

Artigo

## Investigação da Relação entre Variáveis Atmosféricas e a Concentração de $MP_{10}$ E $O_3$ no Estado de São Paulo

Tailine C. dos Santos<sup>1</sup>, Michelle Simões Reboita<sup>2</sup>, Vanessa Silveira Barreto Carvalho<sup>2</sup><sup>1</sup>*Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.*<sup>2</sup>*Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil.*

Recebido em: 29 de Maio de 2017 - Aceito em: 17 de Abril de 2018

### Resumo

O presente estudo tem como objetivo identificar relações entre variáveis atmosféricas e concentrações de material particulado inalável ( $MP_{10}$ ) e ozônio ( $O_3$ ) registradas no estado de São Paulo. Para isso, foram utilizados dados entre 2005 a 2014 de cinco estações de monitoramento de qualidade do ar. O estudo foi baseado em duas metodologias: Análise de Componentes Principais (ACP) e campos médios meteorológicos. Nas ACP para as concentrações de  $O_3$ , encontraram-se correlações positivas entorno de 0,5 e 0,6 com temperatura do ar, e correlações negativas, entre 0,4 e 0,6 com umidade relativa do ar. As contribuições das componentes do vento nas concentrações de  $O_3$  diferem de uma localidade para outra, sendo em Cubatão e Bauru maior a relação com ventos meridionais e nas demais a maior contribuição é da componente zonal, contudo, em todas as localidades as correlações são negativas com o  $O_3$ . Para o  $MP_{10}$  teve-se as menores correlações, negativas para umidade, e praticamente nulas para temperatura. As correlações com as componentes do vento variam de acordo com a localidade. Com isso, é possível concluir que relações de  $MP_{10}$  com umidade são mais significativas e no caso do  $O_3$ , dentre todas as variáveis, destaca-se a correlação com temperatura como a mais importante, já com relação ao vento ressalta-se a forte ligação deste com as características locais e particulares de cada estação. Os campos médios das variáveis atmosféricas revelam durante altas concentrações de  $MP_{10}$  e  $O_3$  a predominância da atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) sobre a região Sudeste do Brasil. Com relação à temperatura do ar, as maiores concentrações de ozônio ocorreram em dias com temperaturas elevadas, e sem diferença significativa em dias de altas concentrações de  $MP_{10}$ . Por fim, as maiores concentrações de  $MP_{10}$  e  $O_3$  ocorreram em dias secos e de ventos fracos.

**Palavras-chave:** análise de componentes principais, material particulado, ozônio, qualidade do ar, Estado de São Paulo.

## Investigation of the Relationship Between Atmospheric Variables and the Concentration of $MP_{10}$ and $O_3$ in the State of São Paulo

### Abstract

This study aims to identify the relationship among weather variables, inhalable particulate matter ( $PM_{10}$ ) and ozone ( $O_3$ ) concentrations registered in the state of São Paulo. Therefore, data from 2005 to 2014 from five air quality monitoring stations were used. The study is based in two methodologies: Principal Component Analysis (PCA) and meteorological means. In the PCA, for  $O_3$  concentrations, positive correlations environment of 0.5 and 0.6 were found for air temperature, and negative correlations, of about 0.4 and 0.6 was found for relative air humidity. The contributions of the wind components to the  $O_3$  concentrations differ from one location to another. In Cubatão and Bauru, the relation with southern winds is greater, and in the others the greater contribution is from the zonal component, however, in all these places the correlations are negative with  $O_3$ . For  $PM_{10}$ , lower values of correlation were obtained, negative with relative air humidity, and almost null with temperature. Correlations with wind components vary by location. Therefore, it is possible to conclude that  $MP_{10}$  ratios with moisture are more significant and, in the case of  $O_3$ , among all variables, the correlation with temperature is the most important with the local and specific characteristics of each season. The average fields of the atmospheric variables reveal during the high concentrations of  $PM_{10}$  and  $O_3$  the predominance of the South

Atlantic Subtropical Anticyclone (ASAS) on the Southeast region of Brazil. In relation to the air temperature, the highest concentrations of ozone occurred on days with high temperatures, and with no significant difference in days of high concentrations of  $PM_{10}$ . Finally, the highest concentrations of  $PM_{10}$  and  $O_3$  occurred on dry days and in weak winds.

**Keywords:** principal component analysis, particulate matter, ozone, air quality, State of São Paulo.

## 1. Introdução

A qualidade do ar tem sido objeto de pesquisas e preocupação tanto científicas como por tomadores de decisão, uma vez que afeta diretamente a vida do ser humano e o meio ambiente. Nos grandes centros urbanos, com o aglomerado de pessoas, veículos e indústrias, a qualidade do ar é afetada diariamente e impacta negativamente na saúde da população. Um exemplo é a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), localizada no Sudeste do Brasil, que convive diariamente com essa problemática.

Entre os diversos gases e partículas presentes na atmosfera, pode-se destacar o material particulado inalável ( $PM_{10}$ ) e o ozônio ( $O_3$ ) troposférico, que têm apresentado violações aos padrões de qualidade do ar, principalmente em regiões metropolitanas como é o caso da RMSP (Carvalho, 2015, Andrade *et al.*, 2017).

O material particulado (MP) se refere a partículas líquidas e sólidas encontradas em suspensão na atmosfera que podem ser classificadas de acordo com seu tamanho aerodinâmico (Dockery e Pope, 1994; Minguillón *et al.*, 2008). No caso do  $PM_{10}$ , são partículas grossas e finas com diâmetro menor que 10  $\mu m$ . As concentrações destas estão intimamente correlacionadas com o tamanho da população, configurações geográficas, condições climáticas predominantes e os tipos de atividades humana (Choi *et al.*, 2008). Em estudo realizado na cidade de São Paulo, o MP foi atribuído principalmente às emissões de processos de combustão de biomassa e de ressuspensão de solo (Freitas e Solci, 2009).

Atualmente, o Decreto Estadual nº 59113/2013, estabelece o padrão de qualidade do ar para o estado de São Paulo de 120  $\mu g/m^3$  para  $PM_{10}$ , referente à média móvel de 24 horas. Entretanto, a CETESB propõe como meta final para o padrão em questão, o valor recomendado pela Organização Mundial de Saúde - OMS (2005), de 50  $\mu g/m^3$  em 24 horas; contudo, este não tem um prazo para ser atingido.

O  $O_3$  troposférico caracteriza um composto secundário produzido a partir de reações químicas que dependem da ação da luz solar e de oxidações fotoquímicas, sendo os principais precursores o óxido de nitrogênio (NO), dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ) e compostos orgânicos voláteis (COVs), provenientes principalmente de emissão veicular no caso de grandes centros urbanos (Seinfeld, 1986; Bronnimann e Neu, 1997; Finlayson-Pitts e Pitts, 1999). Enquanto o  $O_3$  estratosférico é importante para filtrar a radiação ultravioleta incidente, o troposférico, em altas concentrações, é nocivo à saúde. Como valor padrão

de qualidade do ar, a CETESB considera para  $O_3$  o valor de 140  $\mu g/m^3$ , referentes à média móvel de 8 horas (CETESB, 2013), mas propõe como meta, que este passe a ser o recomendado pela OMS (2005) de 100  $\mu g/m^3$ , porém, sem data para ser atingida esta meta.

Estudos (Alvim *et al.*, 2011; Carvalho *et al.*, 2014) constataram que apesar de consideráveis reduções nas emissões veiculares com programas de melhoria da tecnologia dos motores (PROCONVE), ainda são frequentes os dias em que a concentração de  $O_3$  na RMSP ultrapassa os padrões nacionais de qualidade do ar e a redução do  $O_3$  não foi tão significativa nos últimos anos se comparado a outros compostos.

Neste contexto, vale ressaltar que ocorrências de violações ao padrão e episódios críticos de poluição do ar estão intimamente ligadas as condições atmosféricas, pois estas atuam diretamente na transformação e dispersão dos poluentes emitidos, com a influência significativa de variáveis como velocidade e direção dos ventos, precipitação, temperatura, umidade, radiação e condições de instabilidade atmosférica (Lyra *et al.*, 2006; Guerra e Miranda, 2011; Carvalho *et al.*, 2012; Corrêa *et al.*, 2015).

Uma avaliação dos impactos do clima sobre a poluição, especificamente, ozônio e partículas totais suspensas para o verão, feito por Greene *et al.* (1998) em quatro cidades nos EUA, concluiu que existe uma diferença substancial nas cargas de poluição sob diferentes padrões sinóticos. Outro estudo, mais especificamente para o ozônio, Camalier *et al.* (2007) analisando 39 grandes áreas urbanas do leste dos EUA confirma que o ozônio geralmente aumenta com o aumento da temperatura e diminui com aumento da umidade relativa.

Estudos confirmam que o aumento dos valores de  $O_3$  na primavera na região Sudeste do Brasil é consequência de uma grande quantidade de radiação recebida nessa época do ano e devido ao céu estar ligeiramente menos nebuloso na primavera em comparação com o verão, o que facilita a entrada de radiação em baixos níveis da atmosfera (Araujo, 2014; Carvalho *et al.*, 2015; Moura, 2015). Em relação ao comportamento médio horário, a ocorrência de valores elevados de  $O_3$  ocorre poucas horas após o máximo de incidência de radiação solar diária. No período noturno, não há incidência de radiação solar e formação de novas moléculas de  $O_3$  e a concentração do poluente tende a decrescer de forma brusca devido à remoção química de  $O_3$  por NO presente na atmosfera, emitidos pelos veículos à noite (Carvalho, 2006; Galichio e Fornaro, 2007).

Com relação à região Sudeste do Brasil no inverno há maior ocorrência de violações ao padrão de qualidade

do ar de  $MP_{10}$  (Waldheim *et al.*, 2006; Corrêa *et al.*, 2015). Nesse período, a baixa umidade do ar e condições de estabilidade da atmosfera dificultam a remoção de poluentes tanto por via úmida como por dispersão. Segundo a CETESB (2015), inversões térmicas na baixa troposfera são comuns no inverno. Além disso, tem se a influência do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) que no inverno se expande zonalmente (Hastenrath, 1985) e atua sobre a região Sudeste (Reboita *et al.*, 2010) desfavorecendo a formação de nuvens (e conseqüentemente, chuva), diminuindo a velocidade do vento e favorecendo episódios de inversão térmica o que contribui para o aumento na concentração de poluentes (Bastos *et al.*, 2000; Yonue *et al.*, 2017).

Estudos como os de Carvalho (2006) e Corrêa *et al.* (2015) têm empregado a técnica de Análise de Componentes Principais (ACP) para explicar a relação das variáveis atmosféricas com o  $MP_{10}$  e  $O_3$ . Carvalho (2006) identificou para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) relações entre as concentrações de  $O_3$  e  $NO_2$  com as variáveis meteorológicas, onde obteve correlações negativas entre as concentrações de  $O_3$  e a umidade relativa (UR), e positivas com a radiação solar total, radiação ultravioleta e a temperatura do ar. Corrêa *et al.* (2015) verificaram que na cidade de Bauru no estado de São Paulo, a concentração de  $MP_{10}$  está diretamente relacionada com a radiação e temperatura do ar, e inversamente com a umidade relativa e intensidade do vento; e o  $O_3$  relacionado diretamente com a radiação e temperatura máxima, e inversamente com a intensidade do vento. Esta mesma técnica, ACP, também foi empregada no Kuwait, por Abdul-Wahab *et al.* (2005) com dados de poluentes e variáveis meteorológicas, com o intuito de prever a concentração de ozônio na atmosfera.

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho é investigar a relação entre variáveis atmosféricas e as concentrações de  $MP_{10}$  e  $O_3$  no estado de São Paulo. Para isso, serão utilizados dados medidos em estações de qualidade do ar da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). As informações deste estudo podem ser usadas na caracterização da atmosfera quando da ocorrência de episódios de alta concentração de  $O_3$  e  $MP_{10}$  para auxiliar na análise dos impactos diferenciais do clima e da poluição na saúde humana. Informações específicas sobre as ligações entre os padrões de variáveis meteorológicas e as concentrações de poluição podem ser usadas no desenvolvimento de sistemas de alerta de tempo e saúde para alertar o público de um episódio crítico de poluição.

## 2. Metodologia

### 2.1 Área de estudo

O estado de São Paulo, em 2015, ano referente à coleta dos dados do presente estudo, possuía 45 estações

de monitoramento de qualidade do ar mantidas pela CETESB. Entretanto, para o estudo, foram selecionadas somente as que registravam de forma simultânea os dados de: temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento, além das concentrações de  $MP_{10}$  e  $O_3$ , poluentes escolhidos como objeto deste estudo. Dessa forma, fizeram parte do estudo três estações localizadas em municípios fora da RMSP: a estação de Bauru, Cubatão e Paulínia, e duas localizadas na capital São Paulo: Pinheiros e Ibirapuera (Fig. 1).

A RMSP é a mais populosa do Brasil, com uma população estimada de 21 milhões de habitantes e concentrando 39 municípios em uma área territorial de aproximadamente 8000 km<sup>2</sup> (IBGE, 2014). Estima-se que a frota veicular, superior a 7 milhões de veículos, seja responsável por 97% das emissões de CO e 76% de hidrocarbonetos (HC), 68% de óxido de nitrogênio ( $NO_x$ ), 17% de óxido de enxofre ( $SO_x$ ) e 40% de MP (CETESB, 2017). As concentrações de  $O_3$  e  $MP_{10}$ , monitoradas na RMSP, frequentemente, apresentam violações ao padrão nacional de qualidade do ar (PNQA) (Martins *et al.*, 2004; Freitas *et al.*, 2004; Sánchez-Ccoyllo *et al.*, 2006a; Carvalho *et al.*, 2015).

Uma breve descrição dos aspectos locais dos pontos onde as estações de monitoramento da qualidade do ar estão inseridas é apresentada na Tabela 1.

### 2.2. Dados

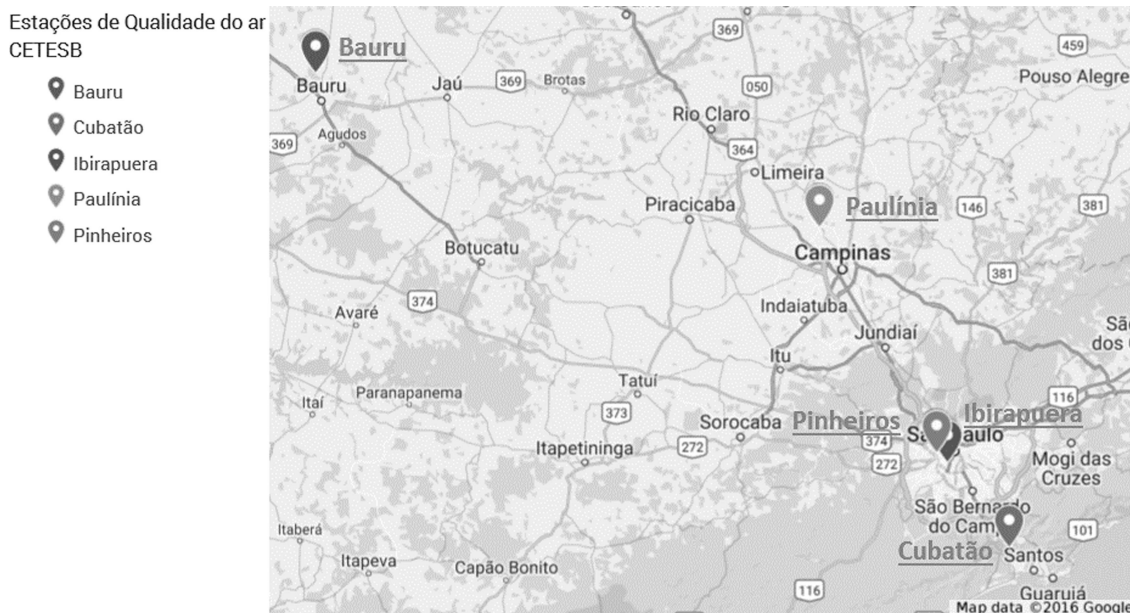
Foram utilizados na análise multivariada deste estudo, dados de concentrações de  $O_3$  e  $MP_{10}$ , e de quatro variáveis meteorológicas, sendo estas: temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento, das estações de monitoramento do ar selecionadas da Cetesb, referente ao período de 2005 a 2014.

Para a análise do vento, foram calculadas as componentes zonal e meridional ( $u$  e  $v$ ), a partir dos dados de velocidade e direção do vento, pelas seguintes equações:

$$u = Vv \sin\left(Dv \frac{\pi}{180}\right); v = Vv \cos\left(Dv \frac{\pi}{180}\right)$$

onde  $Vv$  é a velocidade do vento e  $Dv$  é o ângulo de direção do vento.

Nos campos médios meteorológicos fez-se o uso dos seguintes dados de reanálise: pressão ao nível médio do mar, temperatura a 2 metros de altura, umidade relativa e umidade específica em 1000 hPa (pressão ao nível do mar) e componentes zonal e meridional do vento ( $u$  e  $v$ ) a 10 metros de altura. Esses dados foram provenientes da reanálise Era-Interim (Dee *et al.*, 2011), que é a junção de dados observados com modelados em pontos de grade em todo o globo, com resolução horizontal de 1,5° de latitude e longitude, do horário das 12 UTC.



**Figura 1** - Localização das estações de monitoramento da qualidade do ar da CETESB utilizadas no presente estudo. Fonte: Google Map.

**Tabela 1** - Características das estações de monitoramento da qualidade do ar e das fontes emissoras

Estações	Latitude	Longitude	Altitude	Localização	Fontes emissoras
Ibirapuera	7389978	330545	750 m	Parque do Ibirapuera s/nº - setor 25	Emissões por atividades comerciais, residenciais e veículos (CETESB, 2004).
Pinheiros	7393293	326287	722 m	Avenida Prof. Frederico Hermann Jr., 345 - CETESB - Alto de Pinheiros	Emissões por fontes móveis (veículos)
Cubatão	7358443	355580	0 m	R. Salgado Filho, 121 Parque Fernando Jorge	Emissões por fontes industriais
Bauru	7529779	696439	570 m	Rua Castro Alves s/nº - Q4 - 12º Bombeiros - Vila Souto	Emissões veiculares e do forte setor de serviços (DEDECCA et al., 2009).
Paulínia	7480073	278763	596 m	Praça Oadil Pietrobom s/nº - Vila Bressani	Emissões por veículos e indústrias (CETESB, 2006).

### 2.3. Estatística multivariada: análise de componentes principais (ACP)

A Estatística Multivariada consiste em métodos estatísticos utilizados em um conjunto de dados oriundos de diversas medidas, levando em conta não somente características individuais de cada uma das medidas obtidas, mas também, as relações porventura existentes entre as diversas variáveis utilizadas. Neste contexto, vale ressaltar que as diversas variáveis de um ambiente interagem entre si para formar o quadro resultante de uma determinada situação sob investigação, sendo assim, não há razão para que o estudo se processe somente com cada variável individualmente. Sabendo disso, o enfoque multivariado se trata de uma boa estratégia para se ter um quadro geral do que se está investigando (Andriotti, 2003; Mingoti, 2005).

Segundo Kendall (1980), em um estudo multivariado há vários enfoques que podem ser utilizados, dentre os quais tem-se: a simplificação da estrutura dos dados com a busca de uma representação simplificada; colocação de diversas observações em agrupamentos por

similaridade; análise de interdependência; como também análise de dependência; e podendo dar embasamento também para formação de hipóteses.

Dentro das técnicas multivariadas, Hotelling, em 1933, desenvolveu um trabalho embasado no de Karl Pearson, em 1901, sobre técnicas multivariadas, incluindo neste a definição da técnica de Análise de Componentes Principais (ACP), que será aqui utilizada. Hotelling se refere a técnica como a que permite que se encontre uma forma de classificar os pontos e/ou de detectar relações entre eles. Assim, a ACP deve ser usada para se conhecer a relação entre os elementos e a possível influência de um conjunto de variáveis (Andriotti, 2003). Em síntese, a ACP permite reduzir o número de variáveis originais empregadas no estudo e facilita a compreensão da relação entre elas. Portanto, a ACP pode ser utilizada nas mais diversas áreas e análises quando se tem um conjunto de dados multivariados. Dessa forma, tal técnica se encaixa perfeitamente no presente estudo uma vez que este engloba um conjunto de dados de variáveis distintas.

A ACP consiste em reescrever coordenadas das amostras em outro sistema de eixos mais convenientes para a análise dos dados, ou seja, através das combinações lineares das  $n$ -variáveis originais é possível obter  $n$ -componentes principais. A principal característica destas componentes, além da ortogonalidade, é que são obtidas em ordem decrescente de máxima variância. Com isso, o método permite a redução dos pontos representativos pois, é comum obter em apenas 2 ou 3 das primeiras componentes principais mais do que 90% desta informação (NETO, 1997). Na ACP, basicamente se computa a matriz de correlação (ou de covariância), os autovalores e autovetores (Hair *et al.*, 2009). O número de autovetores (ou componentes principais) é igual ao número original de variáveis incluída no estudo, mas como o objetivo é só manter as mais importantes, se utilizam testes para redução do número de componentes. No presente estudo, empregou-se o teste das raízes latentes, em que são retidas para análise as componentes principais que tiverem autovalor igual ou maior ao algarismo um (Reboita e Krusche, 2000). A descrição matemática detalhada da ACP pode ser encontrada em Hair *et al.* (2009) e Mingoti (2005).

Como a ACP é sensível às magnitudes das medidas das variáveis tratadas, as séries temporais foram padronizadas, a fim de deixar todas as variáveis na mesma unidade de medida. A padronização dos dados consiste em subtrair de cada valor da série temporal, a média da mesma e depois dividir o resultado pelo desvio-padrão da série (Varella, 2008).

Seguindo a metodologia utilizada por Carvalho (2006), a aplicação da técnica de ACP foi realizada em dados horários para  $MP_{10}$  e  $O_3$ , de 2005 a 2014. Contudo, é importante destacar que devido a falha nos dados, somente os horários que possuíam séries completas, ou seja, com todas as variáveis do estudo, foram considerados.

A fim de identificar a relação da concentração de  $MP_{10}$  e do  $O_3$  com as variáveis atmosféricas previamente citadas foi utilizada a ACP (considerando a matriz de correlação), separadamente para cada poluente nas cinco estações de monitoramento da qualidade do ar.

#### 2.4. Campos médios das variáveis atmosféricas

Tendo como base os valores referenciados como metas finais para os padrões de qualidade do ar pela CETESB (2013), foram considerados nesta etapa do estudo, como limiares, os valores de  $MP_{10}$  acima de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para médias de 24 horas e os de  $O_3$  acima de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , referente ao máximo diário das médias de 8 horas. Assim, foram selecionados episódios em que houve ultrapassagem em no mínimo três estações de monitoramento concomitantemente, ou seja, em mais da metade das estações estudadas.

No presente estudo foi analisado o período seco para o  $MP_{10}$ , pois as altas concentrações deste poluente são comuns no inverno (Waldheim *et al.*, 2006; Corrêa *et al.*,

2015). No caso do  $O_3$  as maiores concentrações são registradas na primavera e verão, devido à maior incidência de radiação solar (Carvalho, 2006), dessa forma, foi analisado apenas o período chuvoso. Com isso os dados foram separados em dois períodos: o seco, em que foi considerado os meses de abril a setembro e o período chuvoso, entre outubro a março, referentes aos anos de 2005 a 2014.

Para esses períodos (seco para o  $MP_{10}$  e chuvoso para o  $O_3$ ), foram computadas as médias de variáveis atmosféricas em episódios acima e abaixo dos limiares estabelecidos, respectivamente, para cada poluente, e gerados campos médios espaciais das variáveis atmosféricas a fim de identificar as diferenças nos padrões de cada uma destas em dias com valores acima e abaixo dos valores estabelecidos.

### 3. Resultados

#### 3.1. Análise de componentes principais (ACP)

Aqui estão apresentados os resultados obtidos no cálculo das matrizes de correlação entre as variáveis atmosféricas e o  $MP_{10}$  e também dos autovalores e autovetores (componentes principais). Na matriz de correlação (Tabela 2), o maior valor de correlação do  $PM_{10}$  foi obtido com a umidade relativa, seguido das componentes do vento, com exceção de Cubatão, em que as componentes zonais e meridionais foram levemente maior, e em Pinheiros em que a correlação com o vento zonal foi maior que com umidade.

As correlações negativas com umidade relativa, indica que altas concentrações de  $MP_{10}$  estão associados a condições de baixa umidade relativa do ar. Sendo a precipitação um fator que atua com muita eficiência na remoção das partículas presentes na atmosfera promovendo a remoção dos poluentes, pois uma parcela significativa desses é incorporada à água da chuva, em condições com baixa umidade relativa não é possível esta remoção, uma vez que não se tem gotículas suficiente para precipitação (Carvalho, 2006). Estas também podem atuar como núcleo de condensação nos processos de formação de nuvens, porém, isto não ocorre quando não se tem umidade suficiente (Braga *et al.*, 2002).

O vento atua diretamente no transporte de poluentes, portanto no caso dos ventos zonais e meridionais as correlações variam de uma localidade a outra, uma vez que está intimamente ligado a características locais e específicas, como direção e intensidade do vento, assim como a disposição da estação com relação à fonte emissora. Por exemplo, Bauru e Cubatão apresentam correlações positivas com ventos zonais, já as demais estações apresentam correlações negativas, ou seja, nas duas primeiras, possivelmente há contribuições de transporte de  $MP_{10}$  por ventos nas direções leste-oeste. Já com relação a ventos

**Tabela 2.** - Matriz de correlação entre o MP<sub>10</sub> e as variáveis meteorológicas, onde T é temperatura, UR é umidade relativa e u e v refere-se à velocidade do vento: a) Bauru; b) Cubatão; c) Ibirapuera; d) Paulínia; e) Pinheiros.

	MP <sub>10</sub>	T	UR	u	v
Bauru					
MP <sub>10</sub>	1				
T	-0,019	1			
UR	-0,297	-0,689	1		
u	0,087	0,308	-0,166	1	
v	-0,057	-0,353	0,174	-0,428	1
Cubatão					
MP <sub>10</sub>	1				
T	0,033	1			
UR	-0,148	-0,686	1		
u	0,177	-0,046	0,006	1	
v	0,117	-0,258	0,222	0,299	1
Ibirapuera					
MP <sub>10</sub>	1				
T	0,048	1			
UR	-0,163	-0,526	1		
u	-0,079	-0,243	0,075	1	
v	0,101	0,151	-0,032	-0,073	1
Paulínia					
MP <sub>10</sub>	1				
T	-0,157	1			
UR	-0,124	-0,701	1		
u	-0,011	-0,367	0,244	1	
v	-0,055	0,286	-0,154	-0,602	1
Pinheiros					
MP <sub>10</sub>	1				
T	-0,063	1			
UR	-0,095	-0,675	1		
u	-0,102	-0,332	0,214	1	
v	0,111	0,266	-0,123	-0,572	1

meridionais, Cubatão, Ibirapuera e Pinheiros apresentam correlações positivas e possível transporte deste nas direções norte-sul. No caso da magnitude, Cubatão é o que apresenta as maiores correlações com vento, e isto se deve ao fato de esta ser uma região litorânea onde os ventos são mais intensos, e também onde estão as maiores concentrações de MP<sub>10</sub>, indicando um grande transporte tanto zonal quanto meridional deste poluente.

Com relação às temperaturas, as correlações foram, em geral, baixas, o que indica pouca relação com MP<sub>10</sub>. Também se observa, na Tabela 2, que a temperatura e a umidade relativa foram variáveis bem correlacionadas,

com valores negativos, indicando que quanto maior a temperatura menor a umidade relativa.

Vale destacar que os valores baixos de correlações encontrados para o MP<sub>10</sub> podem ser devido à alta complexibilidade da relação desse poluente com as variáveis atmosféricas, que é diferente do O<sub>3</sub>, que apresenta uma forte dependência com a radiação. Para o MP<sub>10</sub>, essas relações são ainda pouco conhecidas, por exemplo, o material particulado pode atuar diminuindo ou aumentando a temperatura, uma vez que dependendo do tamanho e composição, está relacionado a mecanismos de absorção ou espalhamento (Silva, 2012). Outro fator é o vento, conforme a velocidade do vento, pode levar a ressuspensão de partículas e, com isso, o aumento ou a dispersão deste poluente, ou também conforme a direção deste com relação a estação e a fonte emissora, este pode dispersar para outra direção ou contribuir para a aumento nesta.

Na ACP, a partir da matriz de correlação obtiveram-se os autovalores e autovetores para a formação das componentes principais. A Tabela 3 mostra os autovalores e a variância explicada pelo autovalor, total e acumulada, em ordem decrescente. Lembra-se aqui que o número de componentes principais (autovetores) obtidas é igual ao número de variáveis em análise e que as componentes mais importantes foram selecionadas com base no teste das raízes latentes, onde são mantidas as componentes em que o autovalor é maior do que 1. Portanto, aqui foram mantidas, em geral, as duas primeiras componentes principais, que juntas explicaram entorno de 56 a 66% da variância total dos dados, dependendo da estação de monitoramento, exceto para Paulínia em que foram mantidas três componentes que juntas explicam 87,5% dos dados.

A partir dos primeiros autovalores, o conjunto de autovetores correspondentes são representados na forma de equações, para cada localidade:

#### Bauru

$$Y_1 = -0,185(\text{MP}_{10}) - 0,573(\text{T}) + 0,530(\text{UR}) - 0,415(\text{u}) + 0,430(\text{v}) \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,590(\text{MP}_{10}) + 0,057(\text{T}) - 0,470(\text{UR}) - 0,451(\text{u}) + 0,473(\text{v}) \quad (2)$$

#### Cubatão

$$Y_1 = -0,041(\text{MP}_{10}) - 0,638(\text{T}) + 0,627(\text{UR}) + 0,174(\text{u}) + 0,410(\text{v}) \quad (3)$$

$$Y_2 = -0,574(\text{MP}_{10}) + 0,157(\text{T}) + 0,260(\text{UR}) - 0,624(\text{u}) - 0,435(\text{v}) \quad (4)$$

**Tabela 3** - Autovalores e a variância explicada para as variáveis atmosféricas e MP<sub>10</sub>.

Componentes principais	Autovalores	Variância explicada total (%)	Variância explicada total acumulada (%)
Bauru			
1	2,12	42,41	42,41
2	1,12	22,45	64,86
3	0,97	19,43	84,29
4	0,57	11,39	95,68
5	0,22	4,32	100
Cubatão			
1	1,85	37,10	37,10
2	1,36	27,15	64,24
3	0,83	16,65	80,89
4	0,65	13,03	93,93
5	0,30	6,07	100
Ibirapuera			
1	1,69	33,87	33,87
2	1,03	20,55	54,42
3	0,96	19,12	73,54
4	0,90	18,08	91,62
5	0,42	8,38	100
Paulínia			
1	2,19	43,75	43,75
2	1,15	22,97	66,72
3	1,04	20,81	87,53
4	0,39	7,78	95,31
5	0,23	4,69	100
Pinheiros			
1	2,11	42,22	42,22
2	1,20	24,06	66,28
3	0,98	19,54	85,82
4	0,42	8,46	94,29
5	0,29	5,71	100

**Ibirapuera**

$$Y_1 = 0,257 (MP_{10}) + 0,639 (T) - 0,593 (UR) - 0,343 (u) + 0,239 (v) \quad (5)$$

$$Y_2 = -0,549 (MP_{10}) + 0,257 (T) - 0,347 (UR) + 0,183 (u) + 0,692 (v) \quad (6)$$

**Paulínia**

$$Y_1 = -0,039 (MP_{10}) + 0,555 (T) - 0,485 (UR) - 0,500 (u) + 0,452 (v) \quad (7)$$

$$Y_2 = -0,300 (MP_{10}) - 0,333 (T) + 0,577 (UR) - 0,413 (u) + 0,545 (v) \quad (8)$$

$$Y_3 = 0,919 (MP_{10}) - 0,277 (T) - 0,002 (UR) - 0,226 (u) + 0,167 (v) \quad (9)$$

**Pinheiros**

$$Y_1 = 0,101 (MP_{10}) + 0,547 (T) - 0,487 (UR) - 0,499 (u) + 0,452 (v) \quad (10)$$

$$Y_2 = 0,386 (MP_{10}) - 0,425 (T) + 0,494 (UR) - 0,410 (u) - 0,508 (v) \quad (11)$$

onde T é temperatura, UR é a umidade relativa e u e v refere-se a velocidade do vento.

A primeira componente principal ( $Y_1$ ) explicou cerca de 37 a 42% da variância dos dados, dependendo da estação de monitoramento (Tabela 3). Considerando esta componente em todas as estações de monitoramento de qualidade do ar, teve-se que a temperatura foi inversamente à umidade relativa. As concentrações de MP<sub>10</sub>, em geral, não foram explicadas pela primeira componente principal, que teve o menor coeficiente para o MP<sub>10</sub>.

A segunda componente principal ( $Y_2$ ) explicou cerca de 20 a 27% da variância das séries temporais. Nesta componente, o MP<sub>10</sub> foi explicado indicando, com sinais opostos, que ele respondeu inversamente à umidade relativa. O mesmo ocorreu para temperatura, com menores coeficientes nesta componente em todas as estações de monitoramento. No caso das componentes do vento, difere bastante de uma estação para outra. Em Bauru as contribuições são do vento meridional, mas com o alto coeficiente a equação indica que ventos zonais também tem suas contribuições, porém, negativamente, o inverso ocorre para Paulínia, com correlações positivas com a componente zonal e negativa com a meridional. Já Ibirapuera e Pinheiros indica relações negativas com ambas as componentes, contribuindo para a diminuição de MP<sub>10</sub>. Somente em Cubatão a correlação é totalmente positiva, indicando que ventos intensos independentes da direção, contribuem para o aumento das concentrações na região da estação.

Comportamento similares foram encontrados para outras localidades na literatura (Carvalho *et al.*, 2014; Corrêa *et al.*, 2012; Waldheim *et al.*, 2006) indicando que condições críticas de concentrações de MP<sub>10</sub> estão relacionadas com condições atmosféricas de baixa umidade, são pouco correlacionadas com temperatura e que as características locais vão ser de suma importância na relação com o vento.

A matriz de correlação (Tabela 4) do O<sub>3</sub> com as variáveis atmosféricas mostra que os maiores valores de correlação ocorreram entre a temperatura e umidade relativa assim como na matriz de MP<sub>10</sub>, com sinal negativo, indicando que quanto maior a temperatura menor a umidade relativa. Em relação ao O<sub>3</sub>, este tem correlação positiva com a temperatura, e negativa com a umidade relativa em todas as estações de monitoramento, com magnitudes

também bem próximas, entorno de 0,5 e 0,6, sendo a correlação com a umidade relativa levemente menor do que com temperatura.

Sendo o O<sub>3</sub> um composto secundário formado a partir de reações fotoquímicas, ou seja, reações que depende da radiação solar, a maior correlação deste neste estudo é com a variável temperatura já que, em comparação as demais, esta é a variável mais intimamente relacionada com radiação, pois a maior incidência de radiação causa elevação na temperatura, assim como também aumento na formação de O<sub>3</sub> (Seinfeld, 1986; Bronnimann e Neu, 1997; Carvalho, 2006). Segundo Carvalho (2006), o comportamento médio mensal das concentrações de O<sub>3</sub> mostra

**Tabela 4** - Matriz de correlação entre o O<sub>3</sub> e as variáveis meteorológicas, onde T é temperatura, UR é umidade relativa e u e v refere-se à velocidade do vento: a) Bauru; b) Cubatão; c) Ibirapuera; d) Paulínia; e) Pinheiros.

	O <sub>3</sub>	-T	UR	u	v
Bauru					
O <sub>3</sub>	1				
T	0,695	1			
UR	-0,686	-0,688	1		
u	0,119	0,312	-0,165	1	
v	-0,208	0,312	0,176	-0,430	1
Cubatão					
O <sub>3</sub>	1				
T	0,545	1			
UR	-0,443	-0,824	1		
u	-0,285	0,058	-0,084	1	
v	-0,476	-0,230	0,263	0,440	1
Ibirapuera					
O <sub>3</sub>	1				
T	0,649	1			
UR	-0,552	-0,528	1		
u	-0,136	-0,247	0,080	1	
v	-0,093	0,153	-0,035	-0,082	1
Paulínia					
O <sub>3</sub>	1				
T	0,643	1			
UR	-0,629	-0,697	1		
u	-0,259	-0,366	0,244	1	
v	0,096	0,287	-0,155	-0,605	1
Pinheiros					
O <sub>3</sub>	1				
T	0,646	1			
UR	-0,621	-0,684	1		
u	-0,124	-0,332	0,227	1	
v	0,025	0,270	-0,139	-0,588	1

maiores valores entre os meses de agosto e fevereiro, enquanto os menores valores são registrados de março a julho, devido a maior e menor incidência de radiação, respectivamente. Em relação, ao comportamento médio horário, a ocorrência de valores elevados de O<sub>3</sub> é registrada entre 13:00 e 15:00 h, ou seja, poucas horas após o máximo de incidência de radiação solar diária e máximos de temperatura do ar (Carvalho, 2006).

As menores correlações do O<sub>3</sub>, em geral, foram para as componentes do vento (u e v). Em Ibirapuera, Paulínia e Pinheiros componentes zonais apresentaram correlações maiores, porém inversamente proporcionais, podendo indicar que ventos de oeste contribuem para diminuir as concentrações, atuando na dispersão. Já em Bauru e Cubatão os ventos meridionais têm maiores contribuições nas concentrações de O<sub>3</sub>, com maiores correlações, porém também contribuições de diminuição. Com isso, pode-se concluir que o vento nestas localidades atua na dispersão e remoção do O<sub>3</sub>. Observa-se que em Cubatão, para o O<sub>3</sub> assim como para MP<sub>10</sub>, tanto o vento zonal como a componente meridional atuam significativamente, estas desempenham maior influências nas concentrações em comparação as demais localidades, devido principalmente a maior intensidade do vento nesta.

Vale destacar que as correlações obtidas para O<sub>3</sub> foram similares em sinal e magnitude com as encontradas por Carvalho (2006), no estudo da RMRJ. Os valores altos de correlação para O<sub>3</sub>, em comparação aos obtidos para MP<sub>10</sub>, devem ser explicados por conta da forte relação que o O<sub>3</sub> tem com a radiação solar, que conseqüentemente influencia a forte relação com as demais variáveis como é o caso da temperatura do ar e a umidade relativa.

Na Tabela 5 são apresentadas os autovalores obtidos pela matriz de correlação e a variância total e acumulada explicada por eles. Pelo teste das raízes latentes, foram retidas para as duas primeiras componentes em todas as estações de monitoramento, que explicam entorno de 66 a 78% dos dados.

Com base nos primeiros autovetores obtidos construiu-se as equações que representaram a combinação das variáveis atmosféricas com o O<sub>3</sub>:

#### Bauru

$$Y_1 = -0,510(O_3) - 0,553(T) + 0,509(UR) - 0,277(u) + 0,314(v) \quad (12)$$

$$Y_2 = 0,323(O_3) + 0,086(T) - 0,311(UR) - 0,601(u) + 0,601(v) \quad (13)$$



**Tabela 5** - Autovalores e a variância explicada para as variáveis atmosféricas e O<sub>3</sub>

Componentes principais	Autovalores	Variância explicada total (%)	Variância explicada total acumulada (%)
<b>Bauru</b>			
1	2,63	52,66	52,66
2	1,22	24,33	76,99
3	0,57	11,46	88,44
4	0,31	6,18	94,62
5	0,27	5,38	100
<b>Cubatão</b>			
1	2,47	49,37	49,37
2	1,43	28,63	78,00
3	0,49	9,82	87,83
4	0,45	9,01	96,84
5	0,16	3,16	100
<b>Ibirapuera</b>			
1	2,22	44,38	44,38
2	1,09	21,85	66,22
3	0,91	18,15	84,37
4	0,48	9,61	93,98
5	0,30	6,02	100
<b>Paulínia</b>			
1	2,64	52,88	52,88
2	1,31	26,14	79,02
3	0,43	8,50	87,52
4	0,34	6,78	94,30
5	0,28	5,70	100
<b>Pinheiros</b>			
1	2,53	50,68	50,68
2	1,40	28,06	78,73
3	0,41	8,17	86,90
4	0,37	7,37	94,27
5	0,29	5,73	100

**Cubatão**

$$Y_1 = 0,514(O_3) - 0,536(T) + 0,516(UR) + 0,167(u) + 0,393(v) \quad (14)$$

$$Y_2 = -0,154(O_3) + 0,355(T) - 0,370(UR) + 0,701(u) + 0,470(v) \quad (15)$$

**Ibirapuera**

$$Y_1 = 0,571(O_3) + 0,585(T) - 0,528(UR) - 0,221(u) + 0,060(v) \quad (16)$$

$$Y_2 = -0,246(O_3) + 0,102(T) + 0,148(UR) - 0,502(u) + 0,809(v) \quad (17)$$

**Paulínia**

$$Y_1 = 0,477(O_3) + 0,535(T) - 0,495(UR) - 0,382(u) + 0,309(v) \quad (18)$$

$$Y_2 = -0,345(O_3) - 0,172(T) + 0,322(UR) - 0,555(u) + 0,663(v) \quad (19)$$

**Pinheiros**

$$Y_1 = 0,475(O_3) + 0,555(T) - 0,517(UR) - 0,344(u) + 0,284(v) \quad (20)$$

$$Y_2 = -0,384(O_3) - 0,130(T) + 0,257(UR) - 0,585(u) + 0,654(v) \quad (21)$$

onde: T é temperatura, UR é a umidade relativa e u e v refere-se a velocidade do vento.

Na primeira componente principal, que explica, em geral, entorno de 50% da série, o O<sub>3</sub> mostrou forte relação direta com a temperatura e inversa com a umidade relativa em todas as localidades. A relação inversa da umidade relativa com o O<sub>3</sub> pode estar relacionada com as reações de formação e destruição do O<sub>3</sub>, que envolvem diferentes mecanismos cinéticos. Um destes mecanismos seria que sem a presença de compostos orgânicos voláteis (COVs) em uma atmosfera com alta umidade relativa pode ocorrer a inibição da formação de O<sub>3</sub>. Já em uma atmosfera com a presença de COVs pode ocorrer a destruição do O<sub>3</sub>, devido a reação do O<sub>3</sub> com radicais peroxila formados através das sucessivas rotas de reação da molécula de vapor d'água (Seinfeld, 1988). Outra explicação seria associada aos menores valores de umidade relativa que geralmente ocorrem nos horários do dia de maior radiação e, com isso, maior formação de O<sub>3</sub> (Carvalho, 2006).

A segunda componente principal explica cerca de 66 a 78% dos dados dependendo da estação. Os maiores fatores nestas são das componentes u e v, que em geral, são inversamente correlacionados entre si, isso mostra que quanto maior a componente zonal, menor a meridional e o contrário também é válido. Esse padrão só é exceção em Cubatão em que a relação é direta, quando uma aumenta, ocorre o mesmo com a outra, ou seja, quanto maior os ventos de norte, maiores também os ventos de leste nesta localidade.

**3.2. Composição das variáveis atmosféricas**

O objetivo desta análise foi identificar as diferenças no padrão espacial das variáveis atmosféricas entre os dias com concentrações abaixo e acima dos limiares de 50 µg/m<sup>3</sup> para MP<sub>10</sub> e 100 µg/m<sup>3</sup> para O<sub>3</sub>. Para cumprir esse objetivo, foram calculadas médias das variáveis atmosféricas

referentes aos dias acima e abaixo do limiar de  $MP_{10}$ , no período entre abril a setembro (seco), quando ocorrem a maioria dos casos de ultrapassagem dos valores deste poluente. O mesmo foi feito para o  $O_3$ , mas entre os meses de outubro a maio (chuvoso), onde foram encontrados mais casos de ultrapassagem nas concentrações deste. Para as datas de altas concentrações referentes à cada poluente, foram selecionados apenas dias em que no mínimo três estações de monitoramento apresentaram concomitantemente eventos em que as concentrações de  $MP_{10}$  excederam a  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $MP_{10}$  para médias de 24 horas e os de  $O_3$  acima de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para médias de 8 horas.

A partir da comparação visual dos campos médios das variáveis atmosféricas foi possível observar diferenças nos padrões espaciais destas quando da ocorrência e não ocorrência de concentrações de  $MP_{10}$  acima de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e que condiz com a literatura. No campo da pressão ao nível médio do mar (Fig. 2a), notou-se que nos dias com concentrações acima do limiar estabelecido, a borda oeste do ASAS estava melhor configurada sobre o Sudeste do Brasil do que nos dias com concentrações abaixo dentro do mesmo período. Portanto, foi possível concluir que entre os meses de abril a setembro, os dias que apresentaram valores de  $MP_{10}$  acima de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , foram dias em que a região está mais influenciada pelo ASAS como já mencionado em outros estudos, porém não mostrado graficamente (Corrêa *et al.*, 2012; Corrêa *et al.*, 2015).

Para a temperatura do ar a 2 metros da superfície (Fig. 2b), notou-se que praticamente não houve diferença entre os episódios de  $MP_{10}$ . Já a umidade relativa (Fig. 2c) e específica (Fig. 2c) mostraram diferenças entre os dias, com menor umidade nos dias que ultrapassaram  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  em comparação aos que não. Este comportamento também concorda com a literatura, pois a baixa umidade dificulta a remoção por via úmida dos poluentes (Corrêa *et al.*, 2012; Corrêa *et al.*, 2015). Por fim, a Fig. 3e mostra a intensidade e os vetores da direção do vento (que além de indicarem a direção, o seu tamanho também indica a intensidade). Observou-se que mesmo sendo a diferença pequena entre as duas situações estudadas, em dias com ultrapassagem no valor de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , os ventos foram mais fracos sobre a região Sudeste, do que em dias com menores concentrações, o que contribui para a menor dispersão dos poluentes.

Vale destacar que os valores mais baixos de umidade relativa e da velocidade do vento, dos dias com concentração de  $MP_{10}$  acima do limiar usado, em comparação aos abaixo, podem estar relacionados com o ASAS que está com sua borda melhor configurada sobre a região Sudeste. Portanto, contribuindo para ventos fracos e subsidência do ar o que dificulta a chuva e a dispersão dos poluentes.

Pela comparação visual dos campos médios das variáveis atmosféricas, entre os dias com valores acima do limiar estabelecido para  $O_3$  e abaixo, verificou-se que no

campo da pressão ao nível médio do mar (Fig. 3a) nos dias acima do limiar, o ASAS estava mais expandido no oceano e o sistema estava com a borda mais próximo do continente do que em relação aos dias com valores abaixo. Assim, sugere-se que entre os meses de outubro a maio, os dias que apresentaram valores de  $O_3$  acima de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  foram dias em que a região estava sob influência do ASAS, sendo o mesmo foi encontrado por Carvalho *et al.* (2012).

Na Fig. 3b são apresentados os campos de temperatura do ar próximo à superfície. Dias com concentração de  $O_3$  acima do limiar estabelecido apresentaram temperaturas mais altas do que em dias com valores abaixo do limiar. A umidade relativa (Fig. 3c) e específica (Fig. 3d) mostraram menores valores nos dias com concentrações de  $O_3$  acima do limiar em comparação do que os dias com concentração abaixo do mesmo. Lembra-se aqui que a baixa umidade dificulta a remoção dos poluentes por via úmida. Com relação à intensidade do vento (Fig. 3e), assim como no caso de  $MP_{10}$ , para o  $O_3$  os ventos também foram mais fracos, sobre a região estudada, nos dias acima do limiar de  $O_3$ . Os valores encontrados para o  $O_3$  concordam com o verificado na literatura (Carvalho, 2006; Sánchez-Ccoyllo *et al.*, 2008; Martins e Andrade, 2008).

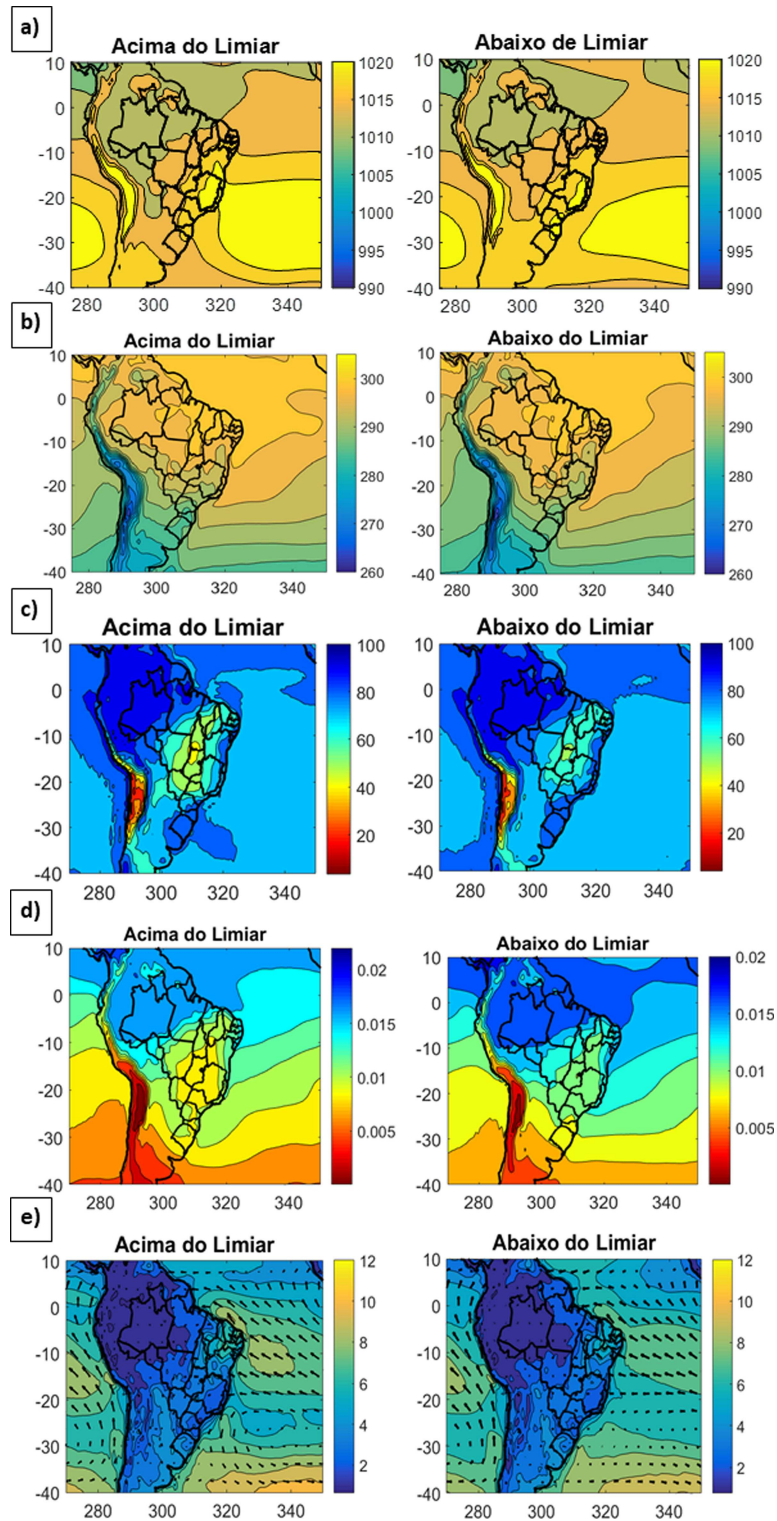
#### 4. Conclusões

Esse estudo investigou a relação da concentração de  $MP_{10}$  e  $O_3$  com algumas variáveis atmosféricas medidas em cinco estações de monitoramento da qualidade do ar da CETESB localizadas em: Bauru, Cubatão, Ibirapuera, Paulínia e Pinheiros, entre 2005 e 2014. Tal relação foi estudada com base em duas metodologias: análise de componentes principais (ACP) e composições.

**ACP:** A ACP indicou que a concentração de  $MP_{10}$  teve baixa correlação, principalmente, com a temperatura do ar. A partir das duas primeiras componentes teve-se que o  $MP_{10}$  respondeu inversamente à umidade relativa. Portanto, quanto maior a umidade relativa, menor é a concentração deste poluente. Já o vento tem correlação direta, mas suas contribuições irão variar de uma localidade para outra, dependendo fortemente das características particulares de cada região.

Com relação ao  $O_3$ , os valores de correlação das concentrações desse poluente com as variáveis atmosféricas foram mais altos do que na análise do  $MP_{10}$ . Isso pode ser devido à forte relação do  $O_3$  com a temperatura do ar. A componente principal indicou que o  $O_3$  estava relacionado diretamente com temperatura do ar, e inversamente com umidade relativa. O vento varia de uma estação para outra com relação a direção de maior contribuição seja negativa ou positiva, mas em geral os maiores coeficientes estão relacionados inversamente com o  $O_3$ .

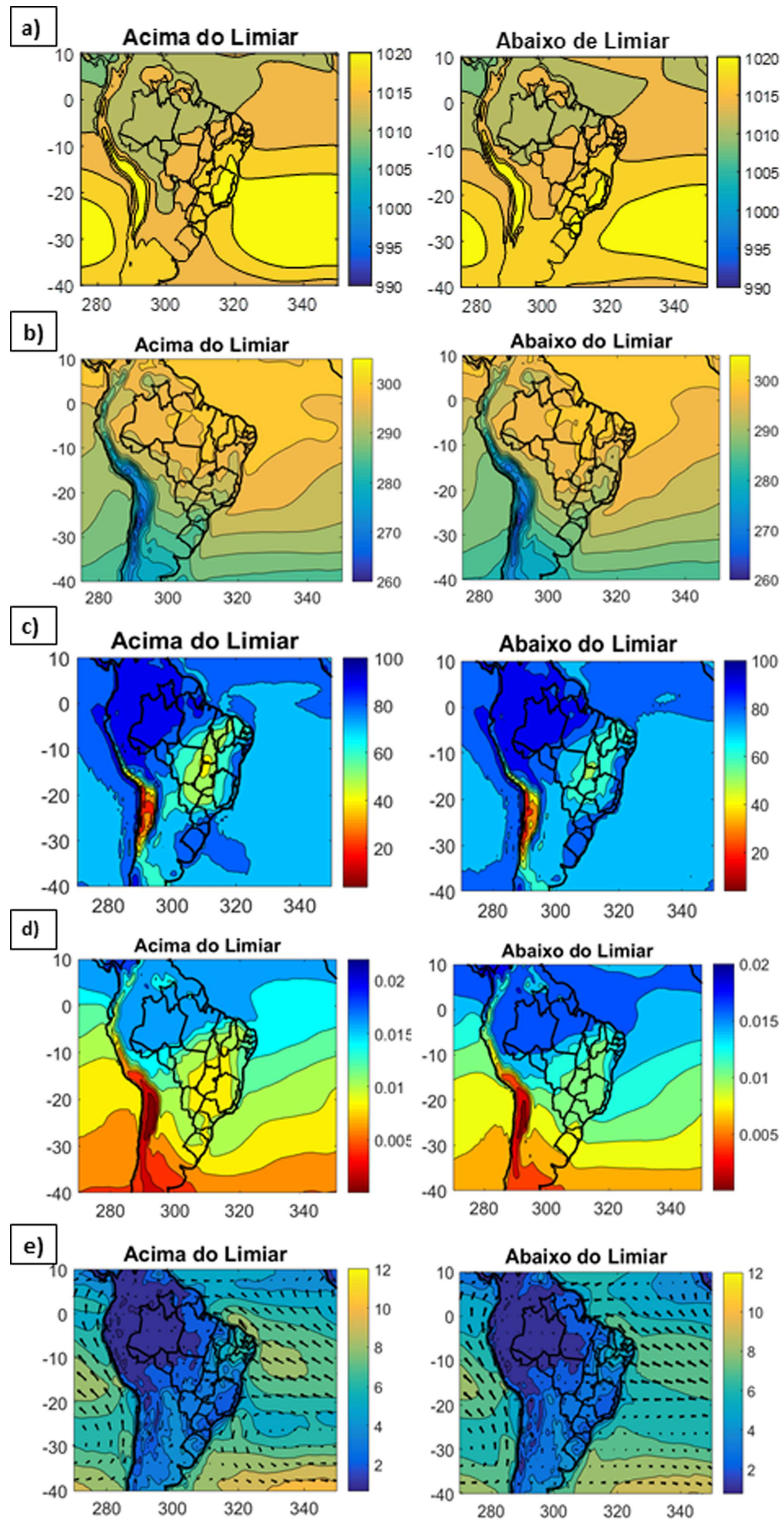
Em resumo, ressalta-se que o  $MP_{10}$  teve maior associação com umidade relativa e com o vento, mas



**Figura 2** - Campos médios referentes aos dias com valores acima e abaixo do limiar de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{MP}_{10}$ , entre abril a setembro de 2005 a 2014, para: a) pressão ao nível médio do mar (hPa); b) temperatura média em 2 metros (K); c) umidade relativa em 1000 hPa (%); d) umidade específica em 1000 hPa (kg/kg); e) velocidade do vento a 10 metros (m/s).

inversamente proporcional umidade, ou seja, quanto maior a umidade, menor a concentração deste poluente na atmosfera. Já, o  $\text{O}_3$  teve maior associação com

temperatura e umidade relativa, tendo relação positiva com a temperatura, ou seja, quanto maior esta variável maior a concentração de  $\text{O}_3$ ; e inversa com umidade,



**Figura 3** - Campos médios referentes aos dias com valores acima e abaixo do limiar de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $O_3$ , entre outubro a maio de 2005 a 2014, para: a) pressão ao nível médio do mar (hPa); b) temperatura em 2 metros (K); c) umidade relativa em 1000 hPa (%); d) umidade específica em 1000 hPa (kg/kg); e) velocidade do vento em 10 metros (m/s).

tendo, portanto, menores concentrações quando estavam presentes os maiores percentuais de umidade na atmosfera.

**Composições:** Nas composições das variáveis atmosféricas nos dias acima do limiar estabelecido apresentaram menor umidade relativa, umidade específica e

velocidade do vento, para  $MP_{10}$  e  $O_3$ , como também, a região Sudeste estava sob maior influência do ASAS em relação aos dias com concentrações abaixo do limiar. Para temperatura, os dias acima do limiar de  $O_3$  foram mais elevadas, assim como na ACP em que indicou correlação positiva entre estas. Sendo assim, as composições dos campos das variáveis atmosféricas confirmaram as correlações encontradas na ACP, exceto para a relação entre o vento com o  $O_3$ . Na ACP, foi verificada uma baixa correlação entre o  $O_3$  e a velocidade do vento, enquanto que as composições revelaram um padrão nítido com ventos mais fracos em dias acima do limiar estabelecido para o poluente.

Vale destacar que, a partir de diferentes métodos, em geral, o comportamento encontrado para ambos os poluentes corrobora o encontrado em outros trabalhos para a região em questão e para outras localidades (Carvalho, 2006; Sánchez-Ccoyllo *et al.*, 2006b; Martins e Andrade, 2008; Corrêa *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2006; Carvalho *et al.*, 2015).

## Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro, a CETESB e ECMWF pelos dados.

## Referências

- ABDUL-WAHAB, S.A.; BAKHEIT, C.S.; AL-ALAWI, S.M. Principal component and multiple regression analysis in modelling of ground-level ozone and factors affecting its concentrations. **Environmental Modelling & Software**, v. 20, n. 10, p. 1263-1271, 2005.
- AHRENS, C.D.; HENSON, R. **Meteorology today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment**. Edition 11th. USA, Cengage Learning, 2016. 656 p.
- ALVIM, D.S.; GATTI, V.N.; SANTOS, M.H.D.; YAMAZAKI, A. Estudos dos compostos orgânicos voláteis precursores de ozônio na cidade de São Paulo. **Eng Sanit Ambient**, v.16, n. 2, p. 189-196, 2011.
- ANDRADE, M.F.; KUMAR, P.; DE FREITAS, E.D.; YNOUE, R. Y.; MARTINS, J.; MARTINS, L. D.; NOGUEIRA, T.; PEREZ-MARTINEZ, P.; DE MIRANDA, R.M.; ALBUQUERQUE, T.; GONÇALVES, F.L.T.; OYAMA, B.; ZHANG, Y. Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. **Atmospheric Environment**, v. 159, p. 66–82, 2017.
- ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. Editora Unisinos, São Leopoldo. 2003. 165 p.
- ARAÚJO, L.M.M.C. **Diagnóstico da qualidade do ar no município de Paulínia, São Paul**. Monografia (Trabalho Final de Graduação) - Universidade Federal de Itajubá. 2014.
- BASTOS, C.C.; FERREIRA, N.J. Análise climatológica da alta subtropical do Atlântico Sul. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, XI, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2000. p. 612-619. Disponível em: <http://www.cbmet.com/edicoes.php?cgid=12&imageField2.x=32&imageField2.y=13> Acesso em: 12 fev. 2016
- BORGES, W.R.; BRAGA J.R., J.C.; TORRES, F.R. O que você precisa saber sobre Cubatão. **Cubatão: Design & Print** (com apoio do Arquivo Histórico Municipal de Cubatão), 2002.
- BRÖNNIMANN, S.; NEU, U. Weekend-Weekday differences of near surface ozone concentrations in Switzerland for different meteorological conditions. **Atmospheric Environment**, v. 35, n. 8, p. 1127-1137, 1997.
- CAMALIER, L.; COX, W.; DOLWICK, P. The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends. **Atmospheric Environment**, v. 41, n. 33, p. 7127-7137, 2007.
- CARVALHO, V.S.B. **Meteorologia da Qualidade do Ar no que tange as Concentrações de Ozônio e dos Óxidos de Nitrogênio na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. 2006. 134 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2006.
- CARVALHO, V.S.B.; FREITAS, E.D.; MAZZOLI, C.R.R.; ANDRADE, M.F. Avaliação da influência de condições meteorológicas na ocorrência e manutenção de um episódio prolongado com altas concentrações de ozônio sobre a Região Metropolitana de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia** (Impresso), v. 27, p. 458-469, 2012.
- CARVALHO, V.S.B.; DE FREITAS, E.D.; MAZZOLI, C.R.; DE FÁTIMA ANDRADE, M. Avaliação da influência de condições meteorológicas na ocorrência e manutenção de um episódio prolongado com altas concentrações de ozônio sobre a Região Metropolitana de São Paulo, Brasi. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos - SP, v. 27, n. 4, p. 463 - 474, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v27n4/09.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2015.
- CARVALHO, V.S.B.; de FREITAS, E.D.; MARTINS, L.D.; MARTINS, J.A.; DE FÁTIMA ANDRADE, M. Air quality status and trends over the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil as a result of emission control policies. **Environmental Science & Policy**, v. 47, p. 68-79, 2015.
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Caracterização das Estações da Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar na RMSP Estação Ibirapuera**. São Paulo, julho/2004. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, Caracterização das estações de monitoramento de fumaça no interior do estado de São Paulo Estação do Município de Paulínia. São Paulo, setembro/2006. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos - 2012**. São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Qualar-qualidade do ar no estado de São Paulo**. São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>

- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Operação Inverno – 2015**. São Paulo, dezembro/2015. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Qualar-qualidade do ar no estado de São Paulo 2016**. São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>
- CHOI, Y.S.; HO, C.H.; CHEN, D.; NOH, Y.H.; SONG, C.K. Spectral analysis of weekly variation in PM10 mass concentration and meteorological conditions over China. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 4, p. 655-666, 2008.
- CORRÊA, T.S.; CARVALHO, V.S.B. **Análise de condições meteorológicas durante episódios de poluição por material particulado na RMRJ**. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, XVII, 2012, Gramado - RS. Anais... Gramado – RS, 2012.
- CORRÊA, T.S.; REBOITA, M.S.; CARVALHO, V.S.B. “Estudos da relação entre as concentrações de ozônio e material particulado e variáveis atmosféricas a partir da técnica de componentes principais em Bauru/SP. In: Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, IX, 2015, Santa Maria – RS. Anais... Santa Maria – RS, 2015.
- DEDECCA, C.; MONTALI, L.; BAENINGER, R. **Regiões Metropolitanas e Pólos Econômicos do Estado de São Paulo: desigualdades e indicadores para as Políticas Sociais. Estudos Regionais**. 183 p. Campinas: Unicamp, São Paulo. 2009.
- DEE, D.P.; UPPALA, S.M.; SIMMONS, A.J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M.A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.
- DOCKERY, D.W.; POPE, C.A. Acute respiratory effects of particulate air pollution. **Annual Review Public Health**, United States. v. 15, n.1, p. 107-132, 1994. Disponível em: <http://www.annualreviews.org/toc/publhealth/15/1>. Acesso em: 03 jul 2015.
- FREITAS, C.; BREMNER, S.A.; GOUVEIA, N.; PEREIRA, L. A.; SALDIVA, P.H. Interações e órbitas e sua relação com a poluição atmosférica em São Paulo, 1993 a 1997. **Revista de saúde pública**, v. 38, n. 6, p. 751-757, 2004.
- FREITAS, A. M.; SOLCI, M. C. Caracterização do MP10 e MP2,5 e distribuição por tamanho de cloreto, nitrato e sulfato em atmosfera urbana e rural de Londrina. **Quim. Nova**, v. 32, n. 7, p. 1750-1754, 2009.
- FINLAYSON-PITTS, B.J.; PITTS, J.N. Jr. **Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications**. 1st Ed. Wiley-Interscience publication, Wiley, New York, 1999. 969 p.
- GALICHIO, W.; FORNARO, A. Estudo da relação entre ozônio e parâmetros meteorológicos na atmosfera de São Paulo. **Ciência & Natura**, Santa Maria – RS, p. 213-216, 2009.
- GALVÃO, W.C. Projeto pedagógico do curso tecnologia em redes de computadores. 2015. 95 p. Faculdade de Bauru, Bauru - São Paulo. 2015. Disponível em: [http://www.faculdedebauru.edu.br/downloads/PPC\\_Rede\\_Computadores.pdf](http://www.faculdedebauru.edu.br/downloads/PPC_Rede_Computadores.pdf).
- GOUVEIA, N.; MENDONÇA, G.A.S.; LEÓN, A. P.; CORREIA, J.E.M.; JUNGER, W.L.; FREITAS, C.U.; DAUMAS, R.P.; MARTINS, L.C.; GIUSSEPE, L.; CONCEIÇÃO, G.M.S.; MANERICH, A.; CUNHACRUZ, J. Air pollution and health effects in two Brazilian metropolises. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, Brasília - DF, v. 12, n. 1, p. 29-40, 2003.
- GREENE, J.S.; KALKSTEIN, L.S.; YE, H.; Smoyer, K. Relationships between synoptic climatology and atmospheric pollution at 4 US cities. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 62, n. 3, p. 163-174, 1999.
- GUERRA, F.P.; MIRANDA, R.M. Influência da meteorologia na concentração do poluente atmosférico PM2,5 na RMRJ e na RMS. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, II, 2011. Anais... Londrina – PR, 2011. 10 p.
- HAIR, J.F.; BLACK, W.C.; BABIN, B.J.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L. **Análise multivariada de dados**. 6 Ed. Bookman, 2009. 688 p.
- HASTENRATH, S. **Climate and Circulation of the Tropics**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, v. 8, 1985. 464 p.
- HOTELLING, H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components, **J. Educ. Psychol.**, v. 24, p. 417 – 441 e 498 – 520. 1933.
- KENDALL, M.G. **A Course in Multivariate Analysis**, 2ª ed. New York. 1980.
- LYRA, D.G.P.; TOMAZ, E. A influência da meteorologia na dispersão dos poluentes atmosféricos da Região Metropolitana De Salvador. 2006. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, XIV, 2006. Anais... Florianópolis - SC, 2006. 7 p.
- MARTINS, L.D.; ANDRADE, M.F. Ozone Formation Potentials Of Volatile Organic Compounds And Ozone Sensitivity To The Air Emission In The Megacity Of São Paulo, Brazil. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 195, p. 201-213, 2008.
- MARTINS, M.H.R.B.; ANAZIA, R.; GUARDANI, M.L.G.; LACAVA, C.I.V.; ROMANO, J.; SILVA, S.R. Evolution of air quality in the São Paulo Metropolitan Area and its relation with public policies. **International Journal of Environment and Pollution**, v. 22, n.4, p. 430-440, 2004.
- MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte – MG, Editora UFMG, 2005. 295 p.
- MINGUILLÓN, M.C.; ARHAMI, M.; SCHAUER, J.J.; SIOU-TAS, C. Seasonal and spatial variations of sources of fine and quasi-ultrafine particulate matter in neighborhoods near the Los Angeles–Long Beach harbor. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 32, p. 7317-7328, 2008.
- MOURA, L.M. **Variabilidade da cobertura de nuvens na cidade de São Paulo**. 2015. 55 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá - MG. 2015.
- NETO, J.M.M. Uma introdução à análise exploratória de dados multivariados. **Química Nova**, v. 24, n. 4, p. 467-469, 1997.
- OMS - Organização Mundial Da Saúde. **Air Quality Guidelines - Global Update**. 2005. 496 p. Disponível em: <http://www.who.int>

- euro.who.int/\_data/assets/pdf\_file/0005/78638/E90038.pdf, Acesso em: 25 jun. 2016
- PENNA, M.L.; DUCHIADE, M.P. Air pollution and infant mortality from pneumonia in the Rio de Janeiro Metropolitan Area. **Relation Bulletin of the Pan American Health Organization**, v. 25, n. 1, p. 47-56, 1991.
- PINTON, L.G.; CUNHA, C.M.L. Avaliação das mudanças na morfologia da rede hidrográfica da área urbana do município de Cubatão/SP - Brasil. 2010. In: Seminário Latino-Americano de Geografia Física, VI, Universidade de Coimbra, 2010. 14 p.
- REBOITA, M.S.; KRUSCHE, N. Análise de componentes principais da ocorrência de Nevoeiros em Rio Grande, RS, no período de 1990 a 1999. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro, XI, 2000. **Anais...** Rio de Janeiro - RJ. p. 853. 2000.
- REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 193-212, 2010.
- SALDIVA, P.H. N.; BRAGA, A.; PEREIRA, L.A. A. Poluição Atmosférica e seus Efeitos na Saúde Humana. In: Sustentabilidade na Geração e Uso de Energia no Brasil: os próximos 20 anos, 2002. **Trabalho apresentado...** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, fev. 2002. 20 p.
- SALDIVA, P.H.N.; LICHTENFELS, A.J.F.C.; PAIVA, P.S.O.; BARONE, I.A.; MARTINS, M.A.; MASSAD, E.; PEREIRA, J.C.R.; XAVIER, V.P.; SINGER, J.M.; BÖHM, G. M. Association Between Air Pollution and Mortality Due to Respiratory Diseases in Children in Sao Paulo, Brazil: A Preliminary Report. **Environmental Research**, EUA, v. 65, p. 218-225, 1994.
- SÁNCHEZ-CCOYLLO, O.R.; YNOUE, R.Y.; MARTINS, L.D.; ASTOLFO, R.; MIRANDA, R.M.; FREITAS, E.D.; BORGES, A.S.; FORNARO, A.; MOREIRA, A.; ANDRADE, M.F. Emissão dos Aerossóis Veiculares Medida no Túnel Jânio Quadros em São Paulo. **Anais...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006a.
- SÁNCHEZ-CCOYLLO, O.R.; YNOUE, Y.R.; MARTINS, D.L.; ANDRADE, M.F. Impacts of ozone precursor limitation and meteorological variables on ozone concentration in São Paulo, Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 40, p. S552-S562, 2006b.
- SANTOS, T.C.; CARVALHO, V.S.B.; REBOITA, M.S. Avaliação da influência das condições meteorológicas em dias com altas concentrações de material particulado na região metropolitana do Rio de Janeiro. **Revista Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro – RJ, v. 21, n. 2, p. 307-313, 2016. <http://www.scielo.br/pdf/esa/v21n2/1809-4457-esa-21-02-00307.pdf>. Acesso em: 20 ago 2016.
- SILVA, B.L. **Estudo do efeito das partículas de aerossol emitidas por queimadas sobre a radiação solar incidente em superfície a partir de medições efetuadas na Reserva Biológica do Jarú**. 2012. 119 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo - SP. 2012
- SEINFELD, J.H. **Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution**. New York: John Willey & Sons, 1986.
- VARELLA, C.A.A. **Análise de componentes principais**. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/multivariada%20aplicada%20as%20ciencias%20agrarias/Aulas/analise%20de%20componentes%20principais.pdf>. Acesso em: 05 out. 2015.
- WALDHEIM, P.V.; ARAUJO, R.M.M.; CARVALHO, V.S.B. Relação entre altas concentrações de partículas inaláveis e o condicionamento meteorológicos na Região Metropolitana do Rio de Janeiro entre 2000 e 2005. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, XIV, Florianópolis - SC, 2006.
- YNOUE, R.Y.; REBOITA, M.S.; AMBRIZZI, T.; SILVA, G. A.M. **Meteorologia: Noções Básica**. 1 ed. São Paulo - SP, Brasil: Oficina de Textos, 2017, v. 1, 184p.