

## Estimativa da concentração média diária de material particulado fino na região do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Ceará, Brasil

Estimate of mean daily concentration of fine particulate matter in the Industrial and Port Complex area of Pecém, Ceará, Brazil

Estimación de la concentración media diaria de material particulado fino en la región del Complejo Industrial y Portuario de Pecém, Ceará, Brasil

Lucas de Oliveira do Couto <sup>1</sup>  
Sharmênia de Araújo Soares Nuto <sup>2,3</sup>  
Sandra de Souza Hacon <sup>1</sup>  
Adriana Gioda <sup>4</sup>  
Francisco Wagner de Sousa <sup>5</sup>  
Edenilo Baltazar Barreira Filho <sup>6,7</sup>  
Karen dos Santos Gonçalves <sup>8</sup>  
André Reynaldo Santos Périssé <sup>1</sup>

doi: 10.1590/0102-311X00177719

### Resumo

A exposição ao material particulado fino ( $MP_{2,5}$ ) está associada a inúmeros desfechos à saúde. Desta forma, monitoramento da concentração ambiental do  $MP_{2,5}$  é importante, especialmente em áreas amplamente industrializadas, pois abrigam potenciais emissores do  $MP_{2,5}$  e de substâncias com potencial de aumentar a toxicidade de partículas já suspensas. O objetivo desta pesquisa é estimar a concentração diária do  $MP_{2,5}$  em três áreas de influência do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), Ceará, Brasil. Foi aplicado um modelo de regressão não linear para a estimativa do  $MP_{2,5}$  por meio de dados de profundidade óptica monitorados por satélite. As estimativas foram realizadas em três áreas de influência (Ai) do CIPP (São Gonçalo do Amarante – Ai I, Paracuru e Paraipaba – Ai II e Caucaia – Ai III, no período de 2006 a 2017. As médias anuais das concentrações estimadas foram inferiores ao estabelecido pela legislação nacional em todas as Ai ( $8\mu g\ m^{-3}$ ). Em todas as Ai, os meses referentes ao período de seca (setembro a fevereiro) apresentaram as maiores concentrações e uma predominância de ventos leste para oeste. Os meses que compreendem o período de chuva (março a agosto) apresentaram as menores concentrações e ventos menos definidos. As condições meteorológicas podem exercer um papel importante nos processos de remoção, dispersão ou manutenção das concentrações do material particulado na região. Mesmo com baixas concentrações estimadas, é importante avaliar a constituição das partículas finas dessa região, bem como sua possível associação a efeitos adversos à saúde da população local.

Poluição do Ar; Material Particulado; Zonas Industriais; Aerossóis; Saúde Ambiental

### Correspondência

L. O. Couto  
Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação  
Oswaldo Cruz.  
Rua Leopoldo Bulhões 1480, Rio de Janeiro, RJ  
21041-210, Brasil.  
lucas.oliv.couto@gmail.com

- <sup>1</sup> Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, Brasil.  
<sup>2</sup> Fiocruz-Ceará, Eusébio, Brasil.  
<sup>3</sup> Universidade de Fortaleza, Fortaleza, Brasil.  
<sup>4</sup> Departamento de Química, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, Brasil.  
<sup>5</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Caucaia, Brasil.  
<sup>6</sup> Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil.  
<sup>7</sup> Faculdade de Ensino e Cultura do Ceará, Fortaleza, Brasil.  
<sup>8</sup> Escuela Andaluza de Salud Pública, Universidad de Granada, España.



## Introdução

A poluição atmosférica representa uma grande ameaça à saúde pública. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), cerca de 80% dos indivíduos que vivem em ambientes urbanos monitorados estão expostos a concentrações que excedem os limites estabelecidos pela própria organização <sup>1</sup>. Dentre os diferentes tipos de poluentes atmosféricos, as partículas com diâmetro aerodinâmico menor que  $2,5\mu\text{m}$  ( $\text{MP}_{2,5}$ ) merecem especial atenção, devido a sua capacidade de se acumular profundamente no sistema respiratório <sup>2</sup>.

Segundo o Health Effects Institute (Boston, Estados Unidos), em 2016, o  $\text{MP}_{2,5}$  foi o sexto maior risco de mortalidade prematura, contribuindo para a morte de aproximadamente quatro milhões de pessoas em todo mundo <sup>3</sup>. Esse tipo de poluente se sobrepõe a fatores de risco já conhecidos, como consumo de álcool e elevado consumo de sódio <sup>3</sup>. No Brasil, em 2017, estima-se que a poluição por  $\text{MP}_{2,5}$  seja responsável pela morte de 50.300 pessoas <sup>4</sup>.

Além de contribuir para o aumento de óbitos em geral, a exposição ao  $\text{MP}_{2,5}$  está associada à ocorrência de processos inflamatórios das vias respiratórias, piora nos sintomas de asma e doença pulmonar obstrutiva crônica, declínio da função pulmonar, diminuição da capacidade imune dos pulmões e casos de câncer de pulmão. Além dos impactos no sistema respiratório, diferentes estudos têm observado efeitos adversos ao sistema cardiovascular e problemas de desenvolvimento fetal <sup>2</sup>.

A incorporação de tecnologias limpas que diminuem a emissão de  $\text{MP}_{2,5}$  e a adoção de medidas para afastar a população das fontes poluentes, apesar de importantes, são ações implementadas em longo prazo. Contudo, existem ações em nível individual e mais imediatas que podem reduzir a exposição aos poluentes, como limitar o tempo de atividades físicas moderadas ou intensas ao ar livre, principalmente em dias ou em períodos do ano com maior concentração de material particulado <sup>5,6</sup>. Recomenda-se também escolher rotas alternativas com menor densidade de veículos e até mesmo permanecer em casa nos dias com concentrações extremas <sup>5</sup>. Essas medidas para minimizar a exposição ao  $\text{MP}_{2,5}$  são importantes principalmente para indivíduos susceptíveis a doenças crônicas respiratórias e cardiovasculares, crianças, idosos e gestantes.

Indivíduos com asma, doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC) e aterosclerose apresentam piora em seus quadros de saúde quando expostos de forma aguda ao poluente. Já as crianças são mais susceptíveis pois estão em fase de desenvolvimento do sistema imune e respiratório, e o contato prematuro com poluentes pode afetar o seu desenvolvimento pulmonar adequado, deixando-as mais propícias a doenças no futuro. Além disso, elas tendem a praticar mais atividades intensas ao ar livre, o que conseqüentemente aumenta a quantidade de poluente inalado <sup>6</sup>. Os idosos, por outro lado, são mais susceptíveis devido ao declínio natural do sistema imunológico e também por conta do histórico de infecções prévias durante a vida, que podem prejudicar a capacidade pulmonar e facilitar o efeito adverso da exposição ao poluente. Já as gestantes são consideradas um grupo de atenção, pois é crescente o número de estudos que observam efeitos adversos da exposição ao  $\text{MP}_{2,5}$  e o desenvolvimento do bebê <sup>7</sup>.

Tanto as medidas de diminuição da emissão de poluentes atmosféricos quanto as de redução da exposição individual dependem de um sistema que monitore e informe a situação da qualidade do ar para gestores e população. Assim, o monitoramento da qualidade do ar subsidia informações necessárias para o controle dos níveis de poluentes atmosféricos em concentrações seguras, fornece informações para o diagnóstico do risco a determinado desfecho de saúde associado à poluição e informa a população local sobre a condição da qualidade do ar na região.

No Brasil, a *Lei nº 6.938* <sup>8</sup> de 1981 instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e, em seu Art. 9º, I, define como um dos instrumentos da PNMA “o estabelecimento de padrões de qualidade ambiental” e que esses padrões são estabelecidos por Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

A *Resolução do CONAMA nº 5*, de 1989 <sup>9</sup> estipulou a criação de uma Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade do Ar e foi complementada pela *Resolução CONAMA nº 3*, de 1990 <sup>10</sup>, que definiu os padrões de qualidade do ar e determinou que é de responsabilidade dos estados a instalação dessas redes de monitoramento em seus territórios. Atualmente a resolução que define os padrões de qualidade do ar é a *Resolução CONAMA nº 491* de 2018 <sup>11</sup>, que revogou a *Resolução nº 3/1990* e os itens 2.2.1 e 2.3 da *Resolução nº 5/1989*.

Apesar do que foi estabelecido pelas resoluções do CONAMA, os sistemas de monitoramento estaduais inexistem, são escassos ou muitas vezes ineficientes. No primeiro relatório nacional sobre a situação do monitoramento da qualidade do ar no país, publicado em 2014, somente dez estados e o Distrito Federal estavam com suas redes de monitoramento ativas<sup>12</sup>.

A falta de cobertura das redes de monitoramento representa um grande desafio na avaliação da exposição humana ao MP<sub>2,5</sub> antrópico, inclusive o de fontes industriais. Esse é o caso dos municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante, no Estado do Ceará. Até o ano de 2016, não contavam com nenhuma rede de monitoramento da qualidade do ar, mesmo abrigando desde 1995 em seus territórios um complexo industrial e portuário com área aproximadamente de 133km<sup>2</sup>, rodeado por áreas habitadas com escolas, postos médicos e estabelecimentos comerciais<sup>13,14</sup>.

Para superar as lacunas deixadas pela ausência de monitoramento da qualidade do ar em diversas regiões do planeta, inclusive em regiões densamente industrializadas como a do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), o uso de técnicas de sensoriamento remoto, com o intuito de prever a concentração de MP<sub>2,5</sub>, é uma alternativa eficaz e de baixo custo. A utilização da espessura óptica de aerossóis (AOD), que expressa a quantidade média de partículas da coluna atmosférica integrada, tem se mostrado adequada para essa finalidade, devido à estimação de valores próximos aos mensurados<sup>15,16,17</sup>.

Diversas metodologias com diferentes desempenhos podem ser usadas nas estimativas do MP<sub>2,5</sub> através do AOD como, por exemplo, modelos de regressão não linear (RNL), modelos aditivos generalizados (MAG), modelos de efeito misto (MEM), modelos de transporte químico (MTQ), regressão geograficamente balanceada (RGB), entre outros<sup>18,19,20,21,22,23</sup>. Para garantir uma maior robustez nos diversos modelos utilizados, é importante incluir variáveis adicionais que podem influenciar a relação entre o AOD e a concentração MP<sub>2,5</sub> como, por exemplo, dados meteorológicos de temperatura, umidade relativa e informações de uso de solo<sup>24,25</sup>.

Desta forma, o objetivo desta pesquisa é estimar a concentração diária do material particulado da fração de 2,5 micrometros (MP<sub>2,5</sub>), utilizando como variável preditora o produto AOD/MODIS, através de um modelo de predição não linear aplicado aos municípios de Caucaia, São Gonçalo do Amarante, Paracuru e Paraipaba, no Estado do Ceará.

## Materiais e métodos

O estudo foi realizado em escala municipal e abrangeu os municípios de Caucaia, São Gonçalo do Amarante, Paracuru e Paraipaba, no Estado do Ceará. Os municípios foram divididos em três diferentes áreas de influência (Ai): I, II e III. A definição das áreas de influência se baseou na direção preferencial dos ventos na região e em uma área de dispersão de 30km, definida a partir do setor I do CIPP, área que atualmente abriga uma gama mais diversa de indústrias (Figura 1).

O Município de São Gonçalo do Amarante foi definido como Ai I, pois se encontram instaladas em seu território a Companhia Siderúrgica do Pecém e a termelétrica Energia Pecém. Os dois empreendimentos abrigam grandes depósitos de carvão mineral a céu aberto, utilizado para a geração de energia.

Os municípios de Paracuru e Paraipaba foram definidos como a Ai II, por se localizarem na direção preferencial dos ventos na região, de maneira que a pluma de poluentes tende a se dispersar em sua direção. Já o Município de Caucaia foi definido como a Ai III, pois se encontra na direção oposta ao deslocamento preferencial dos ventos na região (Figura 1).

### Aquisição de dados MODIS – AOD

A coleta de dados de AOD foi realizada no aplicativo *online Geospatial Interactive Online Visualization And aNalysis Infrastructure* (GIOVANNI – <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>), que permite acesso a uma gama variada de dados de sensoriamento remoto de diferentes programas e missões espaciais da NASA (National Aeronautics and Space Administration). As informações adquiridas de AOD fornecidas no GIOVANNI são provenientes do sensor *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo dos satélites *Aqua* e *Terra*. Ambos os satélites apresentam esses dados com resolução temporal diária e resolução espacial de três quilômetros. O produto AOD coletado dos

**Figura 1**

Destaque da localização do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), Ceará, Brasil, suas áreas de influência e do Porto do Pecém.



Ai I: Município de São Gonçalo do Amarante; Ai II: municípios de Paracuru e Paraipaba; Ai III: Município de Caucaia.

Fonte: elaboração própria.

← Direção preferencial dos ventos – primavera e verão.

sensores MODIS foi o Aerosol Optical Depth 550nm (Dark Target), no período de 10 de janeiro de 2006 a 31 de dezembro de 2017.

Para a coleta dos dados, foi necessário selecionar as áreas dos municípios do estudo, por meio de coordenadas geográficas traçadas a partir de um polígono norte, sul, leste, oeste. Dessa forma, a área que compreende o Município de Caucaia foi demarcada como norte latitude -3.565851, sul latitude -3.992041, leste longitude -38.645648 e oeste longitude -38.997520. O Município de São Gonçalo do Amarante foi definido como norte latitude -3.557242, sul latitude -3.696246, leste longitude -38.858943 e oeste longitude -39.314822. As áreas dos municípios de Paracuru e Paraipaba foram delimitadas em um mesmo polígono: norte latitude -3.335093, sul latitude -3.530176, leste longitude -38.917054 oeste longitude -39.255959.

### **Aquisição dos dados meteorológicos**

Para a estimativa da concentração de material particulado fino, é necessário incluir a temperatura média e a umidade relativa média para ajuste dos modelos preditivos. Para isso, optou-se por utilizar dados mensurados em vez de dados estimados por satélite. Inicialmente a solicitação das informações meteorológicas para as Ai foi feita à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), entretanto, não há informações para todo o período analisado.

Com isso, foi necessária a coleta dessas informações em outro banco de dados, que oferecia informações meteorológicas para todo o período analisado, porém, de região circunvizinha. Foram utilizados dados da estação meteorológica de Fortaleza, Ceará (código OMM: 82397; latitude -3.81° e longitude -38.53°), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Da estação meteorológica de Fortaleza, foram coletadas as leituras diárias de temperatura (média compensada) e umidade relativa média para o período de 2006 a 2017.

Além dos dados de temperatura e umidade relativa, esta pesquisa também utilizou informações sobre velocidade e direção preferencial dos ventos. Apesar de não constarem em nosso modelo de predição do MP<sub>2,5</sub>, são úteis para entender a dinâmica dos poluentes na região. Essas informações foram obtidas por meio do site do Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA). Os dados só estavam disponíveis aos Municípios de Caucaia (PCD – 32322) e São Gonçalo do Amarante (PCD – 32325) para o período de 2006 a 2015.

### **Análise estatística**

Este trabalho aplicou o modelo de predição das concentrações de MP<sub>2,5</sub> desenvolvido por Gonçalves<sup>26</sup>, que utiliza como termos as leituras diárias de AOD por satélite e dados meteorológicos de temperatura média (TEMP) e umidade relativa (RH). Trata-se de regressão não linear composta por função exponencial dos termos, resultando em uma estimativa da concentração média diária do MP<sub>2,5</sub>.

O modelo considerou ainda os dados de AOD como polinômios de primeiro, segundo e terceiro graus (AOD, AOD<sup>2</sup>, AOD<sup>3</sup>) e, em seguida, considerou as variáveis meteorológicas como controle das estimativas de AOD (TEMP, TEMP<sup>2</sup>, RH, RH<sup>2</sup>). Por fim, foram acrescentadas no modelo termos de interação entre AOD, AOD<sup>2</sup>, AOD<sup>3</sup> e o seno e cosseno da variável dia para um período de 365,25 dias (cos.(days\*2\* π /365.25), sin.(days\*2\* π /365.25)). Esse tipo de medida do seno e cosseno dos dias ajuda a controlar as sazonalidades não esperadas no modelo, ou seja, não estão presentes na forma de variáveis de controle. O modelo utilizado é descrito, a seguir:

$$\begin{aligned} MP_{2,5} = & \exp(\alpha + \beta_1 \cdot AOD + \beta_2 \cdot AOD^2 + \beta_3 \cdot AOD^3 + \beta_4 \cdot (AOD \cdot TEMP) + \beta_5 \cdot (AOD \cdot RH) + \\ & \beta_6 \cdot (AOD \cdot TEMP^2) + \beta_7 \cdot (AOD \cdot RH^2) + \beta_8 \cdot (AOD \cdot \cos\_days) + \beta_9 \cdot (AOD \cdot \sin\_days) + \beta_{10} \cdot (AOD^2 \cdot \cos\_days) + \\ & \beta_{11} \cdot (AOD^2 \cdot \sin\_days) + \beta_{12} \cdot (AOD^3 \cdot \cos\_days) + \beta_{13} \cdot (AOD^3 \cdot \sin\_days) \end{aligned}$$

A performance desse modelo foi avaliada por Gonçalves em 2016, através da análise de coeficiente de determinação ajustado (R<sup>2</sup>adj), desvio padrão residual (RMSE – *root-mean-square deviation*), critério de informação de Akaike (AIC) e autocorrelação parcial dos resíduos por defasagens, provenientes da comparação do resultado das previsões do modelo e medições em solo do MP<sub>2,5</sub>. O modelo final obteve valores de R<sup>2</sup> ajustado de 0,82, de desvio padrão residual de 8,60 μg m<sup>-3</sup> e AIC de 4.779,6.

Desta maneira, por se tratar de um modelo robusto para a região em que foi desenvolvido e ser relativamente simples de se trabalhar, decidiu-se por utilizá-lo para a predição diária do  $MP_{2,5}$  nas áreas sob a influência do CIPP. Mais informações sobre a estrutura e o desenvolvimento do modelo podem ser encontradas em Gonçalves <sup>26</sup>.

Para a aplicação do modelo de estimativa e produção dos resultados, foi utilizado o Aplicativo R e o pacote R openair (<http://www.r-project.org>).

## Resultados

A Tabela 1 apresenta um resumo das estimativas diárias de  $MP_{2,5}$  em cada área de influência do CIPP, bem como das medidas meteorológicas, ambas estratificadas no tempo para o período de 2006 a 2010 (período de instalação de muitas indústrias) e 2011 a 2017 (período mais consolidado de operação das indústrias). A concentração média estimada de  $MP_{2,5}$  em todas as áreas de influência no período analisado foi de  $8\mu g m^{-3}$ . As maiores concentrações estimadas ocorreram prioritariamente no período de 2011 a 2017. A área de influência I apresentou o maior pico de concentração ( $44\mu g m^{-3}$ ), e a área de influência II o menor com  $25\mu g m^{-3}$ . Considerando as variáveis meteorológicas, observou-se que a temperatura média variou entre  $27^{\circ}C$  e  $28^{\circ}C$ , e a máxima registrada alcançou  $31^{\circ}C$ . A umidade relativa variou entre 77% e 78%, atingindo a máxima de 97% (Tabela 1).

De maneira geral, em todas as Ais, períodos de maior umidade relativa apresentaram as menores concentrações de  $MP_{2,5}$ , e os períodos de seca com maiores temperaturas apresentaram as maiores concentrações. Ao observar a correlação linear entre as variáveis meteorológicas e as concentrações preditas de  $MP_{2,5}$ , o comportamento encontrado foi moderado. O  $MP_{2,5}$  apresentou correlação negativa entre a umidade relativa na Ai I (-0,41) e na Ai II/III (-0,46 em ambas as áreas). Já a correlação entre temperatura e as concentrações estimadas de  $MP_{2,5}$  foi positiva com valores de 0,41 na Ai I, 0,44 na Ai II e 0,42 na Ai III (dados não apresentados em tabela).

O comportamento das concentrações estimadas de  $MP_{2,5}$  apresentou padrão sazonal esperado. As maiores concentrações foram registradas nos meses de setembro a novembro, dentro do período de seca na região. Já as menores concentrações foram registradas nos meses de março a maio, período de chuva. A média da concentração estimada de  $MP_{2,5}$  do trimestre, de setembro a novembro (período

**Tabela 1**

Resumo estatístico das estimativas diárias de  $MP_{2,5}$  em cada área de influência do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), Ceará, Brasil, e dos dados meteorológicos estratificados no tempo. Períodos 2006-2010 e 2011-2017.

Área de influência do CIPP	Variável	Período	Média anual	DP	IQR	mínimo	mediana	máximo	n
Ai I	$MP_{2,5}$ ( $\mu g m^{-3}$ )	2006-2010	8	5	8	1	7	42	1.826
		2011-2017	8	6	8	1	7	44	2.557
Ai II	$MP_{2,5}$ ( $\mu g m^{-3}$ )	2006-2010	8	5	10	1	6	25	1.826
		2011-2017	8	6	10	1	6	31	2.557
Ai III	$MP_{2,5}$ ( $\mu g m^{-3}$ )	2006-2010	8	6	9	1	6	36	1.826
		2011-2017	8	6	9	1	6	37	2.557
Todas as áreas de influência	Temperatura ( $^{\circ}C$ )	2006-2010	27	1	1	23	28	30	1.826
		2011-2017	28	1	1	24	28	31	2.557
	Umidade relativa (%)	2006-2010	77	6	9	58	76	97	1.826
		2011-2017	78	6	8	62	77	97	2.557

DP: desvio padrão; IQR: amplitude interquartil. Ai I: Município de São Gonçalo do Amarante; Ai II: Municípios de Paracuru e Paraipaba; Ai III: Município de Caucaia.

Fonte: AOD/MODIS – *Geospatial Interactive Online Visualization And aNalysis Infrastructure* (GIOVANNI – <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>).

Temperatura média e umidade relativa – Instituto Nacional de Meteorologia.

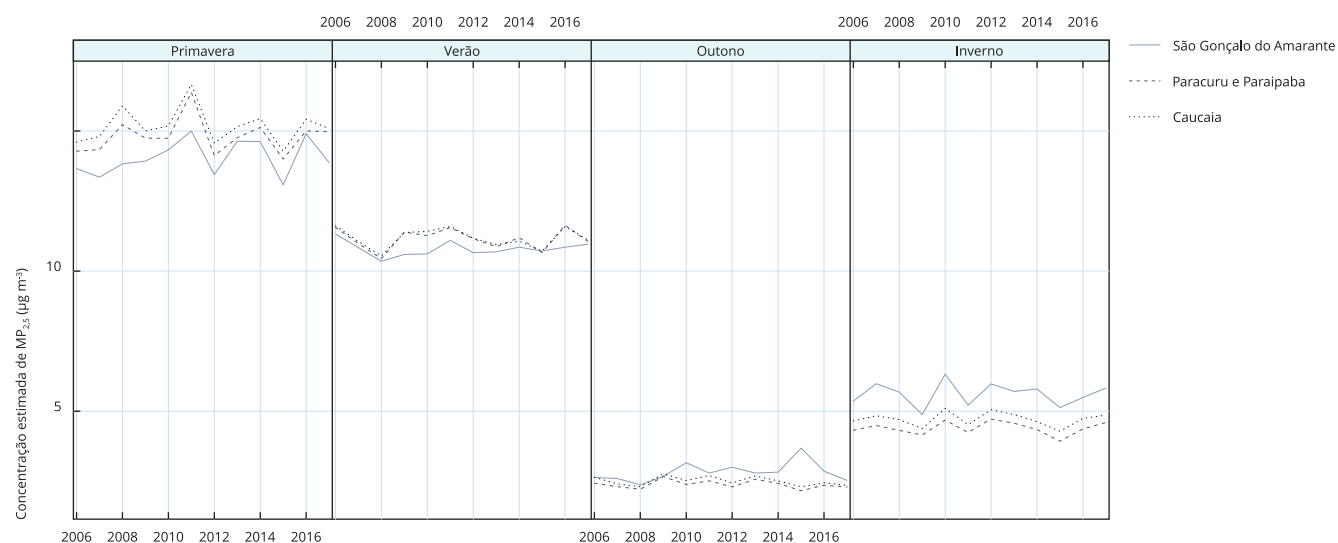
Nota: as variáveis de temperatura e umidade relativa foram as mesmas em todos os três modelos.

de seca), foi superior a  $13\mu\text{g m}^{-3}$  em todas as áreas de influência. Por outro lado, os meses de março a maio (período de chuva) apresentaram as menores médias trimestrais estimadas, inferiores a  $5\mu\text{g m}^{-3}$ . Durante o período de seca, a Ai III apresentou as maiores concentrações, seguida da Ai II e Ai I. Já no período de chuva, foi a Ai I que apresentou as maiores concentrações, seguida da Ai III e da Ai II (Figura 2).

As áreas de influência I e III foram marcadas predominantemente por ventos que sopram do leste para oeste, vindos de Fortaleza, na direção do CIPP (Ai III e I), e de lá na direção da Ai II. Esse comportamento foi mais marcado nos meses de setembro a fevereiro (meses de seca), que foram justamente os meses de maior concentração de material particulado em todas as Ai. Os meses de seca também foram os de maior média da velocidade dos ventos, variando entre  $10$  e  $13\text{m s}^{-1}$  nas Ais III e I (Figuras 3 e 4).

## Figura 2

Distribuição das médias de concentração de  $\text{MP}_{2,5}$  por estações do ano. Municípios de Paracuru, Paraipaba, São Gonçalo do Amarante e Caucaia. Estado do Ceará, Brasil. Período de 2006-2017.



Ai I: Município de São Gonçalo do Amarante; Ai II: municípios de Paracuru e Paraipaba; Ai III: Município de Caucaia; Inverno: junho, julho e agosto; Outono: março, abril e maio; Primavera: setembro, outubro e novembro; Verão: dezembro, janeiro e fevereiro.

Fonte: AOD/MODIS – *Geospatial Interactive Online Visualization AND aNalysis Infrastructure* (GIOVANNI – <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>).

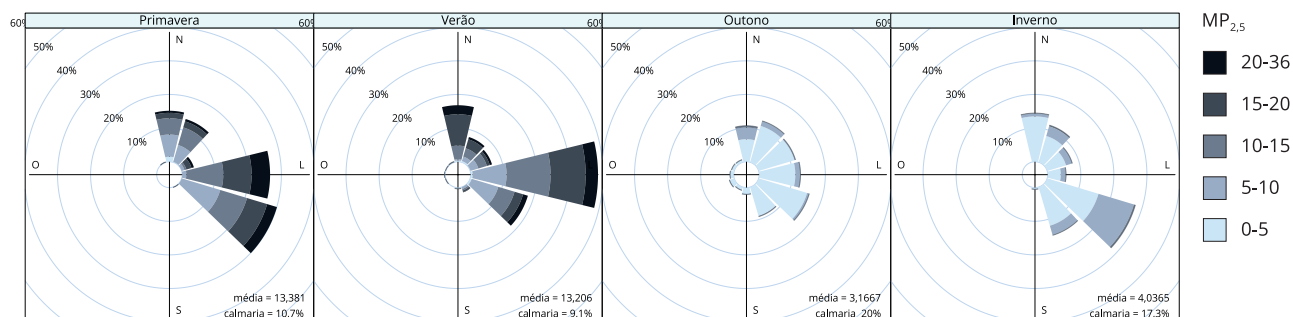
Temperatura média e umidade relativa – Instituto Nacional de Meteorologia.

Nota: as variáveis de temperatura e umidade relativa foram as mesmas em todos os três modelos.



**Figura 3**

Rosa de poluição do Município de Caucaia (Ai III). Estado do Ceará, Brasil. Período de 2006-2015.



Inverno: junho, julho e agosto; Outono: março, abril e maio; Primavera: setembro, outubro e novembro; Verão: dezembro, janeiro e fevereiro.

Fonte: AOD/MODIS – *Geospatial Interactive Online Visualization And aNalysis Infrastructure* (GIOVANNI – <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>).

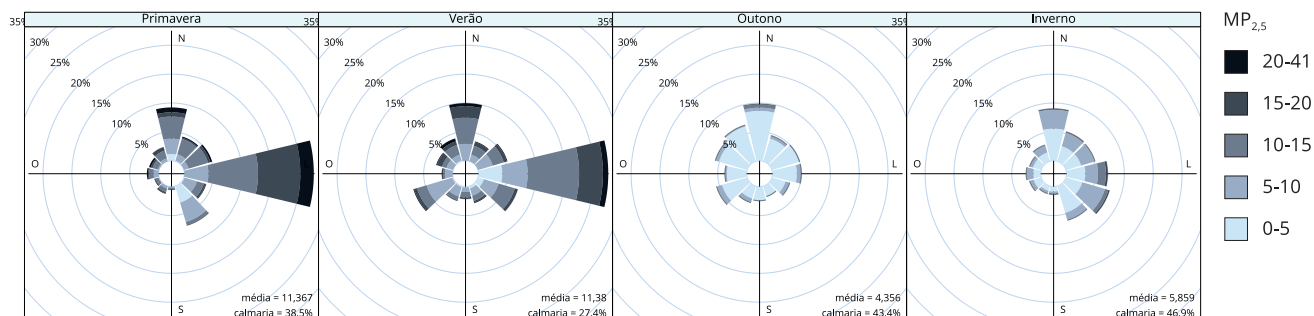
Temperatura média e umidade relativa – Instituto Nacional de Meteorologia.

Nota: as variáveis de temperatura e umidade relativa foram as mesmas em todos os três modelos.

Ai III: Município de Caucaia – dados disponíveis somente no período de 2006-2015.

**Figura 4**

Rosa de poluição do Município de São Gonçalo do Amarante (Ai I). Estado do Ceará, Brasil. Período de 2006-2015.



Inverno: junho, julho e agosto; Outono: março, abril e maio; Primavera: setembro, outubro e novembro; Verão: dezembro, janeiro e fevereiro.

Fonte: AOD/MODIS – *Geospatial Interactive Online Visualization And aNalysis Infrastructure* (GIOVANNI – <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>).

Temperatura média e umidade relativa – Instituto Nacional de Meteorologia.

Nota: as variáveis de temperatura e umidade relativa foram as mesmas em todos os três modelos.

Ai I: Município de São Gonçalo do Amarante – dados disponíveis somente no período de 2006-2015.



## Discussão

O modelo de estimativa nos permitiu observar que as médias de concentração anual de  $MP_{2,5}$  não excedem o atual padrão nacional de qualidade do ar, apesar de existirem dias em que as concentrações médias diárias excederam as recomendações previstas na legislação. Apesar dos resultados referentes às médias anuais serem adequados perante a legislação vigente, é importante dizer que os padrões atualmente considerados seguros necessitam ser revistos<sup>27,28</sup>. Inclusive, em 2015, a OMS reconheceu que há um crescente número de evidências demonstrando os impactos do  $MP_{2,5}$  à saúde em baixas concentrações e em curto período de exposição (menor que 24h). Assim, é importante rever e atualizar as bases de evidências da OMS, para que as futuras recomendações estejam mais alinhadas a essas novas descobertas e desafios<sup>29</sup>.

Foi possível constatar também que as condições meteorológicas exercem um papel importante nos processos de remoção e manutenção das concentrações do material particulado na região. Dias mais úmidos foram os que apresentaram as menores concentrações de material particulado. Esse comportamento é semelhante ao que foi verificado por Lou et al.<sup>30</sup>. Os autores observaram uma forte influência da umidade relativa ( $RH > 80\%$ ) na promoção de fatores que propiciam remoção de partículas finas do ambiente. Em contrapartida, os dias mais quentes foram os que apresentaram as maiores concentrações. Esse comportamento também está de acordo com o observado por Wang & Ogawa<sup>31</sup>, que salientam diversos processos precursores do material particulado como dependentes da temperatura. Entretanto, como as relações entre os fatores meteorológicos e as partículas em suspensão variam de forma espaço-tempo, esse comportamento não é uma regra. Por exemplo, Li et al.<sup>32</sup> observaram uma correlação negativa entre temperatura e concentração de  $MP_{2,5}$ . Neste caso, eles destacam que a influência da temperatura nos movimentos de massa de ar pode ter contribuído para o processo de dispersão do material particulado na região.

Observou-se também a existência de um comportamento sazonal da concentração estimada de material particulado. Em todos os anos estudados, os meses de seca (setembro ao início de fevereiro) apresentaram as maiores concentrações de  $MP_{2,5}$ . As menores concentrações de  $MP_{2,5}$  foram registradas no período de chuvas do Ceará, e de maneira mais acentuada nos últimos três meses na quadra chuvosa (meses da estação outono). No Estado do Ceará, a quadra chuvosa se inicia em fevereiro (mês de transição do verão para o outono) e se estende até o final de maio (outono)<sup>33</sup>. Com isso, podemos supor que as baixas concentrações dentro do período chuvoso podem estar relacionadas a processos de deposição do material particulado por conta da chuva e das características atmosféricas de maior umidade que podem contribuir para a remoção do  $MP_{2,5}$ . Em seu estudo, Wu et al.<sup>34</sup> observaram um efeito de deposição de  $MP_{2,5}$  mais relacionado com a intensidade da chuva do que com a duração. Desta forma, mesmo se as regiões de estudo apresentarem períodos com rápidas pancadas de chuva, isso pode ser o suficiente para contribuir com a remoção do material particulado.

Além do comportamento sazonal das concentrações do material particulado na região, ao observar o comportamento da direção preferencial dos ventos nas Ais III e I (Figura 3 e 4) e o posicionamento geográfico de cada uma das Ais (Figura 1), percebe-se que na Ai III a ocorrência de ventos do leste para o oeste (especialmente nos meses de setembro a fevereiro) contribuiu para a dispersão de parte do  $MP_{2,5}$  em direção a Ai I. Seguindo este mesmo padrão, também nos meses de setembro a fevereiro há uma forte predominância de ventos do leste na Ai I, o que contribuiu com o transporte dos particulados até a área de influência vizinha a oeste (Ai II). Como consequência desse fluxo direcional bastante marcado dos ventos do sentido leste para oeste, e justamente nos meses em que se observam na região as maiores concentrações de  $MP_{2,5}$ , a Ai II torna-se a receptora final do material particulado vindo das outras áreas de influência, Ai I e III. Como resultado desse processo, observa-se que, nos meses de setembro a fevereiro, as médias de concentração de  $MP_{2,5}$  na Ai II se elevavam bastante e tornavam-se maiores do que na Ai I, que foi a área de influência que registrou a maior concentração de  $MP_{2,5}$  entre todas as outras e foi a que mantinha as maiores concentrações de material particulado durante os ciclos sazonais de baixa concentração (maio a agosto) (Figura 2).

A aplicação desse modelo para estimar a concentração de  $MP_{2,5}$  nas três áreas de influência estudadas produziu um conjunto de informações até então inéditas. Os dados produzidos por este trabalho podem auxiliar no diagnóstico e acompanhamento dos efeitos da poluição atmosférica na saúde da população. O vigiar recomenda o acompanhamento dos dados de internação e óbitos por

doenças do aparelho respiratório e cardiovascular como indicadores de impacto na saúde de populações expostas ao MP<sup>35</sup>.

Com a informação obtida da concentração do material particulado, é possível estimar o risco relativo de óbitos ou internações por doenças respiratórias e cardiovasculares em um período retrospectivo de 11 anos na região. A partir dos resultados, pode-se tomar decisões sobre a necessidade, ou não, de um sistema de vigilância que vai monitorar e informar o estado da saúde da população e da qualidade do ar local de maneira constante. Pode-se também entender como necessário implementar um programa que incentive ações que diminuam a exposição individual em períodos mais críticos, neste caso, nos meses de seca. Pode-se até mesmo tomar medidas de realocação da população próxima às indústrias.

O modelo utilizado nesta pesquisa foi construído a partir de uma regressão não linear, que utilizou como variáveis resposta polinômios das medidas de AOD, umidade relativa e temperatura média, além de variáveis de controle de sazonalidade e interação. O fato de ter sido desenvolvido e avaliado no Brasil e de apresentar um bom desempenho ( $R^2 = 0,82$ ) explicando a variação do MP<sub>2,5</sub> utilizando somente duas covariáveis meteorológicas foram pontos importantes para a escolha do modelo aplicado. Foi necessária a coleta de somente três informações em bases de dados externas para sua aplicação (AOD, temperatura média e umidade relativa média). Esse fator é de grande importância quando se avalia a possibilidade de aplicar este modelo em diferentes regiões, principalmente as que não dispõem de muitas informações complementares que muitos modelos mais complexos requerem.

Além do modelo utilizado nesta pesquisa, existem diferentes formas de obter a estimativa da concentração média do MP<sub>2,5</sub>, em escala municipal, nacional ou até global. Song et al.<sup>36</sup> estimaram a concentração de MP<sub>2,5</sub> na cidade de Xiam, na China, por meio de um modelo aditivo generalizado que explicou 69% da variação da concentração do material particulado fino na região. Ainda na China, mas desta vez em uma escala nacional, em 2016, You et al.<sup>37</sup> desenvolveram um modelo de estimativa do MP<sub>2,5</sub> que foi capaz de explicar 76% da variação do material particulado. Neste trabalho, foi utilizada uma técnica de regressão ponderada geograficamente para estimar a concentração do material particulado. Até mesmo modelos mais complexos baseados em *machine learning* já foram aplicados na estimativa da concentração do MP<sub>2,5</sub><sup>38</sup>.

Contudo, os modelos citados anteriormente como exemplo utilizam-se de informações de uso de solo e leituras de material particulado mensurados para serem ajustados e validados. Já em nosso estudo, este tipo de informação mensurada localmente não estava disponível. Atualmente estão sendo coletadas algumas amostras da concentração de MP<sub>2,5</sub> na região do CIPP. Apesar de ainda não ser possível ajustar o modelo utilizado com os dados coletados até o momento, elaborando uma equação própria às características meteorológicas da região, os resultados preliminares coletados indicam concentrações semelhantes às estimadas nesta pesquisa.

## Considerações finais

A partir dos dados produzidos, foi possível compor um cenário abrangente que inclui uma estimativa da concentração das partículas finas nas regiões de estudo, bem como a compreensão do comportamento dessas partículas de acordo com as características meteorológicas da região. Apesar das estimativas estarem abaixo do recomendado pela OMS e legislação local vigente, é crescente o número de evidências sobre os impactos adversos à saúde do MP<sub>2,5</sub>, mesmo em baixas concentrações.

A partir disso, seria importante a continuidade da mensuração local das concentrações das partículas finas (MP<sub>2,5</sub>) na região, para que nossos resultados estimados sejam comparados e validados para essas regiões específicas. Isso permitiria o uso deste modelo de maneira constante, contribuindo para ações de vigilância desse poluente na região.

Além da possibilidade de validação do modelo de predição, a medida da concentração do MP<sub>2,5</sub> in loco pode permitir que os componentes químicos dessas partículas sejam caracterizados. Esse ponto demonstra-se importante, pois a variada gama de elementos suspensos na atmosfera, no entorno do CIPP, que é proveniente das atividades industriais lá desenvolvidas, pode vir a compor as partículas finas suspensas, potencializando sua toxicidade e gerando impactos à saúde, mesmo em baixas concentrações.

Além disso, como objetivo de se monitorar a qualidade do ar é, em última instância, garantir que não haja impactos negativos à saúde da população local, é importante que se obtenham informações sobre uma possível associação entre a concentração estimada do  $MP_{2,5}$  e impactos à saúde dessas populações expostas.

Os dados obtidos nos passos propostos acima podem trazer informações que justifiquem a necessidade da instalação de uma unidade sentinela na região, que seria responsável por acompanhar o comportamento das taxas de internação e óbito por doenças do aparelho circulatório e respiratório na região de maneira mais específica. Além disso, o modelo de estimativa aplicado nesta pesquisa pode ser utilizado como suporte para as equipes de vigilância da qualidade do ar nessas regiões, já que tem um custo menor de operação se comparado a uma estação local, pode obter estimativas retroativas e pode ser aplicado em diferentes regiões próximas, dinamizando o processo de vigilância.

## Colaboradores

L. O. Couto, S. S. Hacon, K. S. Gonçalves e A. R. S. Périssé contribuíram na concepção do estudo, aplicação das análises e interpretação dos resultados, redação do artigo, aprovação da versão final. S. A. S. Nuto, A. Gioda, F. W. Sousa e E. B. Barreira Filho contribuíram na redação e revisão do artigo, aprovação da versão final.

## Informações adicionais

ORCID: Lucas de Oliveira do Couto (0000-0002-3758-3567); Sharmênia de Araújo Soares Nuto (0000-0002-4763-6773); Sandra de Souza Hacon (0000-0003-2836-3447); Adriana Gioda (0000-0002-5315-5650); Francisco Wagner de Sousa (0000-0002-5588-2501); Edênio Baltazar Barreira Filho (0000-0002-7641-677X); Karen dos Santos Gonçalves (0000-0002-3075-6779); André Reynaldo Santos Périssé (0000-0002-5253-5774).

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) – código de financiamento 001.

## Referências

1. World Health Organization. Air pollution, 2018. <https://www.who.int/westernpacific/health-topics/air-pollution> (acessado em 29/Jun/2019).
2. Feng S, Gao D, Liao F, Zhou F, Wang X. The health effects of ambient  $PM_{2,5}$  and potential mechanisms. *Ecotoxicol Environ Saf* 2016; 128:67-74.
3. Health Effects Institute. State of global air/2018. A special report on global exposure to air pollution and its disease burden. <https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga-2018-report.pdf> (acessado em 29/Jun/2019).
4. Health Effects Institute. Interactive data explorer. Health effects, 2018. <https://www.stateofglobalair.org/data/#/health/plot> (acessado em 29/Jun/2019).
5. Laumbach R, Meng Q, Kipen H. What can individuals do to reduce personal health risks from air pollution? *J Thorac Dis* 2015; 7:96-107.
6. U.S. Environmental Protection Agency. Particle pollution and your health. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1001EX6.txt> (acessado em 29/Jun/2019).
7. U.S. Environmental Protection Agency. Air quality criteria for particulate matter, 2004. <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=87903> (acessado em 29/Jun/2019).
8. Brasil. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. *Diário Oficial da União* 1981; 2 set.

9. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 5, de 15 de junho de 1989. Dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR. Diário Oficial da União 1989; 25 ago.
10. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Diário Oficial da União 1990; 22 ago.
11. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da União 2018; 21 nov.
12. Instituto de Energia e Meio Ambiente. 1º diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil. 2014. [http://www.forumclima.pr.gov.br/arquivos/File/Rosana/Diagnostico\\_Qualidade\\_do\\_Ar\\_Versao\\_Final\\_Std.pdf](http://www.forumclima.pr.gov.br/arquivos/File/Rosana/Diagnostico_Qualidade_do_Ar_Versao_Final_Std.pdf) (acessado em 22/Out/2017).
13. Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. Cenário atual do complexo industrial e portuário do Pecém. 2013. <https://www.al.ce.gov.br/phocadownload/cenarioatualpecem.pdf> (acessado em 13/Out/2017).
14. Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Ceará. Rede de monitoramento da qualidade do ar. 2018. <https://www.troposfera.es/br/referencias-2/siam-estado-de-ceara/contaminantes-quimicos-da-atmosfera.html> (acessado em 29/Jun/2019).
15. Kumar N, Chu A, Foster A. An empirical relationship between PM<sub>2.5</sub> and aerosol optical depth in Delhi Metropolitan. *Atmos Environ* (1994) 2007; 41:4492-503.
16. Kumar N, Chu A, Foster A. Remote sensing of ambient particles in Delhi and its environs: estimation and validation. *Int J Remote Sens* 2008; 29:3383-405.
17. van Donkelaar A, Martin RV, Brauer M, Kahn R, Levy R, Verduzco C, et al. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application. *Environ Health Perspect* 2010; 118:847-55.
18. Strawa AW, Chatfield RB, Legg M, Scarnato B, Esswein R. Improving retrievals of regional fine particulate matter concentrations from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) and ozone monitoring instrument (OMI) multisatellite observations. *J Air Waste Manag Assoc* 2013; 63:1434-46.
19. Stieb DM, Chen L, Beckerman BS, Jerrett M, Crouse DL, Omariba DWR, et al. Associations of pregnancy outcomes and PM<sub>2.5</sub> in a national Canadian study. *Environ Health Perspect* 2016; 124:243-9.
20. Zheng Y, Zhang Q, Liu Y, Geng G, He K. Estimating ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations over three megalopolises in China using satellite-derived aerosol optical depth measurements. *Atmos Environ* 2016; 124:232-42.
21. Wang BZ, Chen Z. High-resolution satellite-based analysis of ground-level PM<sub>2.5</sub> for the city of Montreal. *Sci Total Environ* 2015; 541:1059-69.
22. Song W, Jia H, Huang J, Zhang Y. A satellite-based geographically weighted regression model for regional PM<sub>2.5</sub> estimation over the Pearl River Delta region in China. *Remote Sens Environ* 2014; 154:1-7.
23. Cobourn WG. An enhanced PM<sub>2.5</sub> air quality forecast model based on nonlinear regression and back-trajectory concentrations. *Atmos Environ* 2010; 25:3015-23.
24. Liu Y, Koutrakis P, Kahn R. Estimating fine particulate matter component concentrations and size distributions using satellite-retrieved fractional aerosol optical depth: Part 1 – method development. *J Air Waste Manag Assoc* 1995 2007; 57:1351-9.
25. Liu Y, Koutrakis P, Kahn R, Turquet S, Yantosca RM. Estimating fine particulate matter component concentrations and size distributions using satellite-retrieved fractional aerosol optical depth: part 2-a case study. *J Air Waste Manag Assoc* 2007; 57:1360-9.
26. Gonçalves KS. Cardiovascular diseases and the exposure to particulate air pollutants derived from forest fires in Porto Velho municipality, Rondonia state, Brazilian Amazon rain forest regionien [Tese de Doutorado]. Rio de Janeiro: Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz; 2016.
27. Shi L, Zanobetti A, Kloog I, Coull BA, Koutrakis P, Melly SJ, et al. Low-concentration PM<sub>2.5</sub> and mortality: estimating acute and chronic effects in a population-based study. *Environ Health Perspect* 2016; 124:46-52.
28. Nascimento AP, Santos JM, Mill JG, Souza JB, Reis Júnior NC, Reisen VA. Associação entre concentração de partículas finas na atmosfera e doenças respiratórias agudas em crianças. *Rev Saúde Pública* 2017; 51:3.
29. World Health Organization. WHO Expert Consultation: available evidence for the future update of the WHO Global Air Quality Guidelines (AQGs). <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2016/who-expert-consultation-available-evidence-for-the-future-update-of-the-who-global-air-quality-guidelines-aqgs-2016> (acessado em 23/Nov/2018).
30. Lou C, Liu H, Li Y, Peng Y, Wang J, Dai L. Relationships of relative humidity with PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in the Yangtze River Delta, China. *Environ Monit Assess* 2017; 189:582.
31. Wang J, Ogawa S. Effects of meteorological conditions on PM<sub>2.5</sub> concentrations in Nagasaki, Japan. *Int J Environ Res Public Health* 2015; 12:9089-101.
32. Li X, Feng YJ, Liang HY. The impact of meteorological factors on PM<sub>2.5</sub> variations in Hong Kong. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2017; 78:10.
33. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Comportamento das chuvas no Ceará. 2018. [http://www.funceme.br/producos/script/chuvas/Grafico\\_chuvas\\_postos\\_pluviometricos/totalchuvas/index.htm](http://www.funceme.br/producos/script/chuvas/Grafico_chuvas_postos_pluviometricos/totalchuvas/index.htm) (acessado em 29/Dez/2019).

34. Wu Y, Liu J, Zhai J, Cong L, Wang Y, Ma W, et al. Comparison of dry and wet deposition of particulate matter in near-surface waters during summer. *PLoS One* 2018; 13:e0199241.
35. Ministério da Saúde. Vigilância ambiental – VIGIAR, 2019. <http://www.saude.gov.br/vigilancia-em-saude/vigilancia-ambiental/vigiar> (acessado em 29/Jun/2019).
36. Song Y-Z, Yang H-L, Peng J-H, Song Y-R, Sun Q, Li Y. Estimating PM<sub>2.5</sub> concentrations in Xi'an city using a generalized additive model with multi-source monitoring data. *PLoS One* 2015; 10:e0142149.
37. You W, Zang Z, Zhang L, Li Y, Wang W. Estimating national-scale ground-level PM<sub>2.5</sub> concentration in China using geographically weighted regression based on MODIS and MISR AOD. *Environ Sci Pollut Res Int* 2016; 23:8327-38.
38. Lary DJ, Faruque FS, Malakar N, Moore A, Roscoe B, Adams ZL, et al. Estimating the global abundance of ground level presence of particulate matter (PM<sub>2.5</sub>). *Geospat Health* 2014; 8:S611-30.

## Abstract

*Exposure to fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) is associated with numerous negative health outcomes. Thus, monitoring the environmental concentration of PM<sub>2.5</sub> is important, especially in heavily industrialized areas, since they harbor potential emitters of PM<sub>2.5</sub> and substances with the potential to increase the toxicity of already suspended particles. This study aims to estimate daily concentrations of PM<sub>2.5</sub> in three areas under the influence of the Industrial and Port Complex of Pecém (CIPP), Ceará State, Brazil. A nonlinear regression model was applied to estimate PM<sub>2.5</sub>, using satellite-monitored optical depth data. Estimates were performed in three areas of influence (Ai) of the CIPP (São Gonçalo do Amarante – AiI, Paracuru and Paraipaba – AiII, and Caucaia – AiIII), from 2006 to 2017. Estimated mean annual concentrations were lower than established by Brazil's national legislation in all three Ai (8µg m<sup>-3</sup>). In all the Ai, the months of the dry season (September to February) showed the highest concentrations and a predominance of east winds, while the months of the rainy season (March to August) showed the lowest concentrations and less defined winds. Weather conditions can play an important role in the removal, dispersal, or maintenance of concentrations of particulate matter in the region. Even at low estimated concentrations, it is important to assess the composition of fine particles in this region and their possible association with adverse health outcomes in the local population.*

*Air Pollution; Particulate Matter; Industrial Zones; Aerosols; Environmental Health*

## Resumen

*La exposición al material particulado fino (MP<sub>2.5</sub>) está asociada a innumerables problemas de salud. Por ello, la supervisión de la concentración ambiental del MP<sub>2.5</sub> es importante, especialmente en áreas ampliamente industrializadas, puesto que albergan potenciales emisores de MP<sub>2.5</sub> y de sustancias con potencial de aumentar la toxicidad de partículas ya suspendidas. El objetivo de esta investigación es estimar la concentración diaria del MP<sub>2.5</sub> en tres áreas de influencia del Complejo Industrial y Portuario de Pecém (CIPP), Ceará, Brasil. Se aplicó un modelo de regresión no lineal para la estimación del MP<sub>2.5</sub>, mediante datos de profundidad óptica supervisados por satélite. Las estimaciones fueron realizadas en tres áreas de influencia (Ai) del CIPP (São Gonçalo do Amarante – Ai I, Paracuru y Paraipaba – Ai II y Caucaia – Ai III en el período de 2006 a 2017. Las medias anuales de las concentraciones estimadas fueron inferiores a lo establecido por la legislación nacional en todas las Ai (8µg m<sup>-3</sup>). En todas las Ai, los meses referentes al período de sequía (de setiembre a febrero) presentaron las mayores concentraciones y una predominancia de vientos este a oeste, los meses que comprenden el período de lluvia (marzo a agosto) presentaron las menores concentraciones y vientos menos definidos. Las condiciones meteorológicas pueden ejercer un papel importante en los procesos de eliminación, dispersión o mantenimiento de las concentraciones del material particulado en la región. Incluso con bajas concentraciones estimadas es importante que se evalúe la constitución de las partículas finas de esta región, así como su posible asociación con efectos adversos para la salud de la población local.*

*Contaminación del Aire; Material Particulado; Zonas Industriales; Aerosoles; Salud Ambiental*

Recebido em 15/Set/2019

Versão final reapresentada em 05/Jan/2020

Aprovado em 10/Jan/2020