



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

-TDI

**ESTUDO OBSERVACIONAL NA REGIÃO
METROPOLITANA DE SÃO PAULO: ANÁLISE DA
PROFUNDIDADE ÓPTICA DE AEROSSÓIS E SUA
RELAÇÃO COM MEDIDAS DE MATERIAL
PARTICULADO E PADRÕES DE PRECIPITAÇÃO
DURANTE OS VERÕES DE 2013-2015**

Daniela Ramos Lopes Aléssio

Relatório Final de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE) orientado por Ariane Frassoni dos Santos de Mattos (INPE)

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

28/05/2016



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

-TDI

**ESTUDO OBSERVACIONAL NA REGIÃO
METROPOLITANA DE SÃO PAULO: ANÁLISE DA
PROFUNDIDADE ÓPTICA DE AEROSSÓIS E SUA
RELAÇÃO COM MEDIDAS DE MATERIAL
PARTICULADO E PADRÕES DE PRECIPITAÇÃO
DURANTE OS VERÕES DE 2013-2015**

Daniela Ramos Lopes Aléssio

Relatório Final de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE) orientado por Ariane Frassoni dos Santos de Mattos (INPE)

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

28/05/2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

ESTUDO OBSERVACIONAL NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO: ANÁLISE DA PROFUNDIDADE ÓPTICA DE AEROSSÓIS E SUA RELAÇÃO COM MEDIDAS DE MATERIAL PARTICULADO E PADRÕES DE PRECIPITAÇÃO DURANTE OS VERÕES DE 2013-2015 / Daniela Ramos Lopes Aléssio. – : , 28/05/2016.

p. ; (-TDI)

() – , , .
: .

CDU



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

Informar aqui sobre marca registrada (a modificação desta linha deve ser feita no arquivo publicacao.tex).

RESUMO

Entre os anos de 2013 a 2015, foi observado um evento de seca Região Sudeste do Brasil que afetou principalmente a estação chuvosa, gerando transtornos à população principalmente no que diz respeito ao abastecimento de água na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Este trabalho tem como objetivo analisar o padrão de precipitação observado na RMSP e identificar possíveis relações com a poluição do ar. Foram utilizados dados de profundidade óptica de aerossóis (do inglês Aerosol Optical Depth – AOD) durante os verões de 2013 – 2015, obtidos a partir dos satélites AERONET e MODIS. A partir da média calculada para os valores de AOD do MODIS entre os anos de 2013 a 2015, verificou-se que os meses de agosto, setembro e outubro são os meses que apresentaram maior espessura óptica dos aerossóis, com valores de 0,11 (8% superior à média), 0,16 (55,44% superior à média) e 0,16 (55,44% superior à média), respectivamente. Em relação ao regime de precipitação, observou-se no ano de 2014 fortes desvios em relação à média climatológica, associado ao evento de seca que perdurou até o início de 2015. Em 2014, da precipitação total anual observada na estação meteorológica oficial da cidade de São Paulo foi de 1253,3 mm, com uma anomalia negativa de 187,8 mm, sendo que no mês de outubro, a anomalia foi de -101,7mm. Também, 2014 foi o ano com a maior espessura óptica dos aerossóis, com máximos entre os meses de agosto a outubro. Comparando o ano de 2014 com o ano de 2013, houve um aumento de 27,76% no AOD no mês de outubro. Embora seja comum a ocorrência de máximos de espessura óptica durante o período de inverno (abril a setembro), isso não é observado durante outubro, quando tem início a estação chuvosa na região central do Brasil. Existe uma forte correlação entre a quantidade de Mp10 e o valor de AOD, indicando que eles se relacionam diretamente. Já a precipitação tem uma relação indireta com Mp10 e direta com AOD de alguns meses antes, ou seja, o aumento da precipitação resulta na diminuição de Material Particulado suspenso, e o aumento de AOD pode influenciar a precipitação dos meses seguintes. As análises sugerem que a espessura óptica dos aerossóis na RMSP está associada ao regime de precipitação, possivelmente associado com a redução da deposição úmida, mas não se sabe se a diminuição da precipitação é causa ou consequência deste processo.

Palavras-chave: Aerossol. RMSP. Precipitação. Correlação. AOD.

AEROSOL OPTICAL DEPTH ANALYSIS AND IT'S RELATION WITH PRECIPITATION PATTERNS DURING THE SUMMERTIME OF 2013-2015 IN THE SÃO PAULO METROPOLITAN AREA

ABSTRACT

Between 2013 until 2015, Brazil's southeast region has been affected by a strong drought event, generating disorders to the population, mainly regarding to water supply at São Paulo Metropolitan Area (SPMA). This research has the objective to analyze the precipitation pattern observed at SPMA and to identify possible relations with air pollution. We have used the aerosol optical depth (AOD) data at SPMA during the summertime of 2013 to 2015 from AERONET and MODIS satellites. Trough the mean values of AOD from MODIS between the years 2013 to 2015, it has been observed higher AOD during August, September and October, with the values of 0,11 (8% above average), 0,16 (55,44% above average) and 0,16 (55,44% above average), respectively. Comparing AOD from 2014 with the mean AOD from 2000 to 2015, there has been an increase of 27,76% in AOD in October. Also, higher AOD was observed during 2014, with maximum between August and October. Though it is usual the occurrence of maximum AOD during the winter (April to September), usually it is not common during October. This month is characterized by the onset of the rainy season in the Central Region of Brazil, and the AOD starts to decrease. Furthermore, it was observed precipitation deficits in 2014, with strong deviations from the long term mean associated with the persistent drought since end 2013 to early 2015. In 2014, the total annual precipitation observed at the official raingauge at São Paulo city was 1253,3 mm, with a negative anomaly of 187,8 mm. In October, the anomaly was -101,7 mm. There is a strong correlation between the amount of Pm10 and AOD, indicating that they relate directly. Precipitation has an idirect relation with Pm10 and a direct relation with the AOD from a few months earlier, that is, the increase od precipitation results in de decrease of suspended Particulate Matter, and the increase of AOD can result in a raise of precipitation a few months later. The analysis suggest aerosol at SPMA is associated with precipitation patterns, possibly associated with the reduction of the wet deposition. However, it is not known if the decrease of precipitation is the cause or consequence of the drought.

Keywords: Aerosol. SPMA. Precipitation. Correlation. AOD.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Fórmula para o Cálculo da Média	3
1.2 Fórmula para o Cálculo do Desvio Padrão	3
1.3 Fórmula para o Cálculo do Coeficiente de Correlção de Pearson	3
4.1 Dados de espessura óptica do aerossol obtidos pelo MODIS para os anos de 2000 a 2015 nas coordenadas 70W a 30W e 40S a 15S.	9
4.2 Dados de espessura óptica do aerossol obtidos pela AERONET durante os anos de 2000 a 2015 na coordenada 23,561500S e 46,734983W.	10
4.3 Dados de espessura óptica do aerossol obtidos pelo MODIS para os anos de 2000 a 2015 na coordenada 23,561500S e 46,734983W.	11
4.4 Dados de espessura óptica do aerossol obtidos pelo MODIS para a média dos anos de 2000 a 2015 nas coordenadas 70W a 30W e 40S a 15S	12
4.5 Dados de espessura óptica do aerossol obtidos pela AERONET das médias dos anos de 2000 a 2015 na coordenada 23,561500S e 46,734983W.	12
4.6 Dados de espessura óptica do aerossol obtidos pelo MODIS para a média dos anos de 2000 a 2015 na coordenada 23,561500S e 46,734983W.	13
4.7 Dados de material particulado com diâmetro menor que 10 micrômetros obtidos pela CETESB para os anos de 2013 a 2015 no município de São Paulo.	13
4.8 Dados de material particulado com diâmetro menor que 2,5 micrômetros obtidos pela CETESB para os anos de 2013 a 2015 no município de São Paulo.	14
4.9 Dados de material particulado com diâmetro menor que 10 micrômetros obtidos pela CETESB para os anos de 2013 a 2015 na RMSP.	14
4.10 Dados de material particulado com diâmetro menor que 2,5 micrômetros obtidos pela CETESB para os anos de 2013 a 2015 na RMSP.	15
4.11 Precipitação de chuva em São Paulo para os anos de 2013 a 2015 e climatologia.	15

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 Média trimestral de precipitação nos anos de 2013 a 2015 e comparação com a média trimestral da climatologia.	16
4.2 Anomalia da média trimestral de precipitação nos anos de 2013 a 2015	16
4.3 Acumulado trimestral de precipitação nos anos de 2013 a 2015 e comparação com o acumulado trimestral da climatologia.	17
4.4 Anomalia calculada a partir do acumulado trimestral de precipitação de 2013 a 2015.	17
4.5 Dados da média trimestral de AOD de 2013 a 2015.	17
4.6 Dados da anomalia trimestral de AOD de 2013 a 2015.	18
4.7 Dados da média trimestral de Mp10 de 2013 a 2015.	18
4.8 Dados da média trimestral de Mp2,5 de 2013 a 2015.	18
4.9 Correlação entre dados de AOD e Mp10	19
4.10 Correlação entre dados de precipitação e AOD	19
4.11 Correlação entre dados de precipitação e Mp10	19

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 Introdução	1
1.1 Aerossóis	1
1.2 Coeficiente de Correlação de Pearson	2
2 Dados	5
2.1 AERONET	5
2.2 MODIS	5
2.3 Instituto Nacional de Meteorologia – INMET	5
2.4 Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE	6
2.5 Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB	6
2.6 Grid Analysis and Display System – GRADS	6
3 Metodologia	7
3.1 AOD	7
3.2 Material Particulado	7
3.3 Precipitação	7
3.4 Análises trimestrais	7
3.5 Análise da correlação	8
4 RESULTADOS	9
4.1 AOD	9
4.2 Material Particulado	11
4.3 Precipitação	15
4.4 Análises trimestrais	16
4.5 Análise da correlação	18
5 CONCLUSÕES	21
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

1 Introdução

1.1 Aerossóis

O aerossol (material particulado) é um dos grandes responsáveis pelas mudanças climáticas, além de ser ofensivo à saúde. É estimado que cerca de 2.906 mortes prematuras foram causadas na América do Sul por exposição à aerossóis oriundos de queimadas, que causam doenças cardiopulmonares e câncer de pulmão (REDDINGTON et al., 16 set. 2015). Os aerossóis podem ser definidos como partículas sólidas e líquidas suspensas no ar, que possuem diâmetro que varia de nanômetros a micrômetros. Eles podem ser emitidos diretamente na atmosfera (aerossóis primários) ou formados a partir dos aerossóis primários (aerossóis secundários).

Eles podem ser classificados de acordo com seu tamanho. Aqueles pertencentes à moda fina têm diâmetro menor que 2,5 micrômetros, sendo a maioria de origem antrópica, e apresentam mais riscos à saúde. Isto porque possuem um diâmetro menor, assim podem atingir os alvéolos pulmonares, a parte mais profunda do sistema respiratório. Os aerossóis de moda grossa possuem diâmetro maior que 2,5 micrômetros, sendo em maioria de origem natural, e devido ao maior diâmetro eles podem ficar retidos na parte superior do sistema respiratório, sendo menos prejudiciais à saúde (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2015b). Eles também podem ser classificados com relação à composição química, sendo: Aerossol de Sulfato: formado com a oxidação do dióxido de enxofre (SO₂). Eles podem ser de origem antrópica, sendo a industrial e a queima de combustível fósseis as principais, ou de origem natural, vindo principalmente da biosfera marinha e de erupções vulcânicas (CONTRIBUTION OF WORKING GROUP I TO THE FOURTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE,); Material Particulado Orgânico (MPO): formado em combustões, como por exemplo a emissão veicular, queima de biomassa e emissão biogênica (ROSARIO, 2011); Black Carbon (BC): também está associado a emissão veicular e queima de biomassa, resultado de combustões incompletas (ROSARIO, 2011); Poeira do Deserto (dust): transportada com a ação do vento próximos à superfície (CONTRIBUTION OF WORKING GROUP I TO THE FOURTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE,); Partículas Marinhas (PM): emitidas da superfície da água para a atmosfera diretamente como gotículas a partir da ação do vento. A principal fonte de aerossol marinho é o rebentamento de bolhas de ar produzida pela quebra das ondas.

As partículas podem ser mais absorvedoras ou mais espalhadoras de radiação solar.

As de Black Carbon são as mais absorvedoras, enquanto os aerossóis de sulfato são os mais espalhadores. Isto nos mostra qual impacto cada tipo de aerossol é capaz de causar. Os aerossóis podem afetar o sistema climático de forma direta, indireta ou semi-direta ([CONTRIBUTION OF WORKING GROUP I TO THE FOURTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE](#),). O efeito direto dos aerossóis é o responsável por espalhar e absorver radiação, dependendo do índice de refração complexo. O efeito indireto é o responsável por alterar as propriedades microfísicas das nuvens, já que eles atuam como núcleos de condensação, fazendo com que as gotículas de água fiquem pequenas, e que a nuvem tenha mais dificuldade para precipitar, ou seja, tenha um maior tempo de vida. O efeito semi-direto é uma consequência do direto, que causa o aquecimento da atmosfera com a absorção da energia radiativa, a evaporação das nuvens, e a estabilização da atmosfera ([ROSARIO, 2011](#)).

Na RMSP, as principais fontes de emissão de aerossóis são a veicular, a industrial e a ressuspensão da poeira, além de sofrer influência da pluma de aerossóis oriundos de picos de queimadas em certos períodos do ano no sub continente. Esse quadro piora durante o inverno, quando os ventos são desfavoráveis à dispersão dos aerossóis. Como consequência, São Paulo apresenta um dos maiores índices da América Latina de densidade óptica de aerossóis Black Carbon durante o ano todo ([ROSARIO, 2011](#)). Segundo Geraque, o município de São Paulo emite três vezes mais poluição do que toda a Suécia. Cerca de 10 mortes por dia são causadas pela poluição na cidade.

Porém, há uma incerteza com relação ao papel dos aerossóis na variabilidade do clima, como por exemplo a mudança nos padrões de precipitação na região do RMSP nos últimos anos. Com isso, o objetivo deste trabalho foi coletar os dados de densidade óptica dos aerossóis da rede Aerosol Robotic Network (AERONET), e dos sensores Moderate resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) a bordo dos satélites TERRA e AQUA, e também dados de precipitação diária e mensal do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), para inferir possíveis relações entre os padrões de poluição atmosférica e de precipitação na RMSP.

1.2 Coeficiente de Correlação de Pearson

Para saber se existe ou não alguma dependência entre duas variáveis quantitativas utiliza-se o coeficiente de correlação de Pearson (r). Segundo [Filho D. B. F. e Júnior \(2009\)](#) "o coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida de associação linear entre variáveis". Para calcular essa associação é necessário saber a média e o desvio

padrão dos dados. Eles podem ser calculados com as seguintes fórmulas das Figuras 1.1 e 1.2:

Média

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum x_i$$

Figura 1.1 - Fórmula para o Cálculo da Média

Desvio padrão

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{X})^2}$$

Figura 1.2 - Fórmula para o Cálculo do Desvio Padrão

Depois de calcular esses dados, é possível obter o valor de r através da fórmula na Figura 1.3

Correlação

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \left(\frac{x_i - \bar{X}}{s_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{Y}}{s_y} \right)$$

Figura 1.3 - Fórmula para o Cálculo do Coeficiente de Correlação de Pearson

O valor de r pode variar de -1 até 1. Quanto mais próximo de 0, menor é a correlação entre as variáveis observadas, indicando que as variáveis são independentes entre si. Quanto mais próximo de 1, maior é a relação direta entre as variáveis, ou seja, o aumento de um resulta no aumento de outra. Quando o valor estiver mais próximo

de -1, a relação indireta das variáveis é maior, e o aumento de uma resulta na diminuição de outra. A interpretação dos valores do r pode variar de acordo com cada pesquisador. De acordo com Cohen (1988), os valores acima de 0,5 podem ser considerados como correlações grandes, entre 0,3 e 0,49 são considerados médios e abaixo de 0,3 são pequenos (FILHO D. B. F. E JÚNIOR, 2009).

Para analisar a correlação de variáveis com defasagem temporal utiliza-se a Análise de Lags Distribuídos. Os lags são os intervalos de tempo, que podem ser positivos ou negativos, dependendo da necessidade. Para isto, as duas variáveis tem que apresentar os mesmo intervalos de tempo (VALE, aug. 2006).

2 Dados

Os dados utilizados foram obtidos do período de 2000 até 2015 na Região Metropolitana de São Paulo.

A seguir é feita uma descrição destes dados que serão utilizados neste estudo.

2.1 AERONET

A AERONET é uma rede mundial de fotômetros solares espectrais estabelecida pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e PHOTométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire (PHOTONS). O programa oferece uma base de dados contínua e acessível de densidade óptica, propriedades microfísica e radiativas dos aerossóis. Os dados de densidade óptica dos aerossóis são registrados em três níveis de qualidade. O Level 1.0 (com nada verificado), Level 1.5 (com nuvens verificadas) e Level 2.0 (com nuvens verificadas controle de qualidade) (AEROSOL ROBOTIC NETWORK, 2013).

2.2 MODIS

O MODIS é um instrumento a bordo dos satélites AQUA e TERRA. O satélite TERRA orbita de norte a sul, atravessando o Equador durante a manhã. Já o satélite AQUA orbita do sul para o norte, atravessando o Equador durante o período da tarde. Eles visualizam a superfície terrestre inteira em um período de 1 a 2 dias. Os dados obtidos nos ajudam a entender melhor a dinâmica global e processos que acontecem em continentes, oceanos e na baixa atmosfera (CLOUDS AND THE EARTH'S RADIANT ENERGY SYSTEM, 2015).

2.3 Instituto Nacional de Meteorologia – INMET

O INMET é um órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, cujo a missão é promover informações meteorológicas à sociedade brasileira para influenciar na tomada de decisões e assim contribuir para o desenvolvimento sustentável brasileiro (INMET). O INMET possui sua sede em Brasília, e é representante da OMM (Organização Meteorológica Mundial) pelo tráfego das informações meteorológicas coletadas na América do Sul e os demais centros meteorológicos da Vigilância Meteorológica Mundial (INMET). O Banco de Dados Meteorológicos do INMET, que contempla as variáveis meteorológicas temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, precipitação, entre outras, já incorporou em seu acervo digital informações diárias desde 1961 (INSTITUTO NA-

CIONAL DE METEOROLOGIA, 2011).

2.4 Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE

O INPE tem como missão produzir ciência e tecnologia nas áreas espacial e do ambiente terrestre e oferecer produtos e serviços singulares em benefício do Brasil (www.inpe.br). O CPTEC, como um centro de excelência em geração de conhecimento, produtos e serviços do INPE, é responsável por ampliar e consolidar competências em previsão de tempo, clima e modelagem ambiental.. Dentre os diversos produtos e ser, o CPTEC gera operacionalmente dados de precipitação para o Brasil e América do Sul em pontos regularmente espaçados ([CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2016](#)).

2.5 Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB

A CETESB é uma agência do Governo do Estado. Ela é responsável por controlar, monitorar, fiscalizar e licenciar as atividades geradoras de poluição, a fim de preservar a qualidade do ar, água e solo (CETESB). A CETESB é responsável pelo monitoramento dos valores medidos e índices de qualidade do ar na RMSP, bem como da legislação vigente sobre os limites de poluição do ar ([COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2015a](#)).

2.6 Grid Analysis and Display System – GRADS

O GRADS é uma ferramenta computacional utilizada para fácil acesso, manipulação e visualização de dados em ponto de grade. Ele usa 5 dimensões, a longitude, a latitude, nível vertical, tempo, e uma quinta dimensão que é opcional.

3 Metodologia

3.1 AOD

Foram confeccionados gráficos de espessura óptica do aerossol utilizando os dados obtidos pela AERONET e pelo MODIS de todos os meses para os anos 2000 a 2014. Primeiro foi realizada uma média, utilizando os dados do MODIS, sobre uma área que compreende o estado de São Paulo, cujas coordenadas são: 70W a 30W e 40S a 15S (Figura 4.1), e outro gráfico com as médias de todos os anos (Figura 4.2). Depois, utilizando os dados obtidos pela AERONET referentes ao ponto de coordenadas 23,561500S e -46,734983W, fez-se um gráfico com as espessuras ópticas de cada mês para os anos de 2000 a 2014 (Figura 4.3), e outro com as médias de todos os anos (Figura 4.4). Por fim, foi feito outro gráfico com os dados do MODIS, porém utilizando a mesma coordenada do ponto da AERONET (23,561500S e 46,734983W). Primeiro, com os dados de cada mês para os anos de 2000 a 2014 (Figura 4.5), e depois para a média dos anos (Figura 4.6), para uma melhor comparação.

3.2 Material Particulado

Foram confeccionados gráficos com dados de material particulado da CETESB para os anos de 2013 a 2015. Primeiro foram feitos apenas no município de São Paulo para Mp10 (Figura 4.7), Mp2,5 (Figura 4.8). Também foram feitos gráficos de toda a RMSB para os 3 anos, um de Mp10 (Figura 4.9) e outro de Mp2,5 (Figura 4.10).

3.3 Precipitação

Foi confeccionado um gráfico da precipitação de chuva em São Paulo para os anos de 2013 a 2015 e a climatologia (Figura 4.11).

3.4 Análises trimestrais

Foram feitas tabelas com os dados das médias trimestrais dos anos de 2013, 2014 e 2015, separando os meses em 4 grupos: dezembro, janeiro e fevereiro; março, abril e maio; junho, julho e agosto; setembro, outubro e novembro. Primeiro foram feitas para os dados de precipitação em uma estação na cidade de São Paulo. A Tabela 4.1 mostra os dados das médias trimestrais, e a Tabela 4.2 mostra as anomalias trimestrais, que são a diferença entre a climatologia (a média obtida em 30 anos) e o dado observado no trimestre. As Tabelas 4.3 e 4.4 são o acúmulo dos dados de precipitação dos 3 meses de cada grupo e a anomalia do acúmulo da precipitação, respectivamente. Em seguida, foi feita uma Tabela 4.5 com as médias trimestrais de

AOD, com os dados do MODIS, e também uma outra Tabela 4.6 com a anomalia calculada a partir de uma média climatológica dos anos de 2000 a 2015. As Tabelas 4.7 e 4.8 foram confeccionadas utilizando os dados de material particulado Mp10 e Mp2,5, respectivamente.

3.5 Análise da correlação

Foram feitas análises de correlações para os dados de AOD, Mp10, e precipitação para o período de 2000 a 2015, já que a análise apenas do período de 2013 na 2015 não tem dados suficientes para apresentar um valor de correlação consistente. As correlações feitas foram de AOD (variável x) com Mp10 (variável y) (Tabela 4.9), depois com precipitação (x) e AOD (y) (Tabela 4.10), e por fim precipitação (x) e Mp10 (y) (Tabela 4.11). Para isso, foi utilizado um programa chamado `correlacao_f90`. O valor de r foi calculado para os lags de -3 a 3, sendo que o Lag 0 compara períodos simultâneos, o Lag 1 compara o mês da variável x com o mês seguinte da variável y, e o Lag -1 compara o mês da variável x com o mês anterior da variável y, e assim por diante.

4 RESULTADOS

4.1 AOD

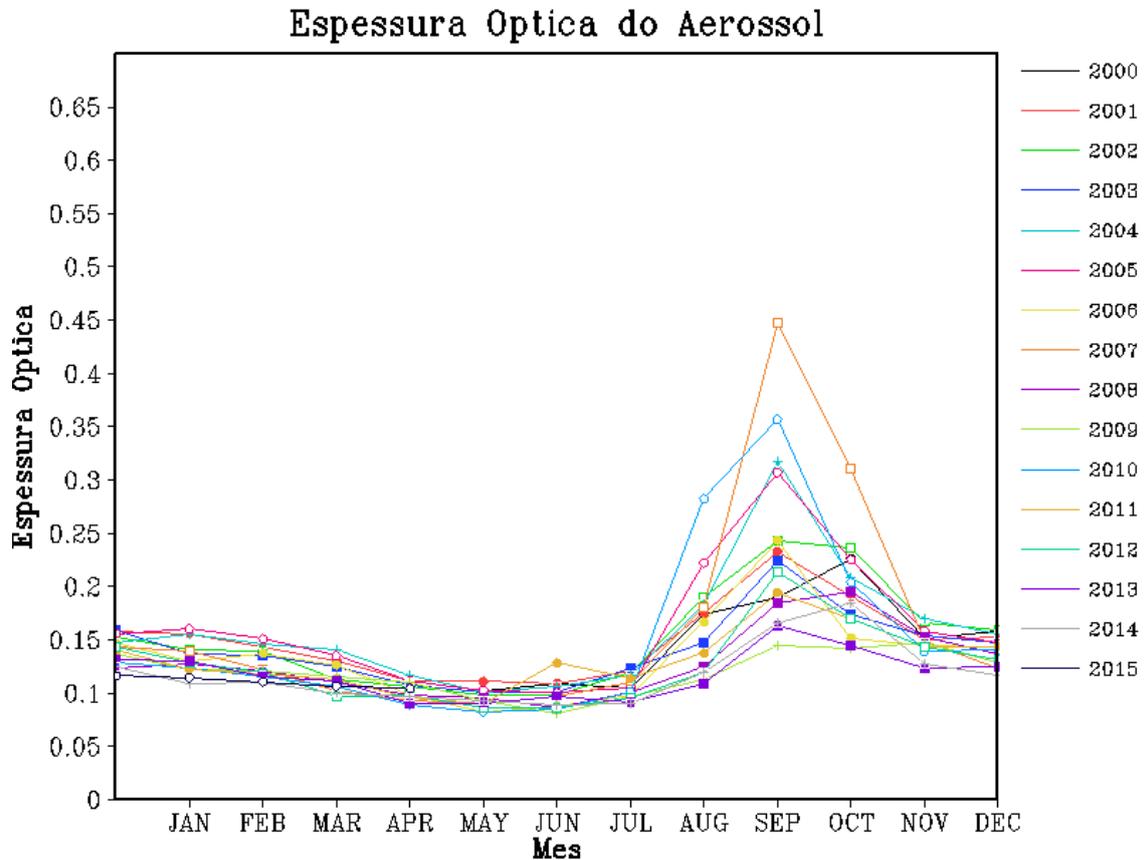


Figura 4.1 - Dados de espessura óptica do aerossol obtidos pelo MODIS para os anos de 2000 a 2015 nas coordenadas 70W a 30W e 40S a 15S.

Nos anos de 2010 e 2005 há uma AOD consideravelmente maior. Isto ocorreu possivelmente como consequência das secas nestes anos na Amazônia. Os meses de agosto, setembro e outubro apresentam uma anomalia na espessura óptica dos aerossóis na região da Amazônia, e consequentemente, na RMSP. Nesses períodos, a temperatura de superfície do mar no Atlântico tropical estava mais elevado do que o normal, e isso contribui com a seca. Quanto mais seco, mais queimadas acontecem, e isso eleva a profundidade óptica do aerossol. Segundo Borma L. S. e Nobre (2013) há também “o possível efeito da queima de aerossóis como fator adicional na inibição da precipitação nos eventos de seca de 2005 e 2010”.

Na Figura 4.1 podemos ver que no ano de 2007 a profundidade óptica se elevou

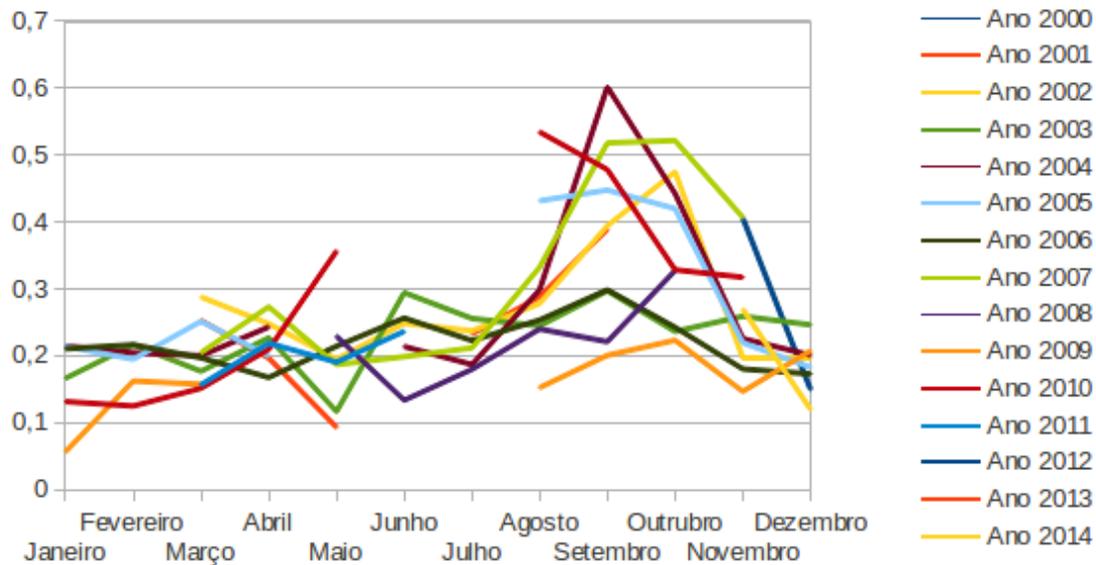


Figura 4.2 - Dados de espessura óptica do aerossol obtidos pela AERONET durante os anos de 2000 a 2015 na coordenada 23,561500S e 46,734983W.

muito nos meses de agosto, setembro e outubro. Porém, na Figura 4.3, que também utiliza os dados do MODIS, ela não está tão acentuada. Isto ocorreu porque a área utilizada para os dados da Figura 4.1 abrange uma parte do estado de Minas Gerais, que durante o ano de 2007 passou por uma seca na região norte do estado, o que resultou em focos de incêndio (SUPER INTERESSANTE, 19 de agosto de 2014). Na Figura 4.3 percebe-se que o ano de 2007 está com a AOD um pouco elevada, mas podemos ver que a seca de Minas Gerais não influenciou tanto na profundidade óptica do aerossol na RMSP quanto as queimadas e a seca da Amazônia.

Percebe-se que a espessura óptica do aerossol aumenta em estações mais frias, principalmente no inverno (junho a agosto), com valores de 0,11 (8% superior à média), 0,16 (55,44% superior à média) e 0,16 (55,44% superior à média), respectivamente. E diminui em estações mais quentes, principalmente no verão (dezembro a fevereiro). Isto ocorre por causa do movimento das massas de ar. O ar quente tende a subir, então nas estações quentes o ar que está mais próximo à superfície arrasta os aerossóis produzidos para cima, favorecendo a dispersão. Já o ar frio tende a ficar em baixo, então o vento fica desfavorável à dispersão, e a profundidade óptica fica maior.

Também, 2014 foi o ano com a maior espessura óptica dos aerossóis, com máximos

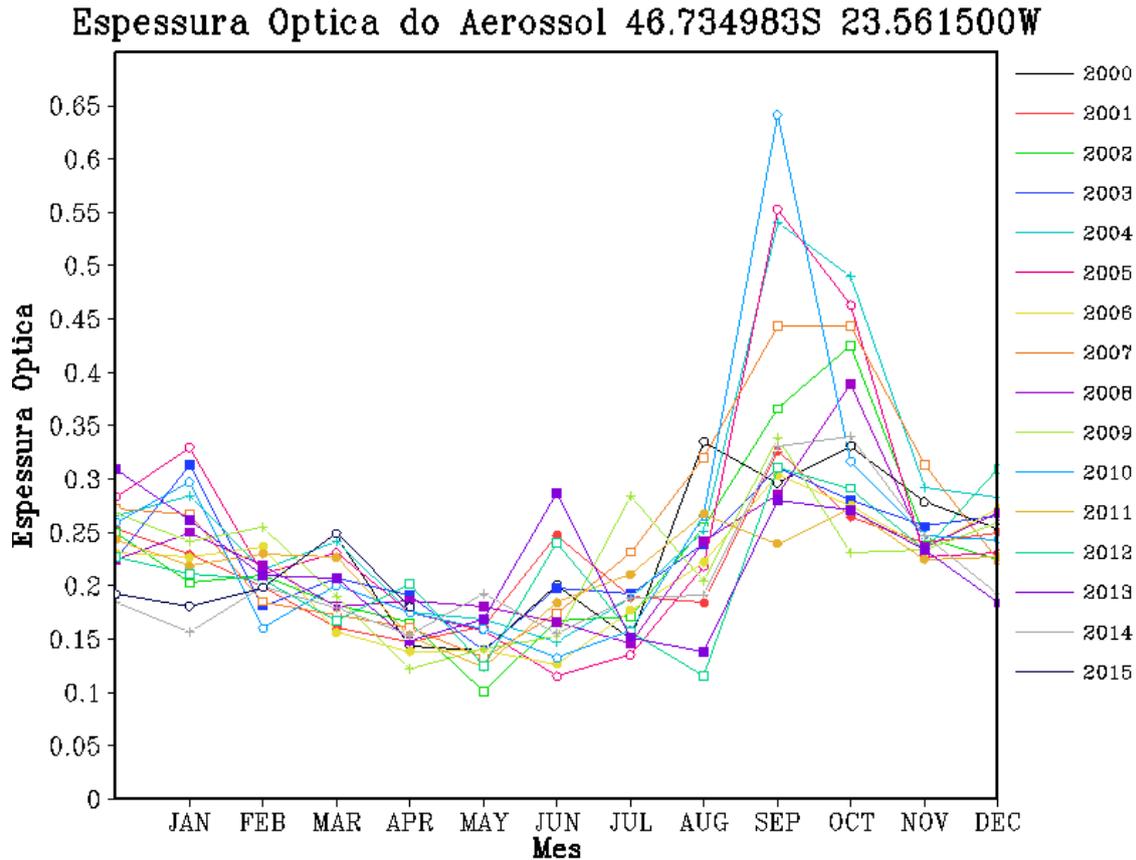


Figura 4.3 - Dados de espessura óptica do aerossol obtidos pelo MODIS para os anos de 2000 a 2015 na coordenada 23,561500S e 46,734983W.

entre os meses de agosto a outubro. Comparando o ano de 2014 com o ano de 2013, houve um aumento de 27,76% no AOD no mês de outubro. Embora seja comum a ocorrência de máximos de espessura óptica durante o período de inverno (abril a setembro), isso não é observado durante outubro, quando tem início a estação chuvosa na região central do Brasil.

Além disso, nota-se que há um pico de espessura óptica do aerossol no mês de setembro. Isto acontece porque durante este período a RMSP recebe influência de uma pluma de aerossóis oriundos das queimadas na região central da América do Sul, que ocorrem nos meses de agosto, setembro e outubro (FREITAS et al., Fevereiro de 2005)

4.2 Material Particulado

Percebe-se que o material particulado diminuiu ao longo dos anos, tanto para o Mp10 quanto para o Mp2,5. Isso aconteceu porque a emissão dos veículos novos

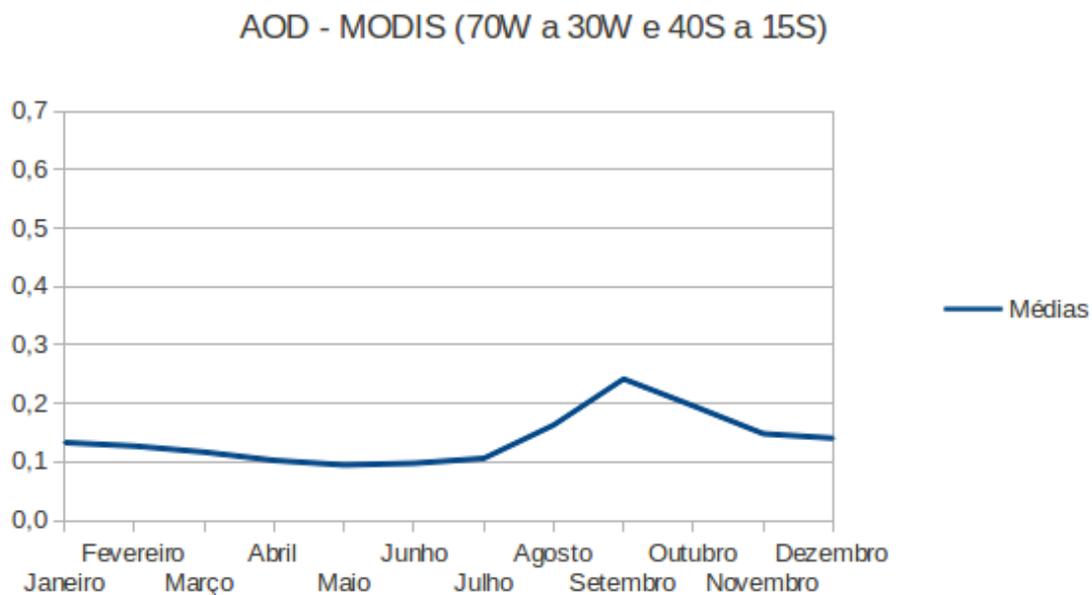


Figura 4.4 - Dados de espessura óptica do aerossol obtidos pelo MODIS para a média dos anos de 2000 a 2015 nas coordenadas 70W a 30W e 40S a 15S

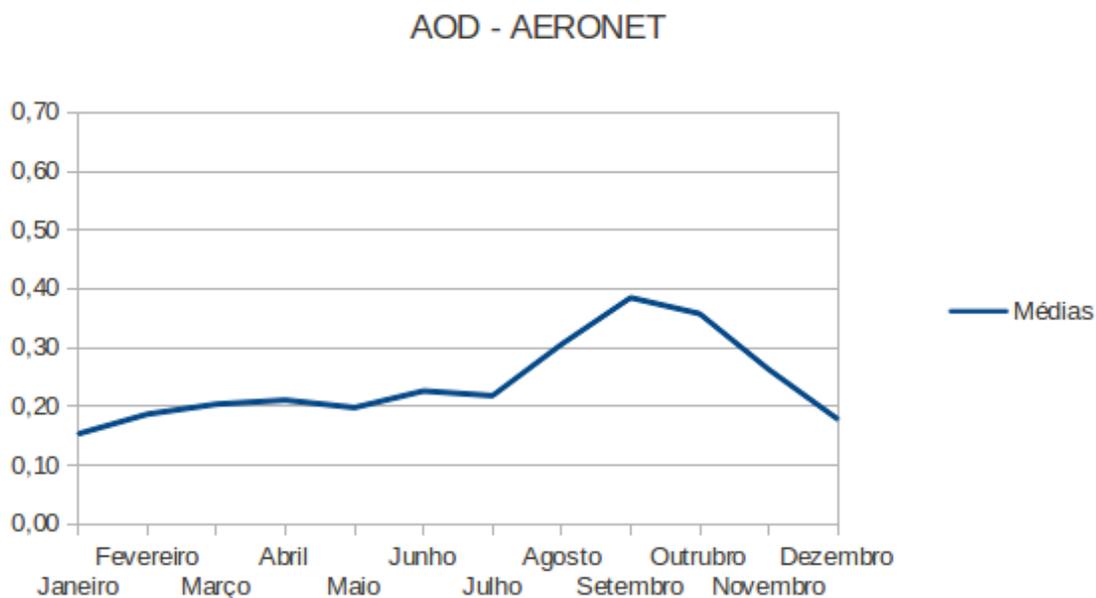


Figura 4.5 - Dados de espessura óptica do aerossol obtidos pela AERONET das médias dos anos de 2000 a 2015 na coordenada 23,561500S e 46,734983W.

está diminuído, então mesmo com o aumento da frota de veículos, a quantidade de material particulado emitido é menor, com isso, o ano de 2015 apresenta uma média

AOD - MODIS (23,561500S e 46,734983W)

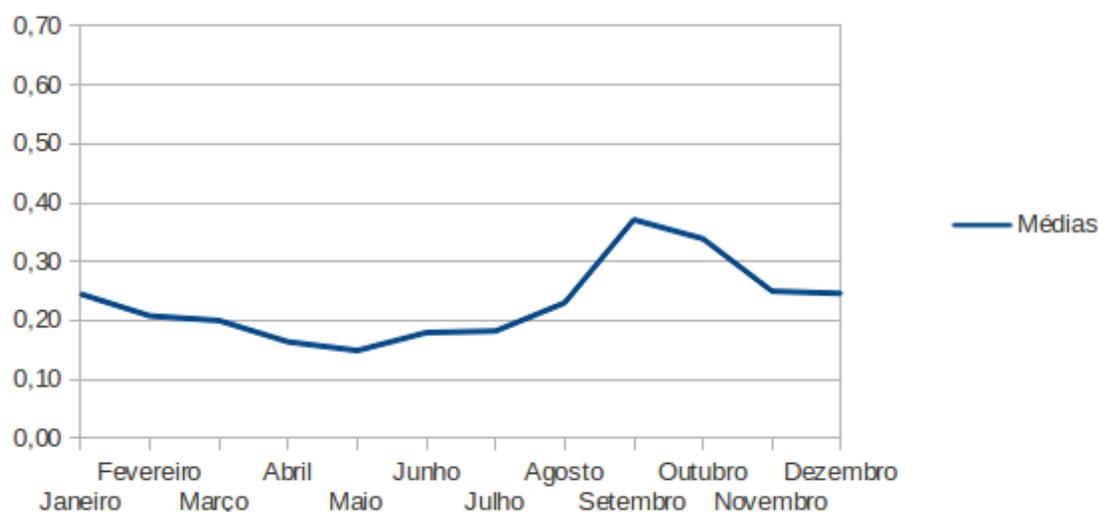


Figura 4.6 - Dados de espessura óptica do aerossol obtidos pelo MODIS para a média dos anos de 2000 a 2015 na coordenada 23,561500S e 46,734983W.

Mp10 - Município de São Paulo

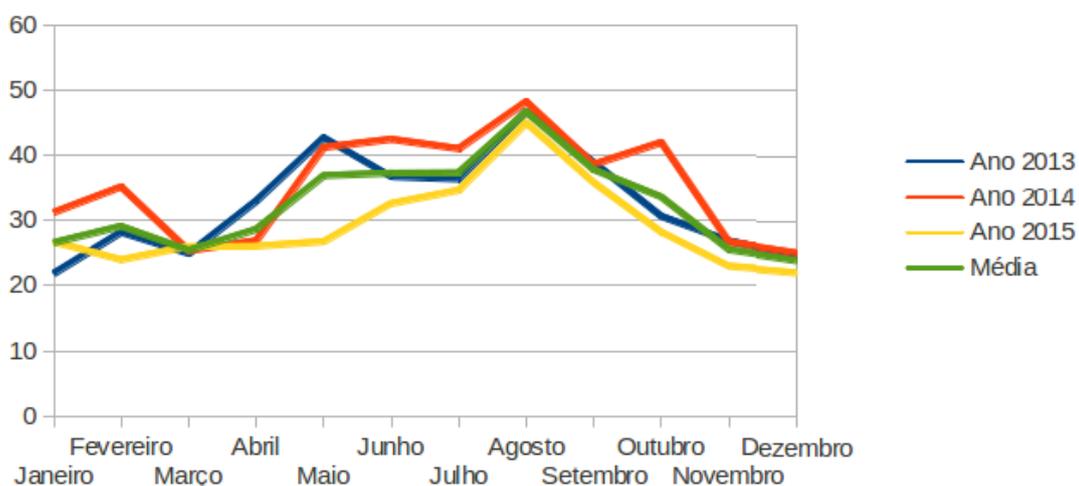


Figura 4.7 - Dados de material particulado com diâmetro menor que 10 micrômetros obtidos pela CETESB para os anos de 2013 a 2015 no município de São Paulo.

menor do que os outros anos (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO,).

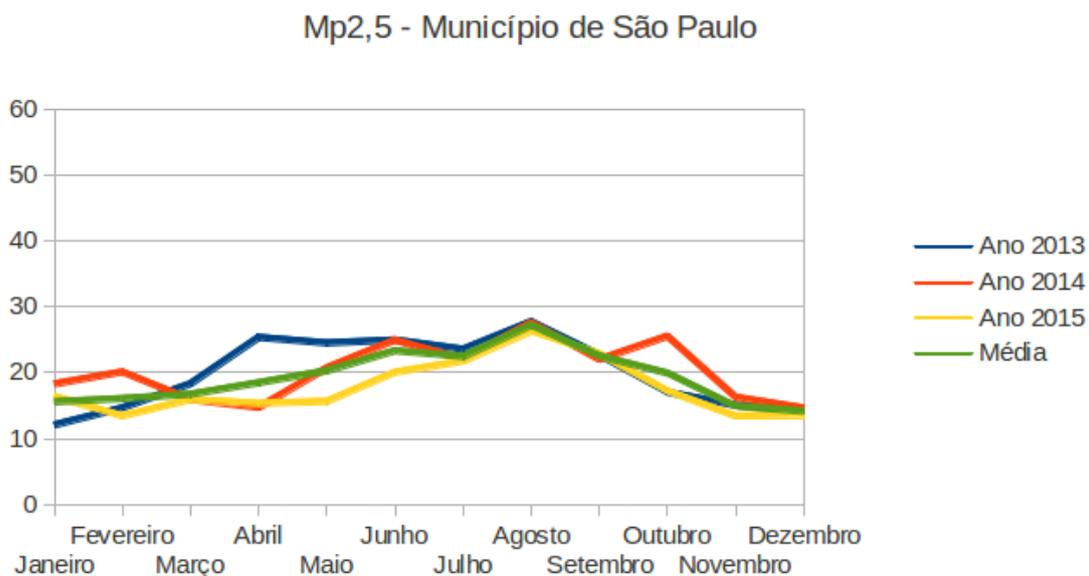


Figura 4.8 - Dados de material particulado com diâmetro menor que 2,5 micrômetros obtidos pela CETESB para os anos de 2013 a 2015 no município de São Paulo.

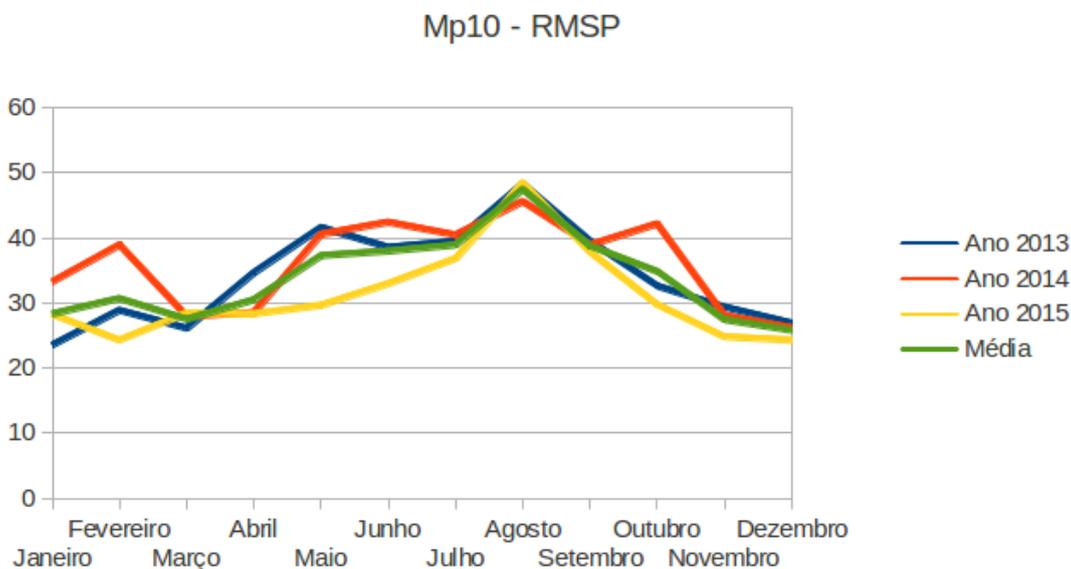


Figura 4.9 - Dados de material particulado com diâmetro menor que 10 micrômetros obtidos pela CETESB para os anos de 2013 a 2015 na RMSP.

O mesmo pode ser observado para a RMSP, com o ano de 2015 abaixo da média devido à diminuição da emissão de poluição veicular. Pode-se perceber que não há muita diferença no material particulado do município de São Paulo e da RMSP.

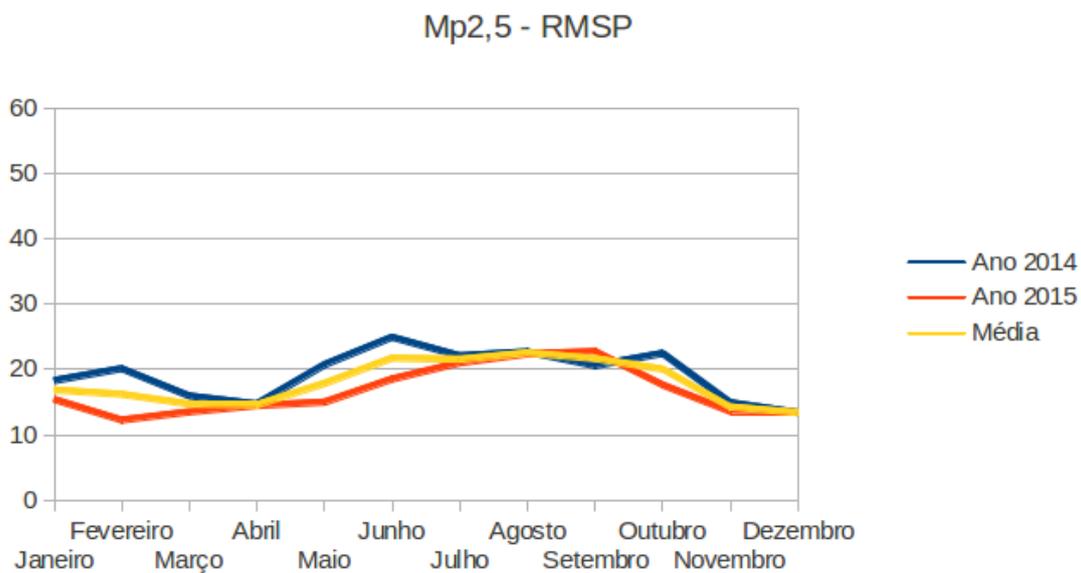


Figura 4.10 - Dados de material particulado com diâmetro menor que 2,5 micrômetros obtidos pela CETESB para os anos de 2013 a 2015 na RMSP.

4.3 Precipitação

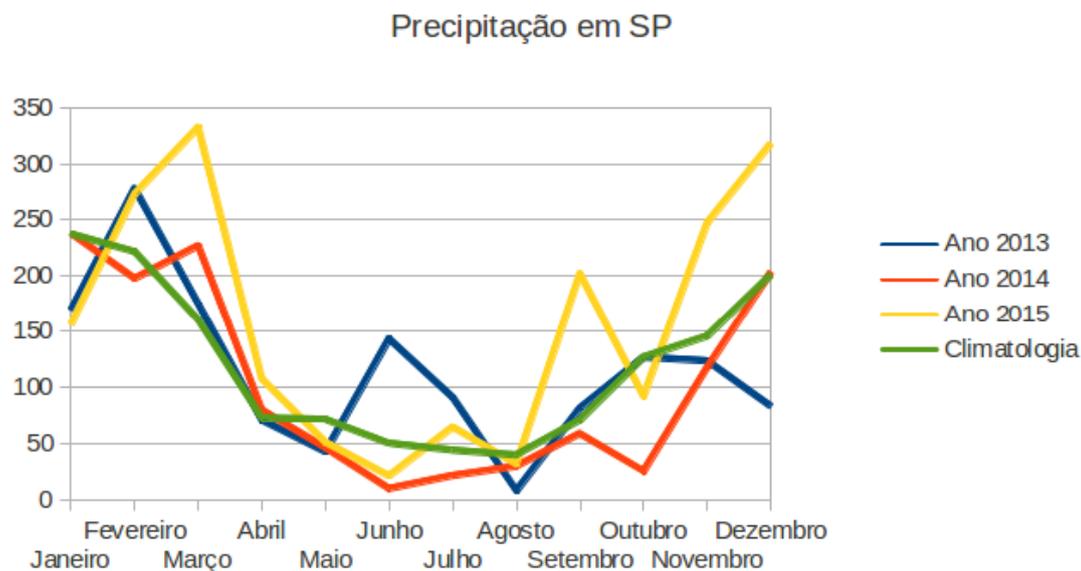


Figura 4.11 - Precipitação de chuva em São Paulo para os anos de 2013 a 2015 e climatologia.

Percebe-se que nos meses em que há mais chuva, de Dezembro a Março, são os meses que há a menor concentração de material particulado e de espessura óptica dos aerossóis. Isso acontece porque a umidade diminui o número de combustões incompletas, e como consequência reduz a emissão de Black Carbon, o aerossol mais presente em São Paulo (ROSARIO, 2011).

No ano de 2014 a precipitação está abaixo da climatologia, pois neste ano houve um período de seca nas regiões sul e sudeste do país, atingindo o município de São Paulo. De acordo com EBC Agência Brasil (29 de março de 2014), a seca ocorreu por causa de um “ciclo natural de resfriamento do Oceano Pacífico, que se reflete em alterações climáticas em grande parte do planeta”.

4.4 Análises trimestrais

Tabela 4.1 - Média trimestral de precipitação nos anos de 2013 a 2015 e comparação com a média trimestral da climatologia.

Médias trimestrais de precipitação	2013	2014	2015	Climatologia
Dez - Jan - Fev	176,8	212,9	249,1	219,9
Mar - Abr - Mai	95,9	117,5	163,7	101,5
Jun - Jul - Ago	80,6	20,2	39,1	44,5
Set - Out - Nov	110,6	67,1	180,3	114,5

Tabela 4.2 - Anomalia da média trimestral de precipitação nos anos de 2013 a 2015

Anomalias médias trimestrais de precipitação	2013	2014	2015
Dez - Jan - Fev	-43,1	-7,0	29,2
Mar - Abr - Mai	-5,6	36,1	-3,9
Jun - Jul - Ago	36,1	-24,3	-5,5
Set - Out - Nov	-3,9	-47,3	65,9

Pode-se perceber que do mês de Junho até o mês de novembro de 2014 a precipitação é consideravelmente menor do que a climatologia. Este foi um período de seca na região sudeste do país, no qual o ano fechou com anomalia negativa. A precipitação total anual observada na estação meteorológica oficial da cidade de São Paulo foi de 1253,3 mm, com uma anomalia negativa de 187,8 mm, sendo que no mês de outubro, a anomalia foi de -101,7mm. Já no início no ano de 2015 a precipitação é acima da

Tabela 4.3 - Acumulado trimestral de precipitação nos anos de 2013 a 2015 e comparação com o acumulado trimestral da climatologia.

Acumulado trimestral	2013	2014	2015	Climatologia
Dez - Jan - Fev	530,3	638,6	747,3	659,6
Mar - Abr - Mai	287,7	352,6	491,2	304,5
Jun - Jul - Ago	241,8	60,7	117,2	133,6
Set - Out - Nov	331,7	201,4	541,0	343,4

Tabela 4.4 - Anomalia calculada a partir do acumulado trimestral de precipitação de 2013 a 2015.

Anomalia do acumulado trimestral	2013	2014	2015
Dez - Jan - Fev	-129,3	-21,0	87,7
Mar - Abr - Mai	-16,8	48,1	186,7
Jun - Jul - Ago	108,2	-72,9	-16,4
Set - Out - Nov	-11,7	-142,0	197,6

média, com uma anomalia positiva.

Tabela 4.5 - Dados da média trimestral de AOD de 2013 a 2015.

Média trimestral de AOD	2013	2014	2015	Climatologia
Dez - Jan - Fev	0,219	0,183	0,126	0,233
Mar - Abr - Mai	0,174	0,176	0,143	0,171
Jun - Jul - Ago	0,192	0,178	-	0,197
Set - Out - Nov	0,262	0,306	-	0,320

Aqui podemos ver que todos os trimestres, com exceção de março a maio de 2013 e 2014, estão com a anomalia negativa. Isto mostra que a AOD dos anos de 2013 a 2015 é menor do que a média esperada, apesar do período de seca. É provável que isto esteja acontecendo por causa da diminuição da emissão de poluição veicular, apesar da frota de veículos ter aumentado (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO,).

Com exceção dos meses de março a maio, o ano de 2014 foi o que apresentou maiores quantidades de Mp10, devido à seca. Em todos os trimestres o ano de 2015 foi o ano com menor quantidade de Mp10, isto se deve possivelmente à diminuição da

Tabela 4.6 - Dados da anomalia trimestral de AOD de 2013 a 2015.

Anomalia trimestral de AOD	2013	2014	2015
Dez - Jan - Fev	-0,014	-0,05	-0,106
Mar - Abr - Mai	0,004	0,005	-0,028
Jun - Jul - Ago	-0,005	-0,019	-
Set - Out - Nov	-0,058	-0,014	-

Tabela 4.7 - Dados da média trimestral de Mp10 de 2013 a 2015.

Média trimestral de Mp10	2013	2014	2015
Dez - Jan - Fev	24,9	30,5	24,3
Mar - Abr - Mai	33,5	31,2	26,3
Jun - Jul - Ago	40,0	43,9	37,4
Set - Out - Nov	32,1	35,8	29,0

emissão de poluição veicular e também à elevada precipitação deste ano.

Tabela 4.8 - Dados da média trimestral de Mp2,5 de 2013 a 2015.

Média trimestral de Mp2,5	2013	2014	2015
Dez - Jan - Fev	13,7	17,7	14,5
Mar - Abr - Mai	22,7	17,7	15,6
Jun - Jul - Ago	25,4	24,9	22,7
Set - Out - Nov	18,3	21,3	17,9

Para o Mp2,5, o ano de 2015 foi o que apresentou as menores médias trimestrais, exceto entre os meses de dezembro a janeiro. Já o ano de 2014 apresentou as maiores médias entre setembro e fevereiro. 2014 e 2015 apresentaram uma média anual muito próxima.

4.5 Análise da correlação

Na Tabela 4.9, no Lag 0 a correlação é positiva, como o esperado, indicando que o AOD está relacionado diretamente com o valor de Mp10. Pode-se perceber que a correlação nos Lags -3 e -2 são maiores que 0,5, que segundo Cohen (1988) pode ser considerada uma correlação forte. Isso significa que um aumento no Mp10 tem uma forte relação com o aumento de AOD nos meses seguintes, como era esperado.

Tabela 4.9 - Correlação entre dados de AOD e Mp10

LAG	Correlação
-3	0,542765617
-2	0,544646382
-1	0,414176613
0	0,200669736
1	-0,130195662
2	-0,320638448
3	-0,375348538

Tabela 4.10 - Correlação entre dados de precipitação e AOD

LAG	Correlação
-3	0,527287185
-2	0,342796445
-1	0,176579461
0	-0,079139970
1	-0,274845630
2	-0,357213438
3	-0,442661107

Na Tabela 4.10 pode-se perceber que a única correlação considerada forte é a do Lag -3. Isto nos mostra que o aumento de AOD possui uma certa relação com o aumento na precipitação 3 meses depois. Este resultado deve ser melhor investigado. Além disso, no Lag 0 a correlação também é negativa.

Tabela 4.11 - Correlação entre dados de precipitação e Mp10

LAG	Correlação
-3	-0,038391195
-2	-0,270282149
-1	-0,442521095
0	-0,565598667
1	-0,466788322
2	-0,348696172
3	-0,107013322

Já na Tabela 4.11 podemos ver que a única correlação considerada forte por Cohen

(1988) é o r no Lag 0. Além disso, ela é negativa, ou seja, o aumento na precipitação está relacionado com a diminuição do AOD. Isto acontece por causa da deposição úmida, que é quando a chuva, ao precipitar, arrasta consigo as partículas de material particulado para o solo, fazendo com que a quantidade de Mp_{10} suspensa no ar diminua.

5 CONCLUSÕES

Na Região Metropolitana de São Paulo os períodos de seca apresentam em geral uma maior espessura óptica dos aerossóis. A espessura óptica dos aerossóis também aumenta em estações frias, isto se deve à inversão térmica que impede que os aerossóis de dispersarem, e diminui em estações mais quentes, mais favoráveis à dispersão.

Outro fator que resulta no aumento na AOD são as queimadas na Região Central da América do Sul no período da seca, que normalmente começa em abril e pode ir até agosto ou setembro. Porém, nos anos de seca os outros meses não tiveram a precipitação que era esperada, então os meses de outubro, novembro e dezembro também foram secos.

Com o passar dos anos, a quantidade de Material Particulado suspenso no ar diminuiu junto com a emissão veicular. Apesar da frota veicular ter aumentado, os carros mais novos estão emitindo menos poluentes, e isto contribui para a diminuição de Mp10. A umidade também influencia na quantidade de Material Particulado, já que diminui o número de queimadas com combustões incompletas que geram mais Black Carbon, e é responsável pela deposição úmida.

Existe uma forte correlação entre a quantidade de Mp10 e o valor de AOD, indicando que eles se relacionam diretamente, já que o aumento na quantidade de partículas suspensas no ar provavelmente resultará no aumento da espessura óptica. A precipitação tem uma relação indireta com Mp10, ou seja, o aumento da precipitação resulta na diminuição de Material Particulado suspenso, e direta com o AOD de alguns meses anteriores, sugerindo que o aumento de AOD pode influenciar a precipitação de alguns meses depois.

Assim sendo, a precipitação e os aerossóis tem uma correlação relativamente forte, tanto com o AOD quanto com o Material Particulado. Porém não se sabe se a diminuição é causa ou consequência deste processo. Estudos mais detalhados deverão ser realizados a fim de melhor investigar a relação entre as variáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEROSOL ROBOTIC NETWORK. **Data - Acces and Dissmeination Tools**. 2013. Available from: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/data.html>. Access in: 26 de novembro de 2015. 5

BORMA L. S. E NOBRE, C. A. **Secas na Amazônia: causas e consequências**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 9

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Produtos**. 2016. Available from: <<http://bancodedados.cptec.inpe.br/>>. Access in: 26 de novembro de 2015. 6

CLOUDS AND THE EARTH'S RADIANT ENERGY SYSTEM. **CERES Data Products**. 2015. Available from: <http://ceres.larc.nasa.gov/order_data.php>. Access in: 26 de novembro de 2015. 5

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale, New Jersey: Erlbaum, 1988. 4, 18, 20

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Emissões veiculares no Estado de São Paulo**. São Paulo. 13, 17

_____. **Histórico**. 2015. Available from: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/institucional/historico/>>. Access in: 26 de novembro de 2015. 6

_____. **Poluentes: Material Particulado (MP)**. 2015. Available from: <<http://ar.cetesb.sp.gov.br/poluentes/>>. Access in: 17 de setembro de 2015. 1

CONTRIBUTION OF WORKING GROUP I TO THE FOURTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1, 2

EBC AGÊNCIA BRASIL. **Chuvas no sul e no sudeste podem voltar ao normal só em 2016**. 29 de março de 2014. Available from: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2014-03/>>

[juliana-chuvas-no-sul-e-no-sudeste-podem-voltar-ao-normal-so-em-2016](#)>. Access in: 20 de janeiro 2016. 16

FILHO D. B. F. E JÚNIOR, J. A. S. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de pearson. **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115 a 146, 2009. 2, 4

FREITAS, S. R.; LONGO K. M. AND SILVA DIAS, M. A. F.; DIAS, P. L. S. Emissões de queimadas em ecossistemas da américa do sul. **Scielo Brasil**, v. 19, n. 53, Fevereiro de 2005. 11

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Lei da informação**. 2011.

Available from: <[http:](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=lei_informacao)

[//www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=lei_informacao](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=lei_informacao)>.

Access in: 26 de novembro de 2015. 6

REDDINGTON, C. L.; BUTT, E. W.; RIDLEY, D. A.; ARTAXO, P.; MOGAN, W. T.; COE, H.; SPRACKLEN, D. V. Air quality and human health improvements from reduction in deforestation-related fire in brazil. **Nature geoscience**, 16 set. 2015. 1

ROSARIO, N. M. **Introdução e Avaliação Numérica do Impacto do Efeito Radiativo Direto no Perfil Termodinâmico da Baixa Troposfera. Estudo da Variabilidade das Propriedades Ópticas dos Aerossóis sobre a América do Sul e dos Impactos do Efeito Radiativo Direto das Partículas de Queimadas**. 212 p. (INPE). Tese (Doutorado) — Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São José dos Campos, 2011. 1, 2, 16

SUPER INTERESSANTE. **Os 10 maiores períodos de seca no Brasil**. 19 de agosto de 2014. Available from: <<http://super.abril.com.br/blogs/superlistas/os-10-maiores-periodos-de-seca-no-brasil/>>. Access in: 15 de janeiro de 2016. 10

VALE, F. X. R. Novas ferramentas aplicadas a fitopatologia. **Fitopatologia Brasileira**, v. 31, n. Suplemento, p. 62 e 63, aug. 2006. 4

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.