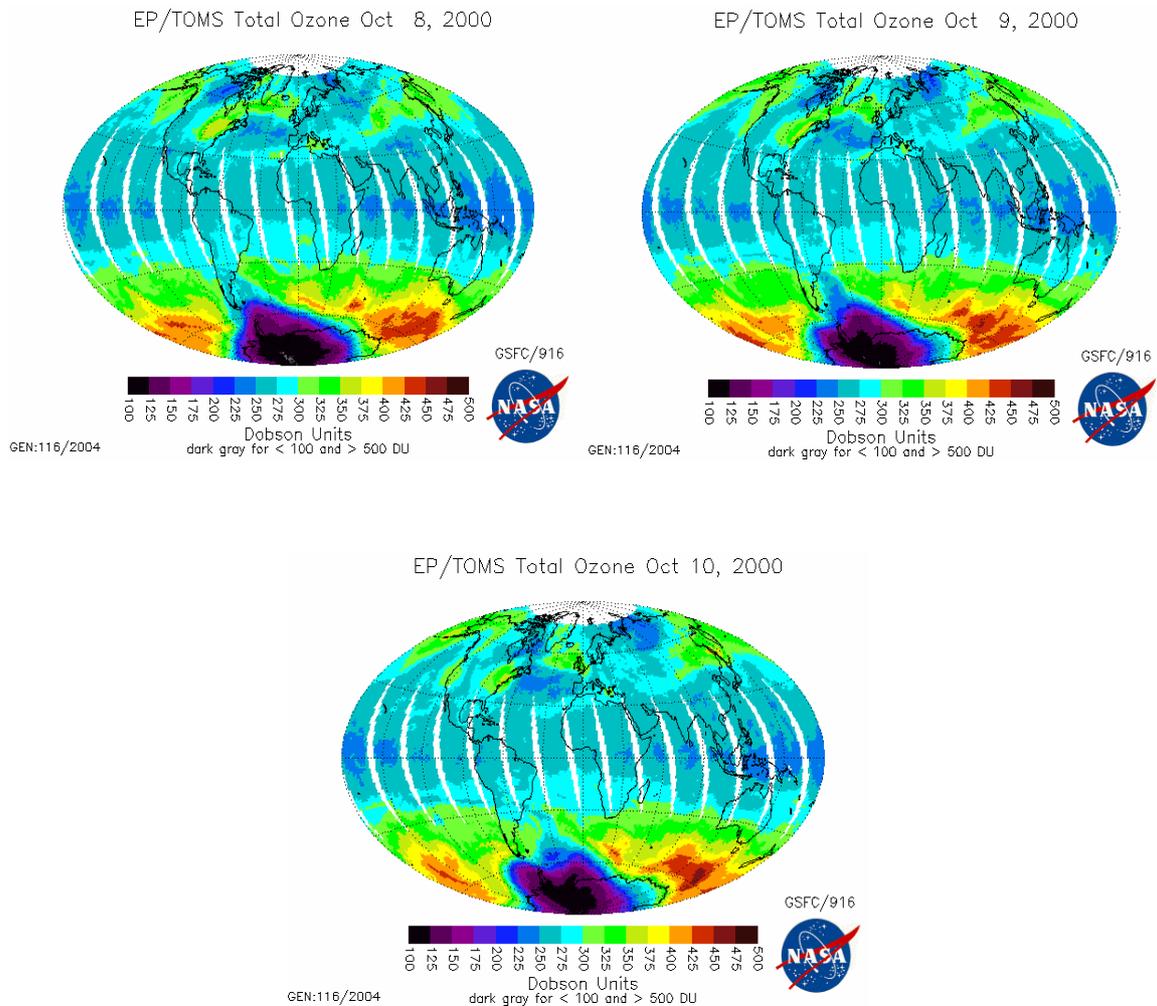


Fig. 6.7 - Imagens mostrando diminuição de ozônio na região do Observatório Espacial do Sul devido aos efeitos secundários do Buraco de Ozônio Antártico, para os dias 08, 09 e 10 de outubro de 2000. Fonte: [http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone\\_v8.html](http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone_v8.html)

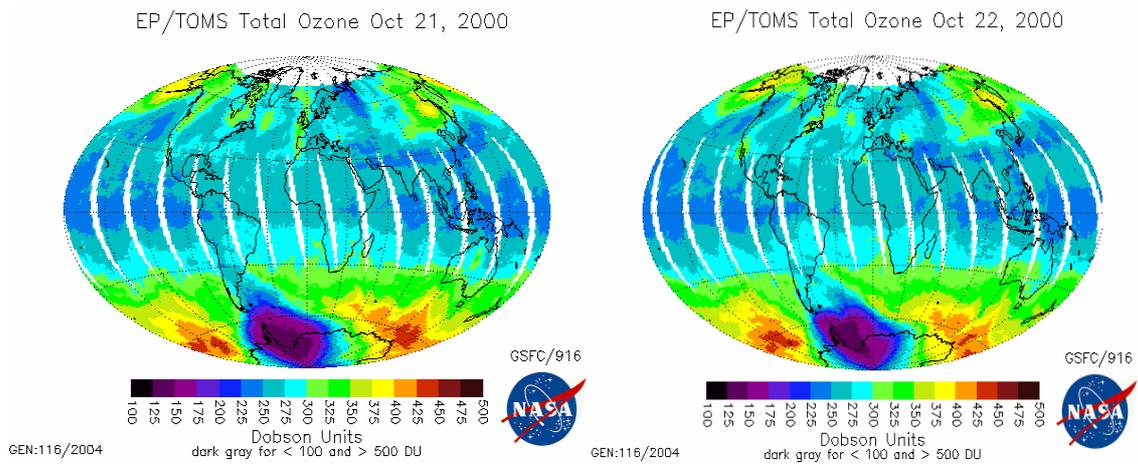


Fig.6.8 - Imagens mostrando diminuição de ozônio na região do Observatório Espacial do Sul devido aos efeitos secundários do Buraco de Ozônio Antártico, para os dias 21 e 22 de outubro de 2000. Fonte: [http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone\\_v8.html](http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone_v8.html)

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSÕES E ATIVIDADES FUTURAS**

O estudo da variabilidade temporal do ozônio está sendo facilitado com a análise das wavelets. A partir da análise dos dados dos gráficos de espectros de potência é possível determinar as variações temporais e associar com os fenômenos meteorológicos correspondentes.

Este estudo avaliou a presença de diversas oscilações estratosféricas nos dados do Observatório Especial do Sul - OES/CRSPE/INPE - MCT, em São Martinho da Serra, RS, que caracterizam o comportamento do conteúdo total de ozônio nessa região. Foi verificado que as oscilações dominantes de alta frequência são mensal, intrasazonal, semi-anual, anual e quase-bianual, e ainda eventos de pequena escala temporal, como os efeitos secundários do Buraco de Ozônio Antártico em baixas latitudes.

Nesta primeira análise foi trabalhada a identificação das variabilidades mais significativas do conteúdo total de ozônio na Região Central do Rio Grande do Sul. Numa próxima etapa, pretende-se trabalhar com eventos que promovem alterações em pequena escala.

Dando continuidade a este Projeto, numa próxima etapa é interesse avaliar as oscilações ao longo da latitude e da longitude do Observatório Especial do Sul e correlacionar as variabilidades do conteúdo total de ozônio com variáveis derivadas do modelo do NCEP.

## CAPÍTULO 9

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- André, I.R.N. – Análise Geográfica da Variabilidade do Ozônio Estratosférico nas Altas e Médias Latitudes da América do Sul e no Setor Oriental da Antártida na Primavera de 1979/1992 e as Relações com a Dinâmica Atmosférica de 11 a 20 de Outubro de 2000, **Doutorado em Geografia (Tese)** – UNESP/IGCE/Rio Claro, 2001. 186p.
- Ambrizzi, T., Kayano, M. T., Stephenson, D. B. A comparison of global tropospheric teleconnections using observed satellite and general circulation model total ozone column data for 1979-91. **Climate Dynamics**, Vol. 14, p. 133-150, 1998.
- Big, G. R., El Niño and the Southern Oscillation. **Weather**, Vol. 45, p. 2-8, 1990.
- Brewer Ozone Spectrophotometer Operator's Manual**, MKIV #081, 1999.
- Brewer Ozone Spectrophotometer Operator's Manual**, MKIII #167, 1999.
- Climerh, **El Niño Oscilação Sul – ENSO**, Disponível em: <<http://www.200.18.5.1/nino/index.html>>. Acesso em: 15 de Maio de 2006
- Dobson, G.M.B. – Ozone in the Atmosphere, In: DOBSON, G.M.B. **Exploring the Atmosphere**. Oxford: University Press, 1968. p. 111-136.
- Farman, J. C., B. G. Gardiner and J. D., Shanklin, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> interaction. **Nature**, Vol. 315, p. 207-210, 1985.
- Garcia, R., and S. Solomon, A possible interaction between interannual variability in Antarctic Ozone and the quasi-biennial oscillation. **Geophys. Res., Lett.**, Vol. 14, p. 848-851
- Gurney, R.J., J.L. Foster, and C.L. Parkinson., **Atlas of satellite observations related to global change**. Cambridge University Press, Cambridge, 1993.
- Herman, J. R., R. McPeters and D. Larko, Ozone depletion at northern and southern latitudes derived from January 1979 to December 1991 Total Ozone Mapping Spectrometer data. **J. Geophys. Res.**, Vol. 98, p. 12783-12793, 1993.

- Kane, R. P., and Sahai Y, Latitude dependence of the quasi-biennial oscillation and quasi-triennial oscillation characteristics. **J. Geophys. Res.**, Vol. 103, p. 8477-8490, 1998.
- Kayano, M. T., Principal modes of the total ozone on the Southern Oscillation timescales and related temperature variations. **J. Geophys. Res.**, Vol. 102, p. 25797-25806, 1997.
- Kumar, P., FoufoulaGeorgiou, E., Wavelet analysis for geophysical applications. **Reviews of Geophysics** **35** (4), p. 385-412, 1997.
- Meyers, S. D., Kelly, B. G. e O'Brien, J. J., An Introduction to Wavelet Analysis in Oceanography and Meteorology: with Application to the Dispersion of Yanai Waves. **Mon. Wea. Rev.**, Vol. 121, p. 2858-2866, 1993.
- Moran, J. M., Morgan, M. D. e Pauley, P. M., **Meteorology: The Atmosphere and the Science of Weather**. New York: Macmillan, 517p., 1994.
- Nelson J. Ferreira, Iara R. Nocentini André, Letícia Palazzi Perez, Variabilidade temporal do ozônio na América do Sul utilizando imagens obtidas pelo sensor TOMS. **Associação de Geografia Teórica AGETEO**, Vol 29, n°.2, p. 253-264
- Peres, R., **Variabilidade Temporal do Conteúdo Integrado de Ozônio no Sul do Brasil**. (Relatório Parcial de Atividades PIBIC) – Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria, Santa Maria, dezembro de 2005.
- Philander, S. G., El Niño and La Niña. **J. Atmos. Sci.**, Vol. 42, n°. 23, p. 2652-2662, 1985.
- Salby, Murry L., **Fundamentals of atmospheric physics**. Academic Press, San Diego, 1996.
- Solomon, S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. **Reviews of Geophysics**, v. 37, n. 3, p. 275 – 316, 1999.
- Torrence, C. e Compo, G. P., **A practical guide to wavelet analysis**. Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 79, p. 61-78, 1998.
- Torrence, C. e Compo, G. P., **A Practical Guide to Wavelet Analysis - Software for Fortran, IDL, and Matlab, 1998** b. Disponível em: <<http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>>. Acesso em: 8 de setembro de 2005.
- Whitten, R. C. and Prasad, S. S., **Ozone in Free Atmosphere**. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 288 p., 1985.

Z. Sergio Luiz, L. Carlos, B. Hugo José, **Séries Históricas Cadastrais da Intensidade, Frequência e Ocorrência do Fenômeno ENSO - El Niño e La Nina.** Disponível em: <[http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/cobrac\\_2002/002/002.htm](http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/cobrac_2002/002/002.htm)>. Acesso em: 17 de Maio de 2006

## CAPÍTULO 10

### TRABALHOS PUBLICADOS E APRESENTADOS

Ao longo do período da bolsa, o bolsista participou dos seguintes eventos:

**1. MODELO PARA CÁLCULO DA COLUNA TOTAL DE OZÔNIO USANDO DADOS DO ESPECTRORADIÔMETRO DO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL.**

**Caroline Bertagnolli**, Rafael Peres, Samara Carbone, Robinson L. Manfro, Damaris K. Pinheiro, Augusta A. M. P. Schuch, H. Nozawa, H. Yamamoto e Nelson J. Schuch.

IX INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, evento realizado em Salvador - Brasil de 11 a 14 de Setembro de 2005.

**2. ANÁLISE DO OZÔNIO TROTOSFÉRICO SOBRE O OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL DE 1996 A 2000.**

Damaris K. Pinheiro, Robinson L. Manfro, Rafael Peres, Samara Carbone, **Caroline Bertagnolli**, Augusta M. P. Schuch, Mary Kayano, Nelson J. Ferreira e Nelson J. Schuch.

IX INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, evento realizado em Salvador - Brasil de 11 a 14 de Setembro de 2005.

**3. MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE UV, OBTIDO COM DADOS DO RADIÔMETRO E DO BIÔMETRO PARA O OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL.**

Samara Carbone, Robinson L. Manfro, Rafael Peres, **Caroline Bertagnolli**, Damaris K. Pinheiro, Augusta A. M. P. Schuch, Mary T. Kayano, Nelson J. Ferreira, Kazuo Makita e Nelson J. Schuch.

IX INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, evento realizado em Salvador - Brasil de 11 a 14 de Setembro de 2005.

**4. MODELO PARA CÁLCULO DA COLUNA TOTAL DE OZÔNIO USANDO DADOS DE RADIÔMETROS DE ULTRAVIOLETA INSTALADOS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL**

**Caroline Bertagnolli**, Tiele Caprioli, Samara Carbone, H. Yamamoto, Damaris K. Pinheiro, Nelson Jorge Schuch.

XX CRICTE – CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA; evento realizado em Foz do Iguaçu – PR de 04 a 07 de Novembro de 2005.

**5. CORRELAÇÃO ENTRE DADOS DE RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA DETECTADOS PELOS EQUIPAMENTOS GUV E PAR DO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL**

**Caroline Bertagnolli**, Jéfferson Gustavo Rosetto, Samara Carbone, Damaris K. Pinheiro, Nelson J. Schuch.

XIX JAI – JORNADA ACADÊMICA INTEGRADA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA; evento realizado em Santa Maria nos dias 08, 09 e 10 de Março de 2006.

**6. SEASONAL OZONE BEHAVIOR THROUGH OZONE TOTAL COLUMN CALCULATION MODEL USING UV SPECTRORADIOMETER AT SOUTHERN SPACE OBSERVATORY: 2003 – 2005.**

**Caroline Bertagnolli**, Tiele Caprioli, Samara Carbone, H. Nozawa, H. Yamamoto, Damaris K. Pinheiro, Nelson J. Schuch.

EUROPEAN GEOSCIENCES UNION GENERAL ASSEMBLY 2006, evento realizado em Vienna - AUSTRIA, de 03 a 07 de Abril de 2006.

**7. BIOMASS BURNING EVENTS INFLUENCE IN AEROSOL DATA BY BREWER SPECTROPHOTOMETER AT SOUTHERN SPACE OBSERVATORY.**

Samara Carbone, Robinson L. Manfro, **Caroline Bertagnolli**, Germano Possani, Tiele Caprioli, Damaris K. Pinheiro, Nelson J. Schuch.

36 th Committee on Space Research (COSPAR), evento realizado em Beijing – CHINA, de 16 a 23 de Julho de 2006.

Além disso, foram submetidos os papers para publicação na revista intitulada BRAZILIAN JOURNAL OF GEOPHYSICS:

**- OZONE TOTAL COLUMN CALCULATION MODEL USING DATA FROM THE UV SPECTRORADIOMETER AND THE UV RADIOMETERS AT SOUTHERN SPACE OBSERVATORY** cujos autores são **BERTAGNOLLI, Caroline**; PERES, Rafael; CARBONE, Samara; MANFRO, Robinson; PINHEIRO, Damaris K.; SCHUCH, Augusta A. M. P.; NOZAWA, Hiromasa; Yamamoto, Hiromasa; SCHUCH, Nelson Jorge.

- **EMPIRICAL MODEL TO DETERMINE THE ULTRAVIOLET INDEX, OBTAINED THROUGH RADIOMETER AND BREWER SPECTROPHOTOMETER FOR SOUTHERN SPACE OBSERVATORY** cujos autores são CARBONE, Samara; MANFRO, Robinson; PERES, Rafael; **BERTAGNOLLI, Caroline**; PINHEIRO, Damaris K.; SCHUCH, Augusta A. M. P.; KAYANO, Mary; FERREIRA, Nelson J.; MAKITA, Kazuo; SCHUCH, Nelson Jorge.

- **OCCURRENCES OF TROPOSPHERIC OZONE PEAK IN MID-LATITUDES ABOVE THE SOUTHERN SPACE OBSERVATORY (29.4 S LAT, 53.8 W LONG): POSSIBLE CAUSES AND SEASONAL VARIATION** cujos autores são PINHEIRO, Damaris K.; MANFRO, Robinson; PERES, Rafael; CARBONE, Samara; **BERTAGNOLLI, Caroline**; GUARNIERI, Fernando L.; ECHER, Ezequiel; e SCHUCH, Nelson Jorge

## **APÊNDICE A**

### **DESCRIÇÃO DO SCRIPT PARA MATLAB**

Estudo e adaptações realizadas pelo bolsista anterior, Rafael Peres, no algoritmo computacional proposto por C. Torrence (1998) para geração das wavelets no programa computacional Matlab.

A partir do script básico foram feitas modificações como a inclusão de uma seqüência para o cálculo da anti-correlação lag1 para o ruído vermelho.

```

load 'ozoniotoms7892.dat' % input time series %
sst = ozoniotoms7892;

%----- Computation
% normalize by standard deviation %
variance = std(sst)^2;
sst = (sst - mean(sst))/sqrt(variance) ;

n = length(sst);
a=sst(1:(n-1));
b= sst(2:n);
c=sst(1:(n-2));
d=sst(3:(n));

alfa1=corrcoef(a,b);
alfa2=corrcoef(c,d);

lag = (alfa1(1,2) + (sqrt(alfa2(1,2))))/2;

dt = 1 ; % escala %
time = [0:length(sst)-1]*dt + 1 ; % construct time array %
xlim = [0,5100]; % plotting range %

pad = 1; % pad the time series with zeroes
dj = 0.125; % this will do 4 sub-octaves per octave
s0 = 2*dt; % scale factor%
j1 = 9/dj; % this says do 9 powers-of-two with dj sub-octaves each
lag1 = lag; % lag-1 autocorrelation for red noise background
mother = 'Morlet';

% Wavelet transform:
[wave,period,scale,coi] = wavelet(sst,dt,pad,dj,s0,j1,mother);
power = (abs(wave)).^2 ; % compute wavelet power spectrum
% Significance levels: (variance=1 for the normalized SST)

```

```

[signif,fft_theor] = wave_signif(1.0,dt,scale,0,lag1,-1,-1,mother);

sig95 = (signif)*(ones(1,n)); % expand signif --> (J+1)x(N) array
sig95 = power ./ sig95;      % where ratio > 1, power is significant

% Global wavelet spectrum & significance levels:
global_ws = variance*(sum(power')/n); % time-average over all times
dof = n - scale; % the -scale corrects for padding at edges
global_signif = wave_signif(variance,dt,scale,1,lag1,-1,dof,mother);

% Scale-average
avg = find((scale >= valor) & (scale <valor));
Cdelta = 0.776; % this is for the MORLET wavelet
scale_avg = (scale)*(ones(1,n)); % expand scale --> (J+1)x(N) array
scale_avg = power ./ scale_avg; % [Eqn(24)]
scale_avg = variance*dj*dt/Cdelta*sum(scale_avg(avg,:)); % [Eqn(24)]
scaleavg_signif = wave_signif(variance,dt,scale,2,lag1,-1,[2,7.9],mother);
whos
%----- Plotting

%--- Plot time series
subplot('position',[0.1 0.75 0.65 0.2])
plot (time,sst)
set (gca,'XLim',xlim(:))
xlabel ('Tempo (Dias julianos)')
ylabel ('Ozonio normalizado')
title('a) Variação de ozonio 78 a 92 para TOMS')
hold off

%--- Contour plot wavelet power spectrum
subplot('position',[0.1 0.37 0.65 0.28])
levels = [0.0625,0.125,0.25,0.5,1,2,4,8,16] ;
Yticks = 2.^(fix(log2(min(period))):fix(log2(max(period))));
contour(time,log2(period),log2(power),log2(levels)); %*** or use 'contourfill'
%imagesc(time,log2(period),log2(power)); %*** uncomment for 'image' plot
xlabel('Tempo (dias julianos)')
ylabel('Period (dias)')
title('b) Ozonio Wavelet Power Spectrum')

```

```
set(gca,'XLim',xlim(:))
set(gca,'YLim',log2([min(period),max(period)]), ...
    'YDir','reverse', ...
    'YTick',log2(Yticks(:)), ...
    'YTickLabel',Yticks)
% 95% significance contour, levels at -99 (fake) and 1 (95% signif)
hold on
contour(time,log2(period),sig95,[-99,1],'k');
hold on
% cone-of-influence, anything "below" is dubious
plot(time,log2(coi),'k')
hold off
%--- Plot global wavelet spectrum
subplot('position',[0.77 0.37 0.2 0.28])
plot(global_ws,log2(period))
hold on
plot(global_signif,log2(period),'--')
hold off
xlabel('Power (dobson^2)')
title('c) Global Wavelet Spectrum')
set(gca,'YLim',log2([min(period),max(period)]), ...
    'YDir','reverse', ...
    'YTick',log2(Yticks(:)), ...
    'YTickLabel',"")
set(gca,'XLim',[0,1.25*max(global_ws)])
%--- Plot scale-average time series
subplot('position',[0.1 0.07 0.65 0.2])
plot(time,scale_avg)
set(gca,'XLim',xlim(:))
xlabel('Tempo (dias)')
ylabel('Avg variance (dobson^2)')
title('d) Scale-average Time Series')
hold on
plot(xlim,scaleavg_signif+[0,0],'--')
hold off

% end of code
```