

Las cenizas, gases volcánicos y la salud respiratoria

Martha Patricia Sierra Vargas* 

* Departamento de Bioquímica y Medicina Ambiental. Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas.
Trabajo recibido: 19-IV-2012; aceptado: 26-IV-2012

RESUMEN. Los efectos agudos en la salud respiratoria ocasionados por la precipitación de ceniza volcánica se han documentado en varias partes del mundo. Los reportes epidemiológicos indican que los efectos son transitorios y reversibles, pero los estudios toxicológicos y de biología molecular muestran alteraciones a nivel bioquímico y molecular relacionados con los compuestos adsorbidos en la superficie de las cenizas. Debido a la solubilidad que muchos de ellos presentan, pueden atravesar la membrana alveolocapilar y causar daño a nivel biomolecular, cuya expresión clínica podría tomar años en manifestarse. Es conveniente ampliar los estudios a este nivel, tanto en personas clínicamente sanas como en personas con enfermedades cronicodegenerativas, sobre todo en aquellas que habitan en las comunidades altamente expuestas.

Palabras clave: Cenizas volcánicas, salud respiratoria, exposición, PM₁₀, toxicidad.

ABSTRACT. The respiratory effects derived from volcanic ash precipitation, have been documented worldwide. Epidemiological studies indicate that the effects are transitory and reversible; but toxicological and molecular biology studies show alterations at biochemical and molecular level related to adsorbed compounds on ashes, many of them are known to be soluble and can pass through the alveolocapilar membrane and cause biomolecular damage and their clinical expression could take years to be evident. It is convenient to extend the studies at this level in healthy as well as in people suffering from chronic-degenerative diseases living in highly exposed communities.

Key words: Volcanic ashes, respiratory health, exposure, PM₁₀, toxicity.

INTRODUCCIÓN

México como otras partes de Latinoamérica incluye a varios volcanes activos en sus paisajes. Éstos se localizan en la faja central conformada por la Sierra Volcánica que atraviesa los estados de Veracruz, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, México, Morelos, Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Guerrero, Jalisco, Colima, Nayarit y el Distrito Federal. En este sistema existen doce volcanes activos (figura 1), varios de ellos rodeados por una alta densidad poblacional. En México, la reciente erupción del volcán *El Chichón*, el 28 de marzo de 1982, dejó una amarga experiencia ya que su erupción originó entre 1,700 y 2,300 muertes, más de 20,000 damnificados y causó daño económico severo derivado de la pérdida de ganado. Los plantíos de café, cacao y plátano se vieron seriamente afectados; además, las comunidades situadas dentro de los 6 km a la redonda del volcán fueron completamente destruidas.¹ La respuesta a este evento fue caótica y desorganizada debido a que en ese entonces no existía la Organización de Protección Civil tal y como la conocemos ahora.

El segundo volcán más alto de México, el Popocatépetl, cuyo nombre significa *Montaña que humea*, está

situado a 45 km al oeste de la ciudad de Puebla, a 70 km al sureste de la ciudad de México y a 60 km al noreste de la ciudad de Cuernavaca, Morelos; tiene una altura de 5,452 m snm y ha presentado actividad desde hace décadas, hecho relevante debido a la cercanía a grandes poblaciones. El diámetro y profundidad de su cráter es de



Figura 1. Volcanes activos y su ubicación en la República Mexicana.

900 m y 150 m, respectivamente, es de tipo estratovolcán andesítico-dacítico, es decir, es un tipo de volcán cónico y de gran altura, compuesto por múltiples capas de lava endurecida, piroclastos alternantes y cenizas volcánicas. En los últimos 500 años se tiene registro de 19 erupciones, desde 1512, y el índice de explosividad volcánica (VEI, por sus siglas en inglés) que ha presentado varía de 1 a 3, aunque datos geológicos indican que se han registrado erupciones hasta de un VEI de 6.²

Los efectos respiratorios secundarios a una erupción volcánica son producto de la exposición a la ceniza y gases volcánicos. El grado de afectación va a depender de la cantidad, composición, propiedades fisicoquímicas de estos materiales y se verá influenciado por las características topográficas locales, la dirección de los vientos y la intensidad de las lluvias. Estos factores contribuyen al desplazamiento y concentración de las emisiones volcánicas en el aire de la población expuesta.

GASES VOLCÁNICOS

Los estudios epidemiológicos indican que la exposición poblacional a los gases volcánicos depende de la intensidad y duración de la actividad volcánica, así como de la altura del volcán, las características topográficas y los fenómenos meteorológicos. De tal suerte que la contaminación del aire en zonas habitadas y relativamente alejadas del volcán tendría efectos inflamatorios agudos reversibles en la población sana, y podría provocar dificultad respiratoria en personas con padecimientos respiratorios obstructivos crónicos. Por esta razón, se debe vigilar la dispersión atmosférica de estos gases hacia áreas habitadas, con el fin de que en caso de que las concentraciones sobrepasen los estándares establecidos de calidad del aire se realicen las acciones preventivas para este tipo de contingencias.

Durante el período de actividad volcánica hay emanación de vapor de agua; pero también se han identificado gases tóxicos como el dióxido de carbono (CO_2), el dióxido y trióxido de azufre (SO_2 , SO_3), que combinados con el vapor de agua originan ácidos sulfídrico y sulfúrico (H_2S , H_2SO_4). El ácido clorhídrico (HCl), el monóxido de carbono (CO), el ácido fluorhídrico (HF), el hidrógeno (H), el helio (He) y el radón (Rn), también son expulsados durante la erupción, así como mercurio (Hg), magnesio (Mg), manganeso (Mn) y bromo (Br), entre otros.³⁻⁵

Sin duda que una exposición grande o masiva con estos gases puede ser fatal, simplemente por asfixia. Las emanaciones de CO_2 fueron responsables de la muerte de alrededor de 1,700 personas en el lago Nyo y más de 30 personas en el lago Monoun, Camerún, en 1986 y 1984, respectivamente.^{6,7} Exposiciones menos importantes generan empeoramiento de enfermedades

respiratorias previas y si son de suficiente magnitud y duración pueden producir alteraciones en personas previamente sanas. Las emanaciones de SO_2 del volcán Kilauea, en Hilo Hawái, se relacionaron con un aumento en los casos de asma.⁸ Además, se estima que de los 491 desastres reportados durante el siglo XX, relacionados con erupciones volcánicas,⁹ 11% de éstos estuvieron relacionados con los gases emanados y que durante estos eventos perdieron la vida 2,016 personas (2% del total) y 2,860 (18%) resultaron heridas. Pero estos lamentables acontecimientos no solamente han tenido lugar durante las erupciones volcánicas. En el Monte Aso, Japón, seis muertes de turistas estuvieron asociadas a la exposición de SO_2 , y otras 59 personas tuvieron que ser hospitalizadas; el común denominador en estos casos fue que sufrían de enfermedades respiratorias crónicas. La necropsia practicada a una de las víctimas evidenció la presencia de enfisema pulmonar.¹⁰ De la misma manera, las personas que regresaron a Miyakejima reportaron una mayor sintomatología respiratoria relacionados con la exposición a este gas; las concentraciones en el aire ambiente registradas durante 2006 eran de 0.031 ppm.¹¹ Por otra parte, Longo *et al.*¹² reportaron que el distrito de Ka'u en Hawaii está expuesto a azufre vog presente en el aire ambiente y derivado del incremento en la actividad del volcán Kilauea en 2008. Este hecho originó la evaluación de la calidad del aire intramuros¹³ en escuelas y hospitales, las cuales se encontraron por arriba del estándar de 24 h recomendado por la OMS de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Por otro lado, las concentraciones de vapores de mercurio (Hg) detectadas en regiones volcánicas, sobrepasan las recomendadas por la OMS para exposición a nivel poblacional (1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), y su acumulación ha sido detectada en profesionales expuestos (vulcanólogos, guías, empleados de la industria geotérmica). Sin embargo, no se han demostrado alteraciones neurológicas.¹⁴ Otro de los gases tóxicos derivado de la actividad volcánica es el fluoruro de hidrógeno (HF), cuyas concentraciones cerca del conducto de ventilación del Popocatépetl se encontraron dentro de la norma de la OMS;³ pero aunque el riesgo de una intoxicación por vía respiratoria pareciera ser poco probable debido a su baja concentración, puede ser una importante fuente de fluorosis debido a que este gas se mezcla con el agua, alcanzando concentraciones de hasta 2,800 mg/L.¹⁵

En el caso del Popocatépetl, el monitoreo de sus emisiones se ha realizado desde diciembre de 1994,¹⁶⁻²⁰ después de un período de inactividad de casi 70 años. La actividad volcánica registrada durante el período de diciembre de 2000 y enero de 2001 fue particularmente intensa, ésta tuvo una influencia negativa en la calidad del aire de la ciudad de Puebla, lo cual se vio reflejado en el incremento de los índices de PM_{10} , CO y compuestos de azufre.²¹

Como resultado de la actividad volcánica mundial, se han realizado varios estudios epidemiológicos que indican que los efectos adversos en la salud secundarios a la exposición a las cenizas volcánicas son agudos y reversibles. Por ejemplo, en las erupciones del Pinatubo y el Santa Elena,²² la ceniza contenía de 3 a 7% de sílice cristalino, causante de la silicosis en los mineros, y más del 90% de las partículas estaban en el rango de respirables,²³ dato que es indicativo de una mayor toxicidad. Un incremento sustancial de partículas PM₁₀ se observó en Quito en 1999,²⁴ las concentraciones relativamente bajas (58 µg/m³) al inicio de la actividad y después incrementaron progresivamente hasta concentraciones que alcanzaron los 1,487 µg/m³. Las zonas con mayor índice de contaminación (3,000-33,000 mg/m³ en 24 h de PST) mostraron un incremento de 2 a 3 veces en las admisiones hospitalarias y de 3 a 5 veces en los ingresos al Servicio de Urgencias debido a padecimientos respiratorios de sujetos con patología respiratoria previa,^{23,25} así como los ocupacionalmente expuestos (leñadores).²⁶ El incremento en la sintomatología respiratoria aguda persistió durante algunos meses, probablemente secundario a la resuspensión de las cenizas. Se ha reportado que la exposición a este material tiene un impacto en la función inmunológica, demostrado por una disminución en las concentraciones de complemento C3 y C4, así como de la inmunoglobulina G (IgG) en personal ocupacionalmente expuesto.²⁷

Iwasawa *et al.*, así como Shimizu *et al.*,²⁸⁻³⁰ encontraron que la frecuencia de tos y expectoración fueron significativamente mayores en la zona de mayor exposición a SO₂ de 0.045 ppm en cuatro áreas de Miyakejima, Japón (febrero 2005 a noviembre 2006) comparado con la zona de baja exposición (0.019 ppm) con una razón de momios ajustado por edad, sexo y tabaquismo de 1.75 (95% CI 1.33-2.30) y 1.44 (1.12-1.87), respectivamente. Además, la prevalencia de síntomas compatibles con bronquitis crónica en sujetos clínicamente sanos se incrementó significativamente con respecto a la observada en 2004 (4.1% vs. 2.1%). También hubo registro del incremento en los síntomas de asma, la reducción del FVC% y FEV1%, la disminución del flujo espiratorio pico (PEF) y, en consecuencia, una mayor necesidad de utilizar medicamentos. Es importante señalar que las concentraciones de SO₂ intradomiciliarias se han observado por arriba de las recomendadas por la OMS y han originado una mayor sintomatología respiratoria en los residentes expuestos, principalmente en aquellos que son fumadores o con enfermedades respiratorias previas. No sólo se han observado alteraciones a nivel respiratorio: Longo *et al.*, reportaron un incremento significativo en la frecuencia del pulso en las personas no fumadoras, clínicamente sanas y con un IMC < 25 kg/

m² que podría ser indicativo de una respuesta cardiovascular derivado de la exposición a las cenizas.^{31,32} Las mujeres parecen ser más susceptibles que los hombres. En el estudio de Miyakejima,³³ la tasa de síntomas respiratorios observada a concentraciones de 0.6 a 2.0 ppm de SO₂ (vs. < 0.01 ppm) fueron: tos, 3.4 (95% CI 1.8 a 6.6) en hombres, y 9.8 (3.9 a 24.9) en mujeres; irritación de garganta, 3.2 (1.7 a 6.2) en hombres, y 5.8 (2.0 a 16.5) en mujeres; finalmente, para disnea fue de 10.5 (4.2 a 26.6) en hombres, y 18.5 (4.6 a 74.3) en mujeres.

El incremento de las visitas al Servicio de Urgencia pediátrico por infecciones agudas de vías respiratorias altas y bajas así como de asma, también se incrementó tres semanas después de la erupción del volcán Guagua Pichincha en Quito, Ecuador, en abril de 2000. El impacto fue mayor en los niños menores de 5 años.³⁴

PRECIPITACIÓN DE CENIZAS VOLCÁNICAS

Durante la actividad volcánica se emite roca que, debido a la fuerza con que es expelida por la ruptura del domo, se convierte en polvo o arena. El tamaño de ésta varía de 0.004 a 2 mm de diámetro. La cantidad y composición de la ceniza varía entre los volcanes y aun entre erupciones de un mismo volcán. En general la ceniza volcánica está compuesta por óxidos, principalmente de sílice, aluminio y hierro (80%), Mg, calcio, sodio, potasio, plomo; metales pesados como vanadio, cromo, cobalto, níquel y zinc. Se presenta en forma de polvo fino, con alturas de precipitación de 1 a 3 cm (en zona mediana de riesgo) y de 5 a 10 cm (en zona de alto riesgo).^{35,36} Las cenizas del volcán *El Chichón* contienen concentraciones significativamente mayores de Mn, cobre (Cu), rubidio (Rb) estroncio (Sr) y niobio (Nb) que la ceniza proveniente del Monte Santa Elena. Además de que el contenido de azufre era catorce veces mayor en las muestras obtenidas de *El Chichón*, así como la concentración de radionúclidos como el torio, el radio y el potasio (²³²Th, ²²⁶Ra, K⁴⁰, respectivamente). El contenido de sílice cristalina fue de 0.8 a 1.2% en forma de α-cuarzo, mientras que el material proveniente del Monte Santa Elena contenía entre 3 y 7% de cristobalita; los estudios toxicológicos realizados con las cenizas de *El Chichón* indicaron un grado de toxicidad moderado.^{23,37-39} Con respecto al Popocatépetl, un estudio realizado por el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ)⁴⁰ reportó que la composición de las cenizas del volcán era la siguiente: 65-68% de SiO₂, 5-6% de álcalis (óxidos de K y Na) y 3-5% de sílice libre (cristobalita) así como partículas de titanio y hierro.

Existen dos factores que intervienen en la toxicidad de la ceniza volcánica, aparte de su composición fisicoquímica y de la concentración: uno es su tamaño, ya

que sólo las partículas más pequeñas pueden penetrar profundo en el pulmón y la capacidad que tienen de transportar los compuestos volátiles que se adsorben en la superficie de las mismas, pudiendo de esta manera aerotransportarse a través de grandes distancias antes de sedimentarse.

Toxicidad de la ceniza volcánica

En resumen, los estudios efectuados a nivel toxicológico *in vivo* e *in vitro* muestran que la ceniza volcánica tiene principalmente efectos citotóxicos, que pueden iniciar o exacerbar procesos inflamatorios crónicos preexistentes en exposiciones crónicas.

En animales de laboratorio se han descrito diferentes efectos bioquímicos, inmunológicos y tisulares, p. ej.: la persistencia de las cenizas en el tejido pulmonar es aproximadamente de 39 días y alrededor de 10% de ellas se retiene en el tejido pulmonar hasta dos meses después.⁴¹ De igual manera se ha observado aumento de la frecuencia respiratoria, acumulación de macrófagos alveolares, proteinosis alveolar, reacción intersticial y linforreticular en la región peribronquiolar y en nódulos linfáticos mediastinales, y en menor proporción la presencia de carcinoma epidermoide,^{42,43} así como una marcada respuesta inflamatoria en los bronquiolos, caracterizada por el predominio de polimorfonucleares (PMN), infiltrados de células mononucleares, desarrollo de granulomas y aumento progresivo de las cantidades de colágeno a los 7 y 28 días de la exposición.⁴⁴ Además de estas reacciones, otros estudios han descrito efectos hemolíticos,^{42,45} aumento de las concentraciones de fosfolípidos, proteínas, enzimas citoplasmáticas y lisosomales en el tejido pulmonar y el lavado bronquioloalveolar (LBA),^{45,46} aumento en la generación de anión superóxido y alteraciones en la capacidad fagocítica de los macrófagos alveolares, pero sin alterar la susceptibilidad de los animales a infección por *Streptococcus*,⁴⁶⁻⁴⁸ daño a la ultraestructura de los neumocitos tipo II, edema alveolar y a largo plazo engrosamiento intersticial y fibrosis.⁴⁹ Otros estudios no han encontrado evidencia de alteraciones tisulares pulmonares seis meses después de la exposición, excepto un incremento del peso pulmonar que podría ser indicativo de edema y que casi la totalidad de las partículas habían sido fagocitadas por los macrófagos y una leve alteración en el consumo de oxígeno en los neumocitos tipo II de conejo.^{50,51} La inhalación de ceniza proveniente del volcán Popocatépetl, originó una reacción inflamatoria con focos neumónicos y presencia de detritus celulares, así como infiltración de linfocitos en el tejido pulmonar de hámsteres expuestos a las cenizas.⁵² Durante la erupción de *El Chichón* se registraron alteraciones de las vías aéreas superiores,

casos de asma, así como conjuntivitis. La severidad de estas alteraciones fue mayor inmediatamente después de la caída de la ceniza.³⁷

Riesgo de neumoconiosis

Es bien conocido que la exposición ocupacional durante largo tiempo a partículas de sílice cristalina puede generar inflamación pulmonar, edema, fibrosis y cáncer. Samukawua *et al.*, observaron cierto potencial fibrogénico debido al contenido de sílice cristalina (SiO_2) evidenciado por un incremento en la profilina mRNA y la expresión de c-jun mRNA en macrófagos de ratas expuestas a cenizas volcánicas.⁵³ Mientras que Jones y Bérubé encontraron que el grado de biorreactividad de las cenizas depende de la cantidad de SiO_2 en la muestra, existiendo una correlación positiva entre la fuerza de unión de ciertas proteínas como albumina, α -1, β -glucoproteína, complemento C3, hemopexina y L-Plastina y la concentración de cristobalita contenida en esa muestra.⁵⁴

Shojima *et al.*⁵⁵ reportaron un caso de una mujer de 57 años que estuvo expuesta durante la erupción del volcán Miyake, en agosto de 2000; fue admitida en el hospital en septiembre del mismo año con un diagnóstico de inflamación pulmonar secundario a ceniza volcánica. La tomografía reveló imágenes difusas irregulares con broncograma aéreo y la biopsia mostró una bronquiolitis con presencia de células alrededor de cristales similares a la ceniza volcánica. Estos datos desaparecieron gradualmente sin tratamiento alguno, pero la paciente se abstuvo de exponerse a las cenizas. Los resultados del seguimiento durante cinco años de personas expuestas a la ceniza del volcán Santa Elena muestran, sin embargo, que el riesgo de bronquitis crónica y neumoconiosis no es significativo cuando se trata de una exposición inicialmente alta que disminuye con el tiempo.⁵⁶ Estos datos son consistentes con otros estudios toxicológicos mencionados anteriormente en este documento. La exposición a cenizas suspendidas en trabajadores al aire libre podría ser potencialmente alta para causar silicosis si las concentraciones son elevadas, de forma constante y durante años, lo que no suele suceder. En estas áreas, deben tomarse muestras de ceniza, analizar su composición y estimar la cantidad de sílice libre en la fracción respirable, a fin de evaluar el riesgo de neumoconiosis y establecer las medidas de control.

CONCLUSIONES

La exposición a gases, especialmente el SO_2 y las partículas de ceniza volcánica PM_{10} , producen en la población cuadros de inflamación aguda de las vías respiratorias

superiores e inferiores habitualmente reversibles ya que la exposición suele ser transitoria. Es posible que interfieran con algunos mecanismos de defensa; sin embargo, los resultados no permiten concluir que la exposición a la ceniza volcánica facilite la sobreinfección bacteriana o interfieran en los mecanismos de defensa contra enfermedades virales. El riesgo más importante de problemas respiratorios lo presentan los niños, las personas de la tercera edad y aquellas que se encuentran o trabajan al aire libre; pero sobre todo los que padecen alguna enfermedad pulmonar crónica. Dependiendo del grado de exposición pueden presentar empeoramientos, como sucede con la exposición mayor a la contaminación urbana que se ha demostrado en forma consistente, que llega a ocasionar la muerte de poblaciones ancianas y enfermas causando un incremento en las defunciones, y que vuelve a cifras normales al pasar el incremento en contaminación.

Los estudios experimentales han demostrado que la ceniza volcánica tiene moderada capacidad fibrogénica muy inferior a la del cuarzo y no se han descrito casos de silicosis por ceniza volcánica, lo que de nuevo orienta no sólo a la toxicidad de la ceniza, sino a la magnitud de la exposición y su duración.

No debemos perder de vista que el pulmón es un órgano con un alto contenido de citocromo P-450 que es vital para los procesos de detoxificación de los xenobióticos y que puede ser el paso también de ellos para ejercer su toxicidad en órganos más alejados. Los estudios del ININ muestran que las partículas respirables de la ceniza volcánica del Popocatépetl, están compuestas por aproximadamente 10 elementos, entre los cuales se encuentra el Mn. El Mn es un metal traza importante para el desarrollo de diversas funciones enzimáticas llevadas a cabo en el organismo, pero que a concentraciones elevadas es altamente neurotóxico.^{57,58} Desgraciadamente el ININ en su estudio no muestra las concentraciones aisladas de cada uno de los metales. Consideramos que los estudios futuros deben ser enfocados a nivel bioquímico en la población expuesta y no solamente a nivel de la función respiratoria, con la finalidad de detectar indicadores biológicos de daño que pudieran mermar la calidad de vida a largo plazo de los sujetos expuestos.

Los efectos agudos en la salud respiratoria ocasionados por la contaminación del aire provocada por la precipitación de ceniza volcánica se han documentado en varias partes del mundo. Debido a las medidas preventivas implantadas en erupciones recientes no han sido registrados casos de muerte por asfixia o dificultad respiratoria en poblaciones expuestas a concentraciones elevadas de ceniza volcánica, aunque pueden llegar a presentarse casos en la población vulnerable,

si no se siguen las medidas de protección y los servicios de salud locales no están preparados para cubrir y atender eficazmente la demanda de pacientes con dificultad respiratoria.

Como parte de la vigilancia de la actividad volcánica cercana a zonas poblacionales se debe incorporar la de las consecuencias en salud, cuando menos con cuentas de visitas a los servicios de urgencias por problemas respiratorios esto correlacionado con alguna medida de magnitud de exposición que no siempre es sencilla ya que no es fácil separar a corto plazo el origen de las partículas que se miden en las zonas urbanas. Los servicios de salud deben anticiparse y estar preparados para atender de manera eficaz el incremento en la demanda de consultas por problemas respiratorios. Para evitar la inhalación de ceniza de tamaño respirable son necesarias mascarillas de alta eficiencia ya que los cubrebocas quirúrgicos sólo detendrían las partículas más grandes. Ninguna de las dos protege, sin embargo, contra los gases contaminantes. En días de depósito de ceniza conviene evitar el ejercicio.

Agradecimientos

La autora agradece al Dr. Rogelio Pérez Padilla por los comentarios al manuscrito, así como al Dr. Luis Armando Jiménez Álvarez por su asistencia en el diseño gráfico.

REFERENCIAS

1. De la Cruz-Reyna S, Martin del Pozzo AL. *The 1982 eruption of El Chichón volcano, Mexico: Eyewitness of the disaster*. Geofis Int 2009;48:21-31.
2. De la Cruz-Reyna S, Tilling RI. *Scientific and public responses to the ongoing volcanic crisis at Popocatépetl volcano, Mexico: Importance of an effective hazards-warning system*. J Volcanol Geotherm Res 2008;170:121-134.
3. Organización Panamericana de la Salud. *Guía de preparativos de salud frente a erupciones volcánicas*. Módulo 1: *El sector salud frente al riesgo volcánico*. Organización Mundial de la Salud, 2005. Fecha de consulta: 04 de mayo, 2012. Disponible en: http://www.paho.org/spanish/dd/ped/gv_modulo1-1.pdf.
4. Goff F, Janik CJ, Delgado H, et al. *Geochemical surveillance of magmatic volatiles at Popocatépetl volcano, Mexico*. Geol Soc Am Bull 1998;110:695-710.
5. Bobrowski N, Hönniger G, Galle B, Platt U. *Detection of bromine monoxide in a volcanic plume*. Nature 2003;423:273-276.
6. Kling GW, Clark MA, Wagner GN, et al. *The 1986 lake Nyos gas disaster in Cameroon, West Africa*. Science 1987;236:169-175.
7. Baxter PJ, Kapila M, Mfonfu D. *Lake Nyos disaster, Cameroon, 1986: the medical effects of large scale emission of carbon dioxide?* BMJ 1989;298:1437-1441.

8. Michaud JP, Grove JS, Krupitsky D. *Emergency department visits and "vog" related air quality in Hilo, Hawai'i*. Environ Res 2004;95:11-19.
9. Witham CS. *Volcanic disasters and incidents: A new database*. J Volcanol Geotherm Res 2005;148:191-233.
10. Ng'walali PM, Koreeda A, Kibayashi K, Tsunenari S. *Fatalities by inhalation of volcanic gas at Mt. Aso crater in Kumamoto, Japan*. Leg Med (Tokyo) 1999;1:180-184.
11. Iwasawa S, Kikuchi Y, Nishiwaki Y, et al. *Effects of SO₂ on respiratory system of adult Miyakejima resident 2 years after returning to the island*. J Occup Health 2009;51:38-47.
12. Longo BM, Yang W, Green JB, Longo AA, Harris M, Bibilone R. *An indoor air quality assessment for vulnerable populations exposed to volcanic vog from Kilauea Volcano*. Fam Community Health 2010;33:21-31.
13. *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Actualización mundial 2005, WHO/SDE/PHE/OEH/06.02. Fecha de consulta: 04 de mayo, 2012. Disponible en: http://www.who.int/phe/health_topics/AQG_spanish.pdf
14. Siegel BZ, Siegel SM. *Mercury in human hair: uncertainties in the meaning and significance of 'unexposed' and 'exposed' in simple population*. Water Air Soil Pollut 1985;26:191-199.
15. Fawell J, Bailey K, Chilton J, et al. *Fluoride in Drinking-water*. World Health Organization (WHO) 2006. Access date: 04 of May, 2012. Available from: http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/fluoride_drinking_water/en/
16. Delgado-Granados H, Cárdenas-González L. *Passive degassing at volcan Popocatépetl México: 2.6 × 10⁶ tons of SO₂ released in 617 days of activity*. Volcanic activity and the environment. Abstracts. IAVCEI, Puerto Vallarta, México;1997.p.49.
17. Andres RJ, Kasgnoc AC. *A time-averaged inventory of subaerial volcanic sulfur emissions*. J Geophys Res 1998;103:25251-25261.
18. Delgado-Granados H, Cárdenas-González L, Piedad-Sánchez N. *Sulfur dioxide emissions from Popocatépetl volcano (Mexico): case study of a high-emission passively degassing erupting volcano*. J Volcanol Geotherm Res 2001;108:107-120.
19. Delgado-Granados H. *Large Volcanic- SO₂ fluxes: COSPEC measurements at Popocatépetl Volcano (Mexico)*. In: Williams-Jones G, Stix J, Hickson C, editors. *The COSPEC Cookbook*. IAVCEI, Special publications;2008.p.230.
20. Heiken G. *Volcanic ash: what it is and how it forms*. US Geol Sur Bull 1993;2047:39-45.
21. Juárez A, Gay C, Flores Y. *Impact of the Popocatepetl's volcanic activity on the air quality of Puebla City, México*. Atmósfera 2005;18:57-69.
22. Hatch GE, Raub JA, Graham JA. *Functional and biochemical indicators of pneumoconiosis in mice: comparison with rats*. J Toxicol Environ Health 1984;13:487-497.
23. Baxter PJ, Ing R, Falk H, et al. *Mount St Helens eruptions, May 18 to June 12, 1980. An overview of the acute health impact*. JAMA 1981;246:2585-2589.
24. Álvarez M, Avilés J. *Ceniza volcánica: un nuevo agente de contaminación química: Consideraciones químicas, clínicas y epidemiológicas en torno a las erupciones de los volcanes de Guagua Pichincha y Tungurahua, Ecuador*. Unidad de preparación para desastres químicos, Ministerio de Salud Pública. Fecha de consulta: 04 de mayo, 2012. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/ceniza/ceniza.pdf>
25. Baxter PJ, Ing R, Falk H, Plikaytis B. *Mount St. Helens eruptions: the acute respiratory effects of volcanic ash in a North American community*. Arch Environ Health 1983;38:138-143.
26. Buist S, Bernstein RS. *Health effects of volcanoes: an approach to evaluating the health effects of an environmental hazard*. Am J Public Health 1986;76(3 Suppl):1-2.
27. Olenchock SA, Mull JC, Mentnech MS, Lewis DM, Bernstein RS. *Changes in humoral immunologic parameters after exposure to volcanic ash*. J Toxicol Environ Health 1983;11:395-404.
28. Iwasawa S, Michikawa T, Nakano M, et al. *Nine-month observation of effects of SO₂ on the respiratory system in child Miyakejima citizens*. Nihon Koshu Eisei Zasshi 2010;57:39-43.
29. Iwasawa S, Kikuchi Y, Nishiwaki Y, et al. *Effects of SO₂ on respiratory system of adult Miyakejima resident 2 years after returning to the island*. J Occup Health 2009;51:38-47.
30. Shimizu Y, Dobashi K, Hisada T, et al. *Acute impact of volcanic ash on asthma symptoms and treatment*. Int J Immunopathol Pharmacol 2007;20(2 Suppl 2):9-14.
31. Longo BM, Rossignol A, Green JB. *Cardiorespiratory health effects associated with sulphurous volcanic air pollution*. Public Health 2008;122:809-820.
32. Longo BM. *The Kilauea Volcano adult health study*. Nurs Res 2009;58:23-31.
33. Ishigami A, Kikuchi Y, Iwasawa S, et al. *Volcanic sulfur dioxide and acute respiratory symptoms on Miyakejima island*. Occup Environ Med 2008;65: 701-707.
34. Naumova EN, Yepes H, Griffiths JK, et al. *Emergency room visits for respiratory conditions in children increased after Guagua Pichincha volcanic eruptions in April 2000 in Quito, Ecuador observational study: time series analysis*. Environ Health 2007;6:21-31.
35. Organización Panamericana de la Salud. *Erupciones volcánicas y protección de la salud*. Quito; 2000.p.24.
36. Witter JB, Kress VC, Newhall CG. *Volcán Popocatépetl, Mexico. Petrology, magma mixing, and immediate sources of volatiles for the 1994-present eruption*. J Petrology 2005;46:2337-2366.
37. Nania JM, Rodriguez GM, Fruchter JS, Olsen KB, Hooper PR. *In the shadow of El Chichón: an overview of the medical impact of the 28 March to 4 April 1982 eruptions of the Mexican volcano*. Prehosp Disaster Med 1994;9:58-66.
38. Nania J, Bruya TE. *In the wake of Mount St. Helens*. Ann Emerg Med 1982;11:184-191.
39. Buist AS. *Are volcanoes hazardous to your health? What have we learned from Mount St. Helens?* West J Med 1982;137:294-301.

40. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Dirección General de Salud Ambiental. Gobierno Federal. *Caracterización de materia particulada aeroportada asociada a la actividad del volcán Popocatépetl (verano de 1997)*. Informe técnico final. Gerencia de Ciencias Ambientales, Departamento de Estudios del Ambiente. México: 1997.
41. Wehner AP, Wilerson CL, Stevens DL. *Lung clearance of neutron-activated Mount St. Helens volcanic ash in the rat*. Environ Res 1984;35:211-217.
42. Vallyathan V, Robinson V, Reasor M, Stettler L, Bernstein R. *Comparative in vitro cytotoxicity of volcanic ashes from Mount St. Helens, El Chichón, and Galunggung*. J Toxicol Environ Health 1984;14:641-654.
43. Vallyathan V, Mentnech MS, Tucker JH, Green FH. *Pulmonary response to Mount St. Helens' volcanic ash*. Environ Res 1983;30:361-371.
44. Kornbrust DJ, Hatch GE. *Effect of silica and volcanic ash on the content of lung alveolar and tissue phospholipids*. Environ Res 1984;35:140-153.
45. Hatch GE, Raub JA, Graham JA. *Functional and biochemical indicators of pneumoconiosis in mice: comparison with rats*. J Toxicol Environ Health 1984;13:487-497.
46. Castranova V, Bowman L, Shreve JM, Jones GS, Miles PR. *Volcanic ash: toxicity to isolated lung cells*. J Toxicol Environ Health 1982;9:317-325.
47. Beck BD, Brain JD, Bohannon DE. *The pulmonary toxicity of an ash sample from the MT. St. Helens Volcano*. Exp Lung Res 1981;2:289-301.
48. Grose EC, Grady MA, Illing JW, Daniels MJ, Selgrade MK, Hatch GE. *Inhalation studies of Mt. St. Helens volcanic ash in animals. III. Host defense mechanisms*. Environ Res 1985;37:84-92.
49. Martin TR, Chi EY, Covert DS, et al. *Comparative effects of inhaled volcanic ash and quartz in rats*. Am Rev Respir Dis 1983;128:144-152.
50. Raub JA, Hatch GE, Mercer RR, Grady M, Hu PC. *Inhalation studies of Mt. St. Helens volcanic ash in animals. II*. *Lung function, biochemistry, and histology*. Environ Res 1985;37:72-83.
51. Wiester MJ, Setzer CJ, Barry BE, Mercer RR, Grady MA. *Inhalation studies of Mt. St. Helens volcanic ash in animals: respiratory mechanics, airway reactivity and deposition*. Environ Res 1985;36:230-240.
52. Rivera TJA, Cedillo RL, Gil JC, Giono CS. *Efectos de la exposición a la inhalación de ceniza del volcán Popocatépetl en hamsters*. Universidad y Ciencia 2003;19:53-61.
53. Samukawa T, Arasidani K, Hori H, Hirano H, Arima T. *c-jun mRNA expression and profilin mRNA amplification in rat alveolar macrophages exposed to volcanic ash and sulfur dioxide*. Ind Health 2003;41:313-319.
54. Jones T, Bérubé K. *The bioreactivity of the sub-10 µm component of volcanic ash: Soufrière Hills volcano, Montserrat*. J Hazard Mater 2011;194:128-134.
55. Shojima J, Ikushima S, Ando T, et al. *A case of volcanic ash lung: report of a case*. Nihon Kokyuki Gakkai Zasshi 2006;44:192-196.
56. CDC. *Follow-up on Mount St. Helens*. MMWR 1980;29:263-264.
57. Roels HA, Bowler RM, Kim Y, et al. *Manganese exposure and cognitive deficits: A growing concern for manganese neurotoxicity*. Neurotoxicology 2012; Apr 3.
58. Racette BA, Aschner M, Guijarro TR, Dyak U, Criswell SR, Zheng W. *Pathophysiology of manganese-associated neurotoxicity*. Neurotoxicology 2011; Dec 21.

✉ Correspondencia:

Dra. Martha Patricia Sierra Vargas, Departamento de Bioquímica y Medicina Ambiental. Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas. Calzada de Tlalpan 4502, colonia Sección XVI. México, D.F., 14080
Correo electrónico: mpsierra@iner.gob.mx

El autor declara no tener conflictos de interés