
DIAGNÓSTICO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA EM REGIÕES SEM REDES CONVENCIONAIS DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR: ESTUDO EM UMA PEQUENA CIDADE DO PARANÁ, BRASIL

Andreza Portella Ribeiro, Angélica Baganha Ferreira, Simone Aquino, Heidy Rodriguez Ramos, Cláudia Terezinha Kniess, Cristiano Capellani Quaresma, José Osman dos Santos, Mitiko Saiki e Paulo Hilário Nascimento Saldiva

RESUMO

A gestão pública reconhece a importância dos programas de gerenciamento da qualidade do ar como forma de fiscalizar as atividades potencialmente poluidoras. Uma alternativa para avaliar os contaminantes atmosféricos em regiões com recursos financeiros limitados, apontada pela Organização Mundial de Saúde, é a utilização do monitoramento biológico com plantas. O objetivo do trabalho foi realizar um diagnóstico sobre poluição atmosférica por meio de um método de monitoramento biológico de baixo custo. A pesquisa foi desenvolvida em São Mateus do Sul, Paraná, Brasil, cidade que abriga várias indústrias. O monitoramento biológico foi utilizado para estimar a contaminação atmosférica causada pela atividade de mineração de xisto. Para tanto, foram identificados os teores de 12 elementos químicos em amostras de cascas de árvores.

Para a interpretação dos resultados, utilizaram-se ferramentas geoestatísticas associadas aos casos de doenças respiratórias registradas no Sistema Único de Saúde (dados secundários). Ferro, enxofre e silício apresentaram concentrações médias muito acima da região controle. Os resultados reforçam que a mineração é principal fonte de poluentes atmosféricos, e as regiões com maiores incidências de doenças respiratórias coincidem com as regiões onde os teores de poluentes eram maiores. Com esta proposta, as autoridades sanitárias, que dispõem de pouco orçamento, podem solicitar o monitoramento biológico dos pontos mais críticos dos emissores, analisar as condições de vida da população e melhorar o desempenho de indicadores de saúde e sustentabilidade nos arredores de indústrias mineradoras.

Introdução

A preocupação global com as mudanças climáticas está presente nos diferentes segmentos da sociedade. Estas mudanças também podem ser mensuradas, por exemplo, por meio de padrões de qualidade do ar, em centros urbanos. Esses indicadores, além de evidenciarem os impactos da poluição atmosférica, destacam que os efeitos adversos das emissões antrópicas podem ser verificados com o aumento de

incidências de doenças respiratórias e cardiovasculares, nas populações urbanas (Gervandi *et al.*, 2015).

Assim, a gestão pública reconhece a importância dos programas de gerenciamento da qualidade do ar como forma de fiscalizar as atividades potencialmente poluidoras e garantir um desenvolvimento ecologicamente equilibrado. No entanto, a implantação de programas tradicionais de monitoramento, como o que preconiza a Agência de Proteção

Ambiental dos EUA (US-EPA), requer grandes orçamentos e profissionais especializados para sua efetividade (Snyder *et al.*, 2013).

Uma alternativa para monitorar a qualidade do ar, em regiões com recursos financeiros limitados, apontada pela Organização Mundial de Saúde (OMS), é a utilização do monitoramento biológico com plantas. As plantas funcionam como bioindicadores de qualidade, pois fornecem uma resposta integrada entre

os contaminantes atmosféricos e outras variáveis ambientais. Assim, por meio da quantificação de substâncias químicas nas plantas, é possível estimar os riscos à população, em virtude da poluição ambiental (Mulgrew e Willians, 2000).

O Brasil reconhece a seriedade das questões associadas à degradação do meio ambiente e a importância de serem elaboradas políticas públicas, que minimizem os impactos à natureza e favoreçam o desenvolvimento susten-

PALAVRAS-CHAVE / Geostatística / Mineração / Monitoramento biológico / Saúde e Meio Ambiente /

Recebido: 01/08/2016. Modificado: 20/10/2017. Aceito: 24/10/2017.

Andreza Portella Ribeiro. Doutora em Tecnologia Nuclear, Universidade de São Paulo (USP), Brasil. Professora Universidade Nove de Julho (Uninove), Brasil. e-mail: aportellar@gmail.com

Angélica Baganha Ferreira. Doutora em Ciências, USP, Brasil. Pesquisadora, Instituto de Tecnologia e de Pesquisas de Sergipe, Brasil. e-mail: angelica.bferreira@itps.se.gov.br

Simone Aquino. Doutora em Tecnologia Nuclear, USP, Brasil. Professora, Uninove, Brasil. Endereço: Rua Deputado Salvador Julianelli, s/n, Uninove, Barra Funda. São Paulo - SP, Brasil. CEP: 01156-000. e-mail: siaq06@hotmail.com

Heidy Rodriguez Ramos. Doutora em Administração, USP, Brasil. Professora, Uninove, Brasil. e-mail: heidyr@gmail.com

Cláudia Terezinha Kniess. Doutora em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina. Professora, Uninove, Brasil. e-mail: kniessel@gmail.com

Cristiano Capellani Quaresma. Doutor em Geografia, Universidade Estadual de Campinas. Professor, Uninive, Brasil. e-mail: quaresmacc@yahoo.com.br

José Osman dos Santos. Doutor em Tecnologia Nuclear, USP,

Brasil. Professor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe, Brasil. e-mail: osmansantos@ig.com.br

Mitiko Saiki. Doutora em Química, USP, Brasil. Pesquisadora e Professora, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Brasil. e-mail: mitiko@ipen.br

Paulo Hilário Nascimento Saldiva. Doutor em Patologia, USP, Brasil. Professor, USP, Brasil. e-mail: pepino@usp.br

DIAGNOSIS OF AIR POLLUTION IN AREAS WITHOUT A CONVENTIONAL AIR QUALITY MONITORING NETWORK: A STUDY IN A SMALL CITY OF PARANÁ, BRAZIL

Andreza Portella Ribeiro, Angélica Baganha Ferreira, Simone Aquino, Heidy Rodriguez Ramos, Cláudia Terezinha Kniess, Cristiano Capellani Quaresma, José Osman dos Santos, Mitiko Saiki and Paulo Hilário Nascimento Saldiva

SUMMARY

Public management recognizes the importance of air quality management programs as a way of monitoring potentially polluting activities. An alternative to monitoring air quality in regions with limited financial resources, as indicated by the World Health Organization, is the use of biological monitoring with plants. The objective of this work is to carry out a diagnosis of atmospheric pollution with the application of a biological low-cost method. The study was conducted in São Mateus do Sul, Parana, Brasil, a city that hosts several schist industries. The biological monitoring was used to estimate the atmospheric contamination from mining activities. The contents of 12 chemical elements in tree bark samples were analyzed. In order to interpret the results, geostatistical tools were used

in combination with the data about respiratory diseases, registered in the Unified Health System (secondary data). Iron, sulfur and silicon were the elements that presented the highest average concentrations, much higher than the control region. The results reinforce that the main source of these elements is the mining activity in São Mateus do Sul, and the regions with the highest incidence of respiratory diseases coincided with regions where the levels of pollutants were higher. With this proposal, health authorities can request the biological monitoring of the most critical points of pollutant emitters, analyze the living conditions of the population and improve the performance of health and sustainability indicators in the surroundings of mining industries.

DIAGNÓSTICO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN REGIONES SIN REDES CONVENCIONALES DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE: ESTUDIO EN UNA PEQUEÑA CIUDAD DE PARANÁ, BRASIL

Andreza Portella Ribeiro, Angélica Baganha Ferreira, Simone Aquino, Heidy Rodriguez Ramos, Cláudia Terezinha Kniess, Cristiano Capellani Quaresma, José Osman dos Santos, Mitiko Saiki y Paulo Hilário Nascimento Saldiva

RESUMEN

La gestión pública reconoce la importancia de los programas de gerenciamiento de la calidad del aire como forma de fiscalizar las actividades potencialmente contaminantes. Una alternativa para supervisar la calidad del aire en regiones con recursos financieros limitados, sugerida por la Organización Mundial de la Salud, es la utilización del monitoreo biológico con plantas. El trabajo tiene como objetivo realizar un diagnóstico de la contaminación atmosférica con aplicación de un método biológico de bajo costo. La investigación fue desarrollada en São Mateus do Sul, Paraná, Brasil, ciudad que abriga una industria brasileña minera de esquisto. El monitoreo biológico fue utilizado para estimar la contaminación atmosférica por las actividades mineras. Se analizaron las concentraciones de 12 elementos químicos en muestras de cortezas de árboles.

Para la interpretación de los resultados fueron utilizadas herramientas geoestadísticas y los datos acerca de casos de enfermedades respiratorias registradas en el Sistema Único de Salud (datos secundarios). Hierro, azufre y silicio presentaron concentraciones medias muy por encima de la región control. Los resultados refuerzan que el origen principal de la contaminación atmosférica es la actividad minera, y las regiones con mayores incidencias de enfermedades respiratorias coincidieron con aquellas con mayores niveles de contaminantes. Con esta propuesta, las autoridades sanitarias pueden solicitar el monitoreo biológico de los puntos más críticos de las emisiones de contaminantes, analizar las condiciones de vida de la población y mejorar los indicadores de desempeño de salud y sostenibilidad alrededor de las industrias mineras.

tável. Assim, o país assume o compromisso com as questões ambientais em diversas agendas mundiais, como destacado na Conferência das Partes - COP 21 (UN, 2016).

Por outro lado, o Brasil precisa enfrentar diferentes problemas sociais, uma vez que estimativas de 2012 indicaram que 18×10⁶ pessoas vivem (no país) na linha da pobreza, das quais 60% está em centros urbanos. Além disso, 27×10⁶ brasileiros têm renda vulnerável, o que aumenta o risco de grande parte da população retornar às condições precárias em situa-

ções de estagnação ou choques econômicos. Como consequência, a política brasileira vem dando prioridade às questões voltadas à inclusão social e econômica, com alvo em famílias de baixa renda (Cord *et al.*, 2015).

As políticas redistributivas têm se preocupado em melhorar a educação, garantir empregos de qualidade, saúde e serviços básicos (Cord *et al.*, 2015). Porém, o apoio do governo para resolver problemas associados à degradação ambiental não é suficiente, ainda que se tenha consenso sobre

sua relevância. Além disso, as agências ambientais que mantêm uma rede de monitoramento da qualidade do ar, com especialistas, infraestrutura e novas tecnologias, estão instaladas em grandes cidades, como Porto Alegre, Curitiba, Belo Horizonte, São Paulo e Rio de Janeiro; ou seja, nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, as quais são consideradas economicamente mais importantes (IBGE, 2015).

Especificamente, a presente proposta de estudo considera como objeto de análise a poluição atmosférica em uma peque-

na cidade, São Mateus do Sul, no estado do Paraná, onde uma refinaria de xisto e outras indústrias estão instaladas, liberando seus resíduos no meio ambiente e causando efeitos adversos à qualidade de vida. Diante deste contexto, o trabalho pautou-se na seguinte questão de pesquisa: quais são os tipos de contaminantes atmosféricos em São Mateus do Sul e suas principais fontes emissoras?

Para responder ao questionamento, o trabalho teve como objetivo principal realizar um diagnóstico da poluição atmosférica, com a aplicação de um

método de baixo custo, na cidade de São Mateus do Sul.

Conforme recomendação da OMS, a avaliação da qualidade do ar foi realizada por meio de um monitoramento biológico com plantas (Mulgrew e Willians, 2000). Assim, foram determinados os teores de potenciais contaminantes atmosféricos em cascas de árvores, as quais foram coletadas em diversos pontos na cidade, com o intuito de se obter um conjunto de dados que fosse representativo da área investigada, o que permitiu estimar a exposição dos moradores aos poluentes oriundos das atividades industriais em São Mateus do Sul.

Destaca-se ainda que o trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), uma fundação pública do Ministério da Educação, em parceria com agências públicas do Estado do Paraná.

A cooperação de trabalho entre governo, universidades e institutos de pesquisa tem sido considerada uma forma promissora para tratar diversos problemas, como os relacionados à poluição, no Brasil. Assim, as agências de fomento ligadas ao Ministérios da Educação e da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação vêm apoiando projetos de pós-graduação voltados ao meio ambiente e à sustentabilidade (Angeli *et al.*, 2013; Ribeiro *et al.*, 2013; Moreira *et al.*, 2016).

Método de bioindicação para avaliar a poluição atmosférica

O monitoramento biológico com cascas de árvores se caracteriza como método de bioindicação e/ou biomonitoramento da qualidade do ar. A diferença entre os dois métodos se deve às informações obtidas em cada um deles. A bioindicação permite avaliar a qualidade do ar ao longo do tempo. Com o biomonitoramento, avaliam-se as reações morfológicas das plantas, em resposta à quantidade do contaminante no ar. Dessa forma, é possível estimar quão significativas foram

as mudanças no meio ambiente, em virtude da poluição atmosférica (Markert *et al.*, 1997; Villarouco *et al.*, 2007; Carneiro *et al.*, 2011; Markert, *et al.*, 2011; Rodriguez *et al.*, 2011; Moreira *et al.*, 2016). O estudo realizado em São Mateus do Sul é definido como método de bioindicação, já que não foram analisadas as reações morfológicas nas cascas coletadas.

A principal vantagem da utilização das cascas de árvores, em comparação a outros bioindicadores, está relacionada à possibilidade de as cascas serem coletadas em qualquer período do ano (Schelle *et al.*, 2008; Moreira *et al.*, 2016).

Em alguns casos, a determinação dos níveis dos contaminantes atmosféricos na casca pode refletir um longo período de exposição das árvores, indicando uma concentração média de poluentes que se refere ao acúmulo de vários anos e não à poluição atual. No entanto, na maioria das cidades, é comum a presença de cobertura vegetal de forma generalizada. Portanto, com a determinação dos poluentes e georreferenciamento das árvores, das quais foram retiradas as cascas, pode-se mapear a origem dos contaminantes; ou seja, relacioná-los com as principais fontes emissoras (Schelle *et al.*, 2008).

Dessa forma, a partir dos pontos georreferenciados e a determinação da quantidade de contaminantes nas cascas, pôde-se identificar as atividades industriais que prejudicam a qualidade do ar e podem causar problemas de saúde à população expostas ao ar contaminado, como no caso dos moradores de São Mateus do Sul.

Materiais e Métodos

O presente trabalho caracteriza-se por adotar métodos mistos, que conforme definição do Creswell (2010); se trata de uma abordagem de pesquisa que combina as formas quantitativas e qualitativas. Foi realizado um procedimento sequencial, inicialmente a partir de uma pesquisa quantitativa, do tipo descritiva, com o objetivo de iden-

tificar os tipos de contaminantes encontrados no ar e suas principais fontes emissoras. Em seguida, foi desenvolvida uma pesquisa qualitativa, exploratória, por meio de análise de registros de casos de doenças respiratórias, a partir de dados fornecidos pelo Sistema de Informações Hospitalares (SIH) do DATASUS (s/f). Por fim, os casos de doenças respiratórias foram associados às principais fontes emissoras de poluentes da cidade.

Caracterização da área estudada

Segundo o censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística de 2010, São Mateus do Sul possui uma população de ~41.257 habitantes e uma área de 1.342,633km². O município está localizado no Estado do Paraná, na região Sul do Brasil (25°52'27''S e 50°22'58''O) (Figura 1). Cerca de 60% da população vive na sede urbana e 40% na área rural, distribuídos em cerca de 5000 pequenas propriedades (IBGE, 2012).

O desenvolvimento da cidade começou no ano de 1877, com a intensificação da agricultura

e do extrativismo vegetal. Em meados do século XX, a economia regrediu e a cidade viveu quase duas décadas de estagnação. O crescimento foi retomado no final dos anos 1960, com instalação de uma indústria de grande porte, voltada à exploração de xisto (folhelho betuminoso), uma rocha sedimentar impregnada de um material oleoso que, ao ser submetido aos processos de refino, fornece os mesmos derivados do petróleo de poço: nafta, gás liquefeito de petróleo (GLP), gás combustível (gás de xisto), óleo combustível (gasolina, óleo diesel) e enxofre (Assmann *et al.*, 1999).

Atualmente, o município ocupa a 19ª posição relativa à arrecadação do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) estadual, de um total de 399 cidades, sendo que a atividade econômica está associada à agricultura e serviços em um 40% e à indústria em um 60% (IBGE, 2012; PMSMS, 2016).

Contudo, apesar dos benefícios econômicos que a indústria de xisto trouxe para a cidade, a mineração a céu aberto tem gerado uma grande quantidade de material particulado,

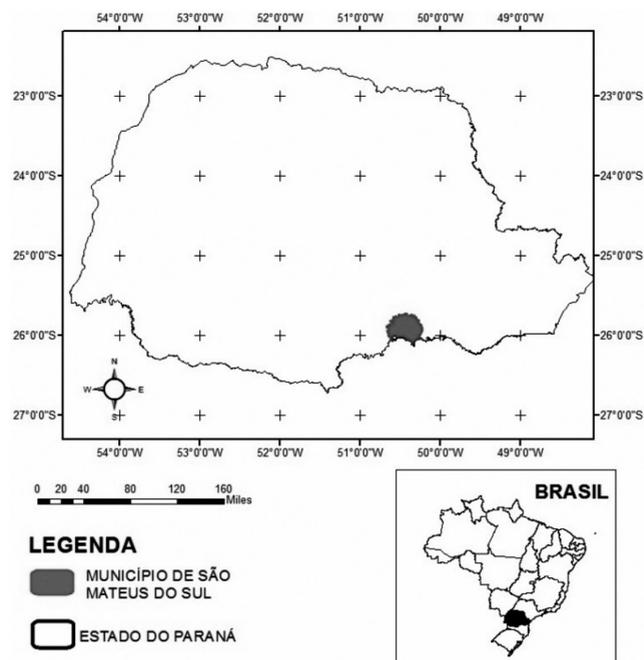


Figura 1. Localização geográfica do município de São Mateus do Sul, Paraná, Brasil.

que são ricos em metais pesados e prejudicam a saúde da população, a fauna e a flora de São Mateus do Sul. As diferentes etapas do processo para extração também contribuem para a emissão de outros compostos químicos voláteis, com grande potencial tóxico, os quais são cancerígenos e podem causar danos respiratórios e neurológicos (Ferreira, 2009; Enriquez, 2009).

Amostragem das cascas de árvores

A coleta dos dados primários foi realizada a partir da amostragem das cascas de árvores no ano de 2007. Foram definidos 62 pontos, abrangendo toda área de São Mateus do Sul (Figura 2a). Para cada ponto foram registradas as coordenadas geográficas, utilizando-se um dispositivo eletrônico portátil com GPS (*Geographic Positioning System*). As latitudes e longitudes foram transformadas para o sistema de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*). Durante a amostragem, priorizou-se a direção principal do vento (W-E) em torno da mineradora de xisto. As cascas foram retiradas a uma altura de 1,7m acima do solo, pois assume-se que a partir de 1,5m de altura, é insignificante a contribuição do solo para deposição de material particulado sobre a casca da árvore; ou seja, a origem dos poluentes é primordialmente devido à deposição atmosférica (Wolterbeek e Bode, 1995).

férica (Wolterbeek e Bode, 1995).

Foram coletadas cascas de *Araucaria angustifolia*, comumente conhecida como ‘pinheiro do Paraná’ ou ‘pinheiro brasileiro’, uma espécie de conífera ameaçada de extinção, na América do Sul. Essa é também a espécie arbórea predominante em São Mateus do Sul. O pinheiro do Paraná é uma árvore que possui cascas rugosas, resinosas e estriadas horizontalmente (Barbieri e Heiden, 2012). As cascas rugosas, normalmente, são soltas das árvores mais rapidamente que as cascas lisas (Martin e Coughtrey, 1982; Schelle *et al.*, 2008). Embora as árvores de cascas rugosas tenham se mostrado mais eficazes para a avaliação das tendências espaciais e temporais, nos estudos sobre a qualidade do ar, ambas as cascas (lisas rugosas) podem ser utilizadas em monitoramento biológicos para avaliação da poluição atmosférica (Schelle *et al.*, 2008; Forbes *et al.*, 2015).

Em São Mateus, coletaram-se ainda cinco amostras de xisto, dentro da área de mineração, com intuito de relacionar os poluentes da casca ao principal resíduo gerado pela indústria.

Para a definição das concentrações mínimas dos elementos investigados; ou seja, concentrações que poderiam ser consideradas como referência de qualidade do ar, foram coletadas cascas rugosas de árvores

localizadas na cidade de Caucaia do Alto, Estado de São Paulo, onde a atividade econômica predominante é a agrícola. Os níveis de poluentes atmosféricos desta região são insignificantes e não oferecem riscos à saúde da população (Ferreira, 2009). Para o presente estudo, esta cidade ficou definida como ‘região controle’.

Coleta dos dados de saúde

Para o levantamento de casos de problemas respiratórios da população local, foi realizada a pesquisa com base em dados secundários, por meio do Sistema de Informações Hospitalares (SIH) do DATASUS (s/f), fornecidos pelos postos de saúde da Secretaria Municipal de Saúde para o ano 2010. Com base em 3000 registros, identificaram-se 245 casos de problemas respiratórios, os quais possibilitaram a obtenção de coordenadas geográficas dos endereços dos pacientes (Figura 2b). As coordenadas foram utilizadas para a elaboração dos mapas que trariam uma estimativa da distribuição dos agravos à saúde que poderiam estar relacionados à poluição atmosférica na cidade. Com os dados de saúde, calculou-se para cada região (quadrante) da cidade, a porcentagem de pacientes com doença respiratória.

Quantificação dos elementos contaminantes

A quantificação dos contaminantes atmosféricos foi realizada conforme protocolo utilizado por Ferreira (2009). Em síntese, as cascas removidas dos troncos das árvores, com o auxílio de uma faca de titânio, foram guardadas em sacos de papel. No laboratório, foram retirados líquens e/ou musgos presentes nas amostras. Estas não foram lavadas para não haver perda do material de interesse adsorvido nas cascas. Para análise, a parte superficial externa das cascas (~3mm) foi removida com o uso de um ralador de titânio (99% de pureza para evitar contaminação).

O material obtido foi passado em uma peneira com telas de 0,2mm de abertura, de modo a obter a casca na forma de pó. Uma massa de 0,5 a 0,6g da amostra e de 2,5g de ácido bórico foram colocadas em um cilindro e prensadas por 60s, com a ajuda de uma prensa de 4ton de força, com intuito de se obter pastilhas de dupla camada (amostra de casca e ácido bórico) com 20mm de diâmetro.

Para a quantificação dos elementos químicos, as pastilhas preparadas foram submetidas à espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF), equipamento EDX 700HS, da Shimadzu Corp. Instrumentos Analíticos, pertencente ao Departamento de Patologia da Universidade de São Paulo.

Foram determinados 12 elementos químicos, tantos nos resíduos de mineração, como nas cascas coletadas em São Mateus do Sul e em Caucaia do Alto. A razão para a escolha desses elementos se baseou no fato de os mesmos terem sido determinados nas cinco amostras de xisto (resíduos), coletadas na área de mineração.

A qualidade analítica dos dados obtidos foi verificada a partir da exatidão e da precisão dos resultados experimentais obtidos com Materiais de Referência Certificados (MRC): NIST 1547 *Peach Leaves* e JB2 Basalt, provenientes respectivamente do *National Institute of Standards and Technology*, EUA e *Geological Survey of Japan*. Nos MRC, foram quantificados os mesmos elementos investigados nas cascas de árvores de São Mateus do Sul.

Tratamento do conjunto de dados

Para a interpretação dos dados, utilizou-se o *software Statistic® 8.0*. Os resultados foram tratados por diferentes ferramentas, como a estatística inferencial (teste t de Student) e a multivariada, com a aplicação da análise fatorial com extração por componentes principais (AF-PCA).

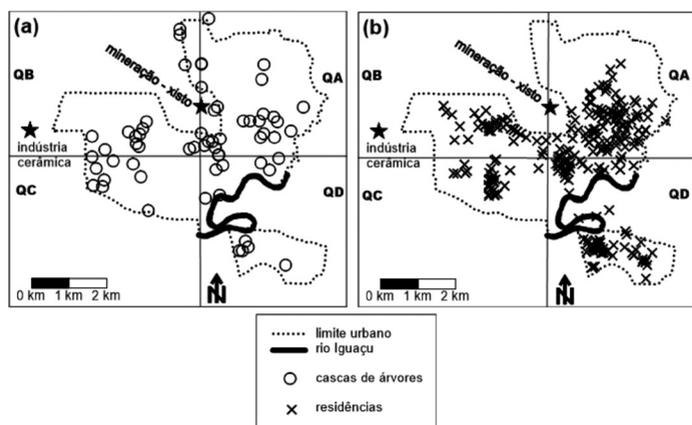


Figura 2. Distribuição espacial dos pontos de coleta de cascas de árvores e residências em São Mateus do Sul, Paraná, Brasil.

O teste t foi aplicado para verificar diferenças estatísticas entre as concentrações dos elementos nas amostras de xisto bruto, nas cascas coletadas em São Mateus do Sul e em Caucaia do Alto (sítio controle).

Com a AF-PCA, obteve-se a explicação sobre a estrutura de covariância por meio de combinações lineares das variáveis originais (as concentrações dos elementos nas cascas), por meio dos autovalores (λ) e dos autovetores (e).

Os autovalores representam a variabilidade de cada componente e os autovetores compõem a base para obter as cargas fatoriais (o peso de cada variável; no caso, dos poluentes). As p-variáveis originais geram, por meio de suas combinações lineares, p-componentes principais que tem como característica obter as componentes em ordem decrescente de máxima variância; ou seja, a primeira componente detém mais informação estatística que a segunda componente principal, que por sua vez tem mais informação que a terceira componente e assim sucessivamente, fazendo a redução da dimensão original das variáveis e facilitando a interpretação das análises para o conjunto de dados (Johnson e Wichor, 2008).

No tratamento dos dados também foi utilizado o *software Surfer Golden® 9* para a elaboração dos mapas de distribuição dos poluentes e dos agravos à saúde, a partir de dados georreferenciados.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos no MRC para os 12 elementos de interesse indicaram erros relativos <5% para todos os elementos analisados e desvios padrões relativos (DPR) <10%, exceto para Pb (DPR= 19%) e Mn (DPR= 11%). Esses valores demonstram que o protocolo adotado na coleta das cascas, preparação das amostras e análises químicas geraram resultados confiáveis. Portanto, os resultados experimentais obtidos para os elementos químicos nos MRC, quando comparados com os seus valores

certificados evidenciam que resultados do estudo são confiáveis; ou seja, foi possível utilizar o conjunto de dados experimentais obtidos com os bioindicadores (cascas), para monitorar a qualidade do ar em São Mateus do Sul.

Os níveis dos metais Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V e Zn encontrados nos resíduos de mineração (xisto) foram na mesma ordem de grandeza, sem diferenças significativas ($p>0,05$), que os observados nas amostras coletadas na região controle (Caucaia do Alto). Da mesma forma, as concentrações desses metais nas cascas retiradas das árvores de São Mateus do Sul não foram significativamente diferentes das concentrações observadas nas amostras de Caucaia do Alto. Portanto, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V e Zn não foram considerados contaminantes atmosféricos em São Mateus do Sul.

Por outro lado, o teste t de Student ($p<0,05$) identificou diferenças estatísticas nas concentrações de Fe, S e Si (principais componentes do minério de xisto). Esses elementos foram encontrados em grandes quantidades, tanto no xisto (Fe= 21.445, S= 11.335 e Si= 118.422, em $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) como nas cascas de árvores de São Mateus do Sul, as quais apresentaram, em $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, os seguintes teores médios: Fe = 4.177, S = 2.429 e Si = 14.890. Estas concentrações ficaram muito acima das concentrações médias obtidas nas cascas da região controle, Caucaia do Alto (Fe= 888; S= 1202 e Si= 632, em $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), apresentando diferenças significativas ($p<0,05$), de acordo com o teste t de Student.

Na Figura 3a, b e c são apresentadas as médias de concentrações obtidas para todos os elementos quantificados, tanto nas cascas de árvores de São Mateus do Sul, como nas da região controle (Caucaia do Alto), pela técnica EDXRF.

Com os teores elementares encontrados nas 62 amostras de São Mateus do Sul e utilizando as coordenadas geográficas de cada ponto, foram

construídos mapas de distribuição da concentração de Fe, S e Si na cidade. Conforme esperado, os mais altos teores dos elementos Fe, S e Si foram observados nas regiões dos quadrantes QA e QB (Figura 3).

Os teores de Fe nas cascas de árvores variaram em todos os pontos de amostragem, sendo que os níveis mais altos podem ser visualizados nas proximidades da mineradora (Figura 3a). As emissões de S da indústria de xisto (Figura 3b) evidenciam a relação com a atividade de mineração. Além de estar presente no minério, o S também é liberado durante o beneficiamento da rocha, no processo de combustão, o qual emite partículas finas e ultrafinas, que tendem a apresentar um comportamento quase-gás, alcançando uma maior área de distribuição (Morawska *et al.*, 2006).

A distribuição espacial de Si (Figura 3c) é mais restrita que a do Fe e S, indicando que sua dispersão depende do tamanho de suas partículas, visto que a emissão está relacionada com a perfuração do minério, causando a liberação de partículas grossas, com maior granulometria; ou seja, aquelas localizadas ao nível do solo, o que limita a dispersão de Si. Além das altas concentrações de Si

ao redor da mineradora, observa-se ainda uma região (a oeste) com altos teores de Si, que está situada nas proximidades de uma indústria cerâmica de grande porte que, conseqüentemente, também contribui com emissões de material particulado rico nesse metal.

Para corroborar as informações obtidas com os mapas de concentração, utilizou-se a estatística multivariada para avaliar se existia forte correlação entre Fe, S e Si e se a principal origem destes, estaria associada à atividade de mineração em São Mateus do Sul. Para a AF-PCA, foram utilizados os dados de concentrações de todos os elementos determinados nas cascas de árvores. Os dados foram normalizados para unificar as diferentes escalas e unidades das medidas. O critério de Kaiser (Yeomans e Golder, 1982) foi utilizado na definição da variância total, que contemplou três componentes principais (Tabela I), os quais representaram 70% da variância total na AF-PCA. Os resultados indicaram no Fator 1 a forte associação entre Cd, Cr, Cu, Pb, V e Zn. O Fator 2 indica forte associação entre Fe, S e Si; enquanto que o Fator 3 apresenta a forte relação entre Co, Mn e Ni.

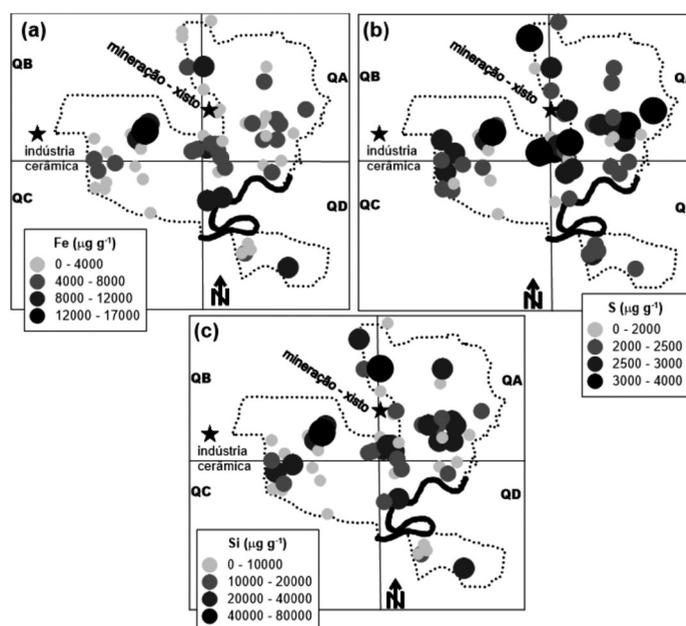


Figura 3. Distribuição das concentrações de Fe (a), S (b) e Si (c) obtidas em cascas de árvores de São Mateus do Sul.

Os Fatores 1 e 3 (Tabela I) apresentaram as maiores cargas fatoriais para aqueles elementos que não representavam potencial de contaminação atmosférica, uma vez que seus teores no xisto e nas cascas de São Mateus do Sul foram equivalentes aos observados nas cascas da região controle. No entanto, no Fator 2 foram observados os maiores *scores* fatoriais para Fe, S e Si (Tabela I), sugerindo que eles têm a mesma origem. Considerando que os três elementos químicos são os principais componentes químicos do xisto, o histórico das atividades industriais na cidade e a distribuição geográfica das concentrações (Figura 3), os elementos Fe, S e Si podem ser utilizados como marcadores das emissões da mineradora, em São Mateus do Sul.

Com relação aos dados de saúde, o percentual (%) de casos respiratórios distribuídos por quadrantes pode ser verificado na Tabela II. A distribuição espacial dos dados de doenças respiratórias permite verificar que os quadrantes QA e

QB (maior ocorrência de casos) coincidem com as regiões onde foram constatadas as maiores concentrações de Fe, S e Si nas cascas de árvores, ou seja, no entorno da indústria mineradora (Figura 4).

O mapeamento do número de residências que incluem moradores que apresentam doenças respiratórias coincide com as áreas que apresentam teores cumulativos de material particulado ricos em Fe, S e Si. É de inteires destacar a utilidade das informações de saúde disponíveis no DATASUS. O trabalho de Enríquez (2009) se caracteriza como um exemplo da utilidade das informações disponibilizadas por meio desse banco de dados; o autor investigou a incidência da morbidade hospitalar, segundo a distribuição percentual das internações por grupos de causa, para o ano 2005. As informações levantadas permitiram classificar certos tipos de doenças como 'típicas de mineração'.

Da mesma forma, o estudo de mapeamento de contaminantes atmosféricos em São Mateus do Sul, a partir de dados no DATASUS evidenciam a importância desse banco de dados. Além disso, o estudo da poluição causada pelas atividades antrópicas corrobora as observações de diversas pesquisas sobre a necessidade da incorporação dos aspectos de saúde na avaliação ambiental, pois são frequentes os impactos ambientais causados por emissões atmosféricas

de grandes indústrias, como as do setor petróleo e gás natural (Zhang *et al.*, 2008; Barbosa *et al.* 2012; Brown *et al.*, 2013).

A combinação de métodos de gerenciamento do impacto das atividades pode subsidiar a definição de diretrizes e regulamentações para a melhoria do desempenho da gestão socioambiental do setor de petróleo e outras atividades industriais com potencial poluidor. Além da identificação e caracterização de populações vulneráveis nas áreas de empreendimentos, dos fatores determinantes e condicionantes da saúde, verifica-se a necessidade de um aprofundamento metodológico para avaliar a qualidade ambiental e da discussão de políticas incorporadas aos estudos e relatórios de impacto ambiental, por meio de normatizações e legislações específicas (Barbosa *et al.*, 2012).

Segundo Almeida *et al.* (2014) as intervenções devem estimular aperfeiçoamentos das políticas públicas que abordem as consequências sobre questões sociais, de saúde, ambientais e jurídicas. Estudos que visam medir os impactos da poluição na saúde representam uma valiosa ferramenta dos técnicos de vigilância em saúde para discutir atividades de prevenção e controle com órgãos reguladores ou com o poder judiciário (Freitas *et al.*, 2010).

Portanto, o método de bioindicção com cascas de árvores para avaliar a qualidade do ar se caracteriza como ferramenta viável, de baixo custo, que poderá apoiar as ações da vigilância ambiental e de saúde, pois fornece informações georreferenciadas sobre a poluição atmosférica, permitindo associá-las às fontes emissoras. Esse método torna-se ainda mais importante para estudos de monitoramento das emissões industriais em municípios que não dispõem de infraestrutura com

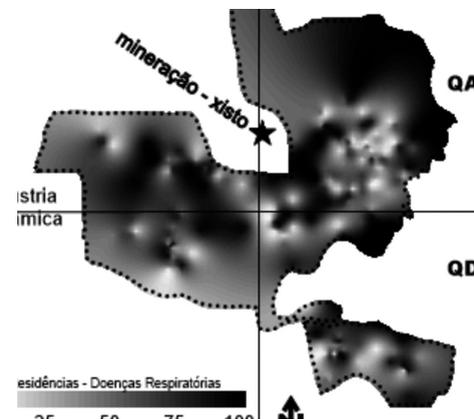


Figura 4. Distribuição de pacientes (residências) com problemas respiratórios em São Mateus do Sul.

tecnologia adequada para a fiscalização ambiental das atividades antrópicas, como é o caso de São Mateus do Sul.

Nesse sentido, a presente proposta pode dar suporte, por exemplo, ao programa governamental que estrutura serviços com foco na estratégia da segurança química, como o Programa Nacional de Vigilância em Saúde Relacionada a Substâncias Químicas (VIGIQUIM). O programa consiste na detecção, conhecimento, mapeamento e no monitoramento de populações expostas a substâncias químicas de reconhecido interesse à saúde em razão de seus efeitos prejudiciais (Netto, 2008).

De acordo com Enríquez (2009), em alguns municípios brasileiros de regiões mineradoras não se observou diferença significativa entre casos de doenças respiratórias. A explicação é que normas regulamentadoras ambientais têm estimulado o desenvolvimento de processos mais comprometidos com a prevenção e o controle de emissões de particulados pela extração mineral. Para o autor, a mineração pode ser considerada sustentável se ela minimizar os seus impactos ambientais e mantiver certos níveis de proteção ecológica e de padrões de qualidade ambientais.

Conclusões

A estratégia de pesquisa utilizada em São Mateus do Sul pode ser facilmente adaptada a outros estudos sobre os impactos

TABELA I
ESTATÍSTICA MULTIVARIADA APLICADA AOS RESULTADOS OBTIDOS COM A ANÁLISE DE CASCAS DE ÁRVORES DE SÃO MATEUS DO SUL

Variáveis	F1	F2	F3
Cd	0,561570		
Co			0,411107
Cr	0,837372		
Cu	0,556294		
Fe		0,813005	
Mn			0,778504
Ni			0,809148
Pb	0,924389		
S		0,818063	
Si		0,909821	
V	0,826543		
Zn	0,920423		
Autovalores	5,325099	1,910510	1,085000
Variância Total (%)	44,37582	15,92091	9,04167

TABELA II
PERCENTUAL DE PACIENTES COM DOENÇAS RESPIRATÓRIAS POR QUADRANTE

Quadrantes	Número total de pacientes (n)	Pacientes com doenças respiratórias (%)
QA	115	87
QB	41	85
QC	23	74
QD	59	78

ambientais e sua correlação com a saúde pública, caracterizando-se como uma alternativa de monitoramento abrangente, preciso, de baixo custo, fácil manuseio e implantação. A abordagem utilizada pode ser de aplicada ao gerenciamento qualidade ambiental em pequenos municípios, que comportam grandes empreendimentos com atividade altamente poluidora, mas que não possuem uma rede de monitoramento convencional, como as existentes em grandes metrópoles.

O presente estudo também propõe que o monitoramento de atividades mineradoras seja realizado em parceria com instituições públicas de pesquisa e unidades de saúde da localidade (que possuem dados sobre o perfil de saúde da comunidade), além da própria participação da população. Ainda contribui com os objetivos dos órgãos governamentais e políticas públicas voltadas para a saúde da população e o meio ambiente, para que possam ser elaboradas medidas preventivas e o acompanhamento de populações expostas às poeiras decorrentes de áreas industriais e mineradoras, semelhantes à área de estudo aqui apresentada.

A contribuição social desta pesquisa está atrelada às ações de vigilância em saúde e ambiental, indicando que políticas públicas voltadas ao acompanhamento de riscos de casos respiratórios crônicos em áreas mineradoras, podem ser implantadas em qualquer região, mesmo naquelas que não dispõem de órgãos ambientais de fiscalização.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro e pela bolsa de doutorado concedida.

REFERÊNCIAS

Almeida IM, Vilela RAG, Silva AJN, Beltran SL (2014). Modelo de Análise e Prevenção de Acidentes-MAPA: ferramenta para a vigilância em saúde do trabalhador. *Ciênc. Saúde Colet.* 19: 4679-4688.

Angeli, JLF, Trevizani, TH, Ribeiro A, Machado, EC, Figueira, RCL, Markert B, Fraenzle S, Wuenschmann S (2013) Arsenic and other trace elements in two catfish species from Paranaguá Estuarine Complex, Paraná, Brazil. *Environ. Monit. Assess.* 185: 8333-8342.

Assmann, TS, Prevedello, BMS, Reissmann, CB, Ribeiro JrPJ (1999). Potencial de suprimento de micronutrientes de calcário oriundo da mineração de folhelho pirobetuminoso da Formação Irati-PR. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 23: 963-969.

Barbieri RL, Heiden G (2012) Árvores de São Mateus do Sul e Região. 2ª ed. 476 pp. Embrapa. Brasília, Brasil.

Barbosa EM, Barata MML, Hacon SS (2012) A saúde no licenciamento ambiental: uma proposta metodológica para a avaliação dos impactos da indústria de petróleo e gás. *Ciênc. Saúde Colet.* 17: 299-310.

Brown JS, Gordon T, Price O, Asgharian B (2013) Thoracic and respirable particle definitions for human health risk assessment. *Part. Fibre Toxicol.* 10:12. doi: 10.1186/1743-8977-10-12.

Carneiro MFH, Ribeiro FQ, Fernandes-Filho FN, Lobo DJA, Barbosa JrF, Rhoden CR, Carvalho-Oliveira R (2011) Pollen abortion rates, nitrogen dioxide by passive diffusive tubes and bioaccumulation in tree barks are effective in the characterization of air pollution. *Environ. Exp. Bot.* 72: 272-277.

Cord L, Genoni ME, Castelán CR (2015) *Shared Prosperity and Poverty Eradication in Latin America and the Caribbean*. World Bank. Washington, DC, EUA. 355 pp.

Creswell JW (2010) *Projeto de Pesquisa: Métodos Qualitativo, Quantitativo e Misto*. Trad. Magda Lopes. 3ª ed. Artmed. Porto Alegre, Brasil. 448 pp.

DATASUS (s/f) *Situação da Base de Dados Nacional em São Mateus do Sul*. Cadernos de Informação de Saúde Paraná. SIH/SUS. <http://tabnet.datasus.gov.br/tabdata/cadernos/pr.htm>. (Cons. 10/05/2016).

Enriquez MARS (2009) Mineração e desenvolvimento sustentável -é possível conciliar? *REVIBEC*. 12: 52-66.

Ferreira AB (2009) *Avaliação do Risco Humano a Poluentes Atmosféricos por Meio de Biomonitoramento Passivo: Um Estudo de Caso em São Mateus do Sul, Paraná*. Tese. Universidade de São Paulo. Brasil. 90 pp.

Freitas CU, Campos RAG, Silva MAFR, Panachao MRI, Moraes JC, Waissmann W, Chacra AR, Maeda MYS, Rodrigues RSM, Belchor JG, Barbosa SO, Santos RTM (2010) Can live in the surroundings of a petrochemical complex be a risk factor for autoimmune thyroid disease? *Environ. Res.* 110: 112-117.

Forbes, PBC (2015) Perspectives on the monitoring of air pollutants. Em *Monitoring of Air Pollutants: Sampling, Sample Preparation and Analytical Techniques*. Comprehensive Analytical Chemistry. Vol. 70. Elsevier. Holand. pp. 3-9.

Geravandi, S, Goudarzi, G, Babaei, AA, Mohammadi, JM, Niri, MV, Salmanzadeh, S, Shirbeigi E (2015) Health endpoint attributed to sulfur dioxide air pollutants. *Jundishapur J. Health Sci.* 7(3): e29377.

IBGE (2012) *Cidades. Censo Demográfico*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <http://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?lang=&codmun=412560&searcho=sao-mateus-do-sul>. (Cons. 03/04/2016).

IBGE (2015) *Síntese de Indicadores Sociais: Uma Análise das Condições de Vida da População Brasileira (2015)*. Estudos e Pesquisas, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 134 pp. ISBN 978-85-240-4369-7.

Johnson RA, Wichern DW (2008) *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice-Hall. Upper Saddle River, NJ, EUA. 303 pp.

Martin MH, Coughtrey PJ (1982) *Biological Monitoring of Heavy Metal Pollutants*. Applied Science. London, RU. 486 pp.

Morawska L, Johnson GR, He C, Ayoko GA, Lim MCH, Swanson C, Ristovski ZD, Moore M (2006) Particle number emissions and source signatures of an industrial facility. *Environ. Sci. Technol.* 40: 803-814.

Markert, B, Wuenschmann, S, Fraenzle, S, Figueiredo, AMG, Ribeiro, AP, Wang, M (2011). Bioindication of atmospheric trace metals-with special references to megacities. *Environ. Pollut.* 159: 1991-1995.

Markert B, Oehlmann J, Roth M (1997) General aspects of heavy metal monitoring by plants and animals. Em Subramanian G, Iyengar V (Eds.) *Environmental Biomonitoring. Exposure Assessment and Specimen Banking*. ACS Symposium Series. Vol. 654. American Chemical Society. Washington, DC, EUA. pp. 19-29.

Moreira TCL, Oliveira RC, Amato LFL, Kang C, Saldiva PHN, Saiki M (2016) Intra-urban biomonitoring: Source apportionment using tree barks to identify air pollution sources. *Environ. Int.* 91: 271-275.

Mulgrew A, Williams P (2009) *Bio-monitoring of Air Quality Using Plants*. WHO Collaborating Centre for Air Quality Management and Air Pollution Control. Berlin, Alemanha. 168 pp.

Netto GF (2008) *Vigilância em Saúde Relacionada a Químicos no Ambiente do Sistema Único de Saúde*. Serviço Geológico do Brasil. www.cprm.gov.br/publique/media/geo_med4.pdf (Cons. 17/05/2016).

PMSMS (2016) *Geografia*. Prefeitura Municipal de São Mateus do Sul. www.saomateusdosul.pr.gov.br/o-municipio/geografia/ (Cons. 28/03/2016).

Ribeiro AP, Figueiredo AMG, Santos JO, Dantas E, Cotrim MEB, Figueira RCL, Silva-Filho EV, Wasserman JC (2013) Combined SEM/AVS and attenuation of concentration models for the assessment of bioavailability and mobility of metals in sediments of Sepetiba Bay (SE Brazil). *Mar. Pollut. Bull.* 68: 55-63.

Rodriguez JH, Weller SB, Wannaz ED, Klumpp A, Pignata ML (2011) Air quality biomonitoring in agricultural areas nearby to urban and industrial emission sources in Córdoba province, Argentina, employing the bioindicator *Tillandsia capillaris*. *Ecol. Indic.*, 11: 1673-1680.

Snyder EG, Watkins TH, Solomon PA, Thoma ED, Williams RW, Hagler GSW, Shelow D, Hindin DA, Kilaru VJ, Preuss PW (2013) The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environ. Sci. Technol.* 47: 11369-11377.

UN (2016) *Conference of the Parties: Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session*. Paris, 30/11-13/12/2015. Proceedings, Part 1. United Nations.

Villarouco FMO, Freire EVC, Pereira ECG, Pérez REU (2007) Análise do líquen *Cladonia verticillaris* (raddi) fr. *Interciencia* 32: 242-246.

Wolterbeek HT, Bode P (1995) Strategies in sampling and sample handling in the context of large-scale plant biomonitoring surveys of trace element air pollution. *Sci. Total Environ.* 176: 33-43.

Yeomans AK, Golder AP (1982) The Guttman-Kaiser criterion as a predictor of the number of common factors. *Statistician* 31: 21-29.

Zhang Y, Schauer JJ, Shafer MM, Hannigan MP, Dutton SJ (2008) Source apportionment of in vitro reactive oxygen species bioassay activity from atmospheric particulate matter. *Environ. Sci. Technol.* 42: 7502-7509.