



Boletim Goiano de Geografia

E-ISSN: 1984-8501

boletimgoianogeo@yahoo.com.br

Universidade Federal de Goiás

Brasil

de Souza, Amaury; da Silva Santos, Débora Aparecida; Gonçalves Caldin, Lariane  
Priscila

POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA URBANA A PARTIR DE DADOS DE AEROSSÓIS MODIS:  
EFEITO DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS

Boletim Goiano de Geografia, vol. 37, núm. 3, septiembre-diciembre, 2017, pp. 466-483

Universidade Federal de Goiás

Goiás, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=337154296006>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA URBANA A PARTIR DE DADOS DE AEROSSÓIS MODIS: EFEITO DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS

URBAN AIR POLLUTION FROM AEROSOL DATA MODIS:  
EFFECT OF METEOROLOGICAL PARAMETERS

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA URBANA A PARTIR DE DATOS DE LOS  
AEROSOL MODIS: EFECTO DE LOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS

Amaury de Souza – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul –  
Campo Grande – Mato Grosso do Sul – Brasil  
amaury.de@uol.com.br

Débora Aparecida da Silva Santos – Universidade Federal de Mato Grosso –  
Rondonópolis – Mato Grosso – Brasil  
deboraassantos@hotmail.com

Lariane Priscila Gonçalves Caldin – Universidade Federal de Mato Grosso –  
Rondonópolis – Mato Grosso – Brasil  
pry\_caldin@hotmail.com

## Resumo

Dados de espessura óptica de aerossóis gerados por satélite (AOT) podem ser utilizados para monitorar a poluição do ar. No entanto, eles estão sujeitos ao efeito de vários parâmetros meteorológicos. Analisa-se a influência de quatro parâmetros meteorológicos (índice de claridade, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento) na estimativa de partículas (PM) de dados MODIS AOT para a cidade de Campo Grande durante o ano de 2008. As correlações dos dados da PM com os dados da AOT foram divididas em quatro estações cronológicas. Determinou-se um coeficiente de correlação mínimo igual a 0.48 para o inverno, mas houve uma correlação muito maior ( $r > 0.80$ ) para as estações de verão e outono. Análises semelhantes realizadas após todas as observações foram separadas em quatro grupos com base na sua similaridade meteorológica, utilizando-se a análise de K-Means e, dos quatro grupos, três apresentam coeficiente de correlação superior a 0.70. A análise de agrupamento permite que o nível de poluição seja determinado com mais precisão a partir de dados MODIS AOT, à temperatura e umidade relativa mais elevada, mas para menores velocidades do vento e índices de claridade.

Palavras-chave: Aerossóis, monitoramento, poluição, estações, modelamento.

## Abstract

Data of aerosol optical depth generated by satellite (AOT) can be used to monitor air pollution. However they are subject to the effect of several weather parameters. The influence of four weather parameters (index of clarity, temperature of the air, relative humidity and speed of the wind) is analyzed in the particles calculation (PM) of data MODIS AOT for the city of Campo Grande during the year of 2008. The PM correlations of the data with the AOT data were divided into four stations time series. A minimum correlation coefficient was determined of 0.48 for the winter, but there was a much higher correlation ( $r > 0.80$ ) for the Summer and

Autumn seasons. Similar analyzes performed after all observations were separated into four groups based on their meteorological similarity using the analysis of k-Means and three of the four groups have a correlation coefficient higher than 0.70. The cluster analysis allows the pollution level to be determined more accurately from MODIS AOT data at higher temperature and relative humidity, but for lower wind speed and clarity levels.

**Keywords:** Aerosol, monitoring, pollution, stations, modeling.

## Resumen

Datos de espesor óptico de aerosoles generados por satélite (AOT) se pueden utilizar para controlar la contaminación del aire. Sin embargo, están sujetos a los efectos de varios parámetros meteorológicos. Se analiza la influencia de cuatro parámetros meteorológicos (índice de claridad, la temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) en la estimación de partículas (PM) a partir de datos MODIS AOT para la ciudad de Campo Grande durante el año 2008. Las correlaciones los datos de PM con datos de la AOT se dividen en cuatro estaciones cronológicas. Se determinó un coeficiente de correlación mínimo igual a 0,48 para el invierno, pero hubo una correlación mucho mayor ( $r > 0,80$ ) para las temporadas de verano y otoño. Análisis similares realizados después de todas las observaciones se separaron en cuatro grupos basados en su similitud tiempo meteorológico, utilizando el análisis de k-Means y de los cuatro grupos, tres presentaron coeficiente de correlación mayor que 0,70. El análisis de la agrupación permite que el nivel de contaminación se determine con mayor precisión a partir de datos MODIS AOT, a la temperatura y humedad relativa más alta, pero para pequeñas tasas de velocidad del viento y la claridad.

Palabras claves: Aerosoles, monitoreo, contaminación, estaciones, modelado.

## Introdução

Aerossóis são partículas sólidas ou líquidas suspensas na atmosfera que servem como importantes indicadores das mudanças climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). O conhecimento de suas propriedades ópticas e microfísicas constitui a base da pesquisa sobre os efeitos ambientais e climáticos dos aerossóis. Estas propriedades físicas e químicas dos aerossóis caracterizam-se por uma elevada variabilidade espacial e temporal. O estudo da sua influência sobre as condições ambientais e climáticas depende da determinação das suas distribuições espaciais e temporais, bem como da estimativa das suas propriedades ópticas. As propriedades ópticas e as características da sua formação em núcleos de condensação de nuvens são governadas pela composição química do aerossol, pela distribuição do tamanho das partículas e pela capacidade higroscópica das partículas. As fontes e os mecanismos de emissão indicam que diferentes tipos de aerossóis têm características ópticas e de radiação variadas (Eck et al., 1999; Dubovik et al., 2002; Kim et al., 2004).

A poluição atmosférica é uma questão global que causa grandes perdas econômicas. É particularmente grave nos países em desenvolvimento, nos quais a qualidade do ar tem se deteriorado muito

e de forma consistente, principalmente em nações que embarcam em ambiciosos programas de revitalização e reforma econômica. A rápida industrialização, incluindo a automobilística, juntamente com a construção civil, contribui para o aumento das partículas no ar. A poluição do ar exerce graves consequências sobre o meio ambiente, a vida e a saúde das pessoas, ameaçando a sustentabilidade do desenvolvimento social e econômico (Wang; Zha, 2006).

Nesta pesquisa estuda-se o efeito dos parâmetros meteorológicos sobre o monitoramento da poluição do ar, conforme registrado em estações de vigilância terrestres a partir de dados AOT derivados de MODIS para a cidade de Campo Grande, MS, Brasil. Além disso, examinam-se as correlações entre as grandezas consideradas como variáveis meteorológicas comuns que afetam os aerossóis: temperatura do ar (T), índice de claridade (Kt), umidade relativa do ar (U) e velocidade do vento (V) (Zakey; Abdelwahab; Makar., 2004; Suresh; Desa, 2005; Lee; Kim, 2007), com os dados sazonais de AOT. As análises conduzem à avaliação dos efeitos dessas variáveis nas condições meteorológicas e na espessura da camada de aerossóis.

## Materiais e métodos

A qualidade do ar é geralmente monitorada em estações terrestres fixas. Apesar das medições no solo serem capazes de indicar o nível de concentração de poluentes atmosféricos e suas variações temporais de forma precisa, tal método de monitoramento é limitado pelo seu alto custo e pela escassa cobertura espacial. O número limitado de estações no solo não consegue representar o padrão espacial de concentração de poluentes numa escala ampla. Além disso, as observações feitas na superfície, ou parte dela, não podem capturar a variação vertical de poluentes acima dela. A detecção remota é muito mais vantajosa, comparativamente, pois ela é capaz de fornecer informações sobre a poluição do ar em uma área extensa, de forma rápida e eficiente. Ela está se tornando uma alternativa aceitável à observação do solo, graças ao lançamento de sensores projetados especificamente para estudar aerossóis. Os resultados desse método são um complemento às observações terrestres (Mao et al., 2002).

O produto aerossol proveniente de dados por satélite não só fornece um meio de estudar o clima global e regional, mas também permite o

estudo da poluição do ar em áreas urbanas a partir do espaço. Devido à capacidade melhorada dos satélites de observação da Terra, as imagens espaciais têm encontrado aplicações crescentes no monitoramento da qualidade do ar urbano em conjunto com dados terrestres (Engel-Cox; Hoff; Haymet, 2004).

Dos diversos dados de satélites disponíveis, a imagem de Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) tem a melhor resolução temporal, que é de 12 horas. Tal característica é altamente desejável no estudo da composição atmosférica em geral e dos aerossóis em particular. A imagem MODIS é capaz de monitorar a poluição do ar em uma escala que vai de local a regional, e até global (Chu et al., 2003; Engel-Cox et al., 2004; Gupta et al., 2006). Quando usados em conjunto com observações no solo, os dados de espessura óptica de aerossóis MODIS (AOT) podem ser úteis para monitorar com precisão os poluentes para toda uma região (Hutchison; Smith; Faruqui, 2004, 2005), como por exemplo, o estado do Mato Grosso do Sul no Brasil.

O princípio subjacente à detecção remota da qualidade do ar a partir do espaço baseia-se numa relação entre a refletância registrada nos dados de satélite e o nível de poluição atmosférica observado no solo. Li et al. (2004) relataram um alto grau de correlação entre as concentrações de partículas observadas no solo e o AOT derivado de MODIS em Hong Kong. Além disso, existe um alto nível de correlação entre o índice de poluição atmosférica (IPA) divulgado por muitas estações municipais de monitoramento ambiental da China e AOT (Liu et al., 2003).

A existência de tal correlação levanta a viabilidade de estudar a poluição do ar em áreas urbanas dos produtos AOT de dados MODIS que têm uma resolução espacial de 10 km. Essa viabilidade foi corroborada por Li et al. (2003), comparando os produtos MODIS AOT com os dados correspondentes obtidos em 2001 com um *sunphotometer* para a região de Beijing. Wang e Christopher (2003) obtiveram um coeficiente de correlação de 0.7 entre AOT derivado de satélites e partículas finas (PM) medidas na superfície em sete localidades no condado de Jefferson, no Alabama. Achados semelhantes foram obtidos em várias cidades do delta do rio Yangtze (Liu et al., 2003). Portanto, o produto AOT derivado de MODIS fornece um novo meio para estudar a poluição do ar.

Há uma correspondência única entre PM e IPA em cidades chinesas nos dias em que os poluentes do ar são dominados por PM10 ao invés de

poluentes gasosos como CO, SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>. Assim, é possível converter esses dois parâmetros de forma intercambiável com base nessa relação entre IPA e PM10. Ao mesmo tempo, IPA pode ser refletida por AOT, como IPA corresponde a um determinado nível de concentração de PM.

No entanto, deve ser enfatizado que PM ou IPA não são absolutamente sinônimos de AOT. Ao contrário, cada um tem seu próprio significado físico. PM ou IPA são determinadas pela massa de partículas e referem-se principalmente à concentração de poluentes sólidos gerados perto da superfície da Terra a partir dos escapes de veículos e descargas de chaminés. Não abrangem os poluentes gasosos como CO, SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>. Esse nível de concentração está fortemente sujeito à turbulência do ar causada pela instabilidade atmosférica e pela mistura da camada vertical. AOT refere-se ao coeficiente cumulativo de extinção vertical da radiação solar, que é determinado pela quantidade total de aerossóis sobre a coluna de ar e seu diâmetro. Assim, exibe um padrão espaço temporal distinto de variação.

Ao estudar a correlação entre AOT e PM/ IPA, a variação sazonal é geralmente examinada dividindo-se todas as observações disponíveis em quatro estações cronológicas e, em seguida, a correlação entre as duas variáveis é examinada separadamente para cada estação (Wang, 2006). No entanto, visto que a sazonalidade está relacionada em grande parte com a temperatura do ar, mas não outros parâmetros meteorológicos, este tratamento não pode revelar as condições meteorológicas sob as quais PM/ IPA é monitorado a partir de AOT mais confiável.

Essa limitação pode ser superada pelo agrupamento de observações estatísticas em termos de semelhança meteorológica. Isso contribuirá positivamente para aumentar nossa compreensão da influência dos parâmetros meteorológicos sobre o acompanhamento da qualidade do ar por meio de sensoriamento remoto, o que é muito importante para evitar estimativas errôneas.

## Dados MODIS AOT e análises

MODIS é um sensor a bordo dos satélites Terra/ Aqua Earth Observation System. Suas 36 bandas de ondas espectrais abrangem a parte da luz visível, infravermelho próximo e infravermelho do espectro com a resolução espacial mais fina, sendo 250 m em uma largura de faixa

de 2.330 km. Tais propriedades de imagem tornam os dados MODIS o candidato ideal para a medição remota de aerossóis terrestres (King et al., 1992).

Os produtos de aerossóis MODIS são derivados dos canais 1 e 3 (luz visível) com o auxílio da banda 7 (infravermelho próximo), usando o algoritmo de pixel escuro em uma resolução espacial de 10 km. Nessa banda, as propriedades radiométricas de objetos escuros estão correlacionadas de perto com sua refletância de solo nas faixas 1 e 3 (Kaufman; Tanré; Remer; Vermote; Chu; Holben, 1997; Kaufman; Wald; Remer; Gao; Li; Flynn, 1997). Assim, a refletância do solo nas faixas 1 e 3 torna-se conhecida. O MODIS AOT derivado é representado na forma de níveis de cinza com valores entre 0 e 3.000 (unidade: 10E-03).

Os dados AOT analisados neste estudo referem-se ao período de 2008. Eles são os valores médios de pixels em toda a área da cidade de Campo Grande. O índice de claridade  $K_t$  determina a cobertura do céu, definido como a razão entre a radiação solar incidente  $R_g$  e a radiação no topo da atmosfera  $R_0$ , ambas medidas em MJ/ m<sup>2</sup>/ dia:

$$K_t = \frac{R_g}{R_0}$$

O índice de claridade foi determinado pelo tipo de cobertura do céu de acordo com a metodologia de Ricieri (1998). Para o intervalo compreendido entre  $0 < K_t < 0.30$ , as radiações global e difusa são praticamente iguais e a radiação direta está próxima a zero, classificando o céu nessas condições como “nublado”. Para valores compreendidos entre  $0.3 \leq K_t \leq 0.65$ , as radiações difusa e direta mantêm-se próximas e a classificação do céu nesse caso é de “parcialmente nublado”. Para valores definidos por  $0.65 < K_t < 1.0$ , a radiação direta se aproxima da global, enquanto a difusa tende ao mínimo. Nessas condições denomina-se o céu de “limpo”.

Todos os dados coletados foram agrupados de forma a acompanhar as quatro estações cronológicas: primavera (outubro-dezembro), verão (janeiro-março), outono (abril-junho) e inverno (julho-setembro). Os quatro parâmetros meteorológicos foram estatisticamente analisados em cada estação. Ademais, a PM foi correlacionada com AOT separadamente por estação.

A mesma análise foi realizada posteriormente sobre as observações, que foram reunidas em quatro grupos usando-se o método de agrupamento de K-Means. Foram calculados o máximo, o mínimo, a média e o desvio padrão de cada parâmetro meteorológico em cada grupo, juntamente com os dados PM<sub>10</sub>. Suas propriedades foram comparadas às suas contrapartes nos resultados da estação analisada.

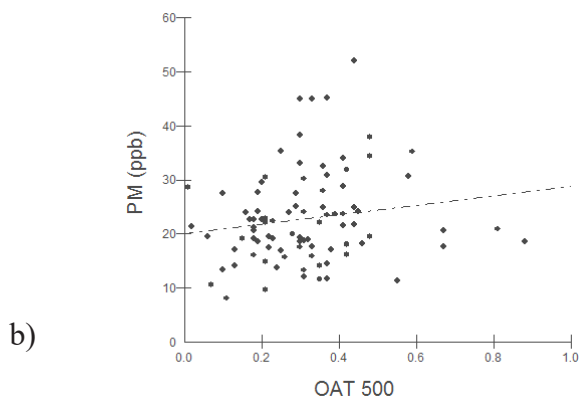
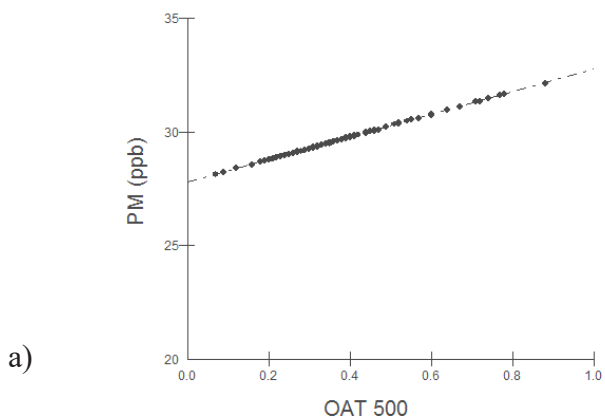
## Resultados e discussão

### *Correlação sazonal do PM e AOT*

Os gráficos de dispersão representados na Figura 1 revelam que a relação entre PM e AOT é linear em todas as quatro estações. No entanto, a precisão do monitoramento do PM e da AOT varia com a sazonalidade. A relação de egressão é mais forte no verão, representada na Figura 1.b, e mais fraca quanto a que ocorre no outono, representada na Figura 1.d. Portanto, a PM pode ser estimada de forma bastante confiável a partir de AOT nas estações de verão, da primavera e do inverno, com  $R^2 > 0.6$   $R^2 > 0.6$ , mas é menos precisa no outono, em que  $R^2 < 0.3$   $R^2 < 0.3$ .

É necessário examinar as condições meteorológicas em diferentes estações, a fim de identificar quaisquer padrões que sejam responsáveis pelas variações sazonais observadas no valor R<sup>2</sup>. Conforme mostrado na Tabela 1, o PM tem um coeficiente de correlação similarmente baixo, de cerca de 0.3 com AOT no outono, mas um coeficiente notavelmente maior, de cerca de 0.70 no verão e na primavera. O exame das figuras provenientes da Tabela 1 não traz nenhum padrão meteorológico óbvio para a estreita correlação durante o verão e a primavera. A temperatura no inverno é similarmente alta, em torno de 18 °C. A umidade relativa do ar é mais alta no verão, porém apresenta valores muito próximos durante a primavera e o outono.





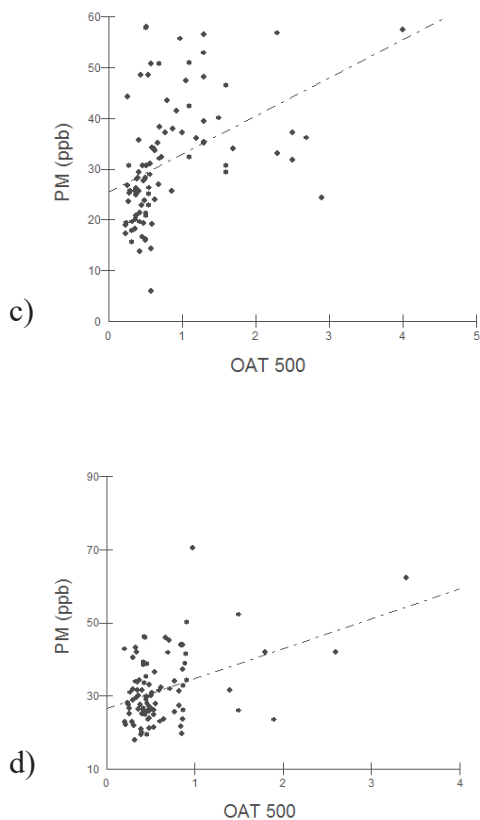


Figura 1 - Correlação entre PM e o valor AOT MODIS derivado por temporada

Legenda: a) verão; b) outono; c) inverno; e d) primavera.

Fonte: Elaborada pelos autores (2017)

		<b>AOT_500</b>	<b>T °C</b>	<b>U (%)</b>	<b>V (m/s)</b>	<b>PM (ppb)</b>	<b>Kt</b>
<b>Verão (0,92)</b>	Média	0,38	30,09	91,68	5,29	29,68	0,53
	D.P	0,16	1,86	4,2	1,4	0,81	0,01
	Mínimo	0,07	23,9	79	2,4	28,14	0,48
	Máximo	0,88	33,2	96	9,4	32,16	0,56
	N	91	91	91	91	91	91
<b>Outono (0,72)</b>	Média	0,32	27,06	88,19	5,3	22,86	0,49
	D.P	0,15	3,7	6,83	1,42	8,43	0,04
	Mínimo	0,01	15,2	72	3	8,1	0,37
	Máximo	0,88	32,6	97	10,3	52,08	0,56
	N	91	91	91	91	91	91
<b>Inverno (0,48)</b>	Média	0,82	30,4	69,55	6,83	31,72	0,49
	D.P	0,68	3,68	16,14	1,64	11,89	0,03
	Mínimo	0,23	18,8	42	4,2	5,93	0,41
	Máximo	4	38,2	96	11,1	57,98	0,56
	N	92	92	92	92	92	92
<b>Primavera (0,52)</b>	Média	0,63	32,07	84,41	6,34	31,76	0,53
	D.P	0,48	2,76	10,49	1,75	9,45	0,02
	Mínimo	0,21	23	44	3,4	17,93	0,47
	Máximo	3,4	38,3	96	10,8	70,51	0,57
	N	92	92	92	92	92	92

**Tabela 1 - Coeficiente de correlação e estatística descritiva dos quatro parâmetros meteorológicos por temporada**

Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

Basicamente, o outono e o verão apresentam climas mais calmos, enquanto a primavera e o inverno são mais ventosos. Tais variações indicam que raramente uma única variável meteorológica é a responsável

pela correlação. Em vez disso, são os efeitos conjuntos de uma série de variáveis que tornam a PM10 apta a ser estimada a partir da AOT. Em suma, é impossível determinar as condições meteorológicas exatas que são responsáveis pela alta correlação nas estações de verão, inverno e primavera, e a baixa correlação no outono. A ausência de qualquer padrão meteorológico identificável responsável pelo coeficiente de correlação alta/baixa na Tabela 1 é devido em grande parte à partição cronológica dos dados, o que resulta na ocorrência do mesmo valor em várias estações.

### Correlação baseada em dados agrupados

Com o objetivo de revelar a contribuição de variáveis meteorológicas individuais para a correlação observada entre AOT e PM10, foi decidido que todo o conjunto de dados de 365 observações deveria ser agrupado em quatro categorias, o mesmo número que as quatro estações, a fim de identificar o impacto dos parâmetros individuais na correlação. Tal agrupamento foi baseado na análise de agrupamento de K-Means, em que o número de iterações foi especificado como 20. Essa análise de agrupamento foi repetida singularmente cinco vezes para um dos quatro critérios meteorológicos, e uma vez para os quatro parâmetros.

Depois de agrupadas, todas as variáveis meteorológicas têm uma gama de valor própria única, representadas na Tabela 2, em contraste com aquelas apresentadas na Tabela 1. Os valores se alteram gradualmente a partir do primeiro para o último grupo. A análise de correlação indica que o agrupamento de todas as observações em quatro categorias é propício para melhorar a correlação entre PM10 e AOT, conforme a Tabela 3. Além da umidade relativa e da velocidade do vento, a temperatura e o índice de claridade têm apenas um grupo com coeficiente de correlação menor do que a sua contraparte mínima na Tabela 1, por exemplo, menor que 0.48. Os coeficientes nos outros três grupos tornaram-se muito altos, maiores que 0.58. Só a temperatura e a umidade relativa do ar produzem um coeficiente de correlação que varia regularmente do grupo 1 para o grupo 4. As temperaturas da superfície vão de 38°C nos grupos 1, 15 e 3, em comparação com os grupos. Além disso, o coeficiente máximo ocorre no primeiro grupo.

		<b>AOT_500</b>	<b>T °C</b>	<b>U (%)</b>	<b>V (m/s)</b>	<b>PM (ppb)</b>	<b>Kt</b>
<b>Grupo 1 (0.48)</b>	Média	0.86	32.49	56.89	7.15	32.37	0.50
	D.P	0.69	3.03	7.82	1.67	11.70	0.03
	Mínimo	0.23	27.30	42.00	4.20	5.93	0.44
	Máximo	4.00	38.30	70.00	10.80	57.98	0.57
	N	55	55	55	55	55	55
<b>Grupo 2 (0.72)</b>	Média	0.44	30.74	78.43	5.50	23.60	0.51
	D.P	0.33	2.97	5.48	1.28	6.46	0.03
	Mínimo	0.07	19.20	55.00	3.00	8.10	0.40
	Máximo	2.50	37.60	86.00	10.10	38.01	0.57
	N	81	81	81	81	81	81
<b>Grupo 3 (0.87)</b>	Média	0.43	28.88	92.27	5.64	27.02	0.52
	D.P	0.30	3.42	3.22	1.58	5.39	0.03
	Mínimo	0.01	15.20	81.00	2.40	9.72	0.37
	Máximo	2.90	35.10	97.00	10.70	38.56	0.57
	N	192	192	192	192	192	192
<b>Grupo 4 (0.83)</b>	Média	0.85	29.47	87.54	6.72	46.07	0.51
	D.P	0.70	3.97	6.71	2.02	7.18	0.04
	Mínimo	0.21	18.80	68.00	3.50	38.01	0.41
	Máximo	3.40	36.10	95.00	11.10	70.51	0.56
	N	37	37	37	37	37	37

**Tabela 2 - Coeficiente de correlação e propriedades estatísticas dos quatro parâmetros meteorológicos após análise de agrupamento com base em um único parâmetro**

Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

A análise acima demonstra que é cada vez mais confiável monitorar PM<sub>10</sub> a partir de AOT de detecção remota quando a temperatura e a umidade são relativamente altas, mas o índice de claridade e a velocidade

do vento são baixos. Inversamente, baixas temperaturas e umidades combinadas com altos valores de velocidade do vento e do índice de claridade enfraquecem a correlação. Tais condições meteorológicas são capazes de considerar a alteração na correlação completamente, porque o AOT é produzido localmente e as partículas produzidas localmente não estão dispersas.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
T(°C)	0.44	0.67	0.7	0.88
U(%)	0.58	0.67	0.73	0.83
v(m/s)	0.78	0.51	0.75	0.75
Kt	0.81	0.47	0.77	0.58

Tabela 3 - Coeficientes de correlação entre PM10 e AOT após Análise de agrupamento baseada em um único parâmetro meteorológico

Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

Conforme exibido na Figura 1, o grupo 1 apresenta o maior valor para R2, igual a 0.92. Para os outros dois grupos, no entanto, o valor R2 também é relativamente elevado, igual a 0.72 para o outono; e 0.52 para a primavera. Isso significa que o agrupamento melhora a correlação entre PM10 e AOT. O modelo mais confiável utiliza a seguinte fórmula:

$$PM10 = 27.8 + 4.97AOT_{500}$$

$$R2 = 0.92$$

Após o agrupamento, as quatro variáveis meteorológicas em um grupo são homogeneizadas, enquanto a variação intragrupo torna-se mais distinta do que as contrapartes baseadas na estação. A eficácia da identificação do controle meteorológico sobre a proximidade da correlação é uma análise comparativa do desvio-padrão dos parâmetros meteorológicos. Todos os quatro grupos constituem menos da metade da variação total, exceto a temperatura. A percentagem combinada é mais baixa para a umidade relativa, mas muito próxima do limiar de 50%

para o índice de claridade e a velocidade do vento. A distribuição dessas percentagens demonstra, mais uma vez, que o agrupamento de variáveis meteorológicas é melhor para identificar as condições em que AOT é mais equivalente a PM10. Isto é explicado pelo fato que, quando as estações são definidas principalmente pelo valor da temperatura, não ocorrem variações significativas através das fronteiras entre duas estações. De fato, grandes variações nessas flutuações dos índices podem ocorrer separadamente nos dias de fronteira, mas o agrupamento baseado em qualquer um dos parâmetros meteorológicos é capaz de produzir uma adesão muito mais homogênea dentro de um grupo. Esse modo agrupado de análise de dados é mais propício para revelar as condições meteorológicas em que a PM10 é melhor monitorada a partir de AOT.

#### Capacidade de monitorização da poluição atmosférica

Como mostrado na Tabela 4, todas as estações têm um alto coeficiente de correlação com as observações totais, se analisadas por estação. A poluição do ar para o grupo 1 (55) das observações não pode ser monitorada de forma confiável. Essa elevada percentagem sugere que os dias em que a qualidade do ar pode ser monitorada de forma confiável através da detecção remota são bastante limitados. Por comparação, o número de observações não pode ser estimado de forma confiável, apresentando, por exemplo, um grande erro quadrático médio de 10.46 após ter sido agrupado. Isso significa que o agrupamento por similaridade meteorológica é superior a análise baseada na estação na redução do número de observações, que não permitem que a poluição do ar seja adequadamente detectada.

	Grupo 1	Verão	Grupo 2	Outono	Grupo 3	Inverno	Grupo 4	Primavera
Número de observações	55	91	81	91	192	92	37	92
% total	15.07	24.93	22.19	24.93	52.60	25.21	10.14	25.21
PM10 observado	33.37	29.68	23.60	22.86	27.02	31.72	46.07	31.76
Correlação	0.48	0.92	0.72	0.72	0.87	0.87	0.83	0.83
EQM	10.49	3.09	8.65	10.54	6.17	10.82	15.44	8.72

Tabela 4 - Comparação do nível de poluição do ar por temporada e por análise de agrupamento Fonte: Elaborada pelos autores (2017).

Uma análise mais detalhada da Tabela 4 mostra que a estações do ano mais poluídas são a primavera, com  $PM_{10} = 31.76$  ppb, e o inverno com  $31.72$  ppb, enquanto o verão tem o menor nível de poluição com  $PM_{10} = 22.86$  ppb. O nível de precisão de monitoramento a partir dos dados MODIS está inversamente relacionado com o nível de poluição. As estações de inverno e primavera com  $PM_{10}$  maiores têm um coeficiente de correlação mais baixo e um EQM elevado. Além disso, o número de dias em que o monitoramento por sensoriamento remoto é viável, também é limitado. Isso significa que a precisão do monitoramento da poluição do ar é baixa quando o nível de poluição é relativamente alto para um número limitado de dias. Tal condição não é ideal, pois na realidade é a situação de poluição mais grave que deve ser monitorada com maior precisão.

## Conclusão

As informações AOT adquiridas a partir de dados MODIS podem refletir a quantidade de partículas em suspensão na atmosfera. Esse indicador de partículas acumuladas sobre a coluna vertical de ar pode apresentar uma estreita correlação com o  $PM_{10}$  observado no solo, em determinadas épocas do ano, sujeito às condições meteorológicas. Em geral, a correlação é forte para todas as observações sob uma variada gama de condições ambientais. Sazonalmente, a relação é mais direta no verão e outono, com um coeficiente maior ou igual a 0.80. A análise de dados em clusters preserva uma estreita correlação entre  $PM_{10}$  e AOT para



três dos quatro grupos. Além disso, o número de dias em que a poluição do ar não pode ser monitorada de forma confiável é reduzido de 192 para 37, depois que todas as observações são agrupadas por semelhança meteorológica. É mais confiável para monitorar MP10 a partir de dados MODIS AOT quando a temperatura e a umidade relativa são elevadas, com baixa velocidade de vento e índice de claridade. Existe uma relação inversa entre o nível de poluição e a precisão com a qual ela é monitorada a partir dos dados MODIS. Esses resultados devem servir como orientação útil para a seleção das condições meteorológicas apropriadas em que a poluição do ar pode ser monitorada de forma confiável a partir de dados MODIS AOT.

## Referências

- CHU, D. A. et al. Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System – Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *J. Geophys. Res.*, v. 108, D21, p. 466, 2003.
- DUBOVIK, O. et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *J. Atmos. Sci.*, v. 59, n. 3, p. 590-608, 2002.
- ECK, T. F. et al. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols. *J. Geophys. Res.*, v. 104, D24, p. 31333-31349, 1999.
- ENGEL-COX, J. A.; HOFF, R. M.; HAYMET, A. D. Recommendations on the use of satellite remote-sensing data for urban air quality. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, v. 54, p. 1360-1371, 2004.
- ENGEL-COX, J. A. et al. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality. *Atmos. Environ.*, v. 38, p. 2495-2509, 2004.
- HUTCHISON, K. D. Applications of MODIS satellite data and products for monitoring air quality in the state of Texas. *Atmos. Environ.*, v. 37, p. 2403-2412, 2003.
- HUTCHISON, K. D.; SMITH, S.; FARUQUI, S. Correlating MODIS aerosol optical thickness data with ground-based PM2.5 observations across Texas for use in a real-time air quality prediction system. *Atmos. Environ.*, v. 39, p. 7190-7203, 2005.
- HUTCHISON, K. D.; SMITH, S.; FARUQUI, S. The use of MODIS data and aerosol products for air quality prediction. *Atmos. Environ.*, v. 38, p. 5057-5070, 2004.
- GUPTA, N. et al. Risk Factors for Initial Surgery in Pediatric Patients With Crohn's Disease. *Gastroenterology*, v.130, n. 4, p. 1.069-1.077, 2006

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *CLIMATE CHANGE 2007: The Physical Science Basis, Fourth Assessment Report Summary*. New York: Cambridge Univ. Press, 2007.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D.; REMER, L. A.; VERMOTE, E. F.; CHU, A.; HOLBEN, B. N. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over the land from EOS-MODIS. *J. Geophys. Res.*, v. 102, D14, p. 17051-17067, 1997.

KAUFMAN, Y. J.; WALD, A. E.; REMER, L. A.; GAO, B. C.; LI, R. R.; FLYNN, L. The MODIS 2.1  $\mu\text{m}$  channel – correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, v. 35, p. 1286-1298, 1997.

KIM, D. H. et al. Aerosol optical properties over East Asia determined from ground-based sky radiation measurements. *J. Geophys. Res.*, v. 109, p. D02209, 2004.

KING, M. D. et al. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, v. 30, p. 2-27, 1992.

LEE, J.; KIM, Y. Spectroscopic measurement of horizontal atmospheric extinction and its practical application. *Atmos. Environ.*, v. 41, p. 3546-3555, 2007.

LEE, Y. C.; KUMAR, N. Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmos. Environ.*, v. 40, p. 5880-5892, 2006.

LI, C. C. et al. An aerosol pollution episode in Hong Kong with remote sensing products of MODIS and LIDAR. *J. Appl. Meteorol. Sci.*, v. 15, p. 641-650, 2004.

LI, C. C.; MAO, J. T.; LAU, A. K. H. Characteristics of aerosol optical depth distributions over Sichuan basin derived from MODIS data. *J. Appl. Meteorol. Sci.*, v. 14, p. 1-7, 2003.

LI, C. C. et al. Research on the air pollution in Beijing and its surroundings with MODIS AOD products. *Chin. J. Atmos. Sci.*, v. 27, p. 869-880, 2003.

LIU, G. Q. et al. Optical depth research of atmospheric aerosol in the Yangtze River Delta region. *Environ. Prot.*, v. 8, p. 50-54, 2003.

MAO, J. T. et al. The comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data and ground sun2photometer observations. *J. Appl. Meteorol. Sci.*, v. 13 (Suppl), p. 127-135, 2002.

RICIERI, R. P. *Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa*. 1998. 89 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrônômicas) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, SP, 1998.

SURESH, T.; DESA, E. Seasonal variations of aerosol over Dona Paula, a coastal site on the west coast of India. *Atmos. Environ.*, v. 39, p. 3471-3480, 2005.

WANG, H. Regression Analysis of Air Pollution Indices against MODIS Aerosol Optical Thickness in Nanjing. *Master's thesis of Nanjing Normal University*, 2006. 55p.

WANG, H.; ZHA, Y. MODIS-derived aerosol optical thickness as an indicator of urban air quality. *Urban Environ. Urban Ecol.*, v. 19, p. 21-24, 2006.

WANG, J.; CHRISTOPHER, S. A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM<sub>2.5</sub> mass: implications for air quality studies. *Geophys. Res. Lett.*, v. 30, n. 21, p. 20-95, 2003.

ZAKEY, S.; ABDELWAHAB, M. M.; MAKAR, P. A. Atmospheric turbidity over Egypt. *Atmos. Environ.*, v. 38, p. 1579-1591, 2004.

---

Amaury de Souza - possui graduação em Física pela Universidade Federal de São Carlos, mestrado em Agronomia (Meteorologia Agrícola) pela Universidade Federal de Viçosa, doutorado em Tecnologias Ambientais Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Atualmente é professor na Universidade Federal do Mato Grosso do Sul.

---

---

Débora Aparecida da Silva Santos - possui graduação em Enfermagem e Obstetrícia pela Fundação Educacional de Fernandópolis. Mestrado em Ciências Ambientais e Saúde pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás e Doutorado em Recursos Naturais pela Universidade Federal de Campina Grande. Atualmente é professora da Universidade Federal de Mato Grosso.

---

---

Lariane Priscila Gonçalves Caldin - possui graduação em Licenciatura em Letras pela Universidade Federal de Mato Grosso. Atua como professora de Língua Inglesa no Colégio Cândido Portinari em Rondonópolis.

---

### Contribuições dos autores

Os autores declaram participação da construção e formação conjunta deste estudo por meio da análise e interpretação dos dados, leitura e interpretação do referencial teórico e da redação do texto.

Recebido para publicação em 11 de junho de 2017

Aceito para publicação em 02 de agosto de 2017