

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia



Dissertação

**Influência da coluna total de ozônio na variabilidade da radiação
ultravioleta sobre o sul da América do Sul**

Mateus Dias Nunes

Pelotas, 2017

Mateus Dias Nunes

Influência da coluna total de ozônio na variabilidade da radiação ultravioleta sobre o sul da América do Sul

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Félix Alonso

Pelotas, 2017

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

N972i Nunes, Mateus Dias

Influência da coluna total de ozônio na variabilidade da radiação ultravioleta sobre o sul da América do Sul / Mateus Dias Nunes ; Glauber Lopes Mariano, orientador ; Marcelo Félix Alonso, coorientador. — Pelotas, 2017.

110 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, 2017.

1. Radiação solar. 2. Dose eritêmica diária. 3. Sensor OMI. I. Mariano, Glauber Lopes, orient. II. Alonso, Marcelo Félix, coorient. III. Título.

CDD : 551.5271

Banca examinadora:

Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano (Orientador). Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Prof. Dr. Marcelo Félix Alonso (Co-Orientador). Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Prof. Dr. André Becker Nunes. Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Prof. Dr^a. Ericka Voss Chagas Mariano. Doutora em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Dedico a meus filhos, Bernardo, Joaquim e Bento.

Agradecimentos

A meus pais Abrahão e Maria Helena, por representarem grande exemplo de vida e também pela satisfação de vê-los orgulhos dessa conquista.

A meus irmãos Marilene, Abrahão, Fernanda e Gláucia por sempre acreditarem no meu potencial.

A minha esposa Beatriz, leal companheira das horas mais difíceis, pelo apoio incondicional, amor e dedicação à nossa família.

Aos meus filhos Bernardo, Joaquim e Bento (in loading), pelas horas de carinho e amor, já que eles são o principal motivo desta incessante e árdua caminhada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano, por mais uma vez acreditar no meu potencial para o desenvolvimento desta pesquisa, pela paciência, liberdade de trabalho e confiança.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Marcelo Félix Alonso, pelas sempre ótimas dicas, pelo apoio didático e o espaço cedido junto ao grupo GEPA da Faculdade de Meteorologia da UFPel.

A todos que de alguma forma auxiliaram para que esta pesquisa se desenvolvesse, colegas de mestrado, professores e funcionários da FMET, PPGMET e CPPMET da UFPel.

“...A missão de meu pai já foi cumprida, vou cumprir a missão que Deus me deu, se meu pai foi o espelho em minha vida quero ser pro meu filho espelho seu...”

Além do espelho - João Nogueira

Resumo

DIAS NUNES, Mateus. **Influência da coluna total de ozônio na variabilidade da radiação ultravioleta sobre o sul da América do Sul.** 2017. 110f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós - graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

O ozônio (O_3) representa muito menos de 1% dos gases da atmosfera terrestre, entretanto é indispensável para a vida na Terra, pois absorve Radiação Ultravioleta do tipo B (UV-B), que é prejudicial para a saúde de seres vivos. A região tropical é a maior produtora de ozônio estratosférico, entretanto devido à circulação Brewer-Dobson a região apresenta baixos valores de Coluna Total de Ozônio, os quais podem se estender para maiores latitudes. O objetivo geral deste trabalho é investigar a influência da Coluna Total de Ozônio (CTO) sobre a variabilidade da Radiação Ultravioleta (RUV) sobre o sul da América do Sul no período de dezembro de 2004 a novembro de 2014, utilizando dados diários de RUV e CTO do sensor Ozone Monitoring Instrument (OMI) da NASA. Através de análises estatísticas como correlação linear, Análise de Componentes Principais (ACP) analisou-se relação entre as variáveis de CTO e Índice Ultravioleta (I-UV) não sendo percebida nenhuma característica específica tanto meridionalmente como sazonalmente, não evidenciando exclusiva influência/dependência entre as variáveis, quando o coeficiente de correlação linear apresentou valores máximos próximos a 0,5 (50%). O primeiro padrão da ACP mostrou que os meses que possuem forte correlação direta ocorrem nos trimestres Junho-Julho-Agosto (JJA) e Setembro-Outubro-Novembro (SON). A regressão apresentou uma maior dependência/resposta da influência da CTO na RUV no trimestre Dezembro-Janeiro-Fevereiro (DJF) chegando a valores maiores que 0,8. No ano de 2005 as anomalias padronizadas apresentaram em DJF e Março-Abril-Maio (MAM), com valores positivos chegando até 3,0 desvios padrões na região sul do Brasil. As análises dos casos estudados comprovaram que apenas os baixos níveis de ozônio não são determinantes para os altos valores de RUV. A presença de bandas de nebulosidade foi um possível fator determinante para o não registro de elevados valores de RUV. Observou-se que tanto mensalmente quanto sazonalmente o P95 da Radiação Ultravioleta apresenta valores mais elevados nos meses mais quentes do que nos meses mais frios.

Palavras-chave: Radiação Solar, Dose Eritêmica Diária, Sensor OMI

Abstract

DIAS NUNES, Mateus. **Influence of ozone total column in ultraviolet radiation variability over southern South America**. 2017. 110f. Thesis (MA) Post-Graduate degree in Meteorology. Federal University of Pelotas, Pelotas.

Ozone (O_3) is much less than 1% of the gases in the Earth's atmosphere; however, it is essential to life on Earth, because it absorbs ultraviolet radiation of the type B (UV-B), which is harmful to the health of living beings. The tropical region is the largest producer of stratospheric ozone; however, due to the Brewer-Dobson circulation, this region has low values of ozone total column, which can be extended to higher latitudes. The overall goal of this study is to investigate the influence of the Ozone Total Column (CTO) depletion on the variability of the solar Ultraviolet Radiation (UVR) on the south of South America in the period from December 2004 to November 2014, using daily data of UVR and CTO depletion from the sensor Ozone Monitoring Instrument (OMI) from NASA. The relationship between the variables of the global ozone column and the Ultraviolet Index (I-UV) did not show any specific characteristics both meridional and seasonally, showing no influence / dependence between the variables, when the linear correlation coefficient presented values close to 0,5 (50%). The first pattern of PC (Principal Component) showed that the months that have strong direct correlation occur in the quarters June-July-August (JJA) and September-October-November (SON). The linear regression showed a greater dependence from the influence of the CTO in UVR in the quarter December-January-February (DJF) reaching values higher than 0,8. In the year 2005 the anomalies were standardized in DJF and March-April-May (MAM) positive values reaching up to 3,0 standard deviations in the southern region of Brazil. The cases of significant depletion of the CTO layer have proven that only low levels of ozone are not determinant for the high values of UVR. The presence of bands of cloudiness was a possible factor for non-registration of high values of UVR. It was observed that both monthly and seasonally the P95 of ultraviolet radiation has higher values in the warmer months than in the colder months.

Keywords: Solar Radiation, Daily Erythemal Dose, Sensor OMI

Lista de figuras

- Figura 1 - Camadas da atmosfera terrestre e as variações da temperatura (°C) em relação à altura (km) e pressão (mbar).25
- Figura 2 - Perfil do ozônio estratosférico medido em latitudes médias no hemisfério norte através do satélite com espectrômetro da Jet Propulsion Laboratory FTIR (*Fourier Transform Infrared*).....27
- Figura 3 - Espectro de absorção das moléculas de gases minoritários presentes na atmosfera.30
- Figura 4 - Profundidade de penetração da radiação UV na atmosfera terrestre para $\mu_0 = 1$ (cosseno do ângulo zenital) e perfil médio de ozônio. A linha contínua representa a altura em que a profundidade óptica é igual a um.31
- Figura 5 - Dados médios mensais de Coluna Total de Ozônio (Unidades Dobson) em função da latitude para o período 1979-1992, obtidos através do sensor TOMS.....33
- Figura 6 - Diagrama esquemático do padrão de circulação Brewer-Dobson em função da altitude (Km), latitude e pressão (hPa) mostrando a variação entre os anos de 1980 e 1989.....34
- Figura 7- Média sazonal do ozônio estratosférico (UD – unidades Dobson) obtidas pelas imagens do sensor TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) a bordo do satélite Nimbus7, para o período de 1978 a 1993: (a) primavera, (b) verão, c) outono e d) inverno.35
- Figura 8 - Coluna total de O₃ média em função da latitude e época do ano, medida em Unidades Dobson, antes da diminuição antropogênica do ozônio. ...36

Figura 9 - Média zonal da Coluna Total de Ozônio para os meses de outubro de 1970 a 1994 no hemisfério sul.	39
Figura 10 - Valores de Coluna Total de Ozônio para os meses de maio (azuis) e outubro (verdes) de cada cidade. Os tons escuros representam as médias mensais, e os tons claros representam a média dos dias abaixo do limiar mensal.	41
Figura 11 - Perfil Vertical de Ozônio e Altitude de Penetração das faixas UV-A, UV-B e UV-C.	43
Figura 12- Gráfico indicativo do tempo seguro de exposição ao Sol para diferentes tipos de pele de acordo com o Índice Ultravioleta.	45
Figura 13 - Gráfico simultâneo e com filtragem de médias móveis e da variabilidade anual do índice UV (preto e escala no lado esquerdo) e ozônio total (vermelho e escala no lado direito) na cidade de Natal.....	47
Figura 14- Coluna Total de Ozônio (UD) (a), e Radiação Ultravioleta (Índice UV) (b) em Punta Arenas (Chile), de setembro a dezembro de 2009.	49
Figura 15 - Localização das duas áreas dentro da América do Sul. Em verde a delimitação de toda a América do Sul, em azul a região onde também atua o ESBOA.	53
Figura 16 - Campos médios mensais da Coluna Total de Ozônio em UD para a América do Sul entre 2004 a 2014. (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.	65
Figura 17 - Média sazonal da Coluna Total de Ozônio em UD, para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014 na região da América do Sul. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON.....	67
Figura 18 - Média mensal do Índice Ultravioleta (adimensional) para a América do Sul para o decênio entre dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.	69
Figura 19 - Média sazonal do Índice Ultravioleta, para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014 na região da América do Sul. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON.....	70

Figura 20 - Correlação mensal entre a coluna inclinada total de ozônio e o índice ultravioleta para a América do Sul para o decênio entre dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.	72
Figura 21 - Correlação sazonal entre a coluna inclinada total de ozônio e o índice ultravioleta, para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014 na região da América do Sul. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON	74
Figura 22 - Distribuição espacial sazonal da primeira CP de Dose Eritêmica Diária para a região sul da América do Sul para os quatro trimestres. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.	76
Figura 23 - Regressão linear simples entre a PC1 da EOF da Dose Eritêmica Diária na região sul da América do Sul e anomalia da Coluna Total de Ozônio para os quatro trimestres. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.....	77
Figura 24 - Representação gráfica da regressão linear simples entre Coluna Total de Ozônio e Radiação Ultravioleta do tipo DED para os casos com redução significativa dos conteúdos de Ozônio na região do sul da América do Sul selecionados a partir de Schmallfuss (2014). (a) Dispersão entre O_3 e RUV mais reta de regressão linear simples, (b) Dispersão resíduos vs. O_3 , (c) Dispersão resíduos vs. RUV e (d) Dispersão resíduos vs. Tempo.	79
Figura 25 - Anomalia padronizada do trimestre DJF para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) 2004-2005, (b) 2005-2006, (c) 2006-2007, (d) 2007-2008, (e) 2008-2009, (f) 2009-2010, (g) 2010-2011, (h) 2011-2012, (i) 2012-2013, (j) 2013-2014.....	83
Figura 26 - Anomalia padronizada do trimestre MAM para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) 2005, (b) 2006, (c) 2007, (d) 2008, (e) 2009, (f) 2010, (g) 2011, (h) 2012, (i) 2013, (j) 2014.	84
Figura 27 - Anomalia padronizada do trimestre JJA para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) 2005, (b) 2006, (c) 2007, (d) 2008, (e) 2009, (f) 2010, (g) 2011, (h) 2012, (i) 2013, (j) 2014.	85

Figura 28 - Anomalia padronizada do trimestre SON para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) 2005, (b) 2006, (c) 2007, (d) 2008, (e) 2009, (f) 2010, (g) 2011, (h) 2012, (i) 2013, (j) 2014.	86
Figura 29 - Campos mensais do Percentil 95% (P95) de Radiação Ultravioleta (DED) em J/m ² , para a região sul do Brasil no período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.	88
Figura 30 - Variabilidade Sazonal do Percentil 95% (P95) de Radiação Ultravioleta (DED) em J/m ² , para a região sul do Brasil no período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON.	90
Figura 31 - Somatório da quantidade de dias acima do P95, onde o sombreado representa os pontos de grade com valores maiores ou iguais a quinze dias para a região sul do Brasil no período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.	91
Figura 32 - Campo representando a média dos casos extremos (média de cada pixel correspondente a dias diferentes) acima do P95, da Radiação Ultravioleta do tipo DED (em J/m ²), para cada um dos quatro trimestres na região sul do Brasil. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.	93
A. 1 - Projeção polar da média sazonal da Coluna Total de Ozônio em UD, para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014 na região da América do Sul. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON.	106
B. 1 - Segunda e terceira EOF da DED para o decênio de 2004 a 2014 para o trimestre DJF que foram descartadas através do truncamento de Kaiser. EOF2 (2,8%), EOF3 (1,7%).....	107
B. 2 - Segunda e terceira EOF da DED para o decênio de 2004 a 2014 para o trimestre MAM que foram descartadas através do truncamento de Kaiser. EOF2 (1,9%), EOF3 (1,0%).	107

B. 3 - Segunda e terceira EOF da DED para o decênio de 2004 a 2014 para o trimestre JJA que foram descartadas através do truncamento de Kaiser. EOF2 (6,8%), EOF3 (1,2%).....	108
B. 4 - Segunda e terceira EOF da DED para o decênio de 2004 a 2014 para o trimestre SON que foram descartadas através do truncamento de Kaiser. EOF2 (2,7%), EOF3 (1,6%).....	108
Anexo A - Tabela Data e localização do pixel com menor valor de Coluna Total de Ozônio e percentuais de queda em relação à média para cada mês.....	109
Anexo B - Imagens de satélite do GOES-10 para os casos propostos por Schmalfluss (2014).....	110

Lista de tabelas

Tabela 1	Processos químicos chave e ciclos catalíticos envolvendo a molécula de O ₃ na estratosfera.....	29
Tabela 2	Tipos de pele e reação à exposição à radiação UVB.....	46
Tabela 3	Representação da Tabela ANOVA para os casos selecionados por Schmalfluss (2014).....	81

Lista de abreviaturas e siglas

ACP	Análise de Componentes Principais
ANOVA	Análise de Variância
AS	América do Sul
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
BrO	Hipobromito
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
cm ³	Centímetro cúbico
Cinc	Coluna Total de Ozônio Inclinada
CCMs	Complexos Convectivos de Mesoescala
CTO	Coluna Total de Ozônio
CO	Monóxido de Carbono
DED	Dose Eritêmica Diária
DEM	Dosis Erythermal Minimum
DJF	Dezembro-Janeiro-Feveeiro
EOA	Espessura Ótica da Atmosfera
EOS	Earth Observing System
EPA	Environmental Protection Agency
ESBOA	Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
hv	Fotodissociação
H	Hidrogênio

HCHO	Formaldeído
I-UV	Índice Ultravioleta
J/m ²	Joule por metro quadrado
JJA	Junho-Julho-Agosto
Km	Kilômetro
MED	Minimal Erythemat Dosis
MAM	Março-Abril-Maio
mJ/cm ²	Mili Joule por centímetro quadrado
µm	Micrômetro
MSE	Mean Square Error
nm	Nanômetro
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
NEPs	Nuvens Estratosféricas Polares
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio
OMI	Ozone Monitoring Instrument
P95	Percentil 95%
QMReg	Quadrado Médio da Regressão
QMRes	Quadrado Médio dos Resíduos
RUV	Radiação Ultravioleta
R ²	Coeficiente de Determinação
SQRes	Soma dos Quadrados dos Resíduos
SQReg	Soma dos Quadrados da Regressão
SQTotal	Soma Total dos Quadrados
SON	Setembro-Outubro-Novembro
SBUV	Solar Backscatter Ultraviolet
SO ₂	Dióxido de Enxofre
TOMS	Total Ozone Mapping Spectrometer
UD	Unidade Dobson
UV-A	Radiação Ultravioleta A

UV-B	Radiação Ultravioleta B
UV-C	Radiação Ultravioleta C
VP	Vórtice Polar
VOCS	Volatile Organic Compounds
W/m ²	Watts por metro quadrado
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

Sumário

1. Introdução.....	20
2. Revisão Bibliográfica	24
2.1 O ozônio na atmosfera terrestre	24
2.2 Formação do ozônio	28
2.3 Especificidades óticas do O ₃ na atmosfera.....	30
2.4 Oscilações espaço-temporais do ozônio	32
2.5 O buraco de ozônio Antártico	37
2.6 Os efeitos secundários do buraco de ozônio.....	38
2.7 Radiação Ultravioleta	42
2.7.1 Avaliações do índice Ultravioleta	44
2.8 Radiação Ultravioleta UV-B e sua relação com O ₃	46
2.9 O sensor Ozone Monitoring Instrument (OMI).....	49
3. Metodologia	51
3.1 Dados do sensor OMI.....	51
3.2 Região de estudo	52
3.3 Análises da série temporal dos dados de Ozônio e Radiação Ultravioleta	54
3.3.1 Correlação	54

3.3.2	Análise de Componentes Principais	56
3.3.3	Modelos de regressão lineares e não lineares	59
3.3.3.1	Análise de variância (ANOVA).....	60
4.	Resultados e Discussões	64
4.1	Análises mensais e sazonais da coluna total de O ₃	64
4.2	Análises mensais e sazonais da Radiação Ultravioleta (Índice Ultravioleta).....	67
4.3	Correlações entre a coluna total de O ₃ e o Índice Ultravioleta	71
4.4	Padrões de variabilidade sazonal da Radiação Ultravioleta sobre a região sul do Brasil.....	75
4.4.1	Análise dos casos de decaimento da Coluna Total de Ozônio e relação com a Radiação Ultravioleta	78
4.4.2	Variações anômalas sazonais de Radiação Ultravioleta no sul do Brasil.....	81
4.4.3	Comportamento dos casos extremos de Radiação Ultravioleta incidente na superfície no sul do Brasil	87
5.	Conclusões.....	94
	Referências Bibliográficas	97
	Apêndice A – Imagens da média sazonal para os dados de Coluna Total de Ozônio para todo hemisfério sul.....	106
	Apêndice B – Análise de Componentes Principais para a série de dados no sul da América do Sul da Radiação Ultravioleta do tipo Dose Eritêmica Diária (DED).....	107
	Anexos.....	108

1. Introdução

A atmosfera da Terra é constituída por diversos gases que variam na quantidade, dependendo da pressão com relação à altitude. Sua composição química é formada de aproximadamente 78% de nitrogênio e 21% de oxigênio, que somados, integram aproximadamente 99% do total de volume de ar da atmosfera (VIANELLO; ALVES, 2000).

Os constituintes mais importantes para a química da atmosfera estão em pequenas concentrações e assim são denominados como gases-traço. Esses gases são de grande relevância para os estudos ambientais devido às suas grandes emissões na atmosfera terrestre, compondo 1% do total da composição química da atmosfera, sendo O₃ (ozônio), CO (monóxido de carbono) e SO₂ (dióxido de enxofre) alguns dos gases-traço determinantes para observações na química da atmosfera (SEINFELD; PANDIS, 1998).

De acordo com Salby (1995), mesmo estando em pequenas quantidades, o ozônio e o vapor d'água são de extrema relevância para a manutenção da vida dos seres na Terra além da influência no balanço de energia do planeta. O tempo de vida fotoquímico do ozônio pode variar com a altitude, variando de uma hora na alta estratosfera até semanas na baixa estratosfera devido às reações fotoquímicas que ocorrem nessas regiões.

Na estratosfera, a temperatura da atmosfera tem um aumento por conta da liberação de energia em forma de calor no momento do processo de formação do ozônio (WALLACE; HOBBS, 2006).

O ozônio pode ser produzido na região troposférica tornando-se um poluente através de fontes naturais e antropogênicas, tendo essa produção antrópica uma

maior contribuição para sua produção. Devido à urbanização e industrialização, a produção de ozônio na troposfera está mais relacionada com compostos de óxidos de nitrogênio (NO_x) e os VOCs (em inglês, Compostos Orgânicos Voláteis) na presença de radiação solar, os quais têm como principais fontes emissoras as instalações industriais e queima de combustíveis fósseis (DERWENT et al. 2003).

André (2003) relata que existe a redução do ozônio estratosférico em todo o planeta devido às variações sazonais, porém o termo utilizado “buraco na camada de ozônio”, está ligado somente às reduções sazonais desta camada sobre a região antártica. É durante o período da primavera que ocorre a máxima concentração da coluna de ozônio em latitudes médias e no outono as mínimas concentrações, porém na região tropical praticamente não variam as concentrações de O_3 por conta da intensidade de radiação constante ao longo de todo ano (WAKAMATSU et al. 1989, ANDRÉ, 2003). Mesmo a região tropical produzindo maior quantidade de ozônio em função da maior incidência de Radiação Ultravioleta, a circulação Brewer-Dobson, que é um transporte meridional de ozônio estratosférico, resulta em uma convergência na região tropical através de um transporte vertical que ao atingir a estratosfera é transportado para as regiões polares por onde o ozônio é transportado até então divergir sobre as latitudes médias e altas (BREWER, 1949; DOBSON, 1968).

Quando o inverno austral se aproxima, os processos dinâmicos e termodinâmicos fazem com que a atmosfera se resfrie mais, favorecendo a subsidência de ar e aumentando o gradiente de pressão meridional entre as latitudes médias e o polo. Forma-se então neste período do ano o chamado Vórtice Polar (VP), que é uma circulação ciclônica formada no polo sul de sentido oeste-leste e que favorece o aumento da variação meridional do ozônio (SOLOMON, 1999; PERES, 2013). Dentro deste vórtice, em aproximadamente entre 15 e 20km de altitude e com temperaturas de ordem de 183K (-90°C), existe a presença das Nuvens Estratosféricas Polares (NEPs) que se formam a partir da tropopausa no período de inverno nas regiões polares, que influenciam no seu fortalecimento. Além das baixas temperaturas encontradas nesse vórtice, há pequenas quantidades de ácido nítrico e vapor d'água a uma altitude próxima a 20 km (SOLOMON, 1999).

A máxima concentração da coluna de ozônio é registrada na primavera, devido ao vórtice polar que tem duração do início do inverno até o início da primavera, formando sobre a Antártida uma forte circulação ciclônica em altos níveis, que bloqueia os conteúdos de ozônio provenientes de baixas latitudes, trazido pela circulação Brewer-Dobson (ANDRÉ, 2003).

A concentração máxima do ozônio encontra-se na baixa estratosfera, onde ocorre também absorção da radiação solar na faixa do ultravioleta nos comprimentos de onda na faixa de Hartley, entre 200 e 300 nm (WHITTEN; PRASAD, 1985; SLUSSER et al. 1999). O ozônio tem função de proteger a biosfera contra os possíveis danos que a Radiação Ultravioleta pode causar. A Radiação Ultravioleta (RUV) compreende apenas 10% da radiação solar total dentro do largo espectro da radiação solar. A radiação do tipo ultravioleta está subdividida em três faixas, sendo UV- A (315-400nm), UV-B (280-315nm) e UV-C (100-280nm) (LIOU, 2002; CASICCIA et al. 2008). A faixa de Hartley concentra a maior parte da radiação do tipo UV-B, que tem uma absorção eficaz pelo ozônio elevando a quantidade de incidência na superfície sempre que os níveis de ozônio estratosférico estão baixos, assim podendo causar alguns danos como, por exemplo, câncer de pele, supressão do sistema imunológico, entre outros (ECHER et al., 2004; GUARNIERI et al., 2004).

Wang et al. (2006) definem que medições do comportamento da coluna total de O₃ podem ser feitas tanto através de sensores a bordo de satélites (ex.: OMI - Ozone Monitoring Instrument, TOMS - Total Ozone Mapping Spectrometer, GOME - Global Ozone Monitoring Experiment) quanto por instrumentos de superfície (Espectrofotômetro Brewer). Operando desde agosto de 2004 a bordo do satélite Aura da NASA (National Aeronautics and Space Administration), o sensor OMI projetado para monitorar ozônio e outras espécies de gases, realiza entre outras funções, medições diárias globais dos componentes NO₂, SO₂, BrO, HCHO, EOA (Espessura ótica dos Aerossóis) e Aerosol Index (continuando as medições do sensor GOME). Além disso, o OMI pode mapear a distribuição global de radiação UV-B e suas tendências, fazendo medições quase em tempo real do ozônio (OMI, 2010).

A região sul da América do Sul (AS) apresenta um clima subtropical com condições meteorológicas com períodos de estagnação de massas de ar, associada

com inversões de temperatura, frentes frias, sistemas frontais e sistemas convectivos, entre outros sistemas (GONÇALVES et al., 2010). Esta região é composta por alguns centros populacionais de grande e de médio porte e também possuem regiões costeiras de grande atividade turística no verão em suas regiões litorâneas que são influenciadas pelo efeito secundário do buraco de ozônio Antártico que aumenta a incidência de radiação UV-B (SALGADO, 2010).

É importante estudar as variações e concentrações de ozônio e a sua relação com os níveis de Radiação Ultravioleta no sul da América do Sul devido as suas diversas áreas urbana e áreas litorâneas com amplas áreas populacionais para a melhor compreensão de seus efeitos sobre a química atmosférica, periodicidade da sua série temporal, a influência no campo de radiação e seus efeitos no clima da Terra (WALLACE; HOBBS, 2006).

O objetivo geral deste trabalho é investigar a influência da Coluna Total de Ozônio sobre a variabilidade da Radiação Ultravioleta sobre o sul da América do Sul tendo como objetivos específicos:

- Conhecer a variabilidade amostral anual, sazonal e mensal dos valores da coluna da coluna total de O_3 e dos níveis de Radiação Ultravioleta (RUV) incidente dos tipos Dose Eritêmica Diária (DED) e Índice Ultravioleta (I-UV).
- Determinar os pontos de menor concentração e maior variação da Coluna Total de Ozônio de acordo com a sazonalidade no sul da América do Sul e os impactos na Radiação Ultravioleta sobre os mesmos;
- Identificar as possíveis correlações entre os dados de Ozônio e Radiação Ultravioleta através e estudos de casos com reduções da Coluna Total de Ozônio.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 O ozônio na atmosfera terrestre

O conjunto de gases e partículas que constituem o ar que envolve a superfície terrestre é denominado atmosfera, que é caracterizada por variações de temperatura e pressão dependendo da altura. A variação do perfil vertical da temperatura é a base para distinguir as diferentes camadas da atmosfera. De acordo com a altitude verifica-se uma progressiva rarefação do ar, variando sua espessura (LENZI; FAVERO, 2009). De acordo com Lutgens (1995), o O₂ (oxigênio) que hoje compõe a atmosfera é quase todo produto da fotossíntese.

Wallace e Hobbs (2006) afirmam que a atmosfera é comumente subdividida em camadas em função dos parâmetros físicos e/ou químicos que caracterizam essas camadas, como por exemplo, a temperatura, composição química, escape gasoso e densidade de plasma. A divisão das camadas da atmosfera terrestre pode dar-se através do perfil de temperatura. A atmosfera está estruturada basicamente em cinco camadas sendo elas a Troposfera, Estratosfera, Mesosfera, Termosfera e a Exosfera (Figura1).

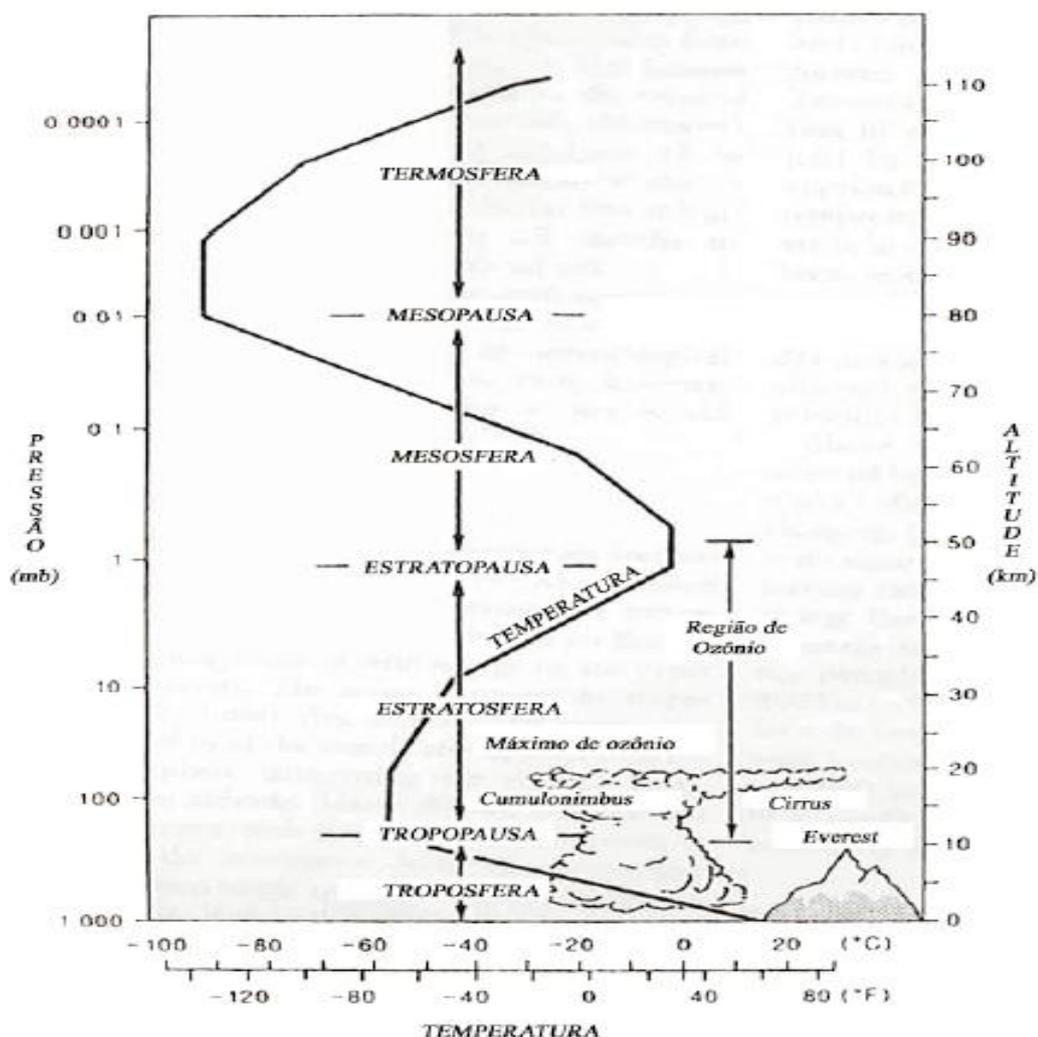


Figura 1 - Camadas da atmosfera terrestre e as variações da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) em relação à altura (km) e pressão (mbar).

Fonte: Adaptado Nesme-Ribes e Thuillier (2000)

Também é possível classificar as camadas da atmosfera de acordo com a composição química do ar na atmosfera em homosfera (composição sem grandes variações); heterosfera (grandes quantidades de hélio e hidrogênio) e exosfera (camada extremamente rarefeita, onde as moléculas gasosas começam a escapar da atração gravitacional terrestre) (LIU, 2002).

O ozônio é um gás minoritário presente na atmosfera e está contido tanto na estratosfera quanto na troposfera. O ozônio quando presente na região troposférica tende a agir como um gás poluente, já na estratosfera, sua função primordial é

interceptar a Radiação Ultravioleta incidente na superfície terrestre, que é nociva aos seres vivos (WALLACE; HOBBS, 2006)

As concentrações de O₃ presentes na atmosfera são muito pequenas, tipicamente algumas moléculas por milhão de moléculas de ar, entretanto essas quantidades são de vital importância para a manutenção da vida na Terra, pois são elas que absorvem a Radiação Ultravioleta biologicamente prejudicial que é proveniente da radiação solar. A manutenção da vida no planeta depende do ozônio (O₃) presente na estratosfera. Logo nos primeiros quilômetros da estratosfera absorve principalmente a RUV do tipo UV-B (entre 0,28μm e 0,32μm micrometros), criando uma barreira para que parte desta radiação não chegue com total liberdade à superfície (SALBY, 1995). A radiação UV-B é prejudicial à saúde dos seres vivos, sendo a causadora de vários tipos de doenças como, por exemplo, catarata, câncer de pele, queimadura entre outros. Também pode ser um fator adverso ao desenvolvimento de plantas, pois a Radiação Ultravioleta afeta a química molecular da fotossíntese e o desenvolvimento das plantas terrestres e aquáticas. Assim as significativas reduções podem afetar a cadeia alimentar oceânica mexendo na extração de dióxido de carbono na atmosfera, favorecendo para que ocorram anomalias positivas de temperatura (aquecimento) na atmosfera (WHO, 1994; SOLOMON, 1999).

De acordo com Betts (2000), cerca de 90% da quantidade total de ozônio está presente na região estratosférica os outros 10% estão contidos na troposfera, camada mais próxima da superfície, assim sua variabilidade da razão de mistura de acordo com a altitude também é importante para a determinação das suas concentrações (Figura 2). Em contrapartida, mesmo absorvendo parte da RUV, o ozônio troposférico é prejudicial à saúde quando em níveis elevados, por conta de sua alta reatividade com outros compostos, tendo sua maior produtividade no período diurno, principalmente em áreas urbanas. Fontinele (2012) descreve que, o ozônio troposférico pode ser de origem natural através do envelopamento da camada que transporta ozônio da média e baixa troposfera para a superfície através dos *downdrafts* convectivos com baixa temperatura potencial equivalente; isso ocorre tipicamente após a passagem de sistemas frontais, sendo esta inserção de ar superior para a atmosfera inferior do lado polar da corrente de jato. Entretanto o

ozônio pode ser produzido de forma antropogênica quando uma atmosfera sobre uma região urbanizada está condicionada às emissões de NO_x (Óxidos de Nitrogênio) e VOCs (Compostos Orgânicos Voláteis) provenientes de instalações industriais, queima de combustíveis fósseis e solventes químicos que são as principais fontes desses compostos (CUCHIARA, 2011).

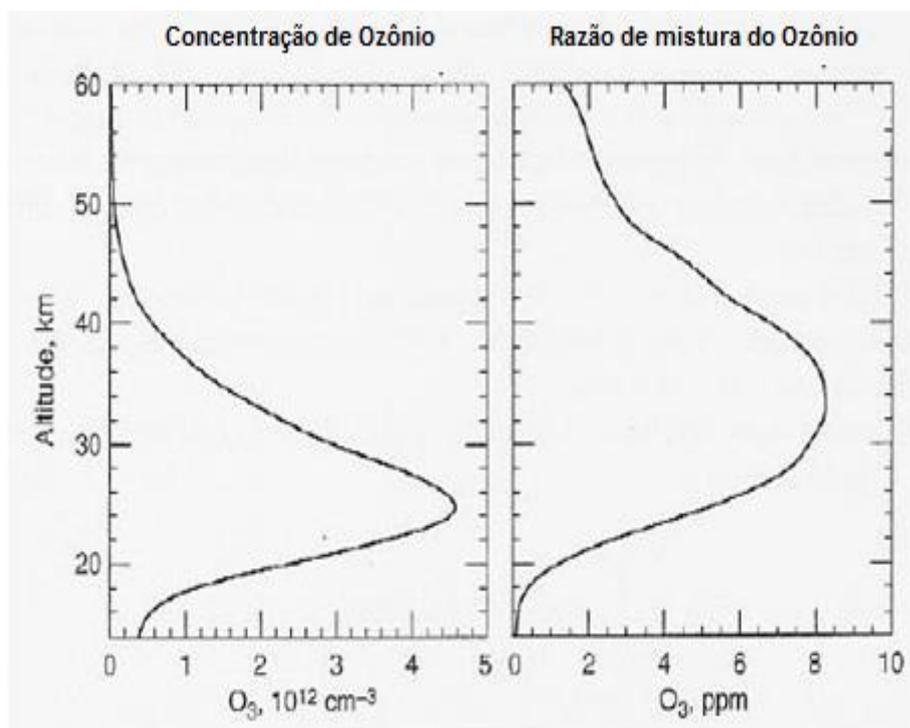


Figura 2 - Perfil do ozônio estratosférico medido em latitudes médias no hemisfério norte através do satélite com espectrômetro da Jet Propulsion Laboratory FTIR (*Fourier Transform Infrared*).

Fonte: Adaptada de SEINFELD e PANDIS, 1998.

O ozônio (O₃) é o maior responsável pelas oscilações da radiação UV e seus impactos na natureza e saúde do ser humano (Madronich, 1993; Fioletov et al. 1997; WHO, 2002), sendo sua quantidade mensurada na atmosfera de forma vertical pela Coluna Total de Ozônio, estando na estratosfera as maiores concentrações, aproximadamente entre 20 e 25km acima da superfície terrestre, diminuindo à medida que aumenta a altura (HORVÁTH, 1985; HEGGLIN et al., 2009).

2.2 Formação do ozônio

As reações fotoquímicas estão relacionadas a questões muito importantes na atmosfera terrestre, tais como a formação e destruição da camada de ozônio, o buraco de ozônio na Antártica, a formação do *smog* fotoquímico, do ozônio na troposfera e chuvas ácidas.

A formação do O_3 na atmosfera é uma reação natural que acontece quando uma molécula de O_2 combina-se a um átomo livre de oxigênio (Hegglin et al. 2009), contudo sua distribuição na atmosfera não é homogênea devido à circulação dos trópicos para os polos gerando uma concentração maior de O_3 nas altas latitudes com diminuição em direção ao equador. Segundo Seinfeld e Pandis (1998), estas reações são determinadas pelo fluxo de fótons que penetra a superfície em um volume da atmosfera. O espectro solar indica a intensidade de fótons que chega a cada comprimento de onda, na região do espaço onde a Terra se encontra.

Chapman (1930) definiu que o ozônio forma-se através do processo de fotodissociação ($h\nu$) de moléculas de oxigênio pela Radiação Ultravioleta nos comprimentos de onda menores que $0,242\mu\text{m}$ (Reação 1- Tab. 1). Desta forma produz-se o oxigênio atômico (O), que ao recombinar-se com o Oxigênio (O_2) formando o ozônio em uma reação termolecular (reação que envolve três moléculas). A presença de um terceiro corpo (M) se faz necessária para que haja uma estabilização da reação e levar o excesso de energia liberada pela combinação de O e O_2 (Reação 2 - Tab.1) (SOLOMON, 1999; LIOU, 2002). Existe uma reação que pode ocorrer nas bandas de Hartley e Huggins através da reação termolecular onde o oxigênio é dissociado pela radiação UV em outra reação (R5 - Tab.1).

A reação entre o oxigênio atômico e a molécula de ozônio resulta em dois oxigênios (R7 – Tab. 1) (CHAPMAN, 1930; WALLACE; HOBBS, 2006). Os mecanismos de Chapman estão representados na Tabela 1 pelas reações R1 até a R7. Outros ciclos catalíticos que causam a destruição do ozônio podem ser conferidos na Tabela 1, tais como óxidos de nitrogênio (NO_x), cloro (Cl) e hidrogênio (H).

Tabela 1 - Processos químicos chave e ciclos catalíticos envolvendo a molécula de O₃ na estratosfera.

<i>Processo Químico</i>		<i>Número da reação</i>	
$O_2 + h\nu \rightarrow 2O$	<i>Química de Chapman</i>	R1	
$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$		R2	
$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O(^1D)$		R3	
$O(^1D) + M \rightarrow O + M$		R4	
$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$		R5	
$O + O + M \rightarrow O_2 + M$		R6	
$O + O_3 \rightarrow 2O_2$		R7	
$O + OH \rightarrow O_2 + H$	<i>Ciclos catalíticos do Hidrogênio</i>	R8	
$H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$		R9	
$O + HO_2 \rightarrow O_2 + OH$		R10	
Net Cycle 1: $O + O + M \rightarrow O_2 + M$		R6	
$OH + O_3 \rightarrow HO_2 + O_2$		R11	
$HO_2 + O_3 \rightarrow OH + 2O_2$		R12	
Net Cycle 2: $2 O_3 \rightarrow 3O_2$		R13	
$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$	<i>Ciclo catalítico do Nitrogênio</i>	R14	
$O + NO_2 \rightarrow NO + O_2$		R15	
Net Cycle 3: $O + O_3 \rightarrow O_2$		R7	
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	<i>Ciclo catalítico do Cloro</i>	R16	
$ClO + O \rightarrow Cl + O_2$		R17	
Net Cycle 4: $O + O_3 \rightarrow O_2$		R7	
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$		R16	
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$		R16	
$ClO + ClO + M \rightarrow Cl_2O_2 + M$		R18	
$Cl_2O_2 + h\nu \rightarrow Cl + ClO_2$		R19	
$ClO_2 + M \rightarrow Cl + O_2 + M$		R20	
Net Cycle 5: $2 O_3 \rightarrow 3O_2$		R13	
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	<i>Ciclo cloro de bromo</i>	R16	
$Br + O_3 \rightarrow BrO + O_2$		R21	
$BrO + ClO \rightarrow Br + ClO_2$		R22	
$ClO_2 + M \rightarrow Cl + O_2 + M$		R20	
Net Cycle 6: $2 O_3 \rightarrow 3O_2$		R13	
$ClO + NO \rightarrow Cl + NO_2$	<i>Reações importantes de acoplamento</i>	R23	
$Cl + CH_4 \rightarrow HCl + CH_3$		R24	
$HO_2 + ClO \rightarrow HOCl + O_2$		R25	
$ClO + NO_2 + M \rightarrow ClONO_2 + M$		R26	
$OH + NO_2 + M \rightarrow HNO_3 + M$		R27	
$HCl + ClONO_2 \rightarrow HNO_3 + Cl_2$	<i>Principais reações heterogêneas</i>	R28	
$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2HNO_3$		R29	
$ClONO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3 + HOCl$		R30	
$HCl + HOCl \rightarrow H_2O + Cl_2$		R31	
$BrONO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3 + HOBr$		R32	
$HCl + BrONO_2 \rightarrow HNO_3 + BrCl$		R33	
$HCl + HOBr \rightarrow H_2O + BrCl$		R34	

Fonte: Adaptado de SOLOMON, 1999

2.3 Especificidades óticas do O₃ na atmosfera

Quando presente na estratosfera o ozônio tem um papel de extrema relevância para dar suporte à vida no planeta pela sua valência de reter parte da RUV perniciososa que incide na atmosfera terrestre (SLUSSER, 1999). Todavia, alguns outros constituintes presentes na atmosfera também têm como função absorver a radiação solar incidente (Figura 3). Além do O₃ o oxigênio (O₂) é responsável pela maior parte da remoção da radiação incidente abaixo do comprimento de onda 290nm (LIOU, 2002). Já o ozônio possui três bandas principais de absorção, a banda de Hartley (200-300 nm), de grande absorção, a banda de Huggins (300-360nm) com uma absorção mais fraca e ainda tendo uma mais fraca interação com a radiação acima de 400 nm, na faixa do visível e infravermelho, chamada de banda de Chappuis (440-850 nm) (LIOU, 2002).

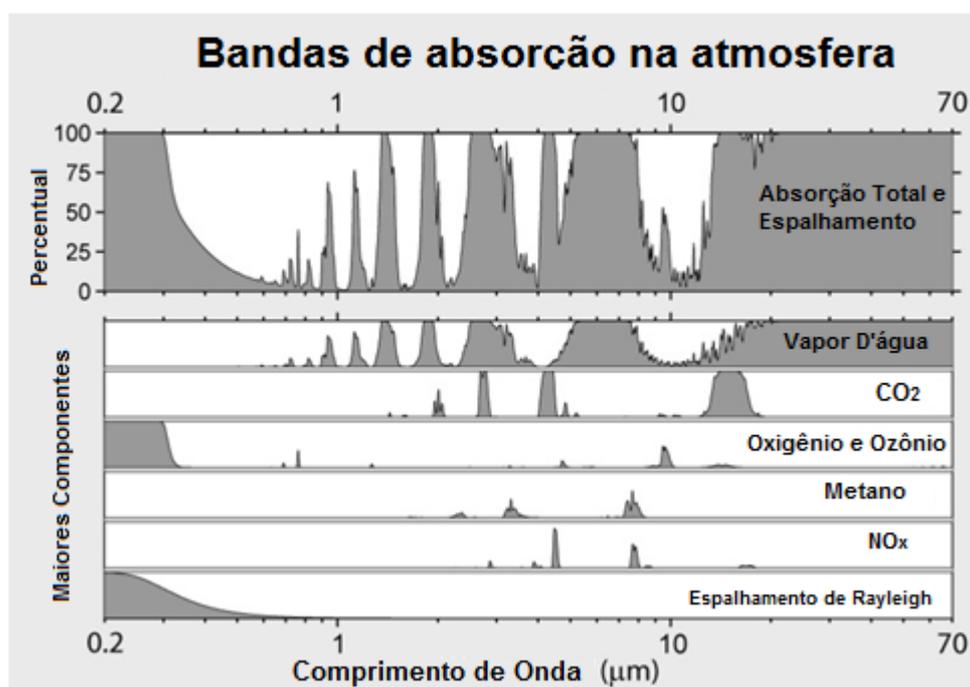


Figura 3 - Espectro de absorção das moléculas de gases minoritários presentes na atmosfera.

Fonte: adaptada de NASA, 2012

A profundidade de penetração da radiação UV na atmosfera é mostrada na Figura 4, onde as moléculas de nitrogênio e oxigênio absorvem esta radiação em níveis mais

elevados, resultado da fotodissociação e ionização das moléculas. Nos níveis mais baixos, o O_3 e O_2 impedem que grande parte da radiação UV chegue à superfície da Terra (WALLACE; HOBBS, 2006).

Ao utilizar a atmosfera como uma célula de absorção para a luz solar, é importante definir a quantidade total de moléculas de O_3 no caminho óptico da radiação. Surge então a definição de “Coluna Total de Ozônio” que tem como unidade de medida a Unidade Dobson (UD), definida como a integral das concentrações de moléculas de ozônio na atmosfera. A concentração do gás pode ser definida pela densidade de massa (gramas por cm^3 , por exemplo) ou pela densidade numérica (moléculas por cm^3). Uma Unidade Dobson (1UD) equivale a uma coluna atmosférica de O_3 de 0,001cm de espessura, comprimida nas CNTP (Condições Normais de Temperatura e Pressão), $0^\circ C$ e 1atm (KROTKOV et al., 2006).

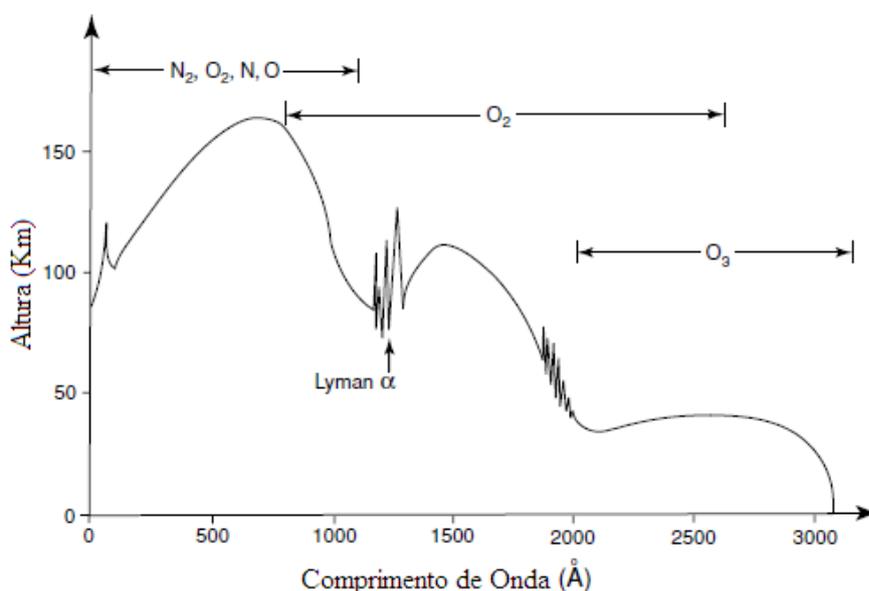


Figura 4 - Profundidade de penetração da radiação UV na atmosfera terrestre para $\mu_0 = 1$ (cosseno do ângulo zenital) e perfil médio de ozônio. A linha contínua representa a altura em que a profundidade óptica é igual a um.

Fonte: Adaptada de: LIOU, 2002.

2.4 Oscilações espaço-temporais do ozônio

A distribuição do O_3 sobre uma determinada região pode ser constituída de três processos, a produção, destruição e transporte dentro ou fora da região. Os processos de criação e destruição são processos fotoquímicos vistos anteriormente no capítulo 2.2. Dentro da estratosfera superior (aproximadamente 40km de altitude) é onde existe a abundância de Radiação Ultravioleta que favorece aos processos fotoquímicos que controlam as quantidades de ozônio. Os processos de transporte do O_3 referem-se aos padrões de circulação do vento que movem as parcelas de ar que contém ozônio (SLUSSER et al.1999). Nesta região o tempo de vida de uma molécula de ozônio tipicamente é breve (aproximadamente um dia), o que resulta num tempo muito curto entre formação e destruição da molécula de O_3 comparado com o tempo que demora a se deslocar o ozônio pelos processos de transporte. Já na estratosfera inferior onde há menos incidência de Radiação Ultravioleta o tempo de vida do ozônio é maior (algumas semanas), o que é fator fundamental para determinar a distribuição de ozônio. Já na região da baixa estratosfera a fotoquímica desempenha importante papel em alguns locais pontuais e em determinadas épocas do ano, tais como o Buraco de Ozônio Antártico durante a primavera (SALBY, 1995).

A maior produção do ozônio se dá dentro da estratosfera tropical dentro de um processo de criação-destruição muito rápido fazendo com que as moléculas de O_2 reajam com outras moléculas de oxigênio para formar o Ozônio. A grande curiosidade se dá pelo fato de que a maioria do ozônio não se encontra na região tropical, e sim, nas latitudes mais altas, ou seja, as maiores concentrações não estão na região de origem. Sazonalmente nas latitudes médias a máxima concentração de ozônio estratosférico ocorre na primavera, e no outono registram-se as mínimas concentrações (Figura 5), entretanto na região tropical essas concentrações quase não têm variação por conta da regular intensidade de radiação recebida por esta região (WAKAMATSU et al., 1989; LIOU, 2002)

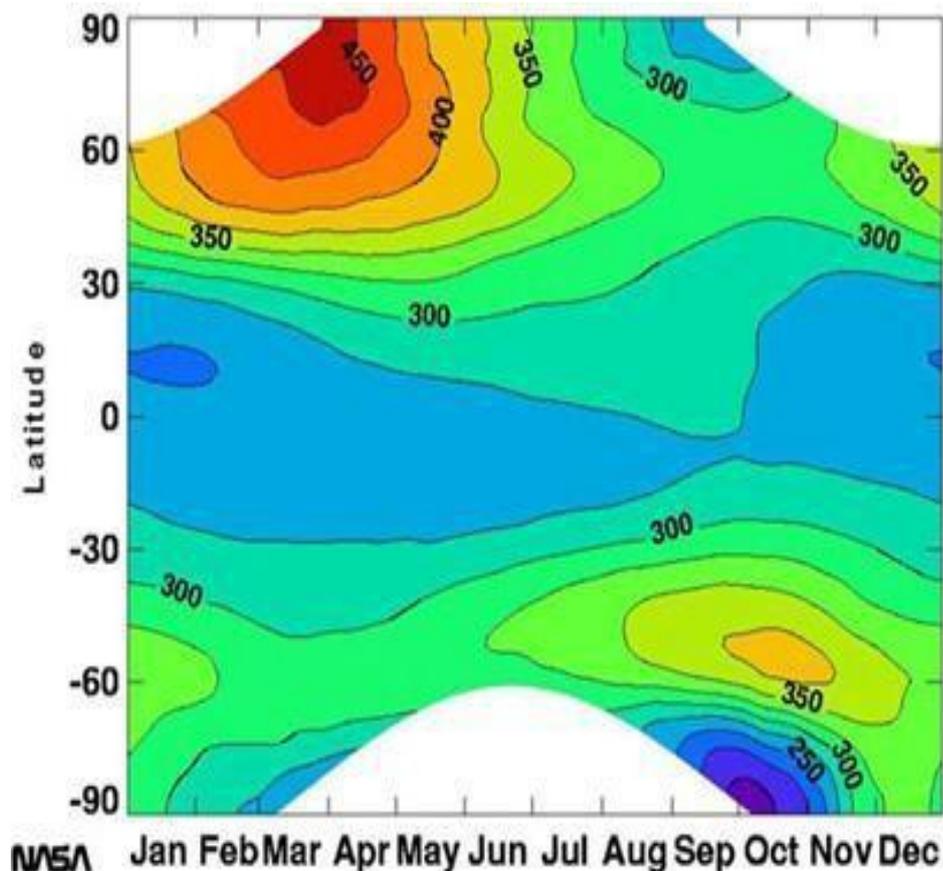


Figura 5 - Dados médios mensais de Coluna Total de Ozônio (Unidades Dobson) em função da latitude para o período 1979-1992, obtidos através do sensor TOMS.

Fonte: Adaptado de NASA, 2000

O Ozônio de latitudes mais altas é fruto da lenta circulação atmosférica que transporta ozônio produzido nas regiões tropicais para as latitudes médias e polares denominada circulação Brewer-Dobson (BREWER, 1949; DOBSON, 1968; SOLOMON, 1999). Na Figura 6, é possível identificar que este padrão de circulação baseia-se na convergência na região tropical, que acarreta no transporte vertical até atingir a região estratosférica, por onde é transportado o O_3 até chegar às regiões de latitudes médias e altas ocorrendo uma divergência no padrão da circulação (WAKAMATSU et al., 1989; ANDRÉ, 2003).

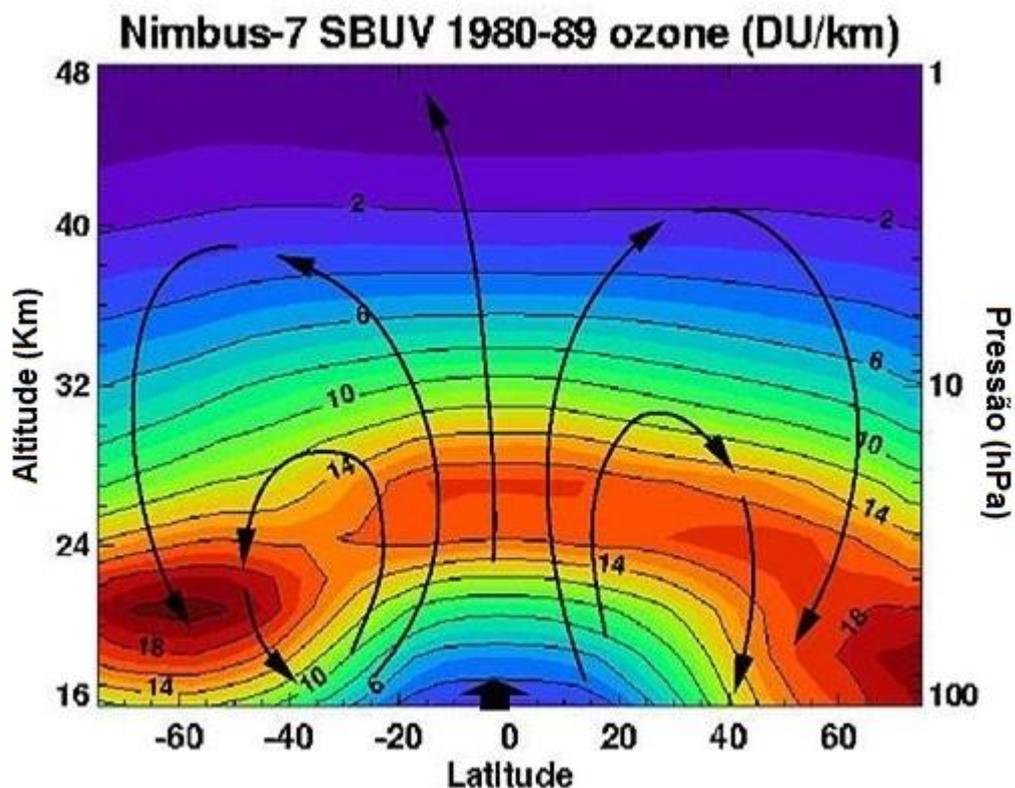


Figura 6 - Diagrama esquemático do padrão de circulação Brewer-Dobson em função da altitude (Km), latitude e pressão (hPa) mostrando a média entre os anos de 1980 e 1989.

Fonte: Adaptado de NASA, 2000.

Essa máxima concentração de ozônio que ocorre na primavera é devido ao vórtice polar formado sobre a Antártica (Dobson, 1968; André, 2003), que intercepta o conteúdo de ozônio proveniente das baixas latitudes, trazido pela circulação Brewer-Dobson (Figura 7). Alguns registros indicam que os valores chegam próximos de 500 UD (Unidades Dobson) contornando quase todo hemisfério (WMO/UNEP, 2010).

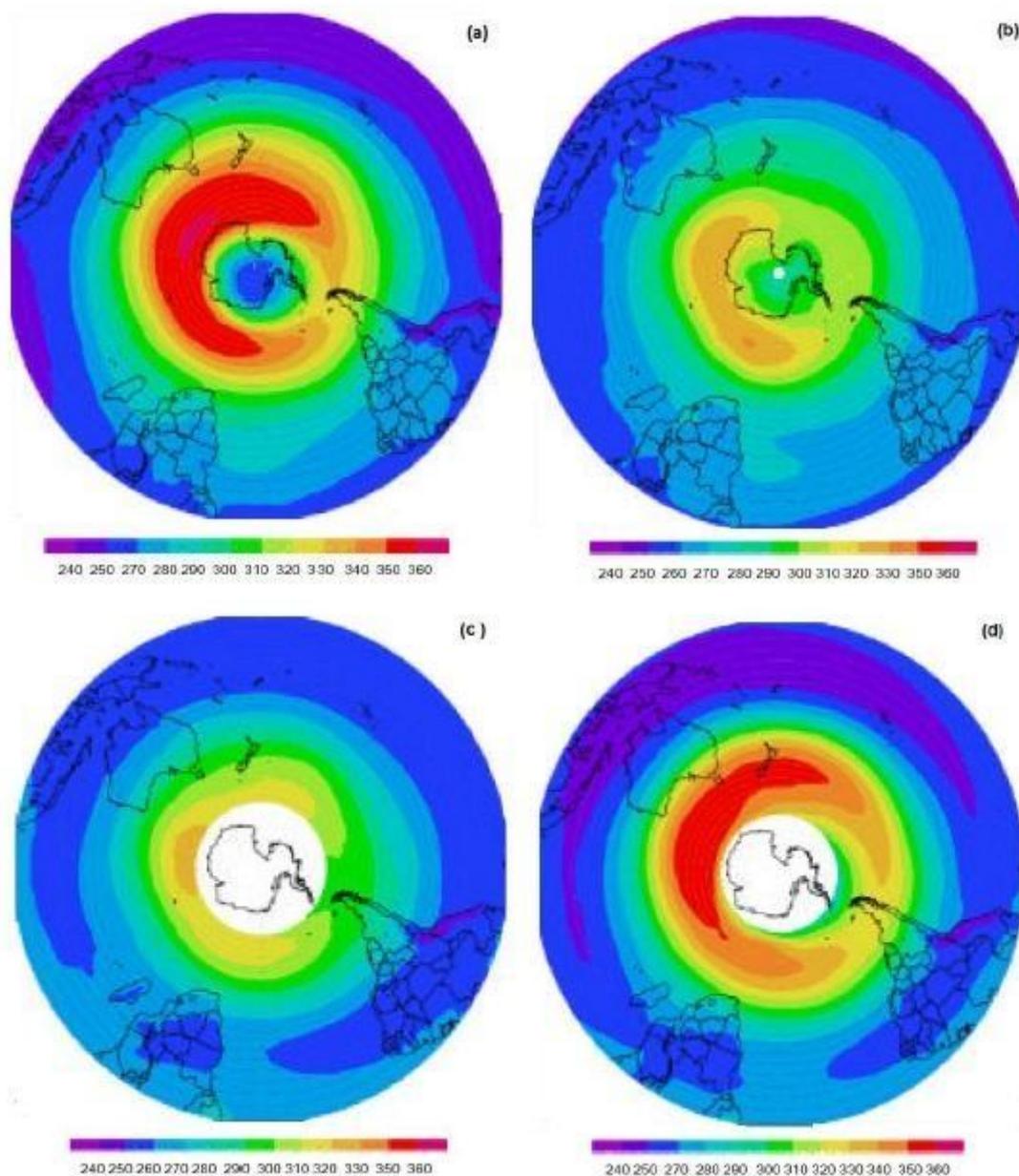


Figura 7- Média sazonal do ozônio estratosférico (UD – unidades Dobson) obtidas pelas imagens do sensor TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) a bordo do satélite Nimbus7, para o período de 1978 a 1993: (a) primavera, (b) verão, c) outono e d) inverno.

Fonte: ANDRÉ et al., 2003.

O tempo de transporte do ozônio presente na região estratosférica do equador para as regiões polares é de aproximadamente de três a quatro meses, sugerindo que o tempo de vida do ozônio na estratosfera seja muito mais longo que o tempo necessário para que o transporte ocorra, podendo variar no equador, de

três anos em 15 km a um dia em 40 km (SEINFELD; PANDIS, 2006).

Quando o inverno no hemisfério sul (inverno austral) se aproxima, a atmosfera na região polar tende a ter um resfriamento fazendo que aumentem os movimentos subsidentes, assim elevando os valores do gradiente latitudinal de pressão entre as médias latitudes e a região polar (ANDRÉ, 2003). Formada na região polar, a intensa circulação de oeste que se intensifica no começo do outono, o vórtice polar começa a aumentar a variação latitudinal de ozônio, tendo suas maiores concentrações no Hemisfério Sul durante a primavera aproximadamente sobre a latitude de 60°S onde se localiza a região da faixa de baixa pressão das frentes polares (WMO/UNEP, 1992, 1994; ANDRÉ, 2003).

É possível identificar a assimetria meridional, ou seja, norte-sul na Figura 8, com a média climatológica da Coluna Total de Ozônio em Unidades Dobson, antes da redução em função do período do ano e a latitude onde os mais altos valores da coluna de ozônio são encontrados a altas latitudes na primavera local e os mais baixos valores nos trópicos durante todo o ano (FISHMAN et al., 1990; KIRCHHOFF, 1991; SALBY, 1995).

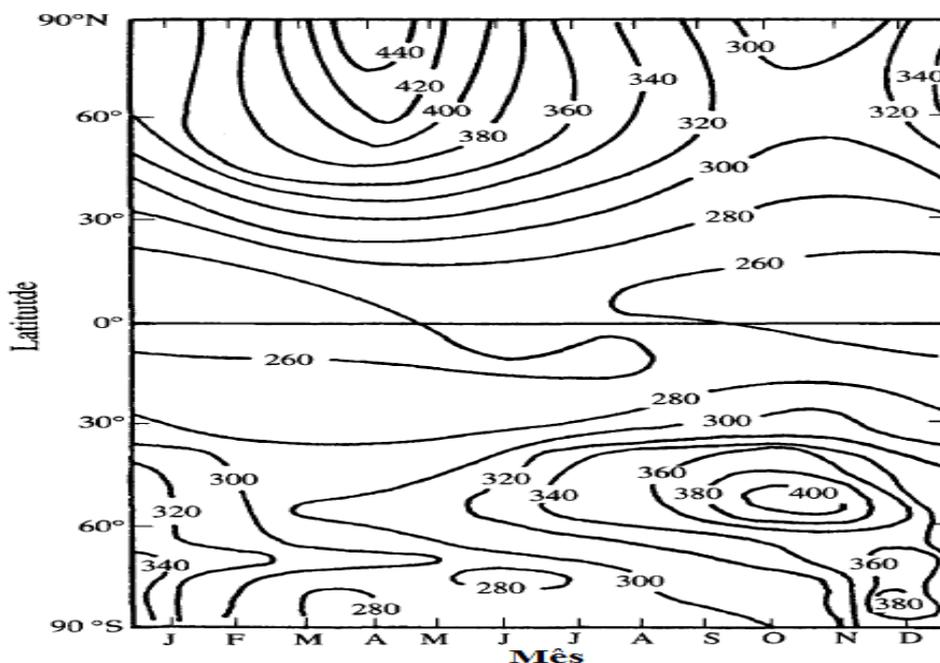


Figura 8 - Coluna total de O₃ média em função da latitude e época do ano, medida em Unidades Dobson, antes da diminuição antropogênica do ozônio.

Fonte: SEINFELD e PANDIS, 2006.

As máximas concentrações de O_3 na região equatorial encontram-se em aproximadamente 25km de altitude. Diferentemente do que se estima, à 40km não estão as maiores concentrações e sim as maiores produções de ozônio, o mesmo ocorre na região dos polos onde essa maior concentração se dá próximo de 18km e as produções a 40km.

2.5 O buraco de ozônio Antártico

A descoberta do buraco de ozônio Antártico em meados da década de 1980 foi uma grande surpresa para os cientistas atmosféricos a partir do anúncio das perdas significativas nas quantidades de ozônio sobre a região Antártica para o período entre 1975 e 1984. Medições realizadas através do instrumento TOMS mostraram que a depleção do O_3 durante a primavera austral se dava ao longo de todo continente Antártico. A área do buraco de ozônio foi definida como sendo a região com valores de ozônio menores que 220 UD, sendo mais acentuado entre 12 e 24 km de altitude (KIRCHOFF et al., 1996). O continente Antártico tem uma das mais elevadas concentrações de ozônio do planeta ao longo do ano por conta do movimento do O_3 produzido na região tropical e transportado para o polo, o que completa a teoria de que por não receber tanta radiação UV (mecanismo que ajuda a fotolisar o O_2) a região polar tem déficit de oxigênio atômico (KIRCHOFF et al. 1996; DESSLER, 2000).

A formação do “buraco de ozônio” é um fenômeno extremamente sazonal, ocorrendo apenas em poucas semanas do ano, basicamente entre os meses de agosto e outubro. No entanto quando chegam os meses de novembro e dezembro, a maior quantidade de radiação solar sobre esta região não permite que as NEPs se formem, tendo o VP enfraquecido devido ao fraco gradiente de temperatura, favorecendo que os níveis de ozônio voltam as condições normais (FARMAN et al. 1985; SOLOMON, 1999). Kirchhoff et al. (1996) afirmam que, quando o VP quebra momentaneamente o ar pobre em ozônio na região polar se desprende do vórtice e se desloca para latitudes mais baixas. Salgado et al. (2010) mostram que, do ano de 1979 a 2010, medições realizadas sobre a região da Antártica mostram valores

mínimos da coluna total de O₃ num nível muito crítico saindo de 190UD em 1979 para aproximadamente 73UD no ano de 1996.

2.6 Os efeitos secundários do buraco de ozônio

Em seu efeito primário, o Buraco de Ozônio Antártico, durante a primavera austral, influencia os conteúdos de O₃ da região do polo, onde quedas são registradas superiores a 25 % em relação à média climatológica da região, ou seja, com valores abaixo de 220 UD (HOFMANN et al. 1997).

As regiões de médias e baixas latitudes sofrem direta e indireta influência do Buraco de Ozônio Antártico. Tendo a influência direta ocorrendo quando a borda do vórtice polar, juntamente com o Buraco de Ozônio em si, passa efetivamente sobre as regiões de médias latitudes, como sobre o Sul do Chile (Punta Arenas) sul da Argentina (Patagônia), que são regiões povoadas, causando preocupantes reduções do conteúdo de ozônio e, conseqüentemente, um aumento na Radiação Ultravioleta que incide sobre a superfície da Terra (LARRY et al. 1995; KIRCHHOFF et al. 1997; MARCHAND et al. 2005; PAZMINO et al. 2005, 2008; CASICCIA et al. 2008).

Com a chegada da primavera, o vórtice polar enfraquece, perdendo estabilidade por conta do aumento das temperaturas, o aumento da atividade de onda planetária ocasionados por eventos de quebra da onda de Rossby (Norton, 1994; Semane et al. 2006; Shepherd, 2007), assim são liberadas massas de ar com baixos níveis da coluna de ozônio causando a sua diminuição temporária dentro de regiões de latitudes mais baixas. Alguns estudos como o de Prather e Jaffe (1990), mostram que massas de ar pobres em O₃ podem permanecer isoladas dentro de um período de 7 a 20 dias após o desprendimento junto ao vórtice. Assim Kirchhoff et al. (1996), observaram essas passagens de massas de ar e às denominaram de Efeitos Secundários do Buraco de Ozônio Antártico (ESBOA), a partir de experimentos realizados com espectrofotômetros Brewer e sondas lançadas através de balões em outubro de 1993, foi possível mostrar que as reduções da coluna total de O₃ estavam relacionadas com a inserção de massas de ar provenientes da região polar. A origem das massas de ar pobres em O₃ vindas da região Antártica é comprovada por

suas trajetórias juntamente com observações de imagens de satélite e análise da vorticidade potencial em superfícies isentrópicas que apresentam uma configuração inclinada meridionalmente que fica mais aguda conforme a latitude aumenta, e com a conservação da temperatura potencial, se os processos se caracterizarem adiabáticos, não há troca de massa e apenas o vento consegue atravessá-las (HOSKINS, 1985; NORTON, 1994).

É possível observar na Figura 9, uma queda abrupta nos valores da Coluna Total de Ozônio em Unidades Dobson para os meses de outubro no período 1970 a 1994 os valores médios longitudinalmente (media zonal) para o hemisfério, onde entre 60°S e 90°S os valores caíram de 300UD em 1970 para menos de 200UD em meados dos anos 1990 (NASA, 2003).

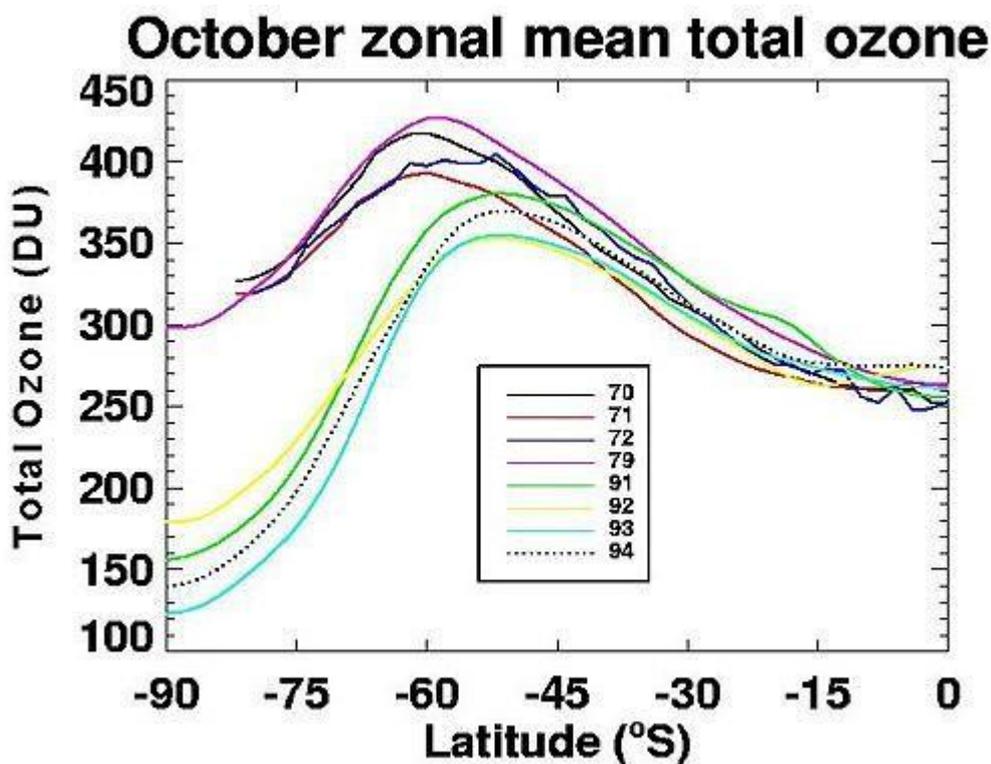


Figura 9 - Média zonal da Coluna Total de Ozônio para os meses de outubro de 1970 a 1994 no hemisfério sul.

Fonte: NASA, (2003)

Um estudo realizado por Pinheiro et al. (2011) constatou a ocorrência de seis ESBOA na região sul do Brasil no período entre 2008 e 2009 quando o valor da

Coluna Total de Ozônio fosse menor que o valor da média climatológica do mês, menos 1,5 do desvio padrão ($\mu - 1,5\sigma$), além de um aumento na vortacidade potencial absoluta no nível isentrópico de 620 K de temperatura potencial, indicando a origem polar da massa de ar pobre em ozônio com queda média de $9,7 \pm 3,3\%$, isso com relação a suas respectivas médias mensais climatológicas. Este limiar ($\mu - 1,5\sigma$) é utilizado uma vez que, se fosse utilizado apenas 1,0 desvios padrão, as flutuações em torno da média seriam em torno de 3% (variação esta que usualmente ocorre devido à variação do ozônio troposférico). Se utilizados 2,0 desvios padrões às flutuações em torno da média seriam de 7%, o que provavelmente excluiria eventos de efeito secundário do buraco de ozônio Antártico (PINHEIRO, 2010; PERES, 2013).

Schmalfuss (2013) identificou os percentuais de queda da Coluna Total de Ozônio (em função do ESBOA), em relação à média para cada mês (maios e outubro) no período de 2004 a 2011 utilizando dados do sensor OMI na região sul da América do Sul. Foram selecionadas seis cidades dentro do limite assim os pontos ficaram localizados entre as latitudes de 20°S e 40°S e entre as longitudes de 30°W e 80°W, com finalidade de exclusão das áreas onde são sentidos os efeitos primários do buraco de ozônio antártico. Para essas seis cidades e a partir de suas médias, foram contabilizados quantos dos dias a Coluna Total de Ozônio esteve abaixo desse limiar estabelecido, mensalmente, para o período entre outubro de 2004 e dezembro de 2011. Identificando as datas de ocorrência foi possível verificar sequências de dias (maior que 04 dias) que apresentaram valores abaixo deste limiar. Pode-se observar que aproximadamente 65% dos casos ocorreram nos meses de maio enquanto 35% ocorreram nos meses de outubro. Os meses de maio registraram praticamente a mesma ordem da média dos valores abaixo do limiar para o mês de outubro (Figura10).

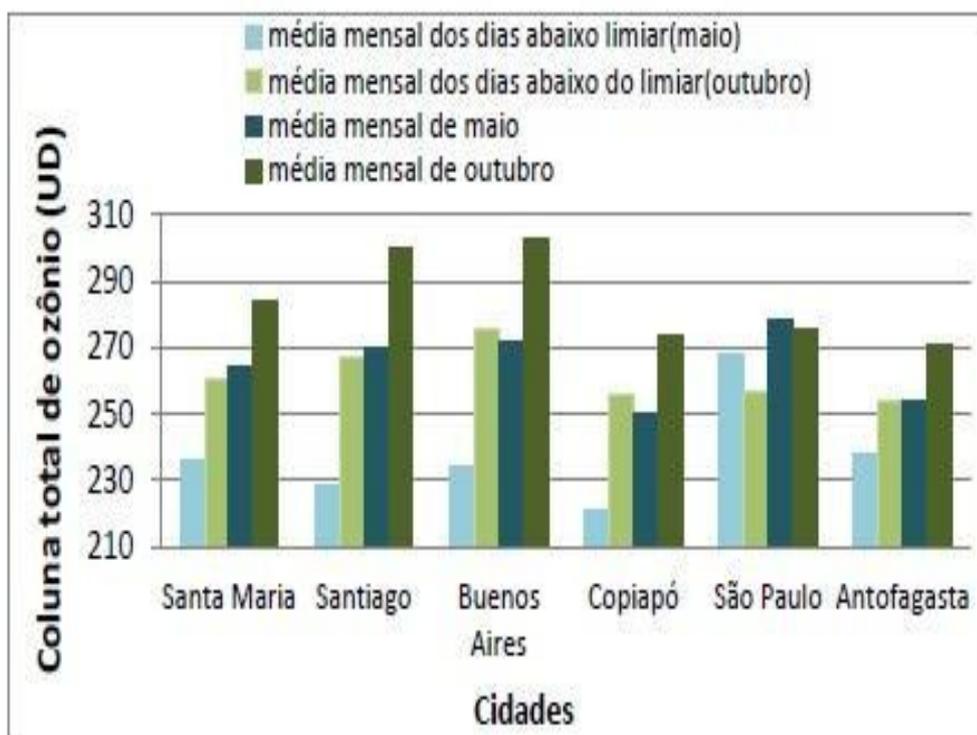


Figura 10 - Valores de Coluna Total de Ozônio para os meses de maio (azuis) e outubro (verdes) de cada cidade. Os tons escuros representam as médias mensais, e os tons claros representam a média dos dias abaixo do limiar mensal.

Fonte: Schmalfluss et al. (2013).

O que mostra o mês maio com os valores de Coluna Total de Ozônio significativamente menor que o mês de outubro, indicando uma maior quantidade de incidência de radiação UV para a superfície durante todo o mês de maio. Bertagnolli et al. (2006), através de uma análise pelo espectro de *wavelets* (ondeletas) em São Martinho da Serra em que a variabilidade temporal da coluna de ozônio por conta dos Efeitos Secundários do Buraco de Ozônio Antártico se comportava oscilatória com a chegada dessas massas de ar pobres em ozônio. Para isso foi feita uma análise preliminar para o ano de 2000, gerando o espectro contínuo de ondeletas, onde se observa variabilidades na escala de 2 e 3,5 dias, com oscilações principalmente entre os dias Julianos 200 e 300, durante a primavera com os maiores valores de ozônio na região de São Martinho da Serra.

2.7 Radiação Ultravioleta

O Sol é a principal fonte natural de Radiação Ultravioleta (RUV) para a Terra cuja atmosfera apresenta opacidade a essa radiação dependente do comprimento de onda, podendo ser definida como aquela porção do espectro eletromagnético entre os Raios-X e luz visível, ou seja, entre 100 e 400nm (7-10% da luz solar), sendo muito importante nos processos atmosféricos entre os comprimentos de onda 200 e 310nm pela formação da camada de ozônio. O restante é dividido entre infravermelho próximo (entre 700 e 1500nm) com 37% e infravermelho (> 1500nm) com 11%. Menos de 1% aproximadamente da radiação emitida está concentrada acima da faixa do infravermelho, ou seja, microondas e ondas de rádio, e abaixo da região ultravioleta, como raios X e raios Gama (NESME-RIBES; THUILLIER, 2000). Quanto a sua penetrabilidade na atmosfera, a RUV pode ser influenciada pelo ângulo do sol, pela presença de nuvens, aerossóis (marinho e de queimada) e quantidades de Coluna Total de Ozônio (WHITTEN; PRASAD, 1985; KIRCHHOFF, 1991; NESME-RIBES; THUILLIER, 2000).

Constituindo 10% da emissão solar (Frederick; Lubin, 1991), a radiação UV que é do tipo não ionizante (Who, 1994), têm sua importância ao interceder tanto na química da estratosfera quanto na formação da camada de ozônio, podendo ser dividida e classificada em três regiões de acordo com o seu comprimento de onda (Figura 11). O UV-C (100-280nm) auxilia para a formação da ionosfera, e é totalmente absorvido na atmosfera pelo ozônio, oxigênio molecular e outros constituintes atmosféricos, não atingindo o solo (WMO, 1999). O UV-B (280-315nm) contribui com aproximadamente com 1,5% da irradiância solar total, enquanto que a superfície terrestre contribui com 0,5%, apresentando o maior efeito biológico na superfície. Seu principal agente absorvedor é o ozônio. Estima-se que uma redução de 1% no ozônio total poderia acarretar um aumento de 1,2% da Radiação UV Biologicamente Ativa (KRZYSZCIN, 1996). O UV-A (400 e 320 nm) tem sua absorção pelos constituintes atmosféricos praticamente ineficientes (Kirchhoff et al. 1996), atingindo a superfície terrestre em quase sua totalidade. Constitui aproximadamente 6,3% da emissão total do Sol, exercendo grande influência na biosfera. Os efeitos da radiação UV sobre os seres vivos são diversos, como a inibição do crescimento de

plantas, eritema, câncer de pele, desenvolvimento de catarata em humanos e animais. As radiações UV-B e UV-A ativam a síntese de vitamina D no organismo humano (WHO, 1994; KIRCHHOFF E NASSER, 1996).

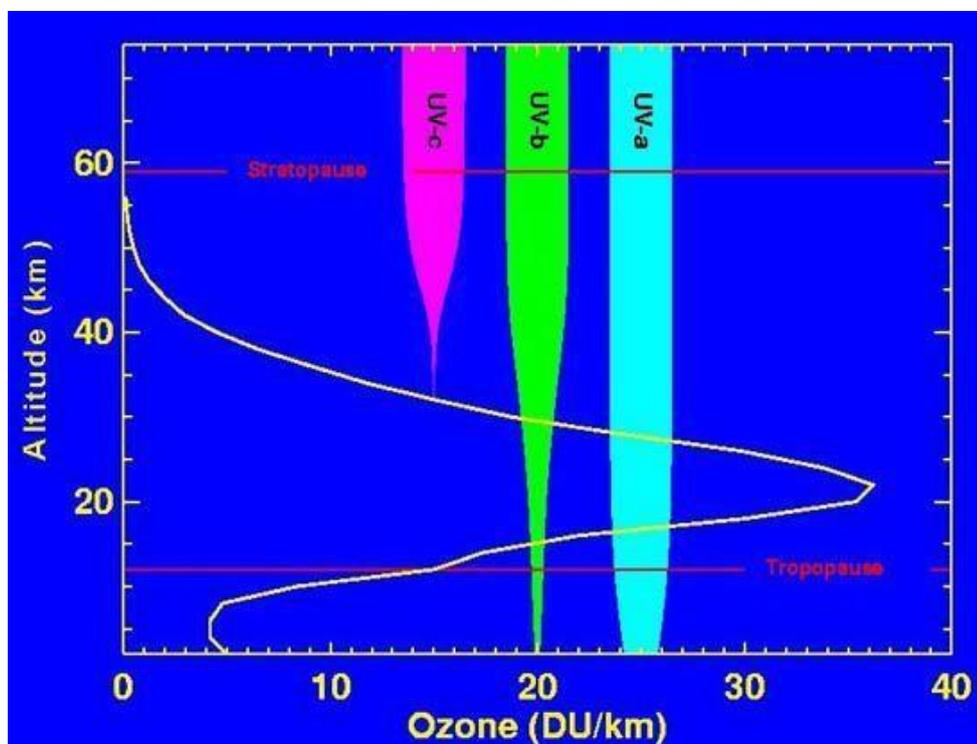


Figura 11 - Perfil Vertical de Ozônio e Altitude de Penetração das faixas UV-A, UV-B e UV-C.

Fonte: NASA, 2002.

Para os estudos de radiação atmosférica, comumente são utilizadas algumas grandezas, que têm como objetivo avaliar métodos de observação de instrumentos meteorológicos, sendo as mais específicas em radiação a emitância, irradiância e radiância. Tendo a emitância como sendo o fluxo radiante emitido por unidade de área a partir de uma superfície, onde é dada em $W.m^{-2}$ (Watts por metro quadrado). Já a irradiância é o fluxo radiante incidente por unidade de área a partir de uma superfície também dada em $W.m^{-2}$. A radiância ($W.m^{-2}sr^{-1}$) é o fluxo radiante por unidade de ângulo sólido em um ponto numa superfície por unidade de área projetada desta superfície (WMO, 1996). Segundo a WMO/UNEP (2010), existe outra grandeza que mede a quantidade total de incidência em um alvo durante um

determinado intervalo de tempo, chamado de Exposição (dose), dado em $J.m^{-2}$ (Joule por metro quadrado).

2.7.1 Avaliações do índice Ultravioleta

O Índice Ultravioleta (I-UV) consiste de um fator de conversão da irradiância Eritêmica e uma padronização numa escala numérica dividida em categorias associadas a valores inteiros e adimensionais, que visa possibilitar uma rápida compreensão sobre a Radiação Ultravioleta biologicamente ativa. Foi criado para informar o público leigo e preveni-lo do tempo máximo de exposição da irradiação solar na faixa do UV-B(WHO, 2002). Surge daí a definição do MED (Minimum Erythema Dosis) ou DEM (Dose Eritematosa Mínima) que é a quantidade de energia mínima capaz de causar um eritema (avermelhamento ou até mesmo maiores lesões na pele). A saída das medidas é dada em MED/hora, considerando um MED de 23 mJ/cm^2 . O valor do Índice é um indicativo da intensidade da radiação e do grau de exposição às pessoas num determinado horário.

O cálculo do índice ultravioleta, realizado pela medida da dose acumulada em 1 hora, baseia-se na conversão do valor obtido em MEDs (em mJ/cm^2) através da multiplicação pelo fator de conversão do instrumento (MADRONICH, 1993). Como exemplo, tendo sido obtida uma dose de energia acumulada em 1 hora igual a 5 MEDs, multiplicando-se pelo fator de calibração 23 mJ/cm^2 , obtém-se 115 mJ/cm^2 ou $11,5 \text{ cJ/cm}^2$, e o índice UV neste caso seria igual a 11 (onze) (KIRCHHOFF,1995).

A Figura 12 apresenta a classificação do I-UV em intervalos e o correspondente conceito associado juntamente com o tempo de exposição ao sol de acordo com cada faixa de valor do índice. A classificação do I-UV de mínimo a muito alto serve como indicativo do tempo de exposição segura ao Sol a que uma pessoa poderá se submeter. Este tempo dependerá do tipo de pele da pessoa e da intensidade de radiação.

A sensibilidade eritêmica também varia de acordo com a parte do corpo humano. O rosto, pescoço e o tronco são de duas a quatro vezes mais sensíveis do que os membros (URBACH, 1969).

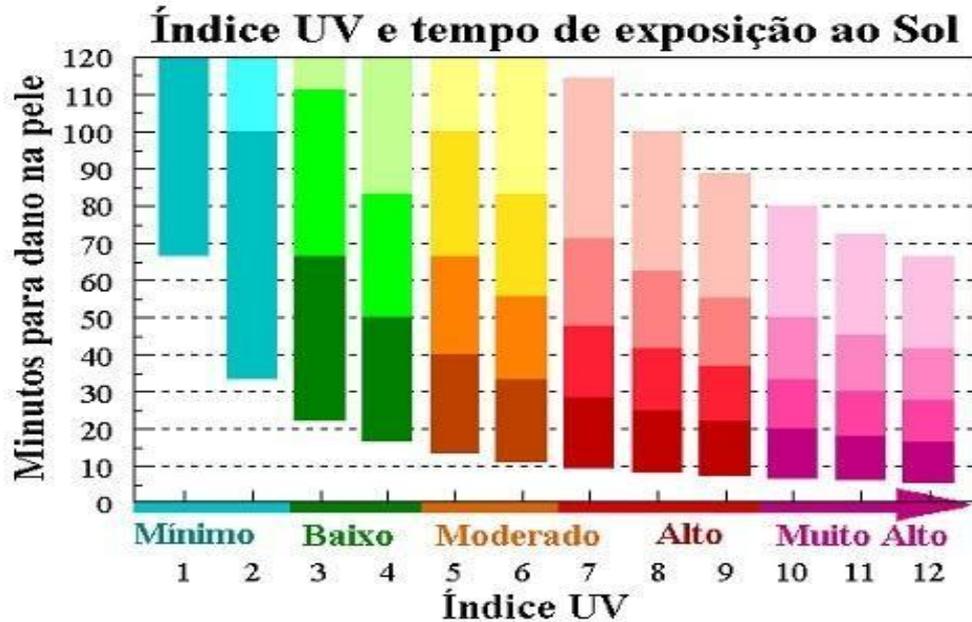


Figura 12- Gráfico indicativo do tempo seguro de exposição ao Sol para diferentes tipos de pele de acordo com o Índice Ultravioleta.

Fonte: Adaptado de WHO, 2002

A caracterização da reação da pele na exposição ao sol tende a ser variável, uma vez que, sob condições reais, de acordo com os hábitos de cada indivíduo a vulnerabilidade da pele de um indivíduo particular depende do tempo de exposição acumulada ao longo dos anos. Uma evidência seria a da Tab.2: pode-se observar que indivíduos com pele mais clara necessitam de uma dose de radiação (exposição) menor para desencadear um processo eritêmico, em relação aos indivíduos de pele mais escura. Por esta razão, a incidência de doenças relacionadas à exposição à RUV é muito maior em indivíduos de pele branca. (Diffey, 1991).

Tabela 2 - Tipos de pele e reação à exposição à radiação UVB

Cor da pele	Tipo de Pele	Queimadura	Bronzeamento	DEM (mJ/cm ²)
Branca	I	Sim	Não	20 – 30
	I	Sim	Mínimo	25 – 30
	III	Sim	Sim	30 – 50
	IV	Não	Sim	45 – 60
Negra	V	Não	Sim	60 – 100
	VI	Não	Sim	100 – 200

Fonte: Adaptada de Diffey (1991)

2.8 Radiação Ultravioleta UV-B e sua relação com O₃

A radiação UV-B pode ser atenuada por absorção pelo ozônio (Molina et al. 1986), em menor quantidade pelo SO₂ (Krotkov et al. 2006) e NO₂ (Davidson et al., 1988) e pelos aerossóis (Seinfeld, 1986), ou por espalhamento Rayleigh nas moléculas de ar e espalhamento nas partículas de aerossóis. A atenuação da radiação UV-B por gases ou partículas pode ser medida de forma indireta através da espessura óptica (KIRCHHOFF et al., 1996).

Kirchoff et al. (1991) afirmam que a dose diária de radiação UV-B que pode ser recebida por cada indivíduo varia de acordo com o tipo de pele. Essa quantidade pode ser medida pela MED, que indica o quanto de radiação UV-B a pele pode receber sem que produza a eritema (queimadura solar ou vermelhidão).

Hupfer et al. (2011) analisaram o comportamento da Radiação Ultravioleta incidente na superfície da região Sul do Brasil para o dia 29/09/2005, no qual houve a ocorrência do Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico. Os dados foram coletados através do espectrofotômetro Brewer na cidade de São Martinho da Serra.

O Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico causou uma diminuição de cerca de 6 % na Coluna Total de Ozônio sobre o Observatório Espacial do Sul,

acarretando um aumento de cerca de 10 % na Radiação Ultravioleta UV-B incidente.

Lopo et al. (2013) apresentaram um estudo da RUV e índice UV em Natal e suas relações com variáveis relevantes como ozônio total. A variabilidade anual da RUV apresentou nos meses de setembro e outubro uma estabilização/redução do I-UV em razão da maior concentração anual de ozônio total, pois indicaram que o ozônio total e aerossóis possuem uma forte correlação negativa com o índice UV nos referidos meses (Figura 13).

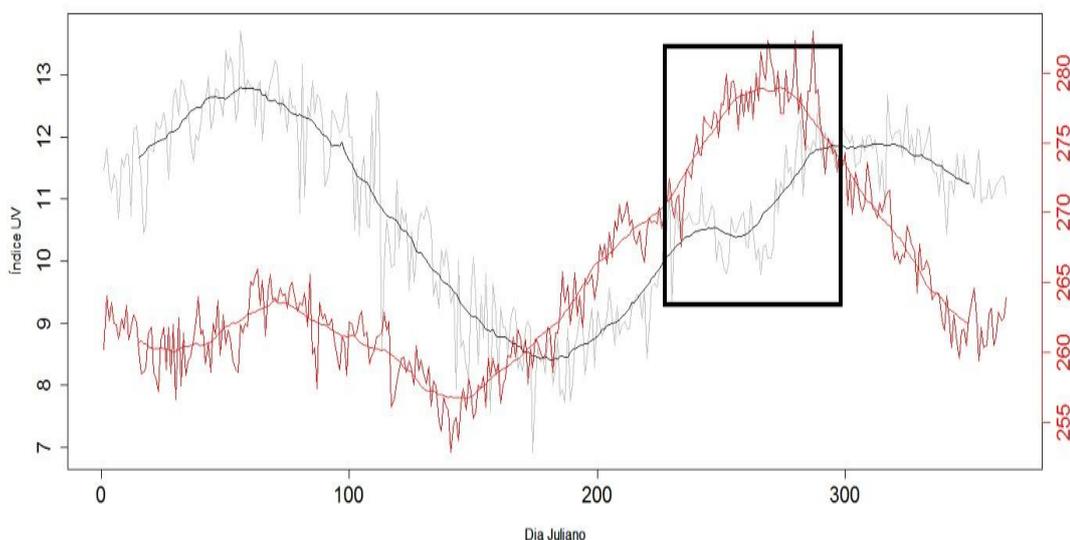


Figura 13 - Gráfico simultâneo e com filtragem de médias móveis e da variabilidade anual do índice UV (preto e escala no lado esquerdo) e ozônio total (vermelho e escala no lado direito) na cidade de Natal.

Fonte: Lopo et al. (2013)

Bojkov et al. (1995) realizaram uma análise da climatologia global em 46 estações utilizando o Espectrofotômetro Dobson para o período de 1964 a 1994 mostrando que o nível do ozônio tinha uma tendência ao decréscimo, onde a região entre 35°S e 60°S (latitudes médias) teve um declínio de aproximadamente 4,3% por década no Hemisfério Norte e 4,1% no Hemisfério Sul (CHUBACHI et al. 2005). Alguns autores (Kirchoff et al. 1996; Guarneri et al. 2004; Salgado et al. 2010) indicam que em maio há um mínimo e em setembro e outubro estão as maiores médias, sendo a variação sazonal próxima de 30UD.

Salgado et al. (2010), observaram as influências do efeito primário do buraco de ozônio Antártico sobre a região da cidade de Punta Arenas no Chile utilizando os dados do Espectrofotômetro Brewer para o período entre 1992 a 2009 e comparados com a climatologia de 15 anos para região, realizada através dos dados do instrumento TOMS da NASA. Comprovou-se que havia um grande aumento de radiação UV-B na superfície, decorrente da grande influência que o buraco de ozônio na Antártica exerce sobre a cidade, sendo o valor da maior queda de coluna total de O₃ de 145,8 UD, enquanto que a média para este mês seria de aproximadamente de 359 UD. A evolução da Coluna Total de Ozônio, de setembro a dezembro de 2009, para Punta Arenas-Chile (Figura 14a) mostra que o decaimento de ozônio devido ao posicionamento do buraco de ozônio Antártico fez a radiação UV-B aumentar sobre a cidade (Figura 14b).

Estima-se que, quando há uma redução de 1% na coluna total de O₃ pode consequentemente causar um aumento de 1,2 a 2% na Radiação Ultravioleta biologicamente ativa (UV-B) devido o ozônio conseguir absorver essa radiação dentro de sua faixa espectral. Todavia, havendo uma queda abrupta e significativa de ozônio, existirá um crescimento no fluxo de Radiação Ultravioleta solar que chegará a superfície terrestre (GUARNIERI et al. 2004).

Reis et al. (2012) correlacionaram a Radiação Ultravioleta Eritêmica (RUV) com a Coluna Total de Ozônio para os períodos de solstício de verão (21 de novembro a 21 de janeiro) e de inverno (21 de maio a 21 de julho) para os anos de 2005 a 2008. Identificou-se no solstício de inverno uma diminuição da Coluna Total de Ozônio da ordem de 1% acarretaria um aumento de 0,15 % na RUV, enquanto que no solstício de verão o aumento seria de 1,04%. A Coluna Total de Ozônio e a RUV apresentaram uma correlação inversa, assim como o ozônio e a radiação UV-B com os valores dos coeficientes de correlação acima de 80% no inverno e acima de 91% no verão.

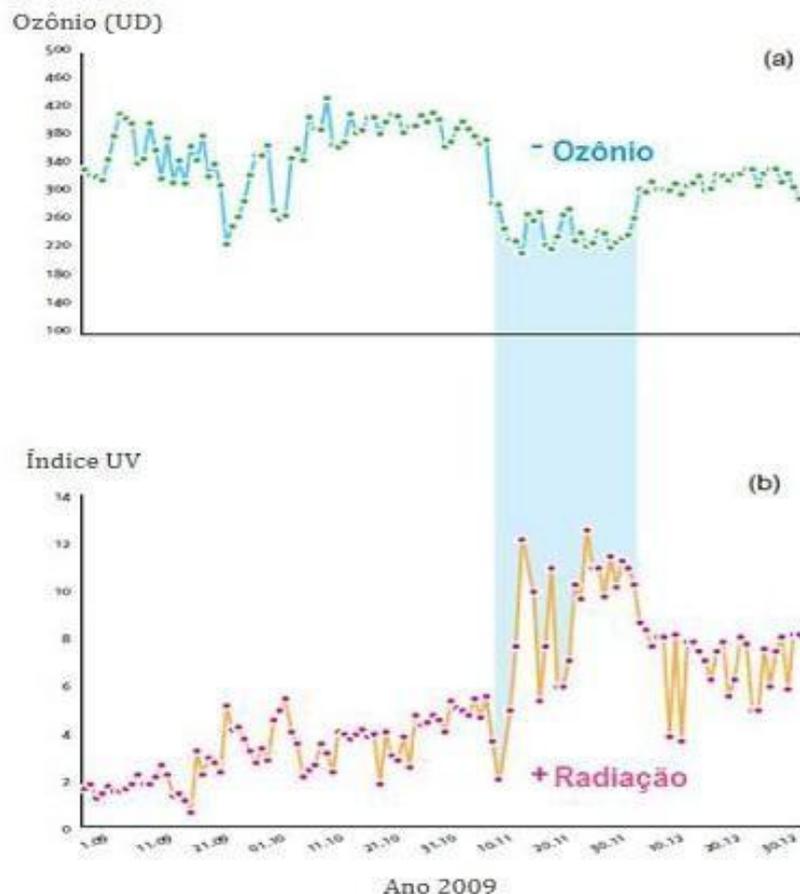


Figura 14- Coluna Total de Ozônio (UD) (a), e Radiação Ultravioleta (Índice UV) (b) em Punta Arenas (Chile), de setembro a dezembro de 2009.

Fonte: SALGADO et al., 2010.

2.9 O sensor Ozone Monitoring Instrument (OMI)

O sensor OMI (Ozone Monitoring Instrument) está a bordo do satélite NASA/Aura fazendo parte do EOS (Earth Observing System), que observa o campo de imagem ultravioleta e visível, sendo o espectrômetro projetado para monitorar ozônio e outras espécies (NO_2 , SO_2 , BrO, HCHO), incluindo os aerossóis atmosféricos (OMI USER'S GUIDE, 2011). É o principal instrumento a bordo do satélite Aura, para monitorar a recuperação da camada de ozônio, em resposta à eliminação de produtos químicos. O OMI mede os principais poluentes atmosféricos identificados pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos EUA como sérias ameaças à saúde humana e produtividade agrícola: O_3 , NO_2 , SO_2 e outros aerossóis

(CARN et al., 2007).

Também pode medir a radiação solar global na banda ultravioleta B (UVB) com comprimento de onda de $10^{-1} \mu\text{m}$ (KROTKOV et al., 2006). Este instrumento utiliza a Unidade Dobson (medida que define a concentração das moléculas de O_3 presentes na atmosfera ou densidade de massa, $1,0\text{UD} = 2,69 \times 10^{16} \text{ mol/cm}^3$) para expressar as colunas totais de O_3 , NO_2 e SO_2 (MARIANO, 2012).

O sensor OMI combina as qualidades dos sensores GOME e SCIAMACHY com as vantagens do sensor TOMS. Opera na faixa do UV/VIS (ultravioleta/visível) entre 306-380nm (nanômetros), realizando varreduras de 2600km diárias em órbita da Terra de aproximadamente $13 \times 24\text{km}^2$. O sensor capta informações de dados de O_3 com uma resolução espacial de $1,0^\circ \times 1,0^\circ$ baseados na extinção de radiação de OL (onda longa) ascendente que é proveniente da radiação IR (infravermelha) refletida pelo sistema Terra-atmosfera (KROTKOV et al. 2008).

O sensor OMI determina a Coluna Total de Ozônio indiretamente pelo mapeamento da luz ultravioleta emitida pelo Sol e retroespalhada pela atmosfera da Terra de volta para o satélite, nas faixas espectrais de Radiação Ultravioleta entre 0, 270 a 0, 314 μm e 0 306 a 0, 380 μm . O instrumento OMI começou a coleta de dados no dia 9 de Agosto de 2004, sendo uma contribuição do Programa Aeroespacial da Netherland's Agency (NIVR) dando continuidade às medidas do *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS), do *Global Ozone Monitoring Experiment* (GOME) e *Solar Backscatter Ultraviolet* (SBUV), quando estes cessaram suas operações. O sensor TOMS operou em três períodos, iniciando em 1978 até 1993, depois de 1991 até 1994 e por fim de 1996 até o ano de 2005, quando cessou suas atividades. O sensor GOME opera desde 1995 e o sensor SBUV desde 1978. O espectrômetro OMI faz a medição da quantidade de radiação solar que é dispersa pela atmosfera da Terra e pela sua superfície, a partir de uma técnica chamada *Backscatter Ultraviolet* (BUV), com duas imagens alimentando sua grade (OMI, 2011).

3. Metodologia

3.1 Dados do sensor OMI

Neste trabalho serão utilizados dados diários para a região da América do Sul (entre as latitudes 10°N, 58°S e as longitudes de 34°W, 80°W) durante o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014, obtidos através do sensor Ozone Monitoring Instrument (OMI) a bordo do satélite Aura.

O sensor OMI determina a Coluna Total de Ozônio indiretamente pelo mapeamento da luz ultravioleta emitida pelo Sol e retroespalhada pela atmosfera terrestre de volta para o sensor a bordo do satélite, nas faixas espectrais de RUV entre 0,270nm a 0,314nm e 0,306nm a 0,380nm. Estes dados são globais de alta resolução com todo o ozônio contido na atmosfera terrestre, tendo resolução temporal diária e resolução espacial de 1,0° x 1,0° para as variáveis de O₃ e Radiação Ultravioleta (KROTKOV ET al. 2006; OMI USER'S GUIDE, 2011). Estes dados estão disponíveis no site da NASA (National Aeronautics and Space Administration) em (<http://gsfc.nasa.gov>).

Para a análise dos dados de O₃ foi utilizada a variável ColumnAmountO3 do produto OMTO3, a qual se refere a Coluna Total de Ozônio (CTO) presente na atmosfera, dada em Unidades Dobson. Os dados de Radiação Ultravioleta do tipo UV-B para análise do Índice Ultravioleta (UVindex) utilizando o máximo valor diário e Dose Eritermal Diária (DailyErythermalDoses dada em J/m²) são determinados pela aplicação do método de integração trapezoidal para as Taxas de Dose Eritêmica (Erythermal Dose Rate) horária calculada assumindo uma única medição diária OMI, obtidos através do produto OMUVB dentro do espectro 305, 310, 324, 380 nm.

Todas estas variáveis acima têm como a resolução espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ e resolução temporal diária para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014.

3.2 Região de estudo

Com o objetivo de exprimir as informações obtidas através dos resultados, a região de estudo foi delimitada entre as latitudes de 60°S , 10°N e as longitudes de 90°W , 30°W chamada neste trabalho de A1 (Área 1) representada pelo retângulo verde (Figura 15). Assim, tem-se que esta área é representativa de todo o continente sul-americano, onde foram calculadas as médias mensais, sazonais de Coluna Total de Ozônio e derivações de Radiação Ultravioleta, como, por exemplo, Índice Ultravioleta, DED, além da correlação entre as variáveis de O_3 e Radiação Ultravioleta.

A região sul da América do Sul representada pelo retângulo azul A2 (Área 2) na Figura 15 (40°S - 20°S e 75°W - 40°W) apresenta inúmeros registros de casos de quedas temporárias de Coluna Total de Ozônio que foram relatados por diversos autores (Kirchhoff et al., 1996; Bertagnolli et al., 2006; Pinheiro et al., 2011; Peres, 2012 e Schmalfluss et al., 2013) como sendo efeitos primários e secundários do buraco de ozônio Antártico, além dos registros de baixos valores de Coluna Total de Ozônio contidos na região dos trópicos devido à presença de circulação Brewer-Dobson que podem se estender para as regiões de maiores latitudes (BREWER, 1949; DOBSON, 1968; SOLOMON, 1999). Esta região engloba estados do Sul, Sudeste e Centro-oeste do Brasil, sul da Bolívia, Paraguai, Uruguai, Chile e Argentina. Algumas das principais regiões metropolitanas da América do Sul estão situadas nesta área e apresentam forte poder econômico devido ao crescimento populacional, ao desenvolvimento industrial nas cidades e regiões metropolitanas de grande e médio porte (IBGE, 2010). Essa região da América do Sul é caracterizada pela presença de relevo e bacias hidrográficas peculiares como, por exemplo, a Cordilheira dos Andes em sua maior parte no Chile e a Bacia do rio da Prata localizada mais ao centro do continente. Juntamente com outros fatores, estes podem ser considerados de grande influência a esta região, na regência de sua climatologia, como por exemplo, a atuação dos Complexos Convectivos de

Mesoescala (CCMs) e Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs), Sistemas Frontais (SF), presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) entre outros fenômenos meteorológicos (CAVALCANTI et al., 2009).

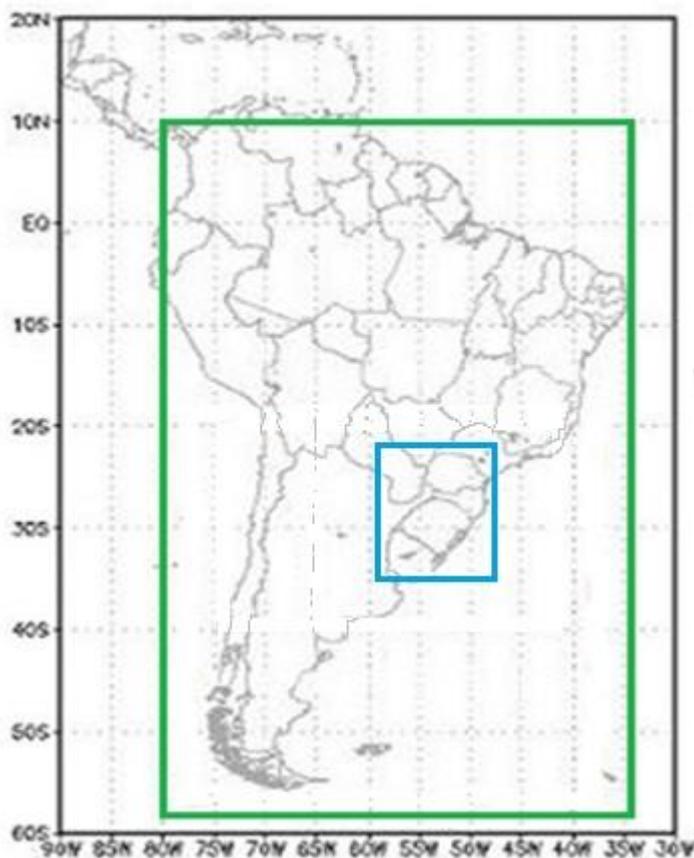


Figura 15 - Localização das duas áreas dentro da América do Sul. Em verde a delimitação de toda a América do Sul, em azul a região onde também atua o ESBOA.

Nesta região serão calculadas as técnicas de Análise de Componentes Principais ou Empirical Orthogonal Functions (Funções Ortogonais Empíricas) sobre as variáveis de RUV para um melhor esclarecimento do comportamento da variabilidade desta variável ao longo do decênio de 2004 a 2014 (Wilks, 2006). Na grande maioria dos trabalhos o que se pretende investigar é como as mudanças em uma variável afetam outra variável, e em muitos aspectos na estatística é necessário assumir um modelo matemático para obtermos progresso. Dentro deste contexto, a regressão do tipo não linear constitui uma tentativa de estabelecer uma equação matemática que descreva o relacionamento entre duas variáveis. Para este estudo foi considerada variável resposta, ou dependente (Radiação Ultravioleta do tipo

Dose Eritêmica Diária), e a outra, chamada variável explicativa, ou independente (Coluna Total de Ozônio) (DRAPER & SMITH, 1998).

3.3 Análises da série temporal dos dados de Ozônio e Radiação Ultravioleta

Utilizando a série temporal dos dados de Coluna Total de Ozônio e Radiação Ultravioleta, disponibilizados pelo sensor OMI, no período de dezembro de 2004 a novembro de 2014 para a América do Sul na A1, calcularam-se as médias mensais e médias mensais individuais (média para cada mês de cada ano de todo período de dezembro de 2004 a novembro de 2014) de Coluna Total de Ozônio e Radiação Ultravioleta (Índice Ultravioleta) com o cálculo das médias para cada pixel da A1 a partir dos dados diários. Para o preenchimento de falhas nos dados, ou seja, nos dias em que não foram registrados os dados de CTO e RUV pelo sensor OMI, devido a diversos fatores, como por exemplo, problemas de processamento e calibração do sensor, o procedimento adotado foi utilizar um dia anterior e um dia posterior ao último dia falho (foi observado para o período, um máximo de dois dias seguidos com falhas nos dados) e assim é calculada uma média entre esses dois dias que representará os dados dos dias com falha na observação. Como o deslocamento das massas de ar contendo O₃ estratosférico a partir da circulação Brewer-Dobson pode levar dias ou até semanas, o procedimento do preenchimento de falhas é avaliado como pertinente não comprometendo a série de dados

A análise sazonal, tanto para dados de CTO e RUV (Índice Ultravioleta), foi elaborada a partir dos dados diários de dezembro de 2004 a novembro de 2014 representadas pelos trimestres DJF (Dezembro-Janeiro-Fevereiro), MAM (Março-Abril-Maio), JJA (Junho-Julho-Agosto) e SON (Setembro-Outubro-Novembro) dentro da região da A1.

3.3.1 Correlação

Por conta dos antecedentes bibliográficos (Kirchoff et al. 1991, 1996; Guarnieri et al. 2004; Salgado et al. 2010) na América do Sul serem de caráter

pontual, ou seja, para uma determinada cidade/localidade, devido à instalação de instrumentos em superfície, surge necessidade de aplicar-se o método de correlação entre as variáveis O_3 e RUV para melhor compreensão da dependência/influência que a CTO exerce sobre a RUV.

O método de correlação linear ou correlação de Pearson visa estimar (mensurar) uma relação que possa existir entre duas variáveis na população. Caso os pontos das variáveis, representados num plano cartesiano (X, Y) ou gráfico de dispersão, apresentem uma dispersão ao longo de uma reta imaginária, dizemos que os dados apresentam uma correlação linear. Um diagrama de dispersão mostra a relação entre duas variáveis quantitativas, medidas sobre os mesmos indivíduos (Wilks, 2006). Porém existe uma medida do grau e do sinal da correlação linear entre duas variáveis (x, y) dado pelo Coeficiente de Correlação Linear de Pearson, para auxiliar na análise visual com um valor r definido pela Equação 1:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde o valor de r estará sempre no intervalo de -1 a 1, que é o reflexo de quando a alteração no valor de uma variável independente provoca alterações no valor da outra variável (dita dependente). Este coeficiente de correlação é adimensional e não é afetado pelas unidades de medidas de x e y. O sinal positivo indica que as variáveis são diretamente proporcionais, enquanto que o sinal negativo indica que a relação entre as variáveis é inversamente proporcional. O valor de r não varia se todos os valores de qualquer uma das variáveis são convertidos para uma escala diferente e também não é afetado pela escolha de x ou y, permutando entre as variáveis x e y o valor de r segue inalterado (WILKS, 2006).

Calculou-se o grau de correlação entre as variáveis (pixel a pixel) de Coluna Total de Ozônio inclinada e de Radiação Ultravioleta (Dose Eritêmica Diária), para os dados diários, assim chegando às correlações mensais e sazonais para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. Vale ressaltar que para este tipo de análise (correlação entre Coluna Total de O₃ e RUV) é necessário que seja utilizado a variável Coluna Total de Ozônio Inclinada (Cinc) no lugar de CTO devido a estas correlações não serem lineares e sim exponenciais, de acordo com a Lei de Beer (LIOU, 2002; WALLACE; HOBBS, 2006).

Para chegarmos aos dados de Coluna Total de Ozônio Inclinada foi realizado o procedimento proposto por Echer et al., (2001), onde se aplica a Lei de Beer (Liou, 2002) afirmando que a intensidade de um feixe de luz monocromático decresce exponencialmente à medida que a concentração da substância absorvente aumenta aritmeticamente. A expressão utilizada para o cálculo está apresentada na Eq. 2:

$$Cinc = CTO \cdot sec \theta \quad \text{Equação (2)}$$

onde Cinc é a Coluna Total de Ozônio inclinada, CTO é a Coluna Total de Ozônio e $sec \theta$ corresponde a secante do ângulo solar zenital. Os dados de ângulo solar zenital, que é o ângulo formado entre a posição do Sol e o zênite, foram obtidos do sensor OMI, com resolução temporal diária e resolução espacial de 1°x1°, porém foram considerados/validados somente ângulos menores que 65°. Para uma aproximação plano-paralela da atmosfera, a massa de ar ótica que é atravessada pelo feixe de radiação é dada por $\mu = sec \theta$ (LENOBLE, 1993).

Para este tipo de análise será apresentado gráfico que conterà imagem projetada sobre a América do Sul, mostrando o grau de correlação entre as variáveis Cinc e RUV.

3.3.2 Análise de Componentes Principais

A finalidade original da Análise de Componentes Principais ou Funções Ortogonais Empíricas (EOF, em inglês) foi reduzir o elevado número de variáveis

nos dados originais para alguma determinada variável, mas sem comprometer a variância apresentada pela variável. No entanto, as análises utilizando EOF se tornaram muito úteis para extrair as principais características dos modos de variabilidade climática, tais como a Oscilação Antártica, Oscilação do Ártico, El Niño Oscilação Sul, Dipolo do Atlântico e Dipolo do Índico (ESCOBAR, 2007). A EOF baseia-se principalmente sobre a utilização da correlação espacial do tempo, uma característica importante em dados climáticos. É uma técnica que tenta incorporar tanto a correlação espacial quanto a correlação temporal, fazendo com que o método se torne uma ferramenta útil para extrair estruturas dinâmicas, tendências e oscilações, e para filtrar dados (HANNACHI *et al.*, 2007).

O método da EOF baseia-se na resolução do problema de autovalores da matriz de covariância (S) do campo de anomalias de uma determinada variável X . O cálculo dessas anomalias é realizado retirando-se o ciclo sazonal médio do campo original de X através da subtração do valor de X de cada mês pelo respectivo valor do mês climatológico. Assim, dada a matriz de dados de anomalias $X_{n \times m}$ para n meses em m pontos, a matriz de correlação fica:

$$S = \frac{1}{n} X^T X \quad (\text{Equação 3})$$

Os autovetores são encontrados a partir da seguinte decomposição, $SP=PA$, onde, S = Matriz de covariância; P = Matriz de autovetores e A = Matriz de diagonal contendo os autovalores. Os autovetores são ortogonais entre si e representam padrões espaciais estacionários ou mapas de variabilidade. A variância explicada por cada EOF é dada pelo respectivo autovalor (λ_i). Para cada autovalor λ_i escolhido, encontra-se o correspondente autovetor p_i , denominado EOF. A primeira EOF é o autovetor associado com o maior autovalor, a segunda EOF é associada com o segundo maior autovalor, subsequentemente, de forma que os menores autovalores são considerados como ruído. Cada autovalor λ_i determina uma medida da fração da variância total explicada pelo modo. Essa fração é obtida dividindo-se o λ_i pela soma de todos os outros valores, sendo que a primeira EOF explica a maior fração da variância total. A matriz de autovetores P tem a propriedade de identidade

I , isto é, $PtP = PPt = I$, mostrando que as EOF's não são correlacionadas no espaço, ou seja, os autovetores são ortogonais entre si, originando o nome do método Funções Ortogonais Empíricas. O padrão espacial obtido a partir da EOF representa uma estrutura estacionária. Para se ver como um dado padrão espacial evolui no tempo, o autovetor é projetado no campo original para se obter a série temporal, os chamados coeficientes de expansão. Assim como as EOF's são ortogonais no espaço (matriz simétrica e diagonal, possui uma base ortogonal associada aos autovalores), as séries temporais associadas são ortogonais no tempo. A fração da variabilidade do campo total explicada por uma dada EOF é proporcional ao seu autovalor associado. Juntos, um autovalor com sua correspondente EOF e coeficiente de expansão, definem um modo de variabilidade. O uso da EOF como ferramenta estatística já foi utilizado em diversos outros trabalhos para o cálculo de variáveis atmosféricas e oceânicas (ex.: ESCOBAR, 2007; HANNACHI, *et al.*, 2007; JUSTINO & PELTIER, 2008).

Existem alguns tipos de ACP utilizados para analisar a variável observada tanto no tempo quanto no espaço como o Modo T, S, O entre outros. O Modo-T, utilizado neste trabalho, pode ser aplicado para criar agrupamentos de variáveis e classificar seus campos atmosféricos espaciais (ESCOBAR, 2007). Segundo Richman (1983) o Modo-T é uma ferramenta muito útil para sintetizar e reproduzir padrões de circulações, quantificando sua frequência e mostrando os períodos de tempo neles dominantes, ou seja, obter a evolução dos principais modos dominantes de circulação que permitam analisar a trajetória e comportamento dos sistemas sinóticos sobre determinadas áreas.

Os padrões dominantes da variabilidade da Radiação Ultravioleta são objetivamente determinados, aplicando-se o método de Análise Fatorial em Componentes Principais diretamente nos dados de RUV. A ACP é empregada com base na matriz de correlação, tal que os autovetores para cada modo representam padrões de correlação com sinais correspondentes aos sinais das anomalias de RUV.

O número escolhido de Componentes Principais foi baseado no critério de truncamento de Kaiser, que considera como mais significativos os autovalores, cujos valores sejam superiores a unidade. Assim, como cada CP possui apenas um

autovalor associado, é possível obtermos o quanto da variabilidade dos dados está contida em cada uma das CP's (WILKS, 2006). Para o cálculo da ACP foi utilizada a variável de Radiação Ultravioleta do tipo Dose Eritêmica Diária (DED), pois esta apresenta escala com maior variabilidade das unidades em relação ao Índice Ultravioleta. Ressalta-se que, como já visto no item 2.7.1 o I-UV é obtido através dos dados de DED multiplicado por um fator de conversão, portanto não há diferença nos resultados, salvo a diferença de escala.

3.3.3 Modelos de regressão lineares e não lineares

Na grande maioria dos trabalhos o que se pretende investigar é como as mudanças em uma variável afetam outra variável, e em muitos aspectos na estatística é necessário assumir um modelo matemático para obtermos progresso. Dentro deste contexto, a regressão linear simples constitui uma tentativa de estabelecer uma equação matemática que descreva o relacionamento entre duas variáveis: uma chamada variável resposta, ou dependente, e a outra, chamada variável explicativa, ou independente. Existem diversas formas de utilização de equações de regressão, como estimar valores de uma variável, com base em valores conhecidos da outra. Em situações em que as duas variáveis medem aproximadamente a mesma coisa, mas uma delas é relativamente dispendiosa, ou difícil de lidar, enquanto que a outra não. Ou a tentativa de explicar valores de uma variável em termos da outra, ou seja, confirmar uma relação de causa e efeito entre duas variáveis. E por fim, buscar prever valores futuros de uma variável (DRAPER; SMITH, 1998)

Se uma relação linear é válida para sumarizar a dependência observada entre duas variáveis quantitativas, então a equação que descreve esta relação é dada pela Equação 4:

$$Y = a + bX \quad \text{(Equação 4)}$$

Por definição, um modelo de regressão é não linear se pelo menos um dos seus parâmetros estão de forma não-linear. Um modelo de regressão não-linear é considerado “intrinsecamente linear” se por meio de uma reparametrização reduz-se o modelo a linearidade, podendo utilizar o termo “intrinsecamente linear” para referir-se a modelos que podem ser linearizados via alguma transformação. Em geral, na prática, um modelo não-linear é linearizado para facilitar a obtenção das estimativas dos parâmetros (MAZUCHELI; ACHCAR, 2002). Em determinados experimentos a dependência entre as variáveis independente e dependente é de forma exponencial, neste caso o ajuste. Por exemplo, na atmosfera a transmitância da radiação solar pode ser explicada pela atenuação exponencial, indicada pela Lei de Beer, onde um feixe monocromático (Radiação Ultravioleta) ao penetrar em um meio opticamente ativo no caso a atmosfera terrestre, sofre uma atenuação de forma exponencial (ECHER et al., 2001).

Por exemplo, aplicando-se logaritmo em ambos os membros da Equação 5, pode-se reduzi-la à forma linear Equação 6:

$$y = ae^{bx} \quad (\text{Equação 5})$$

$$(y/a) = e^{bx}$$

$$\ln(y/a) = bx \cdot \ln(e)$$

$$\ln(y) - \ln(a) = bx$$

$$\ln(y) = bx + \ln(a) \quad (\text{Equação 6})$$

3.3.3.1 Análise de variância (ANOVA)

O teste de hipótese denominado análise de variância (ANOVA) tem o objetivo de verificar se as diferenças entre as estimativas médias a e b são significativas. A análise de variância (ANOVA) é um método estatístico capaz de testar a igualdade de duas ou mais médias populacionais, através da análise de

variâncias amostrais (WILKS, 2006). As hipóteses nulas e alternativas a se testar foram: H_0 – médias populacionais são iguais e H_1 – ao menos uma das médias populacionais é diferente das demais. Utiliza-se um nível de significância igual a 1%, $\alpha = 0,01$ ou 5%, $\alpha=0,05$ na aplicação do teste de análise de variância. Define-se os graus de liberdade por: no numerador igual a $(k-1)$, onde k é composto pelo número de médias populacionais sendo testadas, já no denominador igual a $(N-k)$. O teste de variância é aplicado para calcular a estatística de teste F , que é composta pela razão de duas estimativas, variância entre amostras e variância dentro de amostras. A rejeição ou não da hipótese nula pode ser verificada através do cálculo de P . Se o valor P for menor ou igual a $\alpha = 0,05$, para um grau de confiança de 95%, rejeita-se a hipótese nula. Se o valor P for maior que $\alpha = 0,05$ não se rejeita a hipótese nula, não existindo assim, evidências suficientes para afirmar que existem diferenças significativas entre as médias analisadas. Os índices a serem analisados na tabela ANOVA são: Soma dos Quadrados da Regressão (SQReg), Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQRes), Soma dos Quadrados Total (SQTotal), e algumas medidas de ajuste como o MSE (Medium Square Error, do inglês Erro médio Quadrático), o Coeficiente de determinação (R^2) e a Razão F (F).

A estatística ANOVA será utilizada no estudo dos casos de queda significativa da Coluna Total de Ozônio, ou seja, decaimento da CTO, comparando estes eventos com os dados de Radiação Ultravioleta do tipo Dose Eritêmica Diária (DED) relativos aos pontos analisados de cada caso (em suas respectivas datas) de decaimento da CTO.

3.3.4 Análise do percentil e anomalia padronizada

De acordo com Wilks (2006), o percentil são as medidas que dividem a amostra em 100 partes iguais. A amostra do percentil pode ser interpretada como o valor esperado para exceder um membro escolhido aleatoriamente de um conjunto de dados. A mediana (ou percentil 50% ou P_{50}) de um conjunto de valores, dispostos segundo uma ordem (crescente ou decrescente) é o valor situado de tal forma no conjunto que o separa em dois subconjuntos de mesmo número de elementos, sendo o valor central dos dados de forma que os dados de mesma

proporção estejam situados abaixo ou acima deste valor. Quando o conjunto de dados possuir na amostra uma quantidade ímpar de elementos haverá coincidência da mediana com um dos elementos da série (Equação 7). Quando o número de elementos da série estatística for par, nunca haverá coincidência da mediana com um dos elementos da série (Equação 8). A mediana será sempre a média aritmética dos dois elementos centrais da série.

$$m = X([n + 1] / 2) \quad n \text{ ímpar} \quad \text{Equação (7)}$$

$$m = \frac{X(n / 2) + X([n / 2] + 1)}{2} \quad n \text{ par} \quad \text{Equação (8)}$$

Neste trabalho, analisaram-se os valores dos percentis individualmente em cada ponto de grade, ou seja, cada ponto de grade terá um valor independente à vizinhança, tanto mensalmente quanto sazonalmente. Trabalhar-se-á na análise do percentil 95% (P95), que mostrará onde se concentram os 5% dos casos extremos encontrados, tanto sazonalmente quanto mensalmente durante o período de dezembro de 2005 a novembro de 2014.

Para determinar a variação das séries mensais e sazonais de Radiação Ultravioleta do tipo DED, foi utilizado o cálculo de anomalias padronizadas como medidas de dispersão, seguindo o procedimento descrito por Wilks (1995), envolvendo basicamente normalizações, médias e análise de variância. Estas normalizações são feitas em cada um dos pontos de grade, individualmente, para que através de suas médias e desvios padrões altos não se sobreponham as demais. Assim, para cada um dos pontos de grade as respectivas normalizações são feitas através da subtração da RUV observada (θ) da média mensal (μ) e dividindo esta diferença do seu desvio padrão (σ), sendo que μ e σ são pertinentes a cada ponto de grade e a cada período de observação. Por exemplo, se um valor de precipitação for do mês de janeiro, na normalização utilizam - se μ e σ calculados com valores de todos os janeiros disponíveis.

Os campos de anomalias padronizadas de DED foram confeccionados para os quatro trimestres DJF, MAM, JJA, SON, para o período de dezembro de 2004 a

novembro de 2014, individualmente em cada trimestre de cada ano. Por exemplo, existirá um campo de anomalia padronizada para o trimestre MAM de 2007; relação à média dos outros trimestres MAM (exceto MAM de 2007) do período dezembro de 2004 a novembro 2014.

4. Resultados e Discussões

4.1 Análises mensais e sazonais da coluna total de O₃

Analisando as médias mensais obtidas a partir dos dados diários do sensor OMI da NASA, comprova-se que, assim como já proposto por Dobson (1968), existe um predomínio da variabilidade meridional dos valores da Coluna Total de Ozônio no sul da América do Sul (latitudes maiores que 25°S), sendo que essa maior amplitude variacional nos registros se inicia pouco antes dos meses da primavera austral (primavera no Hemisfério Sul), de julho a novembro. Essa variabilidade ocorre devido ao fortalecimento do Vórtice Polar (exposto no capítulo 2.4) que desfavorece o deslocamento de massas de ar que leva massa de ar rica em ozônio para as regiões polares aprisionando-as (agindo como uma barreira) nessa região por aproximadamente de 120 a 150 dias (Figura 16g, 16h, 16i, 16j, 16k).

O período registrado para os dados de dezembro de 2004 a novembro 2014 com menores índices de variabilidade da Coluna Total de Ozônio é compreendido entre os meses de janeiro a abril, conforme também relatado por diversos autores (Pinheiro, 2010; Peres, 2013; Schmalfluss, 2014). Nota-se também que nos meses em que há a atuação do Vórtice Polar (julho a setembro) e conseqüentemente favorecendo o aprisionamento da CTO na faixa compreendida entre as latitudes 40°S e 60°S, desenvolve-se um leve aumento nos valores da CTO na região equatorial, variando de uma média de 250 UD para 280 UD (cerca de 11%), aumento este causado pela possível existência da quebra do padrão da circulação Brewer-Dobson.

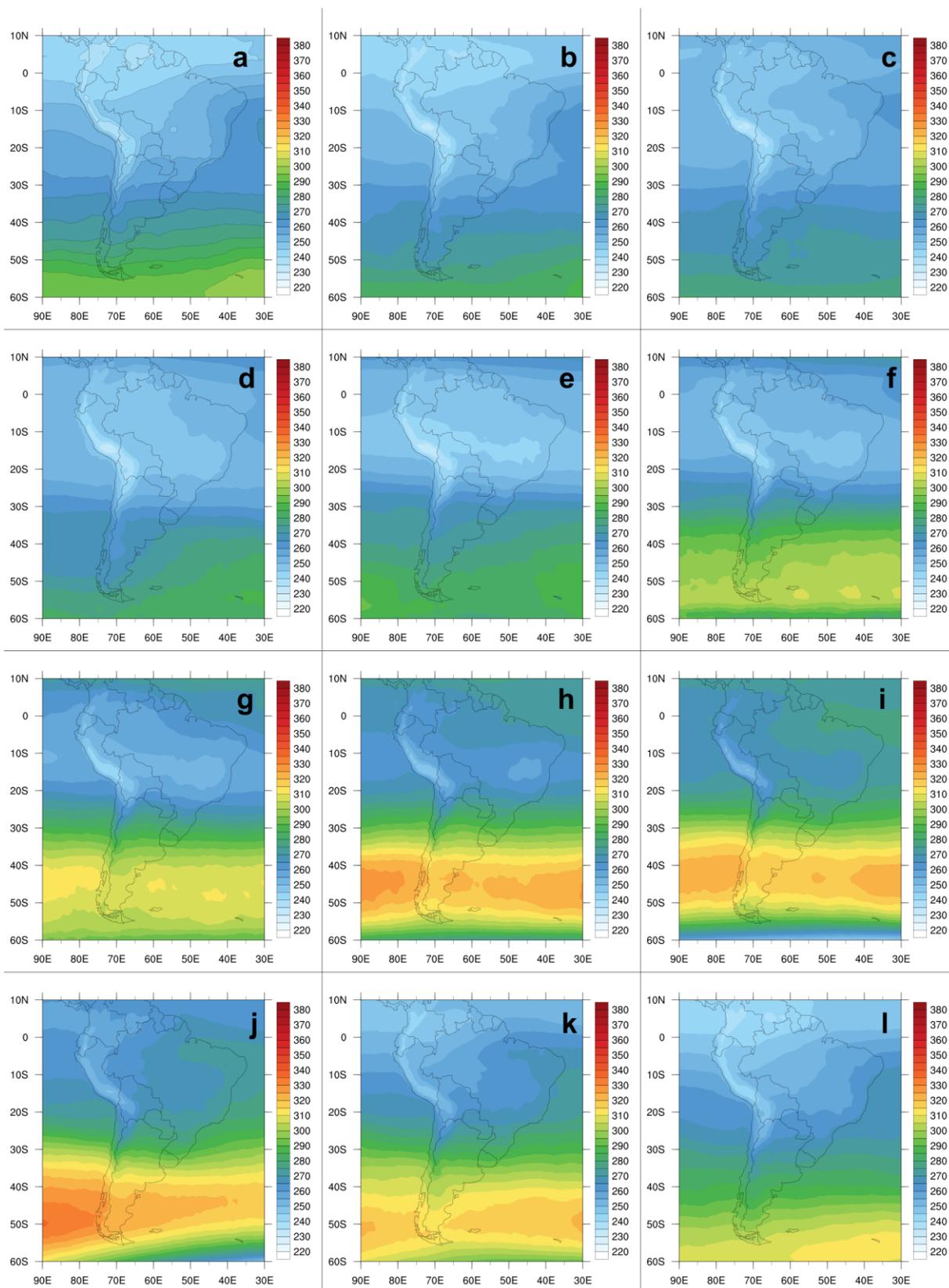


Figura 16 - Campos médios mensais da Coluna Total de Ozônio em UD para a América do Sul entre 2004 a 2014. (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.

Na análise sazonal para o período analisado (Figura 17) é possível observar que as concentrações mais elevadas da Coluna Total de Ozônio no Hemisfério Sul se dão ao longo do cinturão de 60°S (faixa climatológica de baixas pressões onde se concentram as frentes polares) no período SON, onde em alguns anos podem chegar aos valores extremos próximos a 500UD (Apêndice A). Predominantemente, a maior variabilidade deste período se concentra entre as latitudes de 25°S e 60°S estando geralmente com registros entre 290UD e 330UD, com valor máximo próximo ao sul da Argentina e Chile (Figura 17d). No período DJF (Figura 17a) nota-se uma menor variabilidade sobre o sul da América do Sul, com os valores aproximadamente entre 240UD e 290UD, sendo bem diferente dos registros do período SON, devido não existir mais a presença do vórtice polar que se enfraquece tornando-se uma circulação inexpressiva. Semelhante a DJF, o período de MAM mostra-se homogêneo para quase toda região da América do Sul, porém, com variações ainda menores no registro da Coluna Total de Ozônio com valores entre 250 a 280UD, por conta da melhor distribuição da radiação solar, não interrompendo a circulação Brewer-Dobson neste período (Figura 17b), onde os valores climatológicos sazonais podem ser observados no Apêndice A.

A diminuição da radiação solar, quando se aproxima a noite polar e a intensificação do vórtice polar, afeta as concentrações da CTO. Por este motivo, no Hemisfério Sul quando se aproxima a noite polar e a intensificação do vórtice polar, não são registradas/monitoradas as concentrações de ozônio na região polar fazendo com que aumente os valores da Coluna Total de Ozônio na região entre 20°S e 60°S. Assim no período JJA, a Coluna Total de Ozônio já se apresenta mais elevada em relação ao trimestre MAM, tendo na região entre 40°S e 50°S seus maiores valores chegando a uma média de 320UD. Na região entre 20°S e 40°S há um maior gradiente da Coluna Total de Ozônio com valores entre 260 a 310UD (Figura 17c).

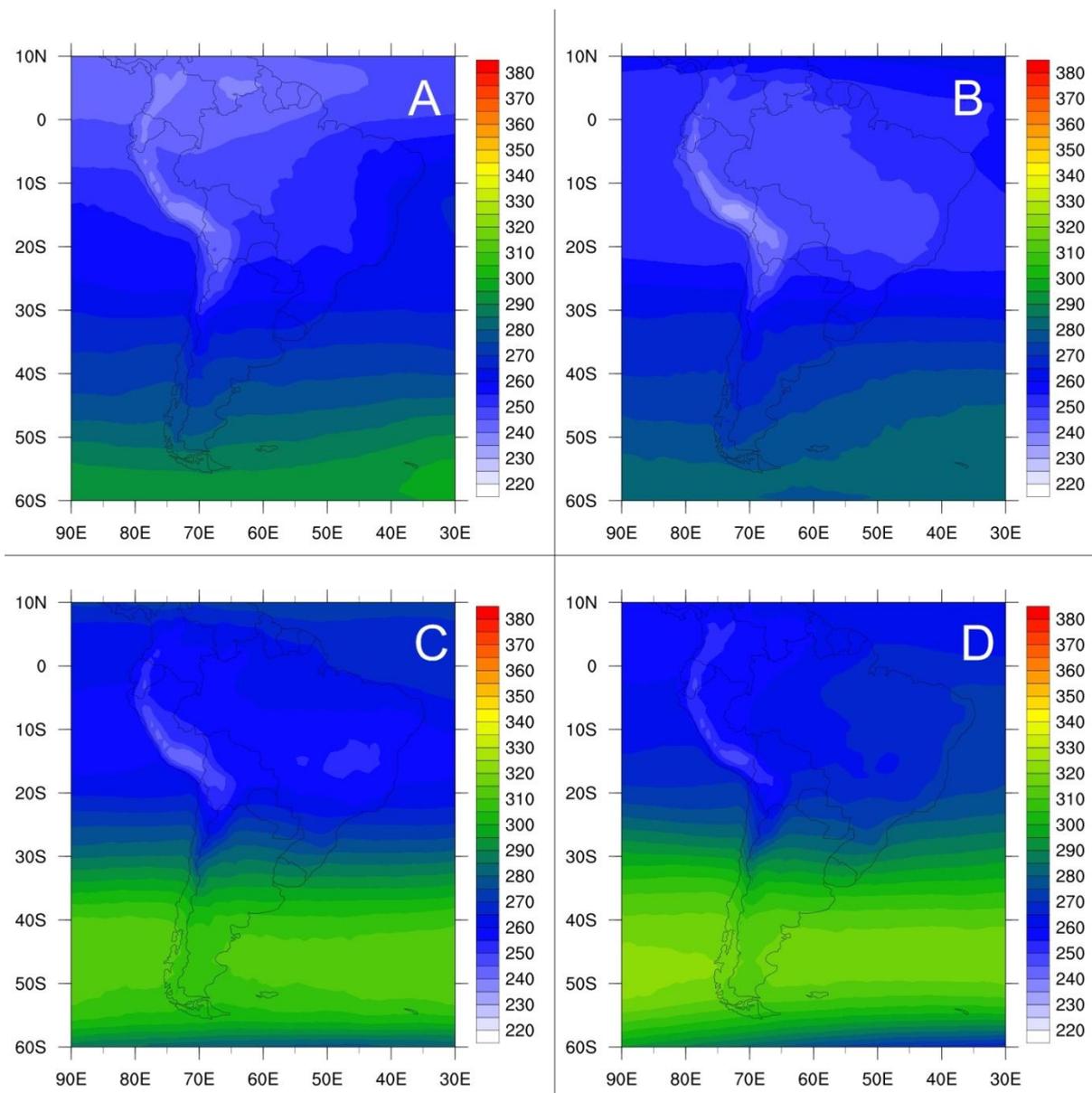


Figura 17 - Média sazonal da Coluna Total de Ozônio em UD, para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014 na região da América do Sul. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON.

4.2 Análises mensais e sazonais da Radiação Ultravioleta (Índice Ultravioleta).

A média mensal do I-UV mostra que os entre os meses de novembro e fevereiro (Figura 18k, 18l, 18a, 18b), considerados meses quentes na América do Sul, temos os valores do I-UV entre 7 e 13 na maioria das regiões, com exceção da região da Cordilheira dos Andes que apresenta certa peculiaridade quanto à predominância de uma atmosfera mais seca, de acordo com o sugerido por

Brasseur e Solomon (1986); Echer et al. (2001), o que facilitaria a penetrabilidade da Radiação Ultravioleta por conta da janela atmosférica mais limpa, pois tanto nuvens quanto poluentes tendem a absorver a energia eletromagnética.

Países como Paraguai, Peru, Bolívia e grande parte do Brasil (até a latitude de 40°S) têm nesses meses (novembro a fevereiro) valores do I-UV entre 10 e 13, o que claramente concorda com os baixos valores de Coluna Total de Ozônio nesse período que ficam em torno de 240 e 270UD, como apresentou Krzýscin (1996) afirmando que a redução de 1% da quantidade de ozônio pode aumentar em até 1,2% a Radiação Ultravioleta.

Nota-se que nos meses ditos frios na América do Sul, entre abril e agosto, há uma diminuição considerável dos valores do I-UV principalmente no intervalo das latitudes 20°S a 60°S. O I-UV apresentou valores entre 2 e 9 unidades nos meses de abril e maio (Figura 19 d, 19e) e nos meses de junho a agosto entre 2 e 5 unidades (Figura 18e, 18f, 18g, 18h). Na costa leste do Nordeste, que possui seu período chuvoso entre abril e julho, existe, portanto, a presença de nebulosidade que afeta também o I-UV. Logo, percebe-se que, quando começam a se elevar os valores da Coluna Total de Ozônio na região, onde também são sentidos os efeitos do ESBOA (entre 20°S e 40°S), há uma queda do I-UV incidente na superfície. Isso ocorre, pois nesse período o Vórtice Polar começa a ganhar força, dificultando a circulação Brewer-Dobson e aprisionando nessa região maiores conteúdos de ozônio produzidos preferencialmente na região tropical.

Nas latitudes inferiores a 20°S nos meses de novembro a fevereiro destaca-se elevados valores para o I-UV podendo chegar a 15 unidades. Meridionalmente, é perceptível o aumento do I-UV no sentido Norte-Sul com a aproximação dos meses mais quentes e ao contrário também se percebe a diminuição dos valores do I-UV na chegada dos meses mais frios.

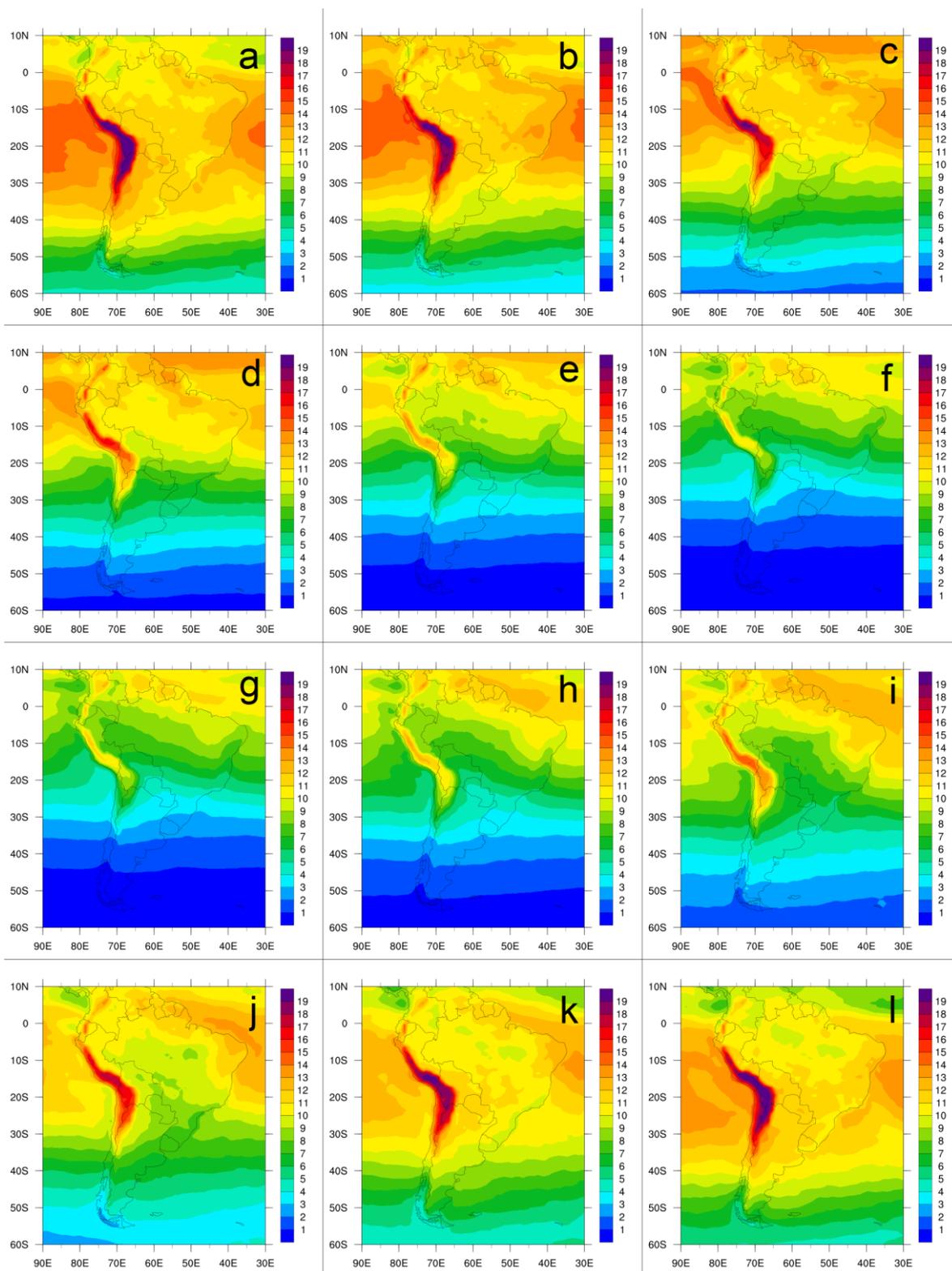


Figura 18 - Média mensal do Índice Ultravioleta (adimensional) para a América do Sul para o decênio entre dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.

Sazonalmente, os campos de Radiação Ultravioleta, em específico as do I-UV, ratificam o que mostra a média mensal da América do Sul, onde nos meses quentes de DJF (Figura19a) os valores se concentram aproximadamente de 7 a 13 unidades, por conta da circulação Brewer-Dobson que atua sem o impedimento do VP. Os dois trimestres seguintes de MAM e JJA (Figura19b, 19c) mostram uma queda brusca na média do Índice Ultravioleta na região de 20°S a 40°S, chegando a registrar média de no máximo 7 unidades. Nas latitudes inferiores a 20°S a média é registrada entre 10 e 13 unidades.

Existe um visual avanço meridional, no sentido norte-sul do I-UV no trimestre SON (Figura 19d), variando entre 7 unidades no trimestre JJA para 12 unidades em algumas regiões da A2 da América do Sul.

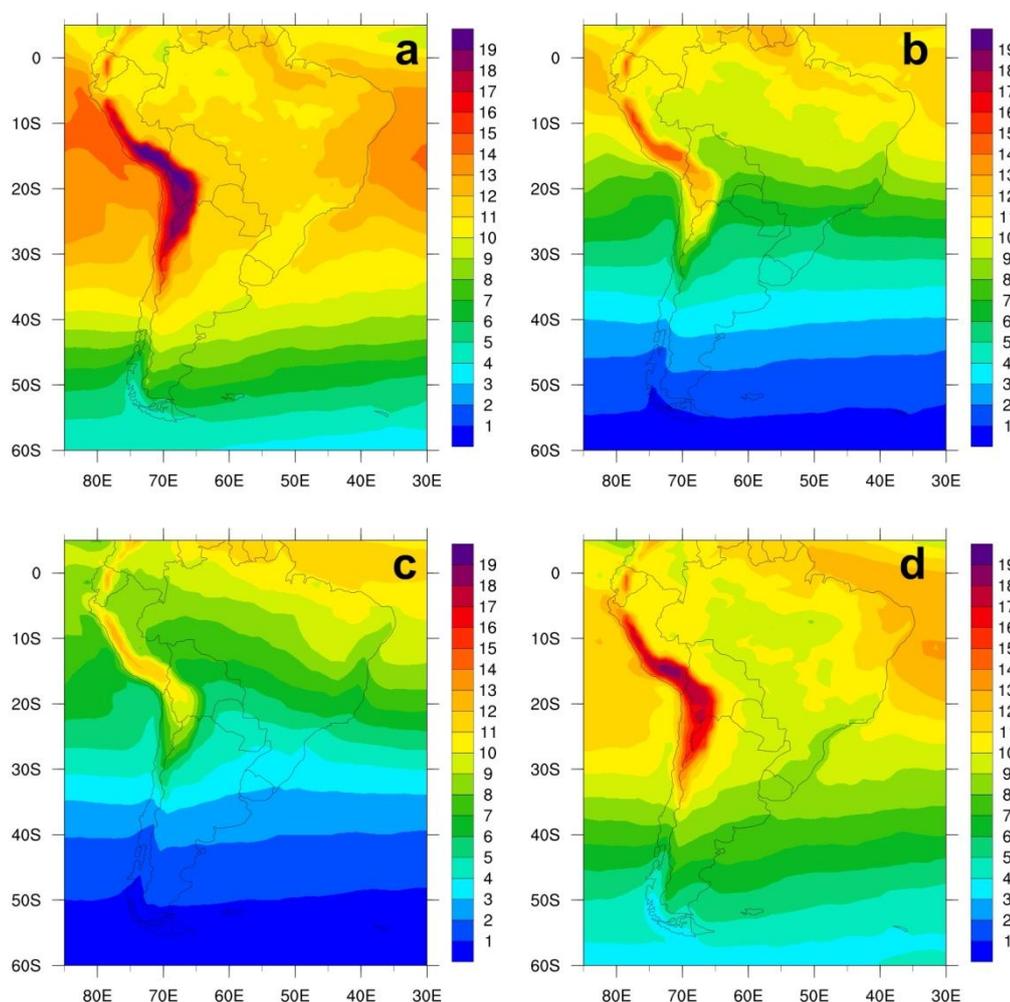


Figura 19 - Média sazonal do Índice Ultravioleta, para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014 na região da América do Sul. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON.

4.3 Correlações entre a coluna total de O₃e o Índice Ultravioleta

Os valores de correlação entre Cinc e o I-UV para as médias mensais do período de dezembro de 2004 e novembro de 2014, não apresentam nenhuma característica específica que possa afirmar influência/dependência entre as variáveis registrando um coeficiente de correlação linear com valores máximos de 0,5 ou 50% (Figura 20). Os valores encontrados, possivelmente, ocorrem devido a influência de outras variáveis como EOA (Espessura Ótica dos Aerossóis), Radiação Global e nebulosidade na alteração do Índice Ultravioleta. A análise da variabilidade anual da UV em relação às variáveis, Coluna Total de Ozônio Inclinada, EOA, nebulosidade e radiação solar global e vento podem indicar a existência sazonal de uma estabilização/redução na UV em superfície podendo ser evidenciados através de uma correlação parcial que envolve mais de duas variáveis.

De acordo com diversos estudos (Kirchhoff et al. 1996; Salgado et al. 2010; Hupfer et al. 2011) sabe-se que o padrão de anticorrelação (correlação inversa) entre Cinc e I-UV seria o normal, entretanto é notória a presença de grandes áreas dentro da A1 com a correlação direta, portanto, o inverso do padrão esperado entre Cinc e I-UV. As variações de variáveis atmosféricas como, por exemplo, radiação solar global, EOA, vento, nebulosidade também possuem a capacidade de influenciar nas observações da RUV existindo a necessidade de uma verificação em conjunto via ACP, como realizado por Lopo et al. (2013). Nos meses de fevereiro, março e setembro (Figura 20b, 20c, 20i), existe a predominância de uma extensa faixa com correlação positiva entre as latitudes de 30°S e 60°S com valores de correlação relativamente fraca entre 0,4 e 0,6 sobre a América do Sul.

Abril, maio e dezembro são os meses em que pode ser observado o padrão esperado de correlação (correlação negativa) entre Cinc e I-UV, principalmente na região do sul da América do Sul (Figura 20d, 20e, 20l). Na região equatorial é registrado um leve aumento na correlação positiva nos meses de julho e agosto (Figura 20g e 20h), meses estes em que há um aprisionamento da Coluna Total de Ozônio na região entre 40°S e 60°S e assim quebrando o padrão da circulação Brewer-Dobson e causando um aumento da CTO na região equatorial da América do Sul, próximo ao nordeste brasileiro (Figura 16g e 16h).

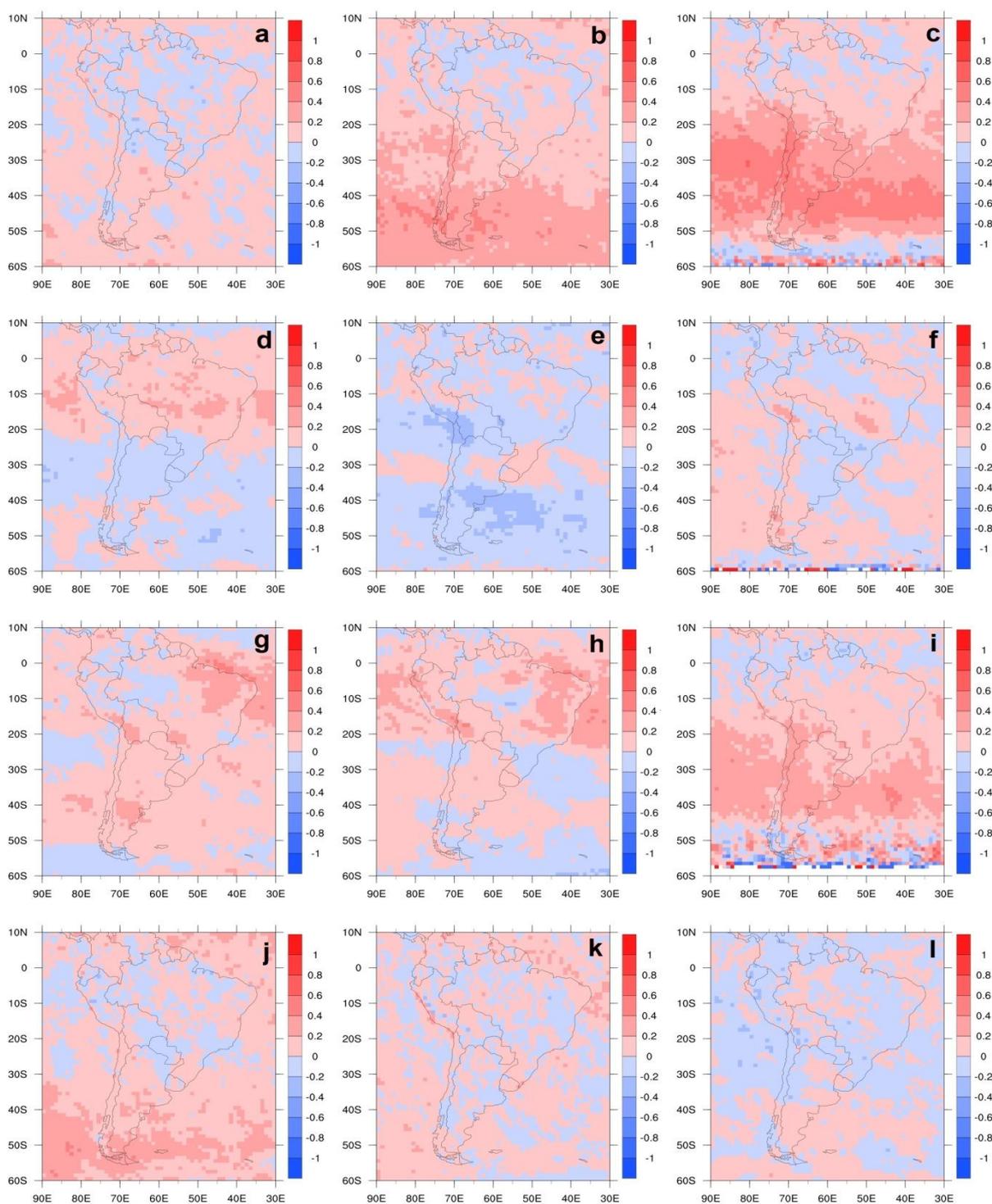


Figura 20 - Correlação mensal entre a coluna inclinada total de ozônio e o índice ultravioleta para a América do Sul para o decênio entre dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.

A dinâmica das médias sazonais é muito semelhante às médias mensais da correlação entre Cinc e o I-UV na região da América do Sul, pois também não apresenta valores que possam evidenciar uma exclusiva dependência/influência de uma variável na outra (Figura 21). No entanto, todos os trimestres apresentaram grandes áreas mais homogêneas que provavelmente tenham casos específicos que comprovem a exclusiva dependência/influência entre as variáveis. A figura 21a, referente ao trimestre DJF, mostra uma grande área com fraca correlação inversa, próximo de 0,2 na área central e norte da América do Sul, e com um leve aumento de 0,4 de correlação em parte do norte e nordeste brasileiro. Semelhante ao que ocorre em DJF, com a América do Sul sendo coberta por uma grande área de correlação inversa, podemos ver na figura 21d, que a área coberta no trimestre JJA é bem maior com relação a DJF, possivelmente por esta época do ano ser caracterizada pela presença de bloqueios atmosféricos como, por exemplo, os do tipo Alta, que não favorecem a formação de nebulosidade na região onde se encontra o bloqueio, contribuindo para a incidência de RUV na superfície. Porém é necessário que em trabalhos futuros haja uma investigação (correlação parcial) onde sejam inseridas no cálculo variáveis como a nebulosidade e EOA, que favorecem para que haja atenuação da RUV.

Praticamente toda a área da América do Sul fica coberta por uma fraca correlação direta nos meses JJA (Figura 21c). A região alongada latitudinalmente sobre a região central da América do Sul, entre 25°S e 5°S com correlação positiva entre Cinc e I-UV (Figura 21b e 21c) coincide com a localização e o período de intensificação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Mesmo que essa correlação seja positiva entre Cinc e I-UV e a que variável Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM) não esteja incluída nesta correlação pode haver alguma influência na efetividade da radiação solar que chega à superfície e conseqüentemente sendo fator determinante para que exista essa grande área dentro desta faixa da América do Sul.

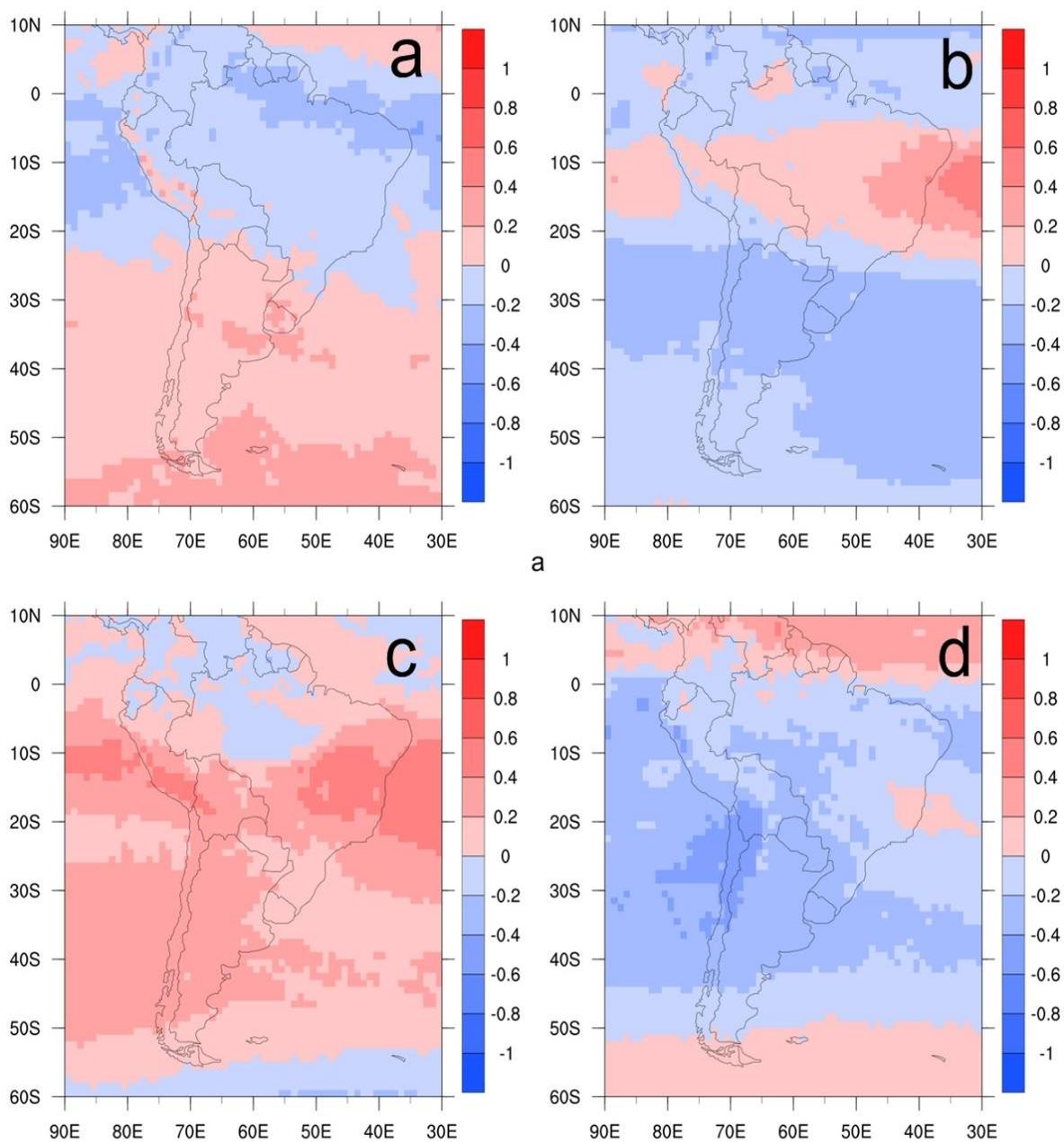


Figura 21 - Correlação sazonal entre a coluna inclinada total de ozônio e o índice ultravioleta, para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014 na região da América do Sul. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON

4.4 Padrões de variabilidade sazonal da Radiação Ultravioleta sobre a região sul do Brasil

O método da ACP gerou novas variáveis chamadas componentes principais, ortogonais (não correlacionadas), seguida das correlações das variáveis e variação captada em cada componente resultante. Os gráficos da representação espacial, das CP possuem apenas a primeira componente principal (EOF1) para os trimestres DJF, MAM, JJA, SON, pois as demais componentes não apresentam valores a serem destacados (DJF: EOF2 2,8% e EOF3 1,7%, MAM: EOF2 1,9% e EOF3 1,0%, JJA: EOF2 6,8% e EOF3 1,2%, SON: EOF2 2,7% e EOF3 1,6%) pra nenhuma região (Apêndice B), e justamente pela falta de representatividade espacial e temporal e também pelo critério de Kaiser adotado, neste trabalho nos retemos apenas a primeira componente principal (Figura 22).

Através da EOF1(Primeira Componente) da Radiação Ultravioleta do tipo DED durante o período de DJF, verifica-se um padrão de variabilidade dos dados de RUV de 87% apresentando contribuições negativas na maioria da área A2, com pouca representação positiva em uma pequena faixa do estado de Minas Gerais (Figura 22a). Para o trimestre MAM é possível observar a contribuição negativa, acumulando 95,5% da variação total dos dados (Figura 22b), o que pode ser explicado tanto no trimestre MAM quanto no trimestre DJF, pois a média de RUV nesses dois trimestres é maior nessa região devido à maior incidência de radiação solar nesses períodos, fazendo com que variabilidade da RUV não seja tão grande.

A variabilidade no trimestre JJA é representada por 86,4% somente na primeira CP (Figura 22c), de acordo com o truncamento de Kaiser obtida com respeito à Dose Eritêmica Diária, com valores de correlação positivos. Existe assim uma correlação forte direta, indicando que durante o período analisado, existe uma concordância de sinais entre as variáveis originais e o primeiro padrão de sequência obtido, onde nota-se essa contribuição devido à neste período do ano a radiação incidente sobre esta região ser menor, possivelmente por conta dos maiores valores observados da variabilidade Coluna Total de Ozônio (Figura 17c), que tem como função bloquear a passagem da Radiação Ultravioleta. O trimestre SON (Figura 22d) semelhante ao trimestre JJA apresenta contribuição positiva na primeira

componente principal com mais de 90% da variabilidade dos dados, isso pode estar relacionado com as quedas de Coluna Total de Ozônio que nesta época do ano ocorrem provenientes dos ESBOA na região sul da América do Sul, assim aumentando a variabilidade da RUV.

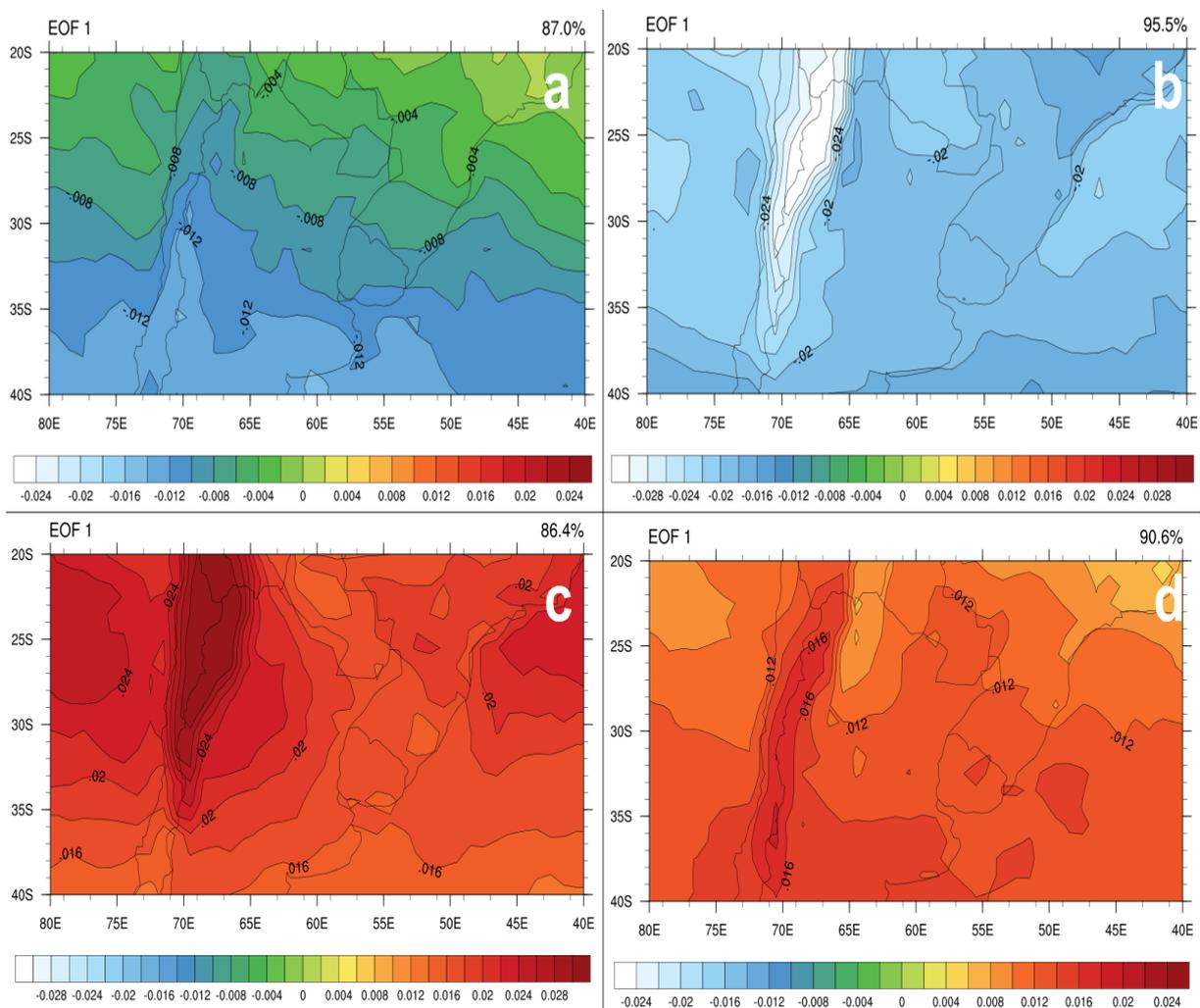


Figura 22- Distribuição espacial sazonal da primeira CP de Dose Eritêmica Diária para a região sul da América do Sul para os quatro trimestres. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

As variações da Radiação Ultravioleta observadas no sul da América do Sul mostram influências sazonais. Sabe-se que as variações de algumas variáveis atmosféricas como, por exemplo, radiação solar global, EOA, vento, nebulosidade e Coluna Total de Ozônio possuem a capacidade de influenciar nas observações da RUV. Assim, procurou-se em um primeiro momento verificar a resposta que a variável Coluna Total de Ozônio dará de representatividade as variações sazonais

da RUV através da distribuição espacial de suas anomalias.

Para isto, foi calculada a regressão linear simples entre a primeira componente principal (PC1 ou EOF1) da EOF da Dose Eritêmica Diária vs. as médias da Coluna Total de Ozônio na região do sul da América do Sul.

A regressão linear entre a PC1 e a Coluna Total de Ozônio (CTO) para o trimestre DJF (Figura 23a) mostra um padrão semelhante ao da média da RUV (Figura 19a), com coeficiente de correlação positivo em toda região da A2, devido à maior incidência de radiação solar nesse período, com o coeficiente de correlação com valores acima de 0,6 no sul do Uruguai e Rio Grande do Sul, chegando a 0,8 na região do sudeste e centro da Argentina. Os trimestres MAM (Figura 23b) e JJA (Figura 23c) mostram uma menor influência da Coluna Total de Ozônio na RUV em relação à observada no trimestre DJF, tendo no trimestre JJA uma maior dependência ($>0,7$) da CTO em relação à RUV na região da Cordilheira dos Andes, por conta de fatores orográficos.

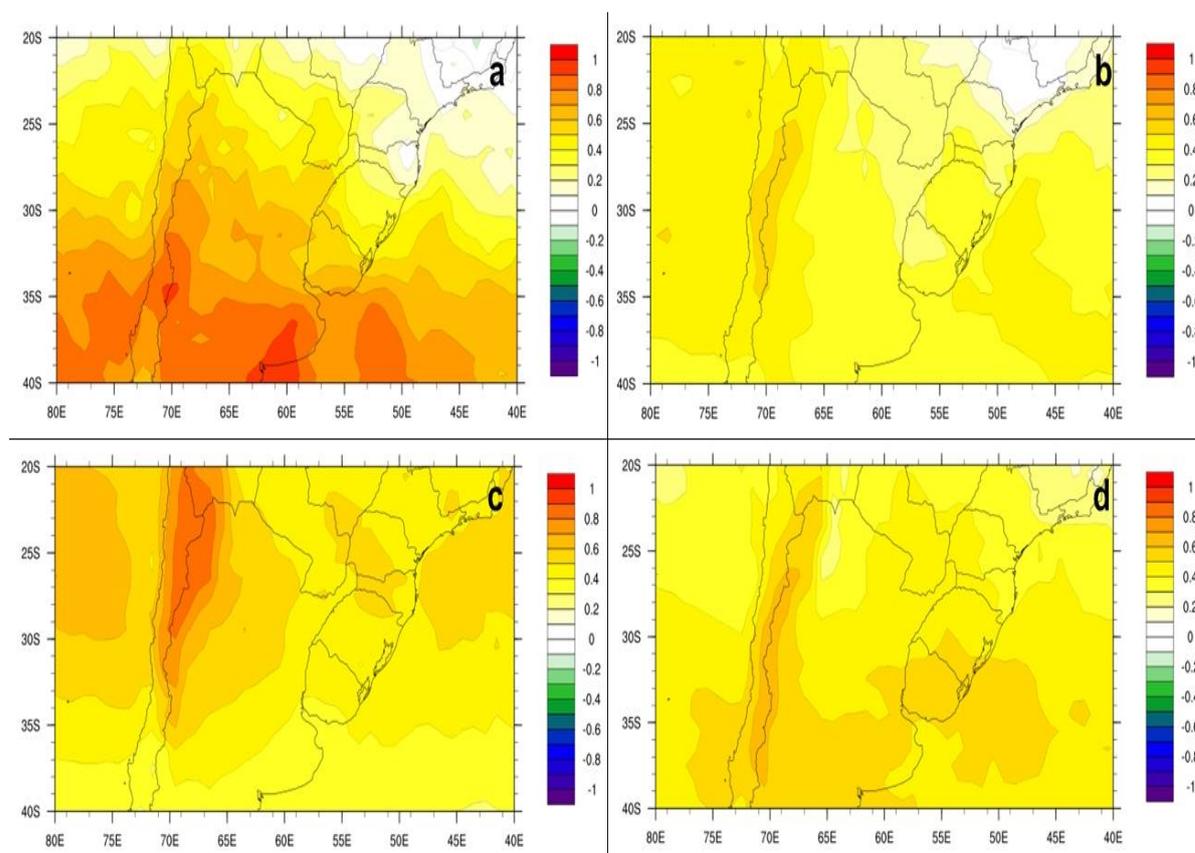


Figura 23- Regressão linear simples entre a PC1 da EOF da Dose Eritêmica Diária na região sul da América do Sul e anomalia da Coluna Total de Ozônio para os quatro trimestres. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

4.4.1 Análise dos casos de decaimento da Coluna Total de Ozônio e relação com a Radiação Ultravioleta

Ao analisarmos os casos de decaimento significativo da Coluna Total de Ozônio (CTO), proposto por Schmalfluss (2014) presentes no anexo A, foi possível observar uma baixa correlação entre as duas variáveis (CTO e RUV), aproximadamente 36%, quando o esperado era que se obtivessem maiores valores de correlação por conta dos valores expressivos encontrados em alguns eventos com cerca de 21% de decaimento da CTO. Entretanto, como já abordado em capítulos anteriores, existe a possibilidade de outras variáveis, como por exemplo, nebulosidade, vapor d'água e EOA estarem parcialmente correlacionados com estes casos.

Os gráficos obtidos através da regressão linear simples entre a CTO e RUV esclarecem a baixa correlação entre as variáveis mostrando a sua relação na dispersão O_3 vs. RUV com uma grande espessura da nuvem de dados em torno da reta de regressão linear (linha vermelha), ou seja, baixa homoscedasticidade perante o modelo regredido (Figura 24a). As figuras 24b e 24c representam respectivamente as dispersões entre os resíduos da regressão vs. a CTO e a resíduos da regressão vs. RUV, onde a linha contínua preta representa o zero, assim quando a nuvem de dados está mais distante desta linha preta comprova-se que não existe muita relação entre as duas variáveis para os eventos analisados pois os valores não tendem a se aproximar de zero, o que seria o ideal. A dispersão em função de resíduos vs. Tempo, na figura 24d também mostra que não há nenhuma relação em função do tempo, ou seja, todos estes casos de decaimento da coluna total de O_3 estão ligados a alguma outra variável que não permite que sejam registrados altos valores de RUV na superfície. Analisando a tabela do Anexo A, nota-se que foi selecionado um dos casos mais significantes de decaimento de CTO em cada um dos meses do ano na América do Sul, assim estima-se que a variável EOA (Espessura Ótica da Atmosfera) não seja a principal atenuadora da RUV, pois de acordo com Recuero (2004); Oliveira (2013) o período de maiores concentrações de EOA na região sul do Brasil se dá entre os meses de julho a outubro, o que previamente faz descartarmos a hipótese de que a EOA seja a principal atenuadora

da RUV. Porém cabe ressaltar que é necessária uma investigação que envolva mais variáveis para se descobrir qual é a maior influenciadora nos altos valores de RUV. O teste t mostrou que a um nível de significância $\alpha = 0,05$, ao aceitarmos a hipótese nula a partir do $t_{\text{crítico}} = 1,699$ sendo maior que o $t_{\text{calculado}} = 1,216$ os grupo tem pouca ou nenhuma relação.

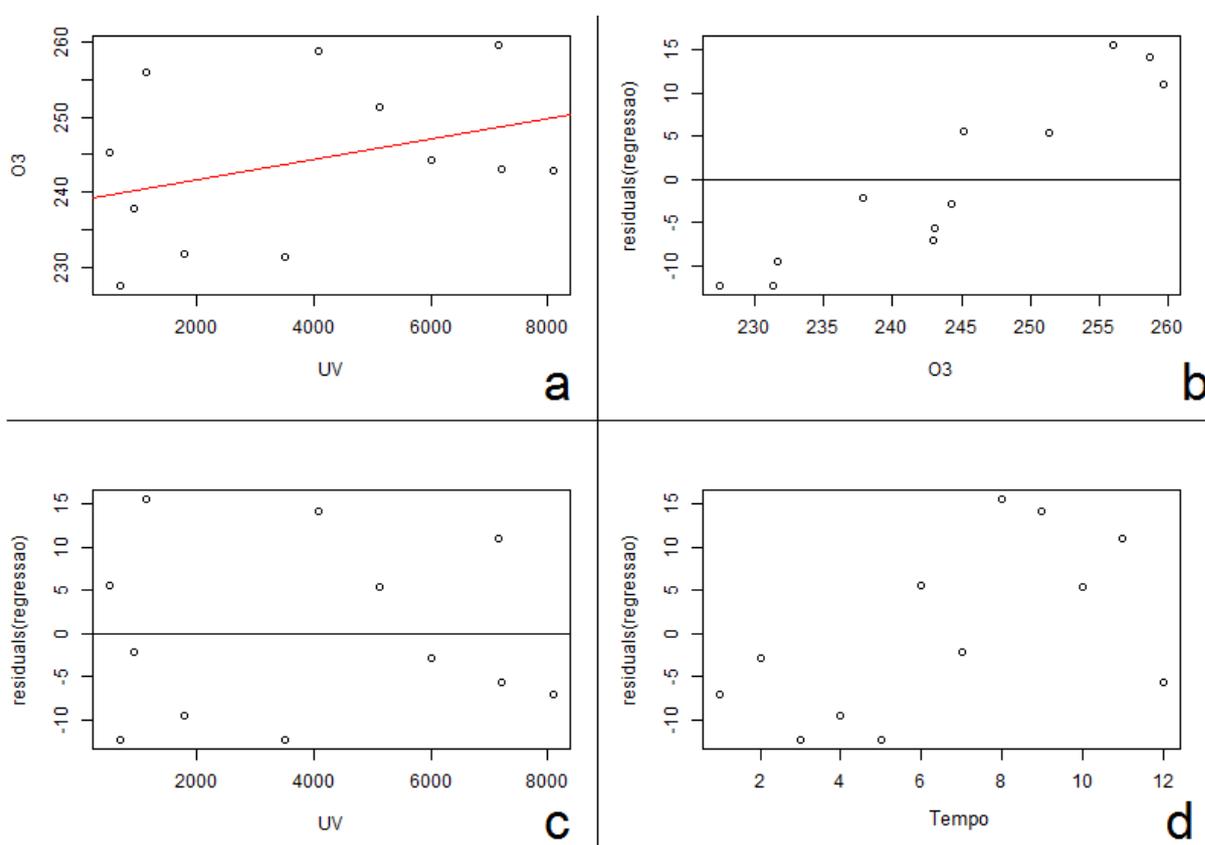


Figura 24 - Representação gráfica da regressão linear simples entre Coluna Total de Ozônio e Radiação Ultravioleta do tipo DED para os casos com redução significativa dos conteúdos de Ozônio na região do sul da América do Sul selecionados a partir de Schmalfuss (2014). (a) Dispersão entre O₃ e RUV mais reta de regressão linear simples, (b) Dispersão resíduos vs. O₃, (c) Dispersão resíduos vs. RUV e (d) Dispersão resíduos vs. Tempo.

A análise da variância dos dados de CTO e RUV presentes na tabela ANOVA (Tab. 3), confirma que esta relação entre as variáveis nestes casos descritos por Schmalfuss (2014) não existe, pois para ser aceitável teríamos valores de SQTotal e SQReg próximos quando o esperado seria estarem distantes (Wilks, 2006), o que não ocorre neste caso, tendo assim SQRes muito próximo do SQTotal.

As três medidas de ajuste comprovam a baixa relação entre os dados, pois tanto os valores de $R^2 = 13\%$, $F = 1,48$ de acordo com Wilks (2006), quanto maior este F melhor é a relação entre as variáveis e o $MSE = 7653003$, assim não sendo a ideal. O R^2 serve para ajustar o modelo estatístico com a regressão. Entretanto o valor obtido nestes casos foi de $R^2 = 0,128$ aproximadamente 13% mostrando pouquíssima relação entre as variáveis CTO e RUV para estes eventos. Como o MSE pode ser utilizado como estimativa de previsão (um estimador é usado para deduzir o valor de um parâmetro desconhecido em um modelo estatístico), sua variação mínima traria uma boa estimativa. Para isto ocorrer o valor perfeito seria $MSE = 0$, mas para a análise dos casos propostos por Schmalfluss (2014) esta situação seria quase impossível.

Uma relação linear perfeita entre os grupos de dados seria se os pares de dados coincidissem com a reta de regressão linear, assim os resíduos seriam iguais a zero e a variação da distribuição residual também igual a zero.

Foi feita uma breve análise observacional da imagem de satélite colorida do GOES-10 sempre entre os horários 13h e 15h para que se pudesse mensurar a possibilidade da influência de nebulosidade em cada um dos casos vistos na tabela 4 (Anexo A), visto que a nebulosidade é um meio atenuador da RUV e este período do dia entre 13h e 15h é o período de maior intensidade do fluxo de radiação solar. Foi possível identificar que em apenas 16% destes casos não há verificação de nebulosidade sobre o ponto analisado presente no anexo B, onde apenas os casos de 11 de outubro de 2005 (pixel selecionado próximo a cidade de Concórdia na Argentina - $31,5^\circ\text{S}$ e $58,5^\circ\text{W}$) e o caso de 30 de novembro de 2006 (Anexo B figura k), (pixel selecionado para novembro fica localizado sobre a cidade de Mendoza – Argentina - $33,5^\circ\text{S}$ e $68,5^\circ\text{W}$) não é verificada a presença de nebulosidade sobre a região analisada. Nos demais casos (aproximadamente 86% do total) é observado a presença de uma banda de nebulosidade considerável para que houvesse a atenuação da Radiação Ultravioleta assim bloqueando em parte a incidência da mesma.

Tabela 3 - Representação da Tabela ANOVA para os casos selecionados por Schmalfuss (2014)

	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F
Regressão	1	11326978	11326978	1.48007
Resíduos	10	76530032	7653003	
Total	11	87857010	7987001	

4.4.2 Variações anômalas sazonais de Radiação Ultravioleta no sul do Brasil

Nas análises da Radiação Ultravioleta do tipo DED para os trimestres DJF, MAM, JJA, SON, foi observado o comportamento das anomalias padronizadas de RUV entre o decênio de dezembro de 2004 a novembro de 2014 na região Sul do Brasil.

Para o trimestre de DJF, período este em que o fluxo de radiação na região sul do Brasil é maior por conta da posição solar, presume-se que a incidência de radiação na superfície seja mais elevada com relação a outros períodos do ano. Na maior parte da região sul do Brasil os três primeiros anos ficaram caracterizados por anomalias positivas (Figura 25a, 25b, 25c), aonde no DJF do primeiro ano 2004-2005 as anomalias positivas chegaram a registrar aproximadamente 2,5 desvios padrões sobre o estado do Rio Grande do Sul, o que caracteriza forte variação positiva com relação à média do período entre 2004 e 2014. Os trimestres DJF dos anos mostrados na figura 25d, 25e, 25f, 25h e 25j, tiveram poucas variações com relação ao decênio não sendo marcante a variabilidade dos níveis de incidência da RUV na região sul, o mesmo ocorrendo com os trimestres do ano 2013, entretanto, toda a região sul do Brasil é apresentada com anomalias negativas (em torno de 1,0 desvios padrões). O trimestre mais significativo com relação a anomalias negativas foi registrado em 2011, registrando até 3,0 desvios padrões no norte do Rio Grande do Sul (RS) e ao sul do estado do Paraná (PR). Possivelmente registraram-se essas anomalias negativas com desvios padrões consideravelmente significativos por conta de variáveis como nebulosidade e vapor d'água que podem agir como atenuadores da RUV incidente na superfície.

Assim como ocorrido no trimestre DJF o trimestre MAM apresentou anomalias positivas nos dois primeiros anos 2005 e 2006 (Figura 26a e 26b respectivamente). Quanto ao observado nestes dois anos citados anteriormente, percebe-se valores entre 2,0 e 2,5 desvios padrões na região sul do Brasil. Em 2005 os valores mais elevados de desvio padrão ocorrem mais ao sul do Rio Grande do Sul e em praticamente todo o território paranaense, já no ano seguinte os valores mais significativos de anomalias positivas (em torno de 2,0 desvios padrões) estão mais a Oeste do RS com a maioria da região sul do Brasil tendo em torno de 1,5 desvios. No trimestre MAM os anos de 2007, 2008, 2009, 2011, 2012 e 2013 apresentam preferencialmente anomalias negativas sem torno da neutralidade e de 1,0 desvios padrões (Figura 26c, 26d, 26e, 26g, 26h, 26i). Os anos de 2010 e 2014 apresentaram anomalias negativas na maioria da região sul do Brasil registrando até 2,0 desvios padrões, tendo em 2010 estes casos identificados entre a região nordeste do RS e em 2014 estas anomalias positivas de 2,0 desvios na região sudoeste do RS.

O trimestre JJA é caracterizado por ser o período de menor fluxo de radiação solar na região sul do Brasil devido ao período de inverno do Hemisfério Sul, conseqüentemente os índices de RUV são mais baixos nessa região (apresentados na figura 19c). Nos anos 2005, 2007 e 2009 representados pela figura 27a, 27c, 27e, há uma predominância de anomalias positivas na média trimestral, onde a maior variação de RUV incidente na superfície ocorre no estado do RS podendo chegar a 2,5 desvios padrões. Na maioria dos anos analisados, a presença de anomalias positivas fracas (entre zero e 1,0 desvio padrões) se faz presente, deixando a região sul com baixa variação nos níveis de RUV beirando a neutralidade nestes casos (Figura 27b, 27d, 27f, 27h, 27i e 27j), podendo este fato ser atribuído aos níveis de ozônio mais elevados nessa época do ano, com relação aos trimestres como DJF, MAM.

O trimestre referente aos meses Setembro, Outubro e Novembro (SON), climatologicamente, apresenta características bem peculiares com relação aos outros trimestres, por se tratar de um período de transição tanto nos fluxos de radiação solar, influenciando nos padrões atmosféricos em geral (Wallace; Hobbs, 2006; Grimm, 2009; Schmalfluss, 2014) além de variabilidade, por exemplo, da

Coluna Total de Ozônio, transporte de aerossóis de queimadas, nebulosidade etc. A figura 28, mostra que para este período não é possível observar um padrão específico de anomalias positivas ou negativas na maioria dos anos para esta região, com exceção ao ano de 2005 (Figura 28a), que se apresenta um ano atípico para o trimestre SON registrando mais de 2,0 desvios padrões no norte do estado do RS e podendo chegar 3,0 desvios padrões na faixa leste do estado do Paraná.

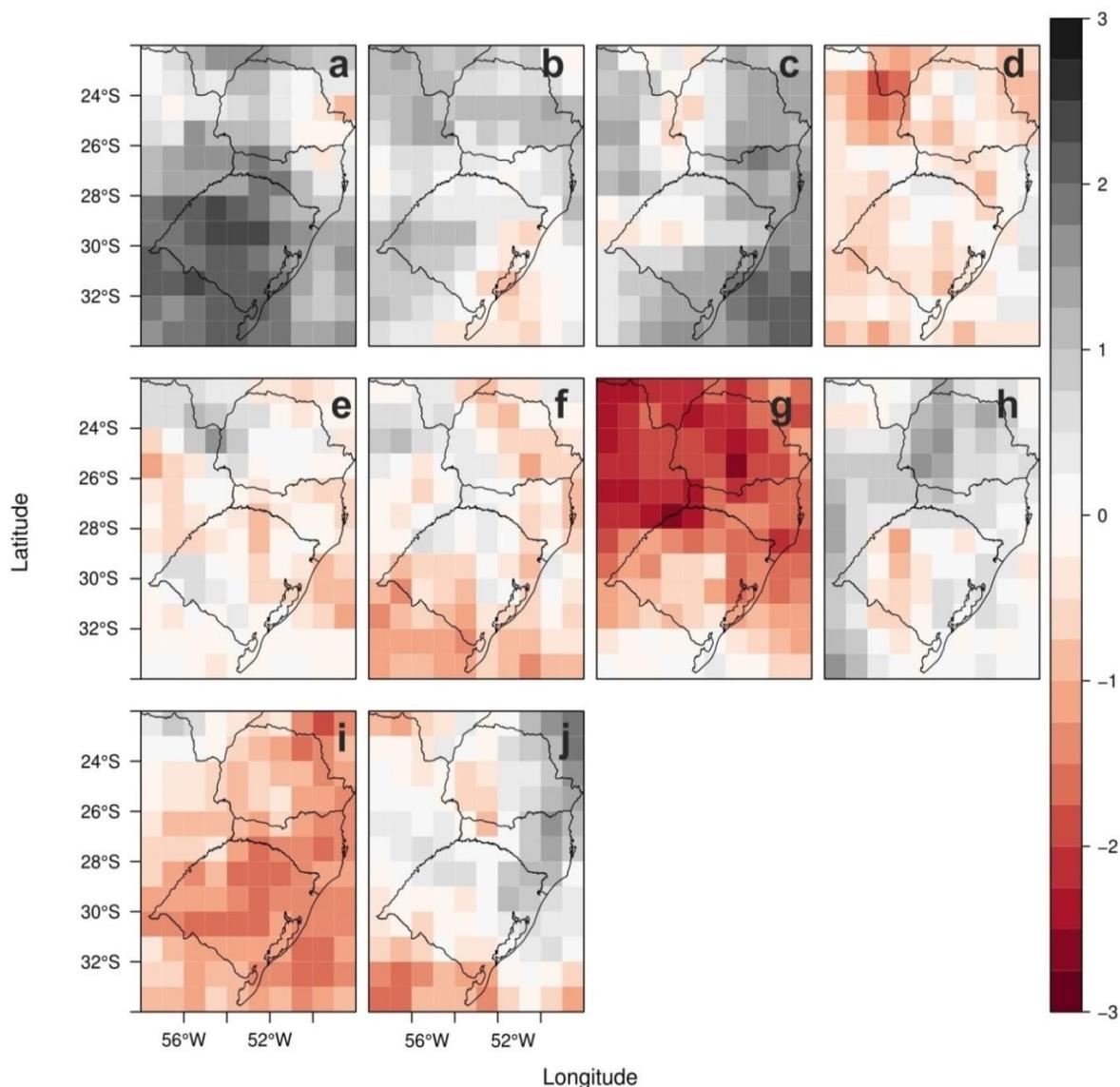


Figura 25 - Anomalia padronizada do trimestre DJF para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) 2004-2005, (b) 2005-2006, (c) 2006-2007, (d) 2007-2008, (e) 2008-2009, (f) 2009-2010, (g) 2010-2011, (h) 2011-2012, (i) 2012-2013, (j) 2013-2014.

Existe a possibilidade que o trimestre SON seja na maioria dos anos mais

neutro, por conta da influência direta de variáveis já citadas como, por exemplo, transporte de aerossóis de queimada da região amazônica para a região sul do Brasil (Recuero, 2004), o aumento da Coluna Total de Ozônio por conta do enfraquecimento do Vórtice Polar (André, 2003) e a presença de vapor d'água transportado através do Jato de Baixos Níveis (JBN), sendo todos estes atenuadores da RUV incidente na superfície. Contudo, é notória a variabilidade anual nas anomalias de RUV em ambos os trimestres, entretanto não é possível afirmar qual variável é a regente nos padrões anômalos.

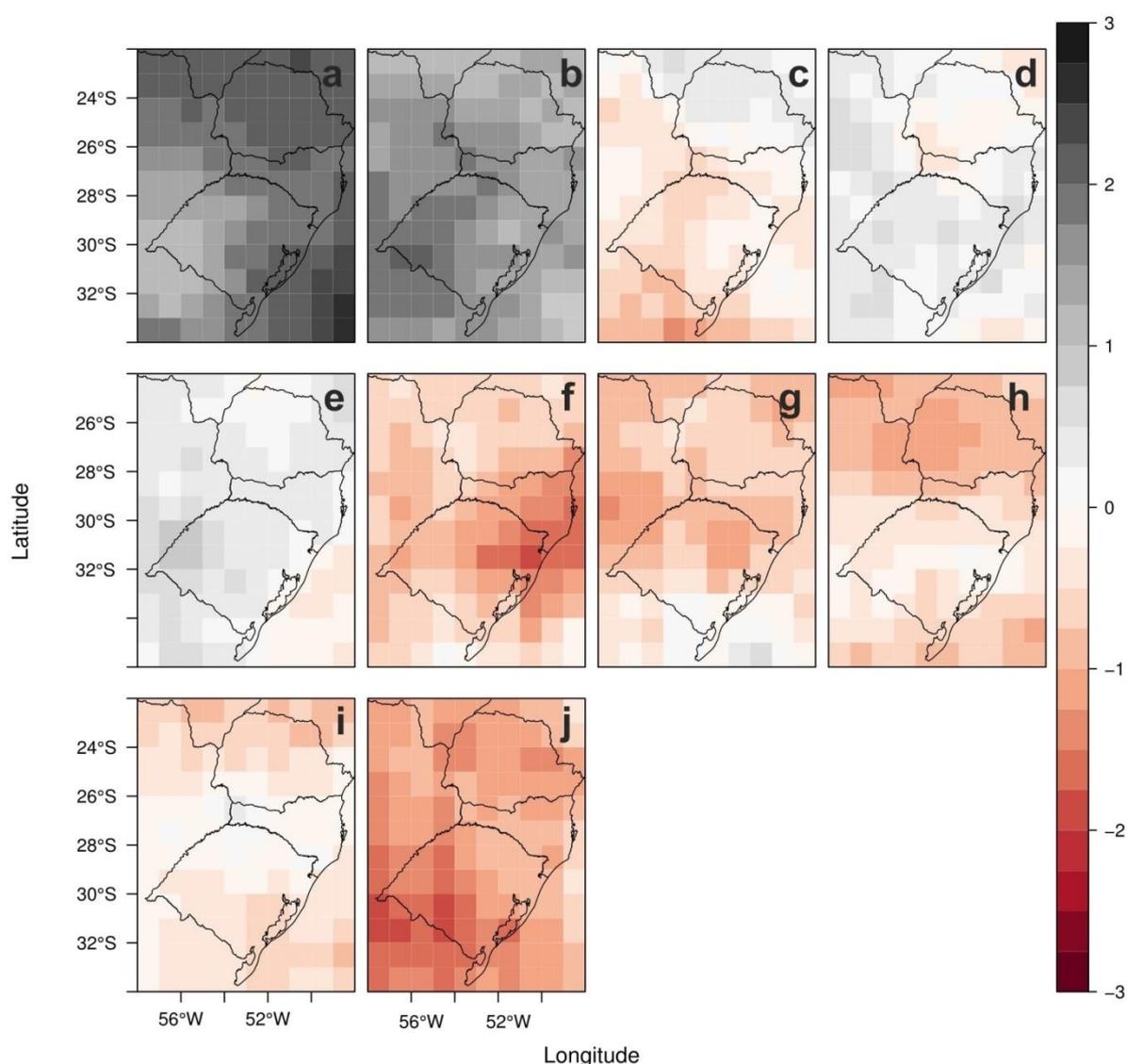


Figura 26 - Anomalia padronizada do trimestre MAM para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) 2005, (b) 2006, (c) 2007, (d) 2008, (e) 2009, (f) 2010, (g) 2011, (h) 2012, (i) 2013, (j) 2014.

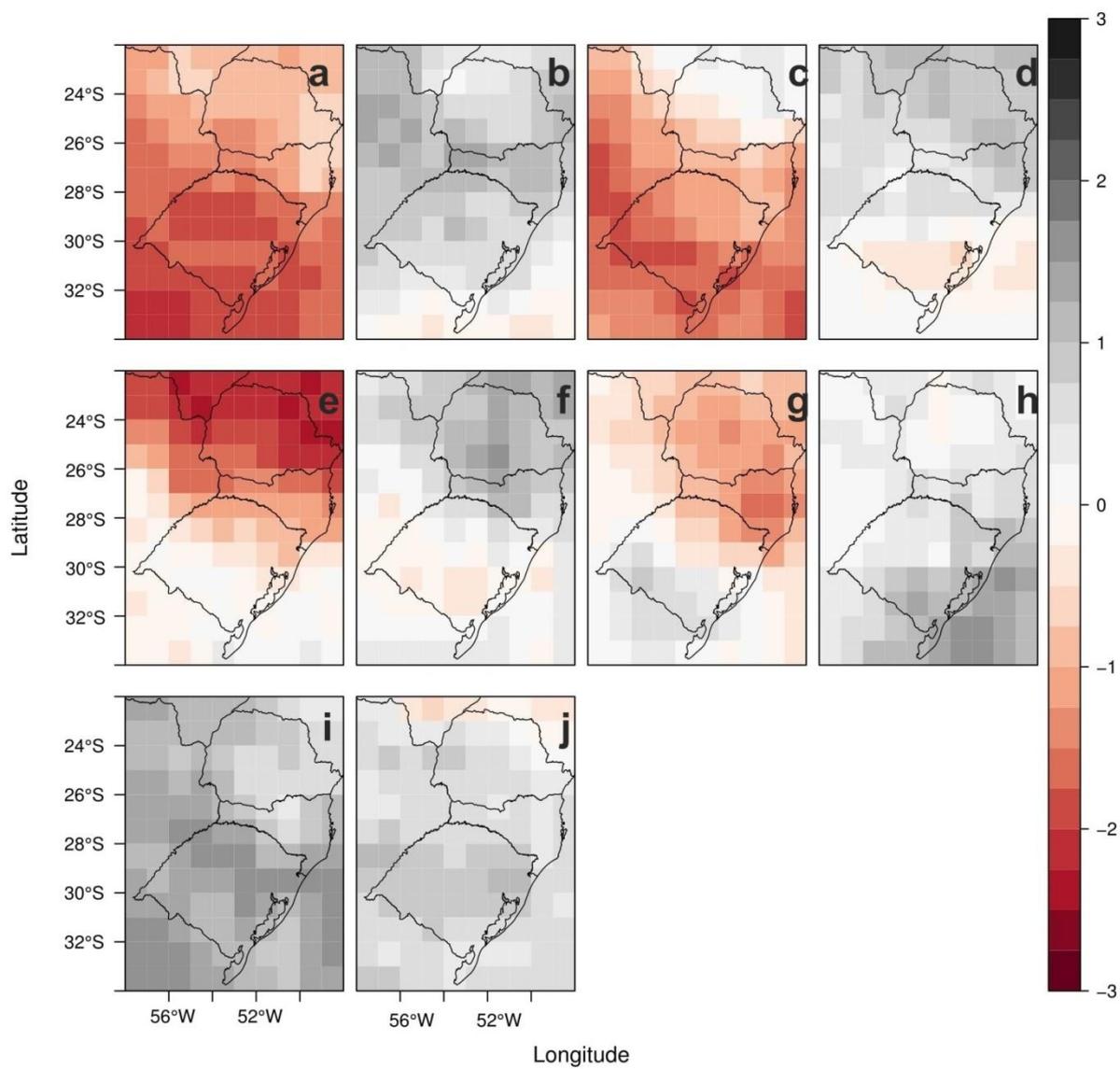


Figura 27 - Anomalia padronizada do trimestre JJA para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) 2005, (b) 2006, (c) 2007, (d) 2008, (e) 2009, (f) 2010, (g) 2011, (h) 2012, (i) 2013, (j) 2014.

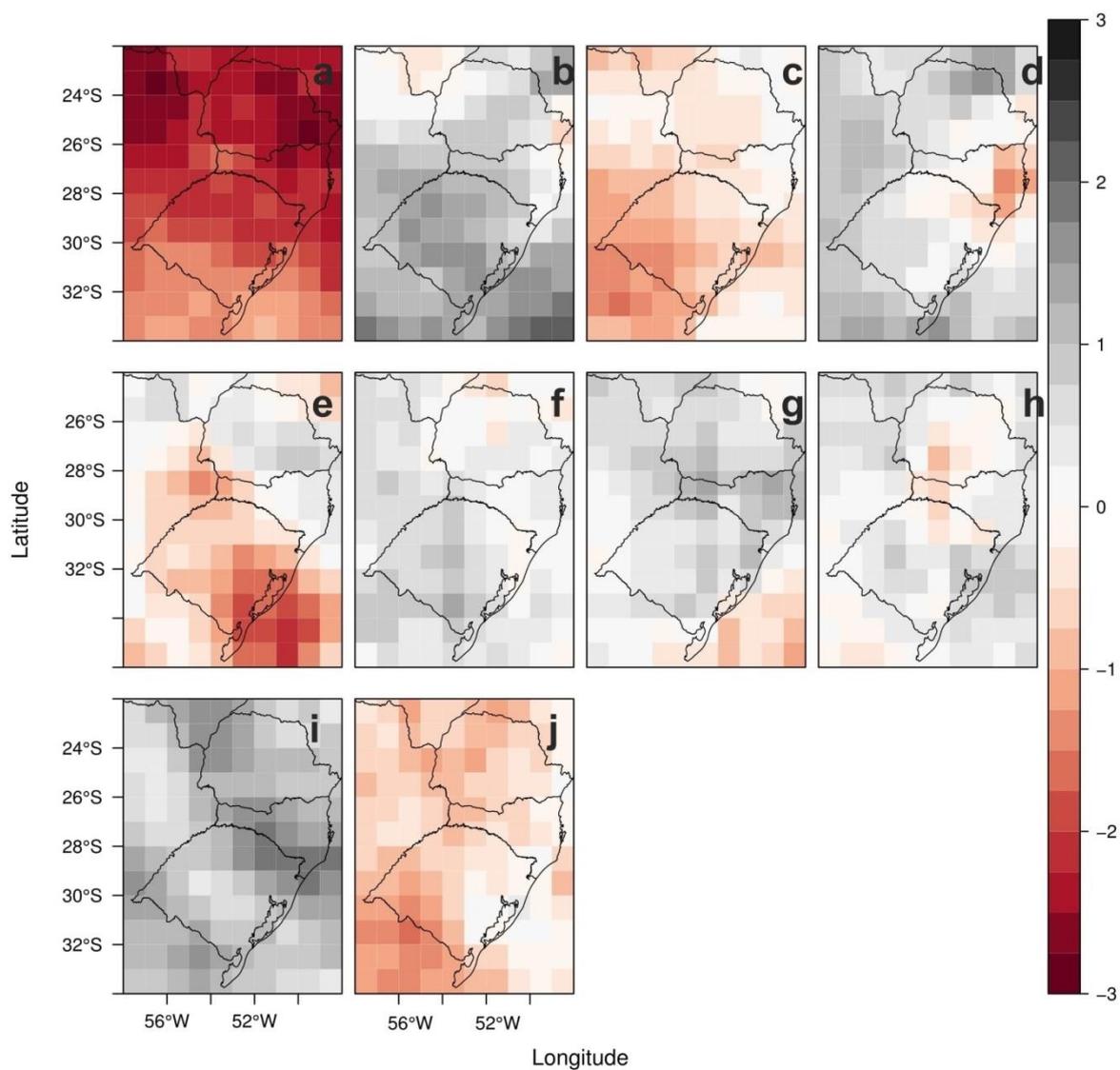


Figura 28 - Anomalia padronizada do trimestre SON para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) 2005, (b) 2006, (c) 2007, (d) 2008, (e) 2009, (f) 2010, (g) 2011, (h) 2012, (i) 2013, (j) 2014.

4.4.3 Comportamento dos casos extremos de Radiação Ultravioleta incidente na superfície no sul do Brasil

A partir do conhecimento da variabilidade da RUV analisou-se os pontos de grade com seus altos valores, através do percentil 95% (P95). Mensalmente é possível observar os valores mais elevados do P95 nos meses mais quentes, que englobam os meses de outubro a março (Figura 29a, 29b, 29c, 29j, 29k e 29l), variando entre os valores 6500 J/m² (Joules por metro quadrado) e 8000 J/m². Durante o período dos meses ditos frios, nota-se uma queda nos valores do P95, chegando a valores abaixo de 2000 J/m² no extremo sul do Brasil observados na figura 29e, 29f e 29g, concordando com o ciclo anual solar. Os meses de agosto e setembro (29h e 29i respectivamente) mostram essa oscilação anual dos níveis de radiação tendo metade norte da região sul do Brasil valores maiores do P95 com relação à parte mais ao sul, indicando maior variabilidade meridional para latitudes maiores que 23S.

A sazonalidade do P95 corrobora com a afirmação do parágrafo anterior, que mostra o ciclo anual solar através da variabilidade da Dose Eritêmica Diária entre meses quentes, frios e de transição. Os valores mais elevados do Percentil 95 são identificados no trimestre DJF (Figura 30a) chegando a uma média de 6000 J/m² em toda a região sul do Brasil, seguido pelo trimestre SON com média do P95 entre 4.500 e 5000 J/m² (Figura 30d) tendo a faixa litorânea com menores valores do P95, provavelmente devido a nebulosidade causada pelos efeitos de brisa marítima. Já nos trimestres considerados frios, MAM e JJA (Figura 30b e 30c respectivamente), os valores não ultrapassam 3000 J/m² em toda a região sul do Brasil, exceto no norte do estado do Paraná que ainda sofre a influência dos meses de março onde as taxas de RUV incidentes na superfície são maiores que em abril e maio próximo a latitude de 23°S.

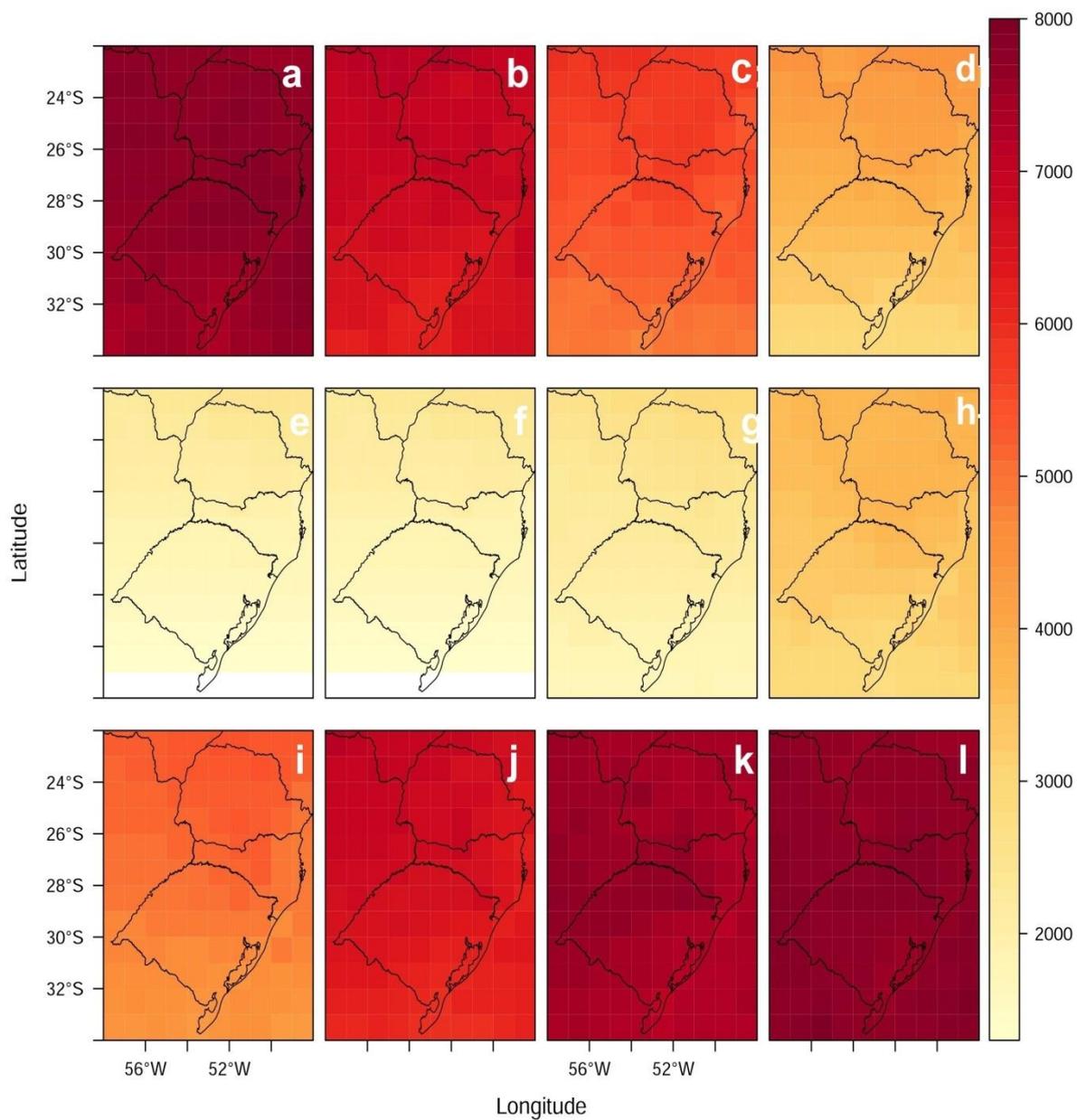


Figura 29 – Campos mensais do Percentil 95% (P95) de Radiação Ultravioleta (DED) em J/m^2 , para a região sul do Brasil no período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.

Os casos extremos, ou seja, valores acima que o P95, foi contabilizado para cada ponto de grade, ou seja, fez-se o somatório da quantidade de casos maiores ou iguais ao valor do percentil em cada ponto para cada mês. Como cada mês possui trinta (ou trinta e um) dias, ao final do período de 2004 a 2014 teríamos 300 (ou 310) observações dependendo de cada mês, salvo os meses de fevereiro com aproximadamente 280 observações em cada ponto. Ao determinarmos o P95, aproximadamente 15 (quinze) destes registros seriam maiores ao percentil, resultando em 5% dos casos. Os pontos maiores a 15 observações estão sombreados.

Os meses de fevereiro, abril, junho, agosto, setembro e novembro (Figura 31b, 31d, 31f, 31h, 31i e 31k), apresentam na maior parte da região analisada, valores abaixo do limiar de 5% (ou 15 casos), com muitos desses pontos fora dos limites geográficos da região sul do Brasil.

Claramente, os meses de janeiro e dezembro são os que apresentam maiores registros de casos acima do P95 (Figura 31a e 31l) por conta da maior incidência de RUV na superfície nessa época do ano. Os meses de outubro também apresentaram grande densidade de casos acima do P95 na região sul do Brasil como mostra a figura 30j. Uma hipótese a ser investigada para a ocorrência desta grande quantidade de casos acima do P95 pode ser em função de desprendimentos de filamentos de massas de ar com baixos conteúdos de O_3 provenientes do enfraquecimento do Vórtice Polar nesta época do ano, assim reduzindo a Coluna Total de Ozônio e favorecendo a incidência de RUV na superfície.

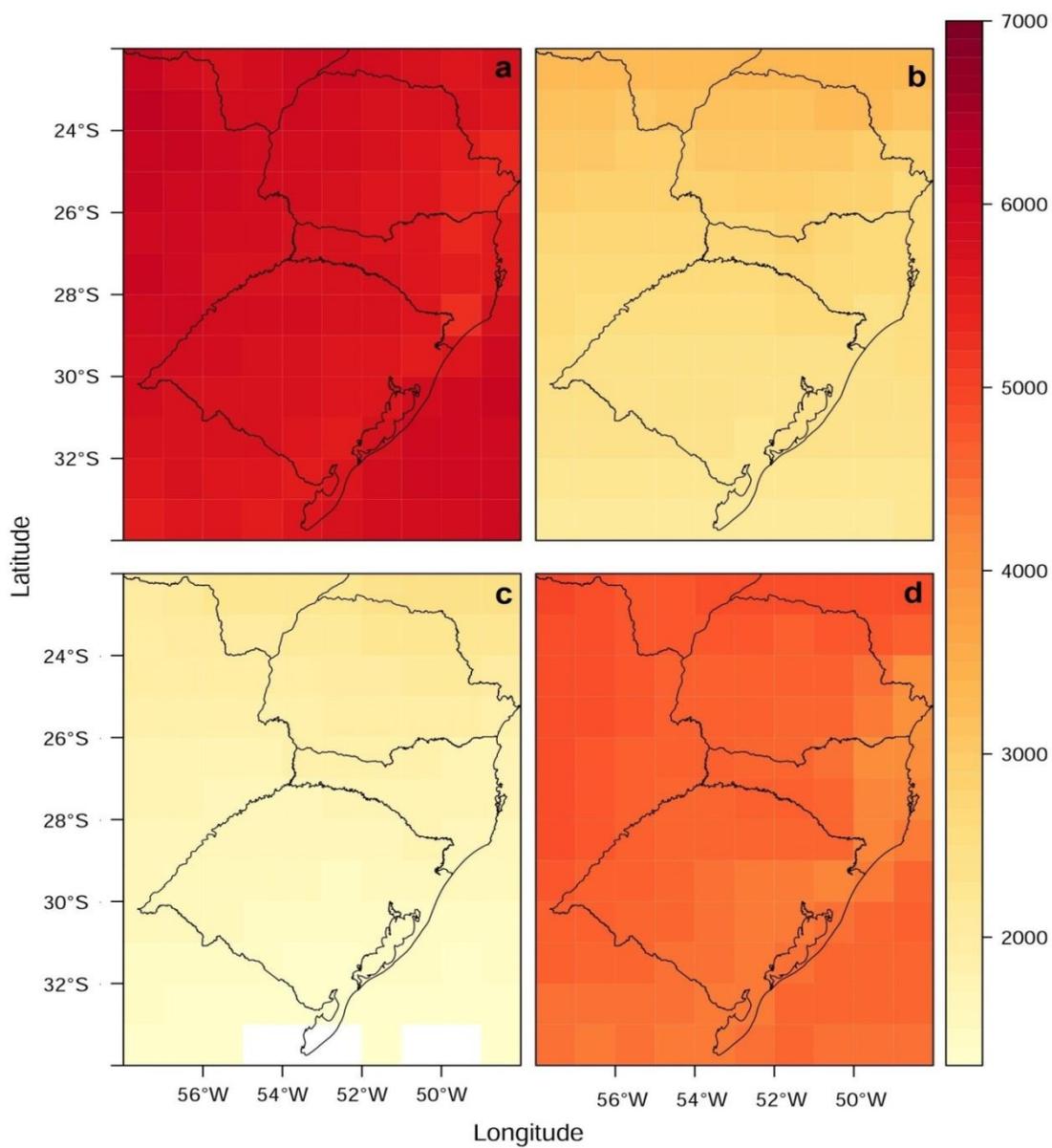


Figura 30 - Variabilidade Sazonal do Percentil 95% (P95) de Radiação Ultravioleta (DED) em J/m^2 , para a região sul do Brasil no período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON.

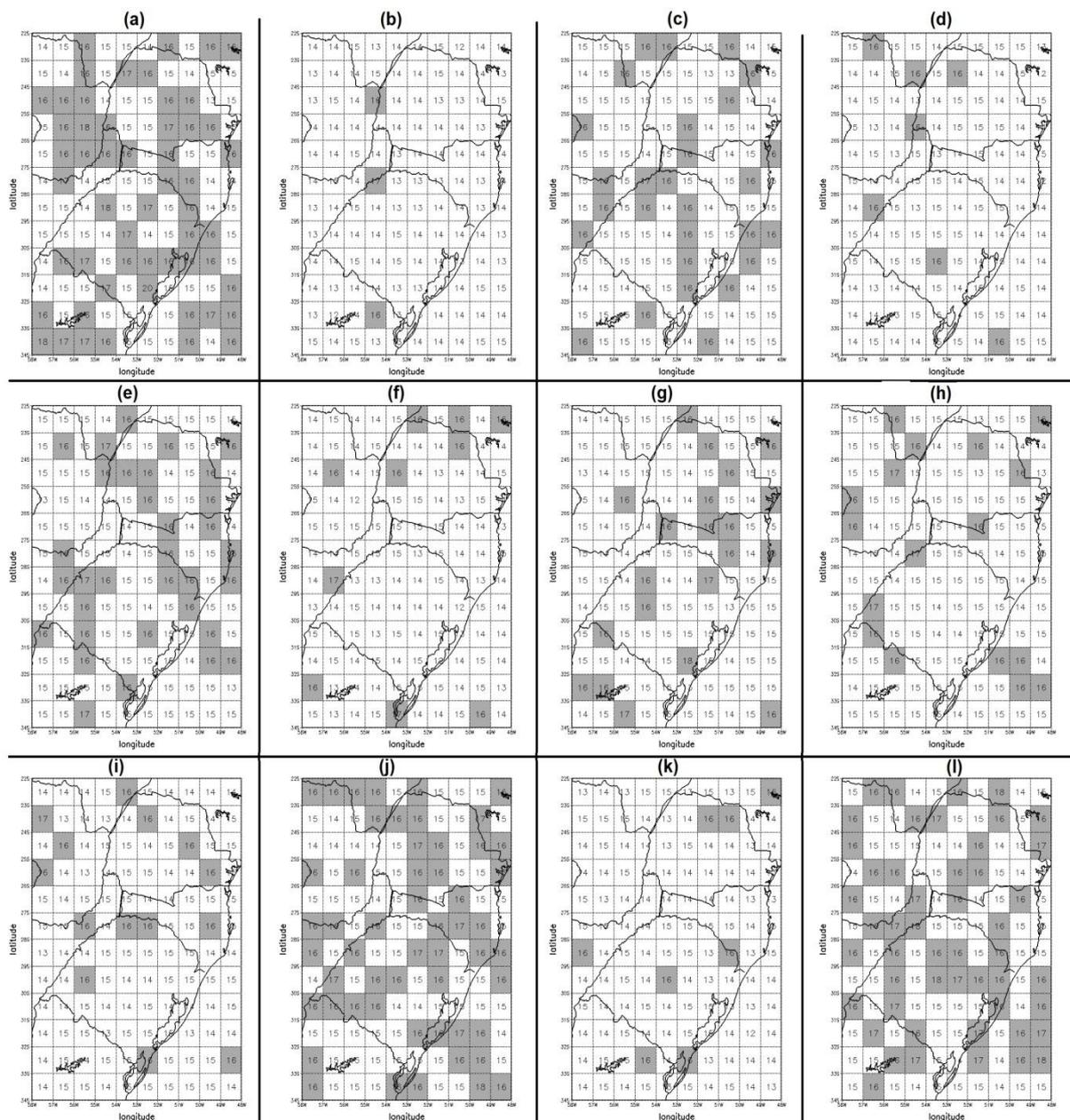


Figura 31 - Somatório da quantidade de dias acima do P95, onde o sombreado representa os pontos de grade com valores maiores ou iguais a quinze dias para a região sul do Brasil no período de dezembro de 2004 a novembro de 2014. (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.

A partir do somatório dos dias com casos acima do P95, foi utilizado o valor médio destes casos em cada ponto de grade e assim gerou-se campos médios trimestrais dos casos acima do percentil 95%. Cada pixel foi avaliado separadamente, sem influência de outros pontos, assim essa média é de acordo com as observações acima do P95 do pixel.

Ressalta-se que na figura 32, a barra de cores está ajustada para cada um dos trimestres individualmente para que seja possível identificar as nuances entre os pontos da região sul do Brasil, a fim de minimizar as diferenças entre os trimestres. Por exemplo, os valores médios do trimestre DJF são no mínimo 100% maiores que os valores de JJA.

Basicamente os intervalos dos valores médios nos trimestres DJF e SON (Figura 32a, 32d), apresentam aproximadamente a mesma variação, ficando entre 7100 e 8000 J/m². É possível observar nestes dois trimestres que a região N/NW do estado do RS é a região mais afetada pelos valores que estão acima do P95 chegando ao registro de mais de 8000 J/m² que equivale a um índice I-UV maior que 14 unidades, sendo extremamente prejudicial à saúde podendo provocar inúmeros tipos de doenças, como por exemplo, câncer de pele e eritemas favorecendo para que a patologia câncer de pele seja observada com maior frequência quando sujeito à exposição contínua. No estado de Santa Catarina os valores acima do P95, também são elevados e ficando em média acima de 7500 J/m², o que significa índices I-UV maiores que 11 unidades.

Os trimestres ditos mais frios, que têm menor incidência de fluxo de radiação solar (MAM e JJA) na região sul do Brasil, apresentam menores valores do P95 e assim menores valores médios nos casos acima do P95. O trimestre MAM tem sobre o sul e centro do RS os valores mais elevados dos casos acima do P95 chegando ao valor máximo de 5700 J/m² representados na figura 32b, já no trimestre JJA a mesma região do RS apresenta os maiores valores analisados do P95 chegando a um máximo de 3700 J/m². A região norte do Paraná registra em todos os trimestres os menores valores do P95 (de acordo com os valores médios de cada trimestre individualmente), mesmo sendo a região que teoricamente teria as menores variações da incidência de radiação solar.

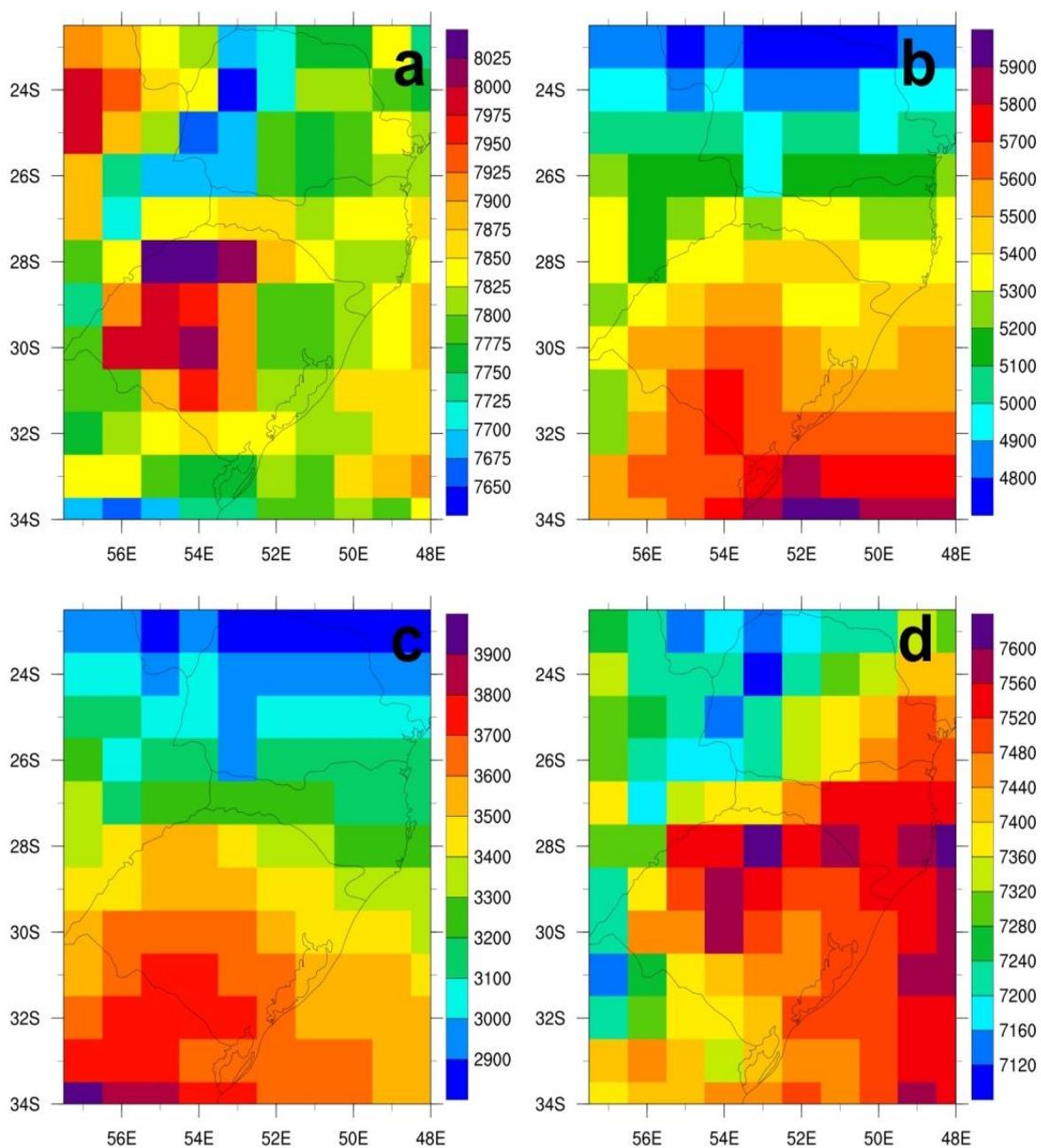


Figura 32 – Campo representando a média dos casos extremos (média de cada pixel correspondente a dias diferentes) acima do P95, da Radiação Ultravioleta do tipo DED (em J/m²), para cada um dos quatro trimestres na região sul do Brasil. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON

5. Conclusões

Os resultados deste trabalho mostraram que a análise mensal da Coluna Total de Ozônio para o decênio de 2004 a 2014 apresenta:

- Uma maior variabilidade meridional no trimestre SON na região da América do Sul chegando a mais de 100UD;
- Menores valores da Coluna Total de Ozônio foram encontrados no trimestre MAM (variando entre 40 e 50UD);

Para os dados do Índice Ultravioleta a análise dos dados do sensor OMI apresenta:

- Os valores do I-UV se concentram de 7 a 13 unidades ao longo de todo continente sul americano no trimestre DJF;
- Os trimestres MAM e JJA apresentam queda acentuada nos valores do I-UV entre as latitudes de 20°S a 40°S registrando valores entre 2 a 7 unidades.
- Conseguiu-se perceber certa a influência da nebulosidade nesses mapas de correlação. Em cada trimestre, as regiões com nebulosidade, mostram correlação positiva e as regiões sem nebulosidades mostram correlações negativas (o esperado). Dessa forma, de maneira subjetiva, percebemos que a correlação entre Cinc e I-UV ocorre inversamente quando não existe a influência da nebulosidade.
- O primeiro padrão da CP mostrou que nos meses que possuem forte correlação direta (maior variabilidade dos dados) ocorrem nos trimestres JJA e SON.
- A regressão linear apresentou uma maior dependência/resposta da influência da CTO na RUV no trimestre DJF chegando a valores maiores que 0,8.
- No ano de 2005 as anomalias padronizadas apresentaram nos trimestres DJF e MAM valores positivos chegando até 3,0 desvios padrões evidenciando um

grande período anômalo de RUV na região sul do Brasil.

- O mesmo ano de 2005 também apresentou valores negativos para as anomalias padronizadas nos trimestres JJA e SON, chegando de 2,5 a 3,0 desvios padrões em algumas regiões, mostrando que este ano foi de grande variabilidade nos níveis de RUV na superfície.

- Ao analisarmos os casos de significativos decaimentos da Coluna Total de Ozônio, foi comprovado que apenas os baixos níveis de ozônio não são determinantes para os altos valores de RUV incidente na superfície tanto pela distribuição da dispersão dos casos quanto através da análise variância ANOVA que comprovou a fraca relação. A presença de bandas de nebulosidade nos casos selecionados foi um possível fator determinante para o não registro de altos valores de RUV.

- Observou-se que tanto mensalmente quando sazonalmente o P95 da Radiação Ultravioleta apresenta valores mais elevados nos meses mais quentes do que nos meses mais frios.

- A maior quantidade de casos acima do P95 na região sul do Brasil se deu nos meses de Dezembro, Janeiro e Outubro.

- Dos casos extremos, os valores mais alarmantes encontram-se na região N/NE do estado do Rio Grande do Sul, chegando a mais de 8000 J/m².

Como sugestão para futuras pesquisas estão:

- Utilizar o limiar proposto por Pinheiro (2011), para analisar individualmente alguns casos que registrem o decaimento na Coluna Total de Ozônio e assim verificar a influência/dependência entre ambas as variáveis (O₃ e RUV) bem como EOA, Vapor d'água entre outras.

- Conhecer o peso/contribuição da variabilidade dos dados de Coluna Total de Ozônio na Radiação Ultravioleta através de Análise de Componentes Principais somente com os casos extremos (acima do Percentil 95%);

- Utilizar dados de nebulosidade EOA (Espessura Ótica dos Aerossóis), vapor d'água para analisar a correlação parcial entre estas variáveis mais a CTO e ver

qual tem mais influência nos valores da RUV incidente em uma análise mensal para a América do Sul;

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**. 2001 186 p. Tese (Doutorado em Geografia) UNESP/IGCE, Rio Claro.

ANDRÉ, I. R. N.; FERREIRA, N. J.; CONFORTE, J. C. “Análise do comportamento do ozônio estratosférico na América do Sul e vizinhanças utilizando-se imagens do satélite NIMBUS7/TOMS”. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. 2003. Belo Horizonte - MG. **Anais...** Belo Horizonte - MG, 2003.

BERTAGNOLLI, C.; POSSANI, G.; PINHEIRO, D. K.; FERREIRA, N. J.; SCHUCH, N. J. Observação de Perturbações do Buraco de Ozônio Antártico na Região Central do Rio Grande do Sul no Ano de 2000 através de Ondeletas. CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLOGIA EM ENGENHARIA, 21. 2006. Ijuí - RS. **Anais...** Ijuí-RS, 2006.

BETTS, A. K.; GATTI, L. V.; CORDOVA, A. M.; DIAS, M. A. F. S.; FUENTES, J. Transport of ozone to the surface by convective downdrafts at night. **Journal of Geophysical Research**. v. 107, p. 6 -15, 2000.

BRASSEUR, G.; SOLOMON, S. **Aeronomy of the middle atmosphere**, D. Reidel Publishing, Dordrecht, Holanda, 1986.

BOJKOV, R. D.; BISHOP, L.; FIOLETOV, V. E. Total ozone trends from quality controlled ground based data (1964-1994). **Journal of Geophysical Research**, v.100, n.12, p. 25867 - 25876. 1995.

BREWER, A. W. Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapor distribution in the stratosphere, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 75, p.351 - 363, 1949.

CARN, S. A.; KRUEGER, A. J.; KROTKOV, N. A.; YANG, K.; LEVELT, P. F. Sulfur

dioxide emissions from peruvian copper smelters detected by the ozone monitoring instrument. **Geophysical Research Letters**. v. 34, p. 1 - 5, 2007.

CASICCIA, C.; ZAMORANO, F.; HERNANDEZ, A. Erythematous irradiance at the Magellan's region and Antarctic ozone hole 1999-2005. **Atmosfera**, v. 21 n. 1, p. 1-12, 2008.

CUCHIARA, G. C. **Modelagem da poluição do ar por reações fotoquímicas associadas a fontes veiculares na região metropolitana de Porto Alegre**. 2011, 127 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Faculdade de Meteorologia, UFPel, Pelotas.

CHAPMAN, S. On ozone and atomic oxygen in the upper atmosphere. **Philosophical Magazine Series 7**, v.10, p.369 - 383, 1930.

CHUBACHI, S.; MIYAGAWA, K.; MAKINO, Y. A case study of the low total ozone event over Europe on 14 February 2001. **International Journal Remote Sensing**, v. 26, n. 16, p. 3423 - 3431, 2005.

DERWENT, R.G.; JENKIN, M.E.; SAUNDERS, S.M.; PILLING, M.J.; SIMMONDS, P.G.; PASSANT, N.R.; DOLLARD, G.J.; DUMITREAN, P.; KENT, A. Photochemical ozone formation in north west Europe and its control. **Atmospheric Environment**, v. 37, p.1983-1991. 2003.

DESSLER, A. **The Chemistry and Physics of Stratospheric Ozone**. International Geophysics Series, v. 74, Academic Press, 2000.

DOBSON, G. M. B., Forty years' research on atmospheric ozone at Oxford: A history. **Applied Optics**, v. 7, p. 387-405, 1968.

DRAPER, N. R. and SMITH, H. Applied Regression Analysis. 3 ed. **Wiley series in probability and statistics**. United States, pp. 705, 1998.

ECHER, E.; SOUZA, M. P.; SCHUCH, N. J. A Lei de Beer Aplicada na Atmosfera Terrestre. **Revista Brasileira de Ensino em Física**, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 276-283, 2001.

ESCOBAR, G. C. J. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 22(2):241-254, 2007.

FARMAN, J. C.; GARDINER, B. G.; SHANKLIN, J. D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x / NO_x interaction. **Nature**. n. 315, p. 207 - 210, 1985.

FIOLETOV, V. E.; KERR, J. B.; WARDLE, D. I. The relationship between total ozone and spectral UV irradiance from Brewer observations and its use for derivation of total ozone from UV measurements. **Geophysical Research Letters**, Canada, v.24, n. 23, p. 2997 - 3000, 1997.

FISHMAN, J.; WATSON, C. E.; LARSON, J. C; LOGAN, J. A. Distribution of tropospheric ozone determined from satellite data. **Journal Geophysical Research**, v. 95, p. 3599-3617, 1990.

FONTINELE, J. L. **Envelopamento da tropopausa no Sul da América do Sul: Relações entre a corrente de jato em altos níveis e a Coluna Total de Ozônio**. 2012. 84 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Faculdade de Meteorologia, UFSM, Santa Maria.

FREDERICK, J. E.; LUBIN, D. The ultraviolet radiation environment of the Antarctic Peninsula: The Roles of Ozone and Cloud Cover. **Journal of Applied of Meteorology and Climatology**, v 30, p. 478 - 493, 1991.

GRIMM, A. M. **Clima da região Sul do Brasil**. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J.; SILVA DIAS, M.A.F. Tempo e clima do Brasil. 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, p.259-275, 2009.

GUARNIERI R. A.; GUARNIERI F. L.; CONTREIRA D. B.; PADILHA L. F.; ECHER. E.; PINHEIRO D. K.; SCHUCH A. M. P.; MAKITA K.; SCHUCH N. J. Ozone and UVB radiation anticorrelations at fixed solar zenith solar angles in southern Brazil. **Geofísica Internacional**, v. 43, n. 1, p. 17-22. 2004.

HANNACHI, A.; JOLLIFFE, I. T. and STEPHENSON, D. B. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. **International Journal of Climatology**, 27, 1119 – 1152, doi: 10.1002/joc.1499, 2007.

HEGGLIN, M. I; SHEPHERD T. G; Large climate-induced changes in ultraviolet index and stratosphere-to-troposphere ozone flux. **Nature Geosciences** v. 2, n.1 p. 687-691, 2009.

HORVÁTH, M.; BILITZKY, L.; HUTTNER, J. Ozone. New York: Elsevier, 1985. 350p. HOFMANN, D. J.; OLTMANS, S. J.; HARRIS, J. M.; JOHNSON, B. J.; LATHROP, J. A. Ten years of ozone sonde measurements at the South Pole: Implications for recovery of springtime Antarctic ozone. **Journal Geophysical Research Atmospheres**, v.102, p. 8931 - 8943, 1997.

HOSKINS, B. J.; McINTYRE, M. E.; ROBERTSON, A. W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 111, p. 877 - 946, 1985.

HUPFER, N. T.; KALL, E.; PERES, L. V.; PINHEIRO, D. K.; SCHUCH, N. J.; LEMES, N. M. P. Comparação da Radiação Ultravioleta quando da ocorrência dos eventos de efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico sobre o sul do Brasil dos dias 16/10/2003 e 28/09/2008. CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 12. 2011, Rio de Janeiro-RJ. **Anais...** Rio de Janeiro-RJ, 2011.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em:<www.ibge.gov.br>. Censo 2010. Acesso em 20 de fev. de 2016.

JOLLIFFE, I. T. **Principal Component Analysis**. 2ed. 487p. Springer – Verlag. New York, 2002.

JUSTINO, F. and PELTIER, R. W. Climate Anomalies Induced by the Arctic and Antarctic Oscillations: Glacial Maximum and Present-Day Perspectives. **Journal of Climate**, 21, 459 – 475, 2008.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella, 1991. 149p.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; DA SILVA, F.R.; BARREIRA, R. A. The Antarctic ozone hole as observed at the Brazilian Antarctic station in 1992. In: MEDRANO-BALBOA, R. A.; PEREIRA, E. B. (org.) **Ciências Espaciais e Atmosféricas na Antártica**. São José dos Campos: Transtec, 1995. v.1, p. 45-64.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; SCHUCH, N. J.; PINHEIRO, D. K.; HARRIS, J. M. Evidence for an Ozone Hole Perturbation at 30° South. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 9, p.1481-1488, 1996.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; SAHAI, Y.; CASICCIA, C. A. R.; ZAMORANO, F.; VALDERRAMA, V. Observations of the 1995 ozone hole over Punta Arenas, Chile. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 102, n. 13, p. 16109-16120, 1997.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; NASSER, N. A radiação UV-B e seus efeitos na pele humana. In: SEMINÁRIO DE INTERAÇÕES GEOMÉDICAS, 1996, Campina Grande **Anais do....** Campina Grande-PB: Universidade Federal da Paraíba. 1996. v.2, p. 10-20.

KROTKOV, N. A.; CARN, S. A.; KRUEGER, A. J.; BHARTIA, P. K.; YANG, K. Band residual difference algorithm for retrieval of SO₂ from the Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI). **IEEE Transactions Geosciences and Remote Sensing**, v. 44, n. 5, p. 1259 - 1266, 2006.

KROTKOV, N. A.; McCLURE, B.; DICKERSON, R. R.; CARN, S. S.; LI, C.; BHARTIA, P. K.; YANG, K.; KRUEGER, A. J.; LI, Z.; LEVELT, P.F.; CHEN, H.; WANG, P.; LU, D. Validation of SO₂ retrievals from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) over NE China. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. 8, p. 1-14, 2008.

KZRÝSCIN, J. W. UV controlling factors and trends derived from the ground-based measurements taken at Balsk, Poland, 1976-1994. **Journal of Geophysical Research**. v.101, n.11, p.16797-16804, 1996.

LARY, D.; CHIPPERFIELD, M.; PYLE, J.; NORTON, W.; RIISHOJGAARD, L. Tree-dimensional tracer initialization and general diagnostics using equivalent PV latitude-potential-temperature coordinates, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 121, p. 187 - 210, 1995.

LENZI, E.; FAVERO, L. O. B. **Introdução à química da atmosfera: ciência, vida e sobrevivência**. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 465p.

LENOBLE, J., **Atmospheric Radiative Transfer**. A DEEPAK Publishing, Hampton, 1993.

LIOU, K. N. **An introduction to atmospheric radiation**. California: Academic Press. v. 2, 2002. 583p.

LOPO, A. B.; SPYRIDES, M. H. C.; LUCIO, P. S.; SIGRÓ, J. Ozone and Aerosol Influence on Ultraviolet Radiation on the East Coast of the Brazilian Northeast. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 4, p. 92-99, 2013.

LUTGENS, F. K.; TARBUCK, E. J. **The atmosphere: An Introduction to Meteorology**. 6 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1995. p. 14 - 17.

MARCHAND, M.; BEKKI, S.; PAZMINO, A.; LEFÈVRE, F.; GODIN-BEEKMANN, S.; HAUCHECORNE, A. Model simulations of the impact of the 2002 Antarctic ozone hole on midlatitudes. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 62, p. 871–884, 2005.

MARIANO, E. V C. **Desenvolvimento de metodologia para validação e análise de dados de dióxido de enxofre (SO₂) atmosférico sobre o Continente Sul-americano e região subantártica**. 2012. 89 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

MADRONICH, S. UV radiation in the natural and perturbed atmosphere. In: TEVINI, M. (org). **UV-B Radiation and Ozone Depletion**. London: Lewis Publishers, 1993. v.1, p. 17-69.

MAZUCHELI, J.; ACHCAR, J. A. Algumas considerações em regressão não linear. **Acta scientiarum**. Maringá, v. 24, n.6, p.1761-1770, 2002.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). Studying Earth's Environment From Space. 2000. Disponível em: <<http://www.ccpo.odu.edu>>. Acesso em: 20 out. 2015.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). Studying Earth's Environment From Space. 2002. Disponível <<http://jwocky.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em: 17 out. de 2015.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). Studying Earth's Environment From Space. 2012. Disponível em: <www.ccpo.odu.edu/~lizsmith/SEES/ozone/oz_class.htm>. Acesso em: 30 out. 2015

NESME-RIBES, E.; THUILLIER, G. **Histoire solaire et climatique**. Paris: Ed. Belin, 2000.238 p.

NORTON, W. A. Breaking Rossby waves in a model stratosphere diagnosed by a vortex – following coordinate system and a technique for advecting material contours. **Journal Atmospheric Science**, v.51, p. 654 - 673, 1994.

OLIVEIRA, A. M de. **Estudo do Impacto dos aerossóis na Espessura Óptica da Atmosfera na região Sul do Brasil**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

OMI Team-NASA. Ozone Monitoring Instrument (OMI). Data User's guide. 2011. PAZMINO, A. F.; GODIN-BECKMANN, S.; GINZBURG, M.; BEKKI, S.; HAUCHECORNE, A.; PIACENTINI, R. D.; QUEL, E. J. Impact of Antarctic polar vortex occurrences on total ozone and UVB radiation at southern Argentinean and Antarctic stations during 1997-2003 period. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 110, n. 3103, 2005.

PAZMINO, A. F.; GODIN-BEEKMANN, S.; LUCCINI, E. A.; PIACENTINI, R. D.; QUEL, E. J.; HAUCHECORNE, A. Increased UV radiation due to polar ozone chemical depletion and vortex occurrences at Southern Sub-polar Latitudes in the period [1997-2005]. **Atmospheric Chemistry Physics**, v. 8, n. 17, p. 5339-5352, 2008.

PERES, L. V. **Efeito secundário do buraco de ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil**. 2013. 178f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

PINHEIRO, D. K; LEME, N. P.; PERES, L.V.; KALL, E. Influence of the Antarctic ozone hole over the south of Brazil in 2008 and 2009. **Annual Activity Report 2010**. National Institute of Science and Technology Antarctic Environmental Research. p.33-37, 2010.

PINHEIRO, D. K.; LEME, N. P.; PERES, L. V.; KALL, E. Influence of the Antarctic ozone hole over South of Brazil in 2008 and 2009. **Annual Active Report 2010 – National Institute of Science and Technology Antarctic Environmental Research**, v. 1, p. 33-37, 2011.

PRATHER, M.; JAFFE, H. Global impact of the Antarctic ozone hole: chemical propagation. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 95, p. 3413 - 3492, 1990.

RECUERO, F. S ; LONGO, K. M. ; FREITAS, S. R. Estudo do Transporte das

Partículas de Aerossol de Queimada Via Sensoriamento Remoto. **Anais do...** XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004, Fortaleza.

REIS, N. C. S.; MENDOZA, F. R. T.; PERES, L. V.; AVENA, M.; CRESPO, N. M.; SILVA, O. K.; HUPFER, N.; PINHEIRO, D. K.; SCHUCH, N. J.; LEME, N. M. P. Anticorrelação entre Coluna Total de Ozônio e a Radiação Ultravioleta do tipo eritema nos solstício de verão e inverno de 2005 a 2008. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 27. 2012, Gramado - RS. **Anais...** Gramado-RS, 2012.

RICHMAN, M. Specification of complex modes of circulation with T-mode factor analysis. In: II INTERNATIONAL CONFERENCE ON STATISTICS AND CLIMATE, 1983, Lisbon. **Anais**, National Institute of Meteorology and Geophysics, 1983. p. 511-518.

SALBY M. L. **Fundamentals of Atmospheric Physics**. International Geophysics Series. v. 61. Academic Press. 1995.

SALGADO, C. A. C.; PAES LEME, N. M.; ZAMORANO, F.; QUEL, E. J.; VIANA, R. Influence of the ozone hole on the American. South Cone 1992-2009. CONGRESS THE MEETING OF THE AMERICAS, 2010, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2010.

SCHMALFUSS, L. S. M; MARIANO, G. L.; PINHEIRO, D. K.; PERES, L. V.; Análise dos dois principais fatores de decaimento da Coluna Total de Ozônio sobre o sul da América do Sul. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 36, Ed. Especial II, p. 415 – 422, 2014.

SEINFELD, J. H. **Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution**. New York: John Willey & Sons, 1986. 738 p.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics**. From Air Pollution to Climate Change, Wiley Interscience, USA. 1998. 1325 p.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. New York: John Wiley & Sons, 2006. 1225 p.

SEMANE, N.; BENCHERIF, H.; MOREL, B.; HAUCHECORNE, A.; DIAB, R. D. An unusual stratospheric ozone decrease in Southern Hemisphere subtropics linked to isentropic air-mass transport as observed over Irene (25.5° S, 28.1° E). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.6, p.1927-1936, 2006.

SHEPHERD, T. G. Transport in the Middle Atmosphere. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 85B, p. 165-191, 2007.

SLUSSER, J.; GIBSON, J.; BIGELOW, D.; KOLINSKI, D.; MOU, W.; KOENIG, G.; BEAUBIEN, A. Comparison of column ozone retrievals by use of an UV multifilter

rotating shadow-band radiometer with those from Brewer and Dobson spectrophotometers. **Applied Optics**, v. 38, n. 9, p. 1543-1551. 1999.

SOLOMON, S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. **Reviews of Geophysics**, v.37, n.3, p.275-316, 1999.

STOHL, A.; WERNLI, H.; BOURQUI, M.; FORSTER, C.; JAMES, P.; LINIGER, M.A.; SEIBERT, P.; SPRENGER, M. A new perspective of stratosphere-troposphere exchange. Bull. **American Meteorological Society**, v. 84, p. 1565-1573, 2003.

Urbach, F. **The biologic effects of ultraviolet radiation**. Pergamon Press, Oxford, 1969. 704p.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Editora da UFV. 2000. p. 448.

WALLACE, W. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science** – an introductory survey. London: Elsevier, 2006. 483p.

WAKAMATSU, S.; UNO, I.; VEDA, H.; UEHARA, K.; TATEISHH, H. Observational study of stratospheric ozone intrusions into the lower troposphere, **Atmospheric Environment**, v. 23, p. 1815-1826, 1989.

.

WHITTEN, R. C.; PRASAD, S. S. Ozone photochemistry in the stratosphere. In: WHITTEN, R. C.; PRASAD, S. S (org.) **Ozone in the free atmosphere**. New York: Van Nostrand Reinhold v. 2, p. 81-122, 1985

WHO - World Health Organization. Ultraviolet radiation. Environmental Health Criteria 160, Geneva, 1994.

WHO - World Health Organization. Global **Solar Index UV: A Practical Guide**. United Nations Environment Program (UNEP) and International Commission on Non-Ionising Radiation Protection (ICNRP), 18 p. Geneva, 2002.

WILKS, D. S. 1995. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Academic Press, San Diego. 467 p.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the atmospheric science**. California, USA. 2ed. Academic Press.2006.649p

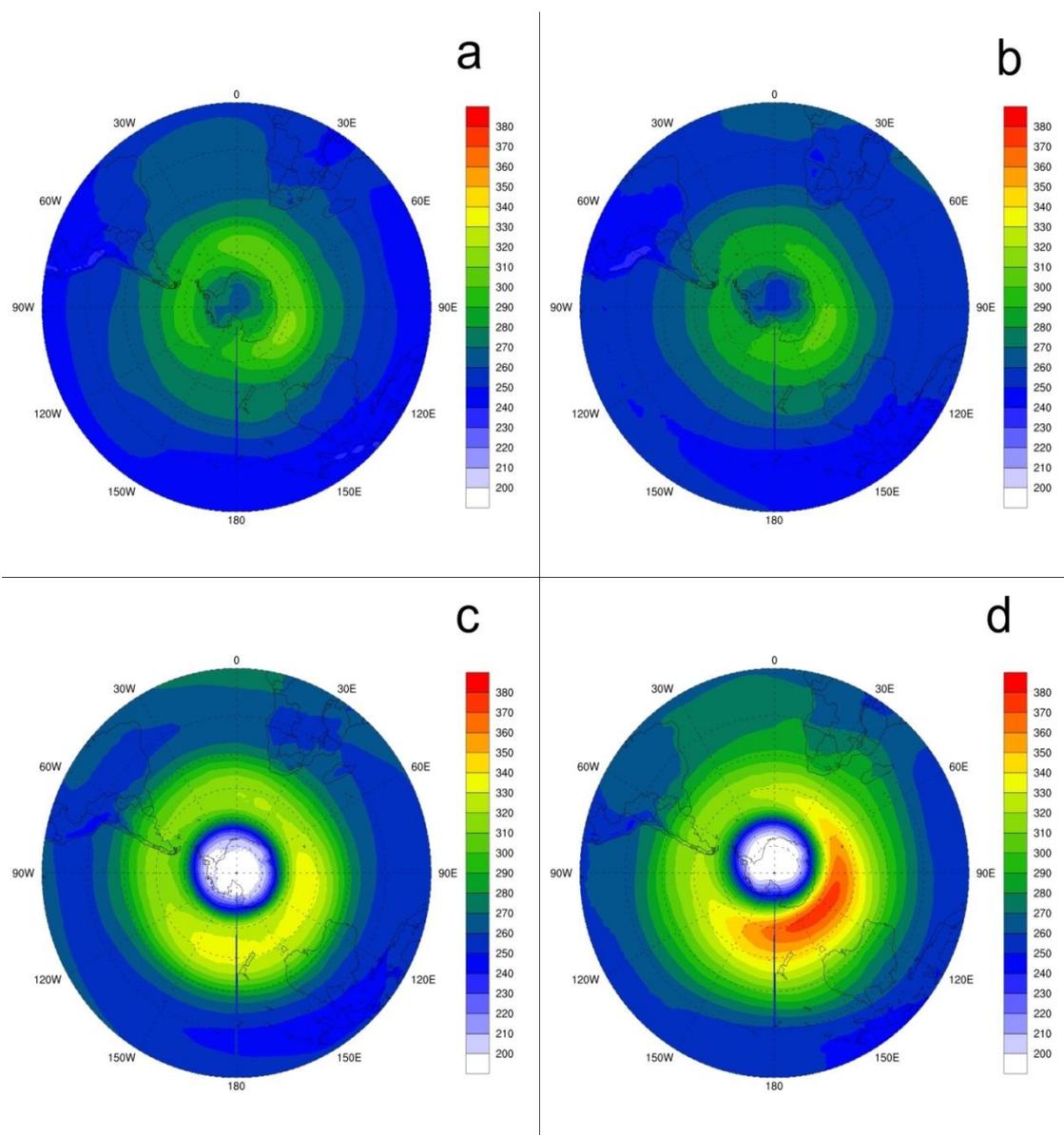
WMO/ UNEP - Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1991, Genebra, 1992.

WMO/ UNEP - Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994. Genebra, 1994.

Apêndices

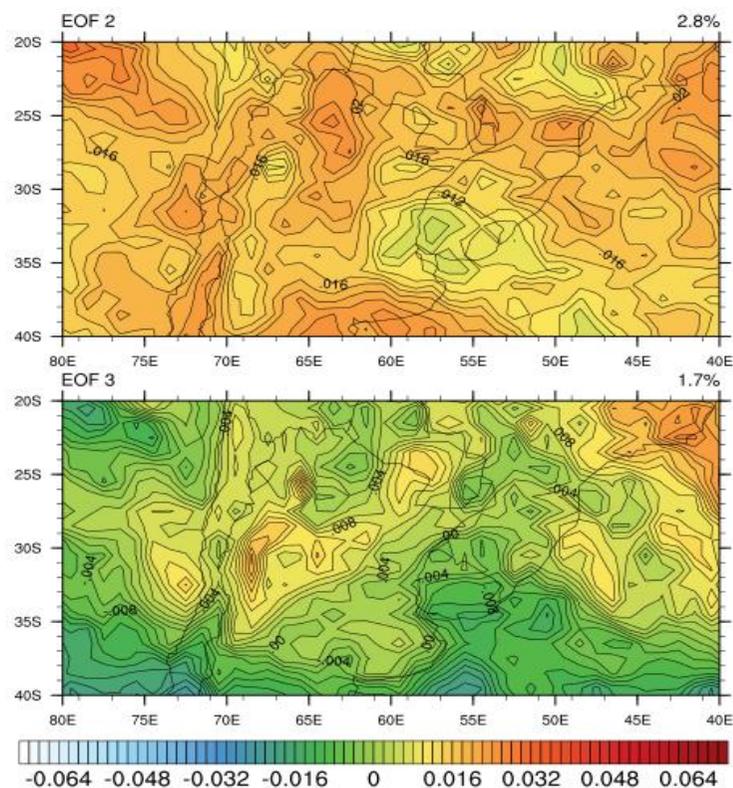
Apêndice A – Imagens da média sazonal para os dados de Coluna Total de Ozônio para todo hemisfério sul.

Na presente seção é apresentada na Figura A.1 o comportamento/influência do vórtice polar na dinâmica estratosférica e por consequência nos níveis da Coluna Total de Ozônio em todo o hemisfério sul.

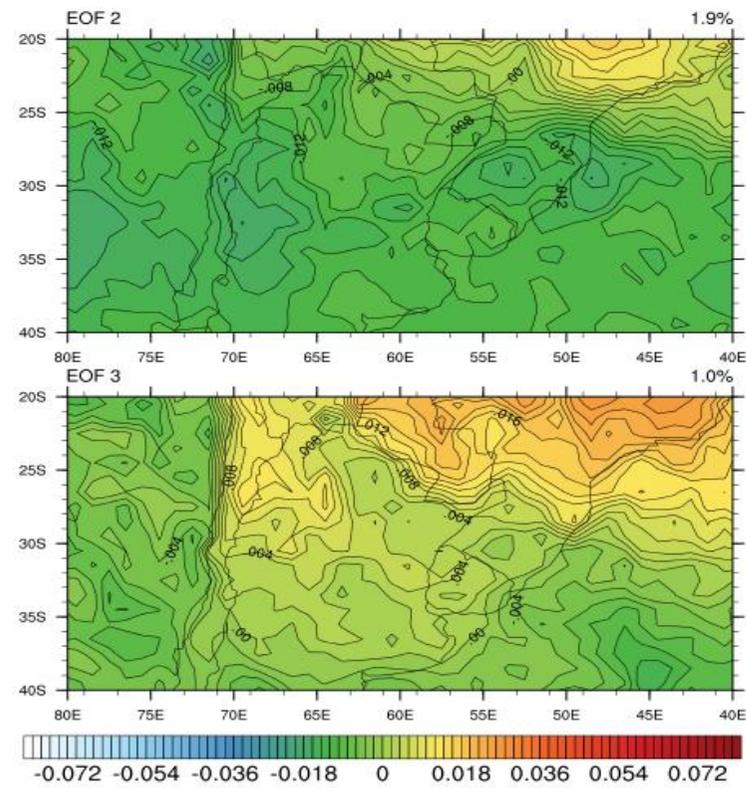


A. 1 - Projeção polar da média sazonal da Coluna Total de Ozônio em UD, para o período de dezembro de 2004 a novembro de 2014 na região da América do Sul. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON.

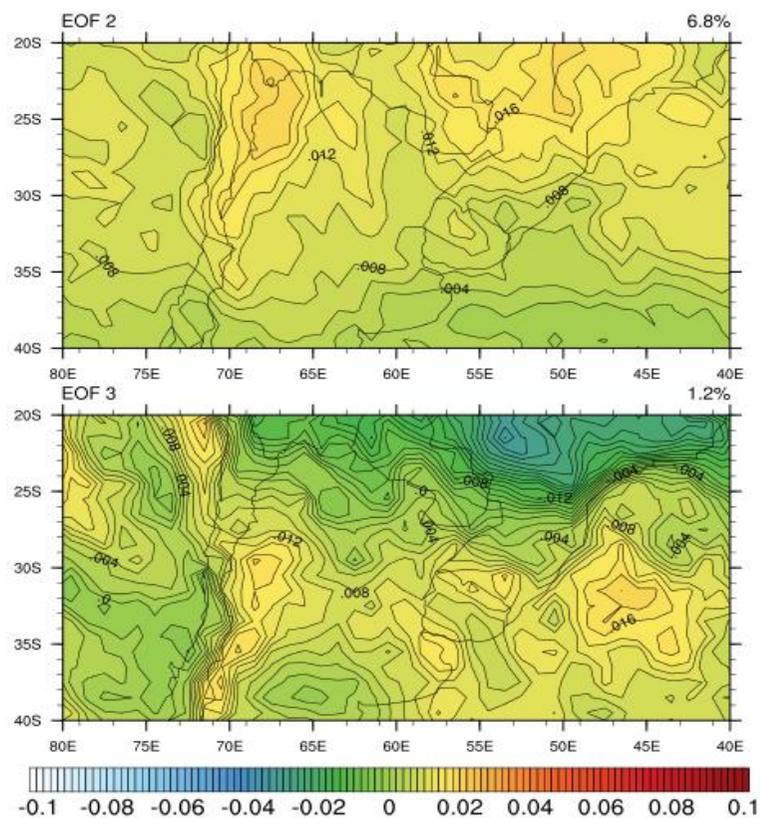
Apêndice B – Análise de Componentes Principais para a série de dados no sul da América do Sul da Radiação Ultravioleta do tipo Dose Eritêmica Diária (DED).



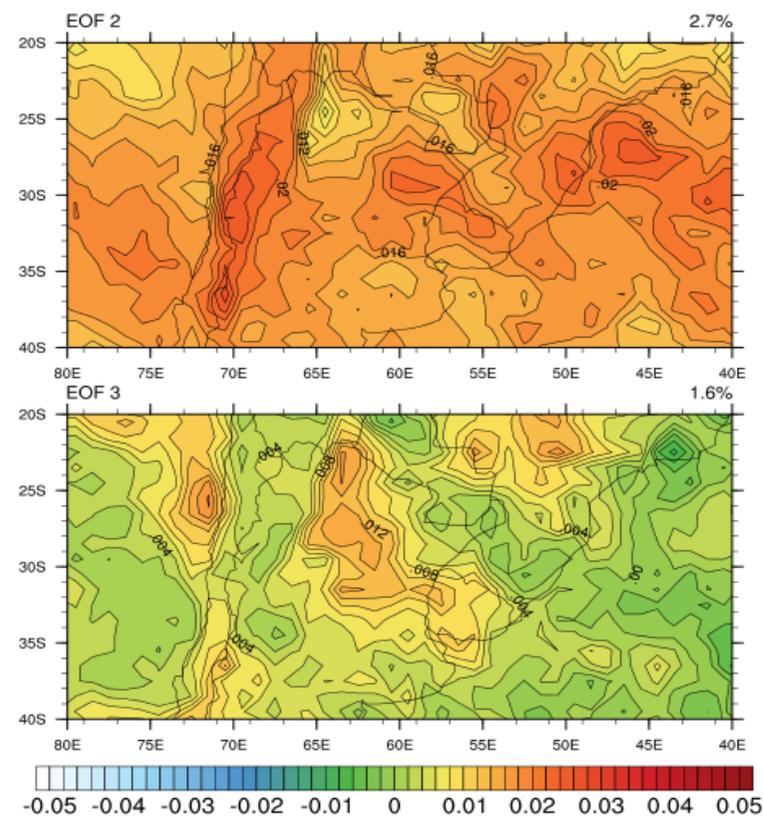
B. 1 - Segunda e terceira EOF da DED para o decênio de 2004 a 2014 para o trimestre DJF que foram descartadas através do truncamento de Kaiser. EOF2 (2,8%), EOF3 (1,7%)



B. 2 - Segunda e terceira EOF da DED para o decênio de 2004 a 2014 para o trimestre MAM que foram descartadas através do truncamento de Kaiser. EOF2 (1,9%), EOF3 (1,0%).



B. 3 - Segunda e terceira EOF da DED para o decênio de 2004 a 2014 para o trimestre JJA que foram descartadas através do truncamento de Kaiser. EOF2 (6,8%), EOF3 (1,2%).

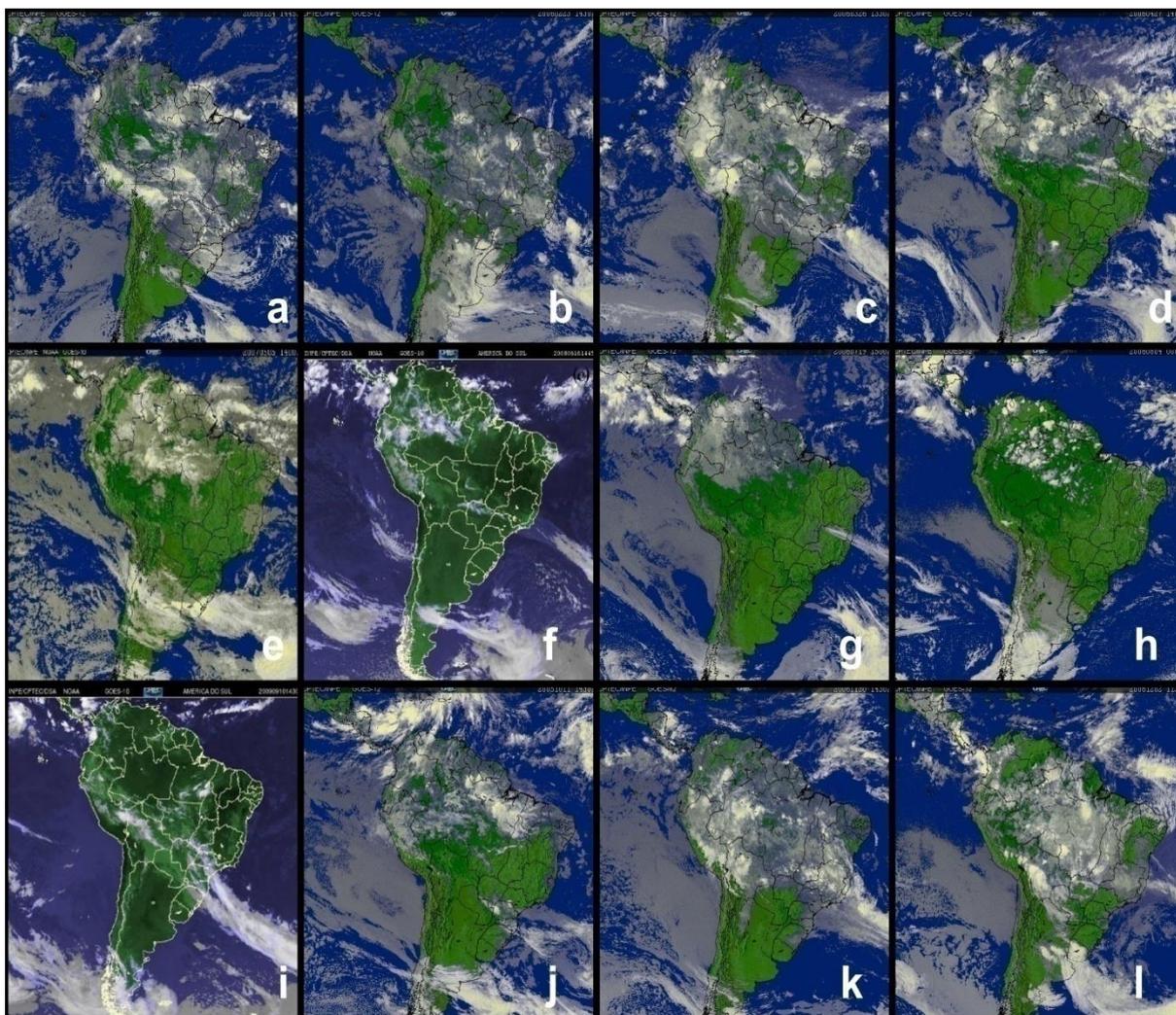


B. 4 - Segunda e terceira EOF da DED para o decênio de 2004 a 2014 para o trimestre SON que foram descartadas através do truncamento de Kaiser. EOF2 (2,7%), EOF3 (1,6%).

Anexo A

Anexo A – Tabela com data e localização dos casos propostos por Schmalfluss (2014) do pixel com menor valor de Coluna Total de Ozônio e percentuais de queda em relação à média para cada mês.

Data	Localização do pixel	Coluna total de ozônio (UD)	Valores percentuais de queda da coluna total de ozônio em relação à média mensal (%)
24 janeiro 2005	29,5°S e 51,5°W	242,9	7%
23 fevereiro 2006	33,5°S e 71,5°W	244,3	7%
26 março 2006	34,5°S e 58,5°W	231,3	11%
27 abril 2006	35,5°S e 59,5°W	231,7	13%
05 maio 2007	33,5°S e 57,5°W	227,5	15%
16 junho 2008	36,5°S e 56,5°W	245,2	14%
19 julho 2006	38,5°S e 63,5°W	237,9	21%
04 agosto 2006	28,5°S e 51,5°W	256,0	10%
10 setembro 2009	23,5°S e 55,5°W	258,7	7%
11 outubro 2005	31,5°S e 58,5°W	251,3	13%
30 novembro 2006	33,5°S e 68,5°W	259,6	11%
02 dezembro 2006	33,5°S e 56,5°W	243,1	12%

Anexo B – Imagens de satélite do GOES-10 utilizados por Schmalfuss (2014)

Anexo B – Imagens de satélite do canal colorido do GOES-10, para todos os casos selecionados por Schmalfuss (2014). (a) caso do mês janeiro, (b) caso do mês fevereiro, (c) caso do mês março, (d) caso do mês abril, (e) caso do mês maio, (f) caso do mês junho, (g) caso do mês julho, (h) caso do mês agosto, (i) caso do mês setembro, (j) caso do mês outubro, (k) caso do mês novembro, (l) caso do mês dezembro.