



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/02.02.23.21-TDI

**ESTUDO DA VARIABILIDADE TEMPORAL DA  
PROFUNDIDADE ÓPTICA DO AEROSSOL  
ATMOSFÉRICO NA REGIÃO SUL DA AMAZÔNIA  
DURANTE O PERÍODO DE 2000 A 2015**

Nathália Velloso Prado

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Meteorologia, orientada pela  
Dra. Simone Marilene Sievert da  
Costa Coelho, aprovada em 17 de  
fevereiro de 2017.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NABNPB>

INPE  
São José dos Campos  
2017

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

## **COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):**

### **Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

### **Membros:**

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/02.02.23.21-TDI

**ESTUDO DA VARIABILIDADE TEMPORAL DA  
PROFUNDIDADE ÓPTICA DO AEROSSOL  
ATMOSFÉRICO NA REGIÃO SUL DA AMAZÔNIA  
DURANTE O PERÍODO DE 2000 A 2015**

Nathália Velloso Prado

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Meteorologia, orientada pela  
Dra. Simone Marilene Sievert da  
Costa Coelho, aprovada em 17 de  
fevereiro de 2017.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NABNPB>

INPE  
São José dos Campos  
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Prado, Nathália Velloso.

P882e      Estudo da variabilidade temporal da profundidade óptica do  
aerossol atmosférico na região sul da Amazônia durante o período  
de 2000 a 2015 / Nathália Velloso Prado. – São José dos Campos :  
INPE, 2017.

xx + 91 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/02.02.23.21-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional  
de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadora : Dra. Simone Marilene Sievert da Costa Coelho.

1. Queimadas. 2. Aerossóis. 3. Propriedades ópticas. 4. Taxa  
de desmatamento. I. Título.

CDU 630\*43:551.5

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): *Nathalia Velloso Prado*

**"ESTUDO DA VARIABILIDADE TEMPORAL DA PROFUNDIDADE ÓPTICA DO AEROSSOL ATMOSFÉRICO NA REGIÃO SUL DA AMAZÔNIA DURANTE O PERÍODO DE 2000 A 2015".**

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de *Mestre* em

*Meteorologia*

Dr. Dirceu Luis Herdies

  
\_\_\_\_\_  
*Presidente / CPTEC / Cachoeira Paulista - SP*

Dra. Simone Marilene Sievert da Costa  
Coelho

  
\_\_\_\_\_  
*Orientador(a) / CPTEC / Cachoeira Paulista - SP*

Dr. Daniel Alejandro Vila

  
\_\_\_\_\_  
*Membro da Banca / CPTEC / Cachoeira Paulista - SP*

Dr. Renato Galante Negri

  
\_\_\_\_\_  
*Membro da Banca / CPTEC / Cachoeira Paulista - SP*

Dr. Nilton Manuel Évora do Rosário

  
\_\_\_\_\_  
*Convidado(a) / UNIFESP / São Paulo - SP*

*Este trabalho foi aprovado por:*

*maioria simples*

*unanimidade*

*São José dos Campos, 17 de Fevereiro de 2017*



*'Para ser grande, sê inteiro: nada*

*Teu exagera ou exclui.*

*Sê todo em cada coisa. Põe quanto és*

*No mínimo que fazes.*

*Assim em cada lago a lua toda*

*Brilha, porque alta vive.'*

*RICARDO REIS*

*Heterônimo de Fernando Pessoa, em "Odes".*



*Ao meu avô, José Velloso, que sempre acompanhou  
e participou dos caminhos de sua neta.*



## AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Simone Sievert, que se tornou uma amiga querida ao longo dos sete anos de orientação, acompanhando toda minha evolução no processo da caminhada acadêmica e pessoal. Ao Prof. Dr. Nelson Ferreira, pelo incentivo e apoio, além de sempre extrair o que há de melhor em seus alunos.

Aos bons professores e pesquisadores, não necessariamente os quais pude ter contato direto, mas também os que por meio de seus inúmeros trabalhos, são inspiração para nós, alunos.

A meus pais que foram sempre o meu suporte e porto seguro e por toda a compreensão devido às inúmeras vezes em que tive de me ausentar devido aos estudos, o meu muito obrigado.

A minha querida irmã, por várias vezes ter ouvido minhas histórias.

Por me cativar, sonhar e estar comigo em todos os momentos, meu companheiro para toda a vida, Diogo, obrigada.

Aos amigos da (melhor) turma de mestrado/doutorado de Meteorologia do INPE do ano de 2015, seja pelas discussões acadêmicas e/ou pelas conversas descontraídas na hora do cafezinho, que nos davam novos ânimos para prosseguir. Todos, sem exceção, tiveram um papel importante no meu crescimento, seja compartilhando suas histórias de vida ou simplesmente dividindo conhecimento. A vocês, meus sinceros votos de gratidão.

Aos amigos e profissionais da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do CPTEC/INPE, pela troca de experiências.

À PGMET, por sua parcela de participação de forma indireta, em especial à Isabel, que sempre agiu com muito profissionalismo e disposição para atender bem aos alunos.

Agradecimentos à NASA, aos grupos de pesquisa e trabalho da rede AERONET e dos sensores MODIS e TRMM e ao CPTEC/INPE.

Ao financiamento do CNPq, sob o processo nº 132376/2015-6.



## RESUMO

Dados do PRODES vêm mostrando que as taxas de desmatamento na Amazônia Legal apresentam uma tendência positiva desde 1988, invertendo o sinal da tendência no ano de 2004. Por outro lado, a prática do uso de fogo nas atividades antropogênicas ainda é comum nessa região, constituindo a maior fonte de aerossóis no Brasil. Neste contexto, o presente estudo visa analisar, na primeira etapa deste trabalho, a relação entre o número de focos de queima, a carga de aerossóis na atmosfera e a taxa de precipitação mensal. A segunda etapa visa verificar a existência de tendências temporais nas propriedades ópticas do aerossol sobre a região Amazônica e avaliar se mudanças nas variáveis em questão podem estar relacionadas à redução do desmatamento. Os resultados mostram que o número de focos de queimadas e profundidade óptica do aerossol (do inglês, Aerosol Optical Depth, AOD) apresentam o mesmo sinal de tendência da taxa de desmatamento. No entanto, estes resultados foram gerados a partir da média das referidas variáveis dentro de uma área. Uma análise espacial dos dados de AOD foi realizada para o período de 2000 a 2015, o qual apresentou uma anomalia padronizada negativa em praticamente todo o território do estado do Mato Grosso (MT), com exceção dos anos de 2005, 2006, 2007 e 2010. Testes de hipótese estatísticos foram utilizados. Resultados do teste de Mann-Kendall Sazonal, empregado com 95% de nível de significância, revelou a existência de uma tendência estatisticamente significativa de diminuição de AOD (*sen's slope* = -0,06) para a estação de Alta Floresta para o período posterior a 2007, o qual foi considerado como significativo pelo teste de Pettitt. Esta mudança na variabilidade temporal de AOD pode estar relacionada a uma alteração na concentração e/ou composição química do aerossol, em decorrência de uma menor contribuição de queima da vegetação típica nessa região (florestas primárias, secundárias, áreas de pastagem e cerrado). A hipótese é que as queimadas atuais estão fortemente associadas a áreas agrícolas ao invés de florestas, como era nos anos 90. Sendo assim, mudanças no material queimado podem influenciar no tipo de aerossol na atmosfera, e, conseqüentemente, em suas propriedades ópticas. O presente estudo pretende contribuir com a atualização das propriedades ópticas do aerossol características da região estudada. Os resultados gerados são informações úteis para a inferência do aerossol via satélite.

Palavras – chave: Queimadas. Aerossóis. Propriedades Ópticas. Taxa de Desmatamento.



**STUDY OF THE TEMPORAL VARIABILITY OF ATMOSPHERIC AEROSOL  
OPTICAL DEPTH IN SOUTHERN REGION OF AMAZONIA DURING 2000  
TO 2015**

**ABSTRACT**

PRODES data present a positive trend of the ratio of deforestation in Legal Amazon since 1998, reversing the signal of the trend by 2004. In the other hand, the use of fire is a common practise in the context of anthropogenic activities in this region, which is one of the most responsible for aerosol emission in Brazil. In this context, the present work first aims to analyse the relationship among the number of fires, aerosols and precipitation. Furthermore, in the second step, it aims to verify the existence of a dependence on time in the number of fire spots as well as in the aerosols optical properties over the amazon region and also to evaluate whether the changes of the variables are related to the reduction of deforestation. Results showed that the rates of the number of biomass burning and AOD present the same signal as the one for deforestation rate. Nevertheless, these results represent the average values of these variables in an area. Spatial analysis of AOD data presents a negative standardized anomaly in practically all the Mato Grosso state, except in 2005, 2006, 2007 and 2010. Statistical hypothesis tests were used and results of Seasonal Mann-Kendall, with 95% of significance level, reveals an AOD's decrease significant trend (*sen's slope* = -0,06) for Alta Floresta in 2007 and subsequent years, which was considered as significant by Pettitt test. These changes in AOD temporal variability could be associated with a modification in concentration and/or aerosol chemical composition, as a result of the minor contribution burn typical vegetation in this region (primary and secondary forests, pasture and brazilian's savannah). The hypothesis is that the actual biomass burning is strongly associated with agricultural areas instead of forests, such as in the 90's. Furthermore, burnt materials might affect the sort of aerosols in atmosphere and, as a consequent, their optical properties. The present work intends to contribute to update data of aerosol optical properties over the studied region. These results are useful information to the aerosols inference via satellite too.

Keywords: Biomass Burning. Aerosols. Optical Properties. Deforestation Rate.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1. Série temporal da taxa de desmatamento (km <sup>2</sup> /ano).....	5
Figura 2. Anomalia padronizada do número de focos de queimadas para a região de estudo.....	5
Figura 3. Série temporal da área plantada com o cultivo de soja no Mato Grosso (MT) .	6
Figura 4. Estados que compreendem a região da Amazônia Legal. ....	8
Figura 5. Mapa representativo do Arco do Desflorestamento na Amazônia Legal.....	11
Figura 6. Taxa de desmatamento na Amazônia Legal. ....	11
Figura 7. Representação da distribuição espacial do desflorestamento na Amazônia Legal. ....	12
Figura 8. Esquematização da posição do radiômetro da AERONET para as realizações das medidas no plano principal e almucântar. ....	19
Figura 9. Estações da AERONET utilizadas neste trabalho. ....	32
Figura 10. Área selecionada para os dados de AOD <sub>550nm</sub> do sensor MODIS.....	33
Figura 11. Série temporal (2000 - 2015) da AOD <sub>550nm</sub> , precipitação mensal acumulada e número de focos de queima. ....	41
Figura 12. Anomalia padronizada de queimadas, precipitação e AOD <sub>550 nm</sub> para o período de 2000 a 2015.....	44
Figura 13. Diagramas de dispersão e coeficiente de correlação.....	46
Figura 14. Série temporal das médias mensais de AOD para o sensor MODIS e estações da AERONET estudadas. ....	48
Figura 15. Boxplot dos dados de AOD filtrados por UTC referente ao mês de Setembro para as estações da AERONET estudadas.....	49
Figura 16. Comparação das anomalias padronizadas dos dados de AOD <sub>500 nm</sub> da AERONET e via sensor MODIS/Terra e Aqua. ....	50
Figura 17. Anomalias Padronizadas de AOD via sensor MODIS, AERONET e número de focos de queimadas.....	51
Figura 18. Anomalia Padronizada de AOD em 500 nm para os sítios da AERONET estudados.....	52
Figura 19. Mapas da anomalia padronizada de AOD <sub>550 nm</sub> via MODIS. ....	59
Figura 20. Mapa de concentração média de AOD <sub>550 nm</sub> para o Brasil. ....	61

Figura 21. Análise Espacial para todo o Brasil e áreas vizinhas do parâmetro de sen's  
slope..... 62

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 1. Níveis de Processamento dos dados da AERONET e suas principais características. ....	21
Tabela 2. Dados a serem utilizados neste trabalho. ....	31
Tabela 3. Estações da AERONET utilizadas e seu período de funcionamento. ....	33
Tabela 4. Sensores dos satélites e esquema operacional utilizados na inferência de perfis verticais no CPTEC/INPE. ....	36
Tabela 5. Critérios de controle de qualidade dos dados da AERONET referentes às propriedades ópticas do aerossol. ....	37
Tabela 7. Médias climatológicas (2000 – 2015) de precipitação e AOD para a região de estudo e número de focos de queima na Amazônia Legal obtidas por satélite. ....	42
Tabela 7. Períodos significativos estatisticamente obtidos pelo teste não paramétrico de Mann-Kendall Sazonal e parâmetro de Sen's Slope para dados de AOD500nm para a estação de Alta Floresta. ....	53
Tabela 8. Períodos significativos estatisticamente obtidos pelo teste não paramétrico de Mann-Kendall Sazonal e parâmetro de Sen's Slope para dados de AOD550nm MODIS/Aqua para o pixel mais próximo da estação de Alta Floresta, centrado no ponto de grade. ....	54
Tabela 9. Valores médios e seus respectivos desvios padrões para as partes real e imaginária para as estações de: Alta Floresta (AF), Abraços Hill (AH), Ji-Paraná (JP) e Cuiabá-Miranda (CB). ....	54
Tabela 10. Índice de refração complexo (m440nm) médio encontrado para as estações da AERONET de Alta Floresta (AF), Abraços Hill (AH), Ji-Paraná (JP) e Cuiabá-Miranda (CB) para os seus respectivos períodos de dados. ....	55
Tabela 11. Índice de refração complexo (m440nm) médio encontrado na literatura referente a outros autores. ....	55
Tabela 12. Valor médio do índice de refração complexo para Cuiabá (MT) nos períodos de 2001 a 2004 e de 2005 a 2015. ....	55
Tabela 13. Índice de refração complexo para as partes real (n) e imaginária (k) em 440 nm para a estação de Alta Floresta. ....	57

Tabela 14. Índice de refração complexo para as partes real (n) e imaginária (k) em 440 nm para as estações de Ji-Paraná e Abraços Hill. ....	57
Tabela 15. Índice de refração complexo para as partes real (n) e imaginária (k) em 440 nm para a estação de Cuiabá-Miranda.....	57

## SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Motivação e justificativa .....	3
1.2 Objetivos .....	6
2 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	7
2.1 A região amazônica .....	7
2.2 Desflorestamento e mudanças no uso do solo .....	9
2.3 A queima de biomassa na Amazônia .....	12
2.4 Os aerossóis atmosféricos originários de queimadas .....	14
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	17
3.1 AERONET como fonte de dados que caracteriza as propriedades ópticas do aerossol .....	17
3.2 O algoritmo do sensor MODIS para a profundidade óptica do aerossol sobre continentes .....	21
3.3 Testes de hipótese estatísticos .....	25
4 DADOS E METODOLOGIA .....	31
4.1 Dados .....	31
4.2 Análise das relações entre profundidade óptica do aerossol, focos de queimadas e precipitação .....	34
4.3 Análise pontual e espacial da AOD e índice de refração complexo .....	35
5 RESULTADOS .....	39
5.1 Estudo da variabilidade temporal da profundidade óptica do aerossol, dos focos de queimadas e da precipitação e suas possíveis relações .....	39
5.1.1 Variabilidade sazonal e interanual de queimadas, aerossóis e precipitação .....	39
5.1.2 Análise da relação entre precipitação, queimadas e aerossóis .....	44
5.2 Análise pontual e espacial da aod e índice de refração complexo .....	46

5.2.1	AOD via sensor MODIS e AOD via AERONET .....	47
5.2.2	Testes de hipótese para a AOD .....	52
5.2.3	Índice de refração complexo via AERONET .....	54
5.2.4	Testes de hipótese para o índice de refração complexo .....	56
5.2.5	Análise espacial .....	57
6	CONCLUSÕES .....	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67
	APÊNDICE A .....	77
	APÊNDICE B .....	81
	APÊNDICE C .....	87

## 1 INTRODUÇÃO

A criação de pastagem, da agropecuária, de cultivos e a retirada de madeira para construção e combustível são as principais causas de desmatamento nos trópicos. Estas atividades antropogênicas são acompanhadas por queimadas, as quais injetam uma grande quantidade de aerossóis na atmosfera (DOMINGUES; BERMANN, 2012).

Os aerossóis atmosféricos são por definição, partículas sólidas ou líquidas suspensas na atmosfera, com exceção dos hidrometeoros, podendo ser originadas por fontes naturais como cinzas de vulcões, sal marinho, poeira de desertos, pólen, ou por fontes antropogênicas como, por exemplo, queimadas e poluição.

No Brasil, a maior fonte de aerossóis é a queima de biomassa, associada principalmente à prática de agropecuária de preparação do solo, constituindo-se como uma das principais fontes antrópicas de aerossóis. Estes são de extrema importância nos estudos de qualidade do ar, balanço de radiação e microfísica de nuvens, podendo afetá-los via efeitos diretos e/ou indiretos, uma vez que dependem de sua concentração e composição química.

Quantificar estes efeitos do aerossol no clima regional e global vem sendo um dos grandes desafios para a comunidade científica na atualidade, uma vez que existe uma interação não linear entre as variáveis aerossol-nuvem-precipitação (INTERGOVERNAMENTAL PANEL OF CLIMATE CHANGE (IPCC), 2013). Medições em superfície, *in situ* e com o uso de sensoriamento remoto têm sido utilizados a fim de se obter uma melhor compreensão desta questão.

Existem duas importantes bases de dados de aerossóis globais. Uma baseada em sensoriamento remoto partir da superfície, a rede AERONET (AERosol RObotic NETwork), descrita em Holben et al., (1998) e outra que diz respeito aos produtos do sensor MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) que se encontra a bordo dos satélites Aqua e Terra, cobrindo diariamente o globo terrestre e que são disponibilizados pela NASA. Estas bases de dados serão utilizadas no presente estudo e informações mais detalhadas a respeito delas são apresentadas na fundamentação teórica (seção 3).

Diversos estudos têm sido realizados com foco na importância dos aerossóis e seus impactos em outras variáveis como, por exemplo, na precipitação (COELHO; COSTA;

FREITAS, 2013; COELHO *et al.*, 2012), na radiação (PROCOPIO, S. *et al.*, 2004; ROSÁRIO, NILTON E. *et al.*, 2011; YAMASOE, H A *et al.*, 2000; YAMASOE, M A *et al.*, 2006), na saúde humana e qualidade do ar (LONGO *et al.*, 2013; SILVA, CLÁUDIO MOISÉS; FREITAS, 2015). Também têm sido desenvolvidos outros trabalhos com foco na composição química e propriedades ópticas do aerossol (ARTAXO, PAULO *et al.*, 2002; PROCOPIO, 2003; ROSÁRIO, NILTON E. *et al.*, 2011; YAMASOE, H A *et al.*, 2000).

As principais regiões emissoras de aerossóis de queimadas têm se concentrado na Amazônia Legal, apresentando uma forte e contínua dinâmica no uso e mudança do solo (ESCADA; ALVES, 2001). Estudos envolvendo a mencionada região, (ALVES *et al.*, 1998; ESCADA; ALVES, 2001; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 1989, 1999, 2000; PRODES, 1996) apontam que algumas áreas dos estados do Acre, Rondônia, Maranhão, Mato Grosso e Pará apresentam as taxas mais altas de desflorestamento e de mudanças constantes no uso do solo. Apesar disso, essas regiões demonstram características distintas em seus históricos de evolução de ocupação e uso da terra (BECKER, 1997, 1998; GODFREY; BROWDER, 1996).

No caso do Mato Grosso, algumas das suas terras nativas foram desmatadas por meio da derrubada da floresta. Inicialmente para implantação da pecuária e, em seguida, transformadas em áreas de agricultura mecanizada, principalmente para o cultivo de soja, fazendo uso de fertilizantes e de sementes modificadas geneticamente (DOMINGUES; BERMAN, 2012).

Historicamente, o processo de evolução da produção de soja no país ocorreu na segunda metade de 1970, só a partir da década de 80 houve a expansão para áreas de cerrado. Neste período, diversos incentivos do governo brasileiro (EMBRAPA, 2013) foram feitos, até que, em 1990, o estado do Mato Grosso se tornou o terceiro maior produtor de soja do Brasil. As diversas fases de ocupação do solo e desenvolvimento socioeconômico no Mato Grosso contribuíram, juntamente com fatores climáticos, para a variabilidade temporal dos cenários de emissões de aerossóis.

Alguns estudos, como o de Koren, Remer e Longo (2007) observaram uma tendência de aumento nos focos de queimadas obtidos via sensoriamento remoto na Amazônia para o período de 1998 a 2005, tendo uma inversão abrupta no ano seguinte, 2006. Além disso, outros trabalhos com relação às análises de tendências de propriedades ópticas do

aerossol em outras regiões também já foram discutidos na literatura (LEVY *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2014; LYAPUSTIN *et al.*, 2011; ZHANG; REID, 2010). Em um trabalho recente, Li et al (2014) apresentaram uma avaliação de tendências de AOD e de outros parâmetros ópticos inferidos via AERONET tendo a América do Norte, Europa e Japão como principais áreas de estudo. No Brasil, os referidos autores mostraram que existe uma tendência negativa na AOD em 440nm para as estações de Cuiabá - Miranda e Alta Floresta. Outro importante trabalho foi conduzido por Zhang et al (2010), o qual teve como foco a tendência de aerossóis sobre regiões oceânicas. Estes trabalhos apenas indicaram a existência da tendência negativa, sem relacionar com fatores antrópicos e climáticos.

O presente trabalho tem por finalidade efetuar uma análise da relação aerossóis, queimadas e precipitação e a verificação de uma possível alteração das propriedades ópticas do aerossol nos últimos anos associada à redução do desmatamento na Amazônia Legal.

### 1.1 **Motivação e justificativa**

A concentração e composição química do aerossol presente na atmosfera depende de diversos fatores, entre eles, fatores meteorológicos associados a circulação, estabilidade, remoção e umidade (ROSÁRIO, NILTON E. *et al.*, 2011). Considerando a interação não linear entre aerossol – nuvem – radiação, quantificar os efeitos diretos e indiretos do aerossol no clima regional e global vem sendo um dos grandes desafios para a comunidade científica (INTERGOVERNAMENTAL PANEL OF CLIMATE CHANGE (IPCC), 2013).

Neste contexto, a determinação das propriedades ópticas dos aerossóis é essencial na avaliação desses efeitos na transferência radiativa, uma vez que isso pode afetar variáveis de interesse, tais como as temperaturas da superfície e da atmosfera (DUBOVIK, O *et al.*, 2000; YU; LIU; DICKINSON, 2002). No que diz respeito aos aerossóis provenientes da queima de biomassa, correspondente ao interesse neste trabalho, as propriedades ópticas variam tanto com a distribuição de tamanho das partículas quanto com o tipo de material queimado (DUBOVIK, OLEG *et al.*, 2002). Em outras palavras, esta dependência das propriedades indica que as mesmas não são estáticas (PROCOPIO, 2003).

No presente estudo buscou-se verificar a possível relação entre: déficit de chuva na estação seca, número de focos de queima e carga de aerossóis. Além disso, efetuou-se uma análise observacional da variabilidade temporal de propriedades ópticas do aerossol para o período de 2000 a 2015.

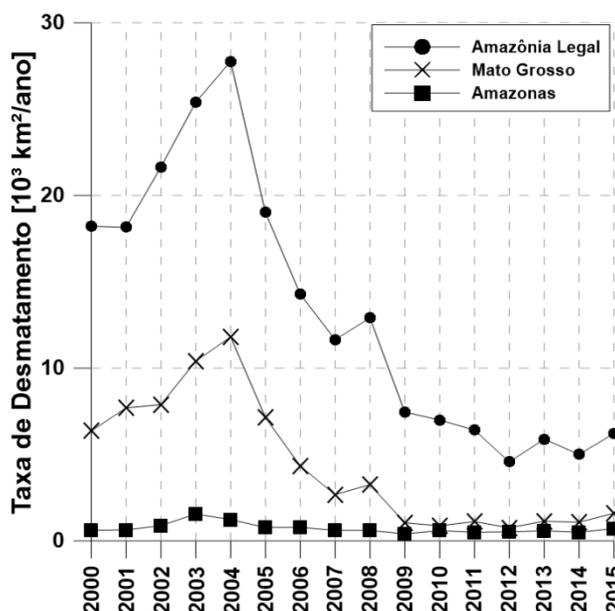
Os argumentos para um estudo da variabilidade temporal das propriedades ópticas são:

- As partículas de aerossóis originadas de queimadas na região amazônica são uma combinação de diferentes processos de queima de vegetação, como o cerrado, áreas de pastagem e de florestas primárias (aquelas intactas, sem ter sofrido ação humana) e florestas secundárias (ARTAXO, PAULO *et al.*, 1998). Segundo o monitoramento da floresta Amazônica brasileira por satélite realizado pelo INPE foi verificada uma diminuição das taxas de desmatamento (TD) desde 2004 (Figura 1). Sendo assim, espera-se mudança na composição do aerossol, e conseqüentemente, nas suas propriedades, devido uma menor contribuição do material queimado de florestas.
- As novas áreas que foram desflorestadas em 2004 (pico do desmatamento nos últimos 20 anos), possivelmente podem ter sido aproveitadas para a prática de cultura agropecuária, muito comum nessa região, podendo explicar parte do aumento expressivo do número de focos de queima no ano de 2005 (Figura 2), e das áreas plantadas com o cultivo da soja no estado do Mato Grosso (Figura 3);
- Tais mudanças no manuseio e na utilização do solo podem acarretar alterações na AOD e, conseqüentemente, nas propriedades ópticas tais como albedo simples e eficiência de extinção (DUBOVIK, OLEG *et al.*, 2002).

Considerando os argumentos acima, alguns questionamentos são levantados:

- Como se apresenta o comportamento da AOD (via satélite e via superfície) com relação à variabilidade temporal do número de focos de queimadas (NFQ) e da TD no período analisado?
- Podemos, de fato, relacionar o comportamento temporal da AOD à mudança no uso do solo ou ao regime de precipitação?
- Considerando possíveis mudanças na composição do aerossol associada à redução do desmatamento, qual seria o impacto no índice de refração complexo?

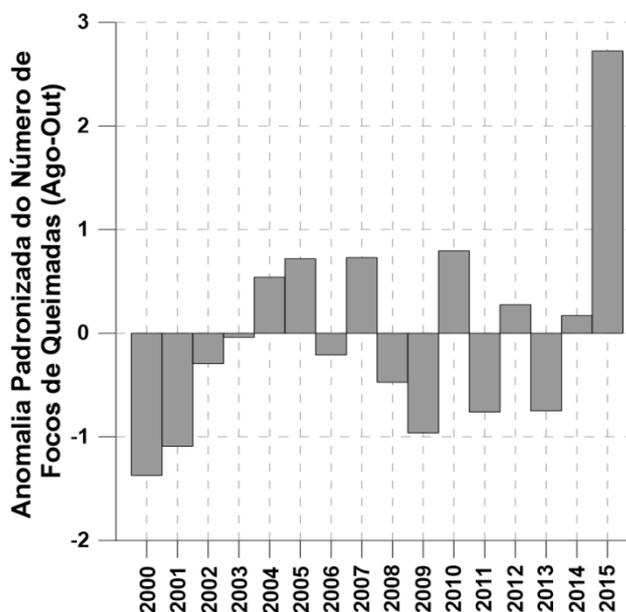
Figura 1. Série temporal da taxa de desmatamento (km<sup>2</sup>/ano).



Série temporal da taxa de desmatamento (km<sup>2</sup>/ano) da Amazônia Legal em comparação aos estados do Mato Grosso e Amazonas.

Fonte: Produção do autor.

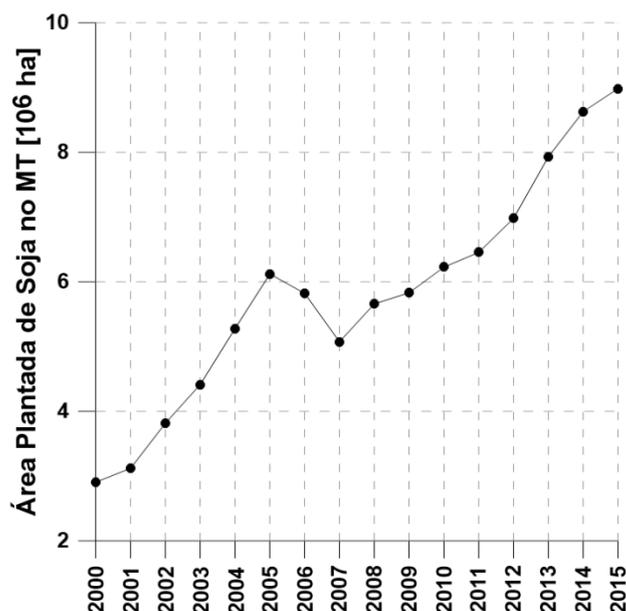
Figura 2. Anomalia padronizada do número de focos de queimadas para a região de estudo.



Anomalia padronizada (i.e diferença entre a referida variável e a média da climatologia dividida pelo desvio padrão amostral) do número de focos de queimadas (CPTEC/INPE) para os meses de Agosto a Outubro para a região de estudo para uma série histórica de 2000 – 2015.

Fonte: Produção do autor.

Figura 3. Série temporal da área plantada com o cultivo de soja no Mato Grosso (MT)



Série temporal da área plantada ( $10^6$  ha) de acordo com o cultivo de soja no Mato Grosso (MT) e a série histórica (2000 – 2015).

Fonte: adaptado de (IBGE, 2015)

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é:

- Estudar o comportamento temporal da profundidade óptica do aerossol, verificando sua relação com a precipitação e possíveis mudanças do uso do solo na região de transição entre a região amazônica e o cerrado.

Os objetivos específicos são:

- 1) Avaliar a relação entre a precipitação, a carga de aerossóis atmosféricos e o número de focos de queimadas;
- 2) Verificar possíveis alterações das propriedades ópticas do aerossol provenientes de queimadas na região amazônica, para os períodos que precedem e sucedem o ano de 2004 (pico da taxa de desmatamento);
- 3) Estudar o comportamento temporal da AOD inferido por sensores a bordo de satélite e instalados em superfície;
- 4) Avaliar se ocorreram mudanças na AOD e índice de refração complexo do aerossol.

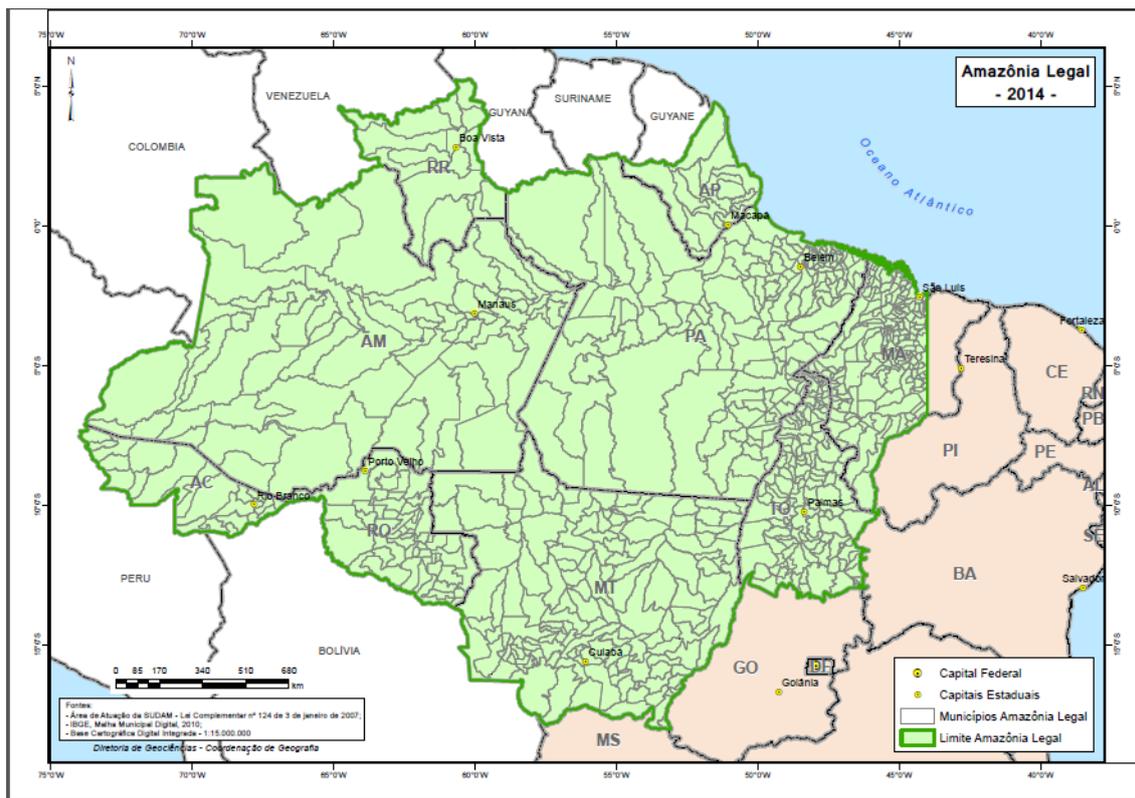
## **2 CONTEXTUALIZAÇÃO**

A escolha do domínio de estudo utilizado neste trabalho, compreendendo o estado do Mato Grosso e algumas regiões vizinhas, está relacionada ao fato de ser um dos maiores emissores de aerossóis originados de queimadas do Brasil (ARTAXO, PAULO; *et al.*, 2006). Esse domínio de estudo está inserido no contexto da Amazônia Legal, mais especificamente no contexto do arco de desflorestamento. Sendo assim, este capítulo visa delinear as características mais relevantes para o presente estudo em termos geográficos, das atividades antropogênicas e dos aspectos físicos e socioeconômicos da Amazônia Legal e do arco de desflorestamento.

### **2.1 A região amazônica**

Localizada entre 5°N e 10°S e estendendo-se por uma área de aproximadamente 6,3 milhões de km<sup>2</sup>, a região amazônica compreende alguns países da América do Sul, como a Bolívia, Equador, Colômbia e Peru, porém a maior parte, cerca de 5,5 milhões de km<sup>2</sup>, ocupa mais da metade do território nacional brasileiro (IBGE, 2015). Para fins de planejamento e promoção do desenvolvimento dessa região, o governo criou a Lei 1.806, com o conceito de Amazônia Legal, em Janeiro de 1953. A Amazônia Legal (Figura 4) abrange aproximadamente 5.020.000 km<sup>2</sup>, incluindo os estados da região norte brasileira: Acre (AC), Rondônia (RO), Amapá (AP), Roraima (RR), Amazonas (AM), Pará (PA), alguns municípios dos estados do Maranhão (MA), Tocantins (TO) e, em sua totalidade, o estado do Mato Grosso (MT). Esta região está sob responsabilidade de uma autarquia federal, a Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM), criada em 1996 (SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO NA AMAZÔNIA (SUDAM), 1996).

Figura 4. Estados que compreendem a região da Amazônia Legal.



Estados que compreendem a região da Amazônia Legal: Acre (AC), Rondônia (RO), Amapá (AP), Roraima (RR), Amazonas (AM), Pará (PA), Mato Grosso (MT) e alguns municípios dos estados do Maranhão (MA) e Tocantins (TO).

Fonte: adaptado de (IBGE, 2015).

Na fronteira entre o Brasil, Colômbia e Venezuela, estudos apontam uma precipitação total anual de aproximadamente 3500 mm com valores elevados próximo aos Andes, devendo-se ao fato da ascensão orográfica de umidade transportada por ventos alísios vindos de leste das Altas Subtropicais (MARENGO, 1995). O litoral compreendido entre os estados do Pará e Amapá também são marcados por altos índices de precipitação. Esta região costeira é fortemente influenciada pelas linhas de instabilidade formadas durante o período da tarde e sofrem a ação forçada de brisas marítimas (MARENGO, 1995). Em aproximadamente 5°S, a região central da Amazônia apresenta um máximo de precipitação, podendo estar associada à penetração de sistemas frontais provenientes da região Sul do país, que interagem com a convecção local (FIGUEROA; NOBRE, 1990). De uma maneira geral, a região amazônica possui um período de forte atividade convectiva entre os meses de Novembro e Março, com menor intensidade entre Maio e Setembro. Os meses de Abril e Outubro são meses transientes entre um

regime e outro (FISCH; MARENGO, J. A.; NOBRE, 1996). Estudos revelaram ainda que o trimestre de Dezembro, Janeiro e Fevereiro (DJF), apresenta altos índices de precipitação – superior a 900 mm – na porção oeste e central da Amazônia, podendo este fato estar relacionado à Alta da Bolívia. O trimestre dos meses de Junho, Julho e Agosto (JJA) pode sofrer influência da célula de Hadley, deslocando o seu centro de máxima precipitação para o norte, na América Central.

## 2.2 Desflorestamento e mudanças no uso do solo

O desflorestamento na Amazônia é distribuído ao longo da fronteira agrícola em direção à floresta, estendendo-se desde o estado do Acre, passando por Rondônia até atingir o estado do Maranhão, abrangendo biomas como o cerrado e a floresta amazônica. Esta região é conhecida como Arco do Desflorestamento (Figura 5), atualmente também denominada Arco do Desenvolvimento Sustentável. A expansão de área plantada, principalmente na porção central da Amazônia Legal, tem causado diversos impactos socioambientais, que vão desde a prática de queimadas até mudanças quanto ao manuseio do solo e concentração de latifundiários (DOMINGUES; BERMANN, 2012; NOBRE *et al.*, 1996).

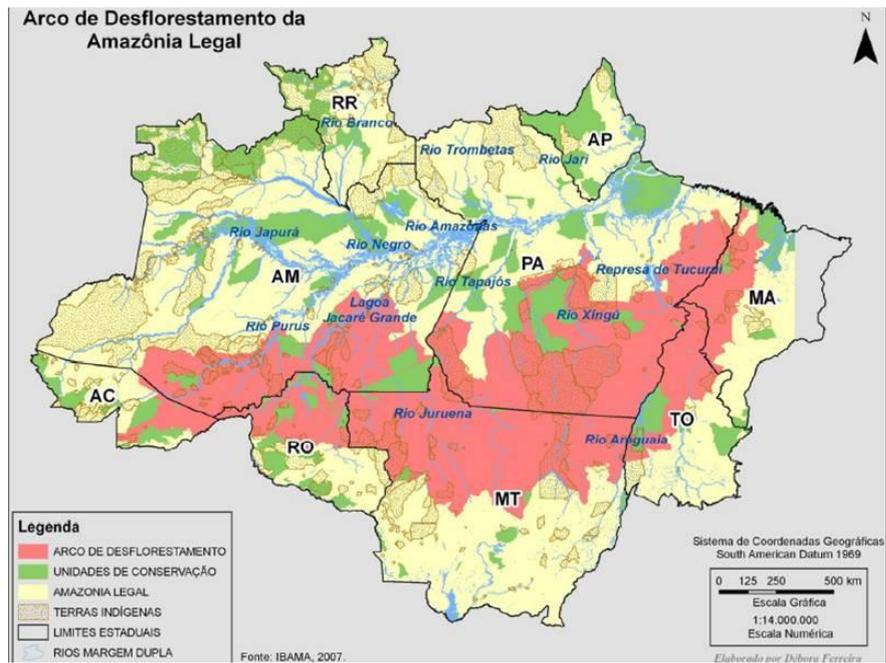
Historicamente, o início do processo de evolução da produção de soja no Brasil deu-se na segunda metade de 1970, e, a partir da década de 80, expandiu-se para zonas de cerrado. Foram grandes os incentivos do governo neste período para que sua expansão tivesse andamento e em 1990 o estado do Mato Grosso (MT) já passava a ser o terceiro maior produtor de soja do país, com 1,6 milhões de hectares plantados. Existem hipóteses quanto ao processo do avanço da cultura de soja, em especial na porção noroeste do MT. Esta se baseia em evidências indicativas de que tal expansão propriamente dita ocorre através de práticas destinadas à pecuária que precedem o plantio de soja (DOMINGUES; BERMANN, 2012). Essa expansão na produção de soja está ocasionando o desmatamento por meio da derrubada da floresta, implantação da pecuária e, em seguida, transformação em áreas de agricultura mecanizada e uso de fertilizantes. Também tem levado ao deslocamento de parte da população, antes habitando em áreas rurais, para a região fronteira de produção agrícola.

A Figura 6 mostra a evolução da taxa de desmatamento em milhares de km<sup>2</sup>/ano desde o ano de 1988 até 2015 para a Amazônia Legal, segundo dados do programa PRODES do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, que realiza o monitoramento via satélite dos

desmatamentos ocorridos nesta região (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 1988). Este programa utiliza imagens do satélite Landsat, que possui de 20 a 30 metros de resolução espacial e uma taxa de revisita de 16 dias, com técnicas de minimização de problemas por conta da cobertura de nuvens. Para mais detalhes, a plataforma de acesso encontra-se no endereço eletrônico do PRODES (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 1988).

Nos dez anos compreendidos entre 1988 e 1998, o desflorestamento na Amazônia Legal atingiu uma média de 15.000 km<sup>2</sup>/ano, podendo ser verificados valores de 11.130 km<sup>2</sup>/ano entre 1990 e 1991 e aumentando para 29.059 km<sup>2</sup>/ano entre 1994 e 1995 (WOOD; PORRO, 2002). A Figura 7 apresenta a distribuição espacial do desflorestamento na Amazônia Legal para o período de 1988 a 1998. Observa-se que ao invés de se dispersar aleatoriamente pela bacia amazônica, o desmatamento coincide principalmente com a fronteira agrícola à medida que avança para o norte passando pelos estados do Pará, Tocantins, Mato Grosso, Rondônia e Acre. Além disso, os efeitos da construção de estradas rodoviárias e ferroviárias, como a Transamazônica, induzem o desmatamento.

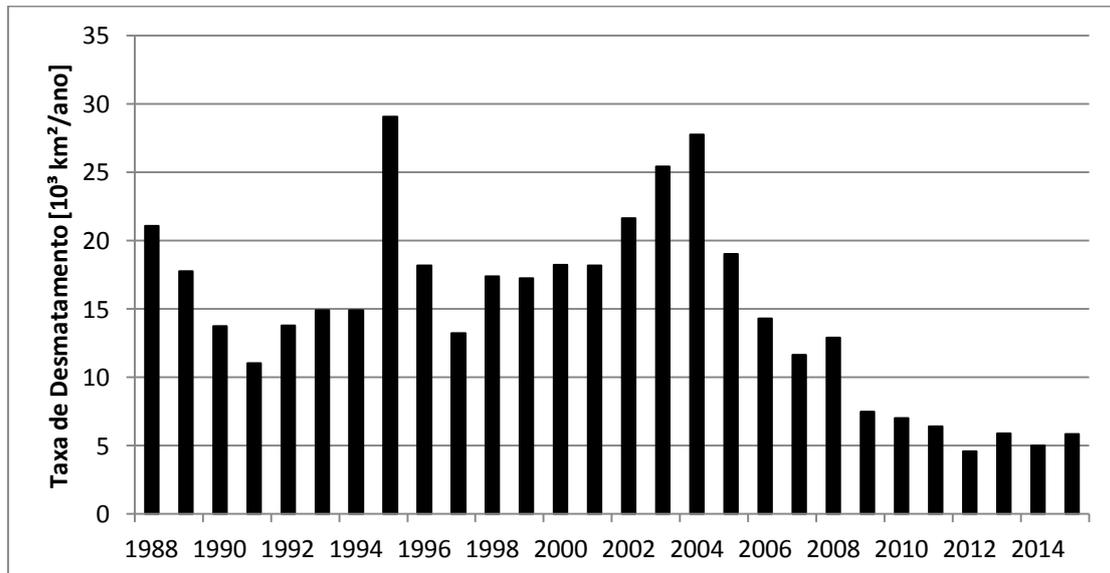
Figura 5. Mapa representativo do Arco do Desflorestamento na Amazônia Legal



Mapa representativo do Arco do Desflorestamento na Amazônia Legal. Áreas em vermelho indicam regiões do Arco do Desflorestamento. Áreas em verde mostram unidades de conservação.

Fonte: adaptado de IBAMA, (2014)

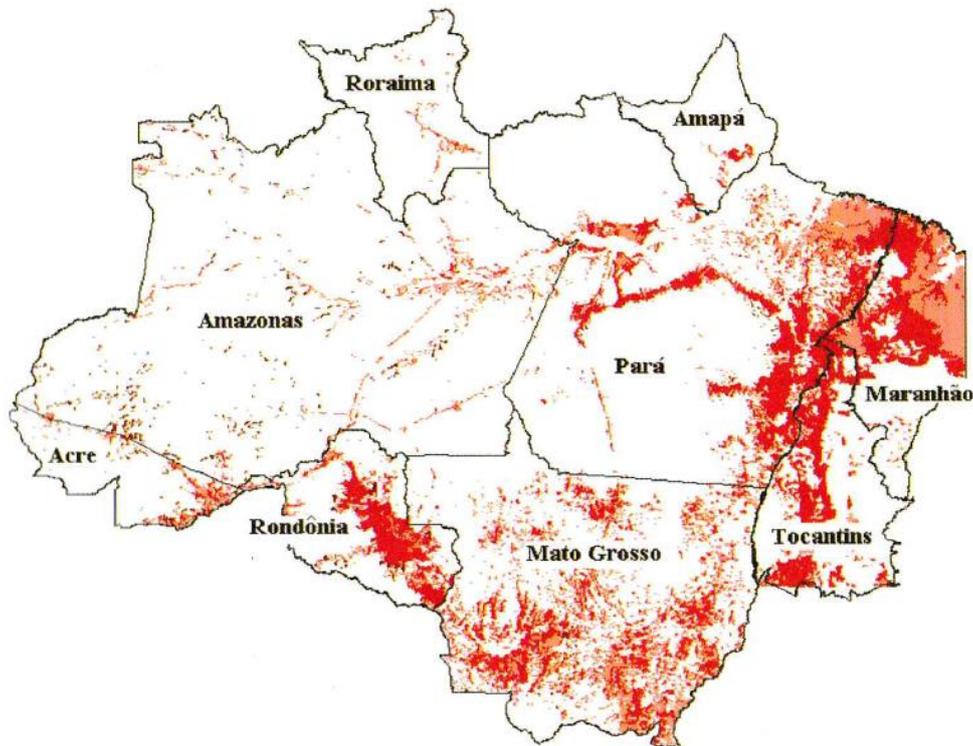
Figura 6. Taxa de desmatamento na Amazônia Legal.



Taxa de desmatamento na Amazônia Legal em km²/ano desde 1988 até 2015, segundo dados do PRODES.

Fonte: PRODES (1988).

Figura 7. Representação da distribuição espacial do desflorestamento na Amazônia Legal.



Representação da distribuição espacial do desflorestamento na Amazônia Legal para os anos de 1988 a 1998.

Fonte: Wood, C. H. e Porro, R. (2002)

### 2.3 A queima de biomassa na Amazônia

Uma queimada é um processo de queima de biomassa, podendo ser ocasionada por processos naturais ou por ação humana (FREITAS; LONGO; SILVA DIAS; *et al.*, 2005). É muito utilizada como forma de preparação do solo para a prática agropecuária pela comunidade amazônica, costumando ocorrer com maior frequência no período de estação seca, e, em muitos casos, é ocasionada posteriormente à exploração madeireira. As florestas acessíveis por terra ou por transporte fluvial são exploradas, com remoção dos fustes de árvores grandes (FEARNSIDE, 2002). A retirada dos galhos maiores aumenta a eficiência da queimada, pois galhos que possuem diâmetro pequeno queimam melhor, uma vez que a superfície de contato é aumentada, elevando a velocidade da reação de queima.

A queimada apresenta quatro estágios desde sua formação até extinguir-se (FREITAS; LONGO; DIAS; *et al.*, 2005; FREITAS; LONGO; SILVA DIAS; *et al.*, 2005). No primeiro, denominado ignição, alguns fatores são determinantes para que o processo de

queima seja iniciado, como a composição que caracteriza a biomassa, seu teor de umidade e fatores ambientais como umidade relativa, temperatura e vento. O momento seguinte é chamado fase de chamas. Nesta, a queimada alcança temperaturas de fogo muito altas, em torno de 1800K, ocorrendo a ruptura de moléculas que constituem a biomassa, levando ao processo pirolítico, o qual componentes de alto peso molecular são decompostos em compostos de peso molecular mais baixo, ocorrendo liberação de CO<sub>2</sub> e CO. O próximo é um estágio mais ‘frio’ por ocorrer a temperaturas abaixo de 1000K, com drástica redução de liberação de CO<sub>2</sub> e um expressivo aumento de CO, que é um composto oxidado de forma incompleta. Nesta fase, denominada fase de brasas, ocorre a maior parte de emissão de material particulado para a atmosfera. E por último, quando a quantidade de biomassa disponível diminui e outros fatores ambientais influenciarem, é alcançado, por fim, o estágio de extinção. Para o caso da vegetação do tipo cerrado, quase toda a biomassa é queimada durante a fase de chamas (WARD; KAUFFMAN; CUMMINGS, 1995), enquanto para a floresta primária (aquelas intactas, sem ter sofrido ação humana), a queima é em torno de 50%.

Devido a enorme extensão espacial da ocorrência de queimadas na América do Sul, a utilização do sensoriamento remoto via satélite torna-se a maneira mais viável no auxílio do monitoramento destes eventos. No Brasil, desde 1980, o INPE vem operacionalizando um sistema de detecção de queimadas. A partir de 1998 o IBAMA/PROARCO vem conjuntamente com o INPE trabalhando nessas detecções, enfatizando a Amazônia. Os dados são obtidos por meio do produto de imagens termais de diversos satélites, como o NOAA, GOES, Aqua/Terra e atualmente, o satélite NPP. Em seguida, são integrados em um sistema de informações geográficas. Essas informações são disponibilizadas em tempo quase real, cerca de 20 minutos após a passagem dos satélites. Para tanto, são utilizadas as recepções das estações do INPE nas cidades de Cachoeira Paulista, no interior de São Paulo, e da cidade de Cuiabá, no estado do Mato Grosso. A detecção é feita pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do CPTEC/INPE e são disponibilizados através do endereço eletrônico de monitoramento de queimadas do INPE (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), [S.d.]).

As queimadas constituem uma importante fonte antropogênica de aerossóis atmosféricos, que serão tratados na seção 2.4.

#### 2.4 Os aerossóis atmosféricos originários de queimadas

Os aerossóis atmosféricos são partículas cujo tamanho compreende de alguns nanômetros a dezenas de micrômetros de diâmetro, podendo ser provenientes de fontes naturais – poeira de desertos, sal marinho, cinzas de vulcão, grãos de pólen – ou antropogênicas, como queimadas e poluição proveniente de emissões veiculares, produção de energia, etc.

Partículas com diâmetro menor do que 2,5  $\mu\text{m}$  geralmente são denominadas partículas finas e aquelas maiores do que 2,5  $\mu\text{m}$  são denotadas como partículas grossas. Existem duas maneiras de o aerossol ser removido da atmosfera: deposição seca (deposição na superfície) e úmida (precipitação). Como o tempo de residência do aerossol na troposfera é de curto prazo, variando de alguns dias a uma semana, sua concentração, composição química, distribuição de tamanho, são fortemente dependentes de sua fonte, seja ela natural ou antropogênica. Sua distribuição geográfica também é não uniforme, ou seja, possui uma alta variabilidade espacial nas propriedades ópticas e radiativas, o que requer observações globais do espaço (SEINFELD; PANDIS, 1998).

Artaxo et al. (1998) verificou que as partículas de aerossóis originadas de queimadas na região amazônica são uma combinação de diferentes processos de queima de vegetação, como o do cerrado, das áreas de pastagem e das florestas primárias e secundárias, que são aquelas cuja vegetação se regenerou de forma natural após desmatamento, causada por processos de extração madeireira, agricultura ou pecuária. Com o aumento significativo das queimadas durante a estação seca, estas partículas também são emitidas em maior quantidade durante este período, sendo tema de diversos trabalhos (ANDREAE; MERLET, 2001; ARTAXO, PAULO *et al.*, 2002). O impacto causado por essas emissões também para o período já citado foi foco de pesquisas experimentais realizados na Amazônia (ANDREAE *et al.*, 2002; ARTAXO, PAULO; *et al.*, 2006; ARTAXO, PAULO *et al.*, 1998; SILVA DIAS *et al.*, 2002) além de estudos acerca de medições e modelagem quanto às suas propriedades ópticas, físicas e químicas (DUBOVNIK, OLEG *et al.*, 2002; ECK *et al.*, 1998; PROCOPIO, S. *et al.*, 2004; REMER, L. A. *et al.*, 1998; ROSÁRIO, NILTON E. *et al.*, 2011; SCHAFER, 2002; SCHAFER *et al.*, 2002; YAMASOE, H A *et al.*, 2000).

Para a análise da composição química das partículas, habitualmente é utilizado o índice de refração complexo ( $m = n + ik$ ), no qual a parte real ( $n$ ) corresponde às

características de espalhamento de radiação e a parte imaginária ( $k$ ), corresponde à absorção (DO ROSÁRIO, NILTON MANUEL ÉVORA, 2011). Isto é, quanto maior a parte imaginária, mais absorvedora é a partícula. Como exemplo deste tipo de partícula, podemos citar o chamado *black carbon* (do termo proveniente do inglês, Carbono elementar), o qual é emitido durante os processos de combustão incompleta, geralmente associados à queima de biomassa.



### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Nesta seção, serão apresentados breves pontos teóricos sob os quais este trabalho está fundamentado.

#### **3.1 AERONET como fonte de dados que caracteriza as propriedades ópticas do aerossol**

A AERONET – Aerosol RObotic NETwork – é uma rede de monitoramento de aerossóis por sensoriamento remoto a partir do solo, estabelecida pela NASA em parceria com vários institutos de pesquisa, universidades e agências nacionais. Hoje, a rede consta com mais de 200 fotômetros solares espalhados por diversos lugares no globo, de maneira estratégica, com a finalidade de realizar medições acerca das propriedades ópticas, radiativas e de microfísica do aerossol na coluna atmosférica.

Cada sítio possui um radiômetro automático, o qual mede radiâncias em bandas espectrais centradas em oito comprimentos de onda: 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940 e 1020 nm, incluindo colimadores e filtros. Quando apontado para o disco solar, têm-se medidas de radiância direta a cada 15 minutos. Quando apontados para o céu em ângulos específicos, têm-se medidas de radiância difusa, também denominadas medidas derivadas.

Das medidas diretas, variáveis como a profundidade óptica do aerossol, coeficiente de Angstrom e água precipitável (quantidade de vapor d'água na coluna atmosférica, dada em [cm]) são calculadas, respectivamente, para sete comprimentos de onda para o AOD (340, 380, 440, 500, 675, 870 e 1020 nm), o coeficiente de Angstrom para dois comprimentos de onda (440 e 675 nm) e, o canal de 940 nm, o vapor d'água.

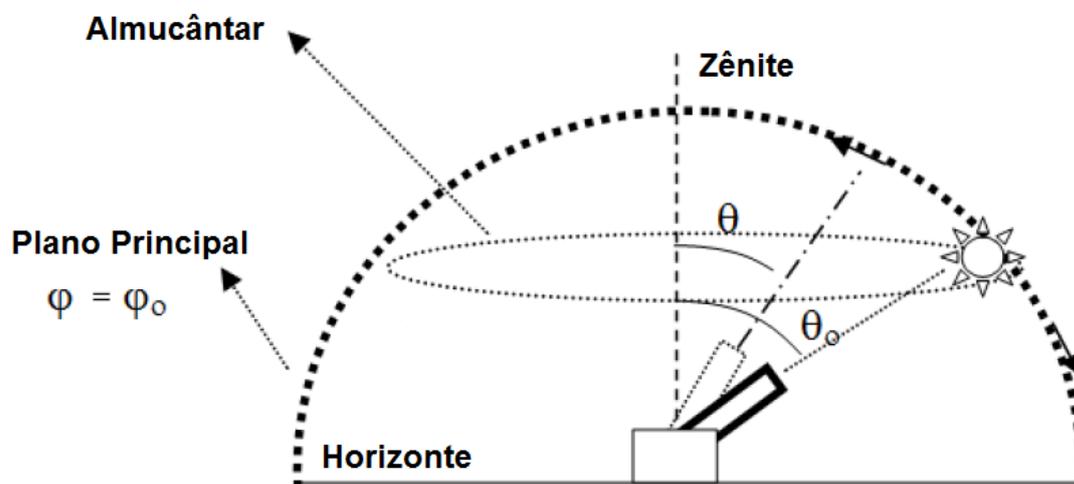
A profundidade óptica do aerossol é derivada a partir da Lei de Beer-Bouguer Lambert, a qual descreve a atenuação de um feixe monocromático de radiação ao atravessar um meio homogêneo. Para fins de aplicação atmosférica, essa lei é corrigida por um fator de distância Terra-Sol e adaptada devido à presença dos constituintes atmosféricos, como o espalhamento molecular, os aerossóis e os gases atmosféricos.

As chamadas medidas derivadas são obtidas através do almucântar, quando o colimador não aponta diretamente para o sol, logo, essas medidas são produzidas em menor frequência temporal, visto que necessitam que não haja a presença de nuvens ao redor,

enquanto as medidas diretas apenas exigem que não haja nuvens entre o sol e o radiômetro (PAIXÃO, 2011).

As medidas de radiância difusa são realizadas para quatro comprimentos de onda (440, 670, 870 e 1020 nm) em relação ao plano principal e almucântar, indicado na Figura 8. O plano principal é definido por um plano vertical com ângulo azimutal que é fixo na direção do Sol, variando o ângulo zenital. O valor do ângulo zenital é definido igual a zero na direção do Sol, positivo acima deste e negativo abaixo deste. Já para o plano do almucântar, fixa-se o ângulo zenital do Sol e varia-se o ângulo azimutal. Neste caso, como se assume que o aerossol encontra-se distribuído de maneira homogênea na atmosfera. O valor do ângulo igual a zero na direção solar mede o espalhamento frontal, indo até 180° para o espalhamento traseiro. Adotando-se o sentido horário, os ângulos são definidos como positivos, e no sentido anti-horário, os ângulos são negativos. Na figura abaixo, os ângulos  $\varphi_0$  e  $\varphi$  representam os ângulos azimutais do sol e do sensor, respectivamente, enquanto os ângulos  $\theta_0$  e  $\theta$  são os ângulos zenitais solar e do sensor, respectivamente.

Figura 8. Esquemática da posição do radiômetro da AERONET para as realizações das medidas no plano principal e almucântar.



Esquemática da posição do fotômetro solar da AERONET para as realizações das medidas no plano principal e almucântar. O ângulo azimutal do Sol é representado por  $\varphi_0$  e o ângulo azimutal do sensor é representado por  $\varphi$ . Os ângulos zenitais solar e do sensor são representados por  $\theta$  e  $\theta_0$ , respectivamente.

Fonte: adaptada de Paixão, M. (2011).

Das medidas do almucântar e do plano principal derivam-se os cálculos para as propriedades de espalhamento das partículas, que são inferidas por meio de um código de inversão, para a obtenção da distribuição volumétrica de tamanho, albedo por espalhamento simples ( $\omega$ ) e índice de refração complexo ( $m$ ), função de fase de espalhamento e raio efetivo. (NAKAJIMA, T *et al.*, 1996; NAKAJIMA, TERUYUKI; TANAKA; YAMAUCHI, 1983) desenvolveu um método para a obtenção da distribuição angular das radiância do céu, o qual leva em consideração o efeito de espalhamento múltiplo em todo um intervalo de ângulos de espalhamento.

O cálculo da distribuição de tamanho e índice de refração pode ser realizado pela AERONET por meio de um ajuste simultâneo de todas as radiância medidas para todo um intervalo angular e espectral disponível (PAIXÃO, 2011). A seguir seguem as equações utilizadas para o cálculo dessas variáveis, segundo AERONET.

**-Distribuição de tamanho:** dada em termos do volume de partícula por área da atmosfera. Relaciona-se com a distribuição numérica de partículas.

$$\frac{dV(r)}{d\ln(r)} = V(r) \frac{dN(r)}{d\ln(r)} = \frac{4}{3} \pi r^3 \frac{dN(r)}{d\ln(r)} [\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2] \quad 3.1$$

**-Raio efetivo da distribuição de tamanho:**

$$r_{eff} = \frac{\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^3 \frac{dN(r)}{d\ln(r)} d\ln(r)}{\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^2 \frac{dN(r)}{d\ln(r)} d\ln(r)} \quad 3.2$$

**-Índice de refração complexo do aerossol:** é dado em termos da parte real de espalhamento,  $n(\lambda)$ , e imaginária de absorção  $k(\lambda)$ .

$$m(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda) \quad 3.3$$

A partir destes parâmetros microfísicos, são derivados os parâmetros ópticos que se seguem, dados por (DUBOVIK, OLEG; KING, 2000).

**-Função de fase de espalhamento:** Provê a distribuição angular da intensidade espalhada  $F(\Theta)$  para os 83 ângulos possíveis de espalhamento medidas no almucântar pelo radiômetro. Esta é uma grandeza adimensional e simbolizada por  $P(\Theta, \lambda)$ .

$$P(\theta, \lambda) = \frac{F(\theta)}{\int_0^\pi F(\theta) \sin\theta d\theta} \quad 3.4$$

**-Parâmetro de assimetria:** Simbolizado por  $g(\lambda)$  é o resultado do cálculo entre a média ponderada dos cossenos dos ângulos de espalhamento pelas radiância. Na equação abaixo, o fator  $\frac{1}{2}$  deve-se à garantia do valor de  $g = 1$  para um espalhamento frontal total, ou seja, que toda a intensidade incidente sobre a partícula é espalhada para frente ( $\Theta = 0^\circ$ ) e para o restroespalhamento ( $\Theta = 180^\circ$ ). Quando o espalhamento ocorre de forma simétrica, ou seja, isotrópica, tem-se  $g = 0$  (espalhamento Rayleigh ou molecular). Para valores de  $g$  positivos, significa que a maior parte do espalhamento foi frontal e, valores negativos de  $g$  simbolizam o restroespalhamento.

$$g(\lambda) = \langle \cos\theta \rangle = \frac{1}{2} \frac{\int_0^\pi \cos\theta F(\theta) \sin\theta d\theta}{\int_0^\pi \cos\theta P(\theta) \sin\theta d\theta} = \frac{1}{2} \int_0^\pi \cos\theta P(\theta) \sin\theta d\theta \quad 3.5$$

**-Albedo de espalhamento simples:** Representa a razão entre o coeficiente de espalhamento e o coeficiente de extinção, simbolizado por  $\omega_0(\lambda)$ . A AERONET o define como sendo a razão entre a profundidade óptica de espalhamento do aerossol e a profundidade óptica de extinção.

$$\omega_0 = \frac{\tau_{esp}(\lambda)}{\tau_{ext}(\lambda)} \quad 3.6$$

Para o cálculo dessas propriedades, muitas aproximações são realizadas e constantes aprimoramentos têm sido feitos no algoritmo da AERONET, desde quando o primeiro código foi criado em 1993. Desde então, algumas versões foram implementadas até se chegar à versão 2.0 atual, descrita detalhadamente em Holben et al. (1998). Entre as principais mudanças ocorridas destaca-se a parametrização do grau de não esfericidade, muito importante para as partículas de poeira e uma melhora considerável na qualidade dos dados da versão 2.0, ocasionando menos perdas de observações. Os dados possuem três versões cada, denominados níveis de processamento (níveis 1.0, 1.5 e 2.0). Na Tabela 1 abaixo, confere-se algumas das características dessas versões mencionadas.

Tabela 1. Níveis de Processamento dos dados da AERONET e suas principais características.

<b>Nível de processamento</b>	<b>Características</b>
1.0	Chamado de <u>nível de medidas básicas</u> . Sinal da tensão do radiômetro é convertido em irradiância. São calculadas as propriedades ópticas do aerossol no primeiro nível da medida.
1.5	Chamado <u>cloud screened</u> . Medidas do nível 1.0 passam por um filtro para a retirada de medidas contaminadas por nuvens.
2.0	Conhecido como <u>quality assured</u> . É avaliado quando o radiômetro volta para a NASA para recalibração dos dados (geralmente uma vez por ano). São submetidos a vários critérios para que obtenha a qualidade assegurada.

Fonte: adaptado de Dubovik et al. (2000)

### 3.2 O algoritmo do sensor MODIS para a profundidade óptica do aerossol sobre continentes

O sensor MODIS (MODerate-Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo dos satélites Terra e Aqua foi o primeiro sensor concebido com características específicas para o estudo de aerossóis (CORREIA *et al.*, 2013) devido à sua grande gama espectral

(36 bandas), o que permite a obtenção de informações como a concentração de aerossóis e o tamanho médio das partículas.

O algoritmo de aerossóis utiliza dados de radiância medidas pelo sensor depois de realizada a sua calibração radiométrica e de geolocalização, além do produto de mascaramento de nuvens e dados meteorológicos auxiliares provenientes do NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Existem dois algoritmos independentes para a obtenção das propriedades ópticas do aerossol – sobre a terra e sobre o oceano – mas, ambos baseiam-se na mesma estratégia de tabelas pré-computadas para o cálculo de transferência radiativa na atmosfera, denominadas *look-up tables*. Neste processo, várias condições de observação e iluminação são computadas para diferentes níveis de concentração de aerossóis e refletância na superfície. As medidas de radiância espectrais no topo da atmosfera obtidas pelo sensor e as estimativas de refletância na superfície são então comparadas com valores pré-calculados, até que seja atingida a melhor solução por meio do método de ajustes de mínimos quadrados (CORREIA *et al.*, 2013).

Um ponto importante na detecção de aerossóis sobre os continentes é o qual diz respeito à correção adequada a ser utilizada devido aos efeitos de refletividade na superfície e o espalhamento molecular (Rayleigh) na atmosfera. Juntos, esses efeitos tornam-se muito maiores do que o sinal advindo dos aerossóis. Logo, buscam-se técnicas que possam diminuir a maior parte do sinal recebido do sensor, a fim de se preservar a informação da camada de aerossóis.

No caso da detecção de aerossóis sobre continentes, a técnica utilizada é a de superfícies escuras (ou alvos escuros), a qual utiliza alguns resultados empíricos (REMER, L. A. *et al.*, 2005):

a) O efeito dos aerossóis na região espectral do infravermelho próximo (NIR) é muito maior do que na região do visível (VIS), decrescendo a uma lei de potências de  $\lambda^{-1}$  a  $\lambda^{-2}$ , em que  $\lambda$  é o comprimento de onda;

b) Sobre superfícies escuras, o efeito radiativo líquido que o aerossol exerce é predominantemente devido ao espalhamento de radiação solar. Para o caso de superfícies brilhantes, ocorre uma sobreposição de espalhamento e absorção de radiação solar. Essa técnica é representada por refletâncias maiores que 6% no canal azul, que

permite explorar essas interações entre a luz solar, aerossóis e superfície para alguns comprimentos de onda;

c) Existe correlação entre as refletâncias de superfície nos comprimentos de onda  $\lambda=0,47 \mu\text{m}$ ,  $\lambda =0,66 \mu\text{m}$  e  $\lambda =2,1 \mu\text{m}$ , tendo sido observada para vários tipos de superfície no globo nas faixas do infravermelho e visível (KAUFMAN, Y. J. *et al.*, 1997).

Após a realização da correção de radiância, é feita uma análise estatística sobre a quantidade de pixels disponíveis nos canais de  $0,47 \mu\text{m}$ ,  $0,66 \mu\text{m}$  e  $2,1 \mu\text{m}$ . O canal de  $0,66 \mu\text{m}$  (resolução espacial de 250 metros) é então ajustado para permitir comparações com os outros dois canais (resolução espacial de 500 metros). Esses pixels são colocados em ‘caixas’ de  $20 \times 20$  pixels (ou seja, 400 pixels). Entre esses pixels, são identificados os quais contém água, neve e nuvem e são aplicadas técnicas de mascaramento. A partir da relação empírica 3.7, são descartados cerca de 50% dos pixels mais brilhantes e 20% dos pixels mais escuros (KAUFMAN, Y J; *et al.*, 1997; REMER, L. A. *et al.*, 2005).

$$0,01 < \rho_{2,1} < 0,25 \quad 3.7$$

Em que  $\rho_{2,1}$  é a refletância no canal de  $2,1 \mu\text{m}$ .

Em seguida, o algoritmo faz uma nova contagem dos pixels e verifica se restaram pelo menos 12 pixels. Dependendo disso, o algoritmo pode seguir dois caminhos. O caminho A, considerado de boa qualidade (Controle de Qualidade, CQ = 3), é o qual possui o mínimo de pixels requeridos. O caminho B, considerado de má qualidade (CQ=0), é o qual não possui o mínimo de 12 pixels requeridos.

No Caminho A, é feita a média desses pixels restantes nos canais de  $0,47 \mu\text{m}$  e  $0,66 \mu\text{m}$  a partir do resultado empírico com o canal em  $2,1 \mu\text{m}$  e é estimada a refletância da superfície (Equação 3.8). O mesmo processo é feito para estimar a refletância no topo da atmosfera ( $\rho_{0,47}^-$  e  $\rho_{0,66}^-$ ).

$$\rho_{0,47}^s = 0,25\rho_{2,1} \text{ e } \rho_{0,66}^s = 0,50\rho_{2,1} \quad 3.8$$

Essas refletâncias da superfície e do topo da atmosfera são utilizadas como parâmetros de entrada no processo de *Look-Up Tables* (LUT) para um modelo preliminar continental e então são estimadas as profundidades ópticas médias em  $0,47 \mu\text{m}$  e  $0,66$

$\mu\text{m}$ . No algoritmo sobre continentes, a profundidade óptica para esses dois comprimentos de onda, são derivados de maneira independente. Além disso, a definição de um modelo adequado é feita por meio de valores pré-definidos de parâmetros ópticos e microfísicos provenientes de medidas experimentais, como o albedo simples por espalhamento ( $\omega_{0,47}$  e  $\omega_{0,66}$ ) e a função de fase ( $P_{0,47}$  e  $P_{0,66}$ ), por meio da relação:

$$\rho_0(0,47) = \omega_{0,47}\tau_{0,47}P_{0,47} \quad 3.9$$

$$\rho_0(0,66) = \omega_{0,66}\tau_{0,66}P_{0,66} \quad 3.10$$

Em que  $\rho_0$  é a radiância espalhada pela atmosfera para os canais em 0,47 e 0,66  $\mu\text{m}$ .

O valor da relação  $\rho_{0,66}/\rho_{0,47}$  e a dependência espectral da radiância espalhada pela atmosfera é o que irá definir sobre qual modelo para aerossol o algoritmo deve utilizar (Equações 3.11, 3.12 e 3.13).

$$\frac{\rho_0(0,66)}{\rho_0(0,47)} < 0,72 \quad 3.11$$

$$\frac{\rho_0(0,66)}{\rho_0(0,47)} > 0,9 - 0,01(\theta - 150^\circ) \quad 3.12$$

$$0,72 \leq \frac{\rho_0(0,66)}{\rho_0(0,47)} \leq 0,9 - 0,01(\theta - 150^\circ) \quad 3.13$$

Nos quais, para o caso da equação 3.11, é utilizado o modelo de não poeira; para a equação 3.12 é utilizado o modelo de puramente poeira do deserto e, para o caso da equação 3.13, é utilizado o modelo misto, que é um modelo a partir da combinação entre os modelos não poeira e puramente poeira.

Depois de definido qual modelo utilizar, o algoritmo passa novamente pelo processo de LUT para derivar a propriedade óptica do aerossol. Para o caso do modelo de aerossol misto, é calculada ainda a fração da profundidade óptica devido somente ao aerossol que não contém poeira,  $\eta$ , dada pela literatura (Equação 3.14):

$$\eta = 1 - \frac{\frac{\rho_0(0,66)}{\rho_0(0,47)} - 0,72}{0,9 - 0,01(\theta - 150^\circ) - 0,72} \quad 3.14$$

Dependendo do valor de  $\eta$ , o modelo faz ainda uma busca sobre a região do globo e época do ano para poder selecionar o modelo de aerossol adequado. Por exemplo, para o Brasil e toda a América do Sul, o modelo adotado é o de países em desenvolvimento,

com aerossol que absorve radiação solar moderadamente (LEVY *et al.*, 2013; REMER, L. A. *et al.*, 2005). E por fim, deriva-se a profundidade óptica e outros parâmetros ópticos. Neste trabalho, são utilizados dados de profundidade óptica do aerossol do MODIS referentes à coleção 005 (LEVY *et al.*, 2013).

### 3.3 Testes de hipótese estatísticos

Uma hipótese estatística é definida como uma determinada inferência imposta a algum parâmetro relacionado a uma amostra de dados, como por exemplo, a possibilidade de tendências em séries temporais. Para que tal inferência seja verificada, os dados amostrais devem ser avaliados por meio de um teste de hipótese, também conhecido como teste de significância (WILKS, 2006).

Testes de hipótese estatísticos podem ser divididos em dois tipos: paramétricos e não paramétricos. Nos testes paramétricos, parte-se do pressuposto da existência de distribuições apropriadas na amostra, como por exemplo, uma distribuição normal, por outro lado, nos testes não paramétricos, tais pressupostos não são necessários. Este segundo tipo de teste pode ser aplicado independentemente do tamanho da amostra de dados. Somado a isto, o conjunto amostral não precisa atender a certos requisitos como no caso dos paramétricos (distribuição normal, homogeneidade dos dados e variáveis contínuas), o que os torna vantajosos no que diz respeito à abrangência de aplicações (WILKS, 2006).

Para realizar um teste de hipótese, devemos considerar duas (ou mais) possíveis afirmações a respeito do parâmetro pertencente à amostra de dados, as quais são denominadas por hipótese nula ( $H_0$ ) e hipóteses alternativas ( $H_A=H_1, H_2, \dots$ ). O teste de hipótese visa provar a inconsistência ou invalidade da hipótese nula. Se for possível provar que a hipótese nula não é válida, tenta-se provar que uma das hipóteses alternativas é verdadeira. As hipóteses alternativas são, portanto, baseadas na não validade da hipótese nula. Em outras palavras, pode-se afirmar que os testes de hipóteses utilizam uma lógica baseada em tentativas de provar que as hipóteses são falsas e não na lógica de provar que são verdadeiras.

As definições das hipóteses  $H_0$  e  $H_A$  são importantes e devem ser feitas adequadamente. Se for de interesse testar uma argumentação que já seja pré-estabelecida, tem-se que a hipótese nula deve conter tal argumentação. Em outro caso, se for desejado dar suporte

a uma determinada argumentação, então a mesma deve ser incluída na hipótese alternativa.

Ao se concluir em favor de  $H_0$ , ou seja, os testes de hipótese utilizados não forem suficientes para provar a invalidade de  $H_0$ , estaremos sujeitos a erros, apresentados na literatura como erros do tipo 1 (WILKS, 2006). A probabilidade de cometermos esse tipo de erro é denominada nível de significância do teste ( $\alpha$ ). Desta forma, a probabilidade de  $H_0$  ser válido é  $1-\alpha$ , e a probabilidade de ser inválido é  $\alpha$ . Comumente é escolhido o nível de significância para  $\alpha = 5\%$  ou  $\alpha = 0,05$ , o qual é pré-estabelecido no início do teste.

Com a finalidade de verificar se um determinado resultado obtido em um teste é significativo, calcula-se o parâmetro denominado por  $p_{\text{valor}}$ .

Para compreender o que significa o  $p_{\text{valor}}$ , podemos supor que o nível de significância tenha sido fixado em  $\alpha = 0,05$ . Um  $p_{\text{valor}}$  igual a 0,20 indica que  $H_0$  não é rejeitado no teste (hipótese nula é falsa). Portanto,  $p_{\text{valor}}$  deve ser menor ou igual ao nível de significância que foi pré-estabelecido ( $p_{\text{valor}} \leq 0,05$ ), uma vez que é buscada a situação em que  $H_A$  é verdadeira.

A seguir são apresentados dois testes e um parâmetro de magnitude, ambos não paramétricos, os quais são de maior interesse neste trabalho.

O *teste de Pettitt* trata da problemática do ponto de inversão nos dados de uma série temporal (1979). Diferentes formulações foram apresentadas em literatura sendo que uma das mais conhecidas no estudo de tendências é a versão baseada na estatística de Mann-Whitney (PETTITT, 1979; YUE; WANG, 2002). Basicamente, esse teste consiste na identificação da diferença entre os dados amostrais por intermédio da somatória de Mann-Whitney,  $U_{t,T}$ :

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \quad 3.15$$

Para o qual: 
$$\begin{cases} \text{sgn}(x) = 1, & \text{se } x > 0; \\ \text{sgn}(x) = 0, & \text{se } x = 0; \\ \text{sgn}(x) = -1, & \text{se } x = -1. \end{cases}$$

Em que  $i, j$ , e  $t$  são índices relacionados aos dados na série e  $T$  é o número total de dados no conjunto amostral.

Por meio da função sinal, fixa-se um valor base ( $x_i$ ) e faz-se uma comparação entre os valores seguintes, um a um. Se o próximo valor for maior do que o valor base, adiciona-se uma unidade na somatória  $U$  de Mann-Whitney. Caso o próximo valor for menor do que o valor base, adiciona-se  $-1$ , e, caso o próximo valor for igual ao valor base, adiciona-se  $0$  na somatória de  $U$  e assim sucessivamente até atingir  $t = T$ .

O ponto que possui a maior magnitude de  $U$ , o que é indicado como  $K_T$ , é o ponto de virada do conjunto amostral.

$$K_T = \max_{1 \leq t < T} |U_{t,T}| \quad 3.16$$

Os pontos de inversão máximo e mínimo de  $K_T$  podem ser indicados, respectivamente pelas equações 3.17 e 3.18:

$$K_T^+ = \max_{1 \leq t < T} |U_{t,T}| \quad 3.17$$

$$K_T^- = -\min_{1 \leq t < T} |U_{t,T}| \quad 3.18$$

Em que  $K_T = \max(K_T^+, K_T^-)$ .

Para verificar se a hipótese é nula, calcula-se o nível de confiança ( $\rho$ ) associado ao  $K_T^+$  e  $K_T^-$ , o qual é determinado pela equação 3.19:

$$\rho = \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 - T^2}\right) \quad 3.19$$

Desta forma, a probabilidade da hipótese nula ser rejeitada é  $1-\rho$ .

O *teste de Mann-Kendall Sazonal* (SMK), desenvolvido por Hirsch e Slack (1984), é um teste de hipótese voltado ao estudo de tendências monotônicas em séries temporais, que foi adaptado do teste de Mann-Kendall (MK). Este último foi inicialmente proposto por Mann (1945) e Kendall e Stuart (1967). Entretanto, o SMK possui como vantagem em relação ao teste MK, o fato de não ser afetado por possíveis sazonalidades.

Uma tendência ascendente (descendente) monotônica significa que a variável aumenta (diminui) ao longo do tempo, sendo que a tendência pode ou não ser linear. A presença de sazonalidade implica que os dados têm distribuições diferentes para diferentes meses do ano. Por exemplo, uma tendência ascendente monotônica pode existir ao longo dos

anos para janeiro, mas não para junho. Por este motivo, vem sendo amplamente utilizado pela comunidade científica na análise de tendências de variáveis climáticas (precipitação, temperatura, etc.) e é sugerida pela Organização Meteorológica Mundial, a OMM (ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM), 1966).

A formulação matemática do teste é semelhante à formulação do teste de Pettitt baseado em Mann-Whitney (Equação 3.20) e ao teste MK, porém o faz separadamente para cada mês da série temporal indicado pela equação 3.21.

$$S_i = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_{ij} - X_{ik}); \quad i = 1, 2, \dots, m \quad 3.20$$

$$S' = \sum_{i=1}^m S_i \quad 3.21$$

De modo que  $i$  representa o  $i$ -ésimo mês da série.

Em que  $m$  é o número de meses para os quais os dados foram obtidos ao longo dos anos. Por exemplo, se os dados foram obtidos ao longo dos anos para cada mês do ano, então  $m = 12$ .

As variâncias podem ser escritas como:

$$\text{VAR}(S_i) = \sum_{i=1}^m \binom{n_i}{18} (n_i - 1)(2n_i + 5) \quad 3.22$$

$$\text{VAR}(S') = \sum_{i=1}^m \text{VAR}(S_i) \quad 3.23$$

Em que:  $n_i$  é o número de dados do  $i$ -ésimo mês.

Normalizando  $S'$ , e, extraíndo a raiz quadrada da variância (desvio padrão), obtém-se a dispersão dos dados do teste SMK, dada pela literatura como  $Z_{SK}$ :

$$Z_{SK} = \begin{cases} \frac{S' - 1}{\sqrt{\text{VAR}(S')}} , & \text{se } S' > 0 \\ 0 , & \text{se } S' = 0 \\ \frac{S' + 1}{\sqrt{\text{VAR}(S')}} , & \text{se } S' < 0 \end{cases} \quad 3.24$$

A hipótese nula é rejeitada no nível de significância  $\alpha$  se  $|Z_{SK}| > 1 - \alpha$ .

Tendências de aumento ou diminuição, bem como a magnitude das mesmas, podem ser quantificadas por meio do parâmetro *sen's slope* (THORSTEN, 2016), de acordo com o método desenvolvido por Theil (1950) e Sen (1968).

O parâmetro *sen's slope*, representado por  $d_k$ , é considerado como sendo a mediana de todas as combinações possíveis do conjunto de dados, é dado pela equação 3.25:

$$\text{sen's slope} = d_k = \text{Mediana} \left[ \frac{X_j - X_i}{j - i} \right], \text{ para todo } i < j \quad 3.25$$

Para  $1 \leq i < j \leq n$ , os quais  $d$  representa a inclinação,  $X_j$  e  $X_i$  são os valores sequenciais de dados e  $n$  é o número de dados.

Quando apresenta valor positivo, o parâmetro indica tendência de aumento e, para a situação inversa, indica tendência de diminuição. Sua magnitude corresponde a uma taxa de variação linear. Portanto, quanto maior o valor de *sen's slope*, maior será essa taxa de variação e, por conseguinte, maior é a magnitude da tendência.



## 4 DADOS E METODOLOGIA

A seguir, são descritos sobre o conjunto de dados (seção 4.1) e a metodologia utilizada (seções 4.2 e 4.3).

### 4.1 Dados

Inicialmente é apresentado um levantamento da disponibilidade e da qualidade dos dados para a realização deste trabalho. A Tabela 2 apresenta informações gerais sobre os dados a serem utilizados neste estudo. As seções a seguir abordam com mais detalhes sobre a obtenção destes dados. O período de estudo escolhido é de Janeiro de 2000 a Dezembro de 2015 devido à disponibilidade do conjunto de dados.

Tabela 2. Dados a serem utilizados neste trabalho.

<b>Dados</b>	<b>Variável</b>	<b>Período de disponibilidade</b>	<b>Fonte</b>
Aerossol	AOD	Janeiro 2000 – 2015 Julho 2002 – 2015	MODIS/Terra MODIS/Aqua
Aerossol, Propriedades ópticas do aerossol	AOD, índice de refração	Alta Floresta: 2000 – 2015 Abraços Hill: 2000 – 2005 Ji-Paraná: 2006 – 2015 Cuiabá-Miranda: 2001-2015	AERONET
Precipitação	Taxa de Precipitação	Janeiro 2000 - 2016	3B43 TRMM
Queimadas	Número de focos de queima	Janeiro 2000 - Atual	AVHRR/NOAA MODIS/Aqua

Fonte: Produção do autor.

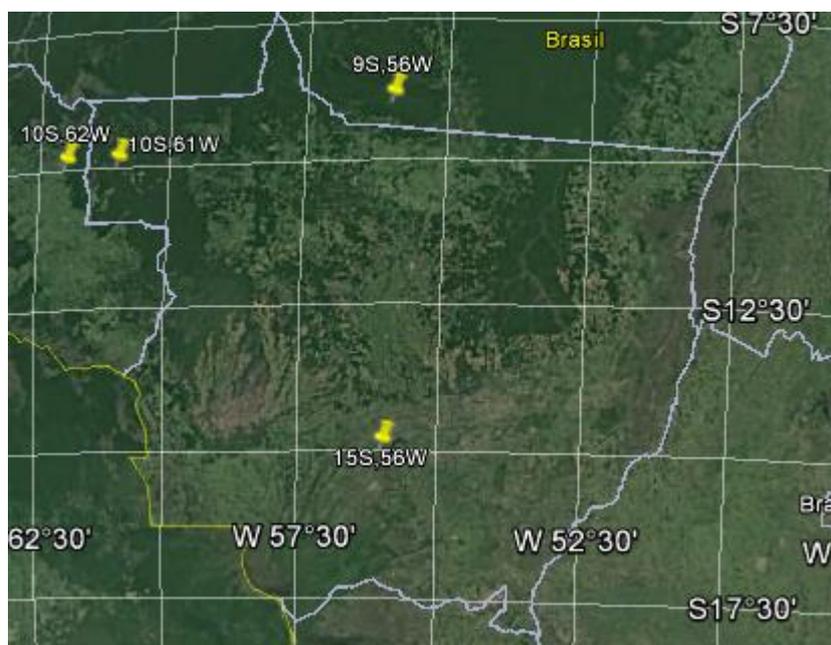
### Propriedades ópticas de aerossóis

Neste estudo serão utilizados dados de aerossóis inferidos a partir da superfície proveniente de três estações observacionais da AERONET: Alta Floresta (09°55'S, 56°00'O), Abraços Hill (10°45'S, 62°21'O) e Ji-Paraná (10°56'S, 61°51'O). A escolha das estações deve-se que as mesmas estão localizadas a aproximadamente 700 km ao sul da Bacia Amazônica, ao longo de uma região conhecida como Arco do Desflorestamento (Figura 9). Devido ao fato da estação de Abraços Hill ter sido desativada no final do ano de 2005, esta pesquisa utilizará os dados para os anos

posteriores da estação mais próxima – Ji-Paraná – para onde foram realocados os instrumentos da rede. A estação de Ji-Paraná foi ativada no ano seguinte ao de desativação de Abraços Hill mantendo-se em funcionamento até os dias atuais. A Tabela 3 mostra as estações utilizadas e os devidos períodos de funcionamento. Estas estações distam de aproximadamente 60 km uma da outra e a região é caracterizada por partículas emitidas da queima de biomassa de espécies vegetais do tipo pasto, cerrado e florestas primárias e secundárias (ARTAXO, PAULO *et al.*, 1998). Adicionalmente, será utilizada a estação de Cuiabá-Miranda, localizada (15°44'S, 56°12'O), no cerrado do Brasil Central. A escolha dessa região deve-se ao fato de receber massas de ar provenientes da região do arco do desflorestamento carregado partículas de aerossol dessa região, devido ao transporte a longas distâncias (PAIXÃO, 2011).

Os dados da AERONET a serem utilizados são: AOD em 500 nm e índice de refração (complexo) para os comprimentos de onda de 440, 670, 870 e 1020 nm. A versão escolhida dos dados da AERONET é 1.5, a qual exclui medidas contaminadas por nuvens. A razão da escolha da versão 1.5 deve-se ao fato da disponibilidade de dados, uma vez que a versão 2.0 não fornece a completude da série histórica desejada nesse trabalho (de 2000 a 2015).

Figura 9. Estações da AERONET utilizadas neste trabalho.



Estações da AERONET de Abraços Hill (10S, 62W) e Alta Floresta (9S, 56W), Ji-Paraná (10S, 61W) e Cuiabá-Miranda (15S, 56W).

Fonte: Produção do autor.

Tabela 3. Estações da AERONET utilizadas e seu período de funcionamento.

Estação	Período de Funcionamento
Alta Floresta	1993 – 2015
Abraços Hill	1993 – 2005
Ji-Paraná	2006 – 2015
Cuiabá-Miranda	2001 – 2015

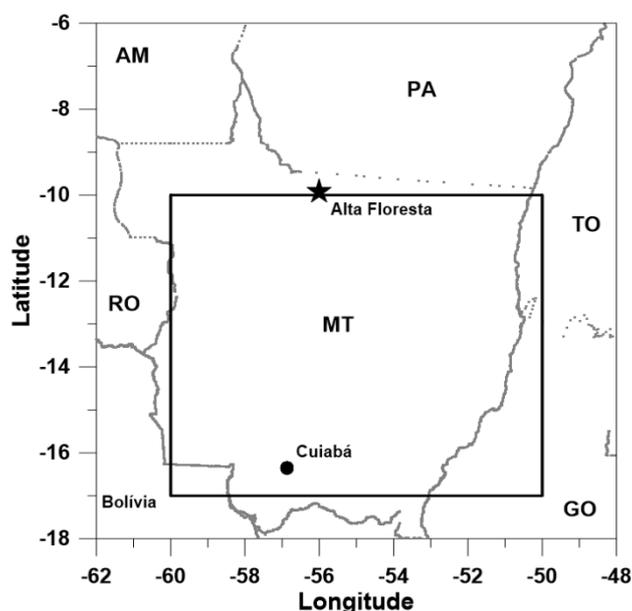
Fonte: Produção do autor.

Adicionalmente, serão utilizados dados de AOD em 550 nm inferidas via sensor MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua operados pela NASA, o qual possui resolução espacial de 1° x 1° disponíveis na plataforma Giovanni Modis no endereço eletrônico

<http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=TmAvMp&starttime=&endtime=&bbox=-180,-90,180,90> (“Giovanni Modis.The Bridge Between Data and Science”, [S.d.]).

Serão utilizados dados mensais para o período de Janeiro de 2000 a Dezembro de 2015, abrangendo uma área compreendida entre [10° a 17°S] de latitude e [50° a 60°W] de longitude (Figura 10).

Figura 10. Área selecionada para os dados de AOD550nm do sensor MODIS.



Localização da região do Mato Grosso e áreas vizinhas que abrange os dados de AOD550 nm via sensor MODIS compreendendo a área do quadrado de [50° a 60°W] de longitude e [10° a 17°S] de latitude.

Fonte: Produção do autor.

## **Precipitação**

Dados de precipitação do produto 3B43 do satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), também operado pela NASA, serão obtidos mensalmente para o período de Janeiro de 2000 a Dezembro de 2015 para a mesma área dos dados de AOD<sub>550 nm</sub>/MODIS, compreendida entre [50° a 60°W] de longitude e [10° a 17°S] de latitude. Este produto possui resolução espacial de 0.25° x 0.25° (aproximadamente 25 km no Equador) e combina vários sensores a bordo do TRMM, como os sensores TMI – Microwave Imager, PR – Precipitation Radar e VIRS – Visible and Infrared Scanner, além de estações pluviométricas a superfície (HUFFMAN *et al.*, 2007). Os dados do TRMM são disponibilizados por meio da ferramenta web Giovanni Modis, através do sistema de distribuição da NASA DAAC (Distributed Active Archive System).

## **Focos de queimadas**

Serão utilizados dados mensais de focos de queimada produzidos pelo CPTEC-INPE que estão relacionados com as atividades de queima de biomassa para todo o estado do Mato Grosso. Estes focos são inferidos a partir de informações do sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), do sensor MODIS, e, recentemente, do sensor VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), respectivamente a bordo dos satélites NOAA, Aqua e NPP (com resolução espacial de 375 metros). Os dois primeiros utilizam técnicas de limiares para os canais do infravermelho solar e termal (3.9 e 10.0  $\mu\text{m}$ ). Uma descrição mais detalhada a respeito destas técnicas encontram-se em Setzer *et al.* (2007). Já o sensor VIIRS amplia e melhora uma série de medidas iniciadas pelos sensores AVHRR e MODIS, contendo 22 canais, porém com melhor resolução espacial para os denominados canais moderados, de 750 metros (0.4 a 12  $\mu\text{m}$ ). Detalhes sobre o VIIRS podem ser encontrados no endereço eletrônico <http://npp.gsfc.nasa.gov/viirs.html> (NASA, [S.d.]).

### **4.2 Análise das relações entre profundidade óptica do aerossol, focos de queimadas e precipitação**

Inicialmente, a variabilidade sazonal e interanual dos aerossóis via sensor MODIS e da precipitação é analisada sobre uma área contida em um quadrado de [10° a 17° S] de latitude e [50° a 60° W] de longitude, ocupando praticamente todo o estado do MT e áreas vizinhas. Dados de focos de queimadas são analisados para a região da Amazônia Legal e o MT, separadamente. A sazonalidade das atividades de queimadas, a presença

de aerossol na atmosfera e a precipitação são estudadas durante o período de 2000 a 2015. A escolha do período está associada à disponibilidade do conjunto de dados de sensoriamento remoto. A base de dados do produto de AOD MODIS/Terra tem início em Fevereiro de 2000, enquanto que os dados de precipitação do TRMM tem início em Janeiro de 2000. Para ambos, a análise é efetuada até Dezembro de 2015.

Em seguida, a relação entre a precipitação, queimadas e a profundidade óptica do aerossol é estudada. Análises estatísticas padrões, como coeficiente de correlação e regressão linear são aplicadas para determinar a possível relação entre precipitação, AOD e queimadas. Adicionalmente, para relacionar as diversas variáveis, é estimada a anomalia padronizada através da diferença entre média mensal e sua média climatológica (2000-2015) dividida pelo desvio padrão. As estatísticas são calculadas usando as médias de AOD/MODIS e precipitação numa região abrangendo  $12.5 \times 10^3 \text{ km}^2$ , e, para as queimadas, os dados compilados pelo INPE para o estado do MT.

#### **4.3 Análise pontual e espacial da AOD e índice de refração complexo**

Essa análise tem por objetivo avaliar possíveis alterações das propriedades ópticas do aerossol provenientes de queimadas devido à redução nos últimos anos do desmatamento na região amazônica. Sendo assim, inicialmente será avaliada se os valores de AOD e número de focos de queima foram modificados nos períodos que precedem e sucedem o ano de 2004. A escolha do ano deve-se que esse foi aquele que apresentou maior taxa de desmatamento detectado por satélite, e após esse ano observa-se uma diminuição sucessiva. Os dados de AOD serão provenientes da AERONET e do sensor MODIS. Importante ressaltar que serão utilizados dados de AOD da AERONET com horários próximos à passagem dos satélites Terra e Aqua (Tabela 4). Nas estações utilizadas neste trabalho (Alta Floresta, Abraços Hill, Ji-Paraná e Cuiabá-Miranda) o horário da passagem dos satélites Terra e Aqua é de aproximadamente 13:30 e 16:30 UTC, respectivamente (PAIXÃO, 2011).

A escolha de horários próximos permitirá verificar se as duas diferentes bases de dados de AOD produzem resultados semelhantes em termos de tendência.

Tabela 4. Sensores dos satélites e esquema operacional utilizados na inferência de perfis verticais no CPTEC/INPE.

Satélite de referência (polar)	Aqua	Terra
Sensor	MODIS	MODIS
Hora de Passagem (UTC)	5 e 17 UTC	2, 14 e 15 UTC
Local Antena de Recepção	Cuiabá – MT	Cuiabá – MT
Modelo de Inversão	IMAPPMODIS	IMAPPMODIS

Fonte: adaptado de Sigma CPTEC/INPE

A área de estudo está localizada entre 10° e 17°S de latitude e 50° a 60° oeste de longitude, totalizando uma área total de aproximadamente de  $1,52 \times 10^5$  km<sup>2</sup>. A escolha da área de estudo é baseada na localização dos sítios da AERONET utilizados neste trabalho.

Para cada uma das variáveis (focos de queima, AOD) será estimada a anomalia padronizada, a qual é definida como a diferença entre a variável e a média climatológica (2000 – 2015) dividida pelo desvio padrão da série para o mesmo período em questão. Os valores da anomalia padronizada podem ser positivos, indicando uma anomalia positiva, ou seja, superando a média climatológica, ou podem ainda ser negativos (anomalia negativa), indicando valores abaixo da média climatológica.

A fim de se verificar mudanças abruptas na série temporal e conferir as possíveis tendências de aumento e diminuição na AOD devido à mudança de sinal da taxa de desmatamento na Amazônia Legal, será aplicada na série de dados o teste de Pettitt. A hipótese associada a esta etapa do trabalho deve-se ao fato de que as queimadas atuais estão associadas a áreas agrícolas ao invés de florestas. Sendo assim, mudanças no material queimado podem influenciar no tipo de aerossol na atmosfera, e, consequentemente, em suas propriedades ópticas.

Em seguida, o teste sazonal de Mann-Kendall deverá ser utilizado para verificar a ocorrência de tendências estatisticamente significativas e o parâmetro *sen's slope* para verificar a magnitude das referidas tendências. Uma análise espacial da concentração média dos dados de AOD/MODIS será realizada com a finalidade de identificar as localidades de maior e menor concentração de aerossóis na área estudada. Também será verificada a distribuição espacial do parâmetro *sen's slope* para as tendências significativas encontradas. Para ambos os testes mencionados (Pettitt, SMK e Theil-

Sen) será utilizado neste estudo 95% de nível de confiança para a amostra de dados de AOD e índice de refração complexo referente à série temporal.

Também serão avaliadas possíveis alterações no índice de refração complexo do aerossol, proveniente da AERONET para cada uma das estações de AF, AH, JP e CB.

Inicialmente, serão selecionadas dados da referida propriedade óptica seguindo o controle de qualidade indicado por Dubovik et al., (2000). A Tabela 5 apresenta os critérios recomendados pelos autores a ser aplicado nos dados de aerossóis oriundos de queimadas.

Além disso, serão estimados os valores médios e os desvios padrões das partes real e imaginária do índice de refração complexo do aerossol. Os testes de Pettitt e de Mann-Kendall Sazonal também deverão ser aplicados para as partes real e imaginária, separadamente. Adicionalmente, o parâmetro *sen's slope* será utilizado para verificar a magnitude das tendências com significância estatística.

Tabela 5. Critérios de controle de qualidade dos dados da AERONET referentes às propriedades ópticas do aerossol.

Critério A	Coefficiente de Angstrom maior que 0.6 ( $\alpha > 0.6$ )
Critério B	Ângulo solar zenital maior que 45°
Critério C	Erros nos ajustes de radiância celestes menores que 5 – 7%
Critério D	Com $\tau_{440\text{ nm}} \geq 0.4$ para as inversões de $n(\lambda)$ , $k(\lambda)$ e $\omega_0(\lambda)$
Critério E	Simetria na radiância celeste em no mínimo 21 medidas de almucântar (ângulos de espalhamento)

Fonte: adaptado de Dubovik et al., (2000)



## 5 RESULTADOS

Resultados obtidos sobre a variabilidade temporal da AOD, dos focos de queimadas bem como o estudo da relação entre essas variáveis encontram-se na seção 5.1. Os resultados sobre a análise pontual e espacial da AOD e do índice de refração complexo do aerossol encontram-se na seção 5.2.

### 5.1 Estudo da variabilidade temporal da profundidade óptica do aerossol, dos focos de queimadas e da precipitação e suas possíveis relações

Conhecer a distribuição temporal da concentração de partículas de aerossóis na atmosfera é um dos fatores relevantes e primordiais para a caracterização de propriedades intrínsecas das partículas, tais como distribuição de tamanho, índice de refração complexo, fator de assimetria, entre outros. Neste contexto, um dos objetivos deste capítulo é efetuar um estudo observacional da abundância de material particulado na coluna atmosférica, sendo utilizado para tanto, a profundidade óptica do aerossol. Dados mensais de  $AOD_{550\text{ nm}}$  utilizados para a região estudada são provenientes do sensor MODIS a bordo do satélite Terra, o qual possui a vantagem em relação ao satélite Aqua de fornecer um maior detalhamento temporal de um determinado local. Outro objetivo deste capítulo é verificar a possível relação entre déficit de chuva durante a estação seca, queimadas e carga de aerossóis na atmosfera. Portanto, são utilizados adicionalmente à  $AOD_{550\text{ nm}}$ , dados mensais do número de focos de queimadas (NFQ) produzidos pelo CPTEC/INPE e dados de precipitação mensal acumulada proveniente do produto 3B43 do satélite TRMM, ambos para o mesmo período de estudo da  $AOD_{550\text{ nm}}$ . Para todas as variáveis (AOD, NFQ e precipitação), a análise é efetuada em termos das escalas sazonal e interanual. Distinto de outros trabalhos que buscam avaliar o impacto dos aerossóis na precipitação durante a estação chuvosa, este pretende avaliar a relação precipitação, atividades antrópicas e aerossóis durante o período de estação seca que antecede o pico das queimadas.

#### 5.1.1 Variabilidade sazonal e interanual de queimadas, aerossóis e precipitação

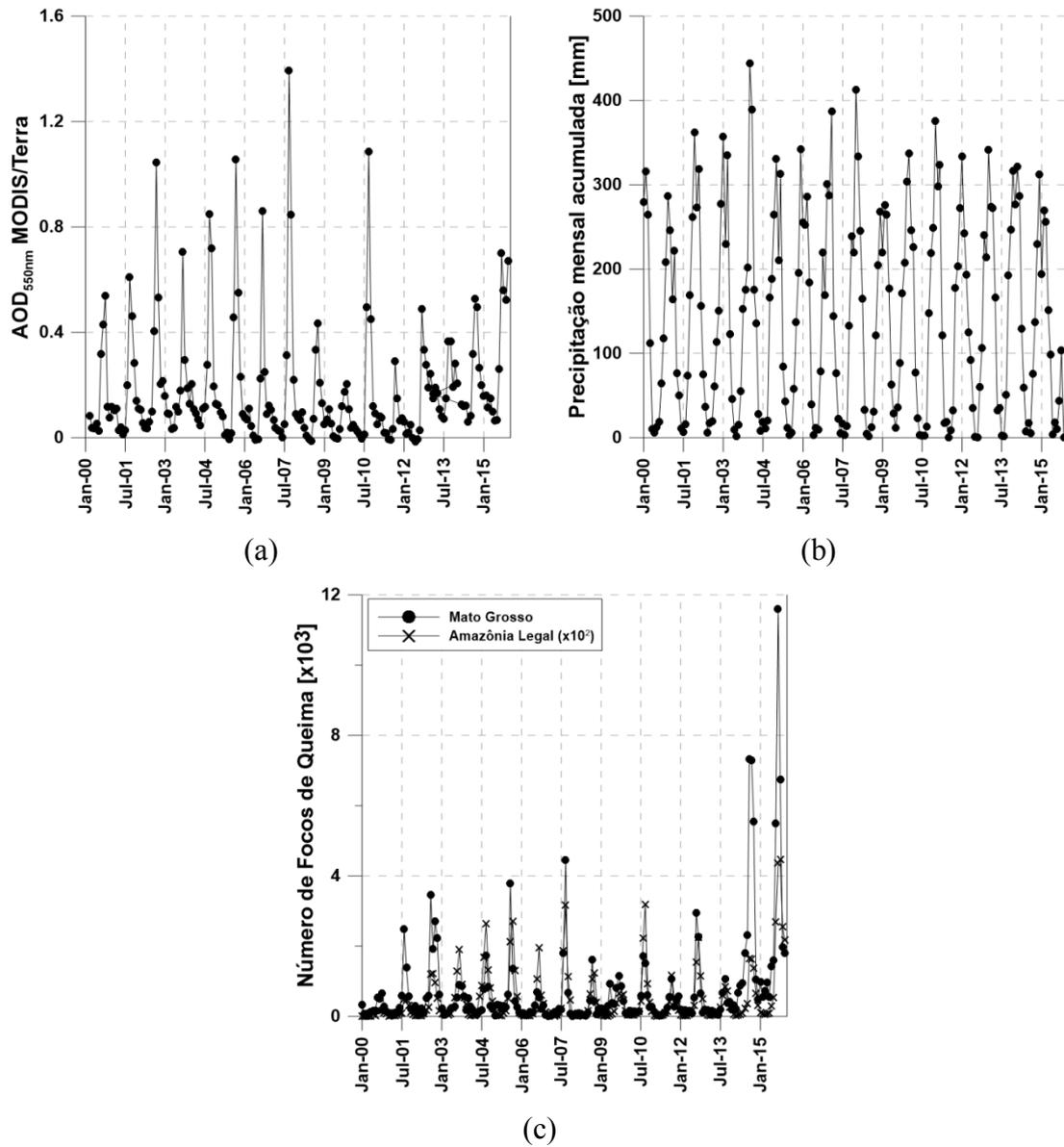
A Figura 11 mostra a variabilidade interanual de AOD, da precipitação e do número acumulado de focos de queimadas no período de Janeiro de 2000 a Dezembro de 2015. No geral, verificam-se altos valores mensais médios de AOD para os meses de Agosto a Outubro (Figura 11a). Climatologicamente, o valor de  $AOD_{550\text{ nm}}$  médio mensal inferido pelo satélite (Tabela 6) é inferior a  $0.10 \pm 0.03$  nos primeiros sete meses do ano (exceção

para o mês de Janeiro,  $AOD_{550\text{ nm}} = 0.11 \pm 0.03$ ), apresentando aumento em Agosto, atingindo pico de  $0.67 \pm 0.4$  em Setembro e diminuindo entre Outubro e Novembro, correspondendo ao período de transição da estação seca para a chuvosa. Os anos que apresentaram os maiores valores de  $AOD_{550\text{ nm}}$  em Setembro são: 2002 ( $AOD_{550\text{ nm}} = 1.03$ ), 2005 ( $AOD_{550\text{ nm}} = 1.05$ ), 2007 ( $AOD_{550\text{ nm}} = 1.4$ ) e 2010 ( $AOD_{550\text{ nm}} = 1.1$ ). Interessante verificar que os valores de  $AOD_{550\text{ nm}}$  são menores nos últimos cinco anos da série temporal (2011 a 2015) em relação ao início da mesma, o que será abordado em detalhes na seção 5.2.

A região possui um ciclo anual de chuva bem definido, com regime dividido por estação seca e úmida. Observações de satélite indicam precipitação média mensal superior a 200 mm no período de Novembro a Março e inferior a 50 mm nos meses compreendidos entre Maio e Setembro, com um acréscimo de 98 mm durante a transição da estação chuvosa em Outubro (Tabela 6). Estes valores obtidos via satélite estão coerentes com os dados observacionais de estações meteorológicas (REBOITA *et al.*, 2010).

Durante a estação seca, ocorre um aumento expressivo das atividades de queima (Figura 11c). O número de queimadas média mensal na Amazônia Legal no período de 2000 a 2015 (Tabela 6) é da ordem de  $10^3$  no primeiro trimestre e sobe para valores superiores a  $10^5$  em Agosto, Setembro e Outubro. No início da série temporal, o número de queimadas era inferior a  $5,0 \times 10^3$ , aumentando gradativamente nos anos subsequentes, atingindo valores de aproximadamente  $3,0 \times 10^5$  em 2007 (duas ordens de grandeza maior em relação ao início da série), diminuindo nos anos subsequentes, com exceção dos anos de 2010 e 2015 (Figura 11c). O estado do Mato Grosso também apresenta um aumento gradativo dos focos de queimadas, com um valor máximo em Agosto de 2007 ( $4.5 \times 10^3$ ), Setembro de 2014 ( $7.5 \times 10^3$ ) e Setembro de 2015 ( $11.0 \times 10^3$ ). No que diz respeito à AOD, observa-se um comportamento similar associado ao período de queimadas. Por outro lado, tendências na série temporal de precipitação não são evidentes.

Figura 11. Série temporal (2000 - 2015) da AOD<sub>550nm</sub>, precipitação mensal acumulada e número de focos de queima.



Série temporal (2000 - 2015) de: a) AOD<sub>550 nm</sub> mensal via sensor MODIS/Terra; b) Precipitação mensal acumulada em milímetros e c) Número de Focos de Queima (NFQ) para a Amazônia Legal e o estado do Mato Grosso.

Fonte: Produção do autor.

Tabela 6. Médias climatológicas (2000 – 2015) de precipitação e AOD para a região de estudo e número de focos de queima na Amazônia Legal obtidas por satélite.

Meses	Precipitação [mm]	AOD MODIS/Terra	Número de Focos de Queima
	TRMM	Adimensional	AVHRR/NOAA
Jan	310,2	0,109	4536,6
Fev	283,1	0,086	3031,6
Mar	247,7	0,080	4148,8
Abr	123,6	0,049	2986
Mai	43,4	0,032	6186,4
Jun	12,2	0,027	16848,6
Jul	8,93	0,034	32160,4
Ago	10,9	0,23	125235,8
Set	51,3	0,67	183498,8
Out	147,8	0,44	110823,6
Nov	209,3	0,20	57028,9
Dez	279,4	0,15	30965,4

Fonte: Produção do autor.

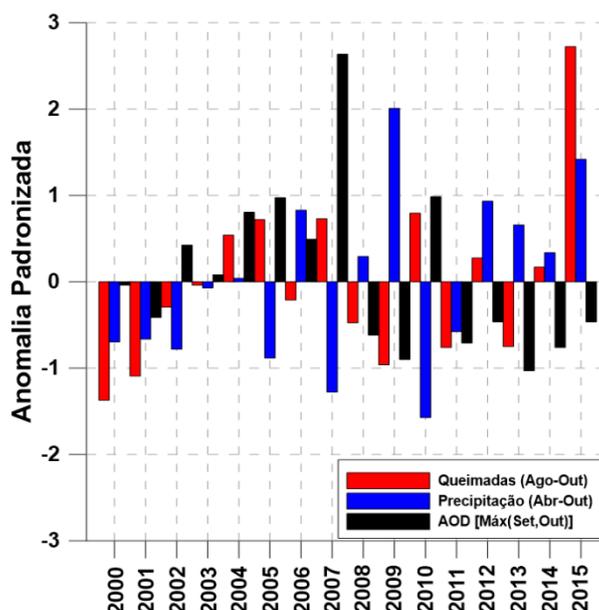
A Figura 12 mostra a variabilidade interanual da anomalia padronizada de AOD, do número de focos de queimadas e da precipitação acumulada. No caso da AOD, é utilizado o valor máximo da média mensal dos meses de Setembro e Outubro, quando ocorre o pico da concentração dos aerossóis na atmosfera. Para as queimadas é utilizada a soma dos meses de Agosto a Outubro, quando ocorre o maior número de focos de queimadas na região de estudo. Para a precipitação é usada a soma dos meses de Abril a Agosto, período que engloba desde o início da estação seca até a sua transição com a estação úmida. A chuva acumulada nestes meses é um dos fatores que determina a disponibilidade de água no solo e o estado da vegetação (COSTA; RODRIGUES, 2015), podendo impactar nas atividades de queimadas.

De acordo com dados do TRMM, os anos mais secos dos últimos 16 anos apresentados neste estudo são 2005, 2007 e 2010. Esses anos apresentaram anomalias negativas significativas de precipitação (i.e. anomalias acima de  $1 \sigma$ , em que  $\sigma$  é o desvio padrão da média climatológica) em uma área de  $12500 \text{ km}^2$  durante cinco meses (Abril a Agosto), indicando seca prolongada em uma ampla área. Os episódios ocorridos nos anos de 2005 e 2010 poderiam estar relacionados aos períodos de duas das mais intensas secas já registradas na Amazônia neste século (ALVES, L.; MARENGO; CAVALCANTI, I., F., 2013; LEWIS *et al.*, 2011). Pesquisadores afirmaram que, apesar de no caso geral as secas na Amazônia estarem associadas ao fenômeno El Niño, foi registrado um pequeno resfriamento do Pacífico Equatorial, além de valores de TSM acima do normal no Atlântico Tropical (ALVES, L.; MARENGO; CAVALCANTI, I., F., 2013). Estes fatores poderiam ter sido refletidos nas ocorrências das secas devido à influência da célula meridional, podendo parte ser explicada pela variabilidade natural do clima e outra, decorrente de ações humanas (ALVES, L.; MARENGO; CAVALCANTI, I., F., 2013). Entretanto, (LEWIS *et al.*, 2011) concluíram que a seca de 2010 foi ainda mais intensa do que a ocorrida em 2005, uma vez que esta abrangeu uma área maior podendo explicar, em partes, a forte anomalia padronizada negativa na Figura 12 ( $-1.5 \sigma$ ).

Altos valores de AOD inferidos pelo sensor MODIS indicam que 2005, 2007 e 2010 são caracterizados como os anos de maior concentração de aerossóis. Esses anos são marcados pela ocorrência do fenômeno La Niña, considerados, respectivamente, como fraco, forte e moderado (NOAA, 2015). O impacto do fenômeno La Niña acarreta diminuição das chuvas na região, e, conseqüentemente, reduz a umidade do solo, propiciando um ambiente com risco elevado para o fogo.

Em contraste, o ano de 2009 pode ser considerado, em relação à climatologia, o mais úmido e de menor concentração de aerossóis. A anomalia padronizada de precipitação para este ano é aproximadamente  $2.3 \sigma$ . Os valores de AOD inferiores a 0.2 no período de Agosto a Setembro de 2009 são similares aos valores climatológicos para o período chuvoso. Os anos de 2005, 2007, 2009 e 2010 são bons exemplos, porém de casos extremos, que ilustram o papel da variabilidade da precipitação na caracterização da carga de aerossóis na atmosfera.

Figura 12. Anomalia padronizada de queimadas, precipitação e AOD550 nm para o período de 2000 a 2015.



Anomalia padronizada de queimadas (Agosto a Outubro), de precipitação (Abril a Outubro) e AOD com pico máximo entre os meses de Setembro e Outubro para o estado do Mato Grosso de 2000 a 2015.

Fonte: Produção do autor.

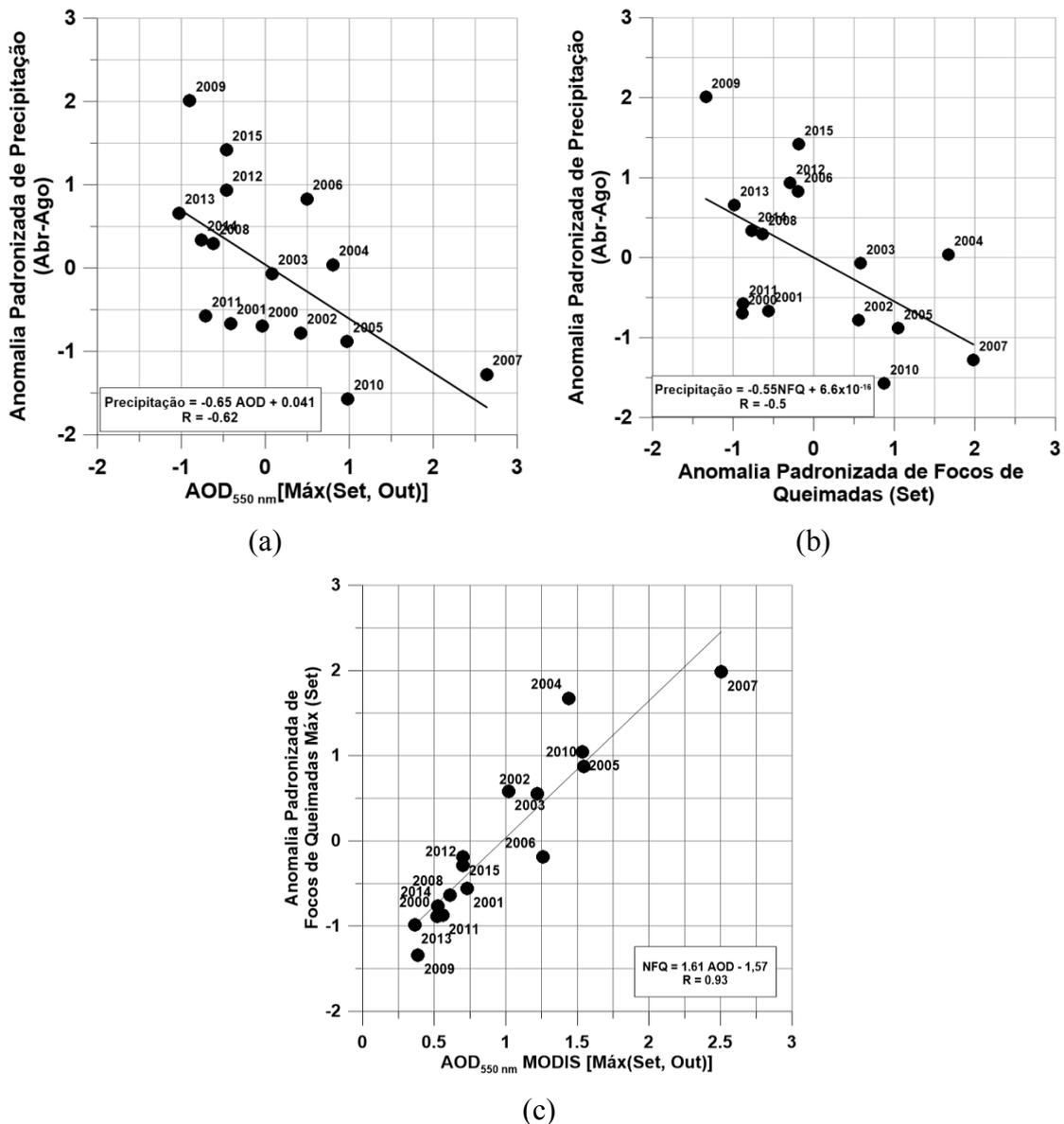
### 5.1.2 Análise da relação entre precipitação, queimadas e aerossóis

Esta subseção visa quantificar a relação entre AOD e precipitação acumulada, no período que antecede o pico das queimadas na região de estudo para o mês de Setembro, utilizando-se como ferramentas estatísticas a regressão linear e a correlação. Para tanto, é realizada uma avaliação observacional sobre a relação da precipitação no favorecimento das queimadas (já discutido na seção anterior) e, conseqüentemente, na presença de aerossóis na atmosfera.

A Figura 13 mostra os diagramas de dispersão relacionando as anomalias de precipitação padronizada com a AOD (Figura 13a) e as anomalias padronizadas de precipitação com os focos de queimadas (Figura 13b). Adicionalmente, a anomalia padronizada de queimadas é analisada em termos da AOD (Figura 13c). Verifica-se que a correlação entre anomalias de precipitação e queimadas é baixa ( $R = -0.5$ ), evidenciando que as queimadas não estão associadas apenas ao déficit de chuva, pois dependem de outros fatores não climáticos, tais como socioeconômicos.

No entanto, a profundidade óptica do aerossol aumenta monotonicamente com a diminuição da anomalia padronizada de precipitação, apresentando um coeficiente de correlação negativo de 0,62, o que indica uma relação linear inversa entre a variabilidade do aerossol e a precipitação. Déficits de precipitação desde o início da estação seca em Abril provocam a diminuição de umidade do solo, e, conseqüentemente, a superfície tem maior vulnerabilidade e risco de fogo. Entretanto, é observado que a AOD aumenta monotonicamente com a anomalia padronizada de queimadas, apresentando forte correlação ( $R = 0,93$ ; Figura 13c). Esta relação é esperada, uma vez que as queimadas injetam maior quantidade de material particulado na atmosfera.

Figura 13. Diagramas de dispersão e coeficiente de correlação.



Diagramas de dispersão da anomalia padronizada de precipitação acumulada no período de Abril a Agosto em relação a (a)  $AOD_{550\text{ nm}}$  e (b) Anomalia Padronizada de focos de queimadas em Agosto. (c) Diagrama de dispersão da anomalia padronizada de focos de queimadas em Setembro e  $AOD_{550\text{ nm}}$ . Para cada diagrama de dispersão, é indicado o coeficiente de correlação (R) e a equação da reta entre as variáveis analisadas.

Fonte: Produção do autor.

## 5.2 Análise pontual e espacial da AOD e índice de refração complexo

Durante a análise da variabilidade temporal das variáveis apresentadas no capítulo anterior, nota-se que a profundidade óptica do aerossol destaca-se por apresentar uma

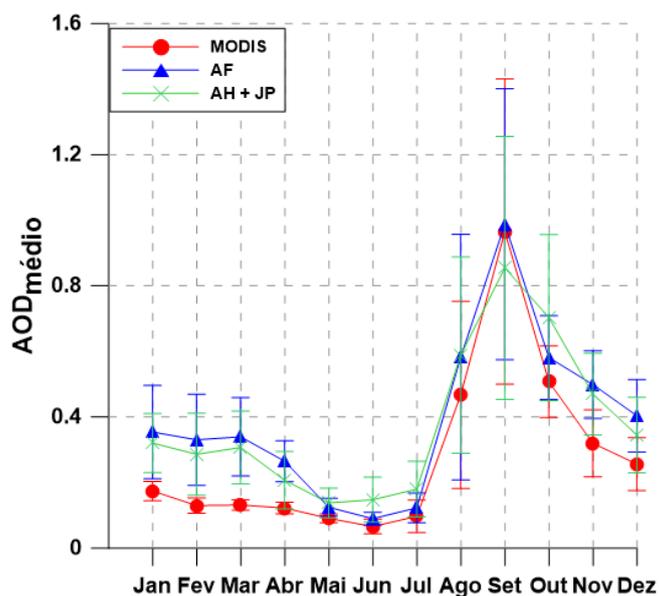
tendência de aumento em sua concentração para o período que antecede o ano de 2007 e, em seguida, é observada uma tendência de diminuição do mesmo (Figura 12). Nesta subseção, avaliar a possível alteração das propriedades ópticas do aerossol provenientes de queimadas na região estudada para os períodos que precedem e sucedem o ano pico da concentração de aerossóis (2007). Para isso, é necessário analisar se a tendência da AOD observada é significativa estatisticamente em toda a área de estudo. Isto é realizado utilizando-se os seguintes testes de hipótese estatísticos não paramétricos: Teste de Pettitt e teste Sazonal de Mann-Kendall. Adicionalmente, é utilizado o parâmetro de *sen's slope* como indicador da magnitude da tendência.

O estudo destas possíveis tendências é realizado não somente para os dados de AOD via sensor MODIS, mas também localmente, por meio de dados de AOD<sub>500 nm</sub> da AERONET. Além disso, no intuito de analisar se estas possíveis mudanças podem estar associadas a modificações no tipo de aerossol, o índice de refração complexo também é explorado.

### **5.2.1 AOD via sensor MODIS e AOD via AERONET**

A Figura 14 representa o comportamento temporal médio mensal de AOD para o sensor MODIS/Terra e as estações de Alta Floresta, Ji-Paraná e Abraços Hill da AERONET, que são estações localizadas no Arco do Desflorestamento. A análise é efetuada de Janeiro de 2000 a Dezembro de 2015 para o mesmo horário de passagem do satélite Terra (10h30, hora local). Nota-se que os dados do MODIS e da AERONET apresentam comportamento similar, com valor de pico máximo de AOD em aproximadamente uma unidade para o mês de Setembro. Observa-se que os valores médios de AOD referentes à curva do sensor MODIS apresentam-se mais baixos em comparação aos valores médios da AERONET e a diferença entre estes se apresenta menor do que o desvio padrão associado. A diferença nos valores médios de AOD podem estar associados à incerteza em relação à refletância da superfície do sensor MODIS para derivações de AOD sobre continentes, ocasionando erros. Kaufman et al., (1997) estimou que o erro de AOD na faixa espectral do visível é de  $\Delta\tau = \pm 0,05 \pm 0,20\tau$  e comparou com produtos de aerossóis da AERONET, constatando que 71% das derivações de AOD do MODIS na faixa espectral do visível se encontram dentro do limite de erro esperado.

Figura 14. Série temporal das médias mensais de AOD para o sensor MODIS e estações da AERONET estudadas.



Série temporal das médias mensais de AOD para o sensor MODIS numa área compreendida entre [50° a 60°W] de longitude e [10° a 17°S] de latitude e estações da AERONET estudadas de Alta Floresta (AF), Abraços Hill (AH) e Ji-Paraná (JP).

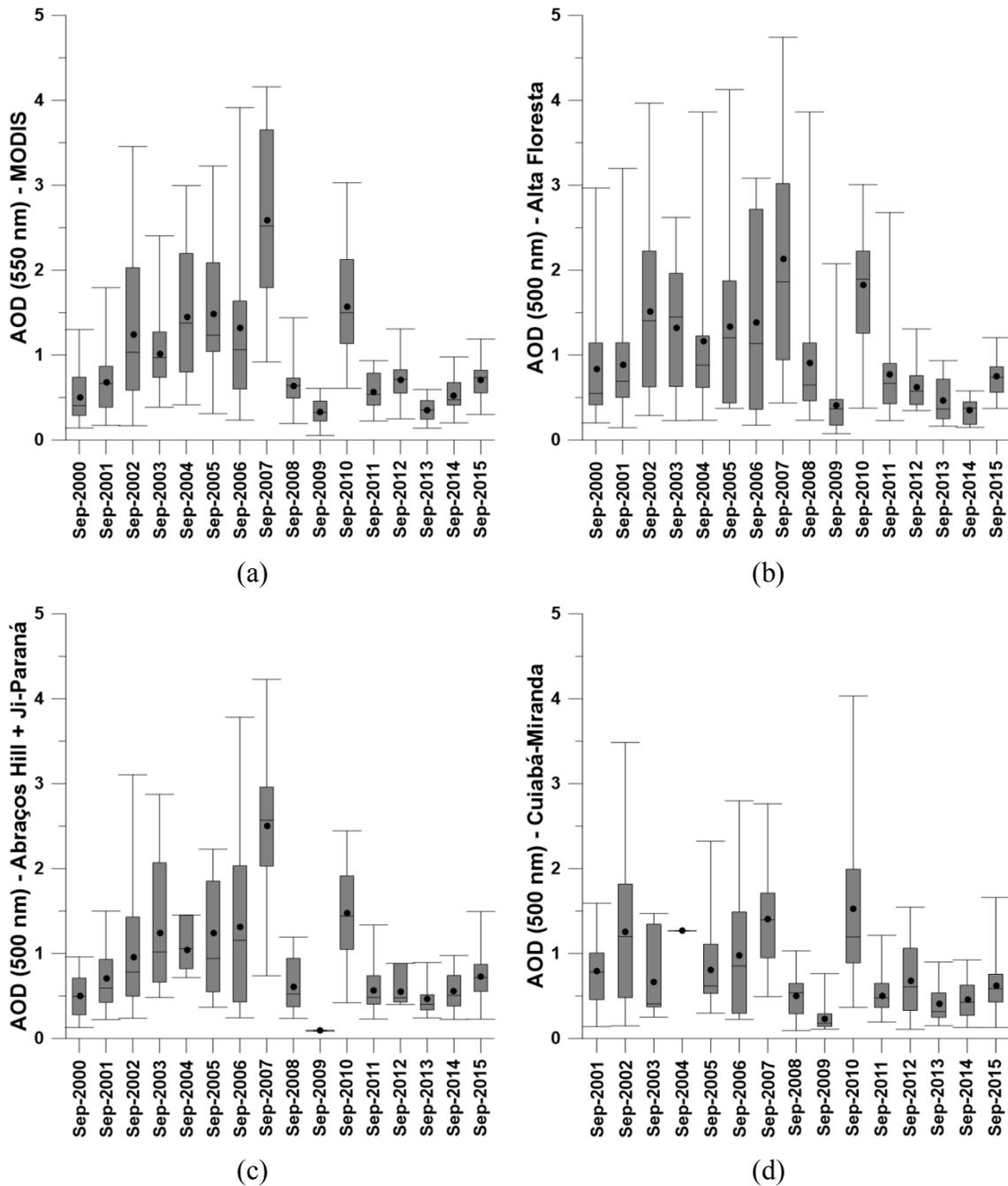
Fonte: Produção do autor.

É incluída no estudo da AOD, a estação de Cuiabá-Miranda no estado do Mato Grosso (15°00'S, 56°00'W) da AERONET. Esta estação está localizada em uma região tipicamente de cerrado onde é caracterizada por partículas de aerossóis que são ocasionalmente geradas por queimadas locais, além de partículas provenientes do transporte de longas distâncias, geradas de queimadas da região do Arco do Desflorestamento, onde se encontra a estação de Alta Floresta, Ji-Paraná e Abraços Hill. O aerossol proveniente da queima de biomassa encontrado nessa região é caracterizado pelo denominado 'envelhecimento', o qual suas propriedades correspondem a um aerossol típico de um período posterior a alguns dias de transporte (PAIXÃO, 2011).

Na Figura 15 são apresentados os *boxplots* (diagramas de caixa) para a AOD<sub>550 nm</sub> MODIS/Terra (Figura 15a) e AOD<sub>500 nm</sub> para as estações de Alta Floresta (Figura 15b), Abraços Hill juntamente com Ji-Paraná (Figura 15c) e Cuiabá-Miranda (Figura 15d) para o mês de Setembro no intuito de avaliar a distribuição empírica dos dados. É observado que a média (representada pelo ponto preto na caixa) aproxima-se mais da

mediana (representada pelo traço contínuo na caixa) para os dados de AOD em 550 nm via sensor MODIS do que para os dados de AOD em 500 nm da AERONET.

Figura 15. Boxplot dos dados de AOD filtrados por UTC referente ao mês de Setembro para as estações da AERONET estudadas.



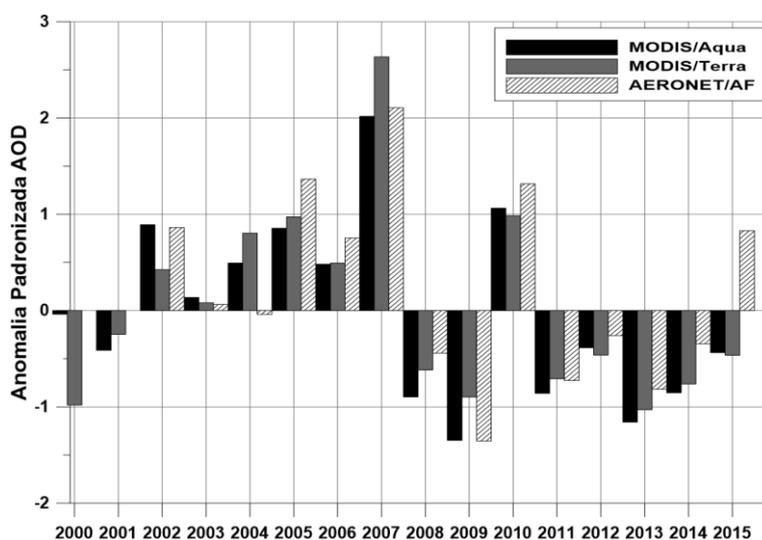
Boxplot dos dados de AOD filtrados por UTC referente ao mês de Setembro para: (a) AOD500 nm para a estação de Alta Floresta de 2000 a 2015. (b) AOD550 nm para o quadrado compreendido entre [56° a 62°S] de latitude e [9° a 11°S] de longitude via sensor MODIS/Terra referente ao mês de Setembro de 2000 a 2015. (c) AOD500 nm

para a estação de Abraços Hill (2000 a 2005) e Ji-Paraná (2006 a 2015). (d) AOD<sub>500</sub> nm para a estação de Cuiabá-Miranda (2001 a 2015).

Fonte: Produção do autor.

Na Figura 16 é apresentada a anomalia padronizada referente aos dados de AOD<sub>550</sub> nm mensais via sensor MODIS/Terra e MODIS/Aqua, os quais combinados permitem uma maior cobertura temporal e espacial, respectivamente. Além disso, dados de anomalia padronizada referente à AOD<sub>500</sub> nm mensal para a estação de Alta Floresta via AERONET para o período de 2000 a 2015 também são apresentados em relação ao mês de Setembro, considerado como o de maior concentração de aerossóis na atmosfera (Figura 14) e de maior número de focos de queimadas registrados por satélite. É observado o mesmo comportamento de tendências de aumento para o período que precede o ano de 2007 e de diminuição para os anos seguintes a este, com exceção ao ano de 2010. Este é um resultado importante, pois as bases de dados de AOD são provenientes de diferentes tipos de instrumentos de medição, ainda assim os resultados convergem e reproduzem o mesmo sinal em termos de tendência.

Figura 16. Comparação das anomalias padronizadas dos dados de AOD<sub>500</sub> nm da AERONET e via sensor MODIS/Terra e Aqua.

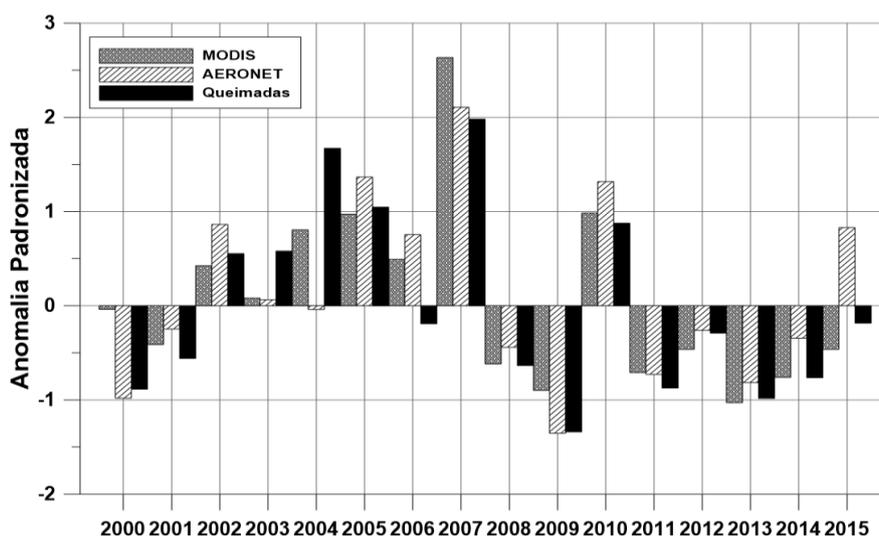


Comparação das anomalias padronizadas dos dados de AOD<sub>500</sub> nm da AERONET para a estação de Alta Floresta e AOD<sub>550</sub> nm via sensor MODIS/Terra e MODIS/Aqua para o período de 2000 a 2015 durante o mês de Setembro.

Fonte: Produção do autor.

É realizada ainda, na Figura 17, a comparação entre as anomalias padronizadas de AOD<sub>550 nm</sub> via sensor MODIS/Terra, AOD<sub>500 nm</sub> via AERONET para Alta Floresta e número de focos de queimadas (NFQ) para o mês de Setembro. Observa-se que ambos apresentam o mesmo padrão de comportamento da AOD em termos de tendência.

Figura 17. Anomalias Padronizadas de AOD via sensor MODIS, AERONET e número de focos de queimadas.

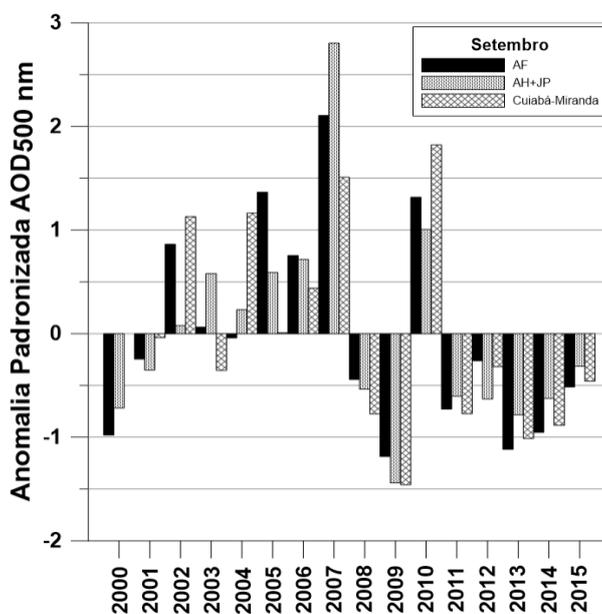


Anomalias Padronizadas de AOD via sensor MODIS/Terra e AERONET e Anomalia Padronizada de Queimadas.

Fonte: Produção do autor.

Uma comparação entre as anomalias padronizadas somente para as estações estudadas da AERONET é apresentada na Figura 18. Pequenas variações foram constatadas entre uma estação e outra, entretanto, estas seguem o mesmo padrão no comportamento temporal. Considerando que AOD é uma propriedade óptica, alterações em sua magnitude podem ser devido a mudanças na concentração do aerossol na atmosfera ou ainda na sua composição química e distribuição de tamanho. Mudanças no comportamento temporal de AOD podem estar associadas às modificações na emissão do aerossol de queimadas para atmosfera, relacionada às alterações no manuseio do solo nessa região.

Figura 18. Anomalia Padronizada de AOD em 500 nm para os sítios da AERONET estudados.



Anomalia Padronizada de AOD em 500 nm para os sítios da AERONET de: (i) Alta Floresta (2000 a 2015), (ii) Abraços Hill + Ji-Paraná (2000 a 2015) e (iii) Cuiabá-Miranda (2001 a 2015) referente ao mês de Setembro.

Fonte: Produção do autor.

Essa hipótese é evidenciada na Figura 1, apresentada na seção 1.1, a qual mostra a variação temporal das taxas de desmatamento (TD) na Amazônia Legal e Mato Grosso (MT). Observa-se que a TD na Amazônia Legal tem um pico de aproximadamente  $3.10^4$  km<sup>2</sup>/ano em 2004, e diminui em anos posteriores, sendo 6 vezes menor ( $5.10^3$  km<sup>2</sup>/ano) em 2012. Por outro lado, apesar do desmatamento diminuir no estado do Mato Grosso, a área plantada vem aumentando (Figura 3, seção 1.1). A redução do desmatamento na região pode explicar parte das mudanças na AOD.

Segundo Artaxo et al., (1998) as partículas de aerossóis na região Amazônica são uma combinação de diferentes processos de queima de vegetação, como cerrado, áreas de pastagem e florestas primária e secundária. Portanto, mudanças na AOD também podem ser associadas a menor contribuição do material queimado de áreas de florestas.

### 5.2.2 Testes de hipótese para a AOD

Apesar dos resultados de anomalia padronizada da AOD indicarem o ano de 2007 como o provável ano de transição entre as possíveis tendências de aumento e diminuição nos dados analisados, utilizou-se o teste de Pettitt com a finalidade de se constatar esta

hipótese estatisticamente. Este teste identifica o ponto de mudança na série temporal e possui algumas vantagens (descritas na fundamentação teórica). Sendo assim, este foi aplicado para os meses de estação seca (Agosto, Setembro e Outubro) para 95% de nível de significância ( $p_{\text{valor}} \leq 0.05$ ).

Resultados apontaram o ano de 2007 para os referidos meses como significativos estatisticamente. Logo, para a verificação de existência das tendências de aumento e diminuição nos dados de AOD (que é abordado no teste de Mann-Kendall Sazonal), foi dividida a série temporal em dois períodos (2000 a 2007 e 2007 a 2015).

A Tabela 7 apresenta os resultados do teste não paramétrico Sazonal de Mann-Kendall e o parâmetro de *Sen's Slope*, os quais foram realizados com 95% de confiança nos dados. Os resultados encontrados nesta tabela fazem referência à estação de Alta Floresta para valores de AOD<sub>500 nm</sub> dos meses de estação seca de Agosto, Setembro e Outubro (representado no texto por suas iniciais, ASO). São destacados na tabela apenas os períodos que obtiveram significância estatística, ou seja,  $p_{\text{valor}} \leq 0,05$ .

O teste aponta a existência de tendências significativas de aumento (+0,17) para o período de 2000 a 2007 durante o mês de Setembro e de diminuição (-0,06) de 2007 a 2015. Estes resultados confirmam estatisticamente as tendências significativas observadas através da anomalia padronizada da AOD analisada na seção 5.2.1, as quais apontavam anteriormente, apenas o indício de possíveis tendências de aumento para o período pré-pico da TD e de diminuição para o período pós-pico de TD.

Tabela 7. Períodos significativos estatisticamente obtidos pelo teste não paramétrico de Mann-Kendall Sazonal e parâmetro de Sen's Slope para dados de AOD500nm para a estação de Alta Floresta.

Período	Mês	Sen's Slope
2000 – 2007	S	+0,17
2007 – 2015	ASO	-0,06
2000 – 2015	ASO	-0,04

Fonte: Produção do autor.

Para os dados de AOD<sub>550 nm</sub> MODIS/Aqua para o *pixel* mais próximo de Alta Floresta, centrada no ponto de grade, os resultados do Teste SMK para os dados de AOD estão indicados na Tabela 8. O teste indica a mesma tendência significativa de diminuição na AOD<sub>550nm</sub> (-0,04) para o trimestre ASO que foi observada para a AOD<sub>500nm</sub> (Tabela 7).

Entretanto, a tendência significativa de aumento de AOD<sub>550nm</sub> (2002 a 2007) ocorre para o mês de Outubro (+0,11).

Tabela 8. Períodos significativos estatisticamente obtidos pelo teste não paramétrico de Mann-Kendall Sazonal e parâmetro de Sen's Slope para dados de AOD<sub>550nm</sub> MODIS/Aqua para o pixel mais próximo da estação de Alta Floresta, centrado no ponto de grade.

Período	Mês	Sen's Slope
2002 – 2007	O	+0,11
2007 – 2015	ASO	-0,04
2002 – 2015	ASO	-0,04

Fonte: Produção do autor.

### 5.2.3 Índice de refração complexo via AERONET

Um cálculo da média e do desvio padrão das partes real e imaginária do índice de refração complexo foi realizado para as estações da AERONET consideradas. Uma tabela completa destes cálculos encontra-se no Apêndice A. Os resultados apresentados nas Tabelas Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11 são para o comprimento de onda de 440 nm. Valores correspondentes encontrados na literatura são apresentados na Tabela 11.

A média atualizada das estações (AF, AH e JP) encontrada neste estudo foi de  $1,47 - 0,010i$  e de  $1,48 - 0,010i$ , respectivamente. Estes são resultados similares aos valores encontrados na literatura.

Tabela 9. Valores médios e seus respectivos desvios padrões para as partes real e imaginária para as estações de: Alta Floresta (AF), Abraços Hill (AH), Ji-Paraná (JP) e Cuiabá-Miranda (CB).

Índice de Refração Complexo (440 nm)	Estação AERONET			
	AF (2000-2015)	AH (2000-2005)	JP (2006-2015)	CB (2001 a 2015)
Parte Real n(440nm)	$1,47 \pm 0,054$	$1,48 \pm 0,044$	$1,48 \pm 0,047$	$1,45 \pm 0,022$
Parte Imaginária k (440nm)	$0,011 \pm 0,005$	$0,010 \pm 0,005$	$0,010 \pm 0,004$	$0,022 \pm 0,014$

Fonte: Produção do autor.

Tabela 10. Índice de refração complexo ( $m_{440\text{nm}}$ ) médio encontrado para as estações da AERONET de Alta Floresta (AF), Abraços Hill (AH), Ji-Paraná (JP) e Cuiabá-Miranda (CB) para os seus respectivos períodos de dados.

Estação AERONET	$m_{440\text{nm}} = n_{440\text{nm}} - ik_{440\text{nm}}$
AF (2000-2015)	$m=1,47 - 0,011i$
AH (2000-2005)	$m=1,48 - 0,010i$
JP (2006-2015)	$m=1,48 - 0,010i$
CB (2001 a 2015)	$m = 1.45 - 0.022i$

Fonte: Produção do autor.

Tabela 11. Índice de refração complexo ( $m_{440\text{nm}}$ ) médio encontrado na literatura referente a outros autores.

Dubovik et al. (2002)	$m=1,47 - 0,00093i$ (na floresta amazônica) $m=1,52 - 0,015i$ (no cerrado brasileiro)
Remer et al. (1998)	$m=1,43 - 0,0035i$
Procópio et al. (2003)	$m=1,50 - 0,012i$

Fonte: Adaptado de Procópio et al., 2003.

O valor médio (2001 – 2015) para o índice de refração complexo em 440 nm encontrado para Cuiabá-Miranda foi de  $m = 1.45 - 0.022i$ , em comparação ao valor obtido por Dubovik et al., (2002) na região do cerrado [ $m = 1.52 - 0.015i$ ]. Entretanto, ao dividir a série em dois períodos (2001 – 2004) e (2005 – 2015), estes valores diferem com certa significância (Tabela 12).

Tabela 12. Valor médio do índice de refração complexo para Cuiabá (MT) nos períodos de 2001 a 2004 e de 2005 a 2015.

2001 – 2004	$m = 1.47 - 0.031i$
2005 – 2015	$m = 1.44 - 0.017i$

Fonte: Produção do autor.

Observa-se uma diminuição significativa na parte imaginária ( $k$ ) do índice de refração complexo para o período de 2005 a 2015 em comparação ao período precedente (2001 a 2004), decaindo para quase a metade do valor. Entretanto, apenas uma pequena diminuição na parte real ( $n$ ) foi constatada.

As queimadas ocorridas na região de cerrado são caracterizadas pela combustão na fase *flaming*, a qual é dominante em função do baixo teor de umidade para este tipo de

vegetação, o que propicia a produção de aerossóis com alto teor do chamado *black carbon* (DO ROSÁRIO, 2011). Consequentemente, são esperados para esta região, valores mais elevados para  $k$ , ou seja, um aerossol tipicamente mais absorvedor. Isso é constatado ao compararmos com o valor encontrado para a estação de Alta Floresta para o período de 2000 a 2015 ( $m = 1.47 - 0.011i$ ).

Entretanto, estudos adicionais afirmam que Cuiabá também apresenta valores de  $k$  característicos da pluma de aerossóis produzida pelas queimadas localizadas na porção sul da bacia amazônica, ocasionando uma mistura de aerossóis resultantes dessa pluma (proveniente do sul da bacia amazônica) e de aerossóis ocasionados por queimadas locais, o que torna complexa a caracterização do índice de refração para esta localidade. Logo, as inversões da AERONET para o índice de refração complexo são resultado de uma mistura de dois tipos de aerossóis distintos, dependendo, portanto, da proporção em que esses dois tipos de aerossóis encontram-se misturados (DO ROSÁRIO, NILTON MANUEL ÉVORA, 2011).

#### **5.2.4 Testes de hipótese para o índice de refração complexo**

O teste de Pettitt também foi aplicado para o índice de refração complexo (440 nm) em ambas as partes real e imaginária, para os meses de estação seca (Agosto, Setembro e Outubro) com 95% de nível de significância ( $p_{\text{valor}} \leq 0.05$ ). Entretanto, não foi verificada nenhuma mudança significativa na série de dados que permitisse dividir a série temporal para os períodos de prováveis tendências de aumento e diminuição dos dados de índice de refração, assim como foi realizado para a AOD. Logo, o teste de Mann-Kendall Sazonal foi aplicado para todo o período de 2000 a 2015 (no caso das estações de Alta Floresta e Ji-Paraná juntamente com Abraços Hill) e de 2001 a 2015 para a estação de Cuiabá-Miranda.

Nas Tabelas 13, 14 e 15 são indicadas apenas as séries temporais que obtiveram tendências significativas estatisticamente através do teste SMK e suas respectivas magnitudes por meio do parâmetro de *Sen's Slope* para o trimestre analisado em questão. Resultados demonstraram que para a estação de Alta Floresta (Tabela 13) somente a parte real do índice de refração complexo apresentou tendência de diminuição significativa (-0,0013), distinto das demais estações da AERONET analisadas. As estações de Ji-Paraná e Abraços Hill (Tabela 14) apresentaram tendências significativas de diminuição de mesma magnitude (-0,002) para ambas as

partes do índice de refração complexo. Em compensação, Cuiabá-Miranda (Tabela 15) indicou valor do *Sen's Slope* para a parte real igual a -0,018, cerca de uma ordem de grandeza acima do referido parâmetro para a parte imaginária (-0,0009).

Tabela 13. Índice de refração complexo para as partes real (n) e imaginária (k) em 440 nm para a estação de Alta Floresta.

n (440 nm)	Mês	Sen's Slope
2000 – 2015	ASO	-0,0013

Fonte: Produção do autor.

Tabela 14. Índice de refração complexo para as partes real (n) e imaginária (k) em 440 nm para as estações de Ji-Paraná e Abraços Hill.

n (440 nm)	Mês	Sen's Slope
2000 – 2015	ASO	-0,00022
k (440 nm)	Mês	Sen's Slope
2000 – 2015	ASO	-0,0002

Fonte: Produção do autor.

Tabela 15. Índice de refração complexo para as partes real (n) e imaginária (k) em 440 nm para a estação de Cuiabá-Miranda.

n (440 nm)	Mês	Sen's Slope
2001 – 2015	ASO	-0,0018
k (440 nm)	Mês	Sen's Slope
2001 – 2015	ASO	-0,0009

Fonte: Produção do autor.

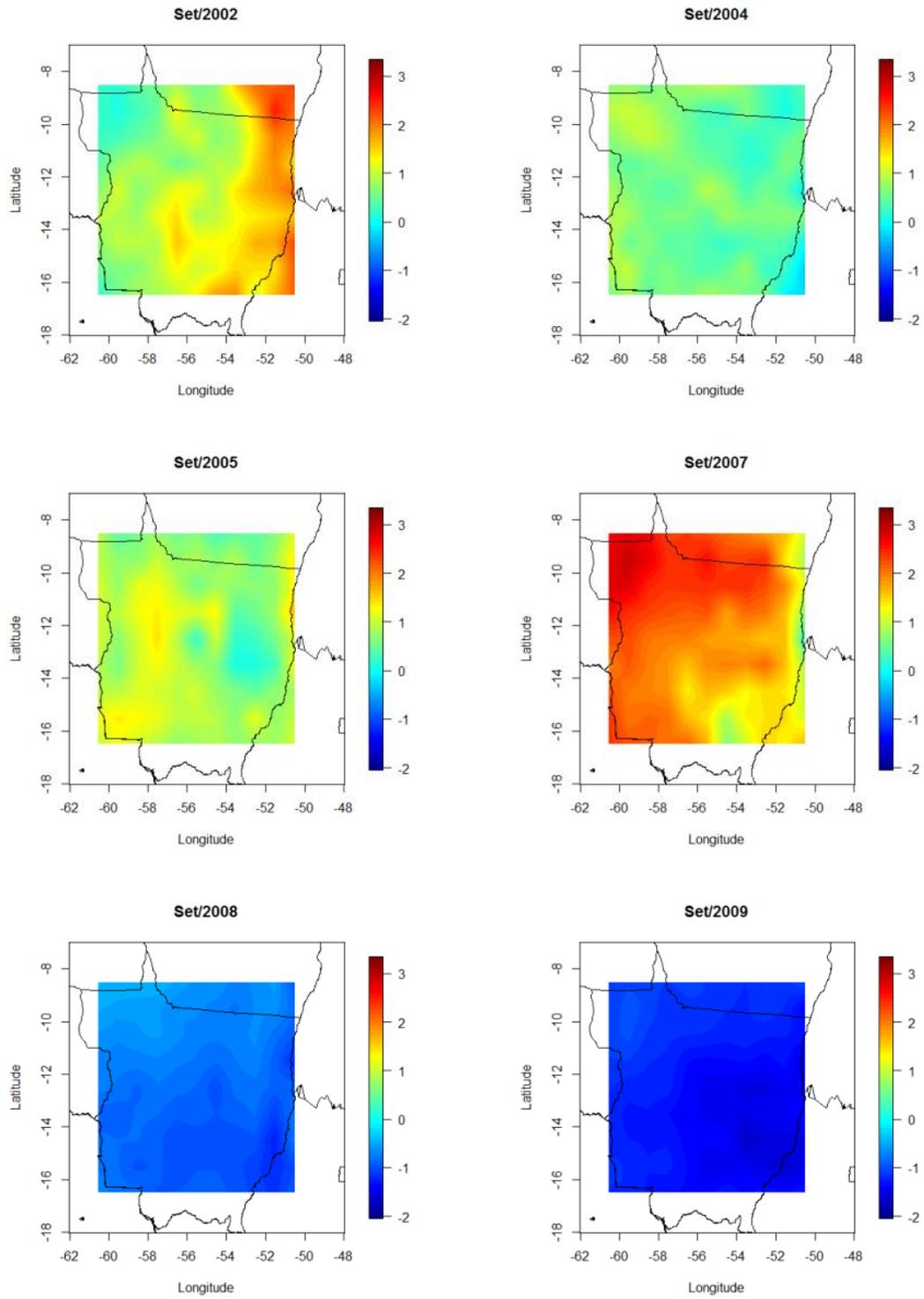
### 5.2.5 Análise espacial

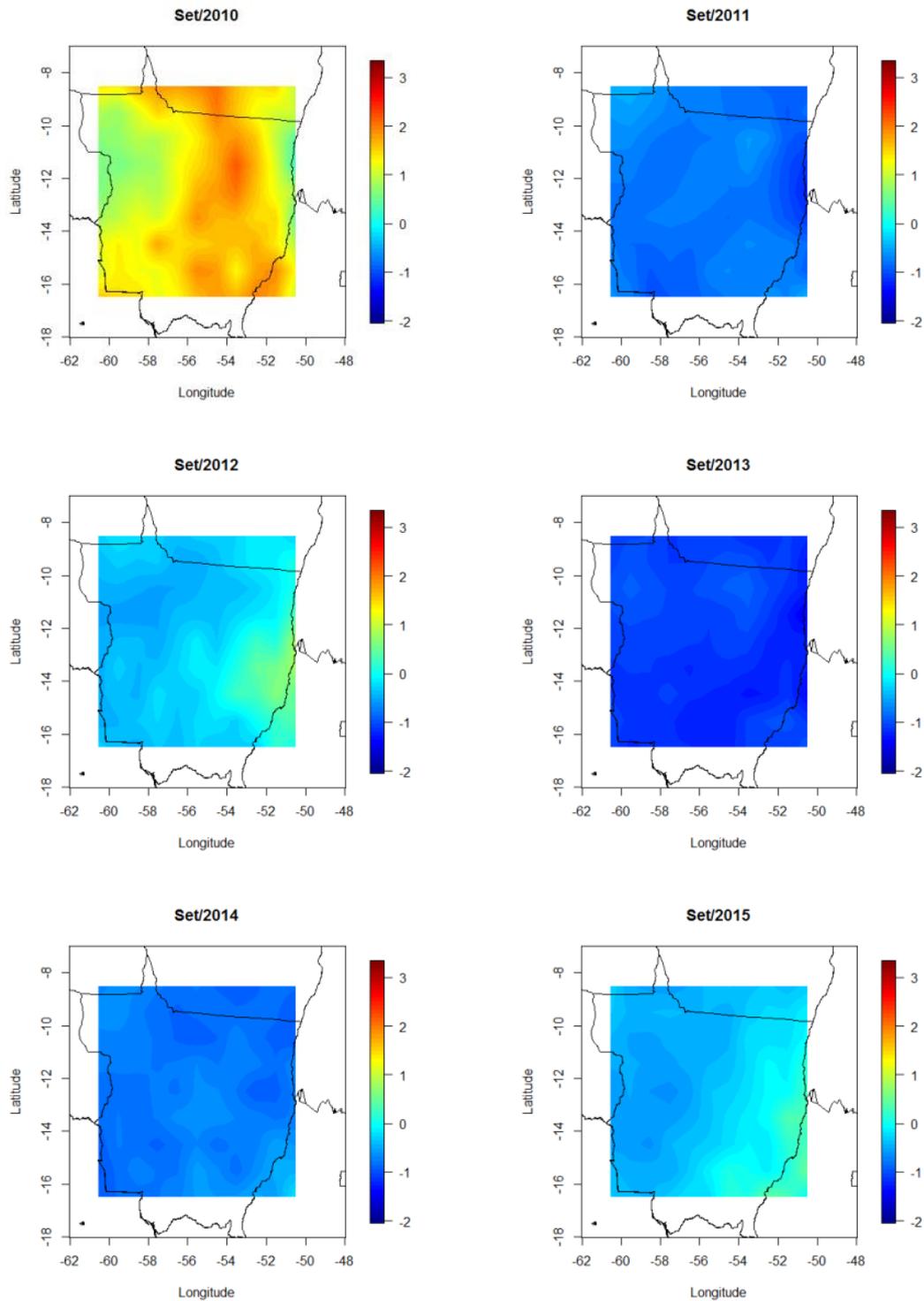
A Figura 19 apresenta a anomalia padronizada da AOD via sensor MODIS para cada ponto de grade ocupando o estado do Mato Grosso praticamente em sua totalidade e algumas áreas vizinhas para o mês pico de Setembro nos anos de 2002, 2004, 2005 e 2007 a 2015. Esta figura permite localizar espacialmente as áreas que apresentaram maior concentração de aerossóis na região analisada. O ano de 2002 apresenta maior anomalia na porção leste do estado, enquanto no ano de 2004 apresenta uma anomalia positiva mais distribuída espacialmente, porém com uma concentração mais elevada em sua porção noroeste. A anomalia positiva ocorrida durante o ano de 2005 concentra-se na parte oeste do MT, embora valores mais elevados sejam observados para o ano de

2007, em praticamente todo o MT. O ano de 2009, caracterizado como de pouca emissão de aerossóis apresenta uma anomalia fortemente negativa concentrada na porção sudeste do estado. O ano de 2010, com o segundo maior pico de aerossóis da série analisada para o período posterior a 2004, apresenta uma anomalia positiva estendida numa faixa de norte a sul do MT e menores valores de anomalia concentrados mais a noroeste, na divisa com o estado vizinho (Rondônia) e uma pequena parte na porção leste, na divisa com Tocantins.

Observa-se num geral, que estes mapas de anomalias padronizadas são condizentes com os valores das anomalias padronizadas da análise pontual e que a tendência de diminuição de AOD ocorre para praticamente toda a área de estudo na maioria dos anos subsequentes a 2005, exceto para os anos já mencionados anteriormente. Os mapas de anomalia padronizada de  $AOD_{550\text{ nm}}$  para os meses de Agosto, Setembro e Outubro para todos os anos da série analisada encontra-se no Apêndice B. Mapas da anomalia padronizada da para toda a América do Sul  $AOD_{550\text{ nm}}$  para os meses de Agosto, Setembro e Outubro podem ser verificados no Apêndice C.

Figura 19. Mapas da anomalia padronizada de AOD550 nm via MODIS.





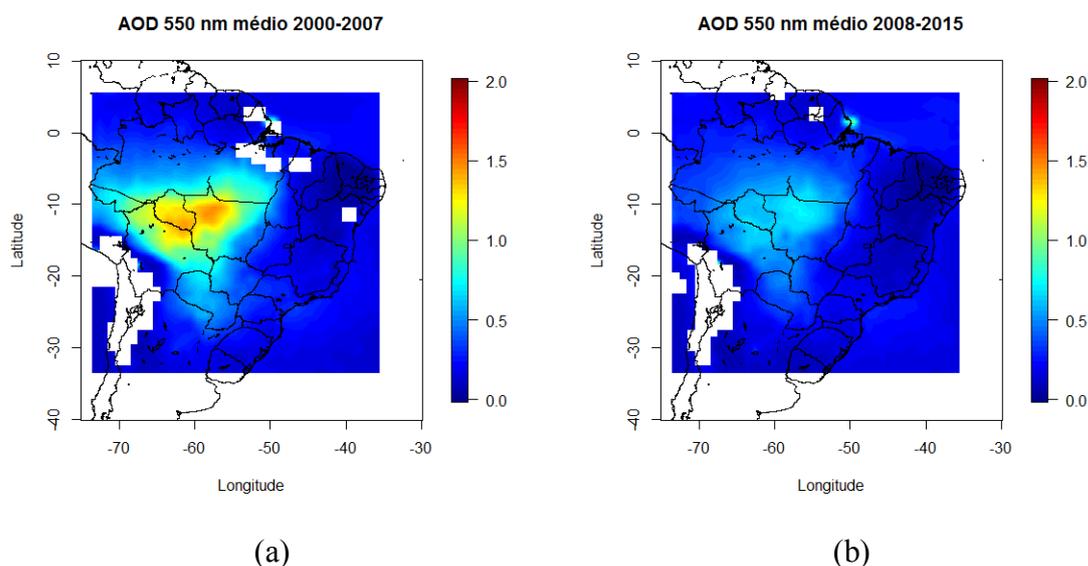
Mapas da anomalia padronizada de AOD550 nm via MODIS/Terra durante o mês de Setembro para os anos de 2002, 2004, 2005 e 2007 a 2015 para a área destacada.

Fonte: Produção do autor.

A análise para uma área de estudo maior, compreendendo um quadrado de [33°S a 5°N] de latitude e [34° a 73°W] de longitude ilustra se realmente a região de análise deste

estudo apresenta a maior concentração de aerossóis. Tem-se, na Figura 20, o mapa de valores médios de  $AOD_{550\text{ nm}}$  para dois períodos distintos abrangendo o território brasileiro: 2000 a 2007 (Figura 20a) e 2008 a 2015 (Figura 20b). Em ambas as figuras ficam evidentes, espacialmente, as tendências de aumento (Figura 20a) e diminuição (Figura 20b) da concentração média de AOD. Nota-se que a maior concentração média de AOD situa-se na área de estudo indicada na Figura 10 e em regiões vizinhas, como o estado de Rondônia e a Bolívia.

Figura 20. Mapa de concentração média de  $AOD_{550\text{ nm}}$  para o Brasil.

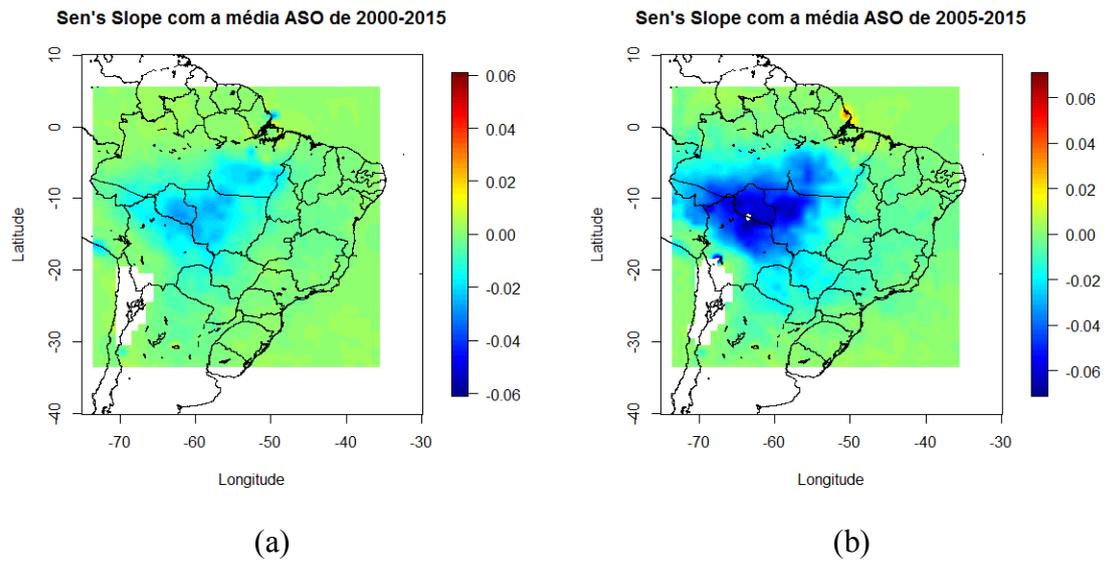


Mapa de concentração média de  $AOD_{550\text{ nm}}$  para o Brasil durante os períodos de: a) 2000 a 2007 e b) 2008 a 2015.

Fonte: Produção do autor.

Uma análise espacial com dados médios do trimestre de Agosto, Setembro e Outubro (ASO) de 2000 a 2015 (Figura 21a) apresenta valores negativos aproximados entre 0.02 e 0.03 para parte da porção noroeste do estado do MT e parte do estado de RO. Entretanto, tomando-se a série compreendida entre os anos de 2005 a 2015 (Figura 21b), notam-se valores negativos compreendidos entre 0.04 e 0.06 do parâmetro *sen's slope*, demonstrando uma inclinação maior da tendência de diminuição de  $AOD_{550\text{ nm}}$  para este período em relação à série completa (2000 a 2015).

Figura 21. Análise Espacial para todo o Brasil e áreas vizinhas do parâmetro de sen's slope.



Análise Espacial para todo o Brasil e áreas vizinhas do parâmetro de sen's slope para o período de: (a) 2000 a 2015. (b) 2005 a 2015.

Fonte: Produção do autor.

## 6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivos realizar um estudo sobre possíveis relações entre os aerossóis provenientes de queimadas na região amazônica e a precipitação, além de avaliar o comportamento temporal das propriedades ópticas do aerossol inferidos por satélite e por superfície.

Para tanto, dividiu-se o estudo em duas partes. A primeira, de caráter observacional, consistiu em explorar o potencial das informações de sensores a bordo de satélite no estudo da relação da precipitação, atividades de queimadas e poluição do ar. Particularmente, procurou-se compreender como déficits de chuva na estação seca impactam as atividades de queimadas no Mato Grosso e áreas vizinhas, e, como estas podem afetar a composição da atmosfera em termos da concentração de aerossóis.

A análise entre os dados de precipitação mensal acumulada e os dados de focos de queimadas apresentou uma fraca correlação ( $R = -0.5$ ), indicando que o déficit de chuva na estação seca é uma das possíveis causas do aumento de queimadas em Setembro, entretanto não é fator único. As atividades socioeconômicas e políticas de preservação de florestas também apresentam um papel importante na atividade de queimada na região (BROWN *et al.*, 2006). A correlação entre o número de focos de queima e  $AOD_{550 \text{ nm}}$  encontrada foi de 0.93, indicando uma relação mais evidente entre queimadas e a carga de aerossóis na atmosfera, como esperado. Não obstante, estes resultados abordaram de maneira limitada a complexidade da relação entre fatores climáticos e antrópicos nas queimadas e na poluição do ar, fazendo-se necessário avançar no entendimento dessa questão. Um dos fatores climáticos importantes que não foi analisado neste estudo, por exemplo, é a umidade do ar, a qual pode afetar a composição química das partículas, modificando parâmetros como o albedo simples e o fator de assimetria (ROSÁRIO, NILTON E. *et al.*, 2011).

Na segunda parte, uma possível mudança no comportamento temporal da AOD também foi estudada. Uma comparação pontual entre as anomalias padronizadas de AOD via sensor MODIS/Terra, MODIS/Aqua e AERONET apresentaram comportamento similar: uma tendência de diminuição de AOD para o período posterior a 2005. A análise espacial mostrou que essa tendência de diminuição ocorre para praticamente todo o estado do Mato Grosso e áreas vizinhas, na maioria dos anos subsequentes a

2005, exceto para os anos de 2007 e 2010. Além disso, a anomalia padronizada de NFQ também apresentou o mesmo padrão da AOD em termos de tendência.

Adicionalmente, uma tendência de diminuição na taxa de desmatamento para o período posterior a 2004 foi observada, enquanto um aumento na área plantada com o cultivo de soja neste mesmo ano foi constatado. A mudança na AOD poderia estar associada à redução do desmatamento, além de poder causar impactos em outras propriedades ópticas do aerossol, devido a uma menor contribuição do material queimado da vegetação que compõe essa região (florestas primárias, secundárias, áreas de pastagem e cerrado).

Portanto, foram empregados testes de hipótese estatísticos tanto para a AOD quanto para o índice de refração complexo do aerossol referente aos meses de estação seca, ASO. Resultados dos testes de Pettitt e SMK, respectivamente, indicaram o ano de 2007 como o de transição entre as tendências significativas de aumento (+0,17 de magnitude para Setembro de 2000 a 2007) e de diminuição (-0,06 de magnitude para o trimestre ASO de 2007 a 2015) na AOD para a estação de Alta Floresta. Para o pixel mais próximo de Alta Floresta, centrado no ponto de grade, também foram verificadas as tendências significativas de aumento (*sen's slope* = +0,11 para Outubro de 2000 a 2007) e de diminuição (*sen's slope* = -0,04 para o trimestre ASO de 2007 a 2015). Uma das possíveis causas da diminuição na tendência de AOD poderia estar relacionada à implementação de políticas públicas de prevenção às queimadas criadas em conjunto com os governos brasileiro, boliviano e peruano, como abordado por Brown et al., (2006) e Koren et al., (2007).

Para o índice de refração complexo das estações de Alta Floresta, Abraços Hill, Ji-Paraná e Cuiabá-Miranda, o teste de Pettitt não captou nenhuma mudança abrupta na série temporal. Porém, o teste SMK apontou tendência de diminuição significativa (*sens' slope* = -0,0013) somente para a parte real do índice de refração complexo. As estações de Ji-Paraná e Abraços Hill apresentaram tendências significativas de diminuição de mesma magnitude (*sens' slope* = -0,002) para ambas as partes do índice de refração complexo. Em compensação, Cuiabá-Miranda indicou valor do *Sen's Slope* para a parte real igual a -0,018, cerca de uma ordem de grandeza acima do referido parâmetro para a parte imaginária (*sens' slope* = -0,0009). As tendências significativas cujas magnitudes foram menores para o índice de refração complexo em relação à AOD

podem ser explicadas pelo fato de que, em se tratando de concentração de partículas na coluna atmosférica, a AOD é mais sensível às variações em sua magnitude do que o índice de refração complexo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, D.S. *et al.* **Análise da distribuição espacial das taxas de desflorestamento dos municípios da Amazônia Legal no período 1991-1994**. 1<sup>a</sup>. ed. São José dos Campos: INPEAMZ- R04/98, 1998. 86 p. .
- ALVES, L., M; MARENGO, J. A; CAVALCANTI, I., F., A. Histórico de Secas na Amazônia. In: DA SILVA, C. G. *et al.* (Orgs.). . **Secas na Amazônia: causas e consequências**. 1<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. p. 21–25. ISBN:978-85-7975-078-6.
- ANDREAE, M. O. *et al.* Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases, and aerosols in Amazonia: the LBA-EUSTACH experiments. **Journal of Geophysical Research D: Atmospheres** v. 107, n. 20 , 2002.ISBN:0747-7309.
- ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. **Global Biogeochemical Cycles** v. 15, n. 4, p. 955–966 , 2001.ISBN:0886-6236.
- ARTAXO, P. *et al.* Large-scale aerosol source apportionment in Amazonia. **Journal of Geophysical Research** v. 103, n. D24, p. 31837 , 1998. ISBN:2169-897X.
- ARTAXO, P. *et al.* Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry seasons in Rondônia, Amazonia. **Journal of Geophysical Research D: Atmospheres** v. 107, n. 20, p. 1–14 , 2002. ISBN: 0747-7309.
- ARTAXO, P.; *et al.* Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia** v. 21, p. 168–189 , 2006.
- BECKER, B. K. **Amazônia**. 5<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Ática, 1997. 112 p. ISBN: 85-08-03608-6.
- BECKER, B. K. Estudo elaborado para a Secretaria de Coordenação dos Assuntos da Amazônia Legal. In: \_\_\_\_\_. **A especificidade do urbano na Amazônia: desafios para políticas públicas consequentes**. 1<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Ministério do Meio Ambiente, 1998. p. 60.

BROWN, I. F. *et al.* Monitoring fires in Southwestern Amazonia Rain Forests. **EOS. Transactions, American Geophysical Union** v. 87, n. 26, p. 2005–2007, 2006.

COELHO, C. A. S. *et al.* Climate diagnostics of three major drought events in the Amazon and illustrations of their seasonal precipitation predictions. **Meteorological Applications**, p. 237–255, 2012.

COELHO, C. A. S.; COSTA, S. M. S.; FREITAS, S. R. Diagnóstico do efeito do aerossol na precipitação durante os eventos de seca na Amazônia em 2005 e 2010. In: BORMA, L. S.; NOBRE, C. (Orgs.). **Secas na Amazônia: causas e consequências**. 1<sup>a</sup>. ed. São José dos Campos: Oficina de Textos, 2013. p. 117–121. ISBN 8579750784.

CORREIA, A. *et al.* Produto de aerossóis. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J. C. (Orgs.). **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. 1<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 2 v. p. 297–314. ISBN 978-85-60507-00-9.

COSTA, Y. T.; RODRIGUES, S. C. Efeito do fogo sobre a vegetação e solo a partir de estudo experimental em ambiente de cerrado. **Revista do Departamento de Geografia (USP)** v. 30, p. 149–165, 2015.

DO ROSÁRIO, N. M. É. **Estudo da variabilidade das propriedades ópticas dos aerossóis sobre a América do Sul e dos impactos do efeito radiativo direto das partículas de queimadas**. Universidade de São Paulo, 2011. 225 p. Disponível em: <[http://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/t\\_nilton\\_m\\_e\\_rosario\\_original.pdf](http://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/t_nilton_m_e_rosario_original.pdf)>.

DOMINGUES, M. S.; BERMANN, C. O arco de desflorestamento na Amazônia: da pecuária à soja. **Ambiente & sociedade** v. 15, n. 2, p. 1–22, 2012. Disponível em: <<http://www.producao.usp.br/handle/BDPI/39759>>.

DUBOVIK, O. *et al.* Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres** v. 105, n. D8, p. 9791–9806, 27 abr. 2000. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2000JD900040>>.

DUBOVIK, O. *et al.* Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. **Journal of the Atmospheric Sciences** v. 59, n. 3, p. 590–608, fev. 2002. Disponível em:

<[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469\(2002\)059<0590:VOAAOP>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469(2002)059<0590:VOAAOP>2.0.CO;2)>.

DUBOVIK, O.; KING, M. D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres** v. 105, n. D16, p. 20673–20696 , 27 ago. 2000. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2000JD900282>>.

ECK, T. F. *et al.* Measurements of irradiance attenuation and estimation of aerosol single scattering albedo for biomass burning aerosols in Amazonia. **Journal of Geophysical Research** v. 103, n. 98, p. 31865 , 1998.0747-7309.

EMBRAPA. **Tecnologias da produção de soja na região central do Brasil**. Londrina, 2013. Disponível em:  
<<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/95489/1/SP-16-online.pdf>>.  
Acesso em: 10 out. 2016.

ESCADA, M. I. S.; ALVES, D. S. **Mudanças de uso e cobertura do solo na Amazônia**: impactos sócio-ambientais na ocupação de regiões de fronteira agrícola. São José dos Campos: Inpe, 2001. Disponível em:  
<[http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio\\_amz\\_dinamica\\_ocupacao.pdf](http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_amz_dinamica_ocupacao.pdf)>.

FEARNSIDE, P. M. Fogo e emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas florestais da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados** v. 16, n. 44, p. 97–123 , 2002.

FIGUEROA, S.N.; NOBRE, C.A. Precipitations distribution over Central and Western Tropical South America. **Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática** p. 36 – 45 , 1990.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. **Clima da Amazônia: Climanalise, edição especial comemorativa de 10 anos**. Disponível em:  
<<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/>>. Acesso em: 29 abr. 2016.

FREITAS, S. R.; LONGO, K M.; DIAS, M. a. F. S.; *et al.* Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul. **Estudos Avançados** v. 19, n. 53, p. 167–185 , 2005.0103-4014.

- FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F.; *et al.* Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. **Environmental Fluid Mechanics** v. 5, n. 1-2, p. 135–167 , 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5094/APR.2011.031>>.ISBN:1567-7419.
- GIOVANNI MODIS.**The bridge between data and science.** Disponível em: <<http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=TmAvMp&starttime=&endtime=&box=-180,-90,180,90>>. Acesso em: 4 jan. 2016.
- GODFREY, B.J.; BROWDER, J.O. Disarticulated urbanization in the Brazilian Amazon. **The Geographical Review** v. 86, p. 441– 445 , 1996.
- HOLBEN, B.N. *et al.* AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. **Remote Sensing of Environment** v. 66, n. 1, p. 1–16 , 1998. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425798000315>>.0034-4257.
- HUFFMAN, G. J. *et al.* The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. **Journal of Hydrometeorology** v. 8, n. 1, p. 38–55 , 2007.1525755X.
- IBAMA. **Arco do desflorestamento na Amazônia Legal de 1988 a 2015.** Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/>>. Acesso em: 21 mar. 2016.
- IBGE. **Área plantada com o cultivo de soja no Mato Grosso (2000 a 2015).** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/amazonialelegal.shtm?c=2>>. Acesso em: 21 mar. 2016.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Avaliação da cobertura florestal na Amazônia Legal utilizando sensoriamento remoto orbital .** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1989.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento da floresta Amazônica Brasileira por satélite 1998-1999 .** São José dos Campos,, 2000
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento da floresta amazônica por satélite 1997-1998 .** São José dos Campos,, 1999

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento de Queimadas e Incêndios (2000 a 2015)**. Disponível em:

<<http://www.inpe.br/queimadas/>>. Acesso em: 4 jan. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **PRODES**.

Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>>. Acesso em: 21 mar. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **PRODES -**

Levantamento das áreas desflorestadas na Amazônia Legal no período 1991-1994 . São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.

INTERGOVERNMENTAL PANEL OF CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate**

**Change 2013: the physical science basis**. Cambridge: [s.n.], 2013. Disponível em:

<[www.climatechange2013.org](http://www.climatechange2013.org)>.

KAUFMAN, Y J; *et al.* Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres** v. 102, n. D14, p. 17051–17067 , 27 jul. 1997. Disponível em:

<<http://doi.wiley.com/10.1029/96JD03988>>.

KAUFMAN, Y. J. *et al.* Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. **Journal of Geophysical Research** v. 102, n. D14, p. 17051 , 1997.2156-2202.

KOREN, I.; REMER, L. A.; LONGO, K. Reversal of trend of biomass burning in the Amazon. **Geophysical Research Letters** v. 34, n. 20, p. 2–5 , 2007.ISSN 0094-8276.

LEVY, R. C. *et al.* The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean.

**Atmospheric Measurement Techniques** v. 6, n. 11, p. 2989–3034 , 2013.ISBN:1867-8548.

LEVY, R. C. *et al.* Towards a long-term global aerosol optical depth record: Applying a consistent aerosol retrieval algorithm to MODIS and VIIRS-observed reflectance.

**Atmospheric Measurement Techniques** v. 8, n. 10, p. 4083–4110 , 2015.

LEWIS, S. L *et al.* The 2010 Amazon drought. **Science** (New York, N.Y.), v. 331, n.

Ci, p. 554 , 2011.1095-9203 (Electronic)r0036-8075 (Linking).

LI, J. *et al.* Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET

measurements. **Atmospheric Chemistry and Physics** v. 14, n. 22, p. 12271–12289 , 2014. ISBN:1227112289.

LONGO, K. M. *et al.* 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, n. 5, p. 1389–1405 , 2013. ISBN: 1991-9603.

LYAPUSTIN, A. *et al.* Reduction of aerosol absorption in Beijing since 2007 from MODIS and AERONET. **Geophysical Research Letters** v. 38, n. 10, p. n/a–n/a , 2011. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2011GL047306>>. ISBN:0094-8276.

MARENGO, J. A. Interannual variability of deep convection over the Tropical South-American sector as deduced from Isccp C2 Data. **International Journal of Climatology** v. 15, p. 995–1010 , 1995. Disponível em: <<Go to ISI>://A1995RX28200005>.0899-8418.

NAKAJIMA, T *et al.* Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions. **Applied optics** v. 35, n. 15, p. 2672–2686 , 1996.0003-6935 (Print)n0003-6935 (Linking).

NAKAJIMA, T.; TANAKA, M.; YAMAUCHI, T. Retrieval of the optical properties of aerosols from aureole and extinction data. **Applied Optics** n. April, p. 2951–2959 , 1983.

NASA. **Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)**. Disponível em: <<http://npp.gsfc.nasa.gov/viirs.html>>. Acesso em: 16 maio 2016.

NOAA. **Cold and warm episodes by seasons: El Niño Southern Oscillation (ENSO) Historical El Nino/ La Nina episodes (1950-present)**. Disponível em: <[http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)>. Acesso em: 24 ago. 2016.

NOBRE, C.A.; *et al.* Climate Change. In: GASH, J. H. C. *et al.* (Orgs.). **Amazonian deforestation and climate**. 1. ed. Institute of Hidrology: Wiley, 1996. p. 611. 0471967343, 9780471967347.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). **Climatic change**.

Geneve, Switzerland: [s.n.], 1966. Disponível em:

<[https://www.wmo.int/pages/index\\_en.html](https://www.wmo.int/pages/index_en.html)>.

PAIXÃO, M. M. A. **Propriedades ópticas de aerossóis naturais e de queimadas da Amazônia**. Universidade de São Paulo, 2011. 120 p. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-30092011-150552/pt-br.php>>.

PETTITT, A. N. A Non-parametric to the Approach Problem. **Journal of the Royal Statistical Society** v. 28, n. 2, p. 126–135 , 1979.

PROCOPIO, A. S. Modeled spectral optical properties for smoke aerosols in Amazonia. **Geophysical Research Letters** v. 30, n. 24, p. 1–5 , 2003. ISBN:0094-8276.

PROCOPIO, S., A. *et al.* Multiyear analysis of amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate. **Geophysical Research Letters** v. 31, p. 1–4 , 2004. ISSN 0148-0227.

REBOITA, M. S. *et al.* Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia** v. 25, n. 2, p. 185–204 , 2010. ISBN:0102-7786 UL -

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862010000200004&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862010000200004&nrm=iso).

REMER, L. a. *et al.* Biomass burning aerosol size distribution and modeled optical properties. **J. Geophys. Res.** v. 103, n. D24, p. 31879–31891 , 1998. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/1998/98JD00271.shtml>>.0148-0227.

REMER, L. A. *et al.* The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation. **Journal of the Atmospheric Sciences** v. 62, n. 4, p. 947–973 , 2005. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JAS3385.1>>.0022-4928.

ROSÁRIO, N. E. *et al.* Downwelling solar irradiance in the biomass burning region of the southern Amazon: dependence on aerosol intensive optical properties and role of water vapor. **Journal of Geophysical Research** v. 116, n. D18, p. D18304 , 20 set. 2011. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2011JD015956>>. ISBNB:0148-0227.

SCHAFER, J. S. *et al.* Atmospheric effects on insolation in the Brazilian Amazon:

Observed modification of solar radiation by clouds and smoke and derived single scattering albedo of fire aerosols. **Journal of Geophysical Research D: Atmospheres** v. 107, n. 20, p. 1–15 , 2002. ISBN:0148-0227.

SCHAFFER, J. S. Observed reductions of total solar irradiance by biomass-burning aerosols in the Brazilian Amazon and Zambian Savanna. **Geophysical Research Letters** v. 29, n. 17, p. 1823 , 2002. Disponível em:  
<<http://doi.wiley.com/10.1029/2001GL014309>>. ISBN:0094-8276.

SEINFELD, J.H; PANDIS, S.N. **Atmospheric Chemistry and Physics - from air pollution to climate change**. 1<sup>a</sup>. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. 1326 p. ISBN:0471178160, 9780471178163.

SETZER, A. Identificação das áreas queimadas nas imagens MODIS. In: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. (Orgs.). **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. 1<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 297–314. 85-8739329-4.

SILVA, C. M.; FREITAS, S. Impacto de um mecanismo de disparo da convecção na precipitação simulada com o modelo regional BRAMS sobre a bacia amazônica durante a estação chuvosa de 1999. **Revista Brasileira de Meteorologia** v. 30, n. 2, p. 145–157 , 2015. Disponível em:  
<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862015000200145&lng=pt&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862015000200145&lng=pt&nrm=iso&tlng=en)>. 0102778620.

SILVA DIAS, M. A F *et al.* Cloud and rain processes in a biosphere-atmosphere interaction context in the Amazon Region. **Journal of Geophysical Research D: Atmospheres** v. 107, n. 20 , 2002. ISBN: 0747-7309.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO NA AMAZÔNIA (SUDAM). **Amazônia Legal: estados e municípios**. 1. ed. Belém: Ministério da Integração Nacional, 1996. Disponível em: <<http://www.sudam.gov.br/>>. .

THORSTEN, P. Non-parametric trend tests and change-point detection. Disponível em:  
<<https://cran.r-project.org/package=trend>>. Acesso em: 15 ago. 2016.

WARD, D.E.; KAUFFMAN, J.B.; CUMMINGS, D.L. Fire in the Brazilian Amazon. 1. Biomass, nutrient pools, and losses in slashed primary forests. **Oecologia** p. 397–408 ,

1995.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2. ed. Ithaca, New York: Elsevier B.V., 2006. 649 p. .9780127519661.

WOOD, C. H.; PORRO, R. **Deforestation and Land Use in the Amazon**. 1. ed. Florida, United States: University Press of Florida, 2002. 385 p. Disponível em: <<http://www.upf.com>>. .0-8130-2465-X.

YAMASOE, H A *et al.* Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of vegetation " res in the Amazon Basin : water-soluble species and trace elements. **Atmopheric Environment** v. 34, p. 1641–1653 , 2000.

YAMASOE, M A *et al.* Effect of smoke and clouds on the transmissivity of photosynthetically active radiation inside the canopy. **Atmospheric Chemistry and Physics** v. 6, p. 1645–1656 , 2006. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00295923>>.

YU, H; LIU, S C; DICKINSON, R E. Radiative effects of aerosols on the evolution of the atmospheric boundary layer - Yu - 2002 - Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012) - Wiley Online Library. **Journal of Geophysical Research** v. 107 , 2002. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2002/2001JD000754.shtml\npapers2://publication/uid/B464D359-02B6-43E7-856E-948F2EAC69C1>>.

YUE, S.; WANG, C. The influence of serial correlation on the Mann – Whitney test for detecting a shift in median. **Advances in Water Resources** v. 25, p. 325–333 , 2002.

ZHANG, J.; REID, J. S. A decadal regional and global trend analysis of the aerosol optical depth using a data-assimilation grade over-water MODIS and Level 2 MISR aerosol products. **Atmospheric Chemistry and Physics** v. 10, n. 22, p. 10949–10963 , 2010. ISBN:1680-7324.



## APÊNDICE A

Tabela completa (2000 – 2015) com os valores médios e desvios padrões encontrados para os comprimentos de onda 440 nm, 674 nm, 870 nm e 1020 nm referentes às partes real e imaginária para os índices de refração complexos para as estações de Alta Floresta (AF), Abraços Hill (AH), Ji-Paraná (JP) e Cuiabá-Miranda. Os valores de n representam a quantidade de dados filtrados pelos critérios de Dubovik et al., (2002) de toda a série de dados obtidos para cada ano referente aos meses de estação seca.

	Índice de Refração Real				Índice de Refração Imaginário			
	440nm	674nm	870nm	1020nm	440nm	674nm	870nm	1020nm
AF								
2000	1,42	1,44	1,46	1,45	0,009	0,009	0,01	0,01
(n=16)	±0,05	±0,0	±0,05	±0,06	±0,004	±0,005	±0,006	±0,006
		5						
2001	1,46	1,47	1,47	1,47	0,009	0,008	0,007	0,007
(n=10)	±0,05	±0,0	±0,04	±0,04	±0,004	±0,004	±0,004	±0,004
		5						
2002	1,45	1,46	1,48	1,47	0,009	0,007	0,007	0,006
(n=60)	±0,05	±0,0	±0,04	±0,04	±0,05	±0,05	±0,04	±0,04
		5						
2003	1,46	1,47	1,48	1,48	0,01	0,01	0,009	0,009
(n=46)	±0,06	±0,0	±0,05	±0,04	±0,005	±0,005	±0,005	±0,005
		5						
2004	1,45	1,46	1,47	1,47	0,009	0,008	0,007	0,007
(n=83)	±0,06	±0,0	±0,05	±0,05	±0,004	±0,004	±0,004	±0,005
		5						
2005	1,46	1,47	1,48	1,48	0,01	0,009	0,008	0,008
(n=91)	±0,06	±0,0	±0,04	±0,04	±0,004	±0,004	±0,004	±0,004
		5						
2006	1,46	1,47	1,48	1,48	0,01	0,009	0,009	0,009
(n=91)	±0,07	±0,0	±0,05	±0,05	±0,004	±0,004	±0,005	±0,006
		6						
2007	1,48	1,49	1,50	1,50	0,01	0,01	0,01	0,01
(n=14)	±0,06	±0,0	±0,05	±0,05	±0,005	±0,005	±0,005	±0,006

5

2008	1,45	1,47	1,47	1,47	0,01	0,01	0,009	0,01
(n=88)	±0,06	±0,0	±0,04	±0,04	±0,006	±0,006	±0,006	±0,006

5

2009	1,41	1,43	1,45	1,45	0,007	0,006	0,006	0,006
(n=33)	±0,07	±0,0	±0,06	±0,06	±0,004	±0,004	±0,003	±0,003

6

2010	1,46	1,48	1,48	1,48	0,01	0,01	0,01	0,01
(n=11)	±0,05	±0,0	±0,05	±0,05	±0,005	±0,004	±0,004	±0,004

5

2011	1,44	1,46	1,46	1,46	0,008	0,007	0,007	0,007
(n=28)	±0,05	±0,0	±0,05	±0,05	±0,003	±0,003	±0,003	±0,003

5

2012	1,44	1,45	1,47	1,46	0,01	0,01	0,01	0,01
(n=73)	±0,05	±0,0	±0,04	±0,04	±0,003	±0,003	±0,004	±0,004

4

Continuação

2013	1,44	1,45	1,47	1,47	0,01	0,01	0,01	0,01
(n=11)	±0,03	±0,03	±0,02	±0,03	±0,006	±0,005	±0,005	±0,005

2014	1,43	1,45	1,46	1,46	0,009	0,008	0,008	0,008
(n=72)	±0,06	±0,05	±0,05	±0,05	±0,004	±0,003	±0,003	±0,003

2015	1,44	1,46	1,47	1,46	0,01	0,01	0,01	0,009
(n=10)	±0,06	±0,05	±0,05	±0,05	±0,005	±0,005	±0,004	±0,004

AH

2000	1,47	1,47	1,47	1,47	0,01	0,01	0,01	0,01
(n=77)	±0,06	±0,04	±0,04	±0,04	±0,004	±0,005	±0,004	±0,005

2001	1,47	1,48	1,48	1,48	0,01	0,01	0,01	0,01
(n=96)	±0,06	±0,05	±0,05	±0,05	±0,004	±0,005	±0,005	±0,005

2002	1,47	1,48	1,48	1,48	0,009	0,008	0,008	0,008
(n=99)	±0,05	±0,04	±0,04	±0,04	±0,003	±0,004	±0,004	±0,005

2003	1,48	1,48	1,48	1,48	0,01	0,009	0,008	0,008
(n=13)	±0,05	±0,04	±0,04	±0,04	±0,005	±0,004	±0,004	±0,003

2004	1,47	1,48	1,49	1,48	0,01	0,01	0,02	0,02
(n=13)	±0,06	±0,04	±0,04	±0,03	±0,008	±0,01	±0,02	±0,02
2005	1,47	1,48	1,48	1,48	0,01	0,01	0,01	0,01
(n=49)	±0,05	±0,04	±0,04	±0,04	±0,005	±0,005	±0,006	±0,006
JP								
2006	1,48	1,48	1,49	1,48	0,01	0,009	0,009	0,008
(n=13)	±0,04	±0,03	±0,03	±0,03	±0,005	±0,005	±0,004	±0,004
2007	1,45	1,47	1,47	1,47	0,009	0,009	0,01	0,01
(n=12)	±0,04	±0,03	±0,03	±0,03	±0,03	±0,03	±0,03	±0,03
2008	1,47	1,48	1,48	1,48	0,01	0,01	0,01	0,01
(n=63)	±0,07	±0,05	±0,05	±0,04	±0,003	±0,003	±0,003	±0,003
2009	1,47	1,48	1,48	1,47	0,01	0,01	0,01	0,01
(n=6)	±0,02	±0,02	±0,01	±0,02	±0,002	±0,003	±0,004	±0,004
2010	1,48	1,5	1,5	1,5	0,01	0,01	0,01	0,01
(n=18)	±0,06	±0,05	±0,04	±0,04	±0,004	±0,003	±0,003	±0,004
2011	1,45	1,46	1,48	1,47	0,01	0,01	0,01	0,01
(n=48)	±0,07	±0,05	±0,05	±0,04	±0,004	±0,005	±0,005	±0,006

Continuação

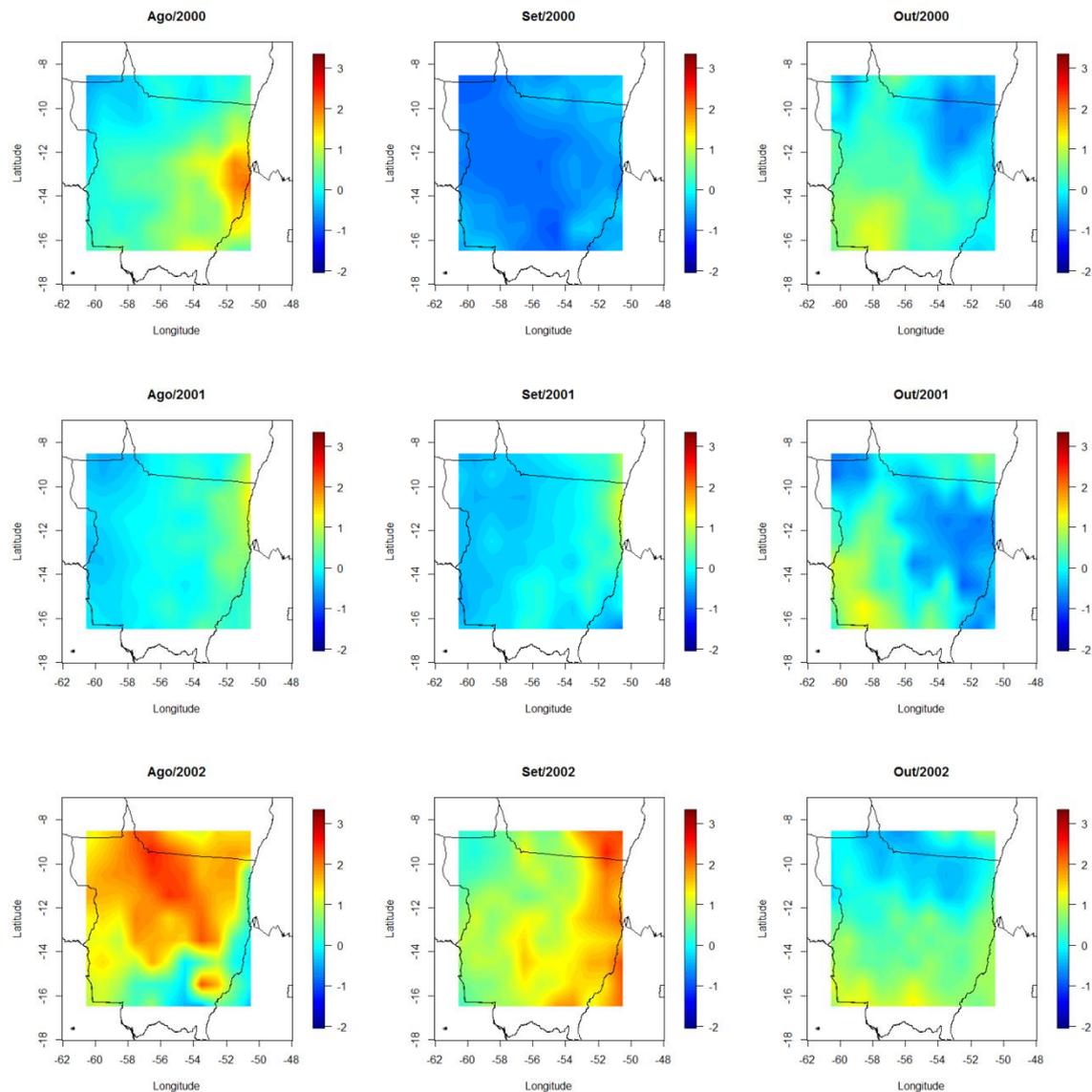
2012	1,44	1,46	1,47	1,46	0,01	0,01	0,01	0,01
(n=36)	±0,05	±0,04	±0,04	±0,04	±0,004	±0,003	±0,003	±0,003
2013	1,44	1,44	1,45	1,45	0,008	0,008	0,009	0,009
(n=27)	±0,05	±0,04	±0,03	±0,03	±0,003	±0,004	±0,004	±0,004
2014	1,45	1,46	1,47	1,47	0,008	0,008	0,009	0,009
(n=12)	±0,05	±0,04	±0,04	±0,04	±0,003	±0,003	±0,003	±0,003
CB								
2001	1,46	1,47	1,47	1,47	0,019	0,020	0,018	0,018
(n=65)	±0,06	±0,05	±0,05	±0,05	±0,006	±0,007	±0,008	±0,009
2002	1,49	1,50	1,51	1,52	0,061	0,064	0,068	0,068
(n=4)	±0,03	±0,03	±0,03	±0,03	±0,003	±0,008	±0,009	±0,009
2003	1,46	1,48	1,49	1,50	0,020	0,020	0,017	0,018
(n=33)	±0,06	±0,05	±0,04	±0,04	±0,007	0,008	±0,007	±0,007
2004	1,47	1,48	1,49	1,49	0,024	0,021	0,018	0,017

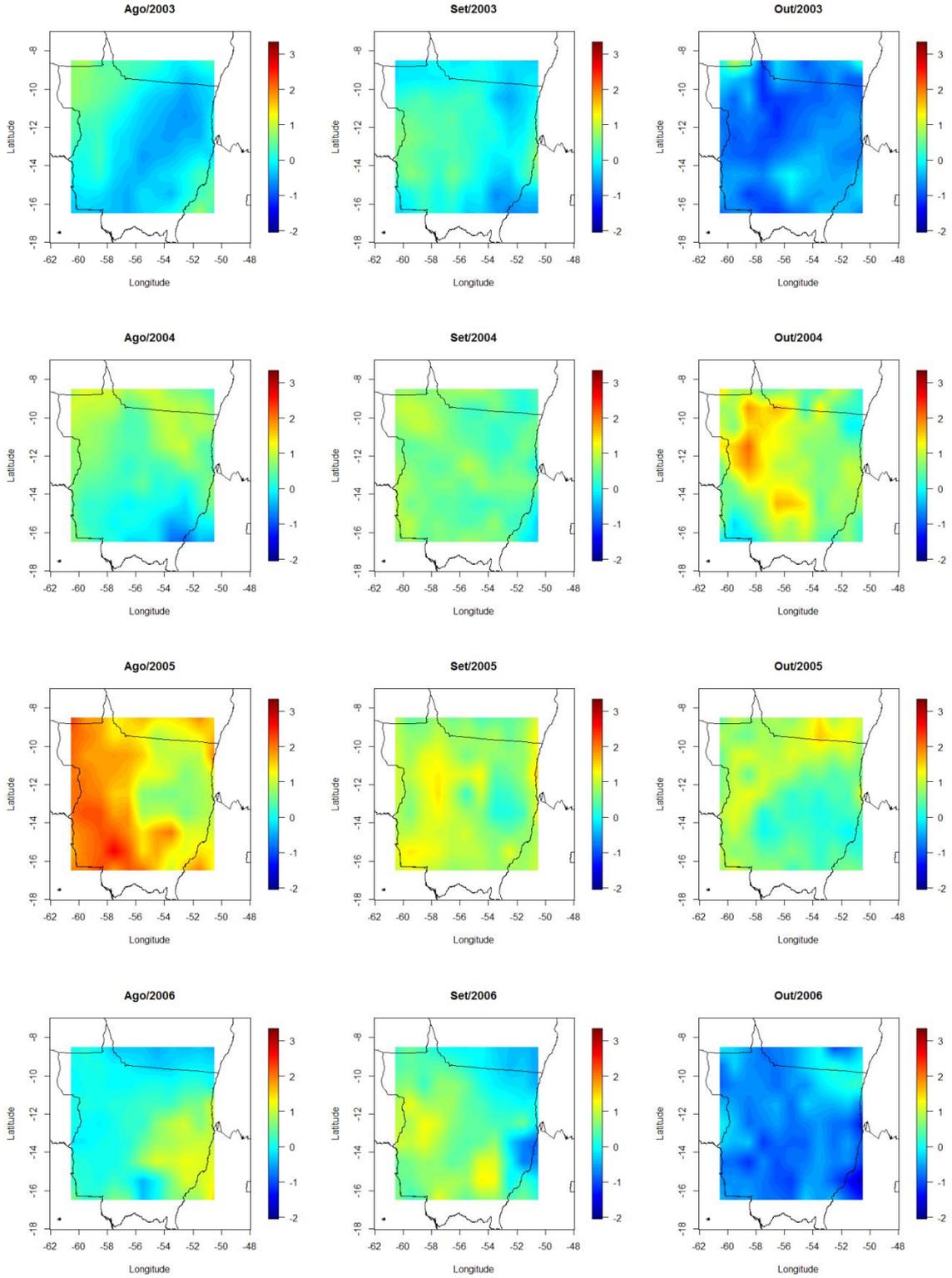
(n=27)	±0.06	±0.05	±0.05	±0.05	±0.004	±0.004	±0.003	±0.003
2005	1.45	1.47	1.48	1.48	0.014	0.013	0.012	0.011
(n=96)	±0.06	±0.05	±0.05	±0.04	±0.006	±0.007	±0.007	±0.006
2006	1.46	1.47	1.48	1.47	0.014	0.015	0.013	0.012
(n=20)	±0.04	±0.04	±0.04	±0.04	±0.008	±0.009	±0.009	±0.008
2007	1.46	1.48	1.48	1.49	0.010	0.008	0.008	0.007
(n=54)	±0.05	±0.04	±0.04	±0.04	±0.003	±0.003	±0.003	±0.003
2008	1.47	1.48	1.49	1.49	0.033	0.031	0.028	0.026
(n=96)	±0.05	±0.04	±0.04	±0.04	±0.012	±0.008	±0.007	±0.007
2010	1.47	1.50	1.51	1.50	0.019	0.016	0.014	0.013
n=199	±0.05	±0.04	±0.04	±0.04	±0.005	±0.004	±0.004	±0.004
2011	1.44	1.47	1.48	1.47	0.013	0.012	0.011	0.010
n=103	±0.06	±0.05	±0.05	±0.05	±0.005	±0.004	±0.004	±0.004
2012	1.44	1.47	1.49	1.49	0.016	0.013	0.013	0.011
(n=73)	±0.05	±0.05	±0.05	±0.05	±0.006	±0.005	±0.005	±0.004
2013	1.39	1.41	1.43	1.44	0.016	0.018	0.018	0.021
(n=6)	±0.06	±0.06	±0.05	±0.05	±0.009	±0.008	±0.008	±0.01
2014	1.44	1.45	1.47	1.46	0.007	0.006	0.006	0.006
(n=74)	±0.05	±0.04	±0.04	±0.04	±0.004	±0.003	±0.003	±0.003
2015	1.45	1.47	1.48	1.47	0.028	0.026	0.026	0.023
n=161	±0.06	±0.05	±0.05	±0.05	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01

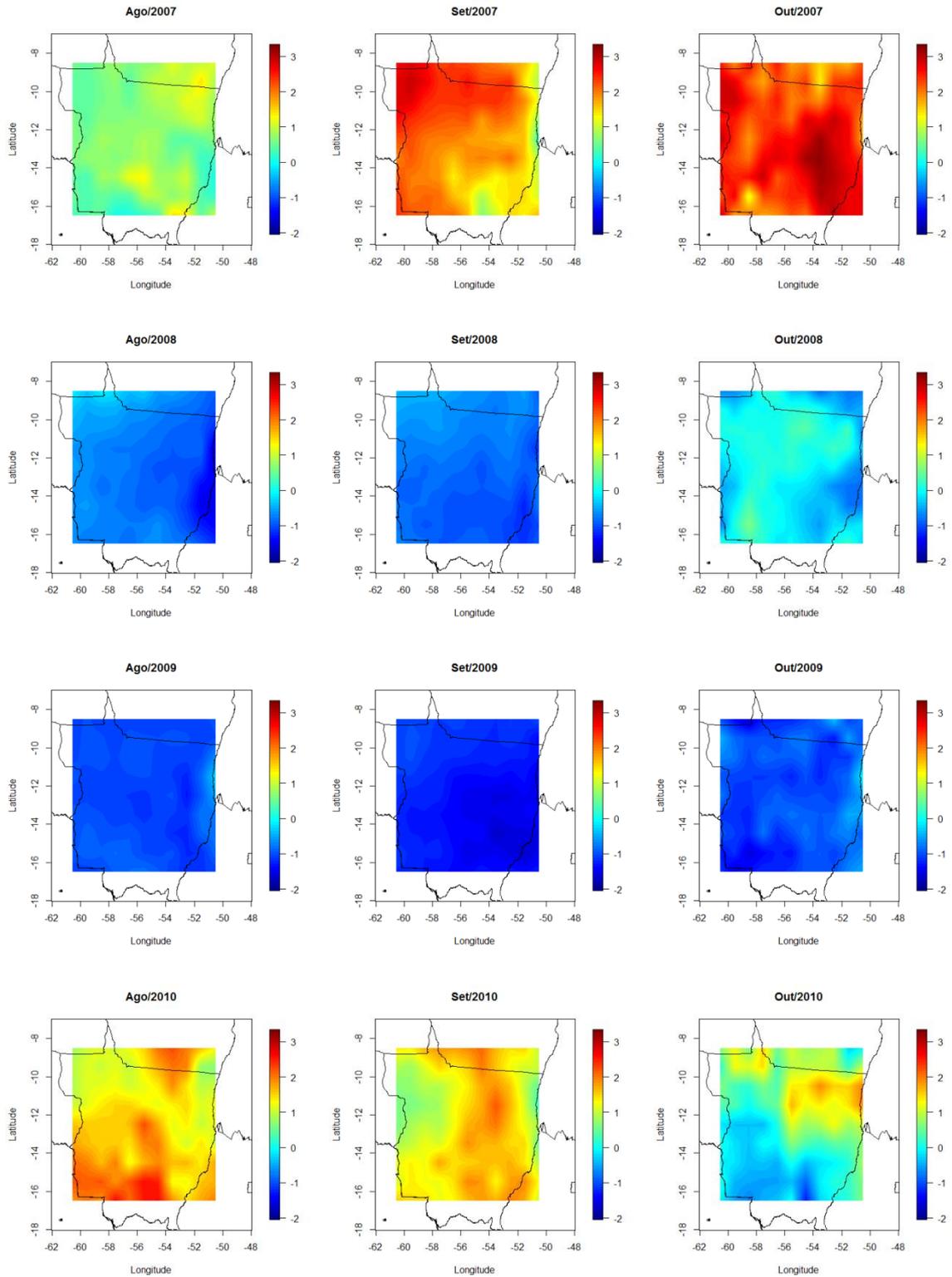
Conclusão

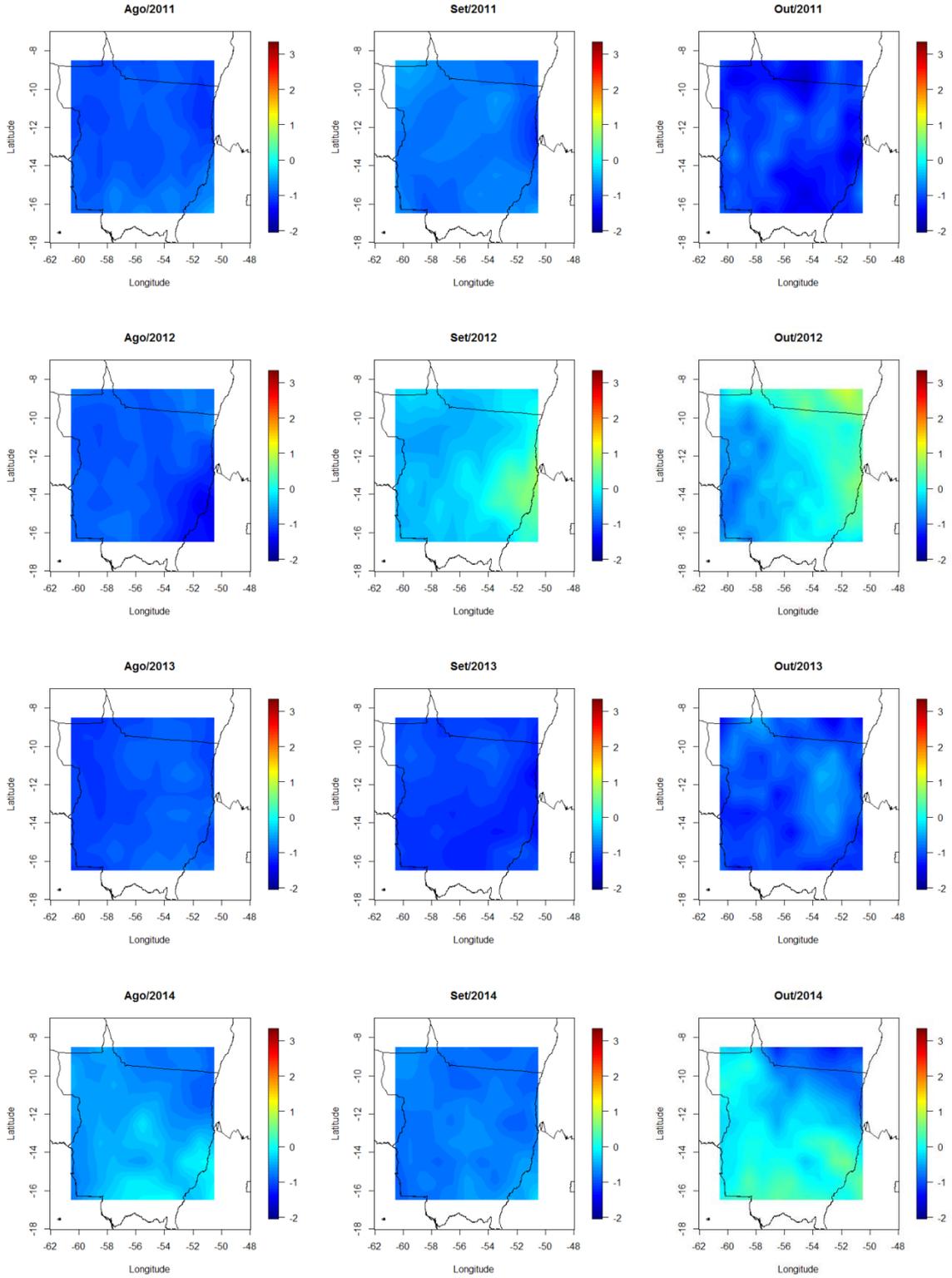
## APÊNDICE B

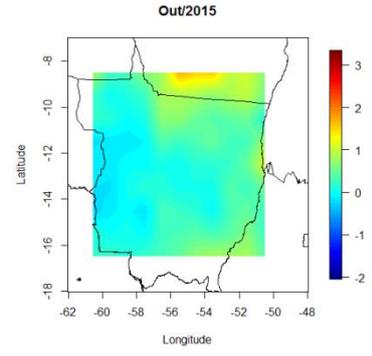
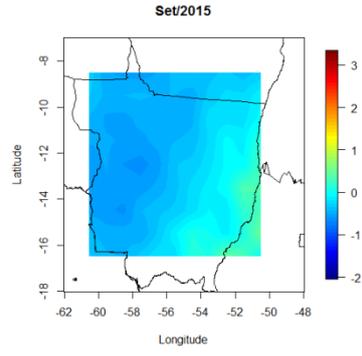
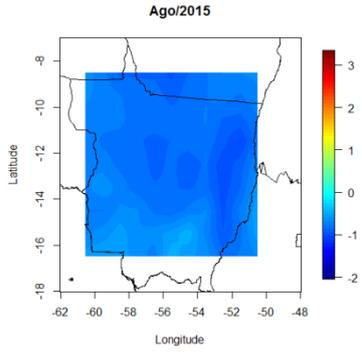
A seguir são apresentados os mapas de anomalia padronizada de AOD<sub>550 nm</sub> via sensor MODIS/Terra para os meses de Agosto, Setembro e Outubro para o estado do Mato Grosso e algumas áreas vizinhas compreendido num quadrado de [50° a 60°W] de longitude e [10° a 17°S] de latitude.













## APÊNDICE C

A seguir, são apresentados os mapas de anomalia padronizada de AOD<sub>550 nm</sub> via sensor MODIS/Terra para os meses de Agosto, Setembro e Outubro para todo o Brasil e algumas áreas vizinhas, compreendido num quadrado de [33°S a 5°N] de latitude e [34° a 73°W] de longitude.

