

CALIDAD DEL AIRE RESPECTO DE METALES (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) Y RELACIÓN CON SALUD RESPIRATORIA: CASO SONORA, MÉXICO

Martín Eusebio CRUZ CAMPAS^{1*}, Agustín GÓMEZ ÁLVAREZ², Roberto RAMÍREZ LEAL¹, Ana Gloria VILLALBA VILLALBA¹, Onofre MONGE AMAYA², Jaime VARELA SALAZAR², Jesús Manuel QUIROZ CASTILLO¹ y Héctor Francisco DUARTE TAGLES¹

¹Ingeniería Ambiental, Universidad Estatal de Sonora. Ley Federal del Trabajo e Israel González, Colonia Apolo, Hermosillo, Sonora, México, C. P. 83100

²Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad de Sonora. Bulevar Luis Encinas y Rosales, Colonia Centro, Hermosillo, Sonora, México, C. P. 83000

*Autor para correspondencia: martincruzcampas@hotmail.com

(Recibido julio 2015; aceptado junio 2016)

Palabras clave: contaminación atmosférica, PST, partículas suspendidas, aerosoles

RESUMEN

Una calidad del aire satisfactoria es un derecho humano fundamental. En muchas ciudades del mundo se ha identificado que la contaminación atmosférica generada por el crecimiento industrial y poblacional puede representar daños a la salud. El presente estudio evalúa la calidad del aire en cuanto a los niveles de Pb, Cd, Ni, Cu y Cr presentes, así como su posible relación con la salud respiratoria (infecciones respiratorias agudas, conocidas como IRAS y neumonías-bronconeumonías) durante un periodo anual, en seis ciudades (Agua Prieta, Nogales, Puerto Peñasco, Hermosillo, Guaymas y Obregón) de Sonora, México. Se muestrearon partículas suspendidas totales por alto volumen cada seis días y las muestras fueron analizadas por absorción atómica. Se encontró que a excepción del Ni en la ciudad de Nogales, las concentraciones de los metales estudiados no rebasaron los máximos permisibles utilizados como criterio de calidad del aire (Pb según norma mexicana, Ni según norma de la comunidad europea y Cu y Cr según norma canadiense). En el presente estudio se identificó una correlación significativa entre IRAS y Cu en Hermosillo y Obregón, y entre Ni y neumonías-bronconeumonías en Guaymas. La presencia de metales y el daño a la salud que ello representa, hacen necesario que las ciudades evaluadas en este estudio cuenten con la estrategia gubernamental mexicana de un programa de mejoramiento de la calidad del aire (ProAire).

Key words: atmospheric pollution, TSP, particles, suspended particles, aerosols

ABSTRACT

Satisfactory air quality is a fundamental human right. Atmospheric pollution has been identified in many cities around the world, generated by industrial and population growth which represents health hazards. This study evaluates the air quality by metals (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) as well as the possible relationship between them and respiratory health (acute respiratory infections known as ARIs and pneumonia - bronchopneumonia) during an annual period in six cities (Agua Prieta, Nogales, Puerto

Peñasco, Hermosillo, Guaymas and Obregón) in Sonora, México. Total suspended particles were sampled by high volume every six days and the samples were analyzed by atomic absorption. It was found that except Ni for the city of Nogales, the concentrations of the metals studied did not exceed the maximum permissible level used as air quality criteria (Pb according to the mexican standard, Ni according to the european community standard, and Cu and Cr according to the canadian standard). A significant correlation coefficient was found between ARIs and Cu in Hermosillo and Obregón, and between Ni and pneumonia-bronchopneumonia in Guaymas. The presence of metals and the damage to health that it represents, make it necessary to have a mexican governmental strategy of an air quality state implementation plan (SIP) in the studied cities.

INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés, 2014) señala que de 1600 ciudades de su base de datos mundial, sólo el 12 % cumplen los criterios de calidad del aire y al menos el 50 % rebasan 2.5 veces dichos criterios. A pesar de las regulaciones ambientales, la mala calidad del aire sigue representando una amenaza para la salud, el ambiente, el bienestar social y el desarrollo económico (WHO 2006, Clean Air Institute 2012, IMCO 2013). La presencia de partículas en el aire incide, junto con otros factores, en el origen o agravamiento de enfermedades pulmonares y cardiovasculares, lo que propicia arritmias, ataques de corazón, afectación a los sistemas nervioso central y reproductivo, incluso podría causar cáncer y con ello, muerte prematura (EEA 2011, WHO-IARC 2013). Es por tales motivos, que la contaminación del aire está asociada con un aumento en la mortalidad (Garibay-Chávez 2009, SSA 2014), y se reconoce como un riesgo ambiental. Tal problemática no es nueva, desde 1272 (Urbinato 1994) se tienen registros de este peligro y a partir de la revolución industrial la contaminación atmosférica se ve como algo cotidiano (Dickson 1996). A nivel mundial se le atribuyen a la mala calidad del aire, 2 millones de muertes prematuras al año (WHO 2011), de las cuales 1.3 millones ocurren en zonas urbanas. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, por sus siglas en inglés, 2012) señala en su escenario al 2050 que de no implementarse acciones, el número de muertes prematuras alcanzará 3.6 millones, convirtiéndose en la principal causa ambiental de mortalidad prematura. Según SEMARNAT (2011) entre 2001 y 2005 en México, 38 mil personas murieron a causa de la presencia de contaminantes en el aire ambiente y de ellas 5000 fueron niños, para el 2008 el

estimado anual aumentó a 15 000 muertes (Clean Air Institute 2012).

Según datos del cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (SEMARNAT 2011), con información desde 2000 al 2009 para partículas iguales o menores a 10 micrómetros (PM_{10}), solamente 3.3 % de los resultados cumplieron con el límite anual de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y sólo 13.2 % cumplieron con el límite para 24 h de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Entre los componentes de las partículas suspendidas totales (PST) en el aire se pueden encontrar metales, los cuales dependiendo de su toxicidad, concentración y persistencia podrían representar peligro a la salud. El plomo (Pb) por ejemplo, es un neurotóxico que se acumula en el cuerpo humano dañando órganos y nervios (ATSDR 2007), el cadmio (Cd) está clasificado como cancerígeno que afecta hígado y riñones (ATSDR 2012). El níquel (Ni) afecta los pulmones y puede tener efectos renales (WHO 2000), el cobre (Cu) es un irritante del sistema respiratorio y de la mucosa de la boca, ojos y nariz (ATSDR 2004), el cromo (Cr) es cancerígeno y afecta el sistema respiratorio y riñones (WHO 2000), por lo que es necesaria su evaluación en términos de calidad del aire y de cumplimiento normativo.

Cruz-Campas et al. (2014) analizaron la calidad del aire respecto a partículas en seis ciudades de Sonora, México durante el año 2010. Se identificó una calidad no satisfactoria según la norma para PST, aunque se desconocían los componentes de dichas partículas. En virtud de que la autoridad ambiental en México (SEMARNAT-INECC 2012) establece que se requieren estudios que contribuyan a la toma de decisiones en el ámbito local, el presente trabajo se enmarca en dicha necesidad y su objetivo fue evaluar la calidad del aire respecto a metales en aire ambiente, así como su posible relación con la salud respiratoria en seis ciudades del estado de Sonora, México durante un periodo anual.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

En el **cuadro I** se presenta la información geográfica, demográfica (INEGI 2010) y climatológica de las ciudades en estudio y en la **figura 1** su ubicación. En 2010, los municipios de Hermosillo, Cajeme (Obregón) y Nogales fueron los más poblados del estado (en ese orden). Guaymas ocupó el sexto lugar, Agua Prieta el noveno y Puerto Peñasco el undécimo de los 72 municipios del estado de Sonora, México.

Muestreo

El método de muestreo utilizado por la Red de Información e Infraestructura sobre Calidad del Aire (REICA) para Agua Prieta, Nogales, Puerto

Peñasco, Guaymas y Obregón, y por el Programa de Mejoramiento de la Calidad del Aire (PEMCA) para Hermosillo, correspondió al de partículas suspendidas totales (PST) por alto volumen (Hi-Vol, en inglés), establecido en la NOM-035-SEMARNAT-1993 (SEMARNAP 1993). Lo anterior coincide con apéndice B, parte 50 del Código de Regulación Federal de Estados Unidos de América (USEPA 2013a). El muestreo se realizó cada seis días durante el año 2010, se utilizaron filtros de fibra de vidrio y un flujo de muestreo entre 1.1 y 1.7 m³.

Análisis

Para determinar la concentración de metales en el material particulado, las muestras fueron solubilizadas por extracción con una mezcla de ácido nítrico y

CUADRO I. INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, DEMOGRÁFICA Y CLIMATOLÓGICA DE LOS SITIOS DE MUESTREO DE METALES EN AIRE AMBIENTE EN SEIS CIUDADES DE SONORA, MÉXICO

Ciudad	Ubicación geográfica	Población (2010)	Clima	Temperatura media anual (°C)	Precipitación media anual (mm)
Agua Prieta	31°18'41.76"N 109°32'07.33"W	77 254	Templado	17	335
Nogales	31°17'35.81"N 110°55'08.40"W	212 533	Semiseco	17.8	461
Puerto Peñasco	31°20'34.10"N 113°30'32.19"W	56 756	Seco semi cálido	20.1	91
Hermosillo	29°02'38.50"N 110°57'27.80"W	715 061	Muy seco semicálido con lluvias en verano	24	320
Guaymas	27°55'24.40"N 110°53'22.28"W	113 082	Seco muy cálido	19	200
Obregón	27°27'20.70"N 109°56'50.64"W	298 625	Cálido extremoso y muy cálido extremoso	24	410

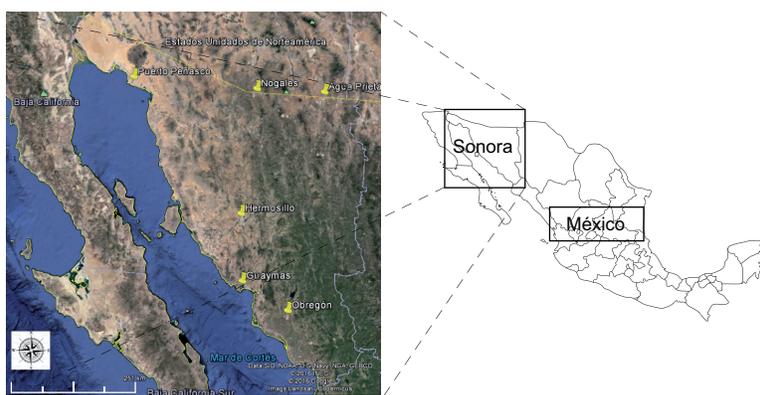


Fig. 1. Localización de los sitios de muestreo de calidad del aire por metales en seis ciudades de Sonora, México

ácido clorhídrico. Posteriormente fueron analizadas por espectrometría de absorción atómica con un equipo PERKIN-ELMER Modelo AAnalyst 400, a través de la técnica establecida en el apéndice G, parte 50 del Código de Regulaciones Federales de Estados Unidos de América (USEPA 2013b). En el control de calidad del proceso analítico se consideraron tres duplicados y cinco blancos para cada estación de muestreo, así como criterios de reproducibilidad, estabilidad de calibración y exactitud.

Calidad del aire

Para la determinación de la calidad del aire se compararon los resultados de concentración de metales con los siguientes criterios, Pb: norma oficial mexicana NOM-026-SSA1-1993 (SSA 1994), Cd y Ni: directiva 2004/107/CE del parlamento europeo (DOUE 2005), Cu y Cr: estándar criterio de calidad del aire de Ontario (OME 2012).

Análisis exploratorio de la relación entre metales y la salud respiratoria

Se utilizó el programa STATA v.12 para estimar el coeficiente de correlación como un indicador de relación (Pértegas Díaz y Pita Fernández 2002, Triola 2013) entre la concentración de metales en aire y los datos de morbilidad, con una significancia de $\alpha = 0.05$. El análisis se realizó bajo dos escenarios, el primero con los promedios mensuales de concentración de los metales de interés en el aire y el segundo con el valor máximo de 24 h de cada mes para cada metal. Los valores de salud respiratoria, identificados como el número de casos nuevos de enfermedad por infecciones respiratorias agudas (IRAS) y neumonías-bronconeumonías, corresponden a los registrados por la Dirección General de Epidemiología del Sistema Nacional de Salud de la Secretaría de Salud en México para el año 2010, se proporcionaron únicamente valores mensuales y por municipio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Control de calidad analítica

Se determinó la reproducibilidad durante cada lote de análisis, siendo ésta $\leq 5\%$. Se determinó la estabilidad de calibración al inicio, cada 10 muestras y al final de cada lote, esta estabilidad se encontró dentro del $\pm 5\%$. Se obtuvo la exactitud del análisis con muestras fortificadas, a través de tres lecturas durante cada lote de análisis, la cual estuvo dentro del $\pm 16\%$.

Presencia y concentración de metales en aire ambiente en seis ciudades de Sonora, México y comparación con criterios de calidad del aire

El efecto de los contaminantes en la salud puede atribuirse tanto a su concentración, como al tiempo que éste permanece en la matriz ambiental. En el **cuadro II** se presenta el porcentaje de días en los que se identificó la presencia de metales en aire ambiente en las seis ciudades. En el **cuadro III** está la concentración promedio anual y máxima en 24 h de cada metal en las ciudades estudiadas. Los promedios fueron obtenidos únicamente con los días que se detectaron concentraciones por arriba del límite de detección de cada metal, el **cuadro III** incluye además, la comparación con los máximos permisibles o criterios de calidad del aire seleccionados para este estudio, a continuación se analiza y discute el resultado para cada metal.

CUADRO II. PORCENTAJE DE DÍAS EN LOS QUE SE IDENTIFICÓ PRESENCIA DE METALES (Pb, Ni, Cu, Cr) EN AIRE AMBIENTE EN SEIS CIUDADES DE SONORA, MÉXICO DURANTE EL AÑO 2010

Presencia de metales en aire ambiente	Ciudades de Sonora, México					
	Agua Prieta	Nogales	Puerto Peñasco	Hermosillo	Guaymas	Obregón
Total de días muestreados	20	49	38	50	32	34
% de días con Pb en aire	30.0	59.2	13.2	98.0	71.9	55.9
% de días con Ni en aire	95.0	75.5	94.7	80.0	71.9	100.0
% de días con Cu en aire	95.0	100.0	100.0	98.0	96.9	100.0
% de días con Cr en aire	0.0	2.0	0.0	0.0	40.6	2.9

Plomo

Este metal se identificó en el aire ambiente de las seis ciudades y su presencia (expresada como % de días con Pb en aire) se muestra en el **cuadro II**. Hermosillo presentó la mayor presencia con 98 % y Puerto Peñasco la menor con 13.2 % de días. El orden de presencia en las seis ciudades fue: Hermosillo > Guaymas > Nogales > Obregón > Agua Prieta > Puerto Peñasco. La **figura 2** muestra la concentración de Pb detectada para cada ciudad a

CUADRO III. CONCENTRACIÓN PROMEDIO Y MÁXIMA DE METALES (Pb, Ni, Cu, Cr) EN AIRE AMBIENTE EN SEIS CIUDADES DE SONORA, MÉXICO DURANTE EL AÑO 2010 Y COMPARACIÓN CON MÁXIMOS PERMISIBLES

Ciudad / Concentración		Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ni ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cr ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Agua Prieta	C. Promedio	0.028	0.013	0.079	ND (< LD)
	C. Máxima	0.052	0.021	0.164	
Nogales	C. Promedio	0.022	0.028	0.076	0.016
	C. Máxima	0.053	0.062	0.167	0.016
Puerto Peñasco	C. Promedio	0.026	0.017	0.103	ND (< LD)
	C. Máxima	0.044	0.039	0.313	
Hermosillo	C. Promedio	0.033	0.017	0.045	ND (< LD)
	C. Máxima	0.074	0.040	0.119	
Guaymas	C. Promedio	0.062	0.015	0.215	0.019
	C. Máxima	0.237	0.043	2.083	0.030
Obregón	C. Promedio	0.052	0.013	0.044	0.013
	C. Máxima	0.115	0.019	0.124	0.013
Máximos permisibles	México	1.5	---	---	---
		Promedio trimestral (SSA 1994)			
	EUA/Canadá	0.15	---	50	0.030
		Promedio trimestral (USEPA 2008a)		Promedio diario (OME 2012)	Promedio diario (OME 2012)
	Europa	0.5	0.02	---	---
		Promedio anual (DOUE 2008)	Promedio anual (DOUE 2005)		

C. = concentración, LD = 0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ND = no detectado

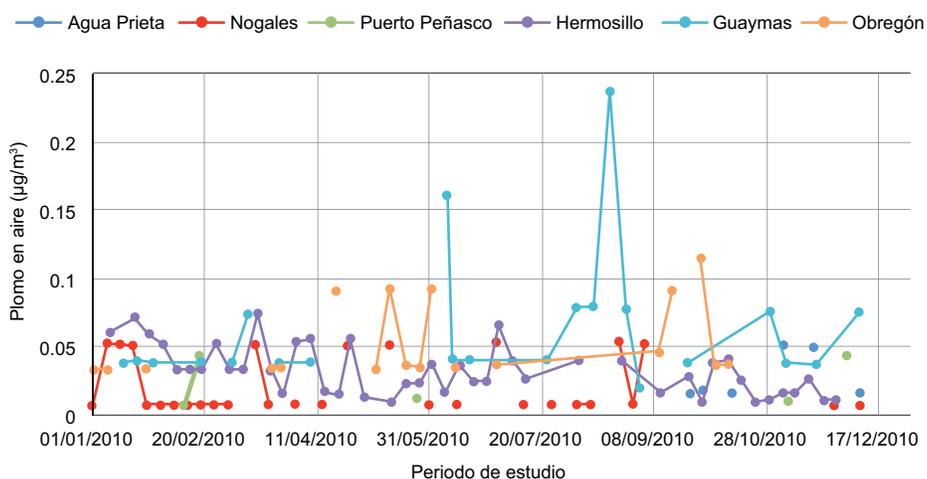


Fig. 2. Concentración de Pb en aire ambiente en seis ciudades de Sonora, México durante un periodo anual

lo largo del año, se identificaron valores entre 0.008 y 0.237 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Concentraciones de 0.06 a 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ son normales en zonas citadinas (SEMARNAT 2007, Mugica et al. 2010, EEA 2011, Cruz-Campas et al. 2013), por lo que los valores detectados en las ciudades sonorenses resultan típicos de áreas urbanizadas.

La norma en México sobre Pb en aire establece un valor máximo permisible de 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio trimestral (SSA 1994). De acuerdo con el **cuadro III** el valor máximo detectado en este trabajo fue de 0.237 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo que los valores en las ciudades en estudio quedaron por debajo del máximo permisible vigente, lo que significa que no rebasó la norma mexicana. La normatividad de Estados Unidos de América (USEPA 2008a) establece un máximo permisible de 0.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio trimestral. Se calculó el promedio trimestral para la ciudad de Guaymas por ser la que reportó los valores más altos y se obtuvieron los siguientes resultados: ene-mar: 0.031 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, abr-jun: 0.040 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, jul-sep: 0.068 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y oct-dic: 0.038 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ninguna de las ciudades rebasó ese criterio. La comunidad europea cuenta con un máximo permisible de 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual (DOUE 2008), el cual de acuerdo con el **cuadro III** no fue rebasado en alguna de las seis ciudades del estudio.

La presencia de Pb en todas las ciudades podría atribuirse a que este metal se encuentra de manera natural en la corteza terrestre, generalmente junto con otros elementos formando compuestos (ATSDR 2007), los cuales son suspendidos del suelo por el tráfico vehicular en calles sin pavimentar. En la CONABIO (2010) se incluye a Sonora en el mapa regional de valores de fondo de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en suelos de México, incluido el Pb, por lo que es posible que este metal aparezca en las partículas del aire. Aunque la concentración de Pb en aire en las seis ciudades fue inferior a la norma, es pertinente señalar que Guaymas a pesar de ser la cuarta ciudad más poblada de las estudiadas, presenta la mayor concentración de Pb por día en aire con 0.237 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el mayor promedio anual con 0.062 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta situación puede deberse a que a menos de 3 km en torno a la ubicación del muestreador, se realizaban actividades potencialmente generadoras de emisiones de Pb como la combustión para la producción de energía en centrales termoeléctricas (EIIP 2001, MAAMA 2014), la operación de ferrocarril de carga y maniobras de los materiales que transporta, carga y descarga de minerales en muelle, así como la presencia de embarcaciones con superficies metálicas deterioradas.

Cadmio

Respecto al Cd, el límite de detección logrado con el método analítico utilizado (absorción atómica por flama) fue de 0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, no se detectó en algún día o ciudad valores mayores a éste. Dicho límite de detección resultó mayor al valor del criterio de calidad del aire seleccionado que fue de 0.005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual, de acuerdo con la normatividad europea vigente al momento del estudio (DOUE 2005), en virtud de no existir normatividad en México. Por tal motivo no fue posible determinar la calidad del aire para este metal, sólo se puede reportar que en las seis ciudades no se identificaron concentraciones superiores a 0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de Cd durante el año 2010. El departamento de salud de EUA (ATSDR 2012) reporta que en áreas citadinas la concentración de Cd va de 0.002 a 0.015 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Níquel

Se identificó que el Ni estuvo presente en el aire ambiente de las seis ciudades y su presencia (% de días con Ni en aire) se muestra en el **cuadro II**. Se puede apreciar que en Obregón se registró la mayor presencia con 100 % y Guaymas la menor con 71.9 % de los días. El orden de presencia de este metal en las ciudades estudiadas fue: Obregón > Agua Prieta > Puerto Peñasco > Hermosillo > Nogales > Guaymas. La **figura 3** muestra la concentración de Ni detectada para cada ciudad a lo largo del año en la que se identificaron valores entre 0.005 y 0.062 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Concentraciones diarias entre 0.01 y 0.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se consideran normales en zonas urbanas (EEA 2011), en este estudio se detectaron valores superiores en Sonora.

En virtud de no existir normatividad mexicana para Ni en aire ambiente, se utilizó la normatividad europea vigente al momento del estudio (DOUE 2005), que establece un máximo permisible de 0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual. De acuerdo con el **cuadro III** el promedio anual obtenido para la ciudad de Nogales fue de 0.028 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con lo que se rebasa el criterio de calidad del aire señalado. Se considera que dicho punto de muestreo no cumple con la norma, para el resto de las ciudades se obtuvieron valores por abajo de la misma.

Tanto el valor diario más alto, como el valor promedio anual más alto de Ni (0.062 y 0.028 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente) corresponden a la ciudad de Nogales. Esta situación puede atribuirse a posibles emisiones de Ni generadas por procesos de cromado o niquelado (USEPA 2008b), así como por procesos de cocción de ladrillo u otros materiales de construcción mediante hornos que utilizan combustibles líquidos (USEPA 2015), actividades que se identificaron a menos de 1.5 km de distancia del punto de muestreo. Otras

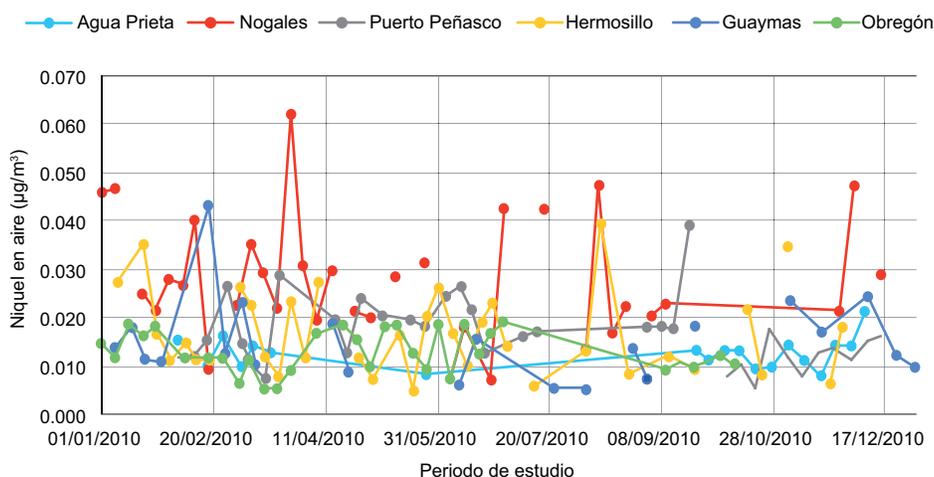


Fig. 3. Concentración de Ni en aire ambiente en seis ciudades de Sonora, México durante un periodo anual

actividades que potencialmente pudieron aportar Ni al aire ambiente lo son las emisiones vehiculares y el material terrígeno que es suspendido por el tráfico en calles sin pavimentar. La COCEF (2011) reporta que aproximadamente 35 % de la superficie de calles (aproximadamente 2.1 millones de m²) no contaban con pavimentación en Nogales durante el periodo de estudio.

Cobre

Se encontró Cu en el aire ambiente de las seis ciudades, con una presencia por encima de 95 % de los días muestreados como se observa en el **cuadro II**. Obregón, Nogales y Puerto Peñasco obtuvieron la mayor presencia con 100 % y Agua Prieta la menor

con 95 % de días, el orden de presencia de este metal en las ciudades fue: Obregón-Nogales-Puerto Peñasco > Hermosillo > Guaymas > Agua Prieta. En la **figura 4** se presenta la concentración de Cu en aire ambiente para cada ciudad durante el periodo de estudio. Se identificaron valores entre 0.01 y 2.083 µg/m³. Se conocen valores entre 0.007 a 0.019 µg/m³ para la ciudad de Dhaka, Bangladesh (Islam et al. 2015), así como entre 0.01 y 0.12 µg/m³ en Pucallpa, Perú (MSP 2010) y de 0.11 a 0.22 µg/m³ en la ciudad de Hermosillo, México (Cruz-Campas et al. 2013), por lo que concentraciones entre 0.01 y 0.3 µg/m³ se consideran normales en las ciudades.

México no cuenta con una norma de calidad del aire para Cu. Para este estudio se utilizó el criterio

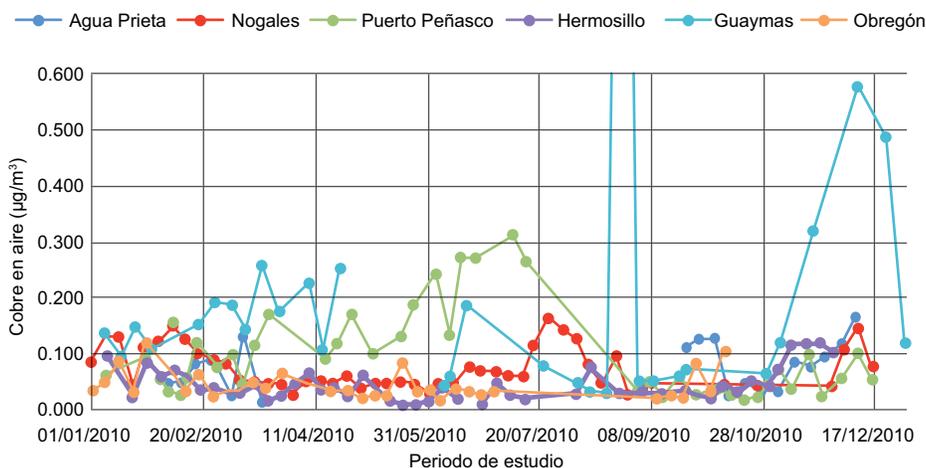


Fig. 4. Concentración de Cu en aire ambiente en seis ciudades de Sonora, México durante un periodo anual (máximo valor en Guaymas: 2.083 µg/m³)

del Ministerio de Medio Ambiente de Ontario Canadá (OME, por sus siglas en inglés, 2012), el cual es de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 h. De acuerdo con el **cuadro III** el valor máximo detectado de Cu en este trabajo fue de $2.083 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo que las concentraciones en las ciudades en el estudio cumplen con dicho criterio.

Respecto a la presencia permanente del Cu en las partículas del aire en las ciudades de Sonora, es relevante señalar que casi la totalidad de la geografía del estado se ubica dentro de una provincia metalogénica caracterizada por depósitos minerales de Cu, Mo y Au (SE 2014). Lo que hace que Sonora sea el principal productor de Cu en el país. La suspensión de partículas de suelo rico en este metal, tanto por efectos naturales como por el tráfico vehicular en vías sin pavimentar podría ser la causa de que el Cu aparezca de manera casi permanente en las PST de las ciudades estudiadas. La ciudad de Guaymas presentó la mayor concentración tanto en 24 h con $2.083 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como en promedio anual con $0.215 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lo anterior, puede deberse a que a menos de 3 km del punto de muestreo se realizaban actividades potencialmente generadoras de emisiones de Cu, como son la descarga y embarque de minerales en el muelle de Guaymas incluyendo concentrados de Cu, además de posibles emisiones a través de chimeneas de termoeléctricas (MAAMA 2014).

Cromo

En el **cuadro II** se muestra la presencia de Cr en aire ambiente en 2010. Guaymas muestra la mayor presencia con 41 %, seguida por Nogales y Obregón con sólo un día (lo que representa 2 - 3 % de días).

No se encontró Cr en el aire ambiente de Agua Prieta, Puerto Peñasco y Hermosillo. En la **figura 5** se presenta la concentración detectada para cada ciudad, los valores se encuentran entre 0.01 a $0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Guor-Cheng y Ci-Song (2012) reportan valores promedio entre 0.017 y $0.079 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para tres ciudades en Taiwán. Según la Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades (ATSDR, por sus siglas en inglés, 2000) valores entre 0.01 y $0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ son típicos en el aire de zonas urbanas, situación que coincide en este estudio.

México no cuenta con una norma de calidad del aire para Cr. Se utilizó el criterio del OME (2012), el cual es de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 24 h para la presencia metálica de este elemento en sus formas divalente y trivalente. El valor máximo detectado en este trabajo fue de $0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo que las concentraciones encontradas en las ciudades en el estudio cumplen con dicho criterio (**Cuadro III**).

Guaymas presentó la mayor cantidad de días con presencia del metal en el aire, así como la más alta concentración diaria detectada en este estudio ($0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Al respecto es pertinente señalar que en esta ciudad han operado dos centrales termoeléctricas, la primera desde finales de los años 50, hasta aproximadamente el año 2008, la segunda opera desde principios de los años 70 y continuaba operando a la fecha de conclusión del este trabajo, ambas utilizando combustóleo. En la SEMARNAT-INE (2006) clasifican al Cr como uno de los principales contaminantes emitidos por el uso de este combustible en este tipo de instalaciones. Asimismo, el programa de mejora de inventarios de emisiones de EUA (EIIP 2001) prevee que este tipo de fuentes

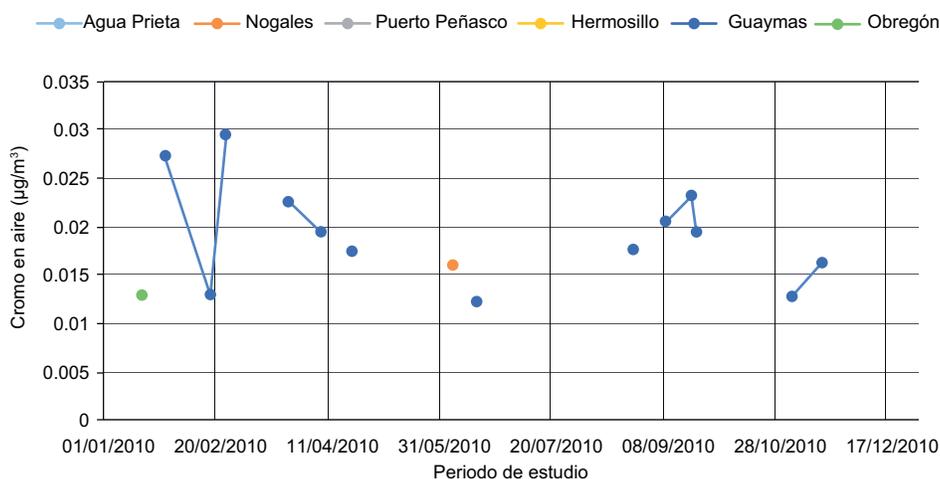


Fig. 5. Concentración de Cr en aire ambiente en seis ciudades de Sonora, México durante un periodo anual

fijas emitirán Cr y compuestos de Cr, lo que podría ser la causa más probable de la presencia del metal en las partículas en el aire, tanto por las emisiones diarias como por la resuspensión de material acumulado en el suelo por décadas, al considerar que la ciudad presentaba aproximadamente 45 % de calles sin pavimentar.

Análisis exploratorio de la relación entre metales (Pb, Ni, Cu, Cr) y la salud respiratoria en seis ciudades de Sonora, México

De acuerdo con los métodos descritos previamente, se calcularon los valores de correlación con una significancia $\alpha = 0.05$. Se descartaron todas aquellas correlaciones cuyo resultado fue menor a 0.5 así como las que no resultaron significativas, por no considerarse de interés desde el punto de vista ambiental.

En el **cuadro IV** se presentan los resultados de correlación con los valores de promedio mensual de metales y el número mensual de casos de salud respiratoria. Se identificó una relación positiva y significativa entre IRAS y Cu en Hermosillo y en Obregón (0.78 y 0.98, respectivamente), en esta última ciudad de grado fuerte. Esta condición se ratifica en el **cuadro V** (0.71 y 0.81) en el que se utilizaron los valores máximos de cada mes de cada metal. Tal escenario señala que el número de casos de infecciones respiratorias agudas y la presencia de Cu en el aire podrían estar relacionados. Según la ATSDR (2004) la inhalación de Cu puede producir irritación de nariz y la garganta, lo que a su vez podría detonar infecciones respiratorias.

En el **cuadro IV** se identifica que en Guaymas se presenta una relación positiva y significativa (0.88)

CUADRO IV. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ENTRE CONCENTRACIONES PROMEDIO MENSUAL DE METALES (Pb, Ni, Cu, Cr) EN AIRE AMBIENTE Y NÚMERO DE CASOS NUEVOS DE INFECCIONES RESPIRATORIAS AGUDAS (IRAS) Y NEUMONÍAS-BRONCONEUMONÍAS EN SEIS CIUDADES DE SONORA, MÉXICO DURANTE EL AÑO 2010

Correlación	Pb	Ni	Cu	Cr
IRAS	---	---	HMO 0.78* OBR 0.98*	---
Neumonías-broncneumonías	---	GYM 0.88*	HMO 0.61*	---

HMO = Hermosillo, GYM = Guaymas, OBR = Obregón, *significancia $\alpha = 0.05$, --- = valores no significativos

entre el número mensual de casos de neumonías-broncneumonías y el promedio mensual de Ni, siendo aún mas fuerte la correlación (0.92) cuando se asocian los valores máximos de Ni en 24 h detectados en cada mes y el número mensual de casos de neumonías-broncneumonías (**cuadro V**). Al respecto la ASTDR (2005) señala que efectos como bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar y cáncer de los pulmones y los senos nasales, pueden ocurrir cuando se respira Ni.

CUADRO V. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ENTRE CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE 24 H POR MES DE METALES EN AIRE AMBIENTE Y NÚMERO DE CASOS NUEVOS DE INFECCIONES RESPIRATORIAS AGUDAS (IRAS) Y NEUMONÍAS-BRONCONEUMONÍAS EN SEIS CIUDADES DE SONORA, MÉXICO DURANTE EL AÑO 2010

Correlación	Pb	Ni	Cu	Cr
IRAS	---	---	HMO 0.71* OBR 0.81*	---
Neumonías-broncneumonías	---	GYM 0.92*	---	---

HMO = Hermosillo, GYM = Guaymas, OBR = Obregón, *significancia $\alpha = 0.05$, --- = valores no significativos

Aunque estas relaciones resultan de interés no necesariamente tienen implicaciones de causa y efecto. El hecho de que dos variables de un sistema tiendan a aumentar o disminuir juntas no significa que el cambio en una, cause un cambio en la otra, sólo se puede inferir que ambas responden de manera correlacionada en el sistema (Pértegas Díaz y Pita Fernández 2002, Triola 2013), por lo que resultan de interés para posteriores estudios de salud ambiental.

CONCLUSIONES

En las seis ciudades se identificó Pb en aire pero en ninguna se rebasó el máximo permisible de México, Estados Unidos de América o la Comunidad Europea. En ninguna ciudad se detectaron valores de Cd por arriba de $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, no fue posible determinar la calidad del aire debido que el límite de detección logrado fue mayor al criterio de calidad seleccionado. El Ni está presente en las seis ciudades y en Nogales se rebasó el valor criterio de calidad utilizado (Comunidad Europea). El Cu está presente en el aire en más de 95 % de los días en las seis ciudades sin embargo, no se rebasó

el criterio de calidad utilizado (OME). No se identificó Cr en el aire ambiente de Agua Prieta, Puerto Peñasco y Hermosillo, pero sí en Nogales, Obregón y Guaymas, en ninguna se rebasó el criterio de calidad utilizado (OME). El análisis de correlación ($\alpha = 0.05$), identificó una relación de moderada a fuerte entre IRAS y Cu en Hermosillo y Obregón, posiblemente asociada con la permanente presencia de este metal en el aire ambiente y su capacidad de irritación de nariz y garganta. Asimismo, se identificó una correlación fuerte entre Ni y neumonías-bronconeumonías en Guaymas, probablemente asociada con la capacidad de afectación del sistema pulmonar que tiene el Ni. La presencia de metales en el aire ambiente en los sitios estudiados, hacen necesaria la implementación de programas de gobierno para el mejoramiento de la calidad del aire (conocidos en México como ProAire) en dichas ciudades.

AGRADECIMIENTOS

Martín E. Cruz Campas agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de estudios doctorales. Los autores agradecen al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, al Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora, al Programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad Estatal de Sonora, a la Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora y a la Dirección de Ecología del Municipio de Hermosillo, por el apoyo otorgado para la realización de este proyecto. Asimismo se agradece al M. en E. Claudio Mario Amescua García y a la M. en C. Irene Romero Nájera del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México su orientación y apoyo en la revisión editorial del manuscrito.

REFERENCIAS

- ATSDR (2000). Resumen de salud pública. Cromo CAS#: 7440-47-3. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Boletín. Atlanta, G.A., EUA, 8 pp.
- ATSDR (2004). Cobre. CAS #: 7740-50-8. División de Toxicología ToxFAQs™. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Boletín. Atlanta, G.A., EUA, 8 pp.
- ATSDR (2005). Resumen de salud pública. Níquel CAS#: 7440-02-0. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Boletín. Atlanta, G.A., EUA, 8 pp.
- ATSDR (2007). Plomo. CAS #7439-92-1. División de Toxicología ToxFAQs™. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Boletín. Atlanta, G.A., EUA, 2 pp.
- ATSDR (2012). ToxGuide for Cadmium. CAS# 7440-43-9. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Boletín. Atlanta, G.A., EUA, 2 pp.
- CAI (2012). La calidad del aire en América Latina: una visión panorámica. Clean Air Institute. Washington D.C., EUA, 18 pp.
- COCEF (2011). Diagnósticos de necesidades de pavimentación por imágenes satelitales para Nogales, Sonora. Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza – Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano. Diagnóstico 1ra edición. Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 27 pp.
- CONABIO (2010). Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Valores de fondo. Ciudad de México, México, 85 pp.
- Cruz-Campas M.E., Gómez-Álvarez A., Quintero-Núñez M. y Varela-Salazar J. (2013). Evaluación de la calidad del aire respecto de partículas suspendidas totales (PST) y metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en la Ciudad de Hermosillo, Sonora, México, durante un periodo anual. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29 (4), 269-283.
- Cruz-Campas M.E., Gómez-Álvarez A., Quintero-Núñez M., Ramírez-Leal R., Varela-Salazar J. y Monge-Amaya O. (2014). Air quality regarding to TSP in six cities of Sonora, Mexico, a criticism to the NOM-025-SSA1-1993 and a proposed criterion for its non-compliance. *Journal of Environmental Protection.* 5, 862-873. DOI: 10.4236/jep.2014.510088
- Dickson T.R. (1996). Química. Enfoque ecológico. Limusa. México D.F., México, 406 pp.
- DOUE (2005). Directiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de diciembre de 2004 relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente. Diario Oficial de la Unión Europea. Directivas. Estrasburgo, Francia, 16 pp.
- DOUE (2008). Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. Diario Oficial de la Unión Europea. Directivas. Estrasburgo, Francia, 44 pp.
- EEA (2011). Air quality in Europe - 2011 Report. Reporte técnico 12/2011. European Environment Agency. Copenhagen, Dinamarca, 84 pp.
- EIIP (2001). Introduction to stationary point source emission inventory development. Volume II: Chapter 1. 454R970048. Emission Inventory Improvement Program. Morrisville, EUA, 21 pp.

- Garibay-Chávez M.G. (2009). Aire y Salud. Editorial Pandora, S.A. de C.V. Guadalajara, México, 159 pp.
- Guor-Cheng F. y Ci-Song H. (2012). Apply woods model in the predictions of ambient air particles and metallic elements (Mn, Fe, Zn, Cr, and Cu) at industrial, suburban/coastal, and residential sampling sites. *The Scientific World Journal* 2012 (Article ID 207620), 7 pp. DOI: 10.1100/2012/207620
- IMCO (2013). ¿Cuánto nos cuesta la contaminación del aire?. Instituto Mexicano para la Competitividad, AC. Boletín. México D.F. México, 41 pp.
- INEGI (2010). Panorama sociodemográfico de Sonora. Censo de Población y Vivienda 2010. Información de Interés Nacional. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México, 164 pp.
- Islam Md.F., Majumder S.S., Al Mamun A., Khan Md.B., Rahman M.A. y Salam A. (2015). Trace metals concentrations at the atmosphere particulate matters in the southeast Asian mega city (Dhaka, Bangladesh). *Open Journal of Air Pollution* 4, 86-98. DOI: 10.4236/ojap.2015.42009
- MAAMA (2014). Inventarios nacionales de emisiones a la atmósfera 1990-2012. Volumen 2 (versión no confidencial): Análisis por actividades emisoras de la nomenclatura SNAP-97. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, España, pp XVIII.
- MSP (2010). Monitoreo de calidad del aire en la ciudad de Pucallpa marzo del 2010. Dirección General de Salud Ambiental. Ministerio de Salud de Perú. Uycali, Perú, 179 pp.
- Mugica-Álvarez V., Figueroa-Lara J. y Hernández-Moreno A. (2010). Evaluación y seguimiento del programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010. México, 357 pp.
- OECD (2012). Environmental outlook to 2050: The consequences of inaction, OECD Publishing. Organization for Economic Co-operation and Development. Paris, France, 350 pp. DOI: 10.1787/9789264122246-en
- OME (2012). Ontario's ambient air quality criteria standards. Development branch. PIBS # 6570e01. Regulación 419/05. Ontario Ministry of the Environment. Ontario, Canada, 15pp.
- Pértegas Díaz S. y Pita Fernández S. (2002). Determinación del tamaño muestral para calcular la significación del coeficiente de correlación lineal. Coruña, España, 5pp.
- SE (2014). Acuerdo por el que se aprueba el Programa de Desarrollo Minero 2013-2018. Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación. 9 de mayo de 2014.
- SEMARNAT (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993. Métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación. 23 de abril de 2003.
- SEMARNAT-INE (2006). Introducción a la evaluación de los impactos de las termoeléctricas de México. Un estudio de caso en Tuxpan, Veracruz. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología. Veracruz, México, 126 pp.
- SEMARNAT (2007). Gestión de la calidad del aire y registro de emisiones y transferencia de contaminantes. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Región de la Comarca Lagunera 2010-2015. Durango, Coahuila, 173 pp.
- SEMARNAT (2011). Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Catálogo de Publicaciones del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México D.F., México, 410 pp.
- SEMARNAT-INECC (2012). Diagnóstico de la medición de la calidad del aire en México. 60 años monitoreando la calidad del aire. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Catálogo de Publicaciones del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México D.F., México, 255 pp.
- SSA (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación. 23 de diciembre de 1994.
- SSA (2014). NOM-025-SSA1-2014. Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación, México. 20 de agosto de 2014.
- Triola M.F. (2013). Estadística. Actualización tecnológica. 10a ed, Pearson. Ciudad de México, México, 888 pp.
- Urbinato D. (1994). London's historic "pea-soupers". *EPA Journal* 20 (1-2), 44.
- USEPA (2013a). Code of federal regulations title 40 protection of environment. Ch. I Pt. 50, App. B - Reference method for the determination of suspended particulate matter in the atmosphere (High-Volume Method). Método de referencia. United States Environmental Protection Agency. Código, Washington, D.C., EUA, 671 pp.

- USEPA (2013b). Code of federal regulations title 40 protection of environment. Ch. I Pt. 50, App. G - Reference method for the determination of lead in suspended particulate matter collected from ambient air. Método de referencia. United States Environmental Protection Agency. Código, Washington, D.C., EUA, 671 pp.
- USEPA (2008a). Federal Register Part II. 40 CFR Parts 50, 51, 53, and 58 National ambient air quality standards for lead. Reglamento final. United States Environmental Protection Agency. Registro. Washigton, D.C., EUA, 98 pp.
- USEPA (2008b). National emission standards for hazardous air pollutants: Area source standards for plating and polishing operations [en línea]. <https://www.regulations.gov/document?D=EPA-HQ-OAR-2005-0084-0008> 15/06/2015
- USEPA (2015). NESHAP for brick and structural clay products manufacturing; and NESHAP for clay ceramics manufacturing. Reglamento final. United States Environmental Protection Agency. Registro. Washigton, D.C., EUA [en línea]. <https://www.regulations.gov/document?D=EPA-HQ-OAR-2013-0290-0251> 04/02/2015
- WHO (2000). Quantification of the health effects of exposure to air pollution. Reporte. EUR/01/5026342 E74256. World Health Organization. Reporte. Bilthoven, Países Bajos, 20 pp.
- WHO (2006). Guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02. World Health Organization. Guía. Ginebra, Suiza, 25 pp.
- WHO (2011). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. Nota descriptiva No. 313 [en línea]. who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/ 02/02/2015
- WHO - IARC (2013). Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. Press Release N° 221. World Health Organization - International Agency for Research on Cancer. Lyon, Francia, 4 pp.
- WHO (2014). News releases. Air quality deteriorating in many of the world's cities. World Health Organization [en línea]. www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-quality/en/ 10/01/2015