

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA



Dissertação

Estudo do Impacto dos Aerossóis na Espessura
Óptica da Atmosfera na Região Sul do Brasil

Aline Macedo de Oliveira

Pelotas, 2013

Aline Macedo de Oliveira

Estudo do Impacto dos Aerossóis na Espessura Óptica da
Atmosfera na Região Sul do Brasil

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Meteorologia
da Universidade Federal de Pelotas,
como requisito parcial à obtenção do
título de Mestre em Ciências (M.S.).

Orientador: Dr. Glauber Lopes Mariano

Pelotas, 2013

Dados de catalogação na fonte:

Ubirajara Buddin Cruz – CRB-10/901

Biblioteca de Ciência & Tecnologia - UFPel

O48e Oliveira, Aline Macedo de

Estudo do impacto dos aerossóis na espessura óptica da atmosfera na região sul do Brasil / Aline Macedo de Oliveira. – 138f. ; il. – Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas. Faculdade de Meteorologia. Pelotas, 2013. – Orientador Glauber Lopes Mariano.

Aline Macedo de Oliveira

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção de grau em Mestre em Meteorologia, Programa de Pós Graduação em Meteorologia, Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 06 de setembro de 2013.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano (Orientador)

Prof. Dr. André Becker Nunes

Prof^a. Dra. Ericka Voss Chagas Mariano (Externo)

Dr. Wendell Rondinelli Gomes Farias (Externo)

Aos meus Pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida, pela família e por todas as pessoas que me cercam.

Aos meus pais Lorena e Ricardo Oliveira pelo apoio incondicional em todas as etapas da minha vida, por sempre acreditarem em minha capacidade e por sempre me ensinarem a não desistir. Aos meus irmãos Richard e Lucas.

Ao meu orientador Glauber Lopes Mariano pelos ensinamentos dados, pela paciência, pelos conselhos, por confiar em mim para que esta dissertação pudesse ser realizada, muito obrigada.

Ao professor Marcelo Alonso pela ajuda fornecida para a realização das simulações complementares aos resultados do trabalho.

A todos os meus colegas em especial a Ludmila Pochmann, Patrícia Tuchenhagen e Venice Meazza pelo companheirismo, desabafos, etc. As minhas amigas e meteorologistas Mônica Tavares, Lidiane Souza e Luana Ribeiro, por sempre estarem comigo, mesmo que longe.

À Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia pela oportunidade e a CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

E as todas as pessoas que de alguma forma, passaram pela minha vida e deixaram um pouco delas em mim, mesmo que despercebidas. Muito Obrigada a todos.

“Não cruze os braços
diante de uma dificuldade,
pois o maior homem do mundo
morreu de braços abertos.”

Resumo

OLIVEIRA, Aline Macedo 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.

Aerossóis são partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera que podem ser originadas por fontes naturais ou antropogênicas. São importantes no balanço radiativo devido a sua capacidade de absorver ou espalhar radiação. Conseqüentemente, afetam o clima aquecendo ou resfriando a temperatura em superfície. De acordo com as características ópticas de cada partícula é possível quantificar seus efeitos na atmosfera, assim como seu tipo. Existem diversas formas de estudar algumas das características e/ou propriedades dos aerossóis. Uma destas é pela análise da Espessura Óptica da Atmosfera (EOA), a qual é responsável por quantificar a atenuação da radiação em um meio contendo material opticamente ativo. Baseado nestas informações, o objetivo principal deste trabalho é analisar os diferentes tipos de aerossóis presentes na atmosfera da região Sul do Brasil. Pela análise do percentil 99 (P99), saber-se-á as regiões dentro da área de estudo, em que estes valores elevados estavam localizados, assim como os períodos em que estes ocorreram. Utilizou-se dados de EOA obtidos do sensor MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) no comprimento de onda de $0,55\mu\text{m}$, no período de 2002 a 2011. Observou-se que os aerossóis predominantes sobre a região podem ser caracterizados como pouco atenuadores de radiação, com EOA baixa ($\text{EOA} < 1,0$). Além disso, observou-se que os períodos em que a EOA foi mais elevada foram inverno e primavera, principalmente na região noroeste da área de estudo. Com os estudos de caso foi possível perceber que o padrão de circulação de grande escala, como exemplo a alta subtropical, auxilia no transporte de partículas de outras regiões para a região Sul do Brasil.

Palavras chave: MODIS, Expoente de Angstrom, queimadas.

Abstract

OLIVEIRA MACEDO DE, Aline. **Study of the impact of Aerosols on the Atmospheric Optical Thickness in Southern Brazil**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Aerosols are solid or liquid particles suspended in the atmosphere which can be originated either by anthropogenic or natural sources. They are important on the radiative balance due to their capacity of absorb or scatter radiation. Consequently they affect the climate system, cooling or heating surface temperature. According to the characteristic of each aerosol particle, it is possible to quantify their effect on the atmosphere, as well as their type. Nowadays, there are several ways of studying some of the characteristics and/or proprieties of the aerosols. One of them is by analyzing the Atmospheric Optical Thickness (AOT), which quantifies the radiation attenuation in an optically active medium. Based on that this work aims to analyze the different types of aerosols present in southern Brazil. By analyzing the percentile 99 (P99) it will be possible to know where the regions with high values of AOT are. This will be done by AOT data from MODIS sensor (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*), in the 0,55 μ m wavelength from 2002 to 2011. It was observed that the predominant type of aerosol in the region is characterized as slightly radiation attenuators, with low AOT (AOT <1,0). Besides this, it was observed that the periods with high AOT was winter and spring, especially in northeast of Southern Brazil. By the studies cases it was possible to notice that the large- scale circulation pattern, for example the subtropical high, aids in the transport of these particles from other regions to the Southern Brazil.

Key words: MODIS, Angstrom Exponent, Biomass burning.

Lista de Figuras

Figura 1	Transporte de material particulado com diâmetro menor do que $2,5\mu\text{m}$, das 18UTC na América do Sul. Linhas de corrente em 1,9 km de altura. Grade em vermelho com resolução horizontal de 35km.....	18
Figura 2	Processos de deposição: seca (esquerda) e úmida (direita).....	21
Figura 3	Esquema da distribuição de tamanho das partículas de aerossóis.....	23
Figura 4	Efeitos direto (esquerda) e indireto (direita).....	25
Figura 5	Foto de uma pyrocumulus.....	30
Figura 6	Simulações numéricas obtidas pelo modelo CATT-BRAMS do material particulado e do campo de vento em 700hPa sobre a América do Sul na estação seca em 2002. Os quadros em vermelho indicam os padrões de circulação observados.....	32
Figura 7	Distribuição de tamanho e volume das partículas atmosféricas, com modas diferentes.....	41
Figura 8	Área de estudo	49
Figura 9	Expoente de Angstrom versus Espessura Óptica da Atmosfera no comprimento de onda de $0,55\ \mu\text{m}$ obtidos pelo sensor MODIS nos anos de 2002 a 2011 (a-j) sobre a região Sul do Brasil. Linhas representam os valores da mediana para o período analisado.....	60
Figura 10	Máximo valor diário da Espessura Óptica da Atmosfera dos anos 2002-2003 a 2010-2011 (a-e).....	63
Figura 11	Climatologia do percentil 99 (a) e mediana ou percentil 50 (b) para todo o período de estudo, de 2002 a 2011.....	64
Figura 12	Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera e mediana (P50) para os verões (a e b), outonos (c e d), invernos (e e f) e primaveras (g e h).....	67
Figura 13	Percentil 99 anual da Espessura Óptica da Atmosfera de 2002 (a), 2003 (b), 2004 (c), 2005 (d), 2006 (e), 2007 (f), 2008 (g),	

	2009 (h), 2010(i)e 2011 (j).....	
Figura 14	Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera para os invernos de 2002 (a), 2005 (b), 2007 (c) e 2010 (d).....	73
Figura 15	Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera do mês de agosto de 2007(a) e 2010 (b).....	75
Figura 16	Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera para asprimaveras de 2002 (a), 2004(b), 2007 (c) e 2010(d).....	77
Figura 17	Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera do mês de setembro dos anos de 2002 (a), 2004(b), 2005 (c), 2007 (d) e 2010 (e).....	79
Figura 18	Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera do mês de outubro de 2004 (a) e 2007 (b).....	80
Figura 19	Espessura Óptica da Atmosfera (a e b) e Expoente de Angstrom (c e d) no comprimento de onda de 0,55 μm . Do dia 28 de agosto de 2005.....	83
Figura 20	Emissão de monóxido de carbono gerado pelo CATT-BRAMS das 21UTC do dia 27 de agosto de 2005 (a), 03, 09 e 15UTC do dia 28 de agosto de 2005 (b, c e d).....	84
Figura 21	Vetor vento médio em 850 hPa do dia 28 de agosto de 2005.....	85
Figura 22	Imagem do satélite Goes- 12 do dia 28 de agosto de 2005 das 03UTC.....	85
Figura 23	Focos de queimada do dia 28 de agosto de 2005.....	85
Figura 24	Espessura Óptica da Atmosfera (a e b) e Expoente de Angstrom (c e d) no comprimento de onda de 0,55 μm . Do dia 22 de setembro de 2004.....	88
Figura 25	Emissão de monóxido de carbono gerado pelo CATT-BRAMS das 21UTC do dia 21 de setembro de 2004 (a), 03, 09 e 15UTC do dia 22 de setembro de 2004 (b, c e d).....	89
Figura 26	Vetor vento médio em 850hPa do dia 22 de setembro de 2004.....	89
Figura 27	Focos de queimada do dia 22 de setembro de 2005.....	90
Figura 28	Espessura Óptica da Atmosfera (a e b) e Expoente de Angstrom (c e d) no comprimento de onda de 0,55 μm . Do dia 07 de setembro de 2007.....	92

Figura 29	Emissão de monóxido de carbono gerado pelo CATT-BRAMS das 21UTC do dia 06 de setembro de 2007 (a), 03, 09 e 15UTC do dia 07 de setembro de 2007 (b, c e d).....	93
Figura 30	Vetor vento em 850hPa do dia 07 de setembro de 2007.....	94
Figura 31	Imagem do satélite Goes – 10 das 21UTC do dia 07 de setembro de 2007.....	94
Figura 32	Focos de queimadas do dia 07 de setembro de 2007.....	94

Lista de tabelas

Tabela 1	Canais MODIS utilizados em análise da atmosfera (aerossóis).....	45
Tabela 2	Combinações entre EOA e EA adotados para o estudo.....	51
Tabela 3	Relação anual das medianas entre a EOA e o EA para a área de estudo (Região Sul) no período de 2002 a 2011.....	56

Lista de abreviaturas e siglas

AIRS	Atmospheric InfraRed Sounder
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS
AMSU-A	Advanced Microwave Sounding Unit-A
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BC	Black Carbon
CATT-BRAMS	Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System
CJ	Chaco Jet
CLP	Camada Limite Planetária
CO	Monóxido de Carbono
EA	Expoente de Angstrom
EOA	Espessura Óptica da Atmosfera
EOS	Earth Observing System
GMT	Greenwich Mean Time
HSB	Humidity Sounder for Brazil
IR	Infra Red
IVM	Infra Vermelho Médio
IVP	Infra Vermelho Próximo
IVT	Infra Vermelho Termal
JBN	Jato de Baixos Níveis
MISR	Multi- angle Imaging Spectro Radiometer
MODIS	MODerate-resolution Imaging Spectrometer
MOPITT	Measurement of Pollution in the Troposphere
NaCl	Cloreto de Sódio
NCEP/NCAR	National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research
NCN	Núcleo de Condensação de Nuvens
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
P50	Percentil 50 (mediana)
P95	Percentil 95
P99	Percentil 99
PM _{2,5}	Material Particulado de 2,5 µm
PM ₁₀	Material Particulado de 10 µm
SALLJ	South America Low Level Jet
SO ₂	Dióxido de Enxofre
TIROS-N	Television and Infrared
UV	Ultra Violeta
VIS	Visível
ZCAS	Zona de Convergência
ZCIT	Zona de Convergência Inter-tropical

Sumário

1. Introdução.....	16
1.2. Objetivos específicos.....	19
2. Revisão de literatura.....	20
2.1 Aerossóis.....	20
2.1.1. Efeito dos aerossóis na radiação.....	24
2.1.2. Efeito dos aerossóis no clima.....	26
2.1.3. As queimadas e os aerossóis.....	29
2.1.4. Transporte de aerossóis.....	31
2.1.5. Aerossóis de Vulcão.....	33
2.2. Sensoriamento remoto e os aerossóis.....	34
3. Fundamentação Teórica.....	36
3.1. Lei de Beer (Beer-Lambert-Bouguer).....	36
3.2. Espessura Óptica.....	37
3.3. Expoente de Angstrom.....	38
3.4. Distribuição de tamanho.....	39
3.5. Processo de remoção de aerossóis.....	42
3.5.1. Deposição seca.....	42
3.5.2. Deposição Úmida.....	43
3.6. Sensor MODIS (<i>MODerate-resolution Imaging Spectrometer</i>).....	43
3.6.1. TERRA – Primeiro satélite do programa EOS.....	45
3.6.2. AQUA – Segundo Satélite do programa EOS.....	46
3.7. Quantis.....	46

4.	Metodologia.....	48
4.1.	Local de estudo.....	48
4.2.	Dados do Sensor MODIS.....	49
4.3.	Análise da Espessura Óptica da Atmosfera (EOA) e do Expoente de Angstrom (EA).....	50
4.4.	Avaliação dos percentis (quantis).....	51
4.5.	Estudo de caso.....	52
5.	Resultados e Discussões.....	55
5.1.	Análise anual da Espessura Óptica da Atmosfera e Expoente de Angstrom.....	55
5.2.	Análise do máximo valor de Espessura Óptica da Atmosfera.....	60
5.3.	Avaliação dos percentis.....	63
5.3.1.	Período de 2002 a 2011.....	64
5.3.2.	Inverno.....	71
5.3.3.	Primavera.....	75
5.4.	Casos de estudo.....	80
5.4.1.	Agosto de 2005.....	81
5.4.2.	Setembro de 2004.....	86
5.4.3.	Setembro de 2007.....	90
6.	Conclusões.....	95
7.	Referências.....	98
	Anexo A.....	104

Introdução

Aerossóis são partículas em suspensão na atmosfera que podem ser encontrados na forma líquida ou sólida. Podem ser encontradas no ar, sobre o oceano, desertos, montanhas, florestas, geleiras e entre quaisquer ecossistemas que estejam envoltos destes. Flutuam na atmosfera da estratosfera até a superfície e têm variação de tamanho que vai desde alguns nanômetros – menos do que alguns dos menores vírus – até dezenas de micrometros – aproximadamente o diâmetro de um fio de cabelo. São produzidos por um vasto número de processos, podendo ter uma variada quantidade de composições químicas. Podem ser emitidos diretamente na atmosfera em forma de partículas - aerossol primário- assim como podem ser formados por condensação ou transformação química de vapores, por conversão gás-partícula – aerossol secundário. (HARTMANN, 1994; SEINFELD e PANDIS, 2006; NASA, 2013). Os aerossóis podem ser naturais, emitidos sem influência humana, como exemplo, aerossóis emitidos por vulcões, de poeira, de sais marinhos, entre outros, ou podem ser antropogênicos, emitidos por influência humana, como exemplo aerossóis de queima de biomassa e de poluição.

Os efeitos climáticos destas partículas estão relacionados com suas propriedades físicas e de tamanho, albedo da superfície e altitude relativa entre as camadas de aerossóis e nuvens. Entretanto, as propriedades dos aerossóis são difíceis de serem medidas sem a ajuda de instrumentação, o que faz com que as estimativas acerca de seus efeitos climáticos se tornem complicadas. Conseqüentemente, há uma grande incerteza sobre os efeitos dos aerossóis no clima global, por isso uma melhor caracterização das propriedades dos aerossóis se faz necessária (KASKAOUTIS et al., 2007; SEINFELD e PANDIS, 2006).

Caracterizar os aerossóis opticamente é uma forma de se conhecer seus diferentes tipos. A análise destas características é de suma importância, uma vez que estas podem auxiliar a definir o aerossol presente em um determinado local. Uma forma de se analisar estas características é através do Expoente de Angstrom (EA) que correlaciona o tamanho da partícula do aerossol com seu tipo, isto é, o valor médio do EA pode determinar o tipo de partícula presente em um determinado ponto da atmosfera.

Juntamente com o EA, a Espessura Óptica da Atmosfera (EOA) complementa as informações sobre o tipo de aerossol presente na atmosfera, uma vez que é utilizada para determinar as propriedades dos aerossóis. Sua natureza espectral é determinada pelas fontes de aerossol além de outros processos atmosféricos. A EOA é dependente do comprimento de onda e é adimensional.

Dentre as diferentes formas de se analisar as características dos aerossóis na atmosfera, o sensoriamento remoto está entre as mais utilizadas. Sensores a bordo de satélites podem quantificar várias propriedades atmosféricas e de superfície. Instrumentos como o MODIS (*MODerate – resolution Imaging Spectroradiometer*), encontrados a bordo dos satélites TERRA e AQUA, medem concentrações globais de aerossóis, assim como suas propriedades desde o ano de 2000 (KAUFMAN et al., 2002).

A região Sul formada pelos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, tem como característica o clima subtropical e um ciclo anual regular de precipitação. Tem como principais sistemas climáticos atuantes, frentes frias, vórtices ciclônicos, cavados em níveis médios, convecção tropical, ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), circulação marítima e JBN – (Jatos de Baixos Níveis) (BARROS e OYAMA, 2010). Alguns desses sistemas, assim como o padrão de circulação atmosférica de grande escala, são responsáveis pelo transporte de partículas de aerossóis de outras regiões, como das regiões Amazônica, Centro-Oeste e Sudeste, para a região Sul do Brasil. A Fig.1 ilustra o transporte de partículas de aerossóis da região norte para a região sul da América do Sul, em outubro de 2002. Nesta, pode-se observar, pelas linhas de corrente, um anticiclone centrado no Oceano Atlântico, que foi responsável pela troca de partículas de fumaça entre o

continente africano e a América do Sul, além do transporte entre a região Amazônica e a Sul do Brasil (FREITAS et al.,2006a).

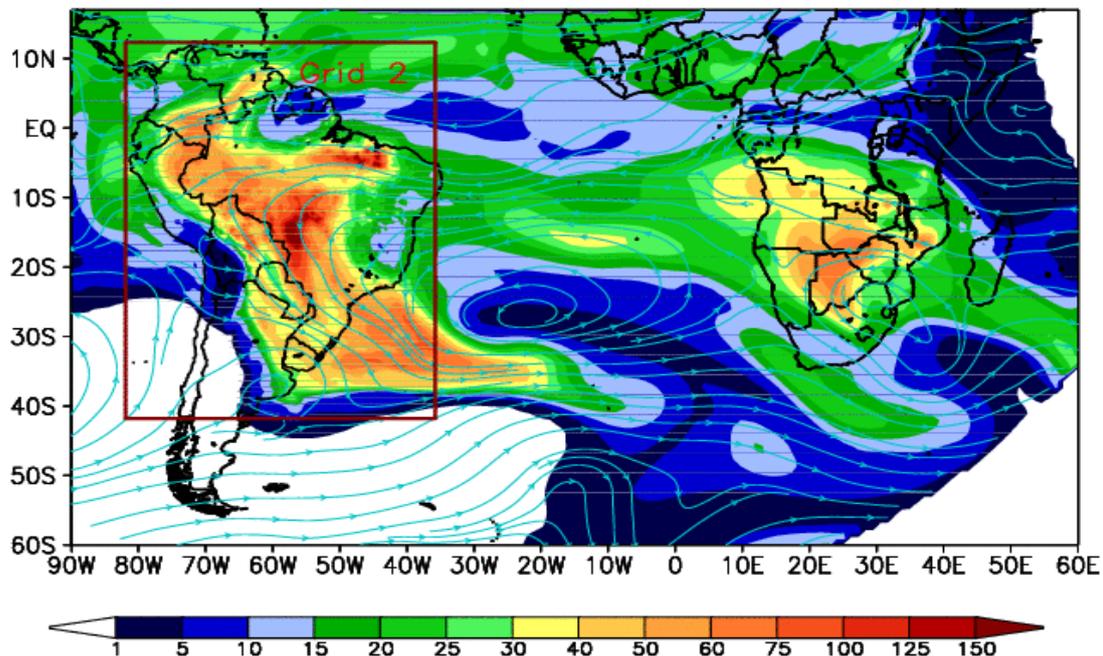


Figura 1: Transporte de material particulado com diâmetro menor do que 2,5µm, das 18UTC na América do Sul. Linhas de corrente em 1,9 km de altura. Grade em vermelho com resolução horizontal de 35 km. Fonte: FREITAS et al., 2006.

O transporte das partículas de aerossóis de outras regiões não é o único motivo para a presença destas na atmosfera da região Sul. Devido ao tamanho, localização, grande produção industrial e quantidade de veículos automotores, a região pode sofrer influência de diversos tipos de partículas de aerossóis. Aerossóis emitidos localmente (ex.: poluição urbana ou de queima de biomassa) podem influenciar a quantidade de partículas presentes na atmosfera. Principalmente considerando as diversas fontes emissoras que vão originar partículas com propriedades distintas, logo estas podem ter efeitos diferentes. Juntamente a isso, a região é cercada pelos oceanos Atlântico (mais próximo) e Pacífico o que faz com que partículas de aerossóis marinhos também possam ser encontradas.

Levando isso em consideração, é de suma importância o aprofundamento do conhecimento sobre o impacto dos aerossóis emitidos localmente e advectados para a região Sul do Brasil e como estes afetam a atmosfera local. Sabe-se que o estudo dos aerossóis na América do Sul se

resume principalmente a região amazônica devido à grande quantidade de eventos de queima de biomassa que lá ocorrem, além de diversos estudos de casos isolados. Este estudo difere dos demais através de análises em períodos maiores, como um ano ou mais. Neste trabalho ainda será feita uma tentativa de identificação de áreas com EOA elevada o que é considerado de suma importância, uma vez que o impacto dos aerossóis, de forma geral, é pouco conhecido. Desta forma o objetivo principal desse trabalho é, através da análise da EOA, observada pelo sensor MODIS a bordo do satélite AQUA, investigar o impacto destes aerossóis na região no período de 2002 a 2011.

1.1 Objetivos específicos

- Identificar as regiões, dentro da área de estudo, com valores de Espessura Óptica mais elevada;
- Analisar os períodos sazonais de máximo e mínimo valor de Espessura Óptica sobre a região Sul do Brasil no período de 2002-2011;
- Determinar o tamanho dos aerossóis presentes sobre a região baseando-se em valores do Expoente de Angström;
- Determinar estudos de caso de transportes de aerossóis para a região analisada, além das diversas fontes de origem destes, através da análise da circulação de grande escala.

Revisão de Literatura

2.1 Aerossóis

O termo aerossóis segundo Seinfeld e Pandis (2006) se designa a partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera, que podem ter sua origem tanto de processos naturais, quanto a partir de consequências de atividades humanas. São emitidas de forma direta na forma de partículas, como na erosão dos ventos sobre o solo e a superfície oceânica (aerossol primário) ou formadas na atmosfera por processos de conversão gás-partícula, que resumidamente, são as mudanças físicas e químicas que os aerossóis tanto naturais como antropogênicos podem sofrer e que vão resultar na formação de partículas (aerossol secundário). Este processo é responsável pela grande parte de sulfato e nitrato encontrados nos aerossóis urbanos (POWDER, 2003; SILVA, 2005).

Alves (2005) afirma que o termo aerossol está designado a suspensões estáveis de partículas sólidas em um gás com dimensões inferiores a $100\mu\text{m}$. A essas partículas estão incluídas: poeiras, fumaça, cinzas, nevoeiros e “sprays”. A composição e o tamanho do aerossol vão depender das fontes de emissão e de processos físico-químicos que ocorrem na atmosfera (ALBUQUERQUE, 2005). A Fig. 3 esquematiza, de forma geral, a distribuição de tamanho das partículas, além das diferentes modas em que estas são caracterizadas.

A maior parte dos aerossóis tem origem natural (cerca de 90%), como aerossóis de origem vulcânica que ejetam grandes colunas de cinzas no ar, assim como dióxido de enxofre e outros gases, formando sulfatos. No oceano, algumas microalgas produzem enxofre que pode ser convertido em sulfato

(exemplos de conversão gás-partícula). Assim como algumas plantas que produzem gases que reagem com outras substâncias e que produzem aerossóis (NASA, 2013).

Os aerossóis são uns dos principais vetores da poluição atmosférica e participam de diversos fenômenos naturais. Têm como principais fontes emissoras: emissões gasosas terrestres, poeiras de meteoritos, emissões vulcânicas, poeiras transportadas pelo vento, processos de combustão, entre outros (ALMEIDA, 2009).

Os aerossóis desempenham um papel importante na atmosfera, uma vez que contribuem para o balanço radiativo, através da dispersão e absorção da radiação solar e na diminuição da visibilidade, além de que, em seu saldo líquido, os aerossóis podem causar um resfriamento na atmosfera (ALMEIDA, 2009).

Aerossóis, usualmente, são considerados regionais, devido a seu curto ciclo de vida, além da variabilidade de suas propriedades. Estas são modificadas durante o transporte por deposição seca (remoção de gases e partículas via transferência direta da atmosfera para a superfície), e por deposição úmida (remoção de gases e partículas transportadas para superfície via chuva, neve ou neblina) em nuvens e reações químicas atmosféricas. Os processos de deposição estão ilustrados na Fig. 2. Condições meteorológicas, como o vento, determinam o transporte dos aerossóis, assim como sua distribuição vertical na atmosfera (KAUFMAN et al., 2002).

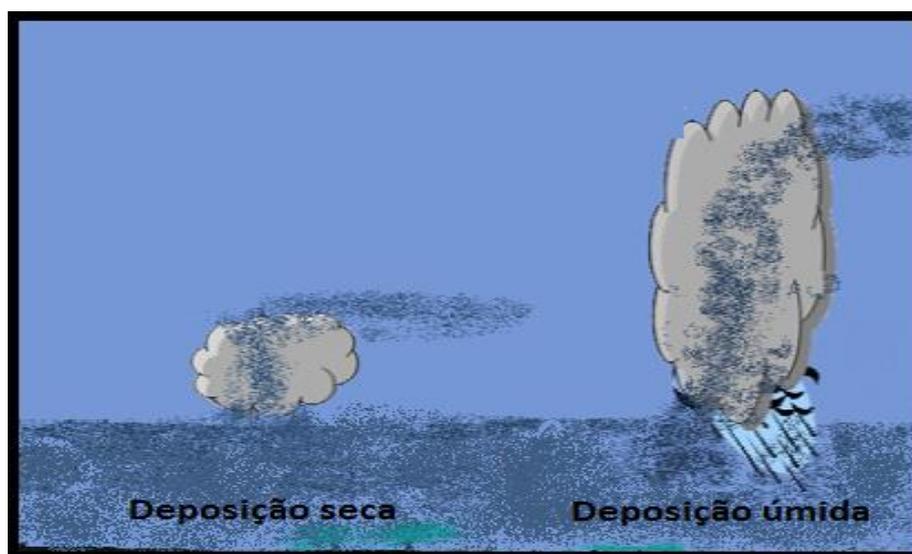


Figura 2 - Processos de deposição: seca (esquerda), úmida (direita).
Fonte: Adaptado de FREITAS et al., 2006a.

Para se descrever totalmente as partículas de aerossóis é necessário especificar além da concentração, também tamanho, composição química, fase (líquida ou sólida) e morfologia. Estas características dependem das fontes de emissão e dos processos de evolução da atmosfera. Durante o tempo de residência dos aerossóis, as partículas sofrem um “envelhecimento” (*aging*) devido à coagulação, condensação, evaporação e processamento dentro das nuvens (GOMES e DOMICIANO, 2009).

De acordo com Silva (2005) os aerossóis também podem ser caracterizados como marinhos, urbanos (são caracterizados de acordo com as atividades dos centros populacionais), rurais (com partículas da atividade orgânica vegetal ou da queima de biomassa) e os continentais (com características globais típicas de uma grande área). Aerossóis oriundos de ações humanas vêm aumentando, principalmente os associados a dióxido de enxofre (SO_2) liberados durante a combustão de carvão, petróleo e queimadas, já aerossóis de ácido sulfúrico são liberados na troposfera em maior quantidade comparado à liberação de forma natural (HARTMANN e MOUGINIS-MARK, 1999).

Vários autores descrevem as partículas de acordo com sua forma, tamanho e composição química. Toxicologistas referem-se a aerossóis como ultrafinos, finos e de material particulado grosso, já os meteorologistas os consideram como materiais particulados (PM), $\text{PM}_{2,5}$ ou PM_{10} (NASA, 2013).

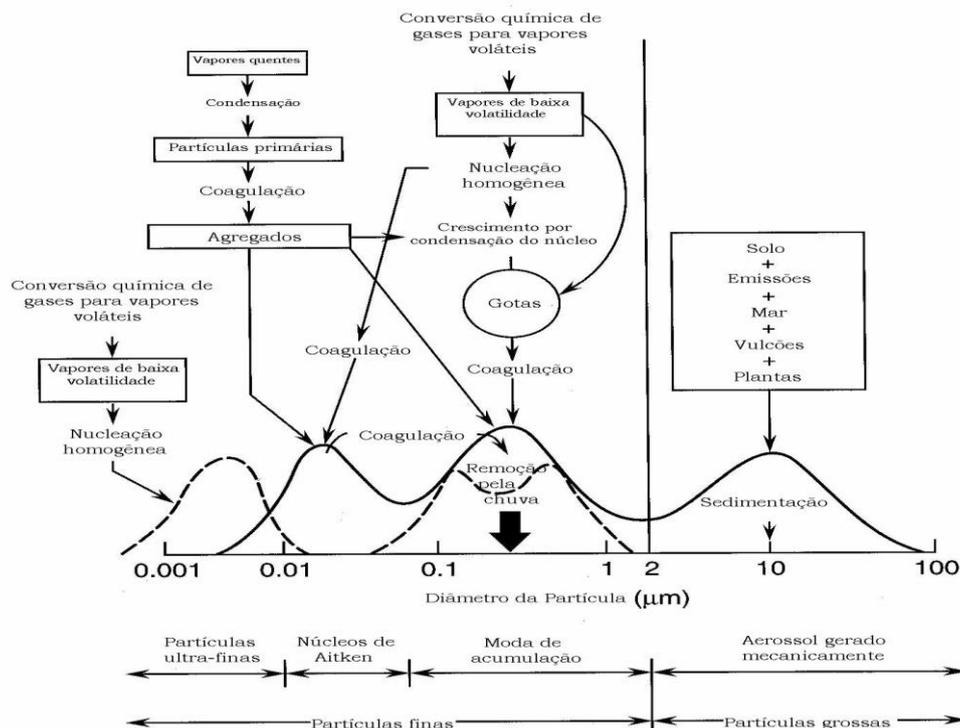


Figura 3 - Esquema da distribuição de tamanho das partículas de aerossóis.
Fonte: Adaptado de FINLAYSON-PITTS e PITTS, 1999.

Aerossóis troposféricos são constituídos basicamente de sulfatos (que espalham radiação), nitratos, amônio, aerossol carbonáceo, sais marinhos (NaCl), metais do solo, entre outros (ALBUQUERQUE, 2005; ARTAXO et al., 2006). Estão concentrados próximos à superfície, na Camada Limite Planetária (CLP), entre 0 – 3 km e na estratosfera (KAUFMAN et al., 2002). Têm duração média na atmosfera na ordem de uma semana, em regiões bastante precipitáveis, ou poucas semanas em outras partes. O efeito dos aerossóis antropogênicos na troposfera é maior do que os naturais, isto devido à quantidade de SO_2 liberados durante processos de queima de combustíveis fósseis, queimas de biomassa entre outros. O efeito destes aerossóis nas propriedades das nuvens pode ser da mesma ordem do que o efeito de resfriamento que estes causam na atmosfera. Isto faz com que os aerossóis sejam uma das maiores incertezas na compreensão das mudanças climáticas, pela vasta variedade destes existentes, incluindo sais marinhos e poeira carregados da superfície para a atmosfera pelo vento e os aerossóis formados

por transformações químicas de componentes gasosos para moléculas na forma líquida ou sólida (HARTMANN e MOUGINIS-MARK,1999).

O aerossol antropogênico (cerca de 10% do total de aerossóis são considerados antropogênicos) é originado de ações humanas (processos industriais, queimadas entre outros), aumentando de forma significativa o número de partículas em suspensão na atmosfera. Apesar de se encontrarem em menor quantidade na atmosfera, estes são dominantes em comparação aos aerossóis naturais (ALBUQUERQUE, 2005). Além dos produzidos localmente, podem ser transportados de outros locais para os trópicos, e ainda, de terem um impacto global (AHLM et al., 2010). Segundo Costa e Pauliquevis (2009), diversas estimativas globais, apontam que o aumento na concentração de aerossóis ocorre devido a atividades humanas, o que corresponde a um aumento de 5% na nebulosidade, 6% no albedo das nuvens (o que vai resultar no aumento da refletividade em nuvens individuais) e na quantidade de água líquida disponível para processos de solidificação em altos níveis, isso em função da redução na eficiência de produção de precipitação na fase quente via colisão- coalescência.

O aerossol carbonáceo é reconhecido como componente mais abundante em massa do aerossol urbano. É basicamente constituído de carbono orgânico e carbono elementar. O primeiro é emitido diretamente por fontes ou é resultado de condensação atmosférica dos gases de baixa volatilidade. O carbono elementar, também conhecido como *black carbon* (BC) é emitido diretamente por processos de combustão incompleta do carbono (ALBUQUERQUE, 2005). O BC é um componente antropogênico das partículas de carbono emitidas na atmosfera, principalmente durante a combustão de combustíveis fósseis e queimas de biomassa (BADARINATH et al., 2007).

2.1.1 Efeitos dos aerossóis na radiação

À medida que passa pela atmosfera a radiação solar sofre alterações que definem seu espectro e intensidade na superfície (FERREIRA e OLIVEIRA, 2006). Os aerossóis afetam o balanço radiativo de forma direta (espalhamento e absorção) e indireta (propriedades radiativas das nuvens). O fluxo de

radiação que chega ao topo da atmosfera age interagindo com a camada de aerossóis, refletindo-se de volta para o espaço (retro espalhado), espalhando, absorvendo e transmitindo diretamente sem sofrer interação com a camada de aerossóis (LUCCA et al., 2006).

Os efeitos indiretos dos aerossóis podem ser classificados em 1) efeito cujo aumento de Núcleos de Condensação das Nuvens (NCNs) implicará em um número maior de gotículas, do conteúdo de água e do albedo da nuvem, e 2) efeito que se refere a alterações induzidas por mudanças nas propriedades da altura da nuvem, como supressão de chuva, aumento na altura e no ciclo de vida da nuvem. Além destes, existem efeitos indiretos em nuvens na fase de gelo, assim como o efeito semi direto, em que o aquecimento da camada de aerossóis absorvedores age para reduzir a nebulosidade e refletividade das nuvens (ROCHA e YAMASOE, 2010). Os efeitos diretos e indiretos dos aerossóis são ilustrados na Fig. 4.

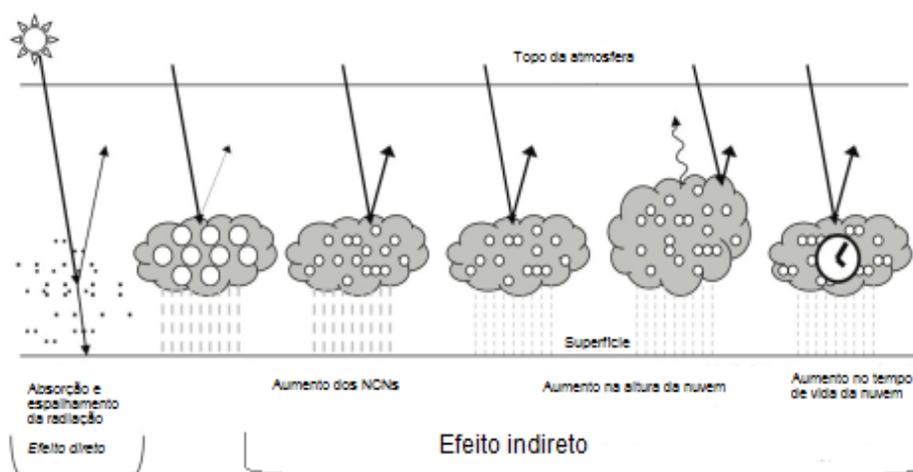


Figura 4 – Efeitos direto (esquerda) e indireto (direita).

Fonte: Adaptado de IPCC, 2007.

Para que o balanço de energia do planeta seja mantido, o fluxo de radiação que chega ao planeta deve ser balanceado por um fluxo que parte da terra pela forma de radiação infravermelha (IR). Os aerossóis podem influenciar o balanço de energia com partículas menores que $1\mu\text{m}$ que vão agir efetivamente no espalhamento da radiação solar, refletindo-a de volta ao espaço. Desta forma, pode haver redução da radiação disponível no sistema, o

que pode acarretar em uma redução da temperatura da atmosfera (POSSANI et al., 2006a).

O conhecimento do tamanho do aerossol é importante para determinar suas propriedades ópticas e estas são necessárias para avaliar o retro espalhamento da radiação solar para o efeito direto, assim como determinar a quantidade de partículas que se tornam NCNs, para avaliar o efeito direto do albedo das nuvens. Apesar dos estudos em que incorporaram o efeito seccional dos aerossóis em um modelo de circulação geral, os recursos da modelagem climatológica global não permitem soluções exatas da distribuição do tamanho das partículas de aerossóis (LESINS e LOHMANN, 2005).

2.1.2 Efeitos dos aerossóis no clima

O efeito dos aerossóis no clima é resultante de seus efeitos na radiação, tanto para aquecer quanto para resfriar a superfície. Isto dependerá da refletividade e esta por sua vez vai depender das características de absorção e espalhamento, que por sua vez dependem do comprimento de onda e da umidade relativa (ARTAXO et al., 2006; AROLA et al., 2007). Os aerossóis também influenciam a formação de nuvens, atuando como núcleos de condensação; isso faz com que a radiação infravermelha seja conservada na troposfera (SILVA, 2005). Esse processo faz com que haja uma diminuição na precipitação e isso acarreta em um aumento do albedo das nuvens. Isto ocorre uma vez que os aerossóis entram em contato com o vapor d'água, formam os NCNs. Quando há um aumento na quantidade destes NCNs seu tamanho é diminuído, o que dificulta sua deposição em forma de precipitação. A supressão da precipitação acarretará em um aumento no tamanho da nuvem, além de seu ciclo de vida. Estes processos tem como consequência o aumento do albedo, já que quanto maior a superfície, maior a reflexão. Segundo Lucca et al. (2006) os aerossóis e as nuvens são componentes básicos no balanço energético terrestre.

Partículas de aerossol são ligadas ao ciclo hidrológico, pois estas constituem os NCNs, que juntamente com o vapor d'água formam as gotículas de nuvens. Os NCNs são partículas microscópicas de aerossol que têm como propriedade condensar a água em sua superfície (na Amazônia, por exemplo,

correspondem a 60 – 80% das partículas de aerossóis naturais). Caso a atmosfera esteja poluída (com uma grande quantidade de NCNs), como na época das queimadas, o vapor d'água faz com que as gotas cresçam pouco e lentamente à medida que a nuvem cresce. Por vezes essas nuvens não precipitam (gotas evaporam) e a água juntamente com os aerossóis não retorna ao chão, mas é levada, pelo vento, para outros locais (ARTAXO et al., 2005).

De acordo com Silva (2005) a escassez de chuva faz com que os mecanismos de dispersão dos aerossóis não ocorram de forma rápida e suficiente, o que vai resultar em uma grande parte de material em suspensão. Mudanças na precipitação, causadas por aumento nos NCNs, adicionam perturbações no ciclo hidrológico nos trópicos, uma vez que as nuvens são importantes controladores do balanço de radiação da superfície terrestre e qualquer variação em suas propriedades teria um forte impacto no clima global (RECUERO, 2003).

Na Bacia Amazônica a estação chuvosa ocorre entre os meses de novembro a março. Durante este período, a concentração de partículas de aerossol nas nuvens é pequena (em torno de 100 a 3000/cm³) e na Amazônia a CLP é relativamente limpa. Os picos de concentração de aerossóis ocorrem quando os ventos estão de sudeste, o que representa a advecção da cidade de Manaus (a fonte da poluição do ar é oriunda da cidade de Manaus na estação úmida, mas não na seca). A estação seca ocorre entre os meses de maio e setembro. Nesta, a concentração de partículas é alta (15000 a 30000/cm³), pois a queima de biomassa não é mais reprimida pelas precipitações intensas. Os picos na concentração de partículas de aerossol ocorrem quando a direção do vento está entre 170-200 graus. Isto representa a advecção do ar com grande influência das queimas de biomassa do sul amazônico. Essa concentração influencia o clima de forma direta uma vez que aumenta o espalhamento da radiação, o que pode afetar a taxa fotossintética, além do balanço regional do carbono (ARTAXO et al, 2005; AHLM et al., 2010).

Os autores acima citados ainda salientam que a absorção da radiação solar por partículas de fumaça pode diminuir a umidade relativa e aumentar a temperatura na camada de aerossóis. Isto reduz a nebulosidade e modifica o

perfil de estabilidade atmosférica que pode afetar os fluxos turbulentos de calor, umidade e de partículas de aerossol.

A quantidade de partículas oriundas de atividades humanas (antropogênicas) tem aumentado de forma significativa da era pré-industrial até os dias atuais. Estas, assim como outras, podem impactar o clima da Terra. Se as partículas forem higroscópicas, podem modificar o albedo médio das nuvens, seu ciclo de vida e a formação da precipitação. Por alterarem o balanço de energia da Terra, podem ser determinantes nas condições de estabilidade da troposfera, modificam a formação das nuvens isto devido a sua capacidade de absorver e espalhar radiação solar. Como todas as gotículas são formadas de partículas de preexistentes de aerossol, que agem como NCNs, o aumento na carga de aerossóis muda a composição das nuvens (i.e. distribuição de tamanho das gotículas de nuvens). E isto determina, em grande medida, o processo de formação de precipitação. O predomínio de aerossóis antropogênicos, como os de poluição urbana e regional e de queima de biomassa, sobre a área continental significa que a composição, precipitação, o ciclo hidrológico e os sistemas de circulação atmosférica são todos afetados tanto pelos impactos radiativos quanto pelos microfísicos dos aerossóis. O efeito dos aerossóis de fumaça oriundos de queimas de biomassa nas nuvens representa uma das maiores incertezas na estimativa das consequências antropogênicas no clima (ALTARATZ et al., 2010; KAUFMAN e KOREN, 2006; ROSENFELD et al., 2008).

O efeito dos aerossóis nas nuvens e na precipitação contribuem para uma das maiores incertezas na estimativa da contribuição antropogênica para as mudanças climáticas. Há duas formas nas quais os aerossóis podem modificar as propriedades das nuvens: por processos físicos e radiativos. Estas duas formas iniciam vários *feedbacks* que adicionam complexidade para o sistema e tem diferentes susceptibilidades a carga de aerossol. Nuvens são susceptíveis a concentração inicial e tamanho dos NCNs. Mudanças na concentração das partículas de aerossol produzem alterações no tamanho das gotas de nuvem e, portanto afetam as taxas de condensação e evaporação, liberação de calor latente, eficiência de coalescência e coalescência e as propriedades das nuvens, como refletância, tempo de vida, tamanho e precipitação (KAUFMAN e KOREN, 2006; KOREN et al., 2008).

Os estudos dos aerossóis no sistema climático estão relacionados com as análises dos efeitos direto e indireto destes no balanço radiativo da atmosfera. O efeito indireto atua diretamente no tempo de vida da nuvem, já que o aumento no tempo de vida desta está associado à redução de sua eficiência precipitante. Além destes existe também o efeito semi direto que consiste no aquecimento da atmosfera devido à absorção da energia radiativa pelos aerossóis o que vai induzir a evaporação das nuvens e a estabilização da atmosfera (ROSÁRIO, 2011).

2.1.3 As queimadas e os aerossóis

Queima de biomassa incluem as causadas por iniciativas humanas para o plantio, assim como as causadas de formas naturais, por descargas elétricas que induzem fogo, apesar de menos frequentes (JORDAN et al., 2007). São as maiores responsáveis pela contribuição de gases traços e aerossóis na América do Sul, oriundas das queimadas de florestas e cerrados, que ocorrem principalmente na estação seca. Estas podem diminuir até 35% da radiação UV-B (λ entre 280 e 315 nm) (POSSANI et al., 2006b).

Dentre regiões em que a queima de biomassa é bastante frequente no globo, estão África, Austrália, América do Sul e Ásia. Durante a queima de biomassa, uma grande quantidade de partículas é lançada na atmosfera e isto altera a qualidade do ar localmente, assim como o clima global. O material lançado na atmosfera pelas queimas de biomassa consiste de BC, materiais orgânicos e matérias orgânicas parcialmente oxidadas (RECUERO et al, 2004). É estimado que 30% das emissões globais de aerossóis são oriundas das queimadas de práticas agrícolas e limpeza de terrenos. Isto resulta em valores altos de espessura óptica durante a estação seca, assim como em uma redução no tamanho do aerossol (POWDER, 2003).

De julho a outubro são registrados altos índices de queimadas no sul da Amazônia e no centro do Brasil. Sessenta e um por cento dos picos de espessura óptica ocorrem entre esses meses que é um período característico de queimadas na Amazônia e no centro do país. Acredita-se que esses picos tenham origem das queimadas da Amazônia, já que os aerossóis de

queimadas, que interagem com a radiação ultravioleta, podem percorrer grandes distâncias (POSSANI et al., 2006b).

Quantificar o impacto dos aerossóis nas queimas de biomassa no clima regional e global é problemático devido à complexibilidade na química e física dos aerossóis, assim como suas propriedades óticas (ABEL et al., 2005).

Partículas de fumaça de queimadas se dispersam rapidamente ficando presas na camada de inversão. Estas se misturam com partículas do solo, emissões biogênicas de florestas e outros poluentes antropogênicos. Os focos mais intensos têm, frequentemente, sobre eles uma nuvem cumulus (conhecida como pyrocumulus), ilustrada na Fig. 5, que age processando a fumaça antes desta ser lançada na atmosfera. Em alguns casos, estas nuvens penetram profundamente na troposfera, onde podem ser lançadas pela ação do vento. As camadas de fumaça são relativamente finas, com grande extensão horizontal e podem ser transportadas por grandes distâncias, longe de seu local de origem (RECUERO, 2003).



Figura 5 – Foto de uma pyrocumulus

Fonte: <http://upperweather.com/bblog/01199653313>

A modificação na estrutura termodinâmica da atmosfera pelos aerossóis de queimadas é através do resfriamento, em superfície, e pelo aquecimento, em níveis médios. Como consequência a formação convectiva é inibida devido à estabilização da atmosfera. Na Amazônia a redução do fluxo solar pela absorção de partículas de aerossóis e o aumento da radiação difusa ocorrem durante o período das queimadas (ARTAXO et al., 2006).

Simioni e Sampaio (2011) monitoraram as principais fontes de queimadas na América do Sul, a fim de detectar a influência dos aerossóis oriundos destas queimadas no Rio Grande do Sul em agosto de 2010. Neste período foram observados pelo sensor MODIS, uma grande quantidade de aerossóis sobre o centro do estado. Esta grande quantidade de partículas, ocorreu devido a presença de uma massa de ar seco com deslocamento no sentido centro – oeste – sul, que ocasionou o transporte das partículas.

2.1.4 Transporte de aerossóis

Circulações atmosféricas de escala global e sinótica resultam em impactos radiativos de aerossóis em locais bastante distantes de sua origem. Poluição urbana e aerossóis oriundos de queimas de biomassa e de desertos foram observados a quilômetros de distancia de suas regiões fontes (POWDER, 2003).

Recuero et al. (2004) analisaram o transporte de plumas de aerossóis durante a estação de queimadas no ano de 2002, nas regiões de Ji-Paraná e Brasil Central, para algumas regiões da América do Sul. Neste estudo foi constatado que as partículas de queima de biomassa são transportadas devido a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sistemas frontais e sistema de pressão Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), além da circulação de grande escala.

Na Fig. 6 mostra-se o transporte da pluma de aerossóis na presença de sistemas meteorológicos diversos. Nesta, foi observado que a ASAS posicionada na costa brasileira, entre as regiões nordeste e sudeste, faz com que a massa de ar penetre o continente e atinja a região fonte de emissão das partículas. A entrada da massa de ar no continente, está relacionada com a posição da ASAS, pelas regiões nordeste ou sudeste. Nestas situações, a pluma de fumaça é deslocada para a região Sul do Brasil. Entretanto se a massa de ar penetrar o continente pela região nordeste, a pluma é deslocada para oeste sobre o estado do Mato Grosso do Sul, limpando a atmosfera na região leste do estado (6b). Na presença de um sistema de alta pressão (sobre o estado de São Paulo), a pluma acopla-se a este sistema, seguindo em direção ao Oceano Atlântico.

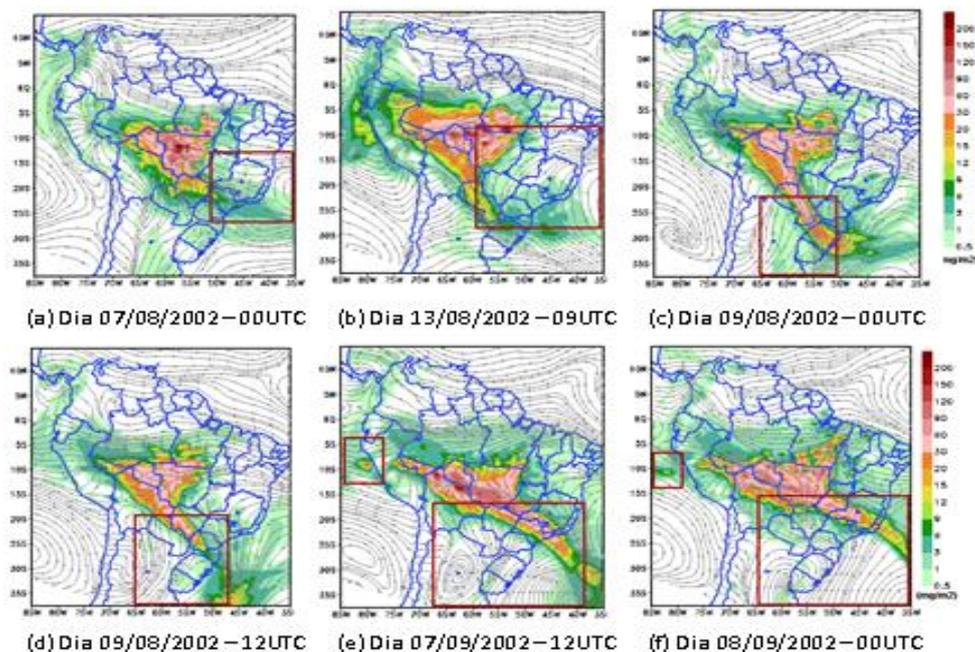


Figura 6 – Simulações numéricas obtidas pelo modelo CATT-BRAMS do material particulado e do campo de vento em 700hPa sobre a América do Sul na estação seca em 2002. Os quadros em vermelho indicam os padrões de circulação observados.

Fonte: RECUERO et al., 2004.

Freitas et al. (2005), afirmam que as fontes emissoras associadas a queimadas emitem partículas com temperaturas superiores a do ambiente; isto ocasiona um levantamento destas partículas. A estabilidade é um dos fatores principais para a altura destas partículas. Outro fator é a interação entre a fumaça e o ambiente, pelos turbilhões que fazem com que o ar frio penetre para dentro da pluma de fumaça, o que vai diluí-la e reduzir sua flutuação.

Os autores ainda ressaltam que sistemas convectivos rasos e não precipitantes que se formam no topo da CLP transportam gases e partículas para a baixa troposfera, ajudando na dispersão destes. Sistemas convectivos profundos e precipitantes agem de forma distinta, dependendo das características higroscópicas das partículas. Partículas pouco higroscópicas são transportadas por correntes ascendentes até o topo da nuvem na alta troposfera. Uma vez na alta troposfera, a velocidade maior dos fluxos de ar transporta-as para regiões distantes do local da emissão. Este transporte pode ser de escala local, continental e até global.

2.1.5 Aerossóis de vulcões

Vulcões têm um papel significativo no clima global. Pelas emissões de gases do interior da Terra eles afetam a composição dos gases da atmosfera. A magnitude da temperatura pode ser modificada dependendo da quantidade de enxofre liberada para a atmosfera. Gases de enxofre são oxidados em aerossóis de enxofre na estratosfera, onde podem residir por um ano ou mais. Geralmente estes aerossóis são responsáveis por resfriar a superfície, reduzindo a quantidade de radiação que chega a esta. Emissões vulcânicas e os aerossóis estratosféricos resultantes também têm uma grande influência na química da estratosfera através de reações químicas que tomam lugar dos aerossóis da superfície e nas mudanças de temperatura que os aerossóis causam na estratosfera. Estas emissões resultam no resfriamento da estratosfera o que pode ter significantes efeitos nesta, assim como no transporte e na dinâmica (HARTAMANN e MOUGINIS-MARK, 1999; BINGEN et al., 2006).

Vulcões representam uma das mais importantes fontes de poluentes na atmosfera, durante e entre as erupções. Estudos sobre os vulcões El Chichón, México (1982) e Monte Pinatubo nas Filipinas (1991), destacaram a importância química e radiativa das plumas de aerossóis associadas a grandes erupções vulcânicas. Estes contribuíram para a compreensão da composição e da evolução das plumas de vulcão, assim como seus impactos. Aerossóis troposféricos de vulcões desempenham um importante papel na radiação da atmosfera, tanto pelo retro espalhamento e pela absorção de radiação de onda curta, quanto modificando a cobertura e propriedades radiativas das nuvens. Podem afetar ecossistemas terrestres e a saúde humana em escalas locais e regionais. (MATHER et al., 2003).

A erupção do vulcão Puyehue localizado no Chile (40°35'S, 72°05'O), em 2011 lançou uma grande quantidade de cinzas vulcânicas na atmosfera. Estas atingiram diversas localidades da América do Sul. Estas cinzas atingiram a Oceania por terem sido lançadas a altas altitudes e devido a sua fluutuabilidade. Neste episódio foram observados, com dados do sensor MODIS, valores altos de EOA na região próxima ao vulcão. No sul do Brasil foram observados menores valores de EOA. Constatou-se também que distúrbios

baroclínicos com circulação ciclônica transportaram estas cinzas para o sul do Brasil (SILVEIRA et al., 2011; RIBEIRO e MARIANO, 2011).

2.2 Sensoriamento remoto e os aerossóis

A energia radiante refletida e emitida pela Terra leva consigo propriedades da atmosfera e superfície com medidas de comprimento de onda e propriedades angulares e de polarização desta energia. Sensores a bordo de satélites podem quantificar várias propriedades atmosféricas e de superfície. Dois instrumentos como o MODIS e MISR (*Multi-angle Imaging Spectroradiometer*), encontrados nos satélites TERRA e AQUA, medem concentrações globais assim como propriedades dos aerossóis desde o ano de 2000. Sobre o oceano, o MODIS usa uma assinatura espectral de aerossóis em um intervalo entre 0,47 – 2,1 μ m, isto, para distinguir partículas de poluição, pequenas, de partículas de sais marinhos e poeira, grossas. Sobre o continente, o MODIS usa um canal de 2,1 μ m para observar as propriedades das superfícies, estimar a refletância em comprimentos de onda visíveis e derivar a EOA da refletância residual e do topo da atmosfera (KAUFMAN et al., 2002).

Bingen et al. (2006) afirmam que caracterizar as propriedades microfísicas dos aerossóis é importante para quantificar seu impacto nos processos atmosféricos. Medidas de IR só dão acesso a parâmetros integrados na microfísica do aerossol, portanto o sensoriamento remoto de IR permite observações até em altitudes baixas, mesmo em períodos de alta concentração de aerossol. As propriedades das partículas de aerossol variam com o tempo e de uma região para outra, podem viajar por longas distâncias levadas pelas correntes de vento. (MASMOUDI et al., 2003; SILVA et al. 2005).

Otero et al. (2011) estudaram um evento de queima de biomassa entre agosto e setembro, que compreende o período de queimadas para agricultura. Com o uso de instrumentos detectores de radiação, observou nuvens de aerossol oriundas de queimadas com uma importante espessura óptica fazendo com que ela seja de fácil localização para estes instrumentos, na condição de céu limpo. Além disso, utilizando dados do sensor MODIS, mostraram pontos da pluma de fumaça oriundas da Amazônia em Buenos

Aires. Estes aerossóis foram transportados pela circulação atmosférica, chegando à Argentina, Paraguai e sul do Brasil. A espessura Óptica da Atmosfera observada pelo MODIS no período de dois dias, mostrou máximo de EOA na Amazônia e um aumento na Argentina.

Ulke (2007) analisou o transporte de aerossóis na presença de um JBN que levou o material particulado da Amazônia para o Rio Grande do Sul. Observaram-se altos valores de EOA relacionados com o mínimo no núcleo do jato. Também se notou que os altos valores de EOA tiveram origem nas queimas de biomassa. Ulke (2009) relacionou o transporte de aerossóis de dois eventos de jato, o SALLJ (*South America Low Level Jet*, Jato de Baixos Níveis da América do Sul) e o CJ (*Chaco Jet*, Jato do Chaco). Observou 30% de eventos de SALLJ e 35% de CJ. Neste período, o valor de EOA foi de 0,12 e de 1,12 para o EA. Também foi observado um aumento de EOA durante eventos de CJ, acordando com a presença de maior carga de aerossóis. O alto valor de EA indica a relação com aerossóis de queima de biomassa, tipicamente material particulado fino.

No trabalho de Recuero et al. (2004), na América do Sul, a análise do transporte da pluma de aerossóis no ano de 2002 mostrou que a EOA na banda de $0,66\mu\text{m}$ e o EA nas bandas de $0,47$ e $0,66$ tiveram como valor máximo de EOA de 1,2, enquanto para o EA não foram observados valores no MODIS, na presença de partícula na fração de moda grossa. Para as partículas de moda fina, foi observado a maior concentração entre 2,5 e 2,6. Em Porto Alegre, as partículas de aerossóis observadas são devidas a circulação de grande escala. O EA diminuiu cerca de 20%, devido à nebulosidade existente.

Haag e Krenzinger (2010) observaram que durante a estação seca na Amazônia, época de queimadas, os valores de EOA em $550\mu\text{m}$, obtidos através do sensor MODIS, foram em torno de 0,9 no Centro - Oeste do Brasil, Bolívia e Paraguai. No Rio Grande do Sul o valor máximo no mês de setembro de 2007 foi de 0,2.

Fundamentação Teórica

3.1 Lei de Beer (Beer-Lambert-Bouguer)

Considerando a propagação da radiação em um comprimento de onda λ , através de uma camada $d(x)$ perpendicular a um feixe de intensidade $F(\lambda)$, a extinção da radiação de um caminho transversal, infinitesimal, dx é linearmente proporcional à quantidade de matéria ao longo do caminho.

$$F(x + dx, \lambda) - F(x, \lambda) = -b(x, \lambda)F(x, \lambda)dx \quad (\text{Equação 1})$$

Onde $b(x, \lambda)$ é chamado de coeficiente de extinção e é proporcional à densidade do material no meio. A extinção inclui absorção e o espalhamento, cada um dos quais remove fótons do feixe. Em contraste à absorção, a energia radiante espalhada se mantém na forma de radiação, mas a direção é alterada da radiação incidente. Dividindo (Equação 1) por dx e fazendo $dx \rightarrow 0$:

$$\frac{dF(x, \lambda)}{dx} = -b(x, \lambda)F(x, \lambda) \quad (\text{Equação 2})$$

A equação 2 é conhecida como Lei de Beer. A absorção e o espalhamento ocorrem simultaneamente, isto porquê, todas as moléculas e partículas absorvem e espalham. A atenuação da radiação em um meio real é expressa pela seção transversal de extinção (b) que é definida pela soma das seções transversais de absorção (b_a) e espalhamento (b_s) como:

$$b = b_a + b_s \quad (\text{Equação 3})$$

A seção transversal de extinção é um fator de ponderação indicando a eficiência em cada comprimento de onda com que a molécula absorve ou espalha radiação ou também pode ser compreendido em termos da probabilidade de uma molécula absorver ou espalhar um fóton incidente (ECHER e SOUZA,2001; SEINFELD e PANDIS, 2006).

3.2 Espessura Óptica

Para quantificar a atenuação da radiação em um meio contendo um material opticamente ativo define-se a espessura óptica. Esta indica a quantidade de material absorvedor e espalhador opticamente ativos encontrados no caminho atravessado pelo feixe de radiação, sendo adimensional. É expressa como a integral ao longo do caminho óptico (dx) do produto da quantidade total de moléculas presentes no meio (N) e a seção transversal de extinção (σ_λ) para cada comprimento de onda. Desta forma:

$$\tau(\lambda) = \int \sigma_\lambda N(x) dx \quad (\text{Equação 4})$$

Assim como definido pela equação 2 da Lei de Beer, a espessura óptica é a soma da espessura óptica devido ao espalhamento (τ_a) e absorção (τ_s):

$$\tau = \tau_a + \tau_s \quad (\text{Equação 5})$$

Seu uso mais frequente é aquele no qual dois pontos, de diferentes altitudes, recebem radiação de formas diferentes e se deseja saber como a radiação solar é atenuada à medida que ultrapassa a atmosfera. Por definição, a espessura óptica é igual a 0 ($\tau = 0$) no topo da atmosfera e aumenta, como a pressão, constantemente de zero no topo da atmosfera (TOA) até seu valor em qualquer altitude z (ECHER e SOUZA, 2001; SEINFELD e PANDIS,2006).

$$\tau(z, \lambda) = \int_z^{TOA} b(z', \lambda) dz' \quad (\text{Equação 6})$$

Na ausência de espalhamento, a absorvidade monocromática se aproxima em unidade, exponencialmente, com o aumento da espessura óptica. (WALLACE e HOBBS, 2006).

3.3 Expoente de Angström

Os aerossóis apresentam sua espessura óptica pela Lei de Angström (ECHER e SOUZA, 2001). O expoente de Angström – EA - (α) é computado de valores espectrais da espessura Óptica da Atmosfera.

O expoente de Angstrom é um parâmetro usualmente utilizado em ciências atmosféricas, uma vez que lida com as propriedades ópticas das partículas (WAGNER e SILVA, 2008).

A dependência espectral da espessura óptica pode ser aproximada (dependendo da distribuição de tamanho) por:

$$\tau\alpha = \beta\lambda \quad (\text{Equação 7})$$

Onde α é o expoente de Angström, β é a espessura óptica (em $1\mu\text{m}$). O expoente de Angström (computado de medidas de τ em dois comprimentos de onda diferentes) pode ser usado para determinar τ em outros comprimentos de onda usando a relação:

$$\tau_{\lambda} = \tau_{\lambda_0} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-\alpha} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde τ_{λ} representa a espessura óptica no comprimento de onda λ e τ_{λ_0} é a espessura óptica no comprimento de onda λ_0 .

O expoente de Angstrom fornece informação adicional à espessura óptica sobre o tamanho da partícula, isto é, quanto maior o expoente, menor o tamanho da partícula. Além disso, informa sobre a função de fase do aerossol e a magnitude relativa da radiância do aerossol em diferentes comprimentos de onda (NASA, 2012).

Valores de $\alpha \leq 1,0$ indicam distribuição de tamanho dominados por aerossóis de moda grossa (raio $\geq 0,5\mu\text{m}$) que são tipicamente associados com poeira e sais marinhos e valores de α entre 1,5 e 2, indicam distribuição de tamanho para aerossóis de moda fina (raio $\leq 0,5 \mu\text{m}$) que, usualmente, são

associados à poluição urbana e/ou queima de biomassa. O expoente de Angström pode ser um bom indicador da fração de partículas pequenas com raio entre 0,057 – 0,21 μm relacionados com partículas com raio entre 1,8 -4 μm para aerossóis troposféricos (SHUSTER et al., 2006).

Os autores ainda afirmam que o conhecimento da espessura Óptica da Atmosfera através da maior parte da região espectral de ondas curtas (~0,3-5 μm) é necessário para computar a forçante radiativa do aerossol de onda curta na superfície, mas a absorção de gases e vapor d'água evita medidas de espessura óptica em todos os comprimentos de onda. Esta dificuldade é facilmente contornada, pois Angström notou que a dependência espectral de extinção pelas partículas pode ser aproximada pela equação 8.

Uma vez que o expoente de Angström é facilmente medido, como por exemplo, usando dados da rede de fotômetros solares da NASA (AERONET), em superfície seu uso esta se tornando cada vez mais acessível a consultas por satélite. A real utilidade desse parâmetro está em sua relação empírica à distribuição do tamanho do aerossol. Como exemplo, α foi usado para caracterizar os componentes dos aerossóis marinhos em ilhas, aerossóis de queima de biomassa na América do Sul e na África e aerossóis urbanos na Ásia (SHUSTER et al., 2006).

O EA é aplicado para descrição do comportamento espectral da seção transversal de extinção e transmissão atmosférica. Além disto, é utilizado para as diferentes propriedades óticas, como por exemplo, nos coeficientes de espalhamento e retro espalhamento. Permite interpolar e extrapolar as propriedades óticas das partículas de aerossol, além da microfísica das partículas relacionadas com o tamanho do aerossol (WAGNER e SILVA, 2008).

3.4 Distribuição de tamanho

Na atmosfera há uma significativa concentração de partículas de aerossol, podendo chegar a $10^{-7} - 10^{-8} \text{ cm}^{-3}$. O intervalo de diâmetro destas partículas pode chegar a mais de quatro ordens de magnitude, assim como de alguns nanômetros até cerca de 100 μm . O tamanho destas partículas afeta tanto seu tempo de vida na atmosfera quanto suas propriedades físicas e químicas (uma abordagem mais detalhada sobre isto é feita no tópico 3.5).

Uma partícula de aerossol pode ser considerada como um constituinte de um número inteiro k de moléculas. A menor partícula de aerossol pode ser definida, em princípio, como aquela que contém duas moléculas (SEINFELD e PANDIS, 2006).

A distribuição de tamanho dos aerossóis influencia a dinâmica do aerossol, seus processos de remoção e produção, transformação de tamanho, propriedades ópticas e efeitos radiativos. Esta distribuição depende fortemente das fontes e dos dissipadores, assim como de processos meteorológicos existentes durante o ciclo de vida dos aerossóis (LATHA e BADARINATH, 2005).

Como resultado de emissões de partículas e a variedade de processos subsequentes à distribuição dos aerossóis atmosféricos pode ser caracterizada por um número de modas. O volume ou a distribuição de massa é dominada por duas modas: a de acumulação (de $\sim 0,1$ a $0,2\mu\text{m}$) e a moda grossa (de ~ 2 a $50\mu\text{m}$).

Partículas de moda de acumulação são resultado de emissões primárias, condensação de sulfatos secundários, nitratos, compostos orgânicos a partir da fase gasosa e coagulação de partículas menores. Em muitos casos a moda de acumulação consiste de duas submodas, a moda de condensação e a moda de gota. A submoda de condensação é resultado de emissões primárias de partículas e pelo crescimento de partículas menores por coagulação e condensação de vapor. A submoda de gota é criada durante o processo de nuvem de algumas das partículas da moda de acumulação. Partículas de moda grossa são usualmente produzidas por processos mecânicos como vento ou erosão (poeira, sal marinho, polens e etc.). A maior parte do material da moda grossa é primário, mas pode haver sulfatos e nitratos secundários (SEINFELD e PANDIS, 2006). A Fig. 7 refere-se a distribuição de tamanho das partículas de aerossol de acordo com a suas respectivas modas.

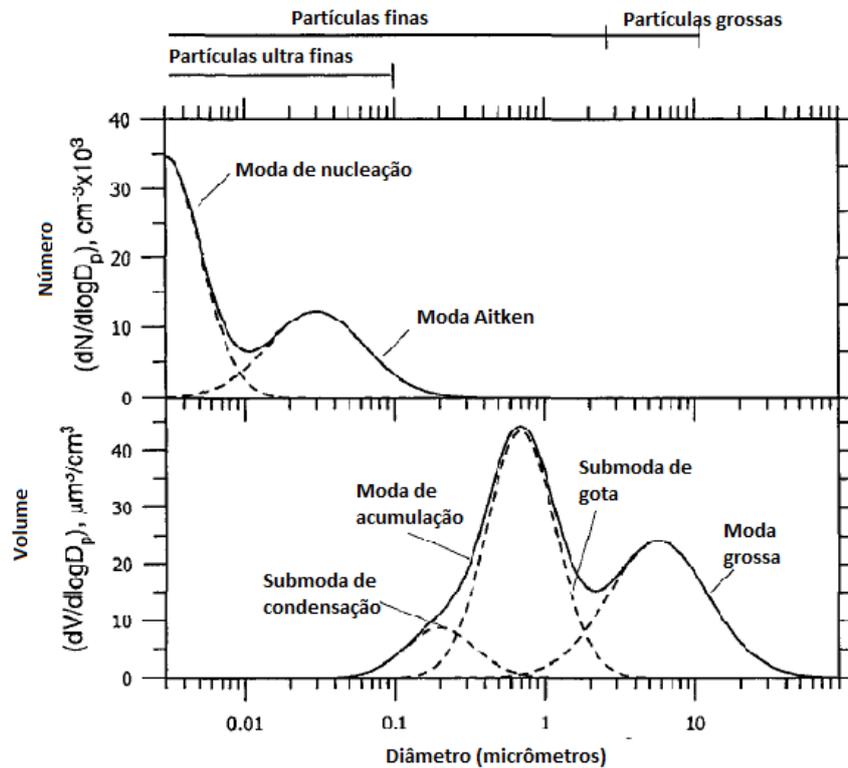


Figura 7 - Distribuição de tamanho e volume das partículas atmosféricas, com modas diferentes.

Fonte: Adaptado de SEINFELD e PANDIS, 2006, p. 369.

Outra forma de se considerar a distribuição de tamanho é se considerar o número de partículas ao invés da massa. Partículas com diâmetros maiores que 0,1 μm , que englobam praticamente toda a massa do aerossol são negligenciáveis comparadas a partículas menores que 0,1 μm .

Duas modas geralmente dominam o número de distribuição dos aerossóis em áreas urbanas e rurais: a moda de nucleação (partículas menores do que 10nm ou menos) e os núcleos de Aitken (partículas com diâmetros entre 10 e 100nm ou menos). Partículas de moda de nucleação são geralmente aerossóis novos, criados *in situ* da fase gasosa pela nucleação. A moda de nucleação pode ou não existir. Esta existência vai depender das condições atmosféricas. A maior parte das partículas de Aitken tem seu início de vida como partículas primárias e o material secundário condensa nela à medida que elas são transportadas pela atmosfera. As partículas de moda de nucleação têm massa desprezível, enquanto que as partículas de Aitken grandes formam a moda de acumulação na distribuição de massa.

Partículas com diâmetros maiores que $2,5\mu\text{m}$ são ditas como partículas de moda grossa, enquanto que aquelas com diâmetros menores que $2,5\mu\text{m}$ são ditas como partículas de moda fina. As partículas finas incluem o maior número das partículas e a maior fração de massa. As partículas com diâmetro menor do que $0,1\mu\text{m}$ são chamadas de partículas ultrafinas (SEINFELD e PANDIS, 2006).

A variabilidade meteorológica pode gerar processos que podem modificar as distribuições de tamanho. Valores de umidade relativa acima de 50% afetam a massa das partículas (apesar disto, neste trabalho, a influência da umidade nos aerossóis não será abordada). Entretanto, no caso de moda fina (raio $\leq 0,5\mu\text{m}$) há uma diferença, pois aerossóis deste tipo consistem predominantemente de material solúvel, enquanto que os de moda grossa consistem de material mais denso (NICOLÁS et al., 2009).

3.5 Processos de remoção de aerossóis

Observações de satélite revelam grandes evidências de transportes de partículas e gases. Este transporte pode ocorrer em escalas intercontinentais até globais. Como exemplo, a poeira do Saara pode ser transportada para as Américas e poeira do Deserto do Gobi, pode chegar à costa leste da América do Norte. Se os aerossóis são produzidos por conversão gás-partícula, como aerossóis vulcânicos, um transporte maior é necessário porque o tempo necessário para a conversão das partículas (relativamente pequenas) produzidas por este processo leva a um maior tempo de residência na atmosfera. Este transporte se dá basicamente por dois processos de remoção, através da deposição seca e úmida (WALLACE e HOBBS, 2006).

3.5.1 Deposição seca

Deposição seca é o transporte de gases e partículas da atmosfera para a superfície sem a presença de chuva. Os fatores que governam a deposição seca de uma espécie gasosa ou de uma partícula são: o nível de turbulência atmosférica, propriedades químicas das espécies depositadas e da natureza da

superfície. A turbulência da atmosfera, especialmente nas camadas próximas à superfície, governa a taxa nas quais as espécies serão depositadas.

Para gases, a solubilidade e a reatividade química podem afetar a absorção na superfície. Para partículas, o tamanho, a densidade e a forma podem determinar se a absorção pela superfície vai ocorrer, uma vez que a superfície é um fator da deposição seca. Uma superfície não reativa pode não permitir a absorção de alguns gases; já uma superfície lisa pode levar a partícula a não ser absorvida. Superfícies naturais, como as vegetadas, geralmente promovem deposição seca (SEINFELD e PANDIS, 2006).

3.5.2 Deposição úmida

A deposição úmida corresponde a cerca de metade do fluxo total de poluentes em superfície, embora sua contribuição anual ou em um curto período de tempo é fortemente dependente do tipo de poluente. Inclui dois processos de remoção: de limpeza dentro da nuvem (precipitação), quando os poluentes são removidos durante produção e crescimento de uma gotícula de nuvem que posteriormente cairá em forma de chuva, neve, etc. e por limpeza abaixo da nuvem (lavagem), quando o poluente é capturado pela queda da precipitação. A eficiência destes dois processos depende das propriedades dos poluentes como a forma e a distribuição da partícula, reação química etc., assim como de considerações atmosféricas como altura do nível de congelamento (acima ou abaixo da nuvem). Em geral, partículas pequenas podem agir como núcleos de condensação em situações de chuva quente e também como agentes efetivos de nucleação de gelo; assim, eles são retirados facilmente pela chuva. Partículas grandes serão removidas por estes mecanismos com mais facilidade do que as partículas pequenas de mesma composição química (HOSKER e LINDBERG, 1982).

3.6 Sensor MODIS (*MODerate-resolution Imaging Spectrometer*)

O sensor MODIS (*MODerate-resolution Imaging Spectrometer*) é o principal instrumento do EOS (*Earth Observing System*). Seu conceito tem origem em vários sensores precursores sendo o principal o AVHRR (*Advanced*

Very High Resolution Radiometer) a bordo dos satélites da série NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), do período de 1978 à 1986 denominado TIROS-N (*Television and Infrared Operation Satellite –Next Generation*) para o monitoramento de tempo e clima.

O sensor MODIS tem diversas inovações em relação aos seus precursores, inovações estas que vão desde uma melhoria na qualidade dos detectores e no sistema de imageamento. A qualidade geométrica das imagens permite o acompanhamento e monitoramento preciso das alterações na superfície terrestre. O avanço do sensor MODIS na área de sensoriamento remoto tem viabilizado o uso dos dados MODIS em um grande número de aplicações para melhor conhecimento e entendimento do nosso planeta proporcionando uma condição para estudos multidisciplinares com o intuito de avaliar o crescente impacto da atividade antrópica e monitorar as mudanças na superfície e na atmosfera (RUDORFF et al., 2007).

O MODIS é o principal instrumento dos satélites TERRA e AQUA. Ele foi projetado para fornecer uma série de observações globais da superfície terrestre, oceano e atmosfera nas regiões do visível (VIS) e do infravermelho (IR) do espectro magnético, cobrindo a terra a cada 2 dias. Possui uma alta sensibilidade radiométrica (12 bits) em 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 a 14,4 μm do espectro eletromagnético. Duas bandas são adquiridas na resolução de 250m, outras cinco bandas na resolução de 500 m e as demais 29 bandas em 1km. A varredura de 55° para cada lado na órbita de 705km de altura resulta numa faixa imageada de 2.330km, com cobertura global em 2 dias. O sistema óptico consiste de um telescópio com dois espelhos fora de seu eixo focal direcionando a radiação incidente para quatro sistemas óticos refrativos, um para cada uma das 4 regiões espectrais, VIS, Infravermelho Próximo (IVP), Infravermelho Médio (IVM) e Infravermelho Termal (IVT) cobrindo toda a faixa de 4 μm a 14,4 μm (RUDORFF et al., 2007).

As 36 bandas espectrais do sensor MODIS estão localizadas em função de diferentes comprimentos de onda, escolhidos para a observação de características das propriedades das nuvens e sua dinâmica, das propriedades da vegetação na cobertura terrestre e da temperatura da superfície dos oceanos no mundo. Isto para evitar as bandas de absorção atmosférica, além de outras feições, durante o monitoramento da superfície terrestre. As

características dessas bandas permitiram o desenvolvimento inicial de 44 produtos MODIS de várias áreas, como mostrado na tab.1.

Tabela 1- Canais MODIS utilizados em análise da atmosfera (aerossóis).

Fonte: Adaptado de RUDORFF et al. (2007).

Canal	λ (μm)	MODIS
1	0,659	Aerossol e Espessura óptica de nuvens
2	0,865-0,876	Propriedades do aerossol
2,17-19	0,890-0,915	Estimativa de água precipitável
1,2	0,620, 0,841	Albedo e espalhamento simples
1-8	0,640-0,405	Espessura óptica
1-8	0,650-0,410	Distribuição de tamanho (sobre água)
1-8	0,670- 0,420	Raio efetivo
3	0,479	Massa integrada
3	0,470	Coluna de aerossol: massa, espessura óptica (τ_a)
4	0,555	Espessura óptica (τ_a)

3.6.1 TERRA – Primeiro satélite do programa EOS

O satélite TERRA foi lançado com sucesso em dezembro de 1999. Era conhecido inicialmente por EOS-AM, pois fazia observações no período da manhã. Tem a bordo os sensores: CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), MODIS e MISR da NASA; ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) do Japão; e MOPITT (*Measurement of Pollution in the Troposphere*) do Canada. O objetivo de pesquisas do programa EOS contemplados na plataforma TERRA incluem o estudo de nuvens, aerossóis, balanço de radiação, ciclo do carbono, entre outros.

Tem órbita quase polar com inclinação de 98,2° e heliosíncrona com passagem pelo Equador as 10:30h da manhã na sua órbita descendente. A repetitividade é de 16 dias no Equador.

3.6.2 AQUA – Segundo satélite do programa EOS

É o segundo satélite do EOS, foi lançado em maio de 2002, inicialmente nomeado de EOS-PM, por cruzar o Equador à tarde, desta forma complementando os dados obtidos pelo satélite TERRA sob diferentes condições de atmosfera e iluminação. Tem por objetivo subsidiar a coleta de informações sobre o ciclo da água na Terra, inclusive a evaporação dos oceanos, vapor d'água na atmosfera, nuvens, precipitação, umidade da superfície, gelo no mar, entre outros. Além desses, o satélite AQUA mede fluxos de energia radiativa, aerossóis, cobertura vegetal, fitoplâncton e matéria orgânica dissolvida nos oceanos, etc. O satélite tem seis instrumentos: 1) o AIRS (*Atmospheric InfraRed Sounder*); 2) a AMSU-A (*Advanced Microwave Sounding Unit-A*); 3) o HSB (*Humidity Sounder for Brazil*); 4) o AMSR-E (*Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS*); 5) o MODIS; e 6) o CERES. Cada um desses instrumentos têm características específicas que em conjunto formam um sinergismo para observação da Terra.

Como missão científica, o satélite AQUA contribui para estudos interdisciplinares dos processos inter-relacionados da Terra. Isto envolve de forma integrada o estudo da atmosfera, do oceano e da superfície do solo a fim de proporcionar o entendimento da relação dos processos com as mudanças globais. Os dados da AQUA melhoram o sistema de previsão numérica do tempo e também têm importante contribuição no monitoramento da dinâmica dos ecossistemas terrestres e marinhos (RUDORFF et al., 2007).

O satélite AQUA possui órbita quase polar, inclinação de 98°, é também heliosíncrona, cruza o Equador às 13:30h na sua trajetória ascendente. A altitude da plataforma é de 705 km com período orbital de 99 minutos (RUDORFF et al., 2007).

3.7 Quantis

Uma amostra de quantil ou percentil (q_p) é um número que contém as mesmas unidades dos dados, que excede a proporção dos dados fornecidos pelo subscrito p , com $0 \leq p \leq 1$. A amostra do quantil pode ser interpretada como o valor esperado para exceder um membro escolhido aleatoriamente de um conjunto de dados, com probabilidade p . Equivalentemente a amostra do

quantil q_p , seria considerada como o $[px100]$ ^{ésimo} percentil do conjunto de dados.

Amostras de quantis são usadas em resumo de dados. É comum usar a mediana, ou $q_{0.5}$, ou o quinquagésimo percentil. Este é o valor central dos dados, de forma que dados de mesma proporção estejam acima e abaixo dele. Se o conjunto de dados contiver um número ímpar de valores, a mediana é simplesmente a estatística da ordem do meio. Se houver um número par, o conjunto de dados tem dois valores médios. Neste caso a mediana é convencionalmente considerada como sendo a média desses dois valores (WILKS,2006). Formalmente:

$$q = \begin{cases} X([n+1]/2) & n \text{ ímpar} \\ \frac{X(n/2) + X([n/2]+1)}{2} & n \text{ par} \end{cases} \quad (\text{Equação 9})$$

Neste trabalho o percentil será utilizado para quantificar o número de casos em que a EOA apresenta valores elevados (valores de EOA > Percentil 99). Supondo que o percentil 99 da EOA (P99) sobre a região de estudo seja 2,0, então 99% dos casos de EOA estão abaixo deste valor, selecionando-se os casos com maiores valores (Neste exemplo: Eventos com EOA > 2,0). Desta forma, deve-se aprofundar o estudo destes casos com o intuito de identificar o motivo destes valores mais elevados.

Metodologia

4.1 Local do estudo

A região sul do Brasil está localizada entre 34° e 22° S e 59° e 47° W, inclui os estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Tem área de aproximadamente 576.774,31 km². Limita-se ao sul do Uruguai, leste da Argentina e do Paraguai, a noroeste do Mato Grosso do Sul, sul de São Paulo e oeste do Oceano Atlântico e possui uma população de aproximadamente 27.386.891 habitantes (IBGE,2010). A Fig. 8 representa a América do Sul e a área de estudo destacada pelo quadrado em vermelho, é constituída pelos estados da região Sul do Brasil e áreas adjacentes: leste da Argentina e Paraguai, sul de Mato Grosso do Sul, Uruguai e oeste do Oceano Atlântico. As regiões adjacentes são consideradas por influenciarem, de forma significativa, os resultados apresentados.

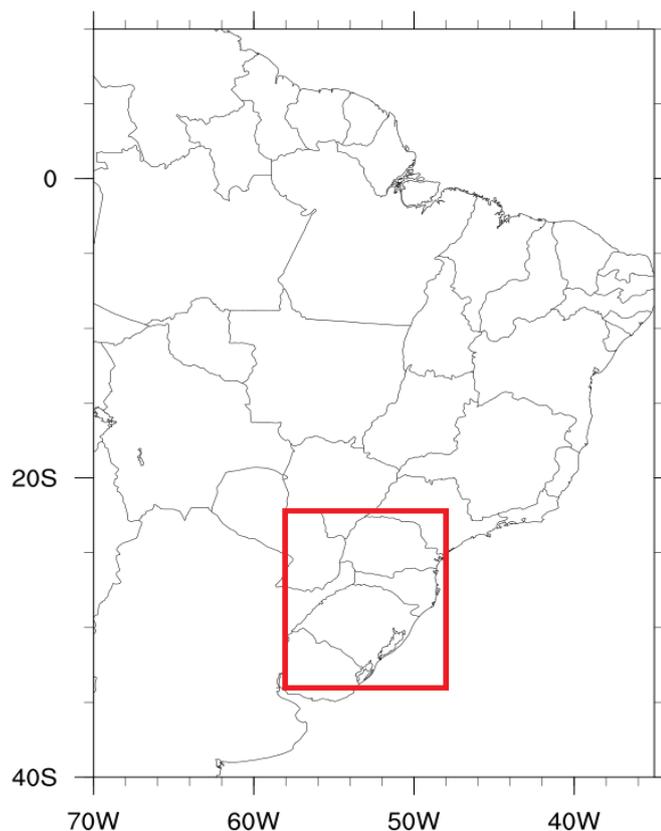


Figura 8 - Área de estudo.

4.2 Dados do Sensor MODIS

Foram utilizados dados do Sensor MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo do satélite AQUA, para a análise de EOA no comprimento de onda de $0,55 \mu\text{m}$ e EA nos comprimentos de onda de $0,47$ à $0,66 \mu\text{m}$, que correspondem aos canais verde, azul e vermelho, respectivamente, faixa do visível, no período de 2002 a 2011.

Os dados do sensor MODIS são encontrados em diferentes tipos de processamento que variam de acordo com o propósito de utilização destes. Níveis mais baixos correspondem aos níveis mais brutos de aquisição, já níveis mais altos, indicam que os dados sofreram transformações se aproximando de produtos na forma de parâmetro. Os dados utilizados no trabalho são de Nível 3 (MYD08_D3), ou seja suas variáveis são mapeadas em grades igualmente espaçadas, com preenchimento consistente e com a aplicação de filtro para remoção de pixels com detecção de nuvens (contaminados).

A resolução espacial dos dados é de 10x10 km, ou seja, 400 pixels de 500m. O produto atmosférico do MODIS é armazenado em uma grade de ângulos de latitude e longitude iguais. As células de grade são de 1X1 grau, o que significa que a saída de grade sempre será de 360 de largura por 180 de altura. A resolução temporal dos dados é de forma diária em um intervalo de 00-24 GMT (*Greenwich Mean Time*- Tempo Médio de Greenwich), resumida globalmente.

4.3 Análise da Espessura Óptica da Atmosfera (EOA) e do Expoente de Angström (EA)

A Espessura Óptica da Atmosfera (EOA), como mencionada no tópico 3.2, é usada para quantificar a atenuação da radiação. Dependendo de seu valor, a EOA pode caracterizar o aerossol como pouco ou muito atenuador de radiação.

Neste trabalho foi levado em consideração os percentis 50 ou mediana (P50), 95 (P95) e 99 (P99) para caracterizar a EOA na região. Como exemplo a mediana servirá para especificar o tipo de aerossol dominante na região de estudo, o P95 para determinar os casos de EOA máxima diária (5% dos dias de um período com maiores valores de EOA) e o P99 para auxiliar nos casos mais elevados de forma geral. Para determinação das áreas com maior influência dos aerossóis altamente atenuadores foi utilizado o Percentil 99. O limiar de EOA igual a 1,0 foi adotado para identificação do tipo de aerossol de acordo com a EOA. Dessa forma:

- Valores de EOA menores do que 1,0 classificarão os aerossóis como pouco atenuadores de radiação;
- Valores de EOA maiores do que 1,0 classificarão os aerossóis como atenuadores de radiação

O Expoente de Angström (EA) indica as propriedades ópticas das partículas, assim como sua distribuição de tamanho. Neste trabalho foram adotados valores de EA segundo Schuster et al. (2006), que são:

- EA menores ou iguais a 1,5 classificarão os aerossóis como de moda grossa;
- EA entre 1,5 e 2,0 classificarão os aerossóis como de moda fina.

A análise das duas variáveis determinará o tipo de aerossol dominante na atmosfera da região Sul. A tab. 2 refere-se a combinações de EOA e EA que foram adotadas para caracterizar o aerossol em suspensão na atmosfera, conforme apresentado por Kaufman (2002).

Tabela 2 – Combinações entre a EOA e o EA adotados para o estudo.

EOA alta	EA alto	EOA alta	EA baixo	EOA baixa	EA baixo	EOA baixa	EA alto
Aerossóis atenuadores de radiação de moda fina.		Aerossóis atenuadores de radiação de moda grossa.		Aerossóis pouco atenuadores de radiação de moda grossa.		Aerossóis pouco atenuadores de radiação de moda fina.	

Visto que é admitido que um possível aumento diário na EOA ocorra devido a presença de aerossóis de queima de biomassa, utilizou-se dados do grupo de queimadas do CPTEC/INPE para determinar a quantidade de focos de queimada ocorridos em determinados períodos/eventos de aumento da EOA.

4.4 Avaliação dos percentis (quantis)

Os três tipos de percentis citados (P50, P95 e P99) terão fins diferentes neste trabalho, porém todos servirão para caracterizar o tipo de aerossol.

- O percentil 50 (mediana ou P50) determinará o aerossol dominante na atmosfera, já que ele confere a frequência média de valores;
- O percentil 95 (P95) auxiliará a determinar os maiores valores máximos diários de EOA;

- O percentil 99 (P99) determinará as áreas com aerossóis altamente atenuadores para a climatologia de identificação dos aerossóis.

A climatologia de identificação de aerossóis consistirá em determinar quais as regiões dentro da área de estudo que apresentam valores elevados de EOA. Com ela foi possível determinar os locais onde a EOA esteve mais elevada. Esta climatologia foi feita pixel por pixel (ponto por ponto), sendo que cada pixel contém 1° de latitude por 1° de longitude da região de estudo, ou seja, 12 graus de latitude por 12 graus de longitude (área de abrangência da região de estudo consiste-se da região Sul).

O P99 foi empregado em cada ponto da área de estudo para determinar a quantidade de dados que apresentaram EOA mais elevada, já que este considera apenas 1% de um conjunto de dados. Como exemplo, considera-se o ano de 2003, do total dos 365 dias de dados, apenas 1% estava com EOA acima de 3,7.

A análise do P99 foi realizada em três períodos diferentes:

- Anual: para cada ano dentro do período de estudo e para o total de todos os anos (10 anos);
- Sazonal: para cada estação do período e para o total de cada estação (Como exemplo: todos os invernos - 2002 a 2011);
- Mensal: nas estações onde a EOA apresentou valores mais elevados serão analisados os meses correspondentes a estas.

Na análise sazonal os meses considerados para as estações foram: verão (dezembro, janeiro e fevereiro), outono (março, abril e maio), inverno (junho, julho e agosto) e primavera (setembro, outubro e novembro).

4.5 Estudo de caso

Os estudos de caso foram escolhidos de acordo com os percentis 95 e 99, ou seja, selecionou-se os dias em que a EOA apresentou os maiores valores do período de estudo. Os casos foram determinados para que uma

análise isolada fosse feita, uma vez que se deseja saber o motivo do aumento da EOA nestes dias. Nestes eventos, pretende-se saber se houve a influência de aerossóis de queima de biomassa na região, advectados, ou se o aumento se dá devido a emissões locais de outros tipos de aerossóis.

Além disto, a escolha dos casos conteve relação direta com a climatologia, já que esta indicou os locais e períodos onde a EOA esteve elevada, entretanto como já mencionado, não se tem certeza do motivo do aumento, se foi decorrente de aerossóis advectados ou locais.

Nos dias escolhidos analisou-se a EOA que determinou a atenuação das partículas e o EA que indicou o tamanho destas, isto para indicar o tipo de aerossol dominante na atmosfera. Visto que se espera saber se os aerossóis que influenciaram a EOA eram locais ou advectados, campos do vetor vento no nível de 850 hPa foram utilizados para determinar o sistema meteorológico que atuava em cada dia escolhido e se estes foram, de alguma forma, responsáveis pelo transporte de partículas de aerossóis de outras regiões, como a região norte, para a região de estudo.

Os campos foram gerados a partir de dados de reanálise 2 do NCEP/NCAR (*National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research*). Possuem resolução temporal de quatro vezes diárias e médias diárias mensais, resolução espacial de 2,5°. Além destes foram utilizadas imagens dos satélites GOES-10 e GOES-12 para analisar as condições atmosféricas para cada dia escolhido.

Outra forma de analisar o transporte de partículas de queimadas é através do uso de simulações numéricas com modelos atmosféricos. O CATT-BRAMS (Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System) é um modelo Euleriano de transporte atmosférico que faz prognósticos de razão de mistura de gases traços através da solução da equação de massa. Inclui processos de advecção, mistura turbulenta na CLP, deposição seca e úmida, ascensão da pluma associada a focos de queimada, além de abranger reatividade química e interação de aerossóis com a radiação solar e terrestre (LONGO et al., 2013). O CATT-BRAMS utiliza um pré-processador de emissões (PREP-CHEM) que considera fontes urbanas/industriais, biogênicas, de queima de biomassa e vulcânicas (FREITAS et al., 2011). As emissões de queima de biomassa são

estimadas através de uma relação entre a quantidade de biomassa seca acima do solo na posição do fogo, a fração de biomassa efetivamente consumida, o fator de emissão que expressa a quantidade de massa do gás por unidade de massa seca consumida e a área queimada pelo fogo (podem ser atualizadas diariamente). As emissões são tratadas com o uso de um modelo de levantamento de plumas, nas quais há uma estimativa na altura de injeção e na espessura da camada de injeção, pois as emissões de queima de biomassa têm características particulares de empuxo na fase de chama (FREITAS et al., 2006b).

Nos casos de estudo, o CATT-BRAMS foi utilizado como forma de confirmar o transporte de partículas de queimadas para a região de estudo. Para isto foram consideradas somente as fontes de queimada, desconsiderando-se qualquer outra fonte antropogênica ou biogênica. Isto foi feito com o intuito de correlacionar o transporte mostrado nos campos de EOA com os obtidos pelo modelo. As simulações utilizam condições iniciais e de fronteira atmosféricas no modelo global T126L28 do CPTEC/INPE e condições de contorno químicas do modelo global (Multi-scale Chemistry and Transport Model) (JOSSE et al., 2004; TEYSSÈDRE et al., 2007).

Resultados e discussões

5.1 Análise anual da Espessura Óptica da Atmosfera e Expoente de Angstrom

Devido a suas diferentes fontes emissoras, os aerossóis podem ser classificados em diversos tipos. De acordo com o tópico 4.3, uma forma de se analisar o tipo de aerossol presente na atmosfera é relacionando a EOA com o EA. A tab. 3 mostra valores de EOA e EA (e suas respectivas medianas) dos anos de 2002 a 2011. Os dados da tabela referem-se a toda região de estudo, desta forma, pode ocorrer casos em que exista uma (ou mais) sub-região com diferentes tipos de aerossol predominante (afetando o valor da EOA pontualmente). Como a área de abrangência nestes casos é pequena, comparada à área total, há a possibilidade de tipos de aerossóis (com valores mais elevados de EOA, por exemplo) não serem representados pelos valores apresentados na tabela. Uma situação de aumento da EOA pode ser devido a possíveis entradas (uma ou mais entradas) de aerossóis de queimadas oriundos das regiões Norte e Centro - Oeste na região do estudo. Dessa forma, podemos entender os valores da tab. 3 como valores dos aerossóis dominantes na região de estudo.

Considerando a EOA (conforme as combinações apresentadas na tab.2), constata-se que os aerossóis dominantes presentes na atmosfera são do tipo pouco atenuadores de radiação, por possuírem valores de EOA menores que 1,0 isto durante todo período do estudo. A análise da tab. 3 mostra que a mediana de todo o período foi consideravelmente baixa, contendo o ano de 2002 com o valor mais elevado (valor da mediana da EOA de 0,098).

Kaufman et al. (2002) e Kaskaoutis et al. (2007) mostram em seus trabalhos que em locais populosos, como a Ásia e Europa, respectivamente a EOA no mesmo comprimento de onda desta análise, foi de aproximadamente

0,6. Mesmo com a diferença na grandeza, pode-se comparar os baixos valores de EOA nestas duas localidades, com os valores das medianas encontrados neste trabalho.

Entretanto somente com a EOA não é possível caracterizar, de forma exata, o tipo de aerossol presente na região, por isso deve se levar em consideração o EA. Analisando os valores de EA da tab. 3, nota-se que devido ao valor do EA ter sido elevado (maior do que 1,5, como adotado na metodologia), os aerossóis dominantes podem ser caracterizados como material particulado do tipo fino.

De forma geral, considerando os baixos valores de EOA juntamente com os altos de EA, pode se caracterizar os aerossóis dominantes em suspensão na atmosfera da região Sul, no período estudado, como pouco atenuadores de radiação e do tipo fino, propriedades estas de aerossóis de poluição urbana, conforme considerado em Kaskaoutis et al. (2007). As características da EOA e do EA apresentadas pela tab. 3 concordam com os resultados encontrados no trabalho recém citado para a cidade de Ispra (Itália). Neste foram caracterizados casos com EA elevado e EOA (em torno de 1,5 e 0,34, respectivamente) como de poluição urbana e regional.

Tabela 3 – Relação anual das medianas entre a EOA e o EA para a área de estudo (Região Sul) no período de 2002 a 2011.

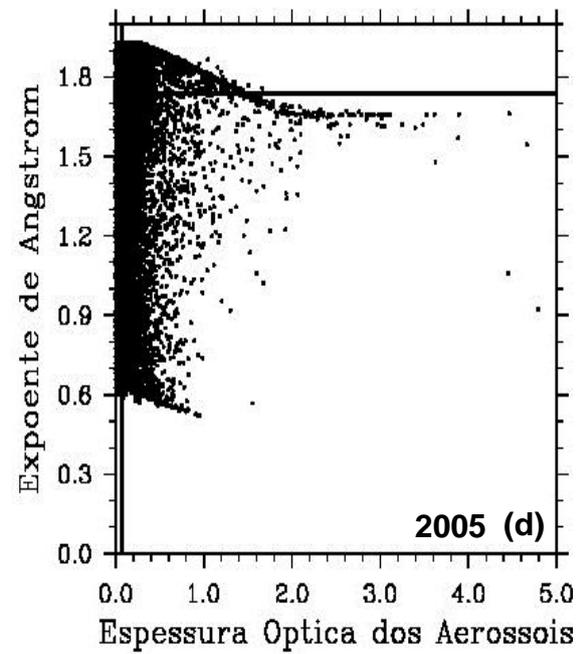
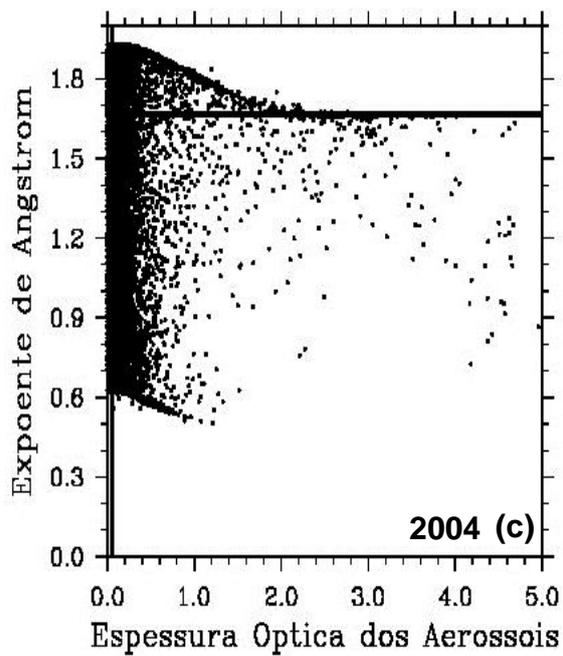
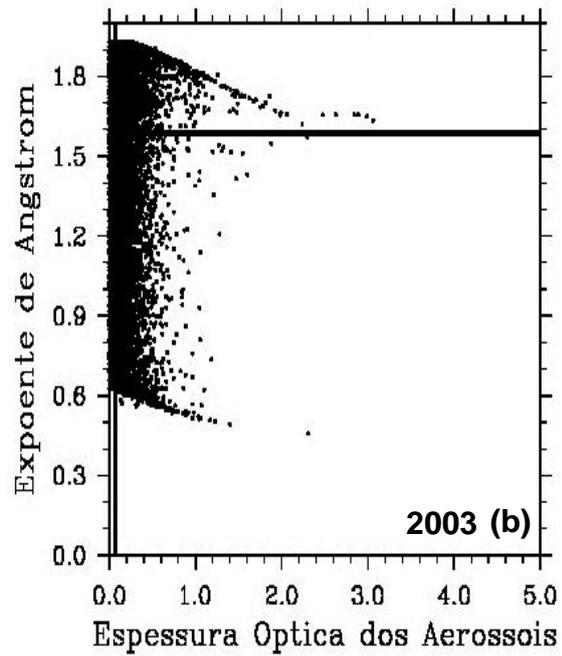
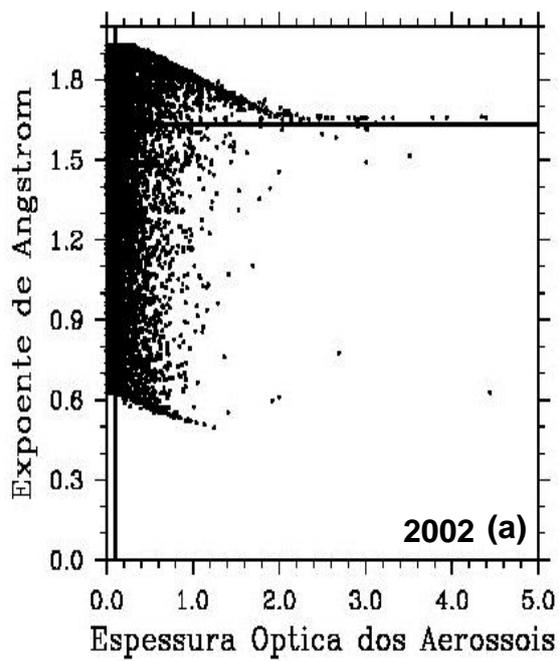
Ano	Espessura Óptica	Expoente de Angstrom
2002	0,098	1,634
2003	0,065	1,586
2004	0,059	1,667
2005	0,067	1,737
2006	0,063	1,714
2007	0,077	1,567
2008	0,066	1,666
2009	0,063	1,666
2010	0,065	1,516
2011	0,071	1,605

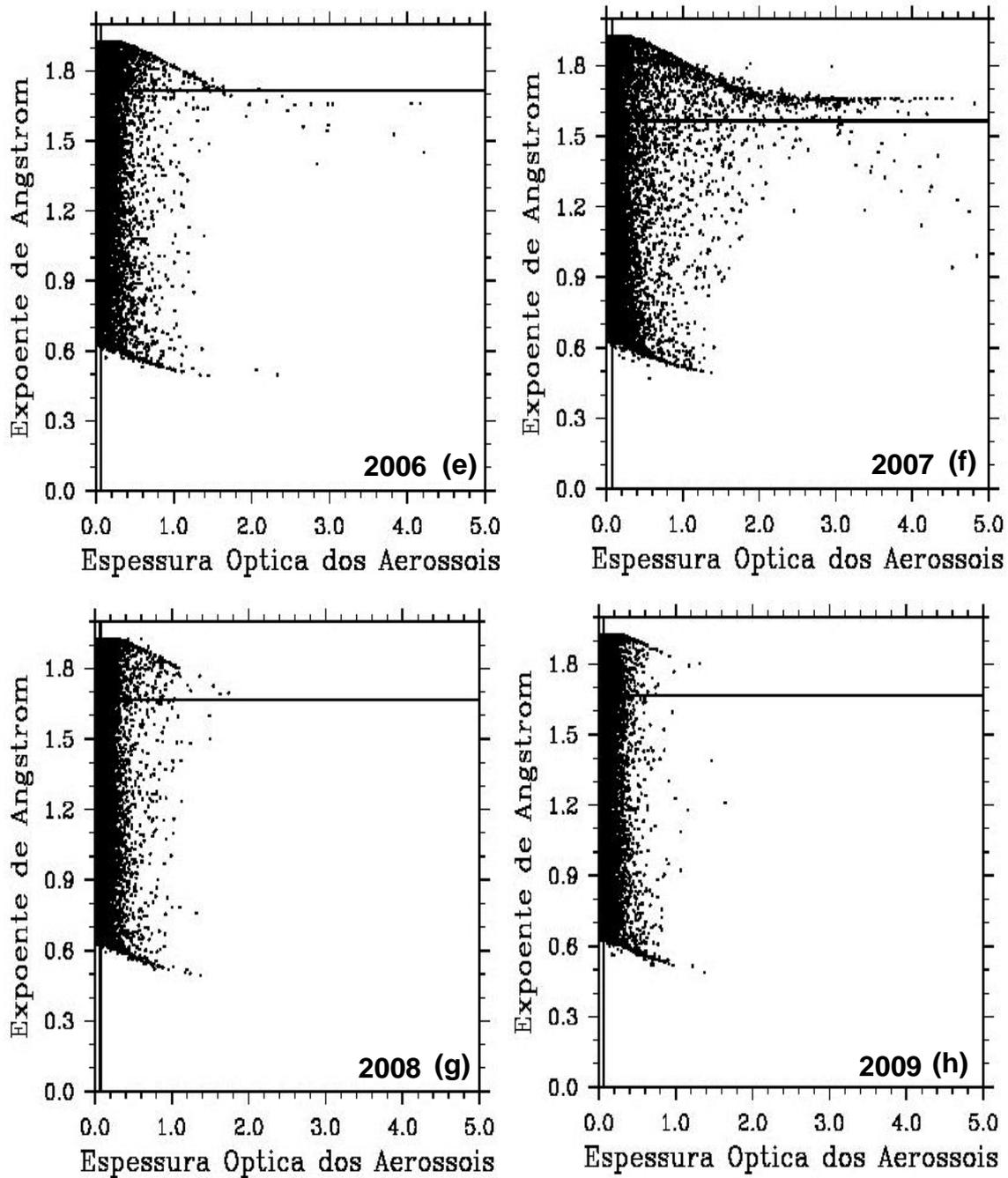
A Fig. 9 corresponde aos anos de 2002 a 2011, em que é mostrada a dispersão da EOA e o EA, dentro da região de estudo. As linhas na figura correspondem à mediana do EA (vertical) e EOA (horizontal). É possível perceber a existência de diversos casos em que há a influência, além dos

aerossóis dominantes indicados pelas linhas de mediana, de aerossóis de diferentes tipos sobre a região. Destacando a existência de aerossóis atenuadores (EOA elevada) e na moda fina (EA > 1,5). Estas figuras enfatizam a predominância de aerossóis do tipo pouco atenuadores de radiação (EOA baixa) e de material particulado do tipo fino (EA alto). Todavia, destacam-se alguns anos em que a EOA aparece mais dispersa e mais elevada, indicando a presença de aerossóis atenuadores de radiação e na moda fina. Destaca-se o ano de 2004 (Fig. 9c), quando é possível observar a ocorrência de dias e pontos com EOA próxima a 5,0.

Os anos de 2002 (Fig. 9a), 2004 (Fig. 9c), 2007 (Fig. 9f) e 2010 (Fig. 9i) dentre todos os anos do período, foram os anos em que há uma maior dispersão da EOA (como exemplo no ano de 2004, 1,016% dos pixels atingem valores mais elevados), como pode ser observado nas figuras citadas. O aumento da EOA nestes anos pode ser decorrente do maior número de eventos de queimadas ocorridos nestes anos e que, possivelmente, transportaram as partículas de aerossóis para a região Sul (além dos focos presentes dentro da região).

O grupo de queimadas do CPTEC/INPE (<http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/>) faz um monitoramento dos focos de queimadas na América do Sul. De acordo com o grupo os anos em que houve um maior número de focos de queimadas no Brasil foram 2002 com 44.891 focos, 2004 com 50.300, 2007 com 25.748 e em 2010 com 24.929. Somente na região Sul, os anos com maior quantidade de focos foram 2002 com 9.530, 2003 com 19.599, 2004 com 13.187 e 2005 com 7.156. Esta quantidade de focos de queimadas pode ser um dos fatores que influenciaram no aumento da EOA nestes anos como apresentado na Fig. 9.





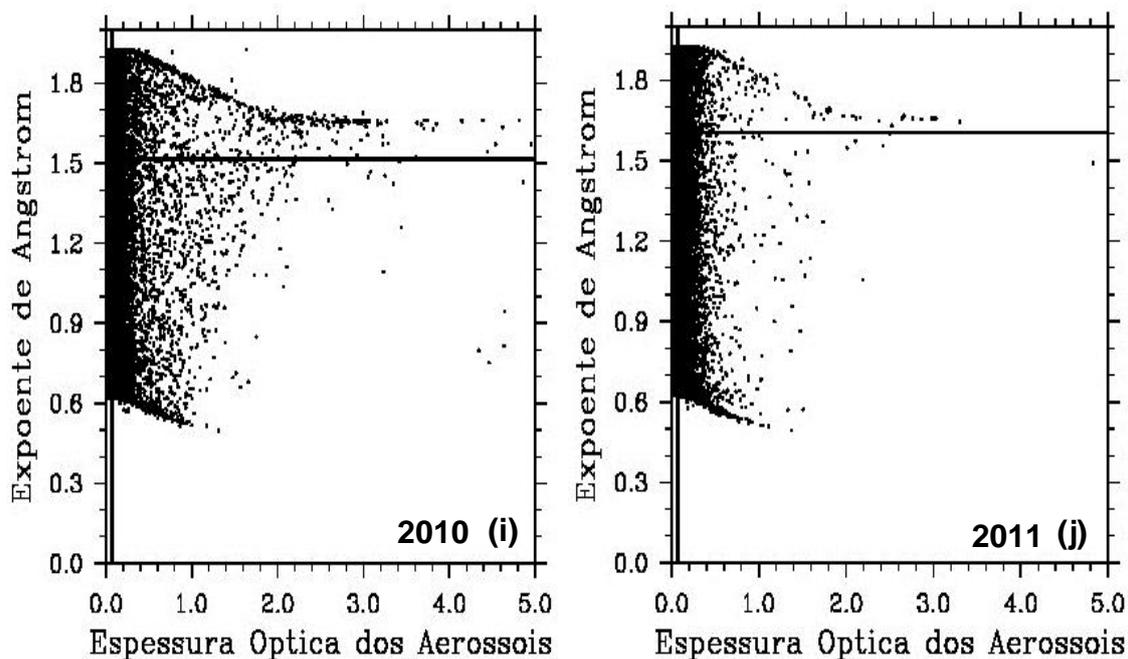


Figura 9 - Expoente de Angstrom versus Espessura Óptica da Atmosfera no comprimento de onda de $0,55 \mu\text{m}$ obtidos pelo sensor MODIS nos anos de 2002 a 2011 (a-j) sobre a região Sul do Brasil. Linhas representam os valores da mediana para o período analisado.

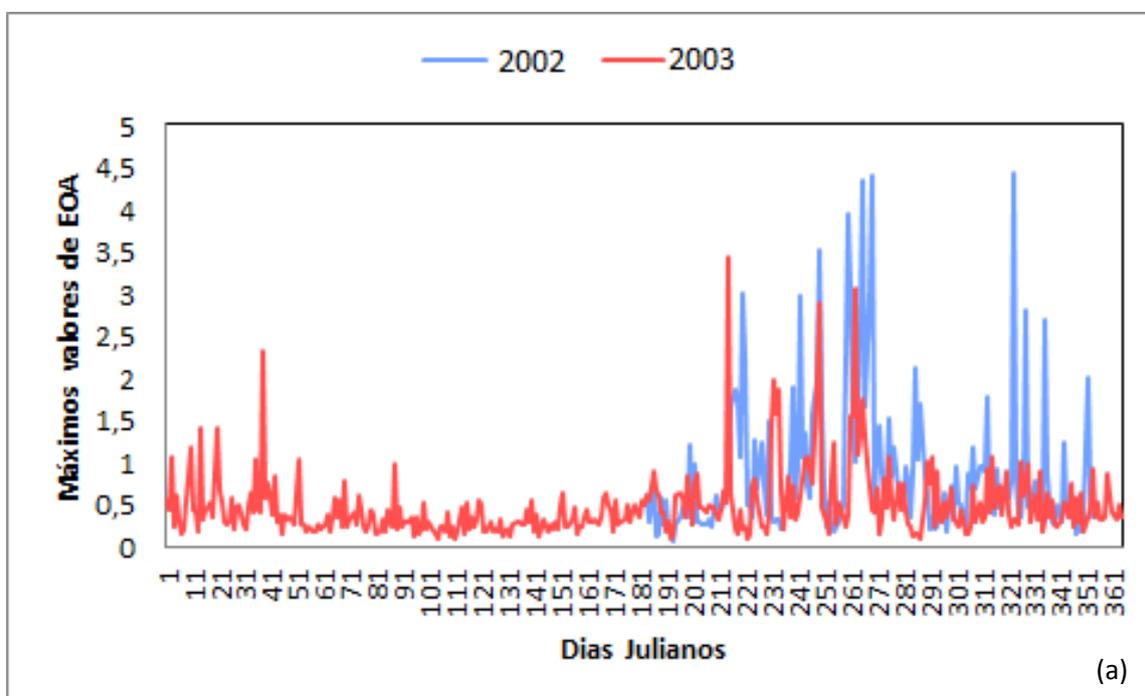
5.2 Análise do máximo valor de Espessura Óptica da Atmosfera

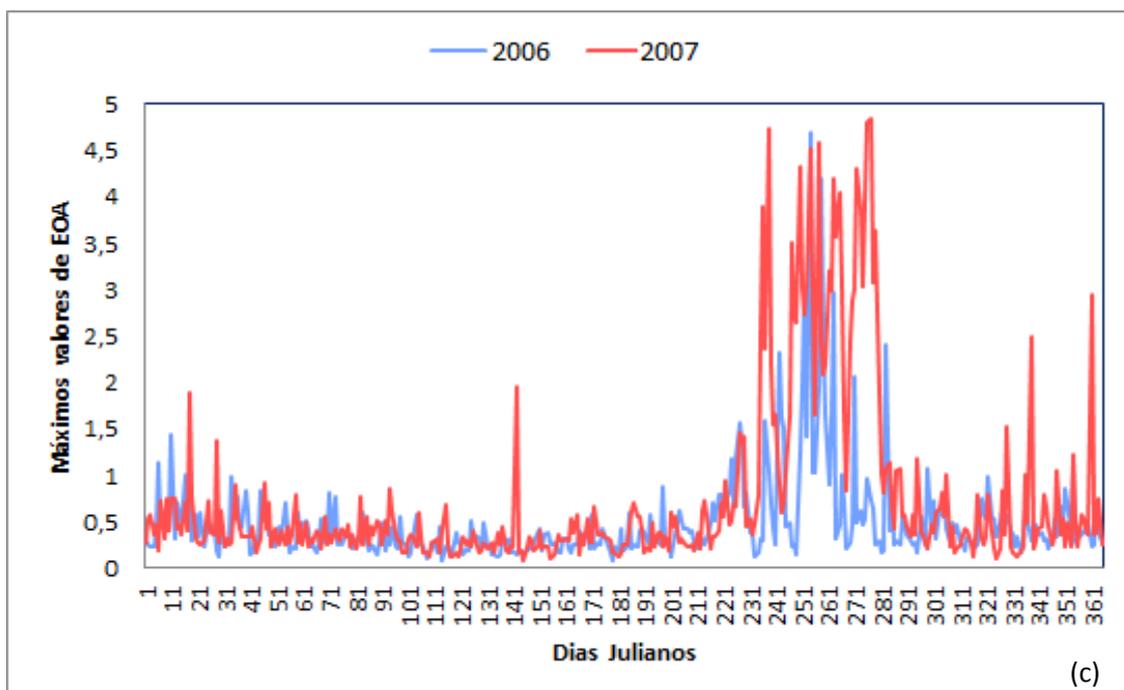
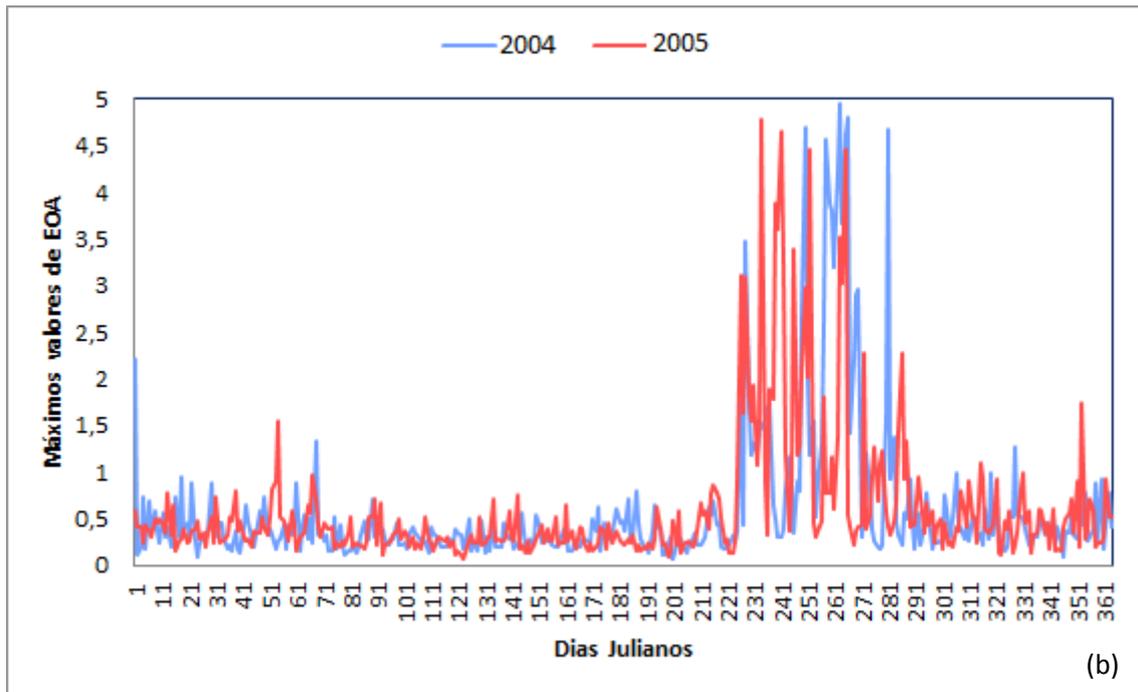
A Fig. 10 mostra os máximos valores diários de EOA encontrados na Região Sul no período de estudo, ou seja, o máximo valor que a EOA conteve em cada dia do ano sobre a área analisada. Os gráficos estão distribuídos bi-anualmente. De uma forma geral, observa-se que estes valores se concentram em períodos sazonais, não havendo uma continuidade de altos valores durante todo ano. Nota-se ainda a presença, em alguns dos anos analisados, de picos isolados em alguns meses do ano, como por exemplo, na Fig. 10a em que se observa um único pico no início do ano de 2003.

Os dias com maiores valores de máxima EOA diários ocorreram principalmente entre o inverno e primavera (aproximadamente a partir do dia Juliano 210 até o dia 300, considerando todos os anos analisados) e podem ser decorrentes de diversos fatores, como por exemplo, quando ocorrem os maiores picos de queimadas na região Norte e Centro - Oeste, além dos focos localizados na região Sul. Mesmo com a possível influência das partículas de

queimadas no aumento da EOA nestes períodos, não se pode descartar a possibilidade de outros tipos de partículas de aerossóis, como por exemplo de poluição urbana, que também podem contribuir no aumento da EOA. Na maior parte dos anos, observa-se que a máxima EOA diária tem valores bastante elevados, havendo casos em que estes chegam a aproximadamente 5,0, caracterizando aerossóis bastante atenuadores.

Considera-se ainda a probabilidade de que a ocorrência de altos valores diários da EOA possa ser decorrente de uma possível deficiência do algoritmo de filtro de nuvens do MODIS. Isto ocorre caso o algoritmo não detecte um pixel contaminado por nuvem removendo-o e consequentemente irá elevar os valores da EOA sobre essa região. Entretanto, levando em consideração o período do ano em que os altos valores de EOA ocorreram, o número elevado de eventos de queimadas é um indício para o aumento. Mesmo com a presença de nuvens (e possível deficiência do algoritmo de filtragem do MODIS), é creditado que o aumento na EOA, nesse período, seja em consequência de um transporte associado à circulação de grande escala que faz com que estes aerossóis sejam advectados para a região de estudo.





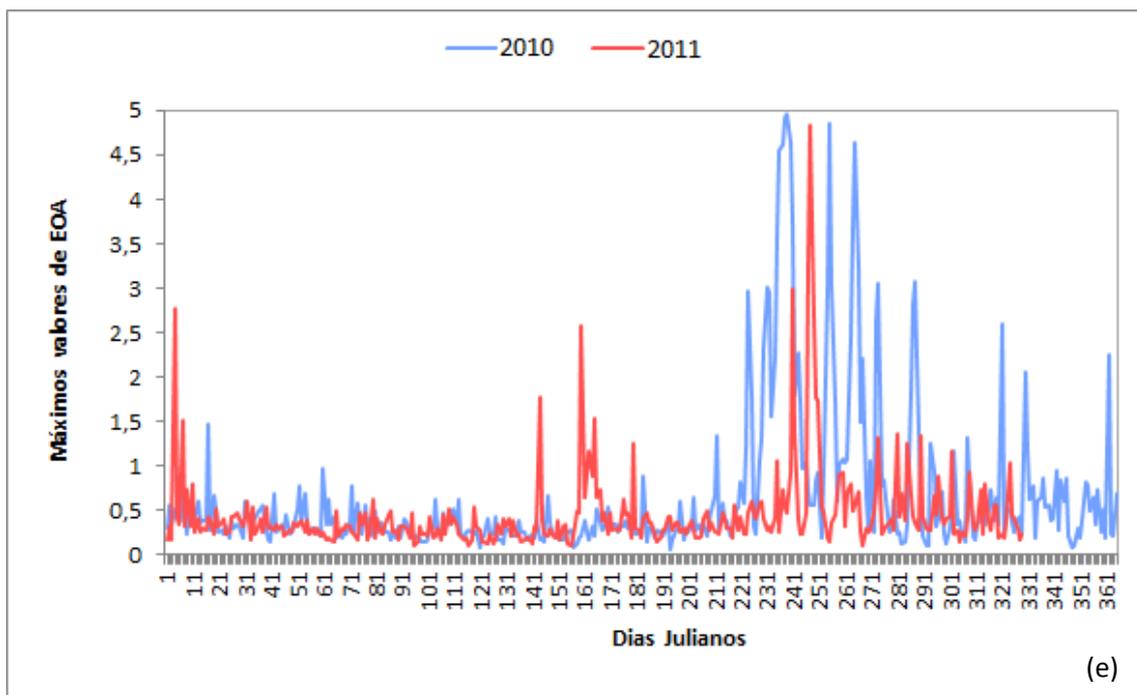
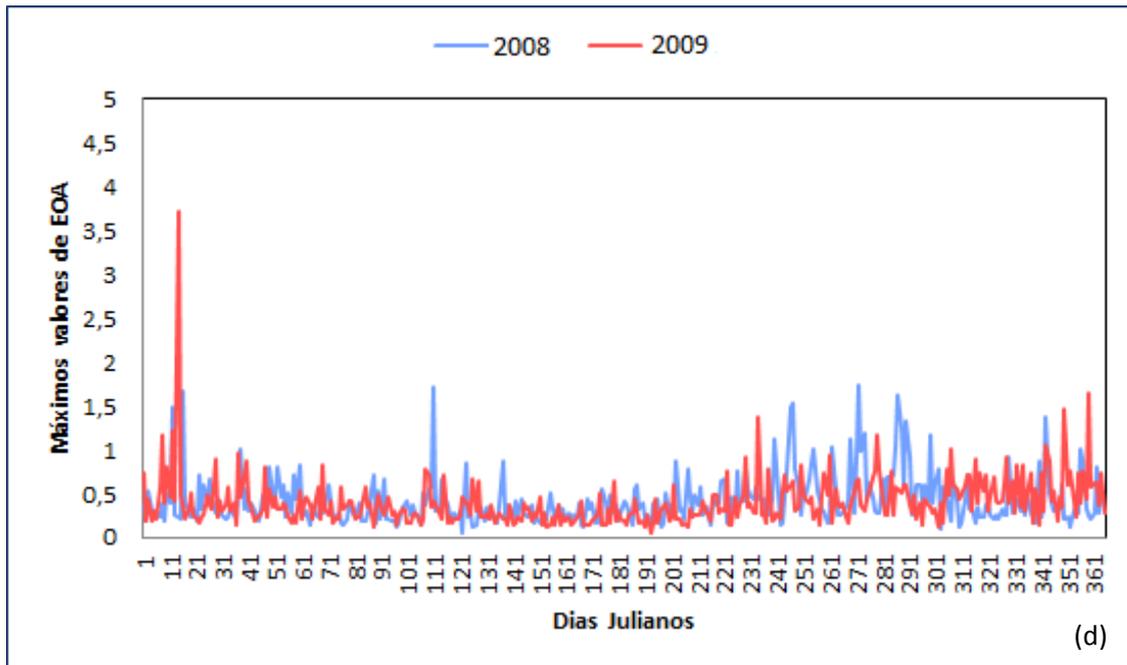


Figura 10 – Máximo valor diário da Espessura Óptica da Atmosfera dos anos 2002-2003 a 2010-2011 (a-e).

5.3 Avaliação do percentis (quantis)

As análises anteriores mostraram que em grande parte dos anos analisados, em geral, a EOA sobre a região Sul do Brasil é baixa o que pode

ser uma característica da região, contudo é perceptível a presença de períodos com EOA elevada com valores consideravelmente altos. No entanto, devido à área de estudo ser ampla, apenas com as análises anteriores não é possível determinar se a elevação da EOA ocorreu em toda região Sul ou em pontos específicos, sequer ter certeza do que a propiciou. Por esta razão neste tópico será mostrada uma tentativa de caracterização das áreas em que a elevação ocorre através da análise do percentil 99 da EOA sobre a região, além de se buscar a razão para este aumento.

5.3.1 Período de 2002 a 2011

A Fig. 11a mostra a climatologia do percentil 99 (P99) da EOA para todo o período, de 2002 a 2011. Esta climatologia foi feita pixel a pixel (ponto a ponto) para toda área de estudo. Por ela é possível observar, como já mostrado em tópicos anteriores, que os aerossóis presentes na região Sul caracterizam-se como pouco atenuadores de radiação, em sua maior parte, visto que a EOA não ultrapassou 1,0. A Fig. 11b é referente à mediana (P50) e com ela é possível confirmar a predominância do tipo de aerossol.

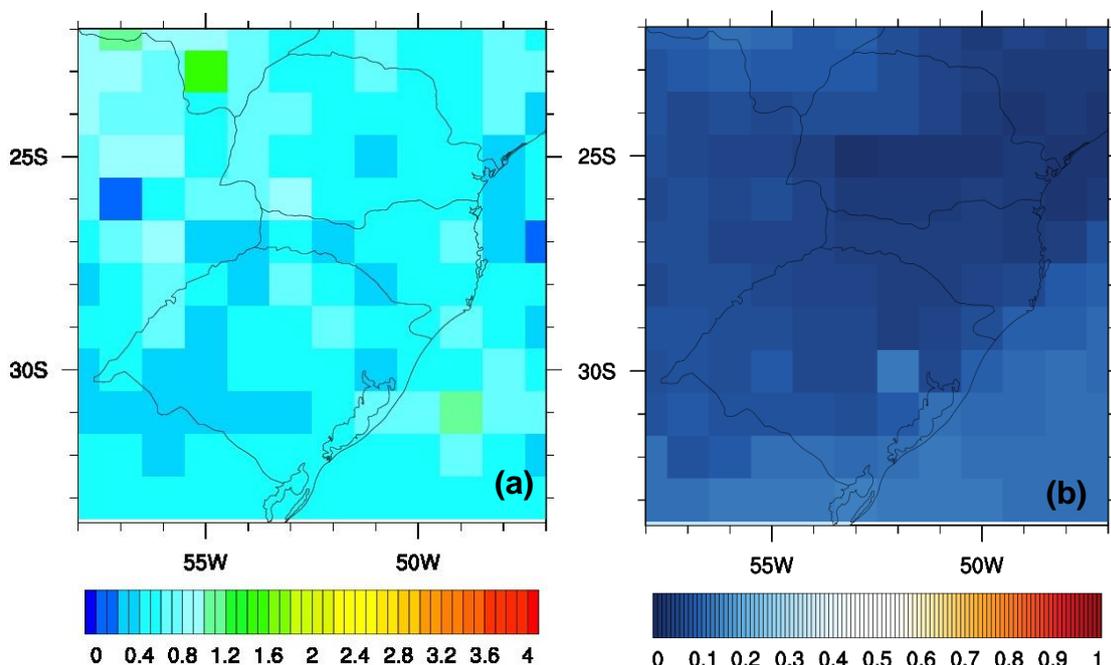
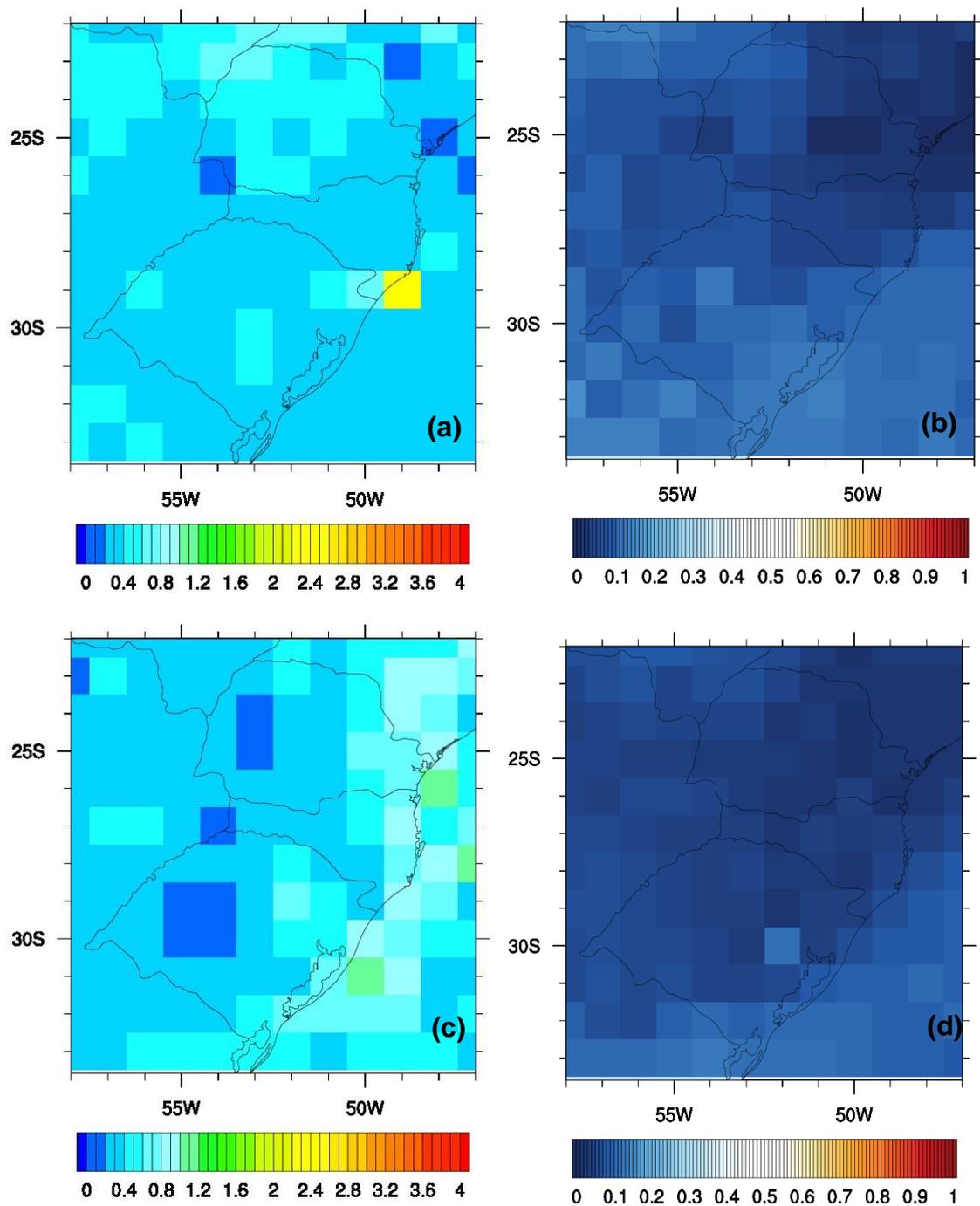


Figura 11 – Climatologia do percentil 99 (a) e mediana ou percentil 50 (b) da EOA para todo o período de estudo, de 2002 a 2011.

A Fig. 12 refere-se ao P99 do total das estações (de 2002 a 2011) e suas respectivas medianas. De forma geral, o P99 mostrou que as estações tiveram EOA baixa na maior parte da região Sul, com exceção do inverno (Fig. 12e) quando, entre o Paraguai e Paraná, a EOA variou entre 1,2 e 3,5. Devido à localização dos pixels com maiores valores, é possível que a elevação tenha ocorrido devido à entrada de plumas de queimadas originárias de outras regiões, já que é entre o inverno e a primavera que ocorre a estação seca na região Norte e maior incidência de focos de queima de biomassa. No outono pode-se observar em toda área que há predominância de EOA baixa, com valores não ultrapassando 0,8. Esta característica ocorreu também no verão e primavera (Figs. 12a e 12g) caracterizando, de uma forma geral, os aerossóis em suspensão na atmosfera na maior parte do ano (excetuando-se o período do inverno) como pouco atenuadores de radiação.

A característica de aerossol com baixa atenuação é reforçada pela mediana (Figs. 12b, d, f e h) que mostra que a EOA em todas as estações caracteriza o aerossol dominante como pouco atenuador de radiação, como já mostrado nos tópicos anteriores.

Durante a primavera, assim como no inverno, há altos índices de eventos de queima de biomassa (focos), porém estes não puderam ser notados nas figuras 12g e 12h, provavelmente, devido ao transporte destas partículas ocorrerem mais significativamente em virtude de sistemas meteorológicos, como por exemplo JBNs, que advectam-nas para o sul do continente.



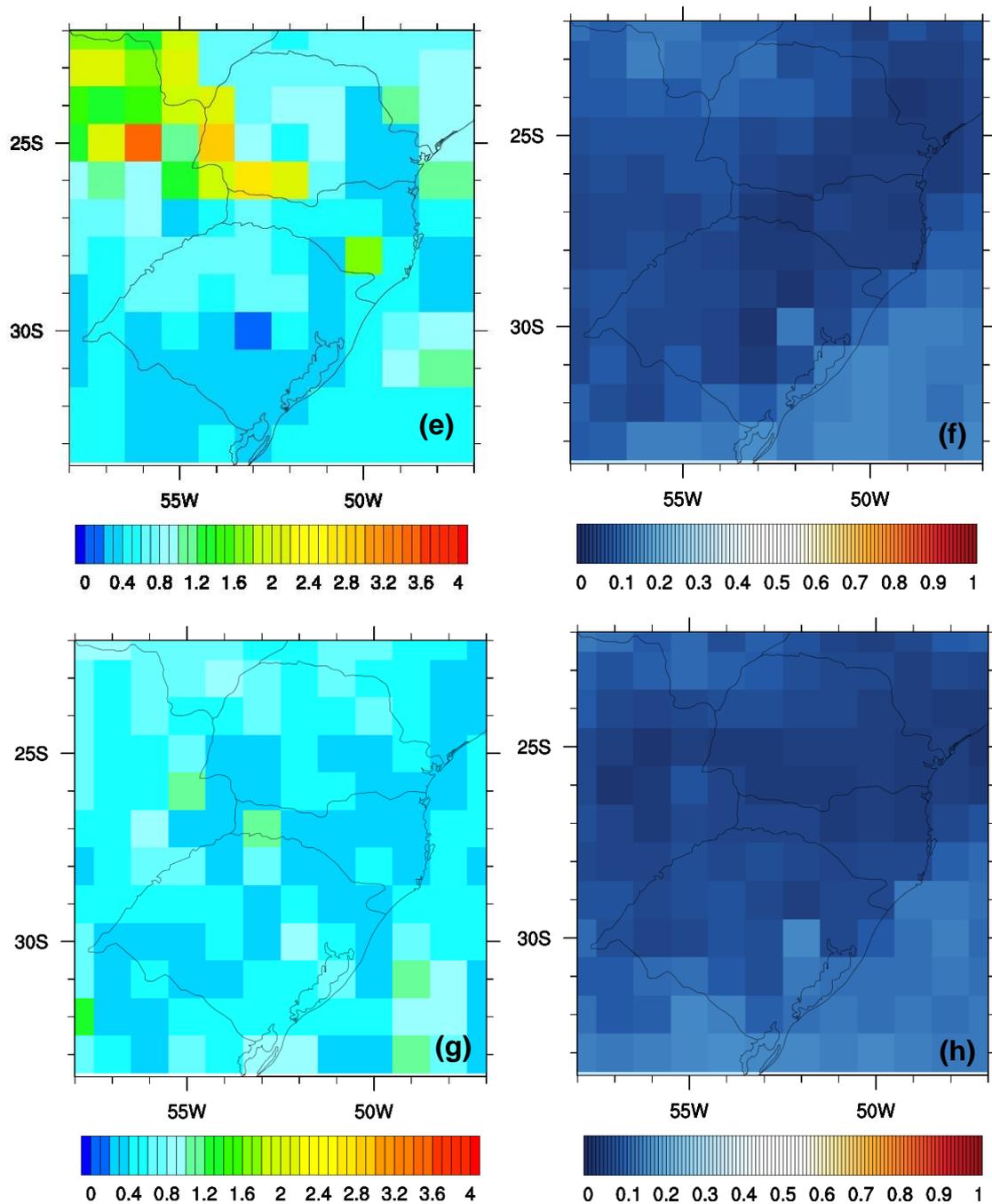


Figura 12 – Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera e mediana (P50) para os verões (a e b), outonos (c e d), invernos (e e f) e primaveras (g e h).

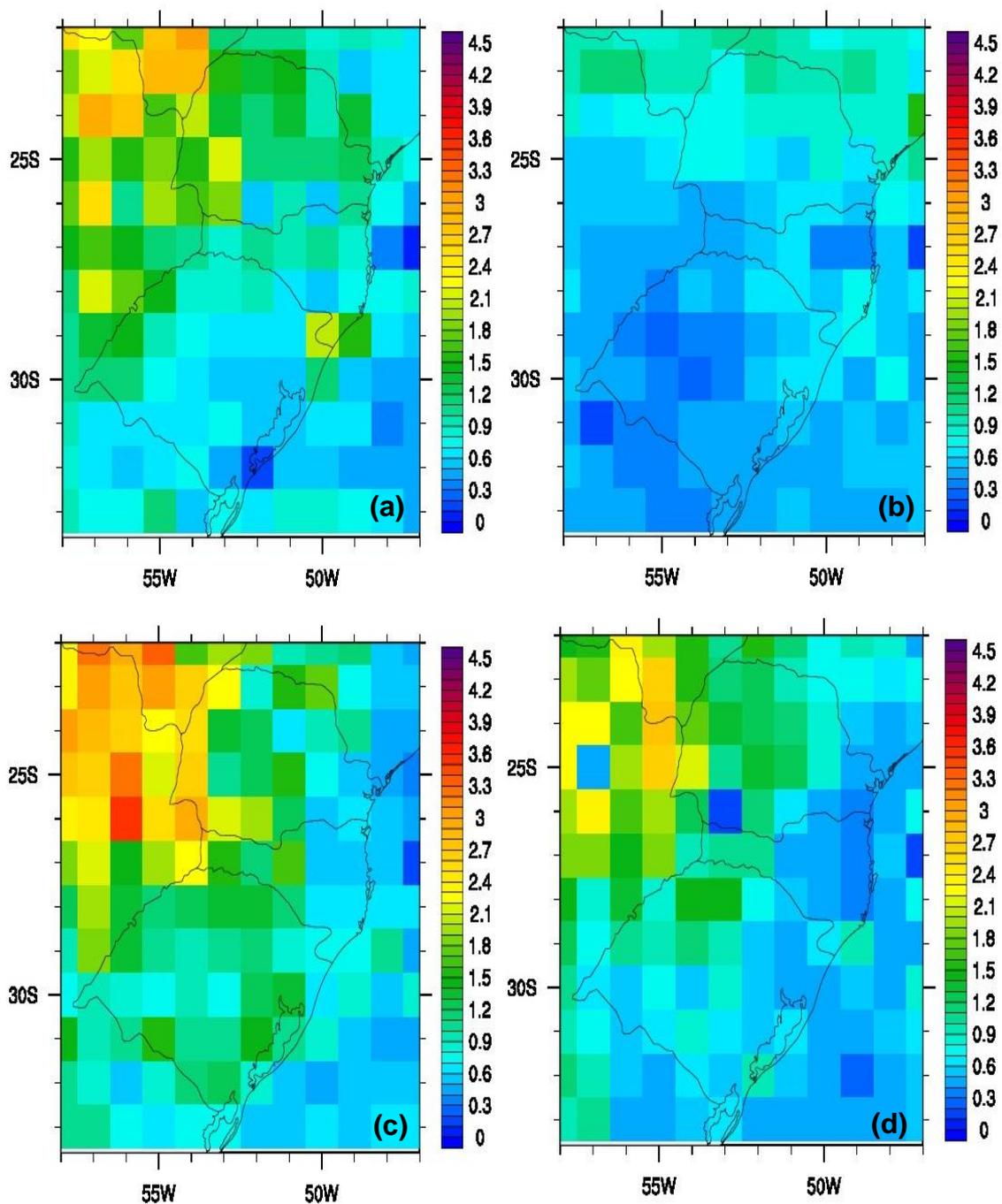
A Fig. 13 mostra o P99 da EOA de todos os anos do período de estudo (2002 a 2011). Assim como nos tópicos anteriores, o P99 apresentado na Fig. 13 mostrou que a maior parte do período é caracterizado como de EOA baixa, com valores menores do que 1,0, como nos anos de 2003 (Fig. 13b), 2006 (Fig. 13e), 2008 (Fig. 13g), 2009 (Fig. 13h) e 2011 (Fig. 13j). Por esta análise é possível perceber que na maior parte da área da região Sul o aerossol dominante é caracterizado como pouco atenuador de radiação. Porém nos anos de 2002 (Fig. 13a), 2004 (Fig. 13c), 2005 (Fig. 13d), 2007 (Fig. 13f) e 2010 (Fig. 13i) percebe-se regiões com valores elevados de EOA (acima de 1,0). Relembrando os resultados apresentados nos tópicos 5.1 e 5.2, esses foram os anos em que houve elevação na EOA, em relação aos outros anos do período. Este aumento foi suposto a uma elevação na quantidade de focos de queima de biomassa no Brasil, bem como, possivelmente, na região Sul (de acordo com grupo de Queimadas do CPTEC/INPE). No entanto com as análises anteriores não foi possível inferir as regiões mais afetadas pela EOA elevada.

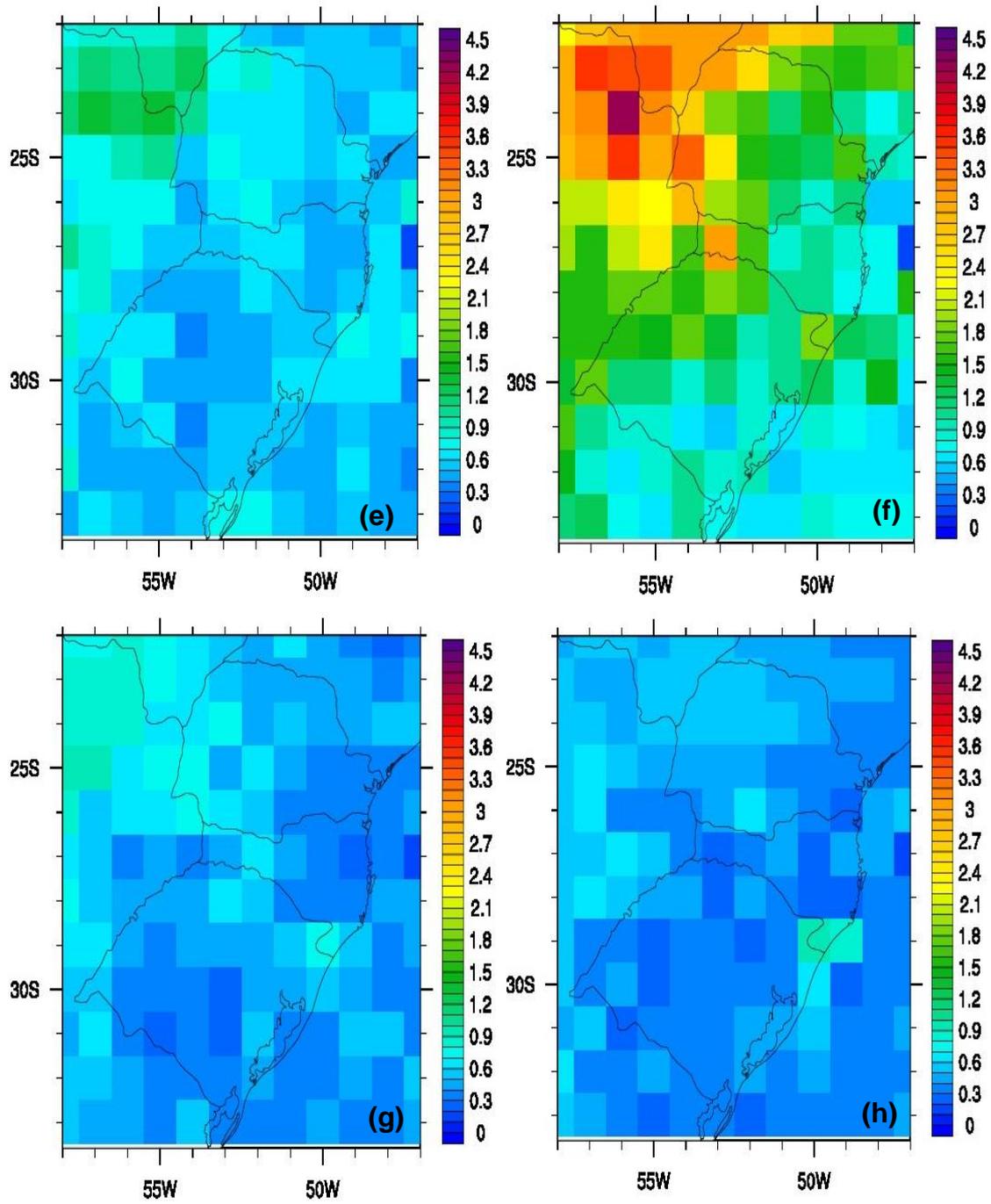
De acordo com as figuras é possível observar que, em todos os anos com EOA elevada destacados acima, os maiores valores localizam-se entre o leste do Paraguai e Argentina e oeste dos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Nestas regiões o P99 da EOA alternou entre 1,5 e 4,5, caracterizando os aerossóis, nestes casos, como atenuadores e muito atenuadores de radiação, considerando os dias com valores de EOA acima do P99 (1% do período analisado).

Este tipo de transporte foi estudado por diversos autores, como por exemplo no trabalho de Otero et al. (2011), em que foi observado pelo sensor MODIS, plumas de aerossóis de queima de biomassa sendo transportadas da região Norte para a Sul devido à circulação atmosférica.

Em alguns destes anos com EOA elevada observa-se uma grande quantidade de pixels com valores altos, como no ano de 2007 (Fig. 13f), em que o P99 da EOA chegou a aproximadamente 4,5. Para a região isto é considerado bem elevado, já que por análises anteriores percebeu-se que o padrão da região é de EOA baixa. Ainda ressalta-se que o P99, neste caso, corresponde a 1% do total de dados para o período e mesmo esta pequena quantidade de dados apresenta uma elevação bem considerável comparado

com total, tanto para a quantidade de pixels quanto para a região afetada por eles.





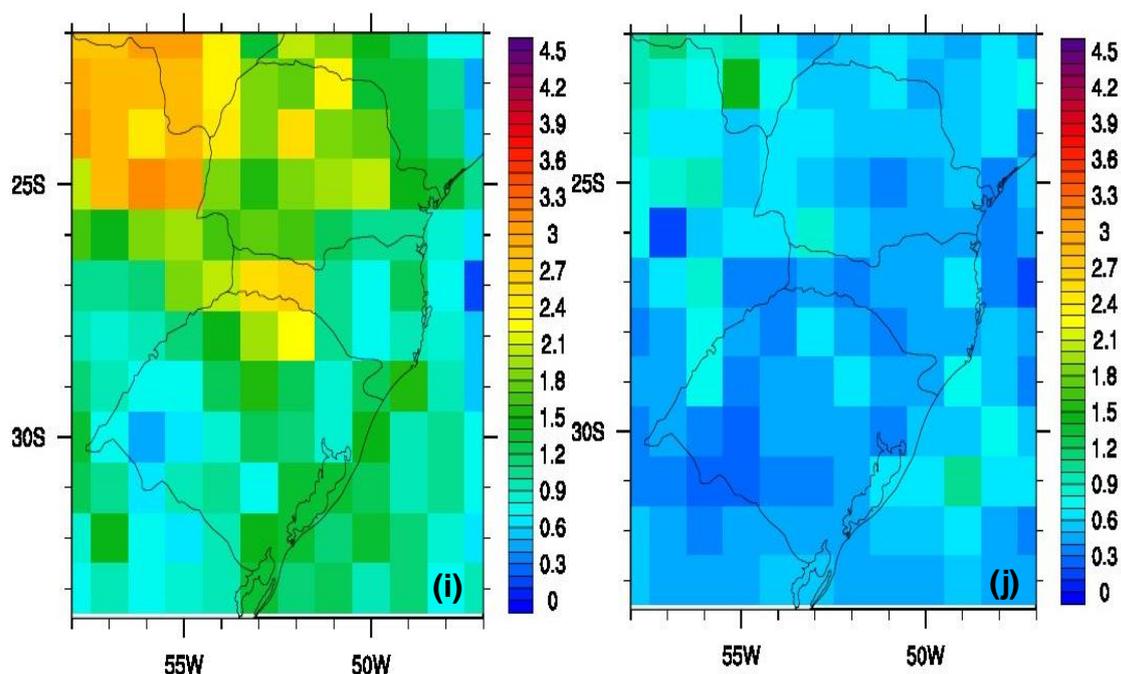


Figura 13 – Percentil 99 anual da Espessura Óptica da Atmosfera de 2002 (a), 2003 (b), 2004 (c), 2005 (d), 2006 (e), 2007 (f), 2008 (g), 2009 (h), 2010(i) e 2011 (j).

5.3.2 Inverno

De acordo com o tópico 5.3 a estação que apresentou, em sua climatologia, maiores valores de EOA foi o inverno tanto para o P99 como para o P50 (mediana). Desta forma, nesta seção serão abordados os anos, nesta estação, em que a EOA foi mais elevada (somente o P99 - as medianas encontram-se no Anexo A). De forma geral, assim como no total anual (Fig. 12e) os maiores valores de EOA estão localizados entre leste do Paraguai e Argentina e oeste do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Entretanto, há situações em que os pixels estão situados entre o centro do estado da região Sul e seus respectivos litorais (leste), como poderá ser visto nas Fig.14.

A Fig. 14a refere-se ao ano de 2002; nesta observa-se que o P99 da EOA varia entre 1,5 e 2,5 nas regiões já citadas (noroeste da área de estudo). Em 2005, representado pela Fig. 14b observa-se quantidade considerável de pixels com EOA elevada (entre 1,8 e 3,6) nos três estados da região de estudo, destacando o estado do Paraná, onde estão concentrados os maiores valores. Neste ano e nestas regiões os pixels variam entre 1,5 e aproximadamente 3,6. A Fig. 14c apresenta o P99 do ano de 2007 onde é possível observar três

pixels com P99 bastante elevado (maiores que 4,0), no sul do Mato Grosso do Sul e Argentina. Nas outras regiões, de forma geral, a EOA foi mais baixa (entre aproximadamente 1,5 e 2,8), com maiores valores no estado do Paraná. Também é possível observar pixels variando entre 1,8 e 2,4 sobre o Oceano Atlântico, entretanto devido a localização dos pixels este aumento pode ser decorrente de aerossóis marinhos ou devido a poluição local, mas somente com uma análise sobre o tamanho da partícula (considerando o EA, como abordado no tópico 5.1) pode se fazer este tipo de conclusão.

Em 2010 observa-se a presença de pixels com EOA mais elevada, em comparação com os outros anos apresentados pela Fig. 14, além de uma maior área contendo-os, situação que é mostrada na Fig. 14d. A EOA em grande parte da área de estudo foi elevada, salvo no oeste do estado do Rio Grande de Sul e parte da Argentina. Os maiores valores ocorrem em Santa Catarina e Paraguai, onde há pixels com EOA atingindo 4,0, assim como na Argentina. Ainda nestas regiões há um pixel com EOA de 4,5, o que para a região é extremamente elevado conforme pode ser observado ao se comparar com as outras figuras apresentadas. No oceano também há pixels com EOA elevada, variando entre 1,5 e 2,5.

Nesta estação, em particular o ano de 2010, foi a em que ocorreram os maiores valores do P99 da EOA dentro do período de estudo; isto pode ser devido ao grande número de eventos de queimadas neste ano, especialmente durante o inverno, período no qual ocorrem os maiores índices destes. Ainda é possível observar que os pixels com valores mais altos também estão presentes nos estados do Mato Grosso do Sul e São Paulo, e isto pode ser um indício de transporte de aerossóis para a região em análise.

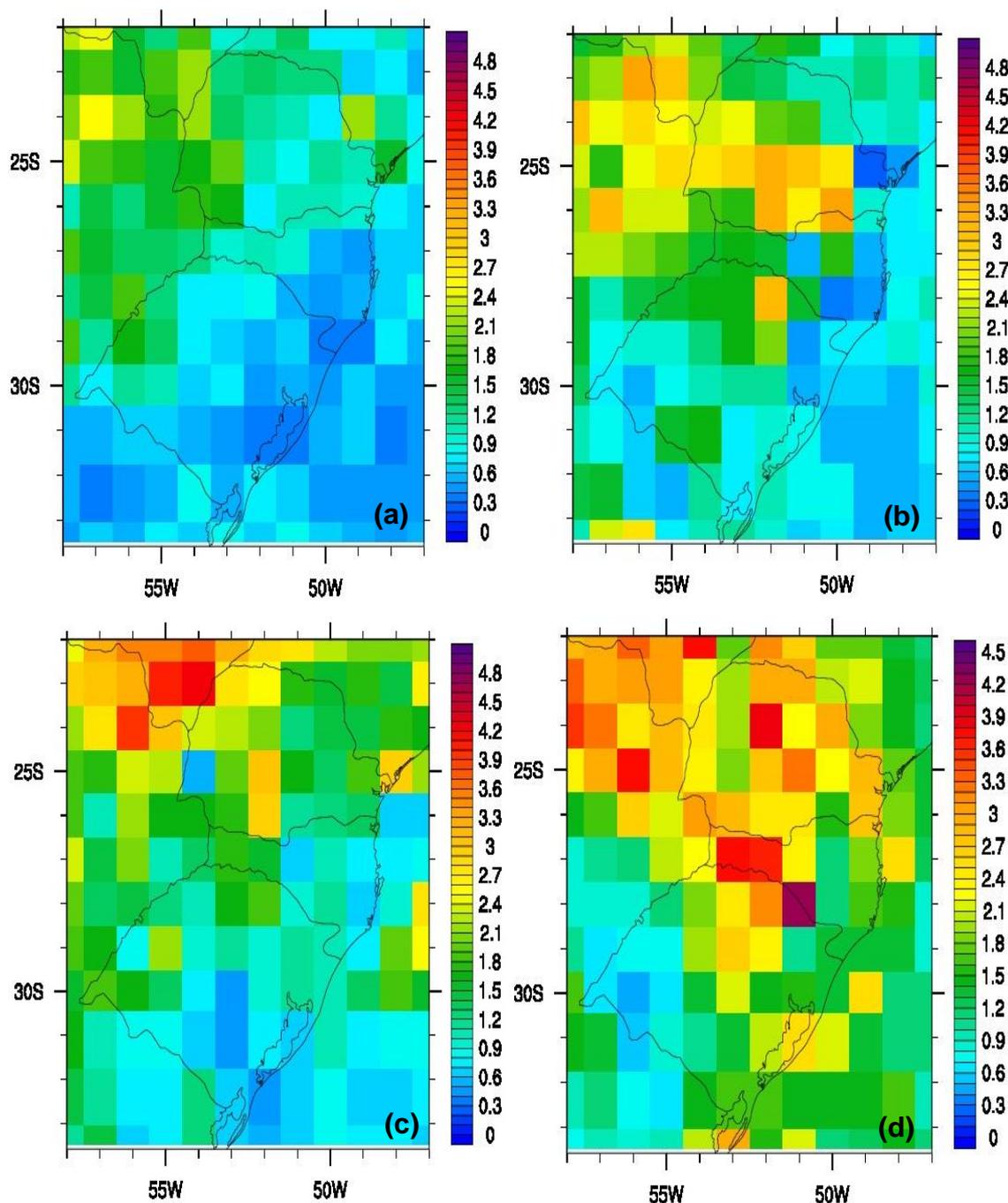


Figura 14 - Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera para os invernos de 2002 (a), 2005 (b), 2007 (c) e 2010 (d).

Considerando os meses do inverno (junho, julho e agosto) nota-se que nos dois primeiros, o P99 da EOA foi baixo em todos os anos do período não chegando a 1,0, salvo o ano de 2011 em que a EOA varia entre 1,2 e 1,5 na região leste do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Dessa forma, optou-se em apresentar estes meses no Anexo A.

Em agosto (Fig.15) ocorreram os maiores valores de EOA no período do inverno. Dessa forma, observa-se que devido aos altos valores apresentados neste mês a climatologia do P99 apresentada para o inverno (Fig. 14) indicou, conseqüentemente, valores elevados de EOA. Uma possível razão para este aumento é o fato de a estação seca ser mais intensa no mês de agosto, além de a maior quantidade de focos de queimadas ocorrerem, em média, entre agosto e setembro (na região Norte e Centro – Oeste), segundo dados do grupo de queimadas do INPE (FILHO, 2011).

De todos os anos do período de estudo, os que tiveram maiores valores de EOA foram 2007 e 2010 (Figs. 15a e 15b). Nestes foi possível perceber que as regiões onde a EOA é maior são as mesmas das análises anteriores (principalmente na região noroeste da área de estudo) e isto pode ser outro indicativo de que os eventos de queima de biomassa influenciaram este aumento, já que em todas as outras situações ocorreu o mesmo padrão.

A Fig. 15a é referente ao ano de 2007 em que são perceptíveis os pixels de EOA com valores entre 1,5 e 3,5 na mesma região citada. Em 2010 (Fig. 15b) é possível observar uma grande quantidade de pixels com valores de EOA bastante elevados em praticamente toda a área de estudo em sua maior parte com valores maiores que 2,0, podendo ser notado, ainda, a presença de pixels com $EOA > 4,0$. O P99 da EOA neste mês, principalmente no ano de 2010, indica que 1% dos dados têm como característica serem de aerossóis altamente atenuadores de radiação. Como já mencionado anteriormente, mesmo a pequena quantidade de valores de EOA influencia de forma significativa a atmosfera da região Sul, ainda mais se for considerado a área em que estes valores ocorrem, como em 2010, onde os valores elevados tomam praticamente toda a região de estudo.

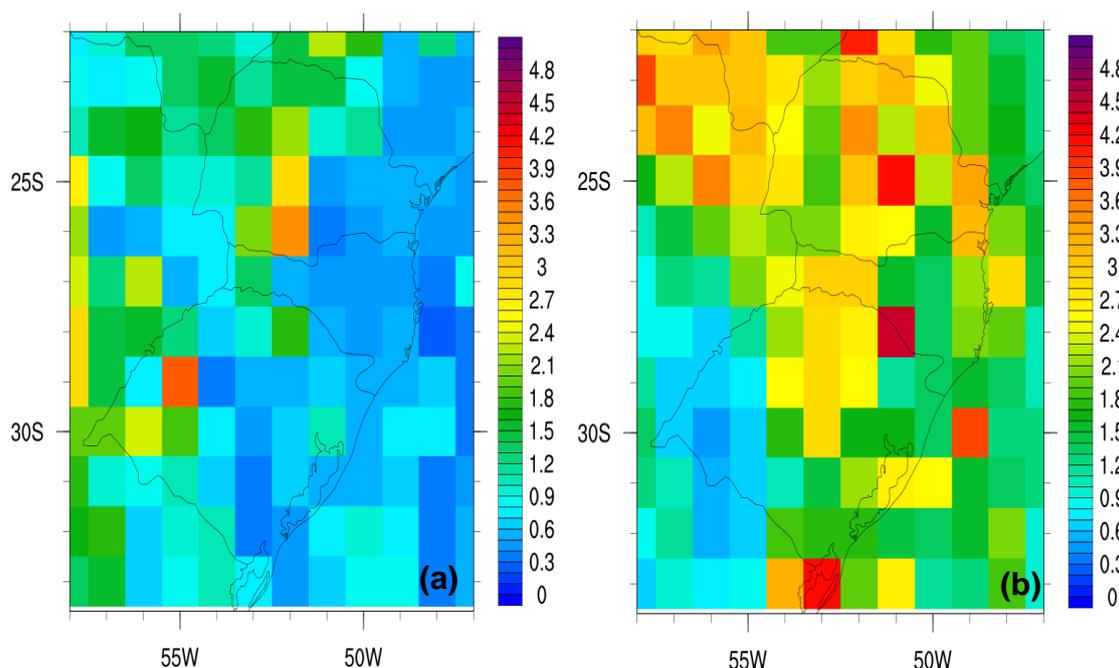


Figura 15 – Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera do mês de agosto de 2007(a) e 2010 (b).

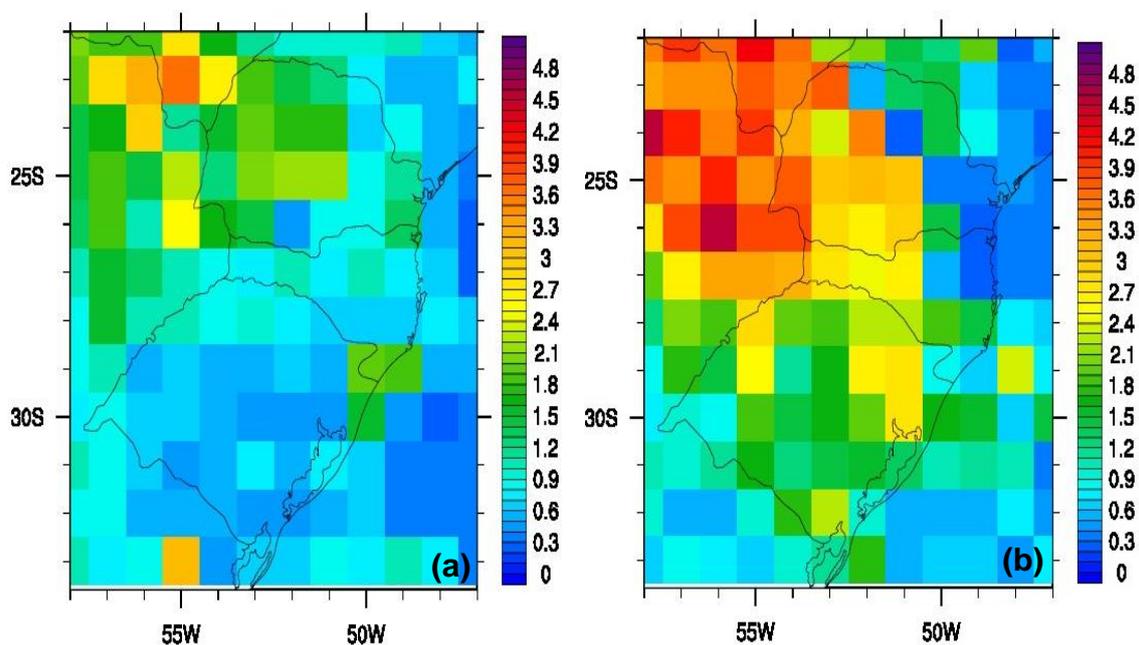
5.3.3 Primavera

Apesar da climatologia do período da primavera (2002-2011) apresentado nas Figs. 12g e 12h não ter mostrado altos valores de EOA, observou-se nos anos 2002, 2004, 2007 e 2010 casos com valores de EOA elevados. Uma possível explicação desses altos valores seria a quantidade de focos registrados neste período e do transporte de partículas de aerossóis de queimada para a região de estudo. Desta forma, nesta análise serão apresentados os anos em que o P99 da EOA teve valores mais elevados sobre a região.

Nos anos de 2002 e 2010 (Figs. 16a e 16d) é possível observar que os pixels de P99 com EOA elevada encontram-se nas mesmas regiões das outras análises apresentadas (noroeste da região analisada, mais especificamente: leste da Argentina e Paraguai e oeste do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul). Nos dois anos essas regiões apresentaram valores de P99 entre 1,5 e 3,3. No restante da área de estudo, observa-se EOA mais baixa, não ultrapassando 1,2. Ainda observa-se alguns pontos sobre o litoral do Rio Grande do Sul e Santa Catarina com valores mais elevados.

No ano de 2004 (Fig. 16b), um dos anos em que houve a maior quantidade de focos de queimada (50.300 focos), observa-se uma grande quantidade de pixels com EOA elevada em grande parte da área de estudo. Os valores maiores encontram-se sobre a Argentina, leste e centro do Paraná e Mato Grosso do Sul; estes se aproximam de 4,8. No Paraná, a EOA contém valores próximos de 3,9 em praticamente todo seu território. Em Santa Catarina e Rio Grande do Sul estes valores são menores, apesar de no primeiro estado os pixels com maiores valores encontrarem-se em maior quantidade. Estes variam entre 1,5 e 2,8 nos dois estados.

Em 2007 (Fig. 16c) a EOA encontrou-se mais baixa, em comparação com 2004, com pixels com valores mais elevados na Argentina, oeste e norte do Paraná, oeste de Santa Catarina e norte do Rio Grande do Sul. Estes pixels com valores mais elevados variam entre 2,4 e 3,6. Observa-se também pixels com EOA mais baixa, de aproximadamente 1,8, principalmente na metade sul (oeste e leste) do Rio Grande do Sul, leste de Santa Catarina e alguns pixels sobre o Paraná.



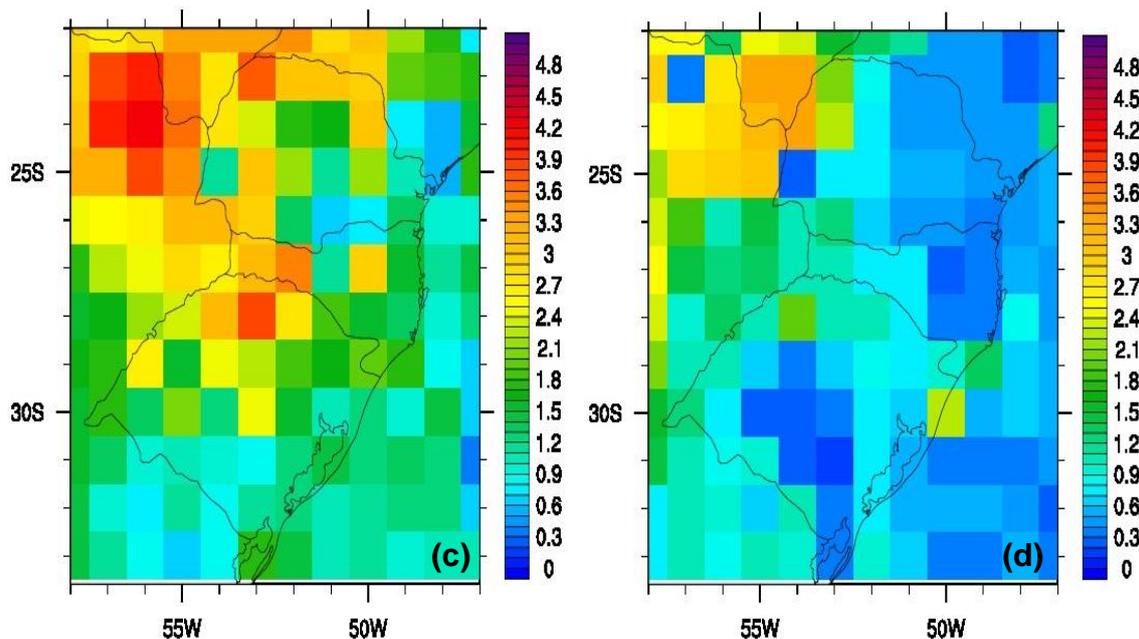


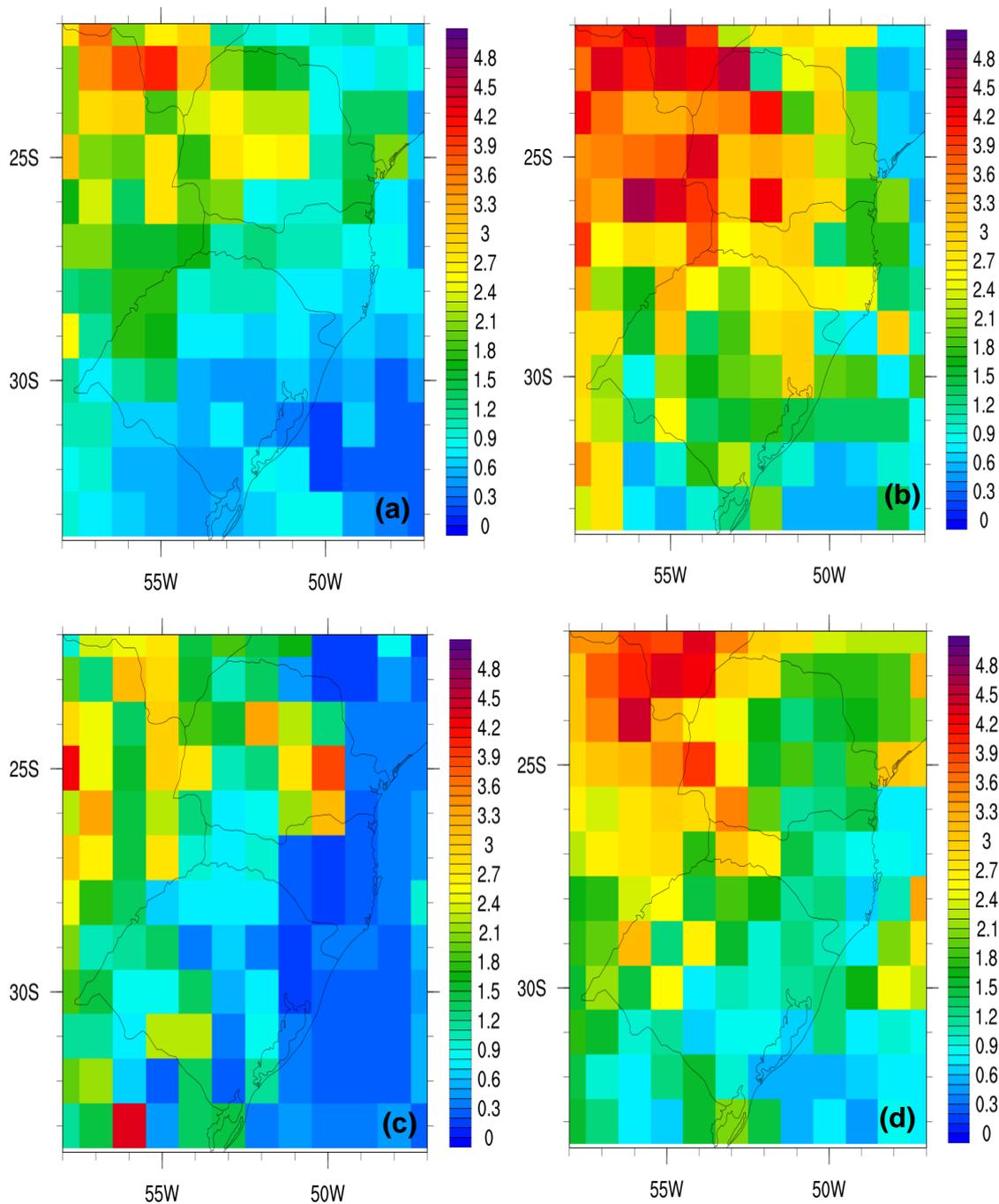
Figura 16 - Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera para as primaveras de 2002 (a), 2004(b), 2007 (c) e 2010 (d).

Dos meses da primavera (setembro, outubro e novembro) do período de estudo, os que apresentaram os maiores valores do P99 da EOA foram setembro e outubro, em alguns anos. Em novembro o P99 apresentou valores baixos, menores que 1,0 em todos os anos e assim como os meses de junho e julho, é apresentado no Anexo A.

A Fig. 17 mostra o P99 da EOA de setembro dos anos 2002, 2004, 2005, 2007 e 2010, que foram os anos em que foram observados os maiores valores de P99 da EOA e estes localizaram-se nas mesmas regiões das situações anteriores, no leste da Argentina e Paraguai e oeste do Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Mais uma vez a possibilidade do transporte de plumas de queima de biomassa é reforçada, já que na maior parte dos pixels (e dos anos) a EOA encontrou-se bastante elevada, contendo pixels (em todos os anos citados) chegando a 4,5, bem como da região onde se observa esses altos valores estar situada próxima à regiões comumente conhecidas por alta quantidade de focos de queimada.

Nos anos de 2002 (Fig. 17a) e 2005 (Fig. 17c) observou-se pixels com valores mais elevados (entre 1,8 e 4,0, aproximadamente) sobre o Paraguai e Argentina. É possível notar ainda alguns destes pixels sobre o Rio Grande do Sul (em 2005). Em 2004 (Fig. 17b), há uma grande quantidade destes pixels

com valores bastante elevados (aproximadamente 4,5 em alguns casos), principalmente na Argentina e Paraná. Nas demais localidades, a EOA apresenta valores mais baixos do que os citados. Em 2007 (Fig. 17d) e 2010 (Fig. 17e) o mesmo padrão foi observado, ou seja, valores mais elevados sobre a região noroeste da área de estudo. Porém em 2007 estes pixels encontraram-se em maior quantidade, preenchendo todo o estado do Paraná, com os maiores valores situados entre o centro e o noroeste do estado.



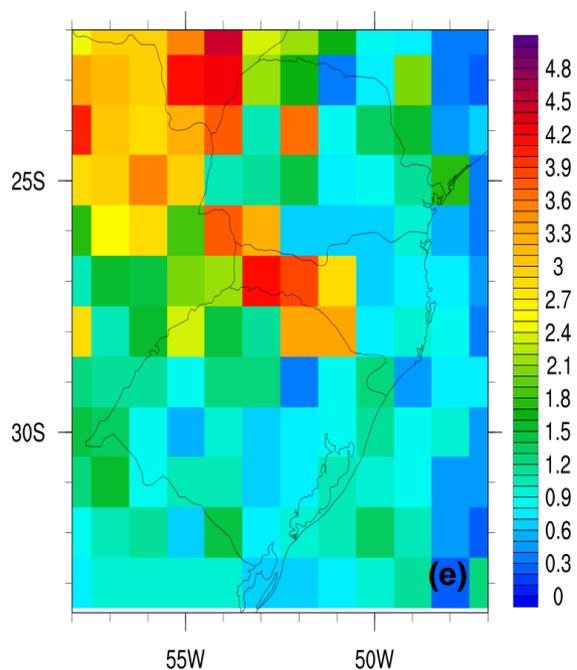


Figura 17 – Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera do mês de setembro dos anos de 2002 (a), 2004(b), 2005 (c), 2007 (d) e 2010(e)

Em outubro os anos em que o P99 da EOA apresentaram os valores mais elevados foram 2004 e 2007. Em 2004 (Fig. 18a) há poucos pixels com EOA elevada, acima de 2,7, entre o leste da Argentina e Paraguai. Em 2007 (Fig. 18b) os pixels localizam-se em grande parte da região de estudo, com EOA entre 2,7 e 4,8. Como em outros casos, os maiores valores estão localizados sobre o estado do Paraguai e sobre a Argentina. Em Santa Catarina e Rio Grande do Sul também observa-se a presença destes pixels porém em menor quantidade.

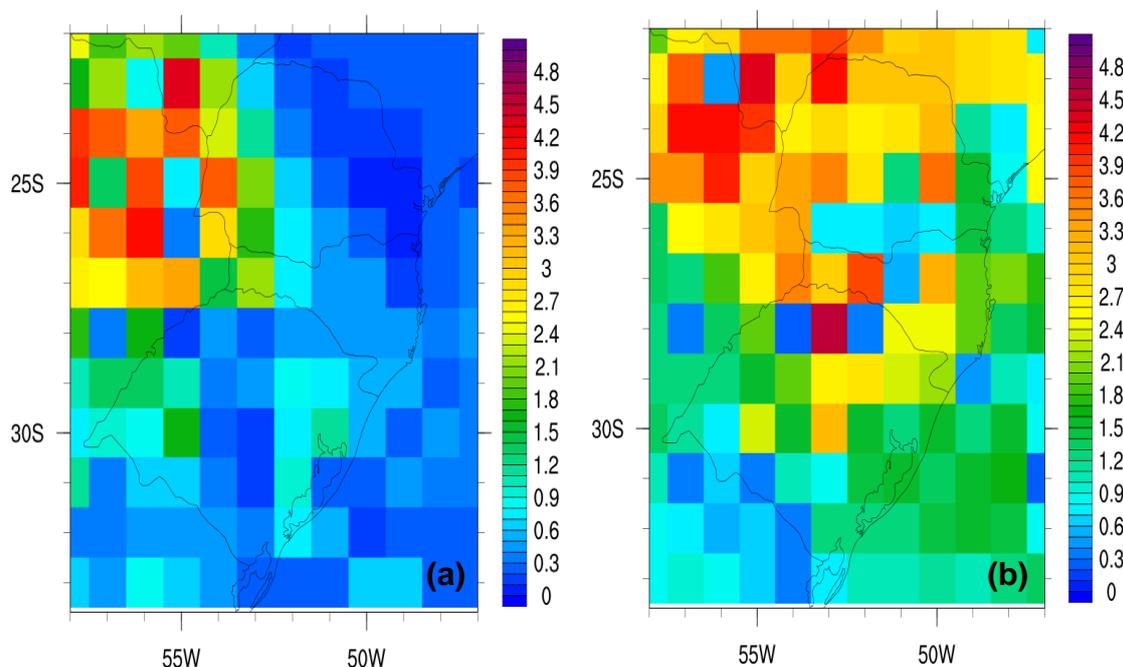


Figura 18 – Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera do mês de outubro de 2004 (a) e 2007 (b).

5.4 Casos de estudo

Devido às incertezas da influência dos aerossóis na atmosfera, estudos sobre estes vêm sendo realizados de formas variáveis. Como mencionado anteriormente, a EOA auxilia na caracterização das partículas. Entretanto somente com esta variável não se tem certeza absoluta sobre o tipo de aerossol na atmosfera; desta forma o EA auxilia neste tipo de análise, uma vez que este informa acerca do tamanho da partícula. Vale ressaltar que, mesmo com o estudo das duas variáveis, ainda não se tem certeza do tipo de partícula presente sobre um local e sua total influência na atmosfera.

Desta forma, estudos de casos em que se fazem análises mais aprofundadas sobre os motivos da variação da EOA em uma determinada região, são de suma importância, já que por estes é possível saber se a elevação foi ocasionada por aerossóis locais ou se estes foram transportados de outras regiões.

Foram observados nas análises apresentadas previamente diversos casos em que a EOA (ou seu P99) apresentou valores elevados dentro de período de estudo. Desta forma, estudos de casos em momentos diferentes

dentro de todo o período serão apresentados neste tópico, isto para auxiliar na identificação dos aerossóis presentes sobre a região analisada.

5.4.1 Agosto de 2005

Considerando que os meses de agosto, de forma geral, apresentaram valores do P99 da EOA, optou-se por analisar o mês de agosto de 2005 pois foi neste mês (em alguns anos) em que foram observados os maiores valores do P99 da EOA. Neste tópico será apresentado o dia 28 de agosto de 2005 apresentado na Fig. 19, em que é mostrado a EOA (a) e EA (b), ambos de toda América do Sul.

Pela Fig. 19a é possível observar regiões com EOA elevada (entre 1,8 e 3,0) entre os estados de Rondônia e Mato Grosso. Lembrando casos citados na revisão bibliográfica (tópico 2), em que foram estudados casos em que houve transporte de partículas de aerossóis de queimadas para a região de estudo e, ainda levando em consideração que são nestes estados que são encontrados os maiores índices destes eventos, há evidências de que este aumento seja decorrente destas partículas. Nota-se a presença de uma pluma em direção à região de estudo, principalmente sobre o Paraná e Santa Catarina.

Observa-se pela Fig. 19b que a EOA é mais elevada entre o Paraguai, Paraná e Santa Catarina. Nestas localidades, é possível caracterizar os aerossóis como atenuadores de radiação, possivelmente devido à queima de biomassa. As Figs. 19c e 19d são referentes ao EA (América do Sul e região Sul). Por estas é possível perceber nos que nos locais onde a pluma passou, encontram-se os valores elevados (acima de 1,5), características de partículas de moda fina, que correspondem a aerossóis de poluição urbana ou de queima de biomassa. Por esta análise pode-se caracterizar, neste evento, os aerossóis como atenuadores de radiação e com material particulado do tipo fino, entretanto ainda resta saber se estes são de poluição urbana ou de queima de biomassa.

A Fig. 20 é correspondente à emissão do monóxido de carbono (CO) gerado pelo modelo CATT-BRAMS em quatro horários diferentes (21 UTC do dia 27, 03, 09 15UTC do dia 28). O CO foi utilizado por ser um excelente traçador, pois dificilmente sofre alterações químicas mantendo assim suas

propriedades. Pelas figuras é possível observar que na região Norte do país o CO encontra-se com valores elevados nos quatro horários especificados. Também observa-se a pluma oriunda da região Norte que se desloca para a área de estudo, principalmente nos locais aproximados em que a EOA apresentou valores elevados, como mostrado na Fig. 19. Além disto, percebe-se pela Fig. 23 que os locais por onde a pluma se deslocou, coincidem com os focos de queimadas mostrados na figura. Desta forma é possível confirmar que os valores elevados de EOA ocorreram devido ao transporte de plumas de queimada da região Norte do país, já que nas simulações feitas, foram consideradas somente as fontes de queimada, excluindo-se qualquer influência de fontes antropogênicas ou biogênicas.

Considerando que as partículas foram classificadas como finas, pode-se concluir que seu transporte seja facilitado pela ação dos ventos em níveis mais baixos. Pela Fig. 21 é possível observar os ventos alísios na região Norte do País que, devido a circulação sobre a região amazônica, são direcionados para o sul do continente chegando aos estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Segundo o boletim da Climanálise, entre a noite do dia 28 e o dia 29 originou-se um sistema frontal estacionário, que pode ser notado aproximadamente entre -30° e -60° S e -50° e -30° O.

A Fig. 22 é referente a imagem do satélite GOES-12 das 12UTC em que observa-se que nas regiões em que a EOA é mais elevada, dentro da pluma, há predominio de céu claro, o que possibilita o transporte das partículas. Possivelmente devido as queimadas alterarem severamente os mecanismos de formação de nuvens, injetando na atmosfera uma grande quantidade de NCNs (Núcleos de Condensação de Nuvens), porém com gotas pequenas que reduzem fortemente a eficiência das nuvens em gerar precipitação (Pauliquevis et al., 2007). Isto pode ter ocorrido sobre a região onde nota-se uma grande quantidade de nuvens, no sul da região, decorrentes do sistema frontal.

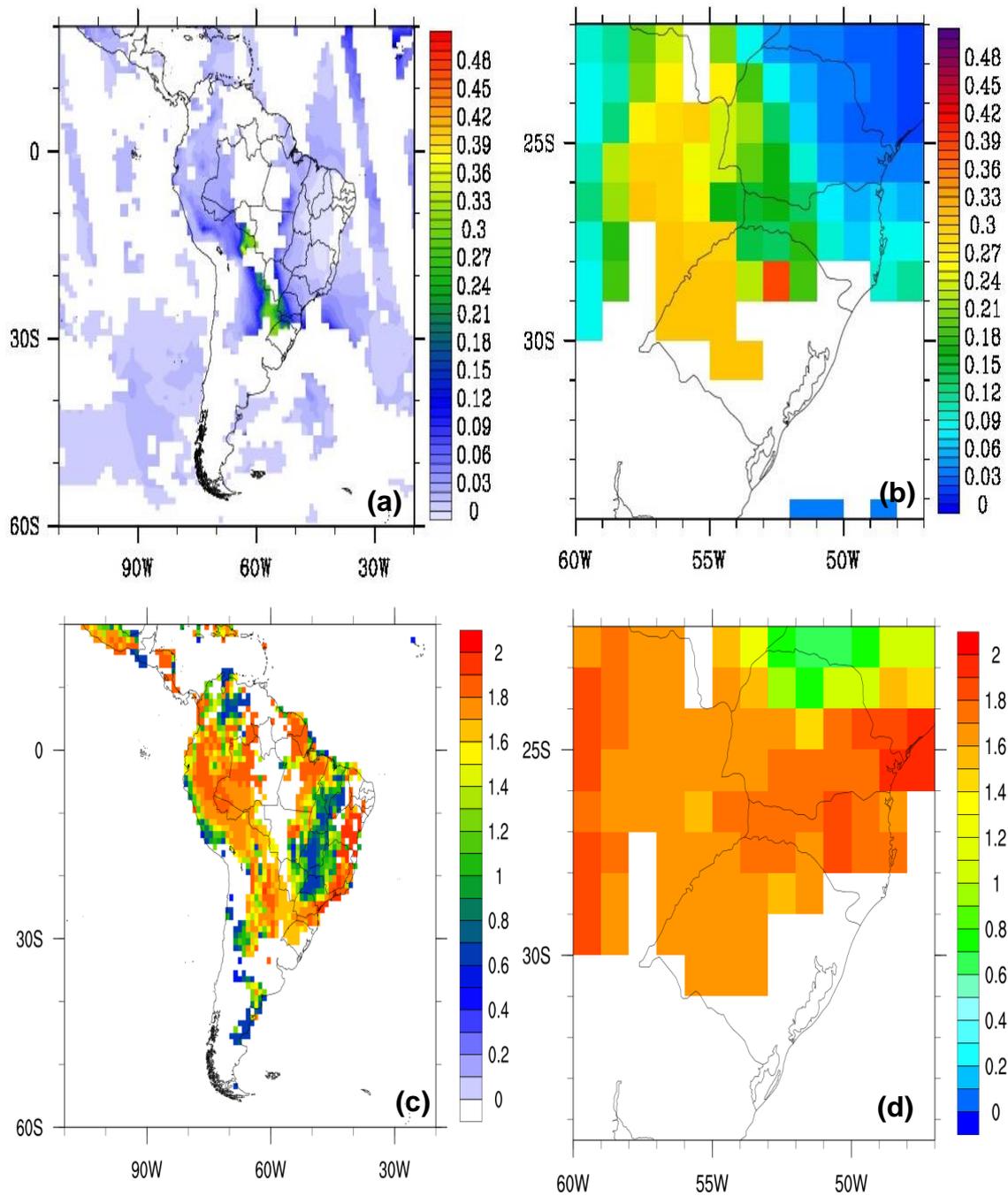


Figura 19 - Espessura Óptica da Atmosfera (a e b) e Expoente de Angstrom (c e d) no comprimento de onda de $0,55 \mu\text{m}$ do dia 28 de agosto de 2005.

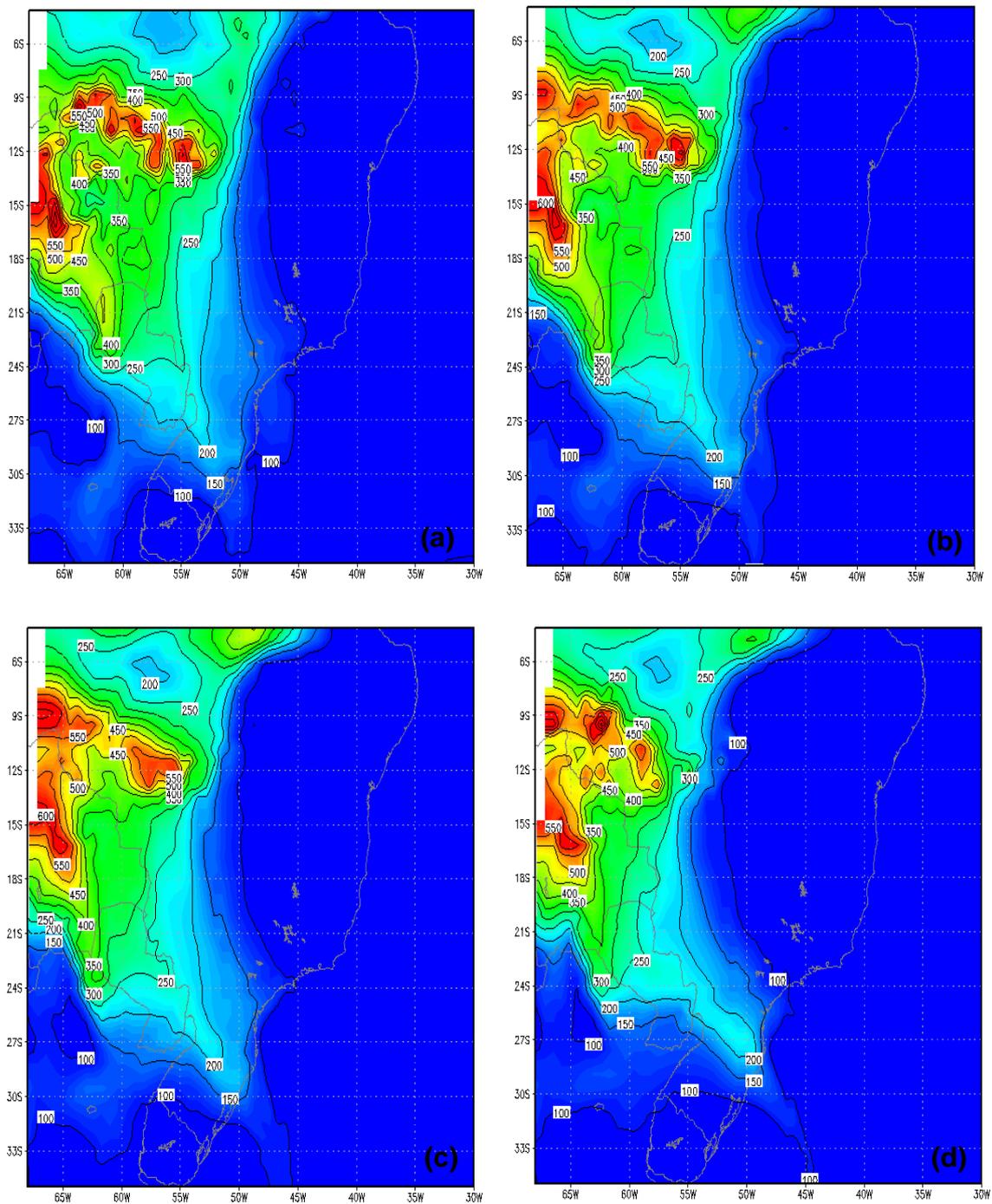


Figura 20 – Emissão de monóxido de carbono gerado pelo CATT-BRAMS das 21UTC do dia 27 de agosto de 2005 (a), 03, 09 e 15UTC do dia 28 de agosto de 2005 (b,c e d).

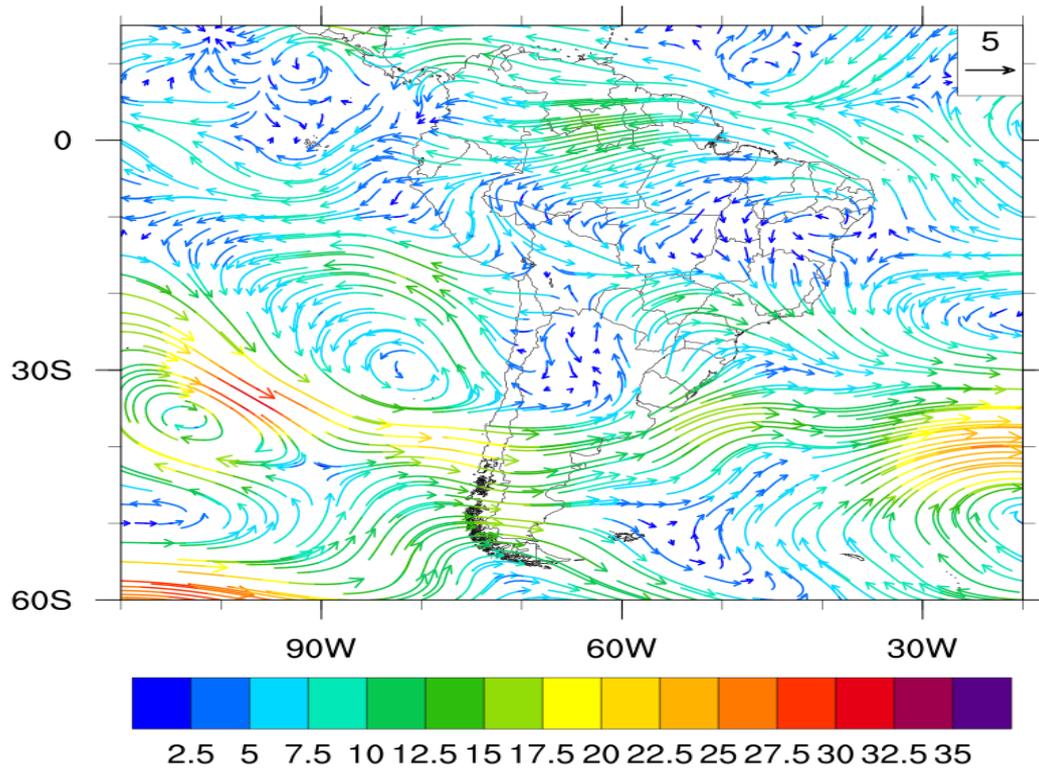


Figura 21 – Vetor vento médio em 850 hPa do dia 28 de agosto de 2005.

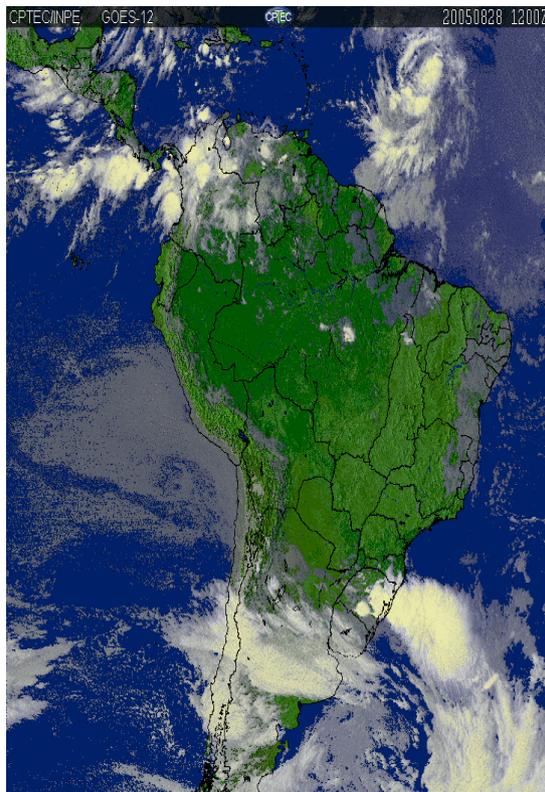


Figura 22 – Imagem do satélite Goes- 12 do dia 28 de agosto de 2005 das 12UTC.

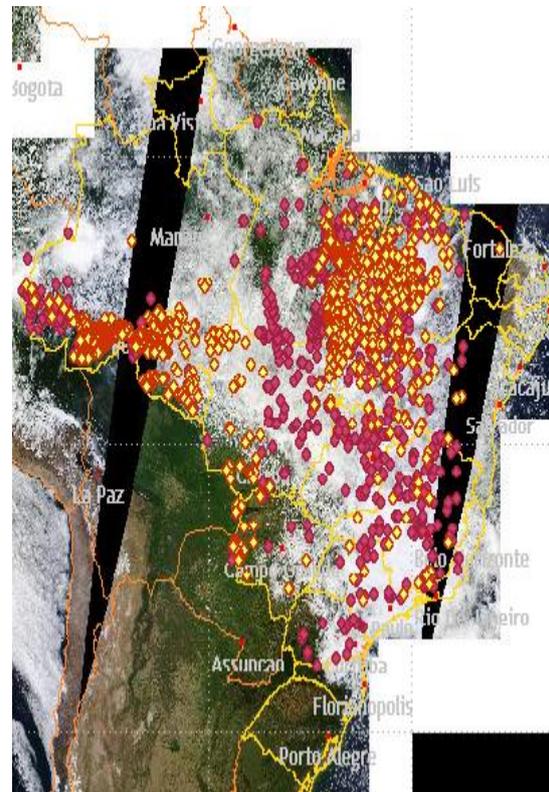


Figura 23 – Focos de queimada do dia 28 de agosto de 2005.

5.4.2 Setembro de 2004

De acordo com as análises anteriores, sabe-se que 2004 foi um dos anos em que a EOA apresentou seus maiores valores sobre a região de estudo. Ainda sabe-se que setembro é um dos meses em que este aumento ocorre de forma mais significativa, devido a altos índices de eventos de queimadas. A Fig. 24a é referente à EOA do dia 22 de setembro de 2004; nesta é possível perceber a pluma de aerossóis oriunda do norte do país com valores baixos de EOA, que aumentam no estado do Mato Grosso do Sul e Paraguai, chegando ao Rio Grande do Sul. Nestes locais, a EOA tem um aumento considerável, aproximando-se de 4,0. Enfocando na região de estudo (Fig. 24b), observa-se a presença de regiões com EOA bastante elevada entre a Argentina e Paraguai, que variam entre 4,2 e 4,8, mostrando claramente a presença de aerossóis bastante atenuadores de radiação, provavelmente de queima de biomassa. No Rio Grande do Sul, há uma diminuição da EOA se comparado com os valores apresentados mais ao norte, mas para o estado também é consideravelmente alta.

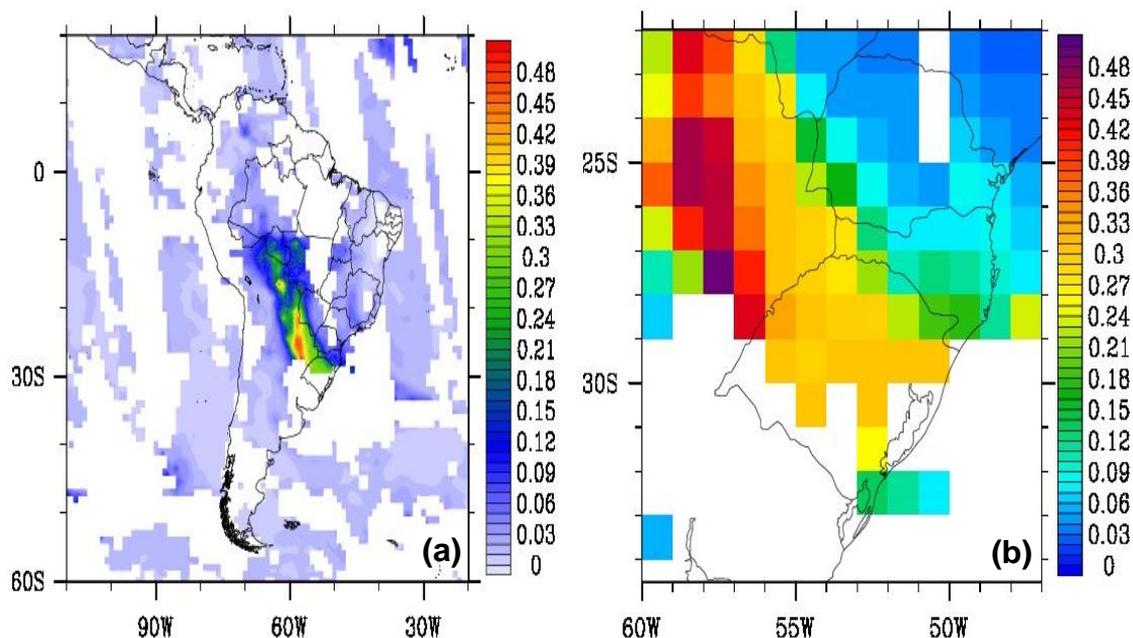
A Fig. 24c correspondente ao EA para o mesmo dia apresentado. Observa-se que na maior parte dos locais onde a pluma foi transportada, os valores foram maiores que 1,5, indicando a presença de partículas finas (corroborando com aerossóis transportáveis). Levando em consideração a EOA e o EA, pode-se caracterizar os aerossóis como atenuadores de radiação com partículas finas.

Observando o transporte do CO, mostrado na Fig. 25 é possível notar que a pluma com valores elevados (valores variam entre 400 600 kg/kgdia) de CO estende-se da região Norte do Brasil até a área de estudo, nos quatro horários especificados 21 UTC do dia 21, 03, 09 e 15 UTC do dia 22. Ainda é possível notar que nos quatro horários, os maiores valores de CO na região de estudo, estão localizados onde a EOA apresentou seus valores mais elevados. Pela Fig. 27 é possível observar uma grande quantidade de focos de queimada nos locais onde ocorreram os maiores valores de CO, indicando uma grande quantidade de partículas lançadas na atmosfera. Desta forma é possível confirmar que os altos valores de EOA foram decorrentes de transporte de aerossóis de queimadas principalmente da região Norte do país, já que o

padrão de transporte do CO assemelha-se ao da EOA.

A Fig. 26 mostra, na região nordeste, ventos alísios sendo direcionados para o sul do continente devido a um anticiclone sobre o Oceano Atlântico. Os vetores indicam alta velocidade do vento, no oceano (entre 22,5 e 25 m/s), o que pode ter auxiliado no transporte das partículas com EOA elevada para a região Sul do País. Os dois anticiclones ou Altas Subtropicais (o outro está localizado no Oceano Pacífico) podem ser indicativos de que o continente encontrava-se seco, facilitando também este transporte (para este dia, não havia disponibilidade de imagem de satélite).

Com estas informações é possível entender que o aumento na EOA entre a Argentina e Paraguai no dia 22 de setembro de 2004 ocorreu devido a presença de aerossóis de queima de biomassa, uma vez que o padrão do vento possibilitou este transporte da região central da América do Sul.



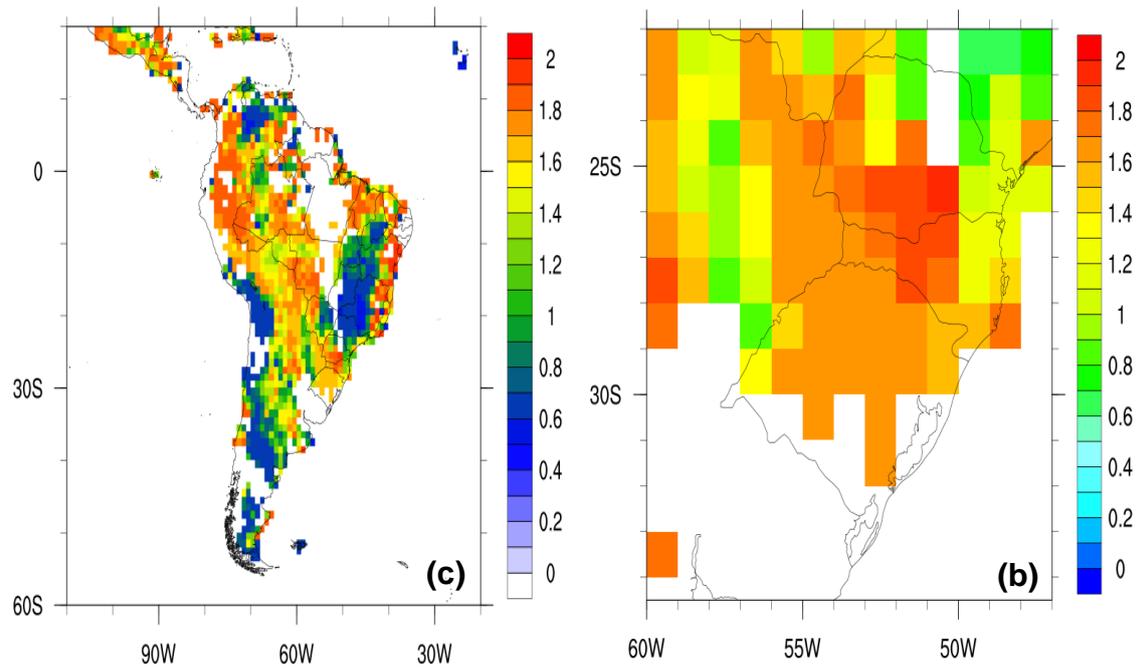
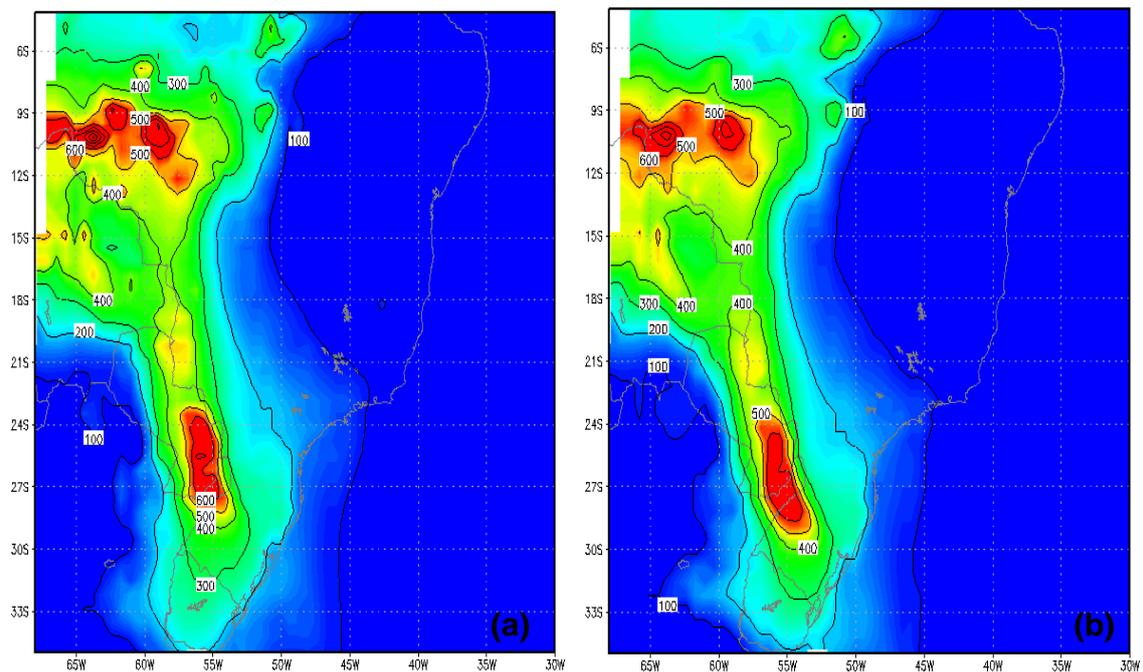


Figura 24 - Espessura Óptica da Atmosfera (a e b) e Expoente de Angstrom (c e d) no comprimento de onda de 0,55 μm do dia 22 de setembro de 2004.



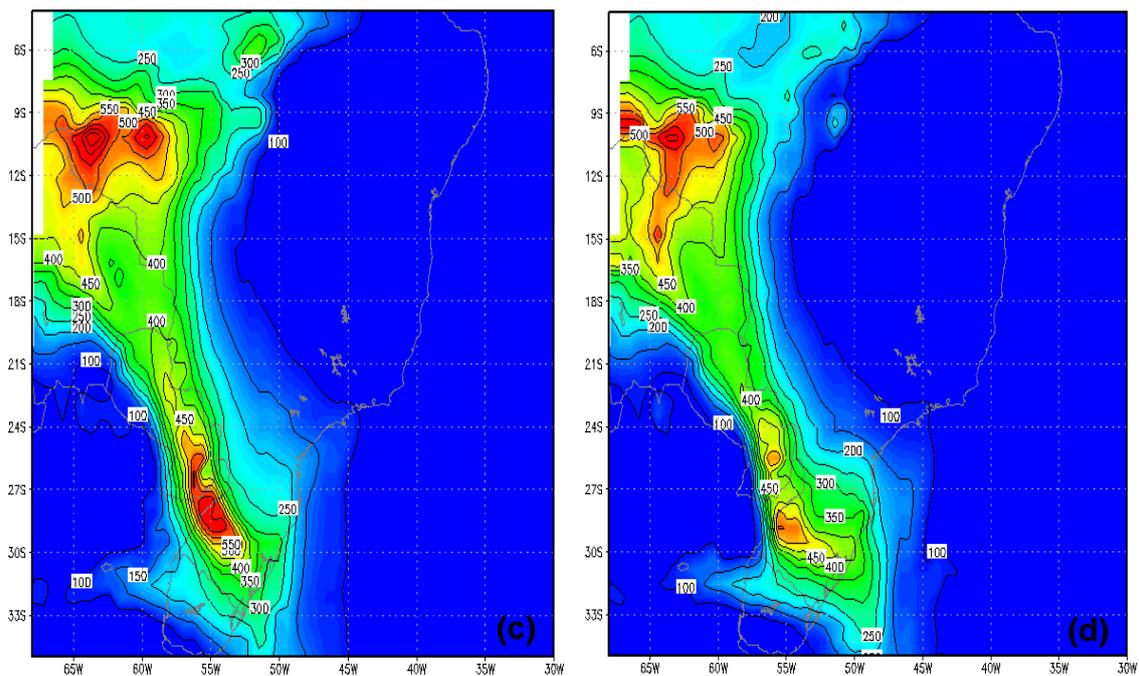


Figura 25 – Emissão de monóxido de carbono gerado pelo CATT-BRAMS das 21UTC do dia 21 de setembro de 2005 (a), 03, 09 e 15UTC do dia 22 de setembro de 2004 (b,c e d).

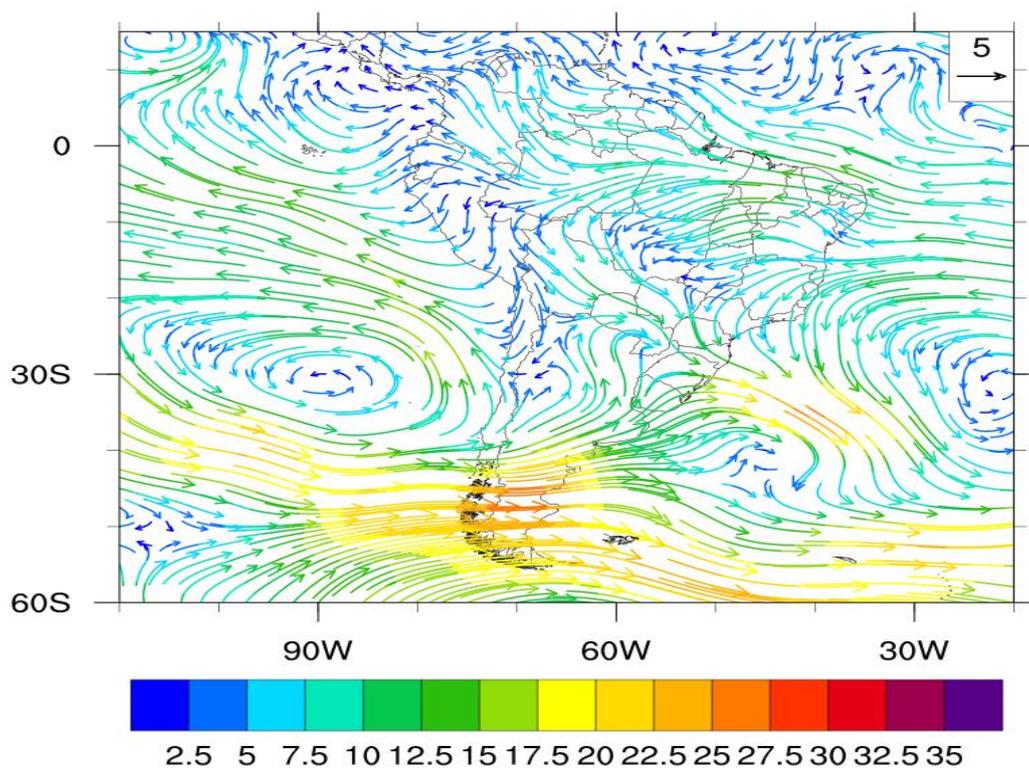


Figura 26 – Vetor vento médio em 850hPa do dia 22 de setembro de 2004.

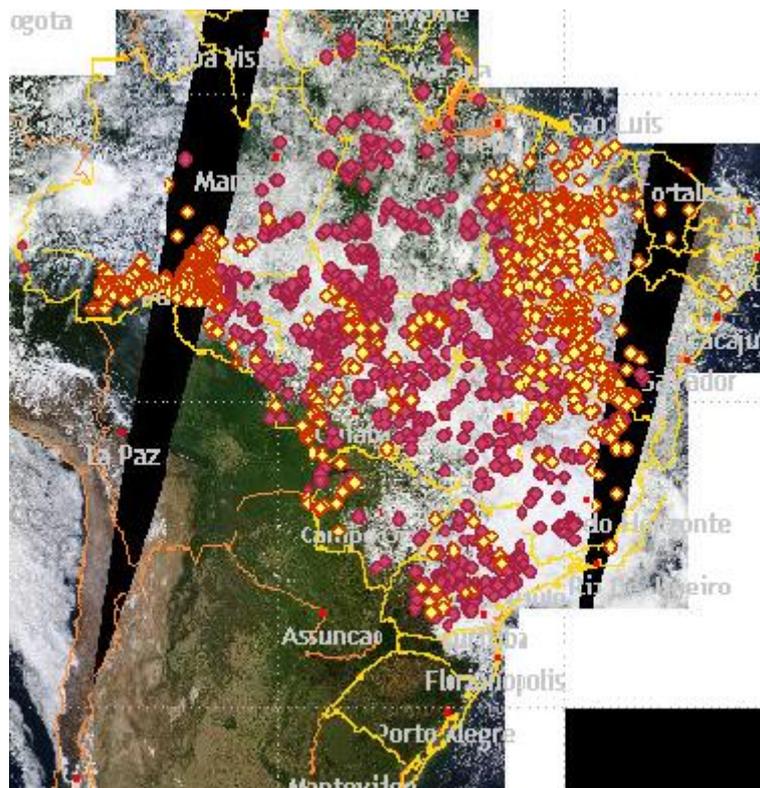


Figura 27 – Focos de queimada do dia 22 de setembro de 2004.

5.4.3 Setembro de 2007

Este caso refere-se ao dia 07 de setembro de 2007 no qual se observa, pela Fig. 28a, uma pluma com altos valores de EOA que se estende da região Norte até o sul da América do Sul. Os maiores valores encontram-se entre Rondônia, Mato Grosso e Bolívia, e ainda observam-se valores altos sobre o Oceano Atlântico. Na Fig. 28b nota-se alguns dos pixels com EOA elevada na região de estudo, principalmente no Paraguai e Argentina. Segundo dados do grupo de queimadas do CPTEC/INPE neste dia ocorreram 3.363 focos de queimada no Brasil e muitos deles na região onde se encontram os valores elevados de EOA como indicado pela Fig. 32.

O EA (Fig. 28c) nos locais onde se encontram os maiores valores de EOA na região Norte, apresentou valores mais baixos, comparados aos locais onde há valores menores de EOA (aproximadamente 1,2), caracterizando as partículas presentes sobre essa região como de moda grossa. Nos locais onde a EOA tem os menores valores, no leste do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, o EA ficou em torno de 1,6, característica de partículas grossas. Na região de estudo (Fig. 28d) observa-se que os menores valores

(aproximadamente 0,8) de EA coincidem com os menores de EOA, localizados no Paraná. Nas demais regiões o EA é mais elevado chegando a aproximadamente 2,0, caracterizando as partículas como finas. No local em que se observa EOA com valor elevado, de 4,5 aproximadamente (além dos outros pixels elevados) o EA também tem valores elevados, o que caracteriza esta região com aerossóis atenuadores de radiação com partículas finas.

Analisando o transporte do CO neste dia, foi possível observar que a pluma tem valores menores, em comparação aos outros casos, e se localiza principalmente a oeste da América do Sul (às 21 UTC do dia 06, representada pela Fig. 29). Nos outros horários a pluma se desloca para o sul da América do Sul, chegando à área de estudo. Observa-se nos demais horários (03, 09 e às 15UTC do dia 07) que os valores menores da pluma de CO relacionam-se com os de EOA, o que confirma que os valores de EOA na região Sul ocorreram em decorrência do transporte de aerossóis de queimada.

Neste dia é possível observar pela Fig. 30, uma alta subtropical localizada no Oceano Atlântico que faz com que o vento se desloque para a região Sul, à medida que passam pelo local onde a EOA estava mais elevada. De acordo com a imagem de satélite das 21 UTC mostrada pela Fig. 31, em todo o país predominava a condição de céu claro.

Por este caso é possível perceber que dentro de uma pluma de partículas de aerossol, há valores variados de EOA, à medida que a pluma se desloca para o sul do continente. Mesmo onde se observa uma grande quantidade de pixels com valores de EOA mais baixos, ainda é possível notar a presença de alguns pixels com valores elevados, fora dos locais onde há concentração de focos de queimada (entre Rondônia e Mato Grosso), como por exemplo, além dos pixels na região de estudo, no extremo sul do continente e sobre o Oceano.

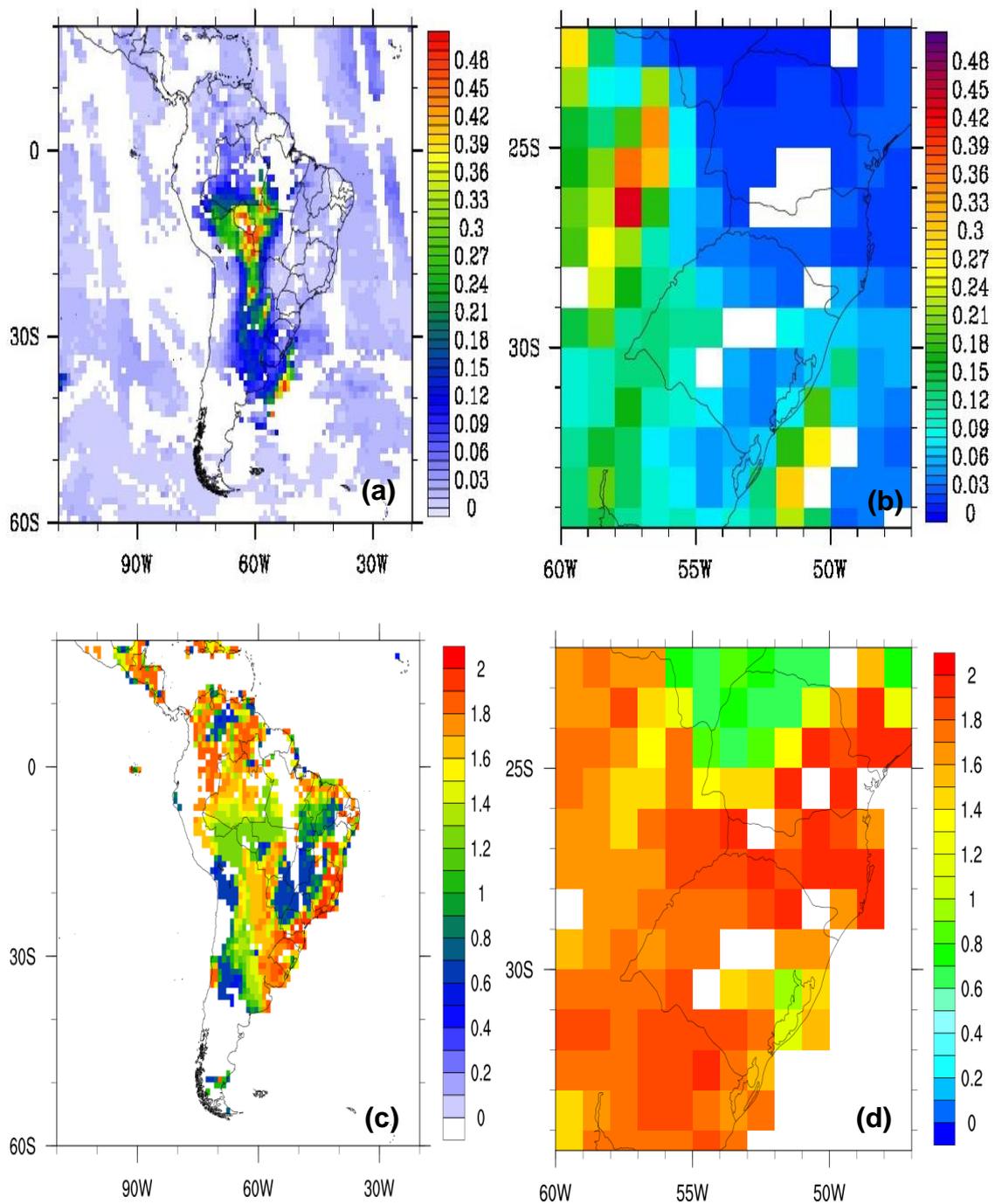


Figura 28 - Espessura Óptica da Atmosfera (a e b) e Expoente de Angstrom (c e d) no comprimento de onda de $0,55 \mu\text{m}$ do dia 07 de setembro de 2007.

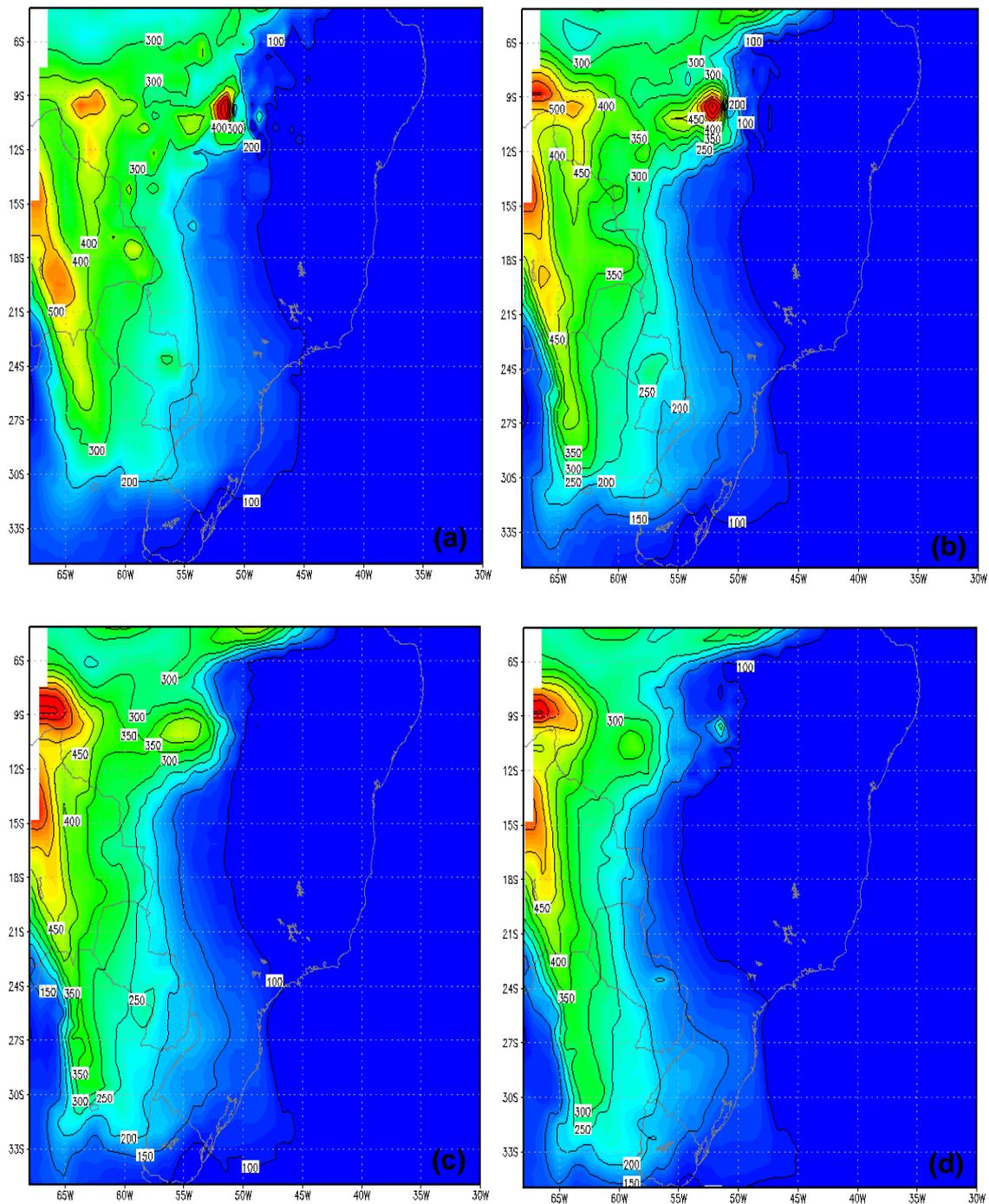


Figura 29 – Emissão de monóxido de carbono gerado pelo CATT-BRAMS das 21UTC do dia 06 de setembro de 2007 (a), 03, 09 e 15UTC do dia 07 de setembro de 2007 (b,c e d).

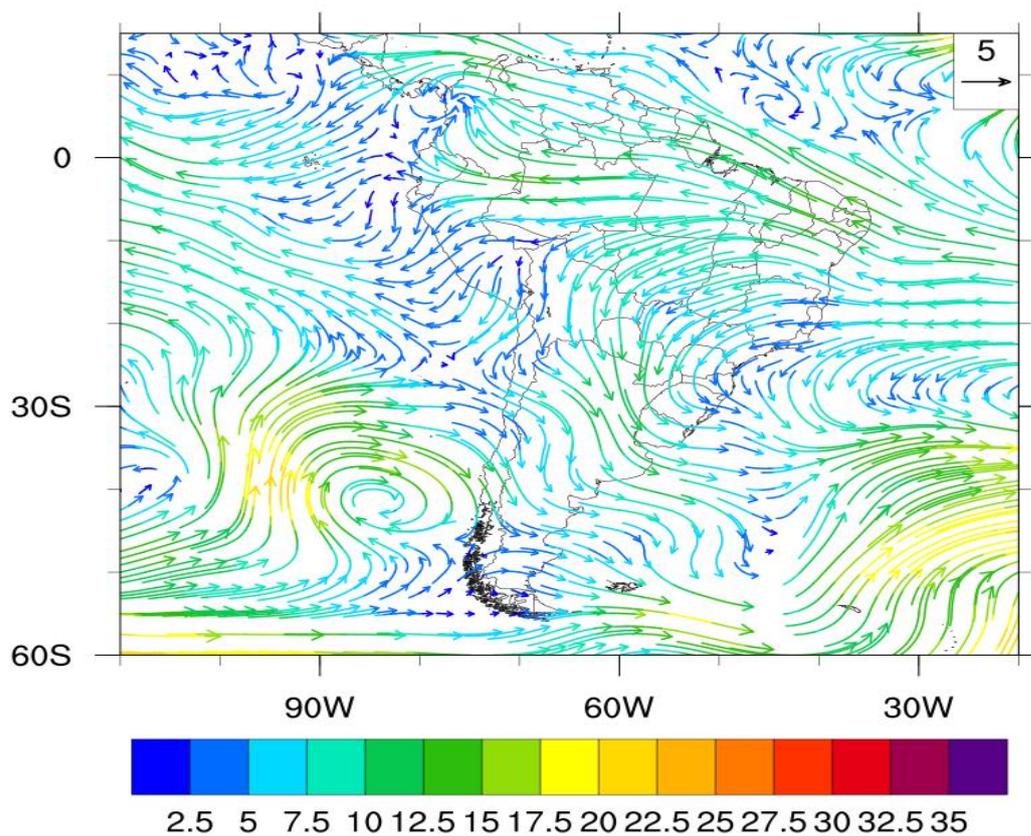


Figura 30 - Vetor vento médio em 850hPa do dia 07 de setembro de 2007.



Figura 31 – Imagem do satélite Goes – 10 das 21UTC do dia 07 de setembro de 2007.

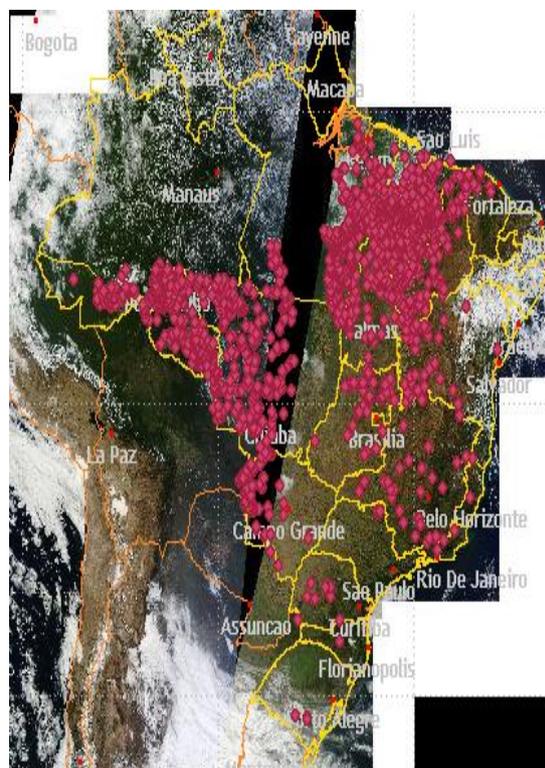


Figura 32 – Focos de queimadas do dia 07 de setembro de 2007.

Conclusões

O objetivo deste trabalho foi analisar o impacto da Espessura Óptica da Atmosfera (EOA) através de dados do sensor MODIS no período de 2002 a 2011 na região Sul do Brasil.

Pela análise da EOA concluiu-se, através da mediana, que o tipo de aerossol predominante na região Sul é caracterizado como pouco atenuador de radiação, com valores de EOA menores que 1,0. Entretanto foi observada a ocorrência de valores elevados de EOA, como nos anos de 2002, 2004, 2007 e 2010 e nestes caracterizou-se os aerossóis como atenuadores de radiação. Considerando o Expoente de Angstrom (EA) concluiu-se que na região, há a presença de partículas grossas ($EA < 1,5$) e finas ($EA > 1,5$), mas de acordo com a mediana, predominam as partículas de moda fina. Desta forma classificaram-se os aerossóis, em sua grande parte sobre a região analisada, como pouco atenuadores de radiação com partículas finas caracterizando-os como aerossóis de poluição urbana. Nos casos em que a EOA apresentou valores elevados, caracterizou-se os aerossóis como atenuadores de radiação de moda fina, possivelmente de queima de biomassa.

Pela análise do percentil 95 (P95) do valor máximo diário da EOA concluiu-se que os maiores valores (5% dos dados) ocorrem em períodos, principalmente entre o inverno (junho, julho e agosto - JJA) e a primavera (setembro, outubro e novembro - SON), quando, na região Norte e Centro - Oeste do Brasil, ocorrem os maiores índices de queimada, o que possivelmente propiciaram o aumento. Os anos que apresentaram os maiores valores de máximo diário da EOA foram os mesmos da análise anterior, 2002, 2004, 2007 e 2010, anos estes em que ocorreram os maiores índices de focos de queimada. Desta forma, neste período, percebeu-se uma maior influência

dos eventos de queimadas sobre a região Sul do Brasil, eventos locais ou devido ao transporte de aerossóis de outras regiões.

Pela análise do percentil 99 (P99) da EOA em cada ponto da região de estudo, concluiu-se que os aerossóis (1% dos dados) foram classificados como atenuadores de radiação, com valores de EOA maiores do que 1,0. Além disso, conclui-se que estes valores elevados ocorrem nos meses do inverno (JJA) e primavera (SON), principalmente nos meses de agosto, setembro e outubro. Os pixels com os valores elevados de EOA situaram-se, principalmente, entre o leste da Argentina e Paraguai, sul do Mato Grosso do Sul e oeste do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, em todos os casos com EOA entre 1,5 e 4,8, aproximadamente. Devido à localização dos pixels supõe-se que esta elevação se deu devido a partículas de queima de biomassa.

Nos casos de estudo apresentados concluiu-se que em casos em que a EOA esteve mais elevada, houve fatores como a presença de anticiclones (em alguns casos, Alta Subtropical) que direcionaram o vento da região norte para a região de estudo, o que possivelmente advectou estas partículas para o Sul do Brasil. Desta forma pela análise da EOA e do EA conclui-se que os aerossóis presentes na atmosfera da região Sul são pouco atenuadores de radiação e de moda fina ($EOA < 0$ e $EA > 1,5$). Para confirmar a presença de aerossóis de queimadas transportados para a região sul a análise do monóxido de carbono (CO) foi realizada, e a partir desta concluiu-se que houve o transporte de partículas de fumaça uma vez que foi observado plumas com valores elevados de CO da região norte para a área de estudo.

De forma geral, percebeu-se que na região Sul do País a EOA sofre influência de partículas diferentes em sua área, havendo predomínio de aerossóis pouco atenuadores de radiação. Entretanto, observou-se a presença de aerossóis atenuadores de radiação em alguns locais. Desta forma, pode-se dizer que a região sofre a influência tanto de aerossóis de poluição (pouco atenuadores de radiação), como de aerossóis de queima de biomassa (atenuadores de radiação), advectados e locais. Saliencia-se o fato deste trabalho ser uma tentativa de identificação destas partículas, assim como das áreas que sofrem influência de outras regiões. Por isto mais estudos acerca do assunto devem ser feitos. Como sugestão de trabalhos futuros destaca-se:

- Analisar outras variáveis meteorológicas, como a umidade relativa, para relacionar sua influência nos valores de EOA;
- Estudar os sistemas meteorológicos que mais contribuem para o transporte de partículas de queimadas para a região Sul do Brasil;
- Utilizar outros instrumentos de medição de aerossóis (ex.: fotômetro solar da AERONET) a fim de se comparar com os resultados obtidos neste trabalho.

Referências

ABEL, S. J.; HIGHWOOD, E.J.; HAYWOOD, J. M.; STRINGER, M. A .The direct radiative effect of biomass burning aerosols over southern Africa. **Atmospheric Chemistry Physics**. ,v. 5, p. 1999–2018, 2005.

AHLM, L.; NILSSON, E. D. ; KREJCI, R.;MARTENSSON1, E. M. ;VOGT, M.; ARTAXO,P. Variations in black carbon aerosol, carbon monoxide and ozone over an urban area of Hyderabad, India, during the forest fire season. **Atmospheric Chemistry Physics**. ,v.10,p. 3063–3079, 2010.

ALBUQUERQUE, T.T .**Distribuições de tamanho, composição química e identificação das fontes do aerossol atmosférico de São Paulo: Um estudo de caso para o inverno de 2003**. 2005. Dissertação de Mestrado(DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – DCA)Universidade de São Paulo

ALMEIDA, A. M. E. ,**Aerossol carbonoso: Contribuição para sua caracterização**. 2009. Dissertação de mestrado (Departamento de Ambiente e Ordenamento), Universidade de Aveiro.

ALVES, C. Aerossóis atmosféricos: perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. **Química Nova**, v. 28, n. 5, p. 859-870, 2005.

ALTARATZ, O.; KOREN, I.; YAIR, Y., PRICE, C. Lightning response to smoke from Amazonian fires. **Geophysical Research Letters**. v. 37, 2010.

AROLA, A., LINDFORS, A.; NATUNEN, A.; LEHTINEN, K. E. J. A case study on biomass burning aerosols: effects on aerosol optical properties and surface radiation levels. **Atmospheric Chemistry Physics**. ,v.7, p. 4257–4266, 2007.

ARTAXO, P.; GATTI, L. V.; LEAL,A. M. C.; LONGO, K.M.;FREITAS, S. R.; LARA, L.L.;PAULIQUEVIS, T. M.;PROCÓPIO, A. S.; RIZZO, L. V .Química atmosférica na Amazônia: A floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. **ACTA Amazonica**. , v.35, p. 185-196, 2005.

ARTAXO,P.;OLIVEIRA, P. H.; LARA, L. L.;PAULIQUEVIS,T. M.; RIZZO, L. V.; JUNIOR, C. P.;PAIXÃO, M. A.;LONGO, K. M.; FREITAS, S.;CORREIA, A. L. Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em

queimadas na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3a, p. 168-22, 2006.

BADARINATH, K.V.S.; KHAROL, S. K.; CHAND, T.R. K.; PARVATHI, Y. G.; ANASUYA, T.; JYOTHSNA, A. N. Variations in black carbon aerosol, carbon monoxide and ozone over an urban area of Hyderabad, India, during the forest fire season. **Atmospheric Research** v. 85, p. 18-26, 2007.

BARROS, S.S.; OYAMA, M.D. Sistemas meteorológicos associados à ocorrência de precipitação no Centro de lançamento de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**. São Paulo, v. 25, n. 3, 2010.

BINGEN, C.; FUSSEN, D.; VANHELLEMONT, F. A review of stratospheric aerosol characterization. **Advances in Space Research**, v. 38, p. 2433-2445, 2006.

CLIMANÁLISE – Disponível em <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rcliman/boletim/#>> Acesso em 28 de jul. de 2013.

COSTA, A. A.; PAULIQUEVIS, T. Aerossóis, nuvens e clima: Resultados do experimento LBA para o estudo de aerossóis e microfísica de nuvens. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.2, 234-253, 2009.

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

FERREIRA, J.; OLIVEIRA, P.A. Variação sazonal do ciclo diurno e anual da espessura óptica na cidade de São Paulo. **Anais do...XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2006.

FILHO, A.E.O; **Variabilidade sazonal e temporal das propriedades ópticas de aerossóis atmosféricos na Amazônia**. 2011. Tese de doutorado (Departamento de Física), Universidade Federal do Mato Grosso.

FINLAYSON-PITTS, B. J., PITTS, J. N. (1999). **Chemistry of the upper and lower atmosphere: theory, experiments and applications**. Academic Press.

FREITAS, S.R; LONGO, M.K; SILVA DIAS, F.A.M; SILVA DIAS, L.P. Emissões De queimadas em ecossistemas da América do Sul. **Estudos avançados**, v.19, n. 53, p. 167-185, 2005.

FREITAS, R.S.; LONGO, K.; SILVA DIAS, A.M.; SILVA DIAS, L.P.; CHATFIELD, R.; FAZENDA, A.; RODRIGUES, F.L.; The coupled aerosol and tracer transport model to the Brazilian developments on the regional atmospheric modeling system: Validation using direct and remote sensing observations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY. 8. **Anais do... Foz do Iguçu**, 2006, p. 101-107 (a).

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; M. Andreae. The impact of including the plume rise of vegetation fires in numerical simulations of associated atmospheric pollutants. **Geophys. Res. Lett.**, 33, L17808, doi:10.1029/2006GL026608, 2006 (b).

FREITAS, S. R. ; Longo, K. M. ; Alonso, M. F. ; Pirre, M. ; Marecal, V. ; Grell, G.; STOCKLER, R. ; Mello, R. F. ; Sánchez Gácita, M. PREP-CHEM-SRC 1.0: a preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 419-433, 2011.

GOMES, S.; DOMICIANO, S.M. O impacto dos aerossóis na temperatura. **Anais do...VII Semana de Engenharia Ambiental**, 2009.

HAAG, R.; KRENZINGER, A. Irradiância solar típica na região amazônica e seu impacto em dispositivos fotovoltaicos de diferentes tecnologias. **Anais do...IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES CLA)**, 2010.

HARTMANN, D.L. **Global physical climatology**. Seattle, Washington. Academic Press, 1994. 425p.

HARTMANN , D. L; MOUGINIS-MARK, P. EOS Science Plan. In: NASA Headquarters, 1999. p. 339-378.

HOSKER, R.P.; LINDBERG,S.E. Review: Atmospheric deposition and plant assimilation of gases and particles. **Atmospheric Environment**, v. 16, n. 5, p.889-910, 1982.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em:< <http://www.ibge.gov.br>>. Censo 2010. Acesso em 25 de fev. de 2013.

JORDAN, N.S.; ICHOKU, C.; HOFF, R.M. Estimating smoke emissions over the US Southern Great Plains using MODIS fire radiative power and aerosol observations. **Atmospheric Environment**, v. 42 n. 2088, p. 2007-2022, 2007.

JOSSE, B. ; SIMON, P.; PEUCH, V-H. Radon global simulations with the multiscale chemistry and transport model MOCAGE. **Tellus**, v. B 56, 339-356, 2004.

KASKAOUTIS, D.G.; KAMBEZIDIS, H.D.; HATZIANASTASSIOU, N.; KOSMOPOULOS, P.G.; BADARINATH, V.S. Aerosol climatology: dependence of the Angstrom exponent on wavelength over four AERONET sites. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v. 7, p. 6357- 6411, 2007.

KAUFMAN, Y.J.; TANRÉ, D.; BOUCHER, O. A satellite view of aerosols in the climate system **Nature**, v.419 p. 215-223. 2002.

KAUFMAN, J. Y.; KOREN, I. Smoke and Pollution Aerosol: Effect on Cloud Cover. **Science**. v. 313, p. 655-658, 2006.

KOREN, I.; MARTINS, V.; REMER, A. L.; AFARGAN, H. Smoke Invigoration versus inhibition of clouds over Amazon. **Science**. v. 321, p.946-949, 2008.

LATHA, K.M.; BADARINATH, K.V.S. Seasonal variations of black carbon aerosols and the total aerosol mass concentration over urban environment in India. **Atmospheric Environment**, v. 39, p. 4129-4141, 2005.

LESINS, G.; LOHMANN, U. Using MODIS and AERONET to Determine GCM Aerosol Size. **Journal of the Atmospheric Sciences**, V. 63. 2005.

Longo, K. M. ; Freitas, S. R. ; Pirre, M. ; Marécal, V. ; Rodrigues, L. F. ; PANETTA, J. ; Alonso, M. F. ; Rosário, N. E. ; Moreira, D. S. ; Gácita, M. S. ; Arteta, J. ; Fonseca, R. ; Stockler, R. ; Katsurayama, D. M. ; Fazenda, A. ; Bela, M. The Chemistry CATT-BRAMS model (CCATT-BRAMS 4.5): a regional atmospheric model system for integrated air quality and weather forecasting and research. **Geoscientific Model Development**, v. 6, p. 1389-1405, 2013.

LUCCA, S.; ARTAXO, P.; CASTANHO, A. A.; CORREIA, A.; PIRES, C. Questões relacionadas á obtenção de espessura óptica de aerossóis em alta resolução na região amazônica. **Anais do... XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2006.

MASMOUDI, M.;CHAABANE, M.; K.;MEDHIOUB, K.; ELLEUCH. F. Variability of aerosol optical thickness and atmospheric turbidity in Tunisia. **Atmospheric Research**, v. 66, p. 175-188, 2003.

MATHER, T.A.; PYLE, D.M.; OPPENHEIMER, C. Tropospheric Volcanic Aerosol. Volcanism and the Earth's Atmosphere, **Geophysical Monograph** n.139, p. 189-212, 2003.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <<http://www.nasa.gov/audience/forstudents/index.html>>. Acesso em 27 de fev. de 2012.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov>>. Acesso em 14 de jul. de 2013.

NICOLÁS, J.F.; YUBERO, E.; PASTOR,C.; CRESPO, J.; CARRATALÁ, A. Influence of meteorological variability upon aerosol mass size ditribution. **Atmospheric Research**, v. 94, p. 330-337, 2009.

OTERO, L.A.; RISTORI, P.R.; PAWELKO, E.E.; PALLOTTA,J.V.; D'ELIA, R.L.; QUEL, E.J. Biomass burning aerosol detection over Buenos Aires City, August 2009. **IOP Science** 2011.

PAULIQUEVIS, T; ARTAXO, P.; OLIVEIRA, P.H.; PAIXÃO, M. O papel das partículas de aerossol no funcionamento do ecossistema amazônico. **Ciência e Cultura**, v. 59, n.3, p. 48-50, 2007.

POSSANI, G.; BERTANGNOLLI, C; CARBONE, S; PINHEIRO, D; ALVALÁ, P; SCHUCH, N. Estudo do método de Langley na determinação das espessuras ópticas de aerossóis no observatório espacial do sul. **Anais do... XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnologia em Engenharia**, 2006. (a)

POSSANI,G.;CARBONE ,S.;PINHEIRO, D. K.; ALVALÁ, P. C.; SCHUCH, N.J. Influência de queimadas na espessura óptica de aerossóis na banda do UV no extremos sul do Brasil: 2002-2006. **Anais do... XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2006. (b)

POWDER, H.C. The geography and climatologie of aerossol. **Progress in physical/geography** v.27, n. 4, p. 502-547, 2003.

RECUERO, F.S. **Estudo do Transporte das Partículas de Aerossol de Queimada via Sensoriamento Remoto**. 2003. Dissertação de Mestrado (DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – DCA)Universidade de São Paulo

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.

RIBEIRO, B.Z.; MARIANO, G.L. Transporte da pluma do vulcão Puyehue para o Rio Grande do Sul em Junho de 2011: Análise Sinótica. **VII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia**, 2011, Santa Maria.

ROCHA, V.R.; YAMASOE, M.A. Interação entre a Profundidade Óptica do Aerossol a Fração de Cobertura de Nuvens na Amazônia utilizando dados obtidos com o MODIS. **Anais do... XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia 2010**, Belém.

ROSÁRIO, É. M. N. **Estudo da Variabilidade das Propriedades Ópticas dos Aerossóis sobre a América do Sul e dos Impactos do Efeito Radiativo Direto das Partículas de Queimadas**. 2011. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo (USP).

ROSENFELD, D.; LOHMANN, U.; RAGA, G. B.; O'DOWD. C. D.; KULMALA, M.; FUZZI, S.; REISSEL, A. ANDREAE, O. Flood or Drought: How do aerosols affect precipitation?. **Science**. v. 321, p. 1309-1313, 2008.

RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C.; **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos, SP. Parêntese, 2007. 427p.

SCHUSTER, G.L; DUBOVIK, O; HOLBEN, B.N. The Angstrom Expoent and Bimodal Aerosol Size Distributions. **Journal of Geophysical Research**,v. 111, 2006.

SEINFELD J., PANDIS, S. **Atmospheric Chemistry and Physics**. Hoboken, New Jersey. 2ed. John Wiley & Sons, Inc., 2006, 1248p.

SILVA, A. A. **A espessura Óptica da Atmosfera na banda do UV-B**. 2005. Tese de doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

SILVEIRA, V.C.; RIBEIRO, B.Z.; MARIANO, G.L. Estudo das características sinóticas e de espessura ótica dos aerossóis do vulcão Puyehue, no Chile. **V GeoNordeste**, 2011, Feira de Santana.

SIMIONI, J.P.D.; SAMPAIO, F.M.A.S. Principais causas da ocorrência de aerossóis atmosféricos na região central do estado do Rio Grande do Sul. **V GeoNordeste**, 2011.

TEYSSÈDRE, H.; MICHOU, M.; CLARK, H. L.; JOSSE, B.; KARCHER, F.; OLIVIÉ, D.; PEUCH, V.-H.; SAINT-MARTIN, D.; CARIOLLE, D.; ATTIÉ, J.-L.; NÉDÉLEC, P.; RICAUD, P.; THOURET, V.; VAN DER, A R. J.; VOLZTHOMAS, A.; CHÉROUX F. A new tropospheric and stratospheric Chemistry and Transport Model MOCAGE-Climat for multi-year studies: evaluation of the present-day climatology and sensitivity to surface processes. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 7, 5815-5860, 2007.

ULKE, A.G. Regional pollution due to biomass burning in South America, **Ciência e Natura**, 2007.

ULKE, A.G. Aerosol characterization in Buenos Aires and relationships with transport patterns in South America, **Ciência e Natura**, 2009.

WAGNER, F.; SILVA, A.M. Some considerations about Angström exponent distributions. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.8, p. 481-489, 2008.

WALLACE J.M.; HOBBS P.V. **Atmospheric Science: An Introductory Survey**. Nova Iorque, USA. 2ed. Academic Press. 2006. 505p.

WILKS,D.S. **Statistical Methods in the atmospheric science**. California, USA. 2ed. Academic Press. 2006. 649p.

ANEXO A

Percentis 99 (P99) e medianas (P50)

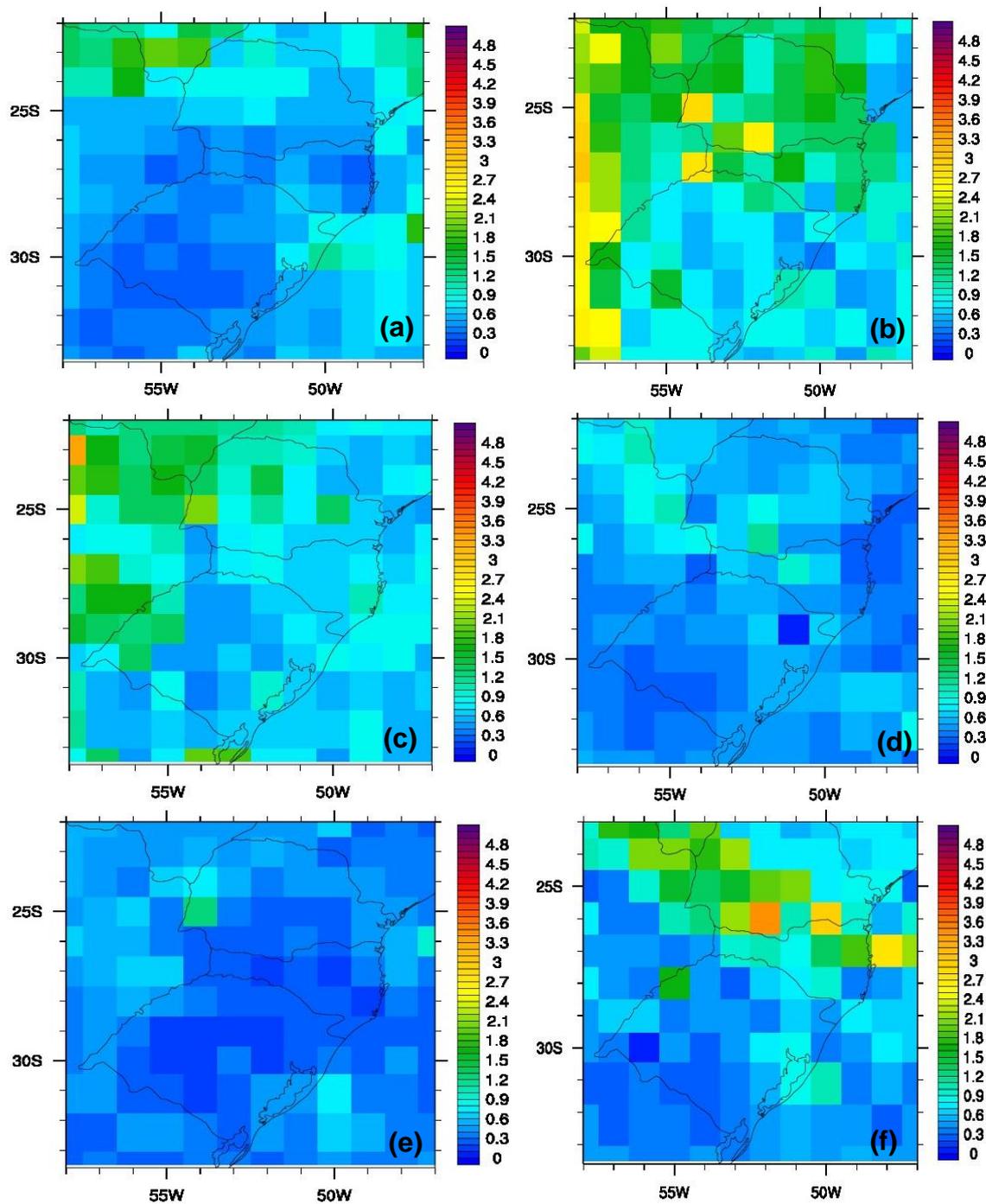
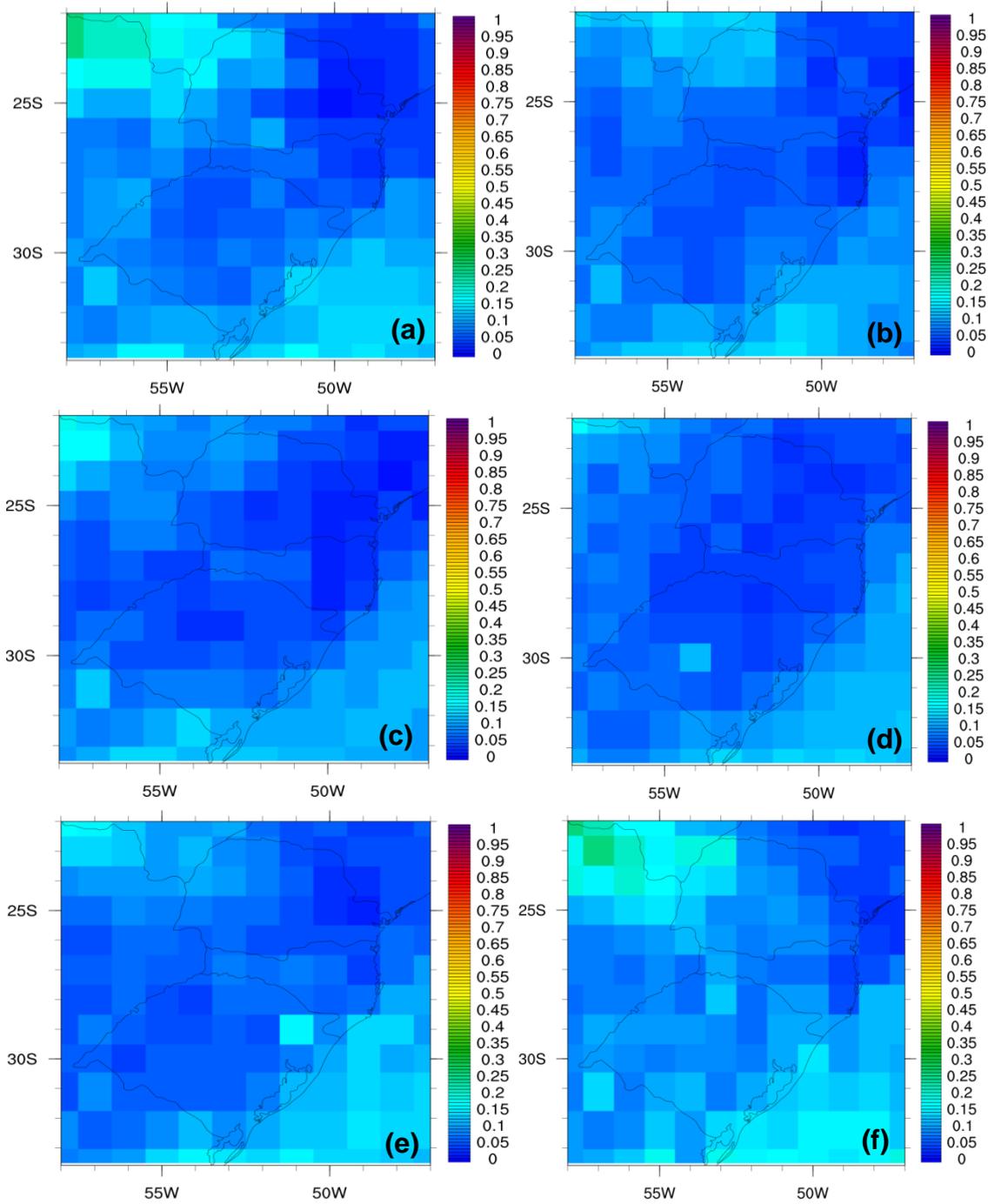


Figura 1 - Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera para os invernos de 2003 (a), 2004 (b), 2006 (c), 2008 (d), 2009 (e) e 2011 (f).



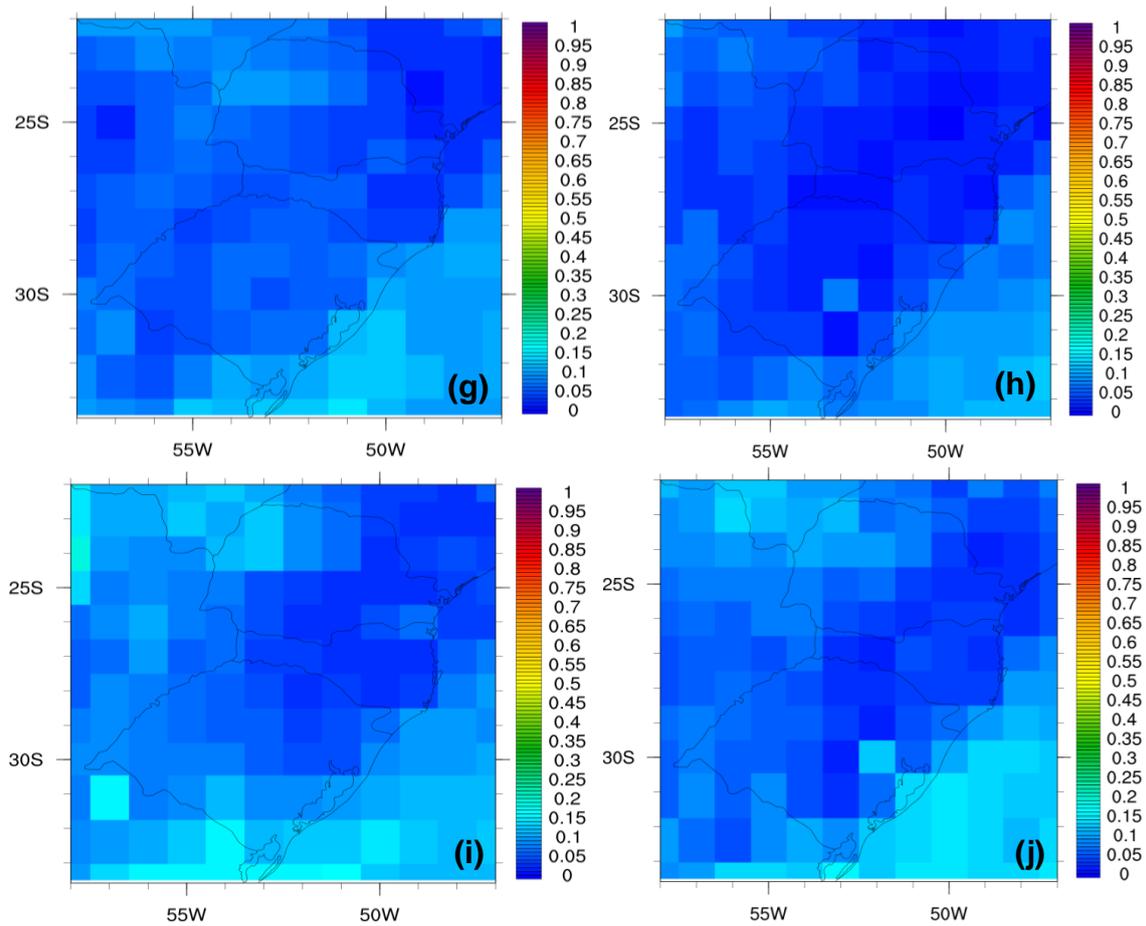


Figura 2 – Mediana (P50) da Espessura Óptica da Atmosfera para os invernos de 2002 (a), 2003 (b), 2004 (c), 2005 (d), 2006 (e), 2007 (f), 2008 (g), 2009 (h), 2010 (i) e 2011 (j).

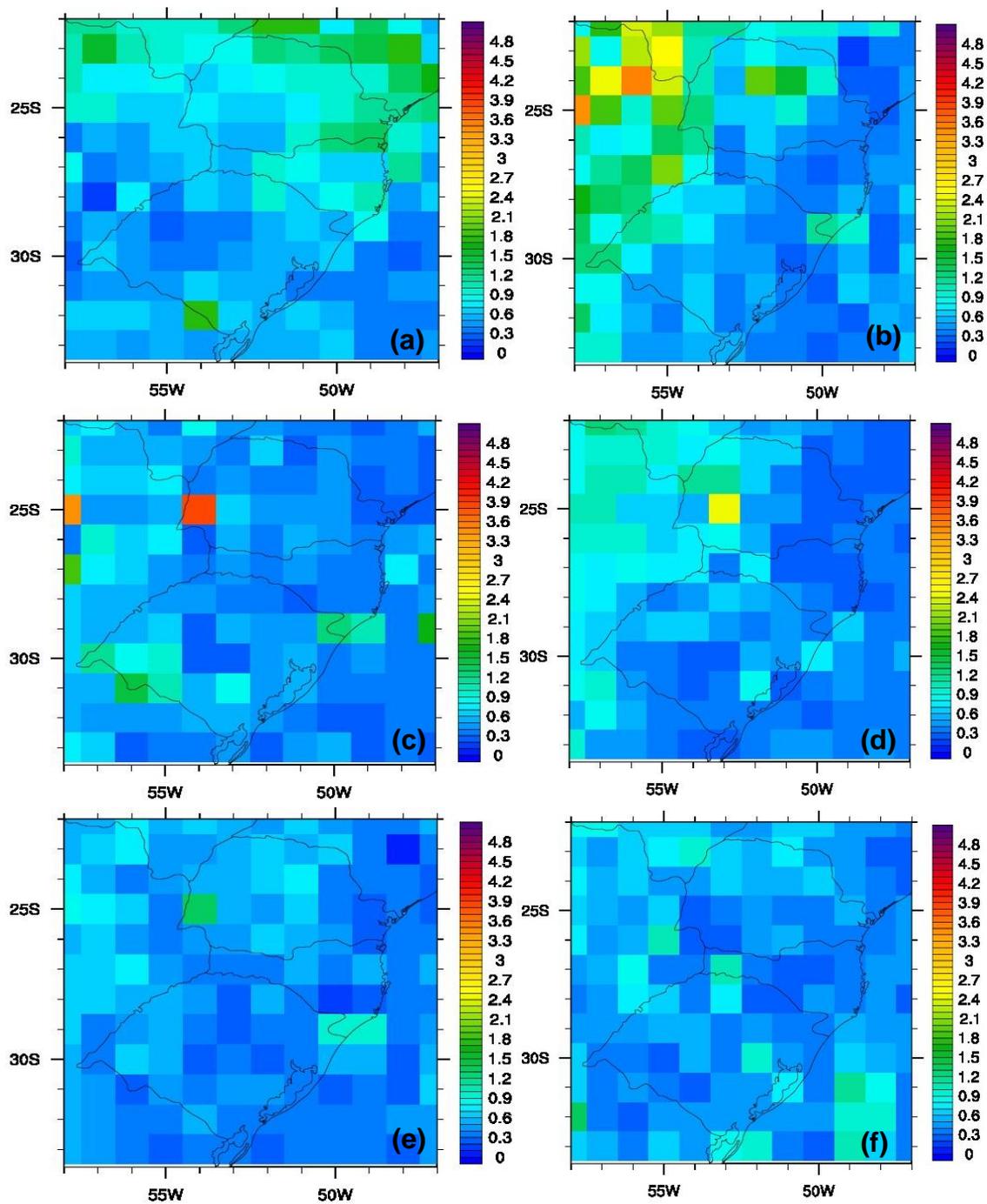
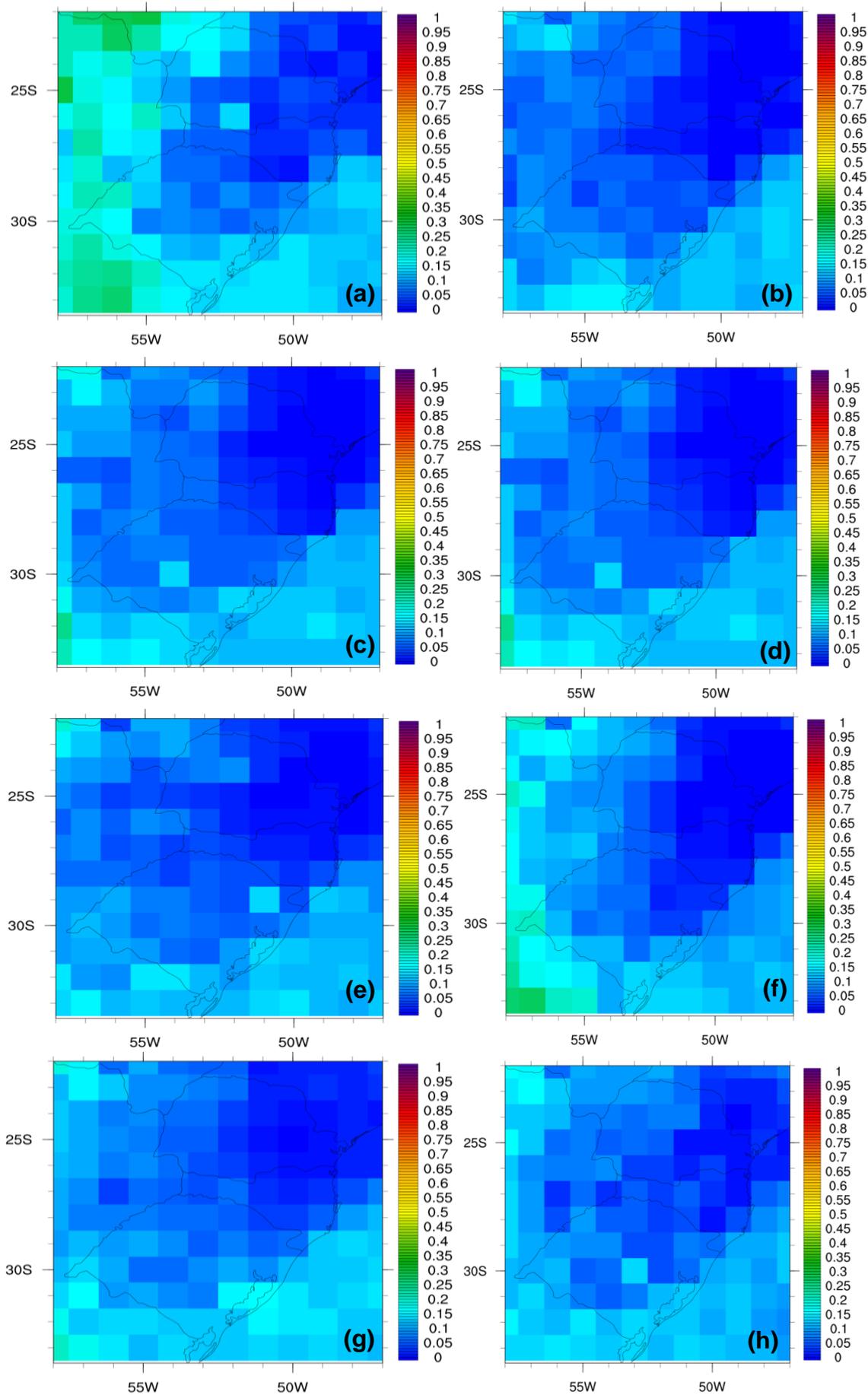


Figura 3 - Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera para as primaveras de 2003 (a), 2005 (b), 2006 (c), 2008 (d), 2009 (e) e 2011 (f).



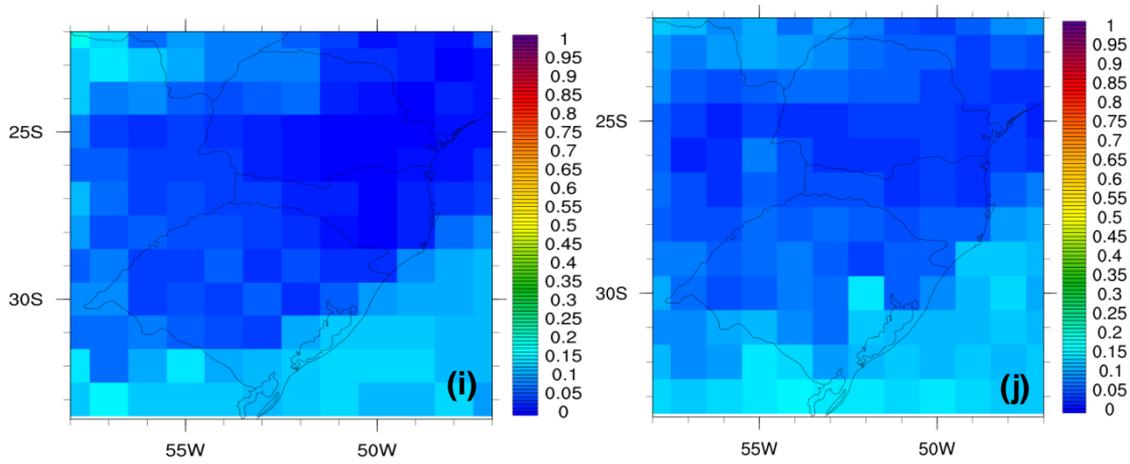
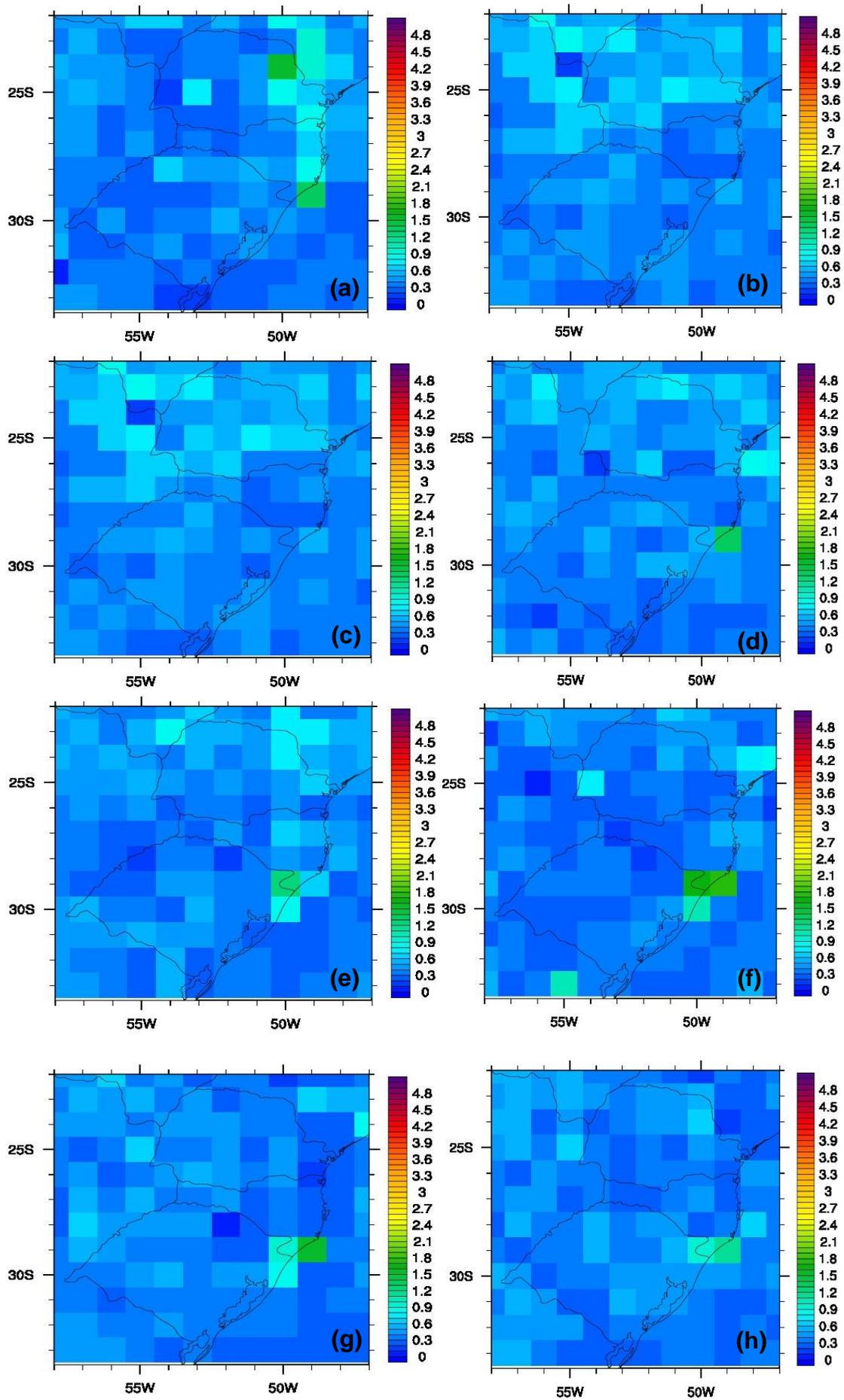


Figura 4 – Mediana (P50) da Espessura Óptica da Atmosfera para as primaveras de 2002 (a), 2003 (b), 2004 (c), 2005 (d), 2006 (e), 2007 (f), 2008 (g), 2009 (h), 2010 (i) e 2011 (j).



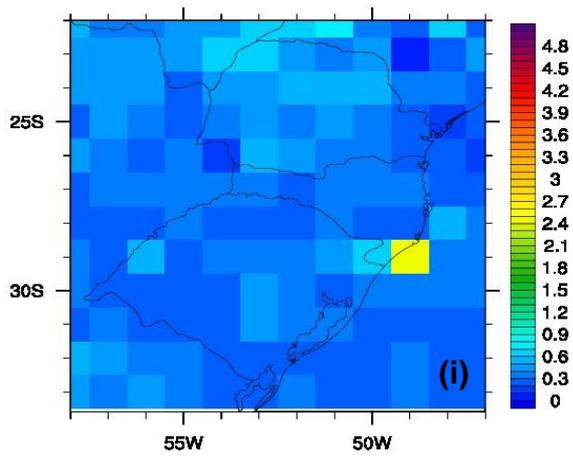
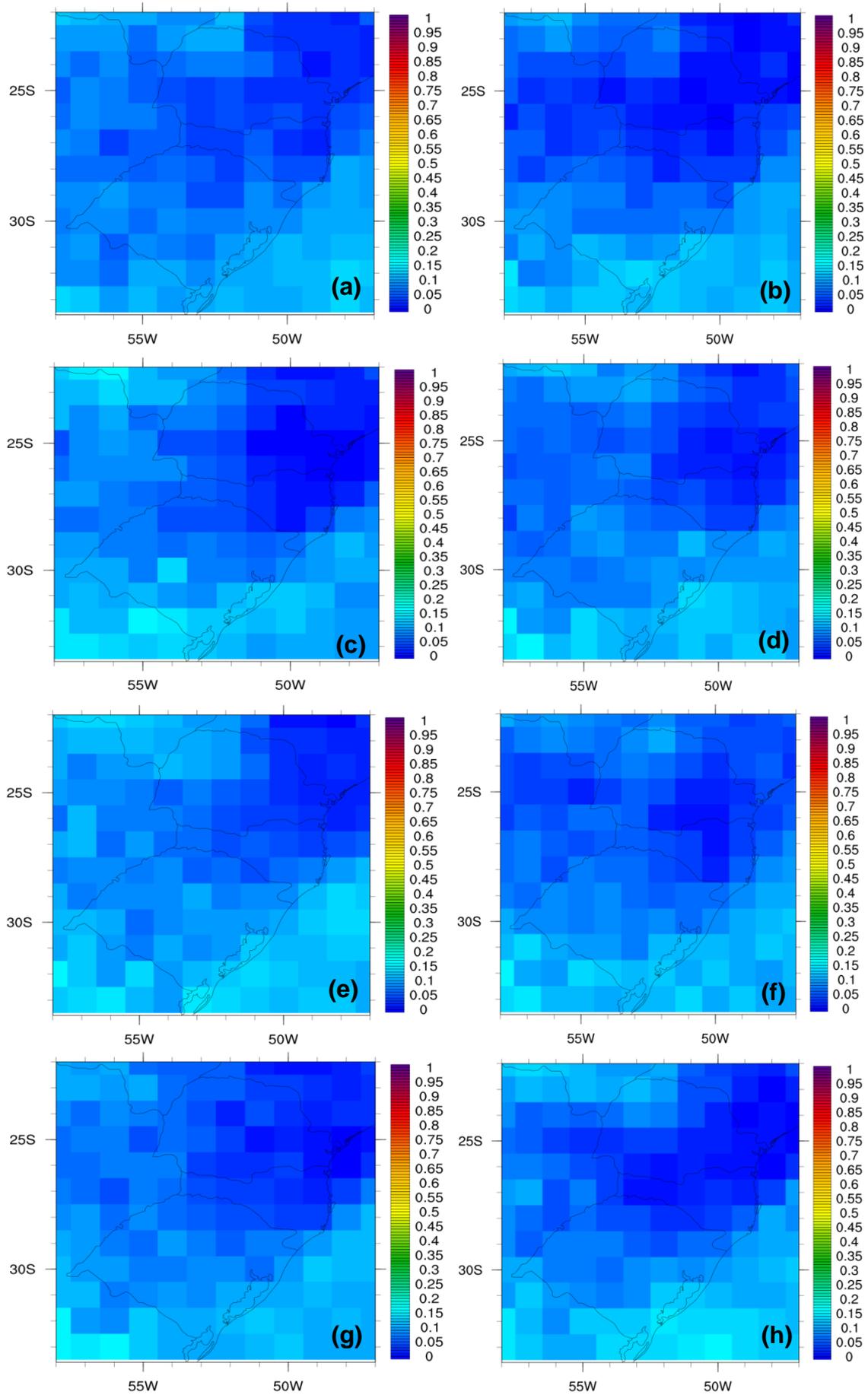


Figura 5 - Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera para os verões de 2002 (a), 2003 (b), 2004 (c), 2005 (d), 2006 (e) e 2007 (f), 2008 (g), 2009 (h) e 2010 (i).



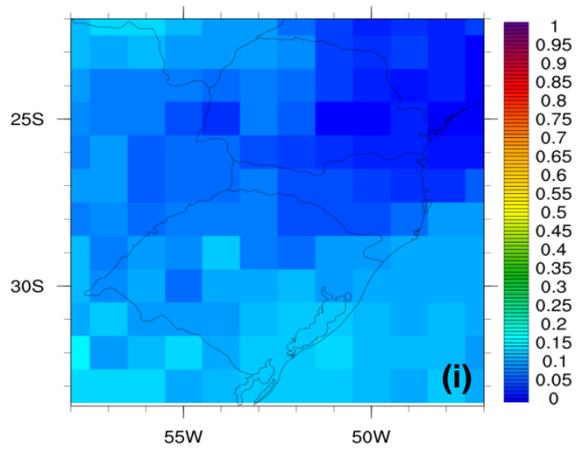
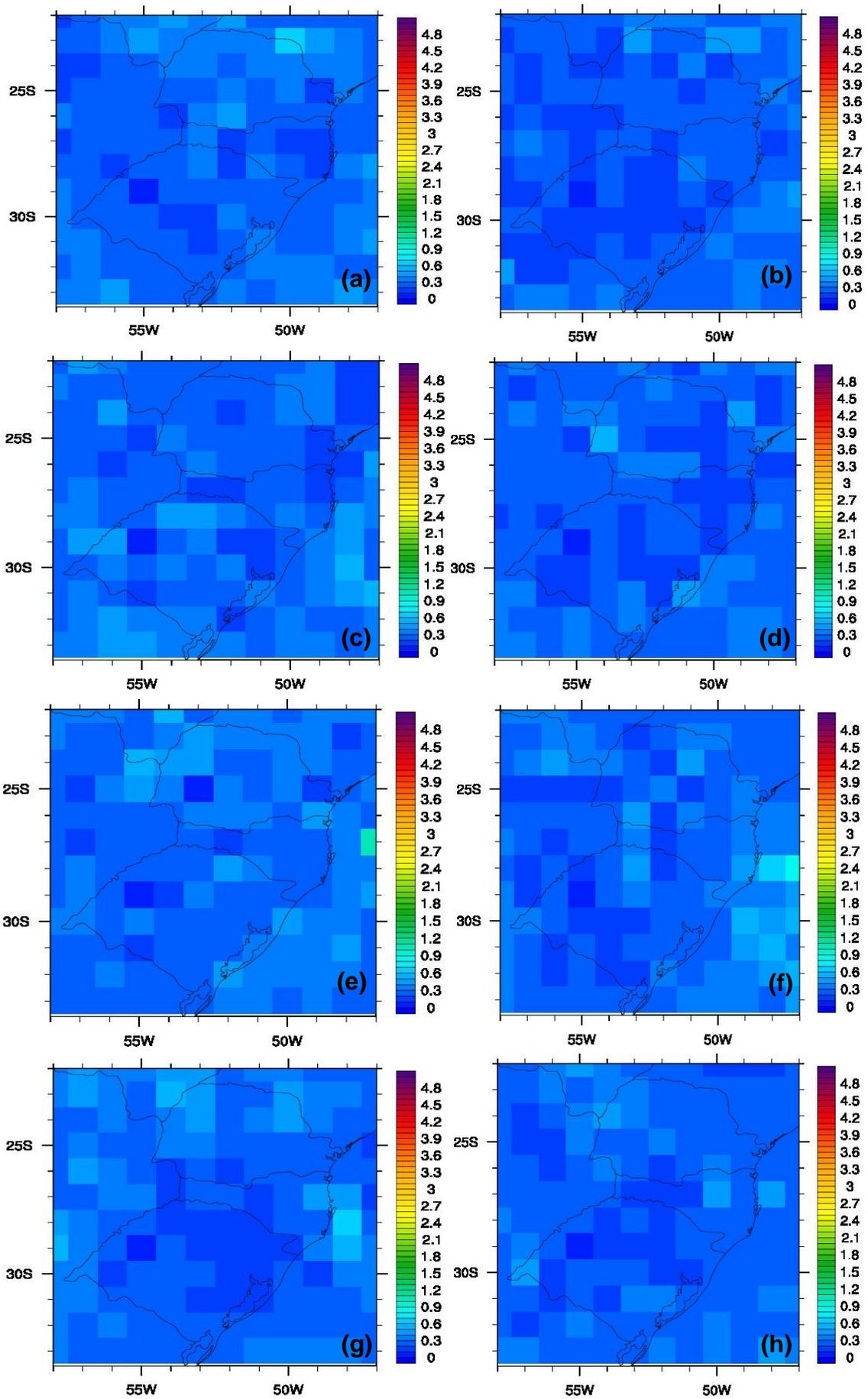


Figura 6 – Mediana (P50) da Espessura Óptica da Atmosfera para os verões de 2002 (a), 2003 (b), 2004 (c), 2005 (d), 2006 (e), 2007 (f), 2008 (g), 2009 (h), 2010 (i).



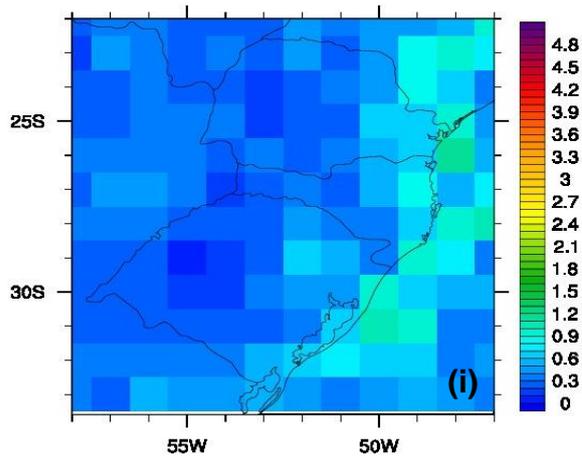
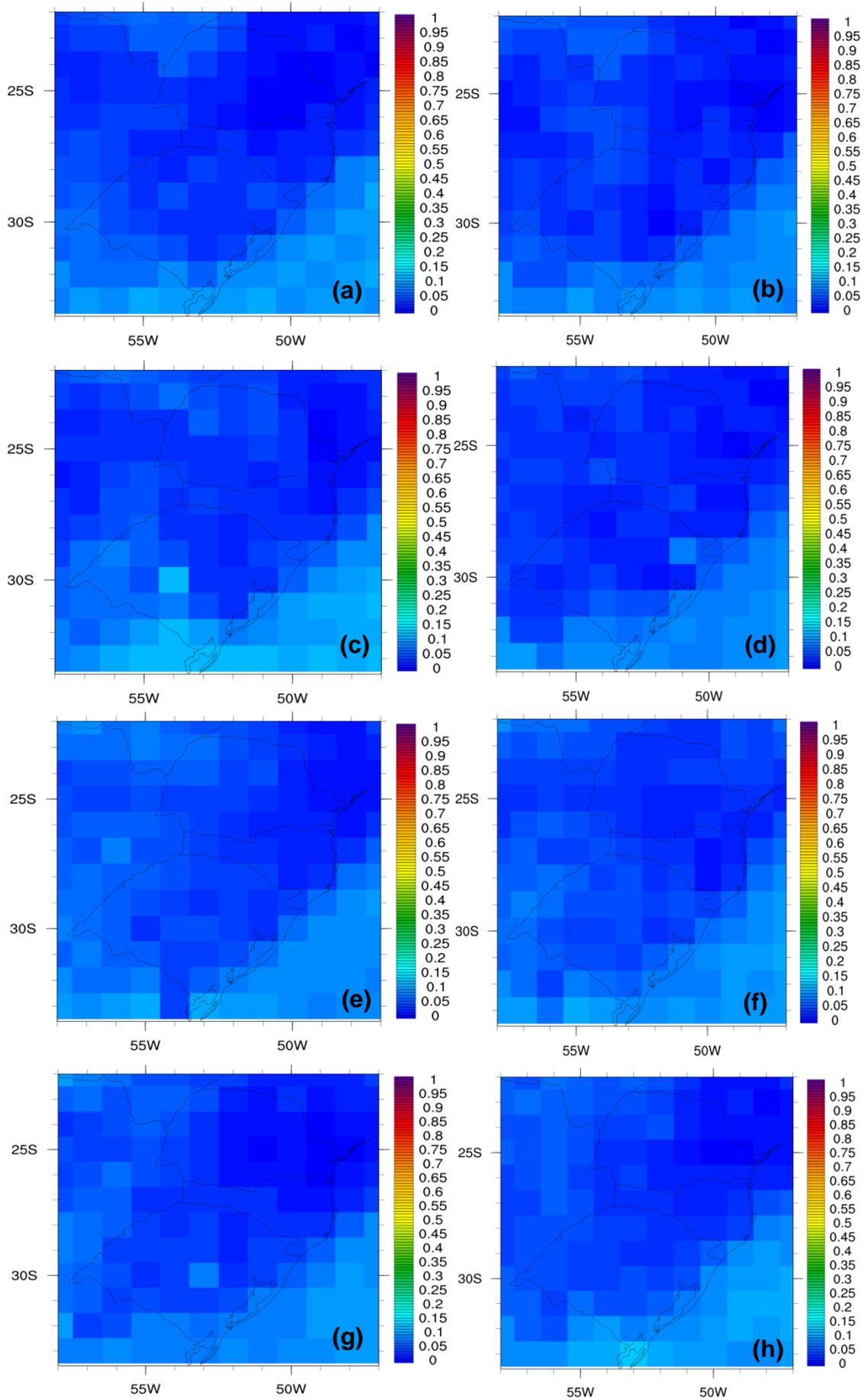


Figura 7 - Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera para os outonos de 2003 (a), 2004 (b), 2005 (c), 2006 (d), 2007 (e) e 2008 (f), 2009 (g), 2010 (h) e 2011 (i).



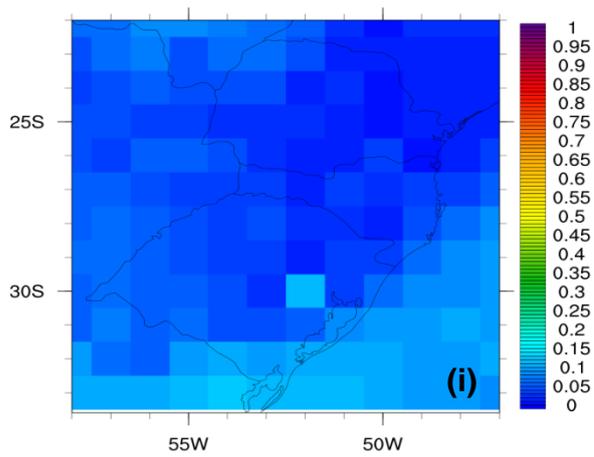
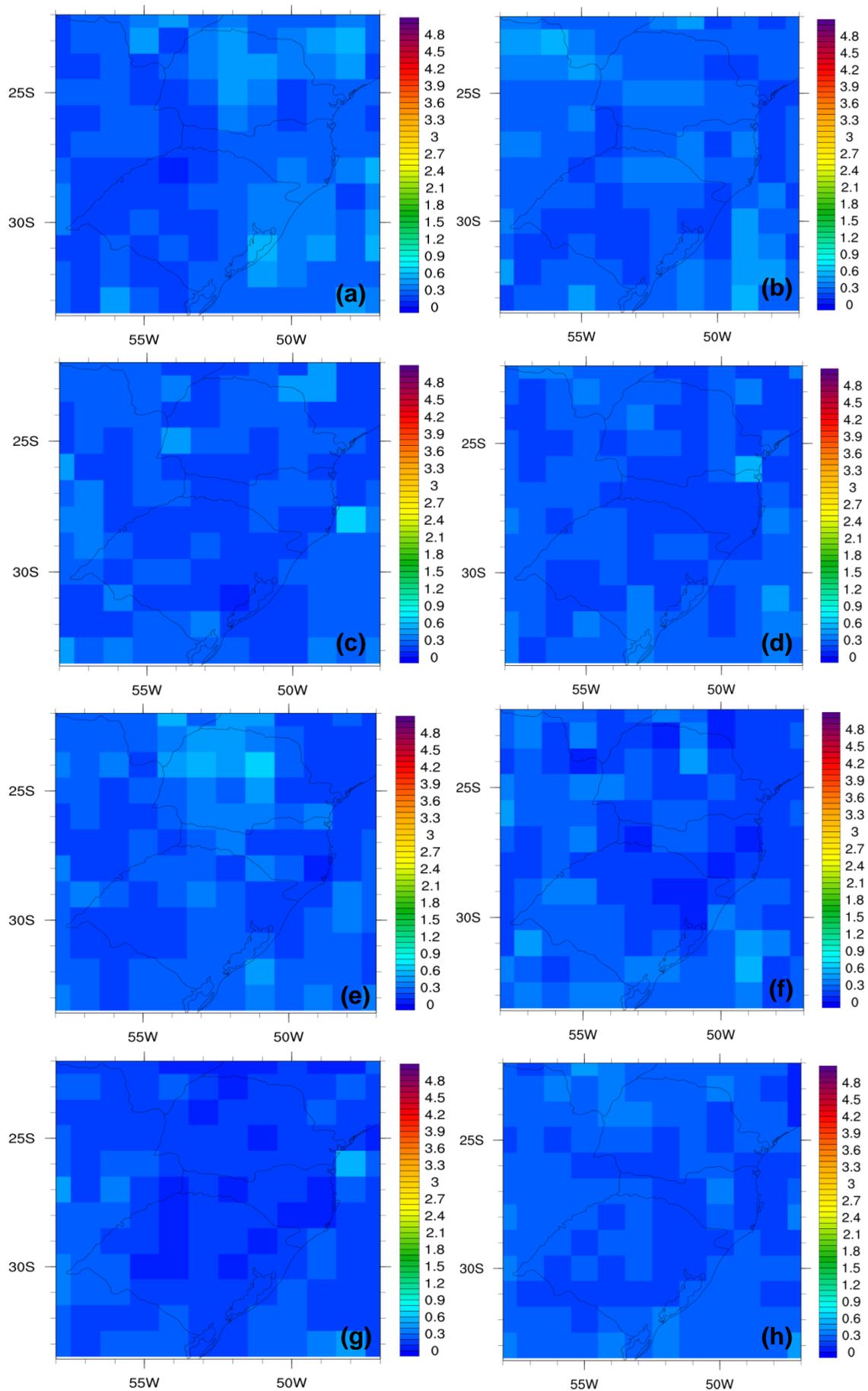


Figura 8 – Mediana (P50) da Espessura Óptica da Atmosfera para os verões de 2003 (a), 2004 (b), 2005 (c), 2006 (d), 2007 (e), 2008 (f), 2009 (g), 2010 (h), 2011 (i).



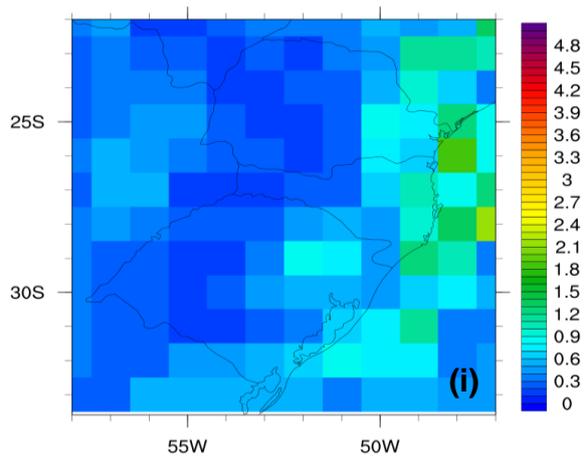
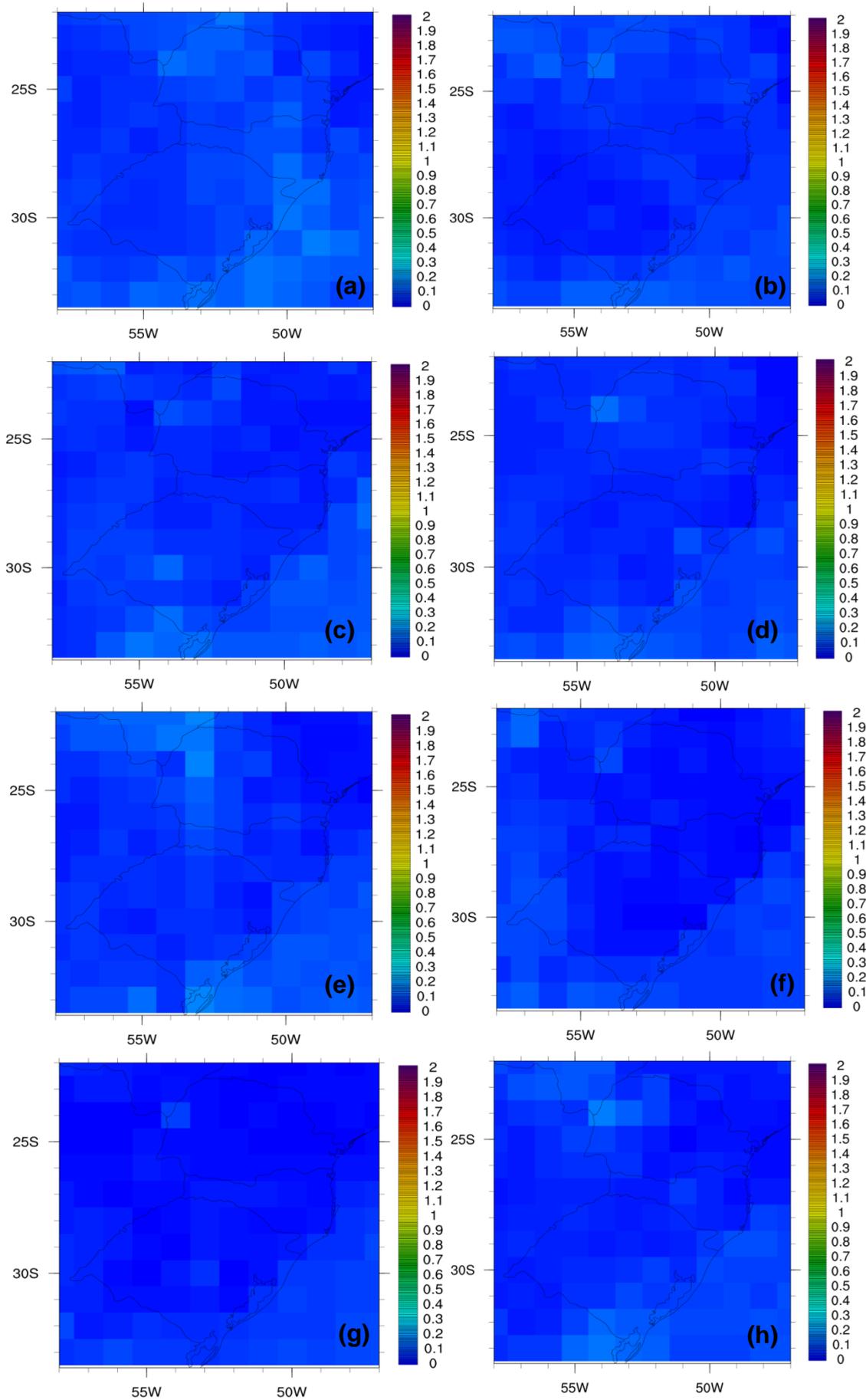


Figura 9 - Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera para o mês de junho dos anos de 2003 (a), 2004 (b), 2005 (c), 2006 (d), 2007 (e) e 2008 (f), 2009 (g), 2010 (h) e 2011 (i).



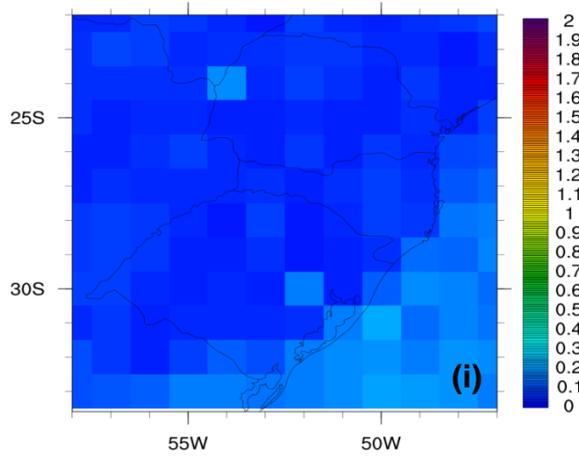
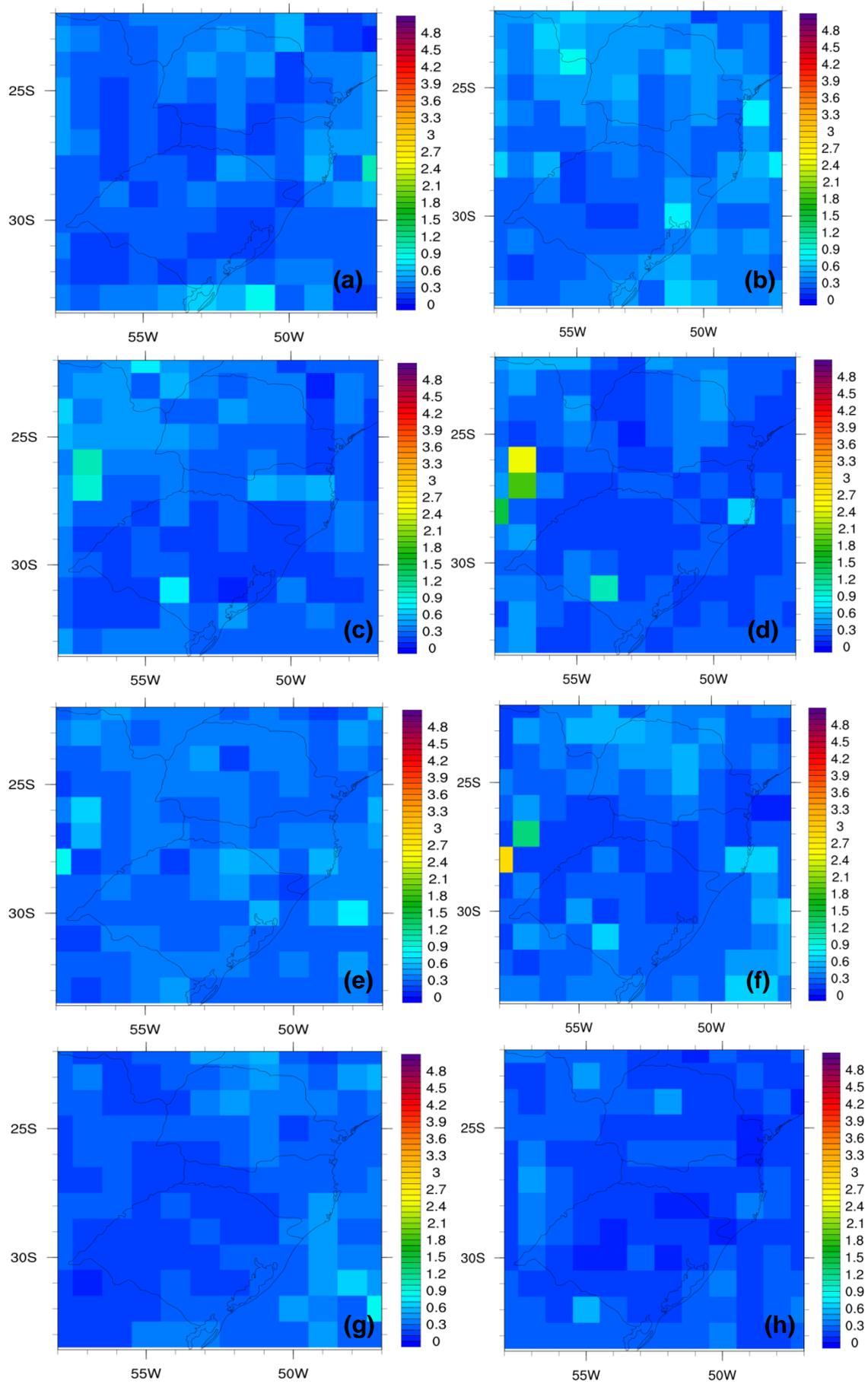


Figura 10 – Mediana (P50) da Espessura Óptica da Atmosfera para o mês de junho dos anos de 2003 (a), 2004 (b), 2005 (c), 2006 (d), 2007 (e), 2008 (f), 2009 (g), 2010 (h) e 2011 (i).



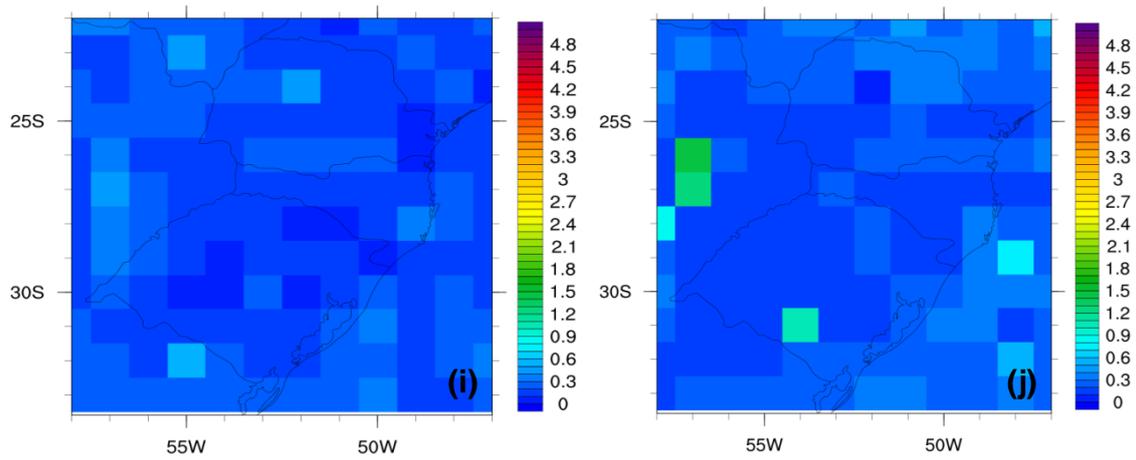
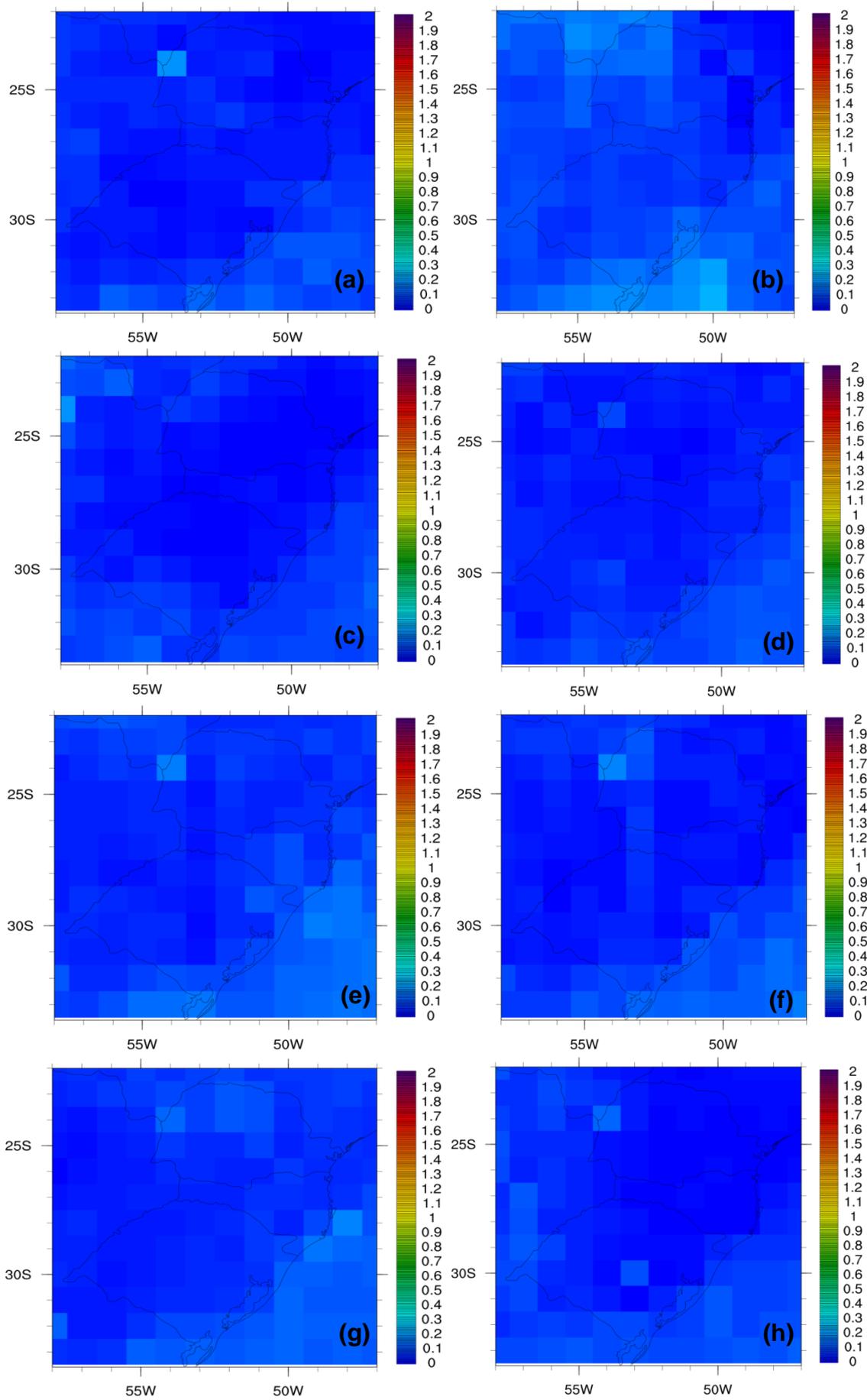


Figura 11 - Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera para o mês de julho dos anos de 2002 (a), 2003 (b), 2004 (c), 2005 (d), 2006 (e) e 2007 (f), 2008 (g), 2009 (h), 2010 (i) e 2011 (j).



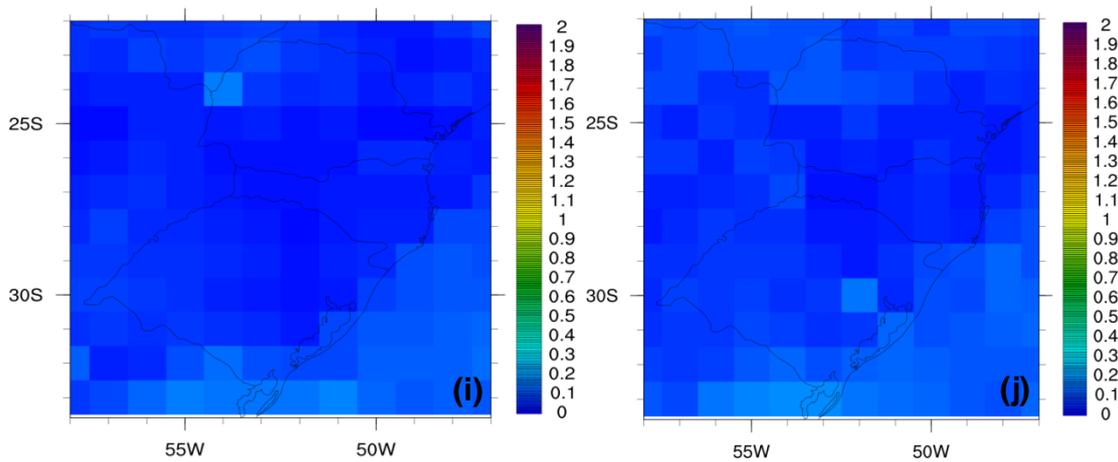


Figura 12 – Mediana (P50) da Espessura Óptica da Atmosfera para o mês de julho dos anos de 2002 (a), 2003 (b), 2004 (c), 2005 (d), 2006 (e), 2007 (f), 2008 (g), 2009 (h), 2010 (i) e 2011(j).

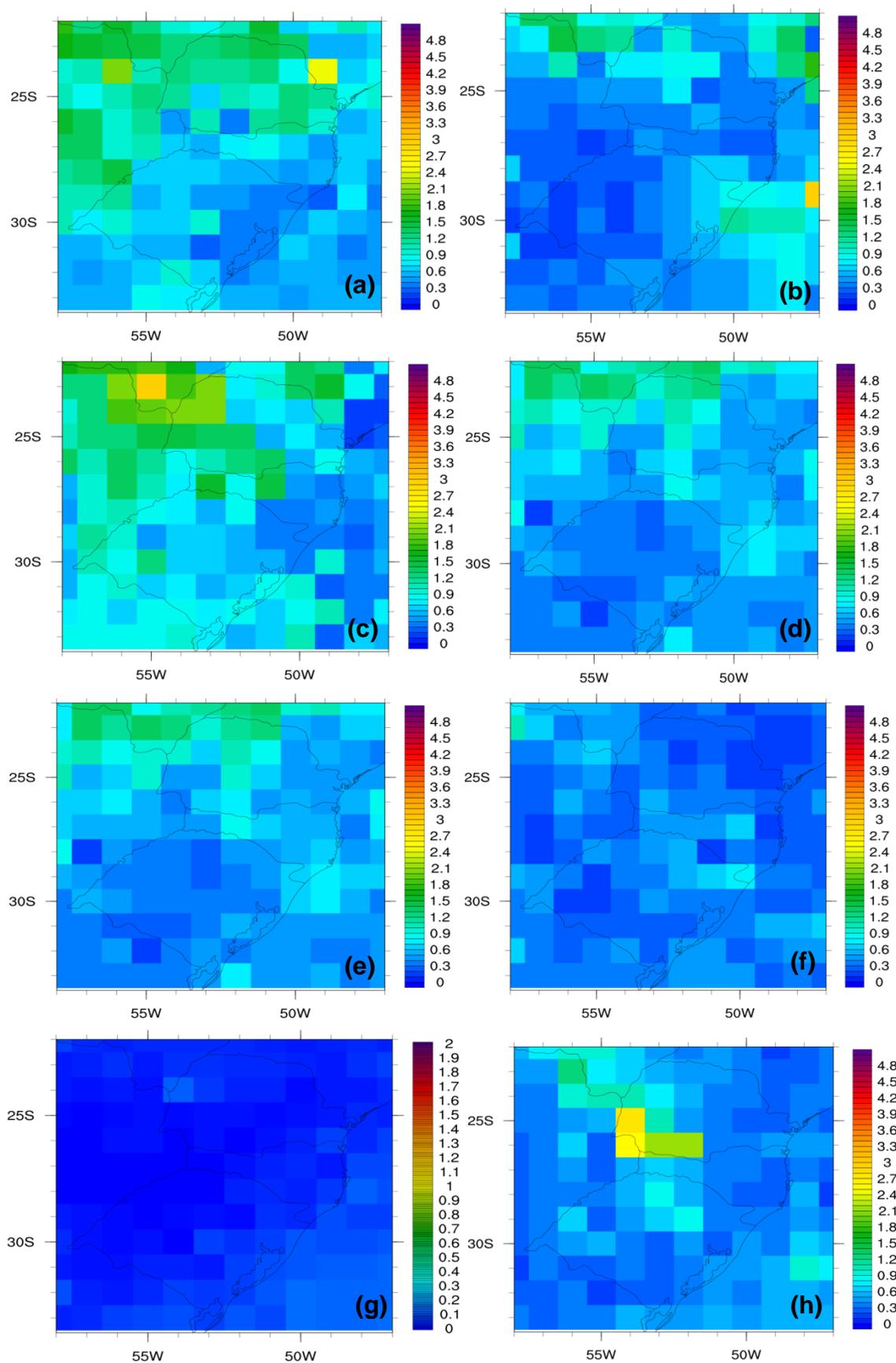
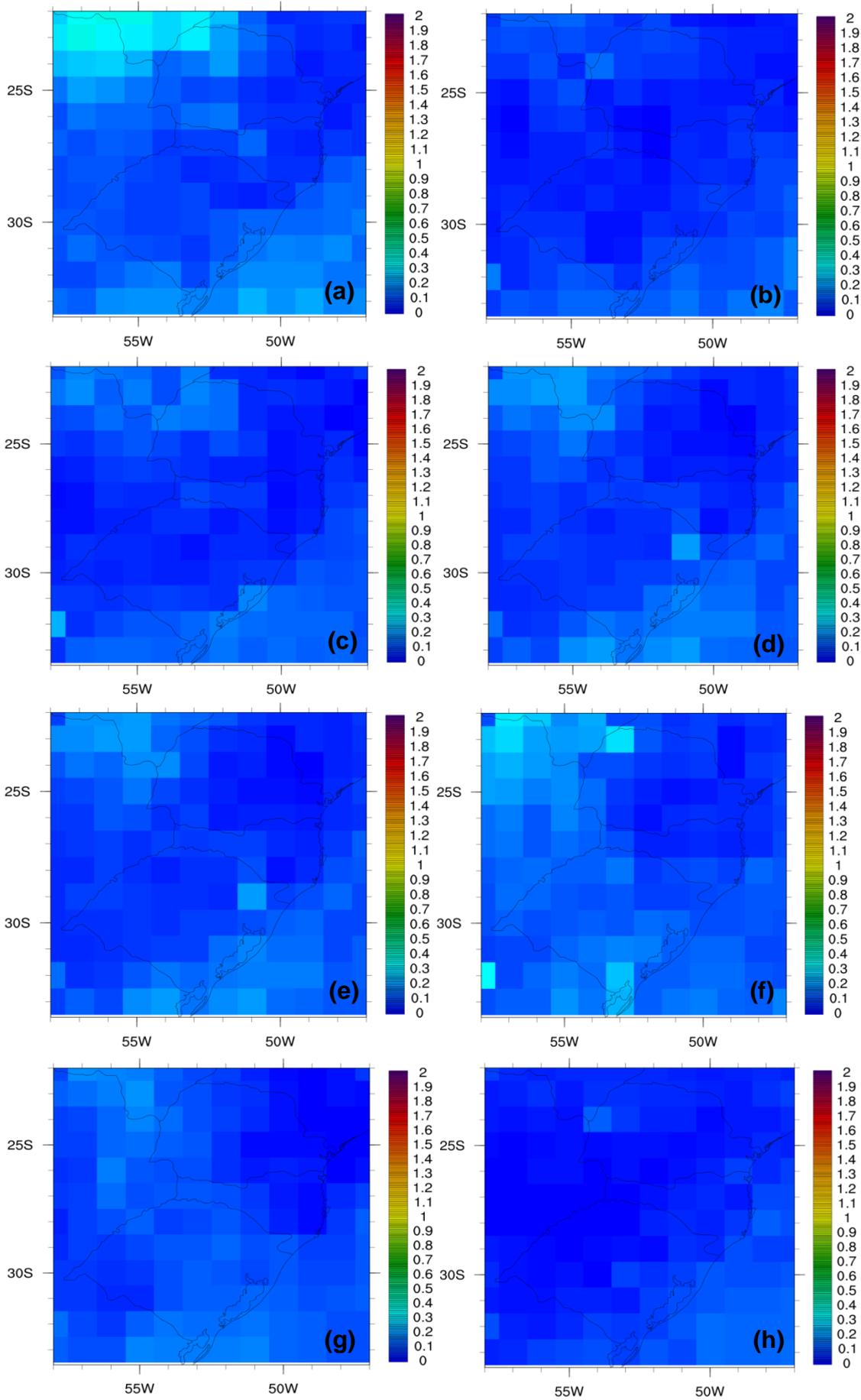


Figura 13 - Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera para o mês de agosto dos anos de 2002 (a), 2003 (b), 2004 (c), 2005 (d), 2006 (e) e 2008 (f), 2009 (g) e 2011(h).



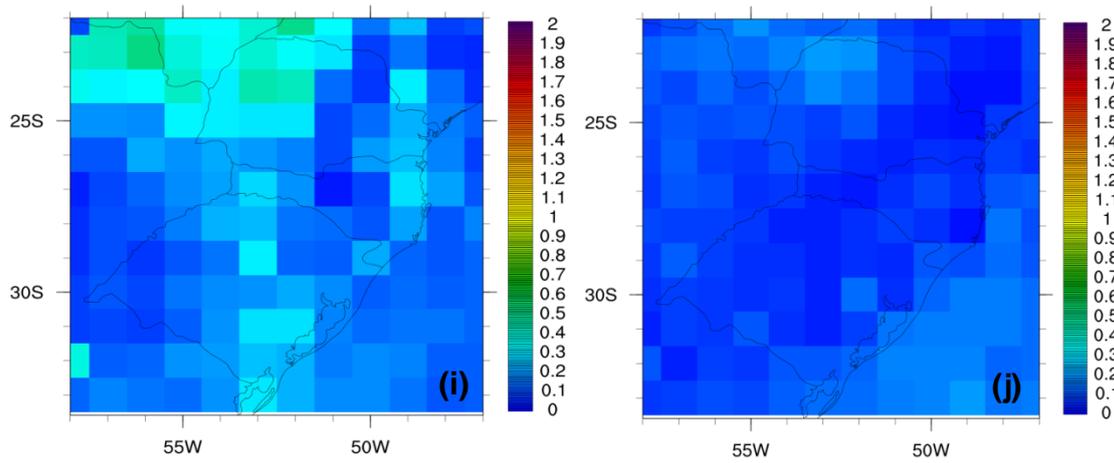


Figura 14 – Mediana (P50) da Espessura Óptica da Atmosfera para o mês de agosto dos anos de 2002 (a), 2003 (b), 2004 (c), 2005 (d), 2006 (e), 2007 (f), 2008 (g), 2009 (h), 2010 (i) e 2011(j).

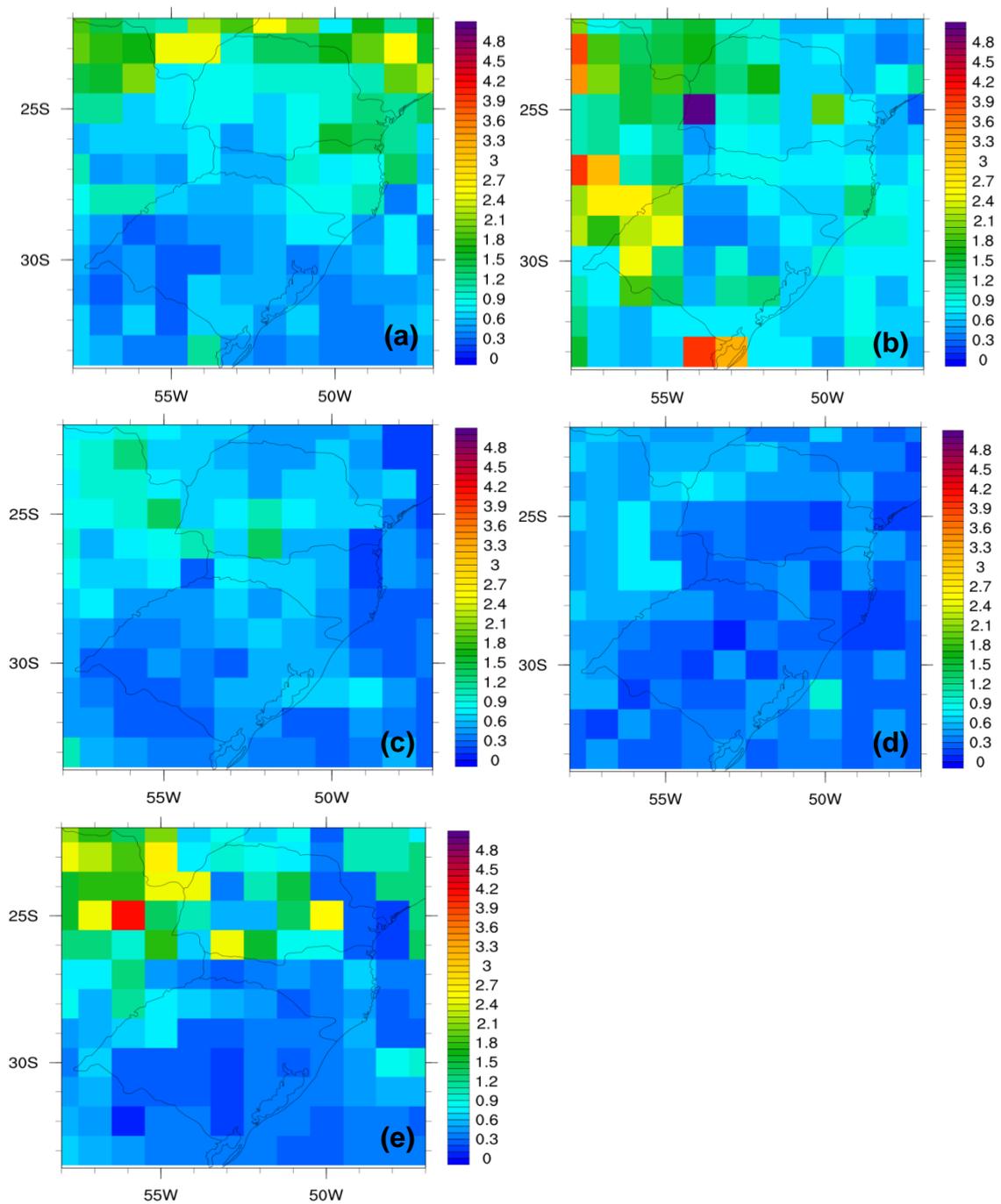
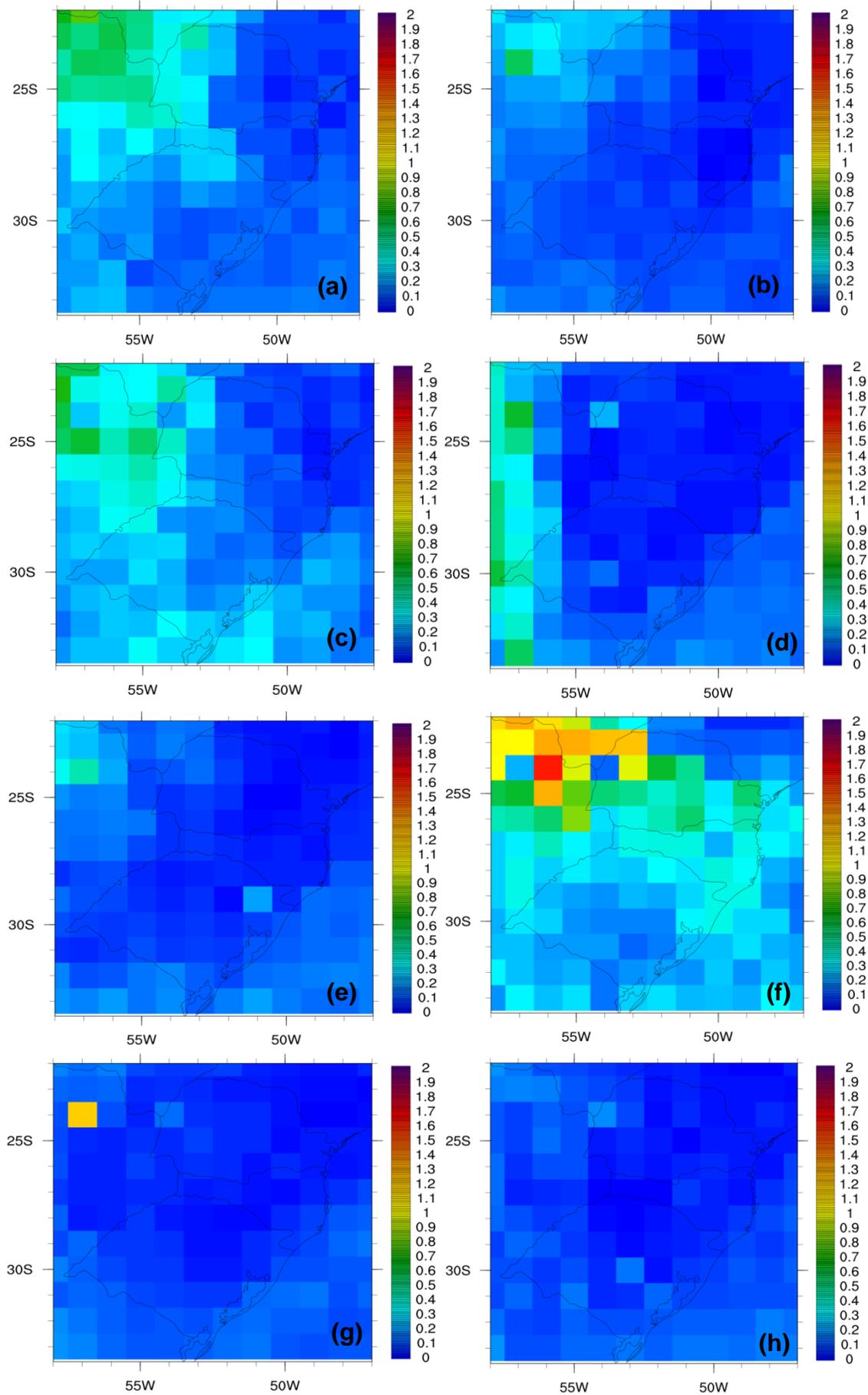


Figura 15 - Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera para o mês de setembro dos anos de 2003 (a), 2006 (b), 2008 (c), 2009 (d) e 2011 (e).



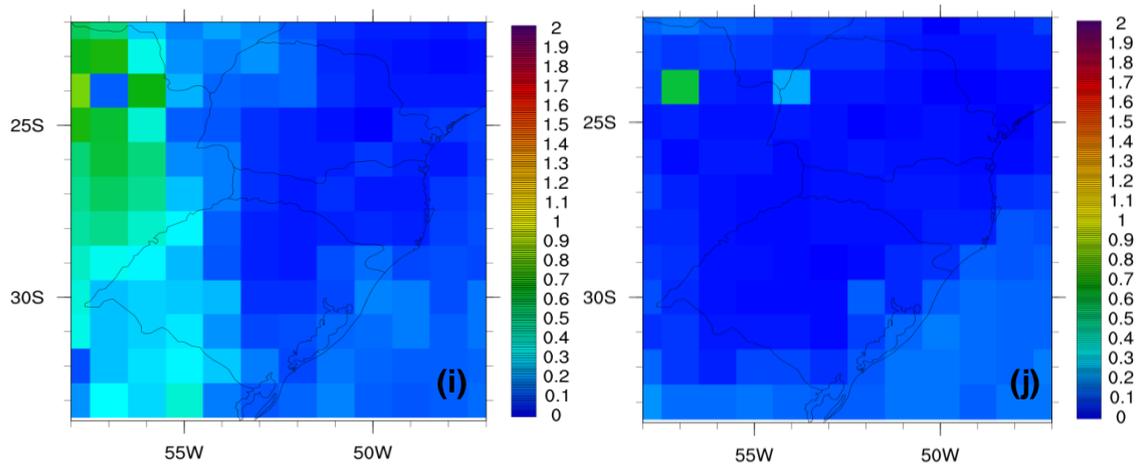


Figura 16 – Mediana (P50) da Espessura Óptica da Atmosfera para o mês de setembro dos anos de 2002 (a), 2003 (b), 2004 (c), 2005 (d), 2006 (e), 2007 (f), 2008 (g), 2009 (h), 2010 (i) e 2011(j).

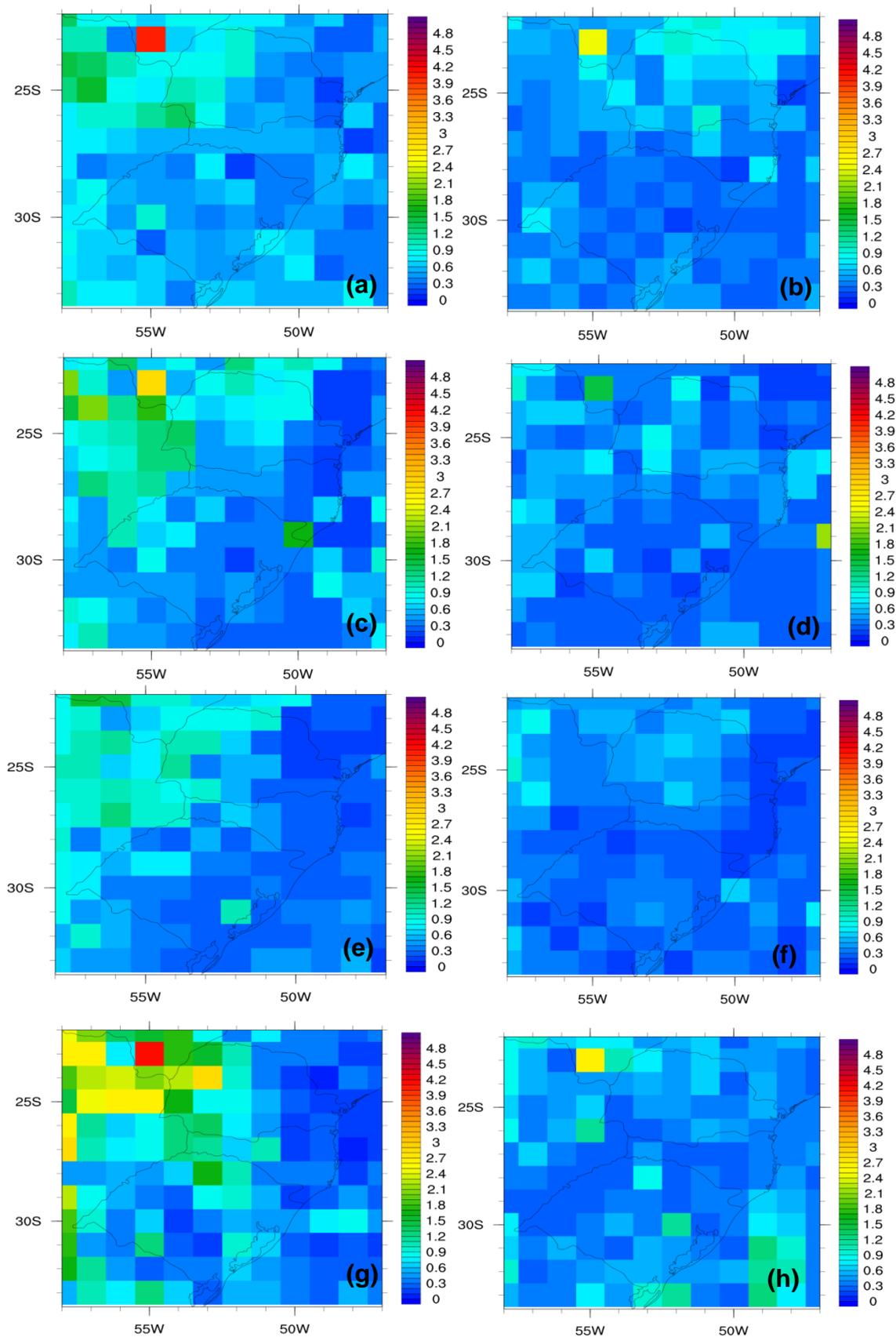
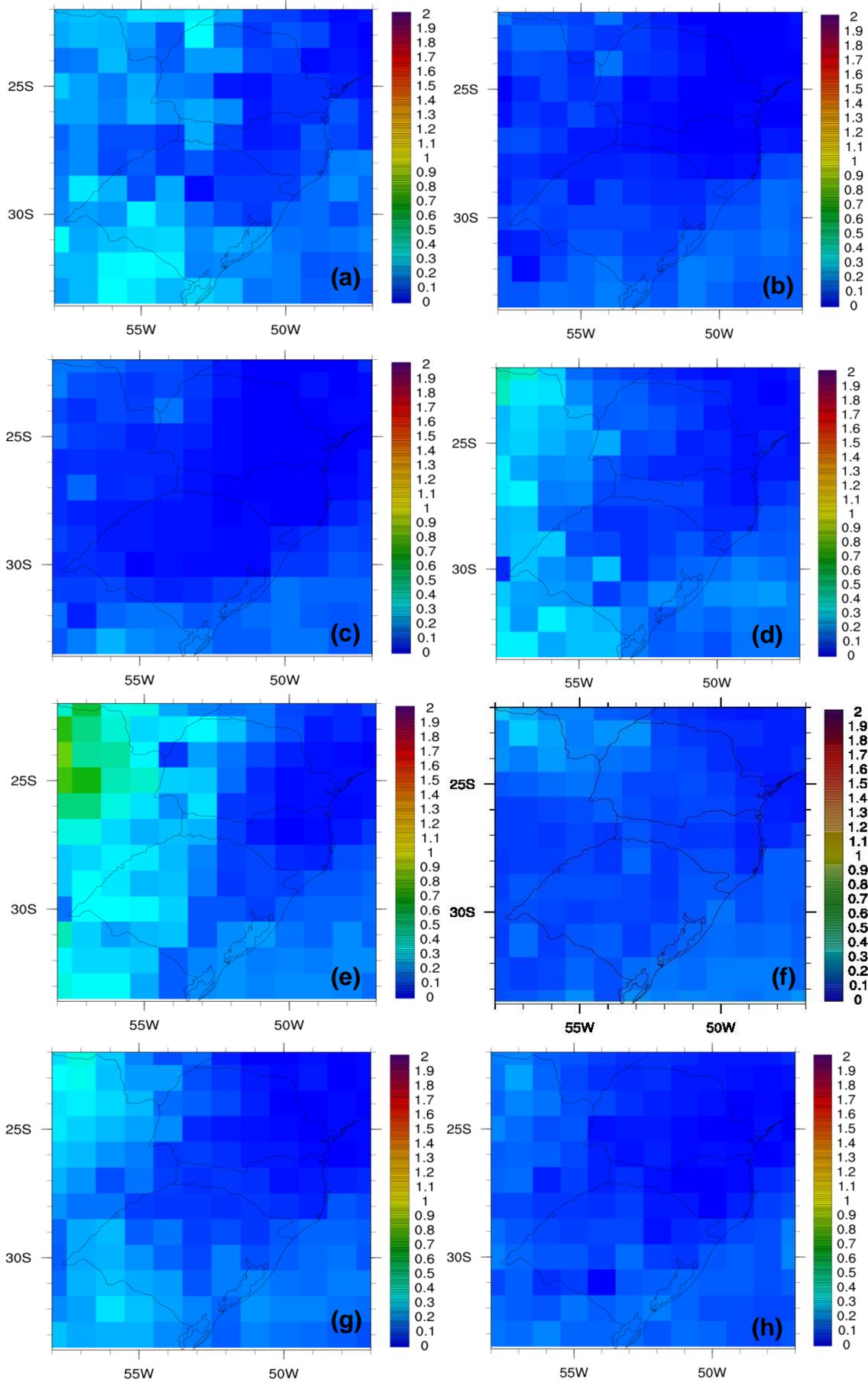


Figura 17 - Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera para o mês de outubro dos anos de 2002 (a), 2003 (b), 2005 (c), 2006 (d), 2008 (e), 2009 (f), 2010 (g) e 2011 (h).



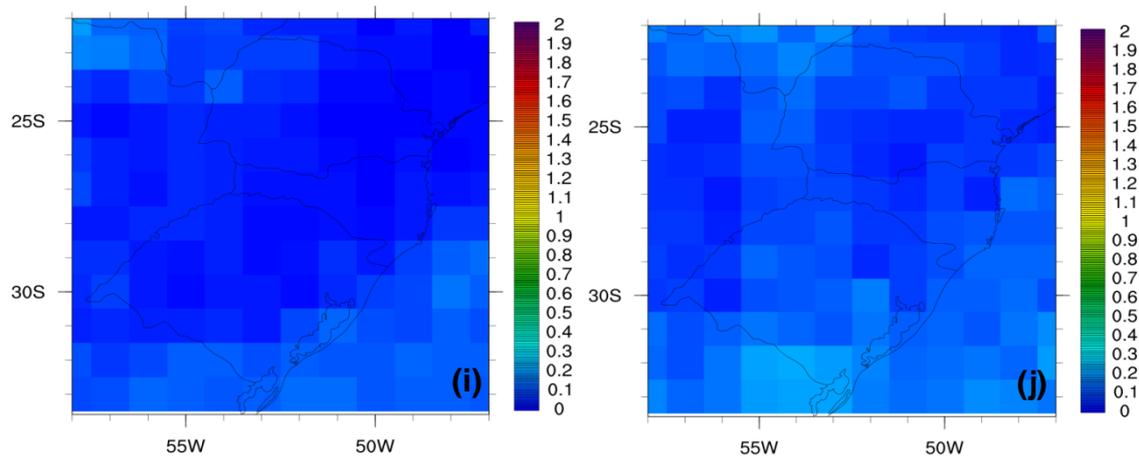
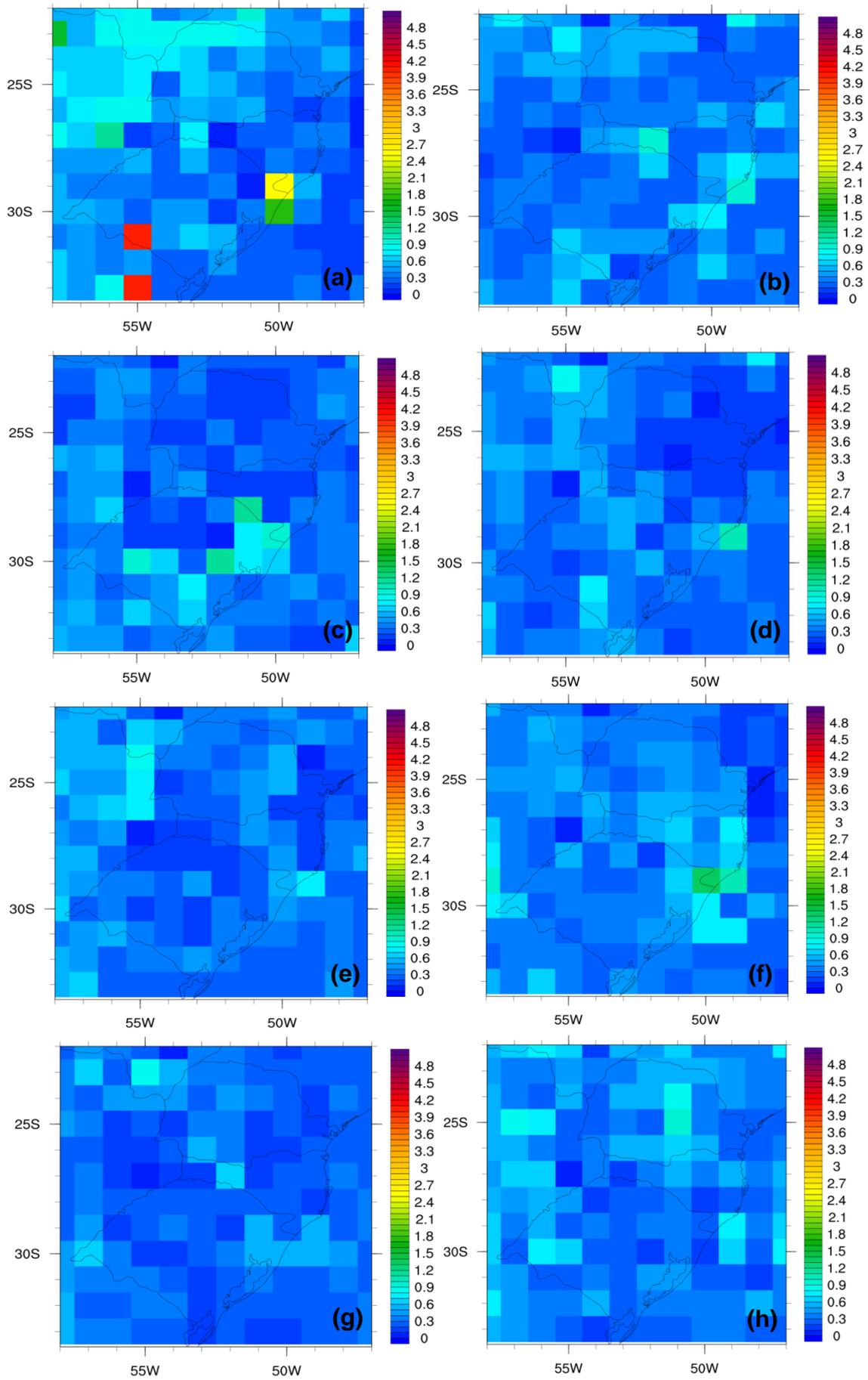


Figura 18 – Mediana (P50) da Espessura Óptica da Atmosfera para o mês de outubro dos anos de 2002 (a), 2003 (b), 2004 (c), 2005 (d), 2006 (e), 2007 (f), 2008 (g), 2009 (h), 2010 (i) e 2011(j).



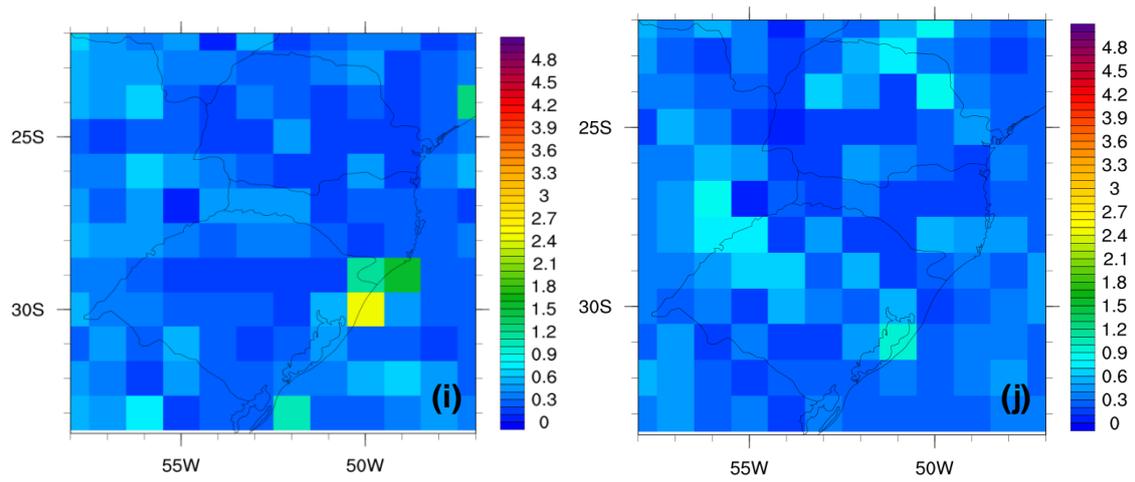
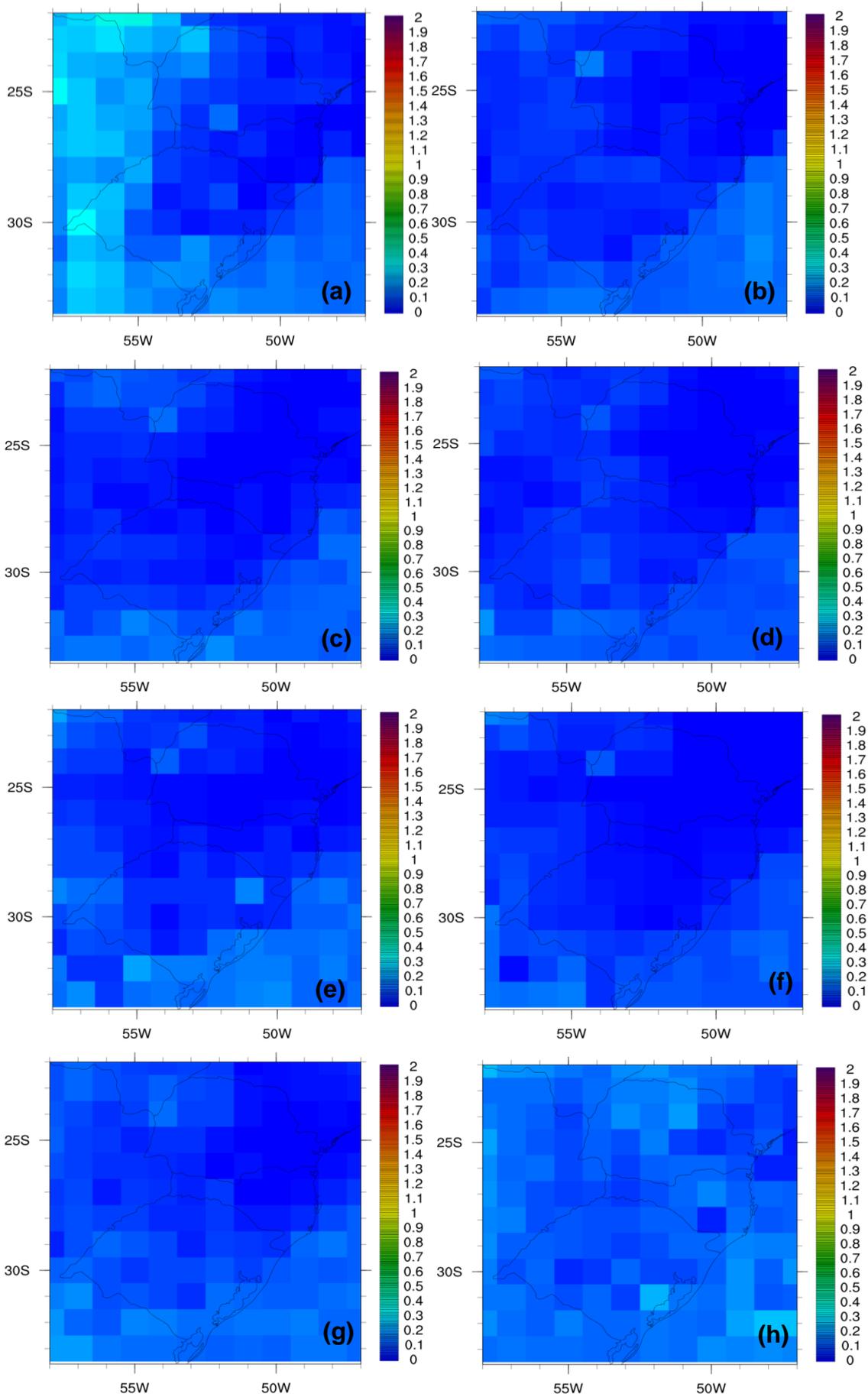


Figura 19 - Percentil 99 da Espessura Óptica da Atmosfera para o mês de novembro dos anos de 2002 (a), 2003 (b), 2004 (c), 2005 (d), 2006 (e), 2007 (f), 2008 (g), 2009 (h), 2010 (i) e 2011 (j).



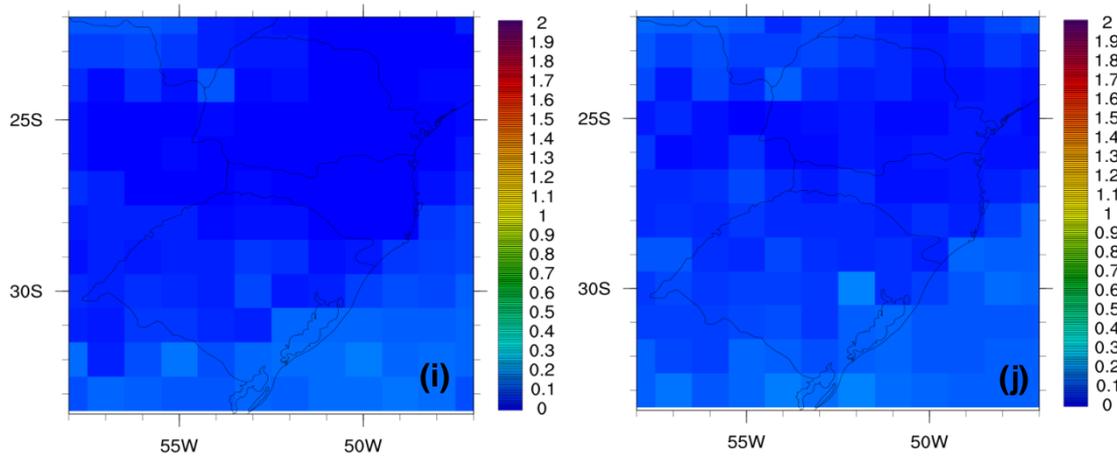


Figura 20 – Mediana (P50) da Espessura Óptica da Atmosfera para o mês de novembro dos anos de 2002 (a), 2003 (b), 2004 (c), 2005 (d), 2006 (e), 2007 (f), 2008 (g), 2009 (h), 2010 (i) e 2011(j).