

Riesgos potenciales de salud por consumo de agua con arsénico en Colima, México

Oliver Mendoza-Cano, D en C Med,^(1,2) Ramón Alberto Sánchez-Piña, D en S Amb,⁽²⁾
 Julián Barrón-Quintana, M en C de la Tierra,⁽¹⁾ Herguin Benjamin Cuevas-Arellano, D en S Amb,⁽³⁾
 Pilar Escalante-Minakata, D en Biot,⁽¹⁾ Ramón Solano-Barajas, D en Teledetección.⁽¹⁾

Mendoza-Cano O, Sánchez-Piña RA, Barrón-Quintana J, Cuevas-Arellano HB, Escalante-Minakata P, Solano-Barajas R. Riesgos potenciales de salud por consumo de agua con arsénico en Colima, México. *Salud Publica Mex* 2017;59:34-40. <http://dx.doi.org/10.21149/8413>

Mendoza-Cano O, Sánchez-Piña RA, Barrón-Quintana J, Cuevas-Arellano HB, Escalante-Minakata P, Solano-Barajas R. Potential health risks from consumption of water with arsenic in Colima, Mexico. *Salud Publica Mex* 2017;59:34-40. <http://dx.doi.org/10.21149/8413>

Resumen

Objetivo. Estimar los riesgos potenciales de salud debidos a la ingestión crónica de arsénico (As) en agua en Colima, México. **Material y métodos.** Se muestrearon aleatoriamente 36 pozos en 10 acuíferos locales. El análisis se hizo mediante ICP-OES siguiendo estándares internacionales. Se realizó una interpolación geoestadística con ArcGIS, implementando un modelo de ponderación del inverso de la distancia, para estimar la ruta de exposición de consumo en cada localidad. Se calcularon los coeficientes de peligro (HQ) y riesgo carcinogénico (R). **Resultados.** El HQ promedio ponderado de As para Colima es 2.41. Existen valores de HQ > 1 para As que indican efectos adversos no carcinogénicos para la salud por ingestión continua y prolongada de agua; esto podría afectar a 183 832 individuos en el estado. El riesgo calculado de desarrollar cáncer debido a las concentraciones de arsénico en aguas subterráneas (R) es de 1.089E-3; estadísticamente esto podría ocasionar 446 casos de cáncer. **Conclusiones.** Los niveles actuales de arsénico en el agua de pozo incrementan los riesgos carcinogénicos y no carcinogénicos de salud humana en Colima.

Palabras clave: agua subterránea; arsénico; cáncer

Abstract

Objective. To estimate potential health risks due to chronic ingestion of arsenic from groundwater in Colima, Mexico. **Materials and methods.** Samples were randomly taken in 36 wells from 10 local aquifers. Analysis was performed by ICP-OES following international standards. Geostatistical interpolation was performed with ArcGIS, implementing a model weighting inverse distance to estimate arsenic routes of exposure and consumption on each locality. The Hazard Quotient Ratio (HQ) and carcinogenic risk (R) for As were estimated. **Results.** The weighted average HQ for arsenic in Colima is 2.41. There are HQ > 1 values indicating adverse non-cancer health effects by continuous and prolonged intake of water with arsenic, which could affect 183 832 individuals in the state. The risk of developing any type of cancer among the population in this study due to high arsenic concentrations in groundwater (R) is 1.089E-3, which could statistically cause 446 cases of cancer. **Conclusions.** Current levels of arsenic in groundwater increase carcinogenic and non-carcinogenic human health risks in Colima.

Keywords: groundwater; arsenic; cancer

(1) Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Colima. Colima, México.

(2) Center for Health and the Global Environment, Department of Environmental Health, Harvard TH Chan School of Public Health. Boston, USA.

(3) Facultad de Ciencias, Universidad de Colima. Colima, México.

Fecha de recibido: 11 de diciembre de 2015 • **Fecha de aceptado:** 25 de agosto de 2016

Autor de correspondencia: Dr. Ramón Alberto Sánchez-Piña. Center for Health and the Global Environment, Department of Environmental Health, Harvard School of Public Health. 401 Park Drive. 02215 Boston, Massachusetts, USA.
 Correo electrónico: rsanchez@hsph.harvard.edu

La ingestión de agua con contenido de metales y metaloides como el arsénico (As), cadmio, plomo y mercurio puede producir daños neuronales, problemas estomacales, parálisis parcial, ceguera y ciertos cánceres en piel, pulmón, hígado, riñón y próstata.¹⁻⁴ El arsénico por sí mismo es un carcinógeno humano que causa tumores pulmonares, de la piel y otros; un umbral práctico en agua potable se toma como 0.01 mg/L.⁵

La exposición humana y ambiental a metales pesados y metaloides puede tener causas naturales como la erosión de suelos ricos en estos elementos y su transportación a los cuerpos de agua o causas antropomórficas como la generación eléctrica, los residuos sólidos de procesos industriales, las baterías no recicladas, los materiales de la industria de la fundición y la aplicación de fertilizantes y plaguicidas en agricultura.^{6,7}

La variabilidad espacial de la concentración de contaminantes se usa para determinar la localización probable de las actividades humanas o fenómenos naturales que podrían ser la causa de contaminación.⁸ Los muestreos de cuerpos de agua y los sistemas de información geográfica (SIG) se utilizan como un método de detección de fuentes contaminantes de metales y metaloides. Este método también permite detectar riesgos de exposición, implementar medidas de prevención de riesgos ambientales y evaluar los efectos adversos potenciales a la salud humana debido a altas concentraciones de metales pesados.^{9,10}

El Estado de Colima tiene aproximadamente 700 000 habitantes y 55% del agua para consumo humano proviene de fuentes subterráneas.¹¹ Algunas mediciones aleatorias en pozos del estado encontraron concentraciones de arsénico entre 0.1 y 10 $\mu\text{g/L}$.¹² Sin embargo, no se ha realizado un estudio a gran escala para determinar la distribución espacial de metales y metaloides en mantos acuíferos y sus riesgos potenciales a la salud en los habitantes de la región. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo utilizar una metodología de interpolación espacial para estimar las concentraciones potenciales de metales pesados en las aguas subterráneas de las localidades del estado que utilizan estas fuentes de abastecimiento (dosis de exposición), datos con los cuales se evaluaron los riesgos potenciales en la salud de la población expuesta.

El método inicia con un muestreo aleatorio simple de las concentraciones de arsénico en pozos de extracción de agua potable y el uso de SIG y métodos estadísticos para determinar la distribución espacial de concentraciones, las cuales se utilizan para determinar exposición a contaminantes y riesgos potenciales en la salud. Esta información podría ayudar a definir políticas de abastecimiento de agua y salud pública que ayuden a proteger a las poblaciones susceptibles a la ingesta de

metales y metaloides presentes en los mantos freáticos de sus comunidades.

Material y métodos

Se utiliza una metodología con herramientas analíticas y geoestadísticas para estimar los coeficientes de peligro y de riesgo para poblaciones expuestas al arsénico a través de las fuentes de abastecimiento de la red de agua potable del estado de Colima. Entre las tres vías principales de exposición (ingestión, inhalación y absorción dérmica), solamente se analizó la ingestión, ya que ésta es la vía más importante de exposición humana para As.¹³

Área de estudio

La mayor parte de la población de Colima reside en zonas urbanas donde se suministran servicios de agua potable y alcantarillado.¹⁴ Existen 272 pozos de agua potable en Colima. Se realizó un muestreo aleatorio simple con el que se recabaron dos muestras de agua de cada pozo en abril de 2013. Se tomaron muestras de 36 pozos, abarcando 10 de los 11 acuíferos de Colima (figura 1).

Preparación y análisis de las muestras

Las muestras de agua se recolectaron cumpliendo con la Norma Oficial Mexicana para uso y consumo humano NOM-014-SSA1-1993.¹⁵ Cada muestra se filtró con acetato de celulosa y jeringa SFCA 45 UM. Se usó el filtro Syring-driven de nylon; mismo que se usa para clarificar el agua.

Se preservaron con ácido nítrico ultra puro marca Sigma hasta llevarlas a un $\text{pH} \leq 2$ (ácido de un solo frasco). Luego, las muestras en solución se aforaron a 50 ml con agua desmineralizada y se analizaron con un espectrómetro de emisión óptica de plasma marca Varian, modelo 730-ES *Optical Emission Spectrometer*, axial, con detector, 1 KW de potencia, 90 psi de presión, 15 rpm y flujo del nebulizador de 0.75 L/min. Para la cuantificación del arsénico se usó una curva de cinco puntos.

Se utilizó el estándar "Cat. #ICP-200.7-6 EPA Method 200.7 estándar 6 solución en 2% HNO_3 + Tr HF" (trazas de ácido fluorhídrico) soluciones A, B, Lote# 1213232 (fecha caducidad enero 22, 2014) para determinar la concentración de As.¹⁶

El control de calidad usado fue con una muestra de valor conocido y un blanco reactivo que se acidifica para tener un pH igual que las muestras blanco de calibración que se prepara igual que los estándar y blanco de enjuague; mismo que igualmente se prepara agregando 5% de HNO_3 a agua desionizada (tipo I). Posteriormente, al control de calidad de la muestra de valor conocido

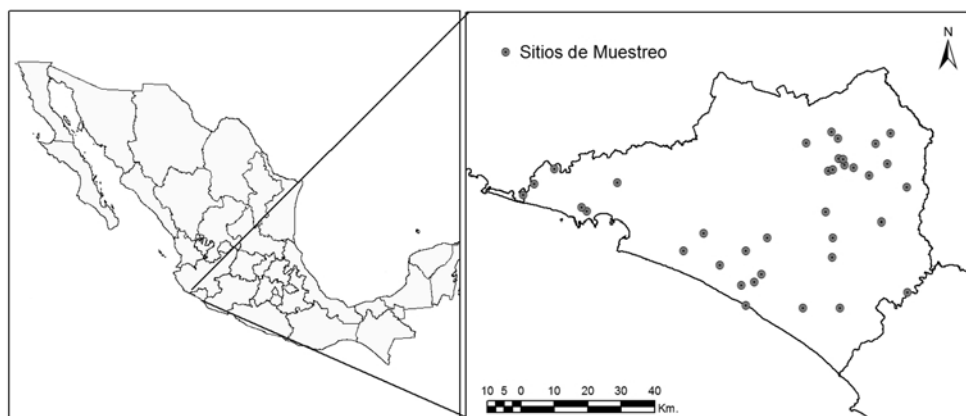


FIGURA 1. UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO EN NUEVE DE DIEZ MUNICIPIOS DEL TERRITORIO ESTATAL DE COLIMA, MÉXICO. PARTICULARMENTE LA ZONA CONURBADA COLIMA-VILLA DE ÁLVAREZ Y CIUDADES DE TEACOMÁN, ARMERÍA Y MANZANILLO. ABRIL 2013

y al blanco reactivo se les realizó la lectura después de un lote de 20 muestras y se sigue lo indicado en el método EPA 200.7 de 9.1 a 9.4. Los valores de precisión y exactitud logrados para As son Repetibilidad (R): 0.023, Reproducibilidad (r): 0.029, %R&r: 1.51 y %R&r≤10: Aceptado.

Interpolación espacial

Esta investigación utilizó las cifras del Censo Población y Vivienda 2010.¹⁷ Con los datos de población total, se calculó la población constante en Colima (se resta la población nacida en otra entidad y el porcentaje de emigración para cada una de las localidades dentro de cada acuífero en el estudio). La información poblacional se usó para desarrollar una capa de población para el SIG utilizando la plataforma ArcGIS. Con esta plataforma también se obtuvo una interpolación para cada punto muestreado de As. El análisis geoestadístico se realizó a través de un modelo de ponderación del inverso de la distancia (IDW, por sus siglas en inglés), dentro de la extensión *Geostatistical Analyst*, este sistema creó isolíneas de la concentración del arsénico¹⁸ con lo cual se hizo una interpolación para las zonas entre los puntos de muestreo.

La población se dividió en tres categorías: bebés (0-2 años), niños (2-17 años) y adultos (18 años en adelante). Para la presentación de los mapas de resultados se hicieron cortes que incluían las poblaciones con pozos de abastecimiento de agua potable. Después se superpuso la capa de población constante a las isolíneas de concentración del arsénico; éstas se unieron para arrojar el resultado final de dosis de exposición. Los mapas generados se limitaron a la delimitación geográfica de

los acuíferos analizados debido a que las predicciones estaban influenciadas por los puntos de muestra vecinos, por lo cual la interpolación geoespacial no se realizó en toda el área superficial del estado de Colima.

Adicionalmente, se consultaron límites máximos permisibles para el arsénico de fuentes oficiales en México, Estados Unidos y el mundo,¹⁹⁻²² que sirvieron para identificar cada uno (y cuantificar el porcentaje) de los pozos muestreados que resultaron fuera de los límites regulatorios permisibles.

Estimación del coeficiente de peligro, riesgo y población expuesta

Para estimar la ingesta diaria promedio de agua para cada grupo poblacional y la dosis de exposición, se tomaron resultados de estudios previos realizados en México.²³ Las suposiciones poblacionales consideradas para el cálculo de la ingesta diaria promedio fueron asumidas de manera conservadora para cada grupo de la siguiente manera: a) para los bebés es que su edad fuera menor a 2 años con un peso promedio de 10 kg por individuo y un consumo diario de 500 ml de jugos de frutas y una fórmula alimenticia que requiere 750 ml de agua hervida; b) para los niños es que tuvieran entre 2 y 17 años, con un peso promedio de 20 kg y un consumo diario de 750 ml de agua embotellada, 250 ml de agua hervida y 250 ml de bebidas envasadas; y c) para los adultos es que tuvieran 18 años o más, con 70 kg de peso promedio y un consumo de agua de 1500 ml de agua embotellada, 350 ml de agua hervida y 350 ml de bebidas envasadas.

La ingesta crónica diaria (CDI, por sus siglas en Inglés) se estimó utilizando métodos de la U.S. EPA

y datos de la interpolación de la concentración de metales y metaloides en el agua para beber para cada comunidad y con las tasas medias de consumo de agua potable para cada grupo poblacional descritas anteriormente.^{16,24,25}

$$CDI = \frac{C \times DI}{BW} \quad (1)$$

donde:

CDI es la ingesta diaria crónica (mg/kg/d).

C es la concentración del agua para beber contaminada (mg/L).

DI es la tasa media de consumo de agua potable (L/d).

BW es el peso corporal en (kg).

Con la finalidad de homogeneizar los mapas, distribuir uniformemente las concentraciones puntuales iniciales de los pozos de agua y realizar un análisis de sensibilidad de riesgo, se crearon cinco clases o zonas con base en sus rangos de concentración y los límites permisibles (0.01, 0.025, 0.05, 0.06 y 0.082). En el cálculo del CDI se usaron las concentraciones mínimas y máximas marcadas para cada clase.

El riesgo no carcinogénico HQ, se calculó utilizando el CDI y la dosis de referencia para el arsénico.^{20,26} Los valores de HQ>1 indican efectos adversos no carcinogénicos para la salud por la ingesta continua y prolongada de agua. Los datos de la dosis de referencia para el arsénico se obtuvieron de la base de datos de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos.^{20,27}

$$HQ = \frac{CDI}{RfD} \quad (2)$$

donde:

RfD es la dosis de referencia (mg/kg/d).

El riesgo para cáncer asociado con la ingestión se calculó utilizando la ingesta diaria crónica y la curva del factor del contaminante.^{20,28}

$$R = CDI \times SF \quad (3)$$

donde:

R es la probabilidad de desarrollar cáncer como resultado de la exposición a un contaminante (o riesgo carcinogénico).

CDI es la ingesta diaria crónica (mg/kg/d).

SF es la curva del factor del contaminante (mg/kg/d)

La U.S. EPA²⁰ ha señalado una dosis de referencia oral crónica (RfD) de 0.0003 mg As/kg/día para el

arsénico inorgánico, la cual fue usada para los cálculos geoestadísticos del estudio; el mismo valor de RfD estuvo basado en un NOAEL de 0.0008 mg As/kg/día para los efectos dérmicos y las posibles complicaciones.

Los datos de las concentraciones calculadas de cada área, obtenidas del sistema ArcGIS, se utilizaron para calcular los HQ y R para As en cada grupo poblacional de cada área geográfica, generando los mapas de resultados. Las categorías de concentración obedecen a las concentraciones límites respecto a la OMS y US EPA (0.01 mg/L), la NOM-127-SSA1-1994 (0.025 mg/L), el doble de dicha concentración de la norma oficial (0.05 mg/L) y el límite superior de la concentración máxima encontrada (0.082 mg/L). Con respecto a la estimación de la potencial población afectada por ingesta crónica de arsénico, se multiplica la población expuesta por el riesgo calculado.

Resultados

Se realizaron los análisis y se calculó la media de ambos resultados por pozo para calcular el dato final de concentración. De los 36 pozos analizados, 80.5% tenían concentraciones de arsénico superiores a lo permisible por la OMS y la US EPA de 0.01 mg/L; mientras que siete pozos (19.4%) superaron las concentraciones permisibles para arsénico fijados por la NOM-127-SSA1-1994, ≤ 0.025 mg/L. De esos siete pozos, uno presenta un grave problema de contaminación (0.083 mg/L), mientras que los otros seis oscilaron entre 0.026 y 0.063 mg/L.

La población que recibe agua de los pozos analizados se estimó en 409 800 habitantes. Los valores de HQ para el arsénico (cuadro I) son mayores a 1 para todos los niveles de concentraciones para el rango de edad de bebés (81 960 individuos); también se observan valores mayores a 1 para los niveles 3 a 5 de la población de entre 2 y 17 años (58 015 individuos) y para el nivel 5 para los adultos (43 857 individuos). Esto indica que todos estos grupos son susceptibles a desarrollar afectaciones a la salud no relacionadas con el cáncer; se estima que 183 832 individuos se encuentran en estos grupos poblacionales susceptibles. Las concentraciones de arsénico también presentan sus mayores niveles cerca de la Ciudad de Colima y Villa de Álvarez, las cuales concentran alrededor de la mitad de la población estatal. Los riesgos de cáncer (R) por ingesta de arsénico (cuadro II) se utilizaron para calcular el número probable de casos de cáncer en las comunidades analizadas, este número se estimó en 466 casos.

Los diferentes niveles de HQ así como de riesgo de cáncer (R) en la población se observan en la figura 2, la cual indica que la zona principal de riesgo se encuentra cerca de la Ciudad de Colima y Villa de Álvarez. El

Cuadro I
ESTIMACIONES DE COEFICIENTE DE PELIGRO (HQ) EN LA POBLACIÓN EXPUESTA AL ARSÉNICO (AS).
COLIMA, OCTUBRE 2013

Clase por rango de concentración	Color	Poblaciones	Habitantes	As en agua, mg/L		HQ		
				Media (STD)	[] máx	[0-2] (20%)	[2-17] (33%)	[≥18] (47%)
1		3	994	0.003	0.01	1.736	0.289	0.115
2		136	233 002	0.01	0.025	4.375	0.729	0.291
3		13	82 490	0.025	0.05	9.375	1.562	0.625
4		0	0	0.05	0.06	13.75	2.291	0.916
5		1	93 314	0.06	0.082	17.873	2.978	1.191
		409 800						

Cuadro II
ESTIMACIONES DE RIESGO EN LA POBLACIÓN EXPUESTA AL ARSÉNICO (AS).
COLIMA, OCTUBRE 2013

Clase por rango de concentración	Color	Poblaciones	Habitantes	As en agua, mg/L		Riesgo		
				Media (STD)	[] máx	[0-2] (20%)	[2-17] (33%)	[≥18] (47%)
1		3	994	0.003	0.01	7.81E-04	1.30E-04	5.20E-05
2		136	233 002	0.01	0.025	1.96E-03	3.28E-05	1.31E-04
3		13	82 490	0.025	0.05	4.21E-03	7.03E-04	2.81E-04
4		0	0	0.05	0.06	6.18E-03	1.03E-03	4.12E-04
5		1	93 314	0.06	0.082	8.04E-03	1.34E-03	5.36E-04
		409 800						

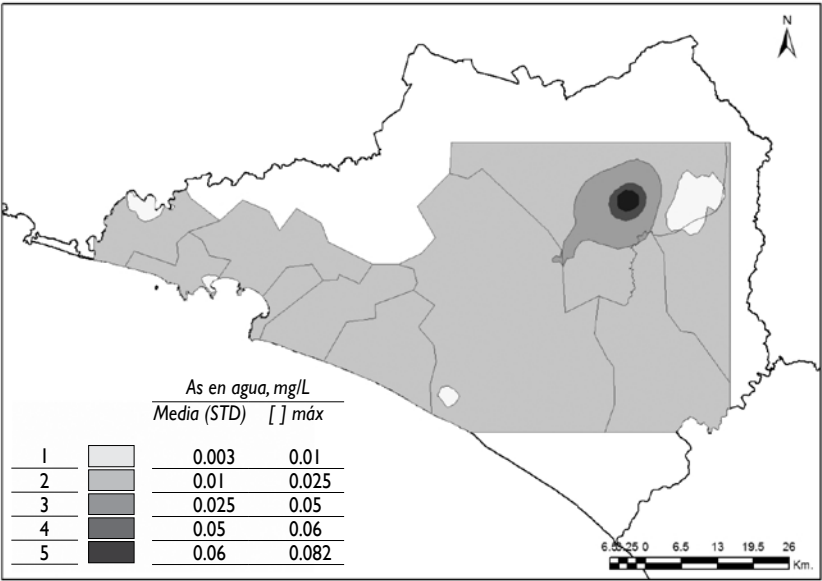


FIGURA 2. INTERPOLACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO POR ACUÍFERO Y DE NIVELES DE COEFICIENTE DE PELIGRO

valor promedio de HQ a nivel estatal fue de 2.41 para el arsénico. El factor de riesgo estatal de cáncer (R) por ingesta crónica de As fue de 1.089E-03.

Discusión

El arsénico podría ocasionar la mayoría de los problemas de salud asociados con la ingesta de agua de pozo contaminada con metales en Colima. Sin embargo, se requiere de mediciones más precisas, un sistema de registro de síntomas en los centros de salud del estado y estudios epidemiológicos a nivel local para poder estimar la incidencia de padecimientos o afectaciones relacionadas con la ingesta de arsénico proveniente de aguas subterráneas. Esto permitiría cuantificar el problema para poder asignar recursos para implementar políticas públicas y de infraestructura para proteger la salud de las poblaciones afectadas.

La población más vulnerable a la presencia de arsénico en el agua son los individuos menores de dos años, puesto que todos los niveles de concentraciones de As podrían ocasionarles afectaciones adversas no carcinogénicas a la salud que todavía no se han cuantificado, incluso tiene el HQ más alto para cualquier grupo poblacional en este estudio (17.87). Este fue el grupo de población más susceptible y numeroso en 2008 (81 960 individuos según el censo de 2010), por lo cual su protección deberá tener prioridad dentro de las políticas de salud pública que se implementen en el futuro para mitigar este problema.

Es poco probable que el aumento en las concentraciones de elementos como el arsénico en el área cercana a las ciudades de Colima y Villa de Álvarez sea por causas naturales, debido a que el diferencial de concentraciones entre esta población y otras localidades del estado es muy marcado. Por ello se recomienda que se investiguen causas antropomórficas de este problema como posibles descargas en el río Colima que podrían estar afectando las concentraciones de metales y metaloides en aguas subterráneas cercanas.

No obstante, el aumento en la profundidad promedio de los pozos en esta área en las últimas décadas, podría ser la causa principal del incremento de metales y metaloides disueltos en el agua subterránea debido a la oxidación que sufren al bajar los mantos freáticos y a posibles concentraciones más altas de los mismos en aguas subterráneas profundas.^{29,30-32} De comprobarse esta causa, podrían implementarse procesos de pretratamiento para disminuir la concentración de arsénico de aguas subterráneas para consumo humano.³³⁻³⁵ Para obtener la concentración de los demás pozos no analizados se usó el método de extrapolación geográfica de ponderación inverso de la distancia (IDW). La referencia

para usar esta ponderación es debido a que este método fue reportado por otros autores como el de menor error en la extrapolación para As en aguas subterráneas.³⁶

Conclusiones

Los porcentajes de pozos que incumplieron con los límites de As varían significativamente dependiendo de si se aplica la norma mexicana o las normas internacionales. La norma oficial mexicana (NOM-127-SSA1-1994) establece un máximo permisible de 0.025 mg/L, mientras que el límite permisible por la OMS y la USEPA es de 0.01 mg/L; por lo cual sería conveniente evaluar los impactos económicos y de salud, además de homologar este límite con el resto del mundo, medida que requeriría de un estudio a nivel nacional.

De haberse tomado como referencia el límite permitido para As por la OMS y la U.S. EPA (de 0.01 mg/L) en el agua potable, únicamente el nivel más bajo de As hubiera estado dentro del rango aceptable; los cuatro niveles restantes presentaron concentraciones por encima de ese parámetro internacional, incluso el nivel de concentración más alto presentó rangos ocho veces más altos que el parámetro marcado. Con respecto a los niveles de As analizados conforme a la NOM-127-SSA1-1994, se observaron concentraciones de arsénico fuera de norma en dos pozos ubicados en el centro de la ciudad de Colima, con alta densidad poblacional. Lo anterior originó que el factor de riesgo se incrementara en la determinación estatal.

Se estimó que 446 personas se encontraban potencialmente en riesgo de presentar algún tipo de cáncer por el consumo crónico de arsénico, sin embargo, esto no necesariamente indica que la enfermedad se presentará. Algunas personas que desarrollan la enfermedad puede que tengan pocos o ninguno de los factores de riesgo conocidos.

Agradecimientos

Al Programa de Mejoramiento del Profesorado (Promep).

Declaración de conflicto de intereses. Los autores declararon no tener conflicto de intereses.

Referencias

1. Cantor KP. Drinking water and cancer. *Cancer Causes Control* 1997;8(3):292-308. <http://doi.org/fgddcq>
2. Calderón RL. The epidemiology of chemical contaminants of drinking water. *Food Chem Toxicol* 2000;38(1 Suppl):S13-S20. <http://doi.org/bhchw8>

3. Varela J, López L, Montiel A. El arsénico y sus riesgos Ruta Crítica 2008;20:46 [consultado el 22 de noviembre de 2013]. Disponible en: <http://www.revistauniversidad.uson.mx/revistas/20-20articulo%2013.pdf>
4. Thomann RV. Physio-chemical and ecological modeling the fate of toxic substances in natural water systems. *Ecol Model* 1984;22:145-170. <http://doi.org/frj4vm>
5. Dogan M, Dogan AU, Celebi C, Baris YI. Geogenic arsenic and a survey of skin lesions in the Emet region of Kutahya, Turkey. *Indoor Built Environ* 2005;14(6):533-536. <http://doi.org/dv3grk>
6. Cui Y, Zhu Y, Zhai R, Huang Y, Chen D, Huang Y. Transfer of metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nanning, China. *Environ Int* 2004;30(6):785-791. <http://doi.org/bg3jcb>
7. Cui Y, Zhu Y, Zhai R, Huang Y, Qiu Y, Liang J. Exposure to metal mixtures and human health impacts in a contaminated area in Nanning, China. *Environ Int* 2005;31(6):784-790. <http://doi.org/bjvw7j>
8. Shan Y, Tysklind M, Hao F, Ouyang W, Chen S, Lin C. Identification of sources of heavy metals in agricultural soils using multivariate analysis and GIS. *J Soils Sediments* 2013; 13(4):720-729. <http://doi.org/f23q99>
9. Poggio L, Vrščaj B. A GIS-based human health risk assessment for urban green space planning, an example from Grugliasco (Italy). *Sci Total Environ* 2009; 407(23):5961-5970. <http://doi.org/fr85g2>
10. Liyuan C, Zhenxing W, Yunyan W, Zhihui Y, Haiying W, Xie W. Ingestion risks of metals in groundwater based on TIN model and dose-response assessment —A case study in the Xiangjiang watershed, central-south China. *Sci Total Environ* 2010;408(16):3118-3124. <http://doi.org/d585nv>
11. Comisión Nacional del Agua (Conagua). Estadísticas del agua en México. Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2011.
12. Mahlknecht J, López-Zavala MA. Reporte técnico final del proyecto Evaluación diagnóstica de la calidad y disponibilidad del agua superficial y subterránea en el Estado de Colima. Conacyt. Número: 164. México. Abril. [2008-37881].
13. O'Rourke MK, Van de Water PK, Jin S, Rogan SP, Weiss AD, Gordon SM, Moschandreas DJ, Lebowitz MD. Evaluations of primary metals from NHXAS Arizona: distributions and preliminary exposures. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1999;9(5):435-445. <http://doi.org/dq7j39>
14. Consejo Nacional de Población (Conapo). Colima: Indicadores demográficos, 2010-2030, 2015.
15. Secretaría de Salud (SSA). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. México: Diario Oficial de la Federación, 30 de noviembre de 1995.
16. US Environmental Protection Agency (USEPA). Guidelines for exposure assessment. Washington, DC: USEPA, 1992.
17. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Marco geoestadístico nacional. México: INEGI, 2010 [consultado en octubre de 2013]. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx
18. Hossain M, Piantanakulchai M. Groundwater arsenic contamination risk prediction using GIS and classification tree method. *Eng Geol* 2013;156:37-45. <http://doi.org/bqqsq>
19. Secretaría de Salud (SSA). Norma Oficial Mexicana NOM-014-SSA1-1993. Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados. México: Diario Oficial de la Federación, 12 de agosto de 1994.
20. US Environmental Protection Agency (USEPA). Integrated Risk Information System (IRIS). Washington DC: USEPA, 2007 [consultado el 3 de octubre de 2013]. Disponible en: www.epa.gov/iris
21. Organización Mundial de la Salud (OMS). Guías para la calidad del agua potable. Ginebra: OMS, 2006 [consultado el 25 de noviembre de 2013]. Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf
22. Organización Mundial de la Salud. Arsénico. Ginebra: OMS, 2012 [consultado el 24 de noviembre de 2013]. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/>
23. Hurtado-Jiménez R, Gardea-Torresdey J. Estimación de la exposición a fluoruros en Los Altos de Jalisco, México. *Salud Publica Mex* 2005;47(1):58-63. <http://doi.org/fq9p8j>
24. Chrostowski PC. Exposure assessment principles. En: Patrick DR, ed. Toxic air pollution handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994.
25. Phan K, Stianopkao S, Kim KW, Wong MH, Sao V, Hashim JH, et al. Health risk assessment of inorganic arsenic intake of Cambodia residents through groundwater drinking pathway. *Water Res* 2010;44(19):5777-5788. <http://doi.org/fhvvcc>
26. Nakaya S, Natsume H, Masuda H, Mitamura M, Biswas DK, Seddique AA. Effect of groundwater flow on forming arsenic contaminated groundwater in Sonargaon, Bangladesh. *J Hydrol* 2011;409(3):724-736. <http://doi.org/czb8t3>
27. Kavcar P, Sofuoglu A, Sofuoglu SC. A health risk assessment for exposure to trace metals via drinking water ingestion pathway. *Int J Hyg Environ Health* 2009;212(2):216-227. <http://doi.org/bgd35d>
28. US Department of Health and Human Services (HHS). Toxicological profile for lead. HHS, 2007 [consultado el 26 de noviembre de 2013]. Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp13.pdf>
29. Patrick DR. Risk assessment and risk management. En: Patrick DR (Ed). Toxic Air Pollution Handbook. New York: Van Nostrand Reinhold, 1994.
30. Rodriguez-Lado L, Sun G, Berg M, Zhang Q, Xue H, Zheng Q, Johnson C. Groundwater arsenic contamination throughout China. *Science* 2013;341(6148):866-868. <http://doi.org/nkx>
31. Fendorf S, Michael HA, Van Geen A. Spatial and temporal variations of groundwater arsenic in south and Southeast Asia. *Science* 2010;328(5982):1123-1127. <http://doi.org/bng4jz>
32. Huaming G, Chen L, Hai L, Wanty RB, Jun W, Yinzh Z. Pathways of coupled arsenic and iron cycling in high arsenic groundwater of the Hetao basin, Inner Mongolia, China: An iron isotope approach. *Geochim Cosmochim Acta* 2013; 112:130-145. <http://doi.org/bqsr>
33. Rahman MM, Bakker M, Patty CH, Hassan Z, Röling VWF, Ahmed KM, Van Breukelen BM. Reactive transport modeling of subsurface arsenic removal systems in rural Bangladesh. *Sci Total Environ* 2015; 537:277-293. <http://doi.org/bqss>
34. Flores OJ, Nava JL, Carreño G, Elorza E, Martínez F. Arsenic removal from groundwater by electrocoagulation in a pre-pilot-scale continuous filter press reactor. *Chem Eng Sci* 2013;97:1-6. <http://doi.org/bqst>
35. Lanhai L, de Dieu H, John M. Plant algae method for arsenic removal from arsenic contaminated groundwater. *Water Sci Technol* 2012;65(5):927-931. <http://doi.org/bqsv>
36. Pham Q, Giang KN, Achara U. Effectiveness of different spatial interpolators in estimating heavy metal contamination in shallow groundwater: a case study of arsenic contamination in Hanoi, Vietnam. *Environment and Natural Resources* 2011;9(1):31-37.