

# Una revisión de la presencia de arsénico en el agua subterránea en México

F.I. Arreguín Cortés, R. Chávez Guillén & P.R. Soto Navarro\*  
*Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Insurgentes Sur 2416, México DF 04340, MÉXICO; [felipe.arreguin@conagua.gob.mx](mailto:felipe.arreguin@conagua.gob.mx), [ruben.chavez@conagua.gob.mx](mailto:ruben.chavez@conagua.gob.mx), [pedro.soto@conagua.gob.mx](mailto:pedro.soto@conagua.gob.mx)*

P.L. Smedley  
*British Geological Survey, Keyworth, Nottingham NG12 5GG, UK; [pls@bgs.ac.uk](mailto:pls@bgs.ac.uk)*

\*Autor a contactar

## RESUMEN

Se han identificado tres principales ambientes hidrogeológicos en donde se ha detectado la presencia de arsénico en el agua subterránea: **acuíferos aluviales** (NW, N y Centro de México), **áreas de actividad minera** (N y Centro de México) y **aguas geotérmicas** (Centro de México). Se presentan a continuación las características generales de esos ambientes, así como también los casos más importantes que se han documentado. Asimismo se describen brevemente las estrategias gubernamentales para asegurar el abasto de agua potable de calidad aceptable.

## INTRODUCCIÓN

En México, el agua subterránea representa la única fuente permanentemente disponible para muchas zonas áridas y semiáridas, dado que más de la mitad del territorio del país se encuentra dominado por condiciones climáticas secas. En tanto que en las regiones húmedas el recurso ayuda a compensar la variación temporal de la precipitación. Los acuíferos de México contienen una considerable reserva de agua: muchas cuencas hidrológicas incluyen acuíferos regionales cuyas áreas van de algunos cientos a miles de kilómetros cuadrados con un espesor de varios miles de metros. En términos generales los acuíferos están compuestos, en los primeros cientos de metros de profundidad, de material clástico no consolidado de textura variable que sobreyace rocas consolidadas (ígneas o sedimentarias). Los acuíferos carbonatados con ambientes kársticos también son importantes, especialmente en la Península de Yucatán.

Se ha estimado que durante los últimos 40 años alrededor de 60,000 hectómetros cúbicos por año ( $\text{hm}^3/\text{a}$ ) de agua han sido minados de los acuíferos a nivel nacional. La mayor parte de la reserva de agua útil se encuentra o ha estado almacenada dentro de los primeros cien metros de profundidad en los acuíferos más permeables, siendo ésta la más

económicamente disponible y la que tiene mejor calidad. Se ha considerado también que existen grandes cantidades de agua almacenada hasta una profundidad de 400 metros. A pesar de que la reserva de agua subterránea es enorme, es importante señalar que ésta constituye en gran parte un recurso no renovable y que su uso presenta diferentes tipos de limitantes; por lo tanto, no debe ser considerada como una fuente inagotable. Actualmente, se está extrayendo de los acuíferos de México un volumen total de 28,000 hm<sup>3</sup>/a para los usos siguientes: aproximadamente 71% para agricultura, 20% para abastecimiento público-urbano (satisfaciendo en este caso las necesidades de 55 millones de habitantes), 6% para uso industrial y 3% para uso doméstico y abrevadero. Como resultado de una excesiva extracción de agua subterránea aproximadamente 100 acuíferos se encuentran sobreexplotados. Se ha estimado que la cantidad de agua minada (esto es, extraída a costa del almacenamiento del acuífero) se ha incrementado durante las últimas cuatro décadas alcanzando un ritmo actual de 5400 hm<sup>3</sup>/a. Durante las primeras décadas de la sobreexplotación (1960-1980) se generó un importante impacto ambiental que incluyó: desaparición de manantiales, lagos y humedales, reducción del flujo base de los ríos, pérdida de vegetación nativa y de ecosistemas, disminución del caudal de los pozos, incremento de los costos de bombeo, subsidencia, contaminación del agua subterránea e intrusión salina, entre otros. Para evitar más impactos ambientales, se requieren urgentemente estrategias de manejo enfocadas en la preservación del recurso. Dichas estrategias actualmente están siendo diseñadas por la autoridad federal del agua (i.e.: la Comisión Nacional del Agua o CONAGUA), e incluyen la determinación de la disponibilidad de agua para cada acuífero, el manejo de la demanda, el reúso y la recarga artificial.

La calidad del agua es otro asunto importante, pues está íntimamente relacionada con el tipo de ambiente hidrogeológico. Por ejemplo, en acuíferos de varios cientos de metros de espesor, especialmente en medios fracturados, la porosidad y la permeabilidad disminuyen con la profundidad debido a la carga litoestática de manera que la recarga de los acuíferos profundos es tan lenta que el agua subterránea se considera como "fósil". En este caso, las interacciones agua-roca a largo plazo resultan en un incremento de la salinidad del agua subterránea, no siendo recomendable esta última para la mayoría de los usos más comunes.

Como un primer intento de clasificación, la calidad del agua subterránea ha sido expresada como salinidad en términos de la concentración del total de sólidos disueltos (TSD) por la autoridad federal del agua. Así, CONAGUA (2004) ha encontrado que del total de acuíferos (653), 80% contienen agua de buena calidad con salinidades iguales o menores a 1000 mg L<sup>-1</sup> en términos de concentración TSD. Sin embargo, en algunas áreas del país, se están utilizando para fines potables, aguas subterráneas con salinidades por encima de este valor, luego de su desalación. Por otra parte, las autoridades mexicanas del agua y de salud han detectado contaminantes naturales tales como fluoruros, hierro, manganeso y arsénico en algunos acuíferos, especialmente en las cuencas áridas del norte y centro del país.

La presencia de altos niveles de arsénico en las aguas subterráneas para uso potable tiene importantes consecuencias para la salud humana. México ha reducido sus límites máximos permisibles para agua potable de acuerdo con las recomendaciones de la Organización

Mundial de la Salud. La normatividad Mexicana establece una reducción de  $5 \mu\text{g L}^{-1}$  por año, comenzando desde un valor de  $50 \mu\text{g L}^{-1}$  hasta alcanzar un límite permisible de  $25 \mu\text{g L}^{-1}$  durante el periodo 2000-2005 (Secretaría de Salud, 2000). La norma actual de  $25 \mu\text{g L}^{-1}$  está siendo revisada y se planea que sea reducida a  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  próximamente. Sin embargo, esto no es un asunto trivial ya que tiene implicaciones logísticas y económicas con un alto grado de complejidad. Aunque un estudio económico sobre las consecuencias que tendría reducir la norma a  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  no ha sido instrumentado por el gobierno federal, es claro que los gastos resultantes de dicha reducción tienen que ser asumidos por la sociedad mexicana en su totalidad. Antes de realizar cualquier intento a fin de definir un nuevo límite permisible de arsénico en agua potable, es necesario primero determinar la magnitud de los problemas por la presencia de arsénico en las aguas subterráneas de México.

La detección de la presencia de concentraciones de arsénico bastante mayores a  $25 \mu\text{g L}^{-1}$  en algunos acuíferos ha sido posible gracias a un importante número de estudios técnicos realizados principalmente por CONAGUA y algunas universidades. Estos estudios técnicos han ayudado a identificar tres ambientes hidrogeológicos donde se presentan altas concentraciones de arsénico en el agua subterránea: acuíferos aluviales del norte y centro de México, áreas mineras en distintas partes del país y aguas geotérmicas asociadas a rocas volcánicas relativamente jóvenes del centro de México (Smedley, 2003; Smedley & Kinniburgh, 2002). Los acuíferos aluviales son de particular interés ya que la mayoría de la población de México vive en sus porciones norte y centro-norte en donde un gran número de habitantes depende del agua subterránea como fuente de abastecimiento. Las aguas subterráneas también son utilizadas para fines agrícolas y la exposición por arsénico a través de la cadena alimenticia representa un riesgo potencial adicional a la salud humana. A diferencia de lo que ocurre en las áreas mineras, los problemas de arsénico en los acuíferos aluviales son difíciles de identificar o anticipar sin la realización de análisis de muestras de agua. Muchos de los acuíferos Cuaternarios de México se encuentran en cuencas cerradas continentales y muestran características hidrogeológicas similares a los acuíferos con alto contenido de arsénico de Argentina y del suroeste de EE.UU. (Robertson, 1989; Smedley, 2003; Smedley & Kinniburgh, 2002; Smedley *et al.*, 2002). Se ha encontrado arsénico en asociado con actividades mineras en algunas áreas montañosas y en cuencas aluviales en ciertas zonas del norte de México. También puede estar presente en aguas geotérmicas asociadas con rocas volcánicas relativamente jóvenes en el centro de México (e.g.: Los Azufres en el estado de Michoacán; y en el estado de Jalisco). A continuación se presenta un panorama general de la presencia de arsénico en las aguas subterráneas de México de acuerdo a los ambientes hidrogeológicos

previamente indicados. Las localidades más representativas se muestran en la Figura 1.

Figura 1. Localidades más documentadas que muestran la presencia de arsénico en las aguas subterráneas de México.



## PRESENCIA DE ARSÉNICO EN AMBIENTES ÁRIDOS OXIDANTES: PLANICIES ALUVIALES DEL NORTE Y CENTRO DE MÉXICO

Extensas áreas del norte y centro de México consisten de planicies separadas por cadenas montañosas alargadas y discontinuas, siendo las elevaciones típicas de 1000–1300 m sobre el nivel del mar. El clima es árido a semiárido con un promedio de precipitación pluvial anual de 400–800 mm. Estas planicies comúnmente incluyen depósitos aluviales de importantes espesores de edades del Cenozoico al Cuaternario. Los sedimentos Cenozoicos en estas cuencas típicamente consisten de clastos de grano grueso depositados en los frentes montañosos y de sedimentos finos bien clasificados, a menudo con evaporitas, en los centros de las cuencas. Los depósitos aluviales Cuaternarios tienen espesores de varios cientos de metros. Muchas de estas planicies aluviales son cuencas cerradas (Anderson *et al.*, 1988). Las cadenas montañosas limítrofes están compuestas de rocas ígneas y metamórficas Precámbricas, de rocas sedimentarias Paleozoicas y Mesozoicas, así como de rocas volcánicas del Cenozoico (Anderson *et al.*, 1988). Se sabe que muchas de estas planicies aluviales presentan problemas de arsénico en sus aguas subterráneas. Las áreas afectadas incluyen porciones de los estados de Coahuila y Durango (e.g.: Comarca Lagunera), así como los de Chihuahua, Sonora y San Luis Potosí (e.g.: Río Verde).

### 1.1 Comarca Lagunera, estados de Coahuila y Durango porción norte centro de México.

La Comarca Lagunera (acuífero Principal), localizada en los estados de Coahuila y Durango, es la región más estudiada y la primera en donde se reconocieron sus problemas por la presencia de arsénico en el agua subterránea. Los problemas de salud relacionados con el arsénico fueron por primera vez descritos en la región a principios de la década de 1960, consistiendo en melanosis, queratosis y cáncer de piel. No se han reportado estadísticas sobre tipos de cáncer de naturaleza interna ni de otros problemas de salud relacionados con el arsénico. Se ha encontrado que el agua subterránea en un gran número de pozos presenta concentraciones muy por encima del límite permisible para uso potable ( $25 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Así, CONAGUA & IMTA (1992) reportaron concentraciones en el rango  $3\text{--}443 \mu\text{g L}^{-1}$ . Por otra parte, Del Razo *et al.* (1990; 1993) encontraron concentraciones en el rango  $8\text{--}624 \mu\text{g L}^{-1}$  y reportaron que el 50% de las muestras contenían más de  $50 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $n=129$ ). Se han encontrado concentraciones más altas en las áreas de San Pedro, Tlahualilo y Francisco I. Madero. En este caso, el arsenato, As(V), fue la especie disuelta dominante en la mayoría de las muestras analizadas. Rosas *et al.* (1999) hallaron resultados similares, con concentraciones en el agua subterránea en el rango de  $7\text{--}740 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $n=73$ ), siendo el 50% superior a  $50 \mu\text{g L}^{-1}$  y con las concentraciones más altas en las mismas áreas. Un estudio de CONAGUA (2000), que incluyó el análisis de 60 muestras de aguas subterráneas, encontró concentraciones de arsénico de hasta  $865 \mu\text{g L}^{-1}$ , con el 55% de las muestras excediendo los  $50 \mu\text{g L}^{-1}$ . Los valores más altos reportados también se encontraron en el área de Tlahualilo en la porción norte de la cuenca. Las aguas superficiales de las presas que controlan las avenidas del Río Nazas presentan concentraciones más bajas, en el rango de  $7\text{--}20 \mu\text{g L}^{-1}$  (CONAGUA & IMTA, 1992). Estos valores están por encima de las concentraciones promedio encontradas en las aguas superficiales en otras partes del mundo, pero son significativamente menores a las de las

aguas subterráneas locales. Se desconoce la variación estacional de los niveles de arsénico de estas aguas superficiales.

Las aguas subterráneas en la cuenca son predominantemente del tipo Ca-SO<sub>4</sub> o Ca-Na-SO<sub>4</sub>. La salinidad es variable, con concentraciones del TSD en algunas áreas por encima de los 2000 mg L<sup>-1</sup>, lo que refleja los efectos de evapotranspiración y de la disolución de evaporitas. Se han encontrado valores más bajos del TSD (<1000 mg L<sup>-1</sup>) en un área bien definida subyaciendo la Ciudad de Torreón, Coahuila. Los valores de pH en las aguas subterráneas varían de ~6.3 y 8.9 (Del Razo *et al.*, 1990) con concentraciones de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el rango de 100-400 mg L<sup>-1</sup>.

El origen de la presencia del arsénico en aguas subterráneas no está bien comprendido, pero se ha sugerido a la disolución o desorción de los minerales que constituyen el acuífero (especialmente óxidos metálicos) bajo condiciones oxidantes como el principal mecanismo responsable, en combinación con las bajas velocidades del flujo subterráneo, aunado a la evaporación (Smedley, 2003). Se han detectado bajas concentraciones de arsénico en zonas de recarga en donde existe infiltración de las aguas del Río Nazas en las cercanías de la Ciudad de Torreón, Coahuila; en tanto que se han encontrado niveles más altos en áreas cercanas a las antiguas zonas de descarga (mismas que están desapareciendo debido a la sobreexplotación: CONAGUA, 1999; Lara, 2003). Este acuífero muestra muchas características similares a las aguas subterráneas oxidantes y de pH elevados identificadas en las planicies de la Pampa y el Chaco en Argentina y en el sur-oeste de EE.UU. (Robertson, 1989; Smedley & Kinniburgh, 2002; Smedley, 2003). Se requiere mayor investigación sobre la distribución de arsénico con la profundidad, condiciones redox y el análisis de los sedimentos que constituyen el acuífero a fin de determinar las fuentes minerales más probables, así como para definir las variaciones de las concentraciones de arsénico a lo largo de las líneas de flujo.

## 1.2 Estado de Chihuahua, norte de México

CONAGUA y el Organismo Operador de Ciudad Juárez realizaron un proyecto de exploración hidrogeológica en el área de la Mesilla para estudiar la posibilidad de abastecer a Ciudad Juárez, Chihuahua, de agua potable, analizando para ello la distribución del arsénico con la profundidad (CONAGUA & JMAS-JUAREZ, 2000). Los resultados mostraron concentraciones de arsénico en el agua subterránea extraída en el rango <5–44 µg L<sup>-1</sup> y en muestras obtenidas hasta una profundidad de 250 m en el rango de <5–650 µg L<sup>-1</sup>. Además se encontró que las aguas subterráneas tenían salinidades elevadas, algunas de las cuales con concentraciones del TSD de hasta 8700 mg L<sup>-1</sup>, predominando las aguas del tipo Na-Cl-SO<sub>4</sub>. Debido a la falta de multipiezómetros en el área de estudio, no fue posible realizar una confiable identificación de los sistemas de flujo subterráneos, de manera tal que su correlación con la distribución tridimensional del arsénico será materia de una investigación posterior.

Importantes niveles de arsénico también fueron detectados en las áreas de Meoqui-Delicias y Jiménez-Camargo en la porción sureste del estado de Chihuahua por CONAGUA (1997).

El acuífero principal está constituido por depósitos aluviales y lacustres del Cuaternario sobreyaciendo a una secuencia Cretácica de calizas y areniscas calcáreas, junto con horizontes de yesos, lutitas y calizas arcillosas. Esta secuencia plegada y fallada ha sido afectada por magmatismo y volcanismo Terciarios, mismos que también representan el origen de importantes yacimientos minerales. Las muestras colectadas de distintos pozos (n=139) muestran que las concentraciones de  $As_T$  que se encuentran en el rango  $<2-225 \mu\text{g L}^{-1}$  están asociadas a ambientes aluviales con aguas subterráneas de bajas temperaturas ( $T <30^\circ\text{C}$ ). En el área de Jiménez-Camargo, las aguas subterráneas evolucionan del tipo  $\text{Ca-HCO}_3$  al  $\text{Ca-SO}_4$ , mientras que en la zona de Meoqui-Delicias se ha detectado un enriquecimiento adicional de Na.

### 1.3 Estado de Sonora, noroeste de México

Wyatt *et al.* (1998) encontraron concentraciones de arsénico en el agua subterránea de 29 ciudades en el estado de Sonora en el rango de  $2-305 \mu\text{g L}^{-1}$ . El 8.9% de las muestras (n=173) excedieron los  $50 \mu\text{g L}^{-1}$ . Las concentraciones promedio más elevadas correspondieron a las áreas de Etchojoa, Magdalena y Caborca. Estos autores también hallaron que el arsénico se correlacionaba significativamente con la presencia de fluoruros. Durante un muestreo posterior de los pozos afectados, se encontraron concentraciones inferiores, pero no es claro si esto se trató de una variación temporal real o fue debido a problemas analíticos. Los datos analíticos de la región se encuentran documentados de manera dispersa y las asociaciones hidrogeoquímicas tampoco son claras.

### 1.4 Cuenca de Río Verde, centro de México

Planer-Friedrich *et al.* (2001) reportaron concentraciones de arsénico en el rango de  $<5-54 \mu\text{g L}^{-1}$  en el agua subterránea de los depósitos Cuaternarios aluviales y lacustres de la cuenca de Río Verde. Estas concentraciones son bajas comparadas con las de las aguas subterráneas de otras áreas anteriormente descritas, aunque se llegan a presentar concentraciones por encima del límite permisible actual para agua potable de  $25 \mu\text{g L}^{-1}$ . Las concentraciones más elevadas de arsénico disuelto parecen correlacionarse con proporciones crecientes de arsenito y se encuentran predominantemente en los depósitos lacustres. Estos depósitos por lo general son más finos que los aluviales y se ha sugerido que la movilización del arsénico está relacionada con condiciones más reductoras propias de los primeros (Planer-Friedrich *et al.*, 2001).

### 1.5 Valle del Guadiana, estado de Durango, porción centro-norte de México

Concentraciones de arsénico por encima del límite permisible han sido detectadas en el acuífero del Valle del Guadiana, mismo que abastece de agua potable a la Ciudad de Durango, Durango (CONAGUA, 2005). El acuífero principal está constituido por depósitos aluviales Cuaternarios de un espesor máximo de 200 m, que sobreyacen a una secuencia Terciaria de riolitas e ignimbritas afectada por una serie de fallas formando un patrón de horsts y grabens. Esta secuencia, que es parte de la Sierra Madre Occidental, también representa un importante acuífero fracturado con influencia geotérmica (manantiales calientes y pozos profundos que extraen aguas subterráneas termales). Las muestras colectadas de pozos agrícolas, industriales y municipales (n=40) muestran que las concentraciones bajas de  $As_T$  en el rango de  $5-90 \mu\text{g L}^{-1}$  están asociadas a ambientes aluviales con aguas subterráneas de baja temperatura ( $T <30^\circ\text{C}$ ) y del tipo  $\text{Ca-HCO}_3$ . Por

otra parte, niveles más altos de  $As_T$  en el rango de 140-240  $\mu g L^{-1}$ , se presentan en el acuífero ígneo caracterizado por aguas del tipo Na-HCO<sub>3</sub> con bajos contenidos de Ca y Mg, altas concentraciones de Na & SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, pH >8, y temperaturas en el rango de 35-58°C. También se encontró que la presencia de arsénico se correlaciona significativamente con la de los fluoruros.

## 2 PRESENCIA DE ARSÉNICO EN ÁREAS MINERAS

### 2.1 Valle de Zimapán, estado de Hidalgo

Los poblados del valle de Zimapán en la porción occidental del estado de Hidalgo también han experimentado problemas de salud relacionados con el arsénico. El agua subterránea constituye la única fuente de abastecimiento en la región y los acuíferos predominantes incluyen calizas Cretácicas, con algunos abastecimientos secundarios en conglomerados del Terciario y del Pleistoceno (Armienta *et al.*, 2001). Algunas norias someras extraen el agua de aluviones del Cuaternario. Las calizas Cretácicas se encuentran fuertemente mineralizadas e incluyen depósitos de sulfuros masivos ricos en arsénico (pirita, pirrotita, arsenopirita), así como minerales secundarios que contienen arsénico (adamita, mimetita, olivinita). El valle de Zimapán ha sido un distrito minero en donde se han explotado depósitos de plata, cinc y plomo desde el siglo XVII.

En 1993, la CONAGUA descubrió altas concentraciones de arsénico en algunos aprovechamientos de la región. El agua servida por el Organismo Operador Municipal de Zimapán (proveniente de la mezcla de distintas fuentes de aguas subterráneas) contenía unos 300  $\mu g L^{-1}$  de arsénico. Concentraciones de arsénico <14–1000  $\mu g L^{-1}$  en el agua subterránea fueron reportadas por Armienta *et al.* (2001). Los niveles más altos correspondieron a pozos profundos que explotaban el acuífero calcáreo mineralizado del Cretácico. Las concentraciones más elevadas se reportaron en los ambientes más reductores (Eh <200 mV) y también se observó una correlación positiva significativa entre el arsénico y la temperatura (r=0.83). Esto presumiblemente estuvo relacionado con la profundidad de los pozos, aunque no se descarta la posibilidad del ascenso de aguas profundas a través de fallas y fracturas. El origen de las altas concentraciones de arsénico en las aguas subterráneas no está claramente ligado con la formación de depósitos minerales, siendo la oxidación de los sulfuros quizá un componente importante en el proceso de movilización. Sin embargo, la asociación observada de importantes niveles de arsénico con condiciones más reductoras (Armienta *et al.*, 2001) sugiere que la reacción de minerales secundarios que contienen arsénico, incluyendo los óxidos de hierro (disolución y desorción reductoras) pueda constituirse en un factor importante. La presencia de contenidos de arsénico de hasta 437  $\mu g L^{-1}$  en algunas norias ha sido relacionada a la contaminación por jales desde la superficie (Armienta *et al.*, 1997).

### 2.2 Estado de Baja California Sur

En las aguas subterráneas de las zonas de Carrizal y Los Planes, cercanas a los distritos mineros auríferos de San Antonio–El Triunfo, situados a 45 km al sureste de La Paz, Baja California Sur, se ha detectado la presencia de altas concentraciones de arsénico. El area ha sido explotada desde finales del siglo XVIII (Carrillo and Drever,

1998a; Carrillo and Drever, 1998b). Los depósitos de mena contienen arsenopirita y minerales secundarios que contienen arsénico, mismo que se presume sean las fuentes del origen de la contaminación por arsénico. Se ha encontrado que los jales mineros presentan concentraciones de arsénico del 0.03–30% (Carrillo and Drever, 1998b). Las concentraciones más altas de arsénico en el agua subterránea (hasta  $410 \mu\text{g L}^{-1}$ ) se observaron cerca de las actividades mineras (Carrillo-Chavez *et al.*, 2000). Las concentraciones más bajas fueron del orden de los  $10 \mu\text{g L}^{-1}$ . Las concentraciones de arsénico disuelto disminuyeron a partir de las fuentes mineralizadas, probablemente como resultado de la adsorción a los óxidos de hierro (Carrillo and Drever, 1998a). Las aguas subterráneas cercanas al área mineralizada también mostraron altas concentraciones de TSD, sulfatos y bicarbonatos resultado de la oxidación de los sulfuros y reacciones químicas asociadas. En las aguas subterráneas más afectadas, se notaron variaciones estacionales como respuesta a las lluvias variables. Actualmente, el poblado de San Antonio se abastece de agua potable proveniente de una planta de ósmosis inversa (Carrillo-Chavez *et al.*, 2000).

### 2.3 Estado de San Luis Potosí

Aunque no del todo bien documentadas, existe evidencia de la presencia de altas concentraciones de arsénico en las aguas subterráneas en el estado de San Luis Potosí, como resultado de las actividades mineras. Los depósitos de mena se encuentran asociados con sulfuros, incluyendo la arsenopirita. Se han reportado concentraciones de arsénico de hasta  $22 \text{mg L}^{-1}$  en las aguas subterráneas (en este caso en una noria), pero esto es atípico y solo ocurre en las proximidades de una zona de minas. Además, se han realizado investigaciones sobre los impactos ambientales de las emisiones a la atmósfera de un complejo en la ciudad de San Luis Potosí, constituido por una fundidora de cobre y una planta de acabado de cinc, en relación a los niveles de arsénico. Díaz-Barriga *et al.* (1993) encontraron concentraciones de arsénico en aumento en el aire, suelo y polvo en las proximidades de la fundidora en comparación con los sitios de control localizados a 25 km. Los suelos en la Colonia Morales presentaron niveles de arsénico de  $117\text{--}1400 \text{mg kg}^{-1}$ . Las concentraciones de cadmio fueron también relativamente altas. Los niveles de arsénico en el agua potable fueron bajas en los sitios de control ( $<0.2\text{--}13 \mu\text{g L}^{-1}$ ), en tanto que se reportaron concentraciones de hasta  $21 \mu\text{g L}^{-1}$  en las proximidades de la fundidora. Estas concentraciones no son comúnmente altas comparadas con otras aguas afectadas por arsénico en México.

### 2.4 Estado de Guanajuato

El distrito minero de Guanajuato localizado en el centro del país contiene ricas reservas de oro y plata de origen epitermal y ha sido explotado por más de 400 años. La geología del área está constituida por rocas volcánicas y sedimentarias Cretácicas con intrusiones Terciarias y rocas volcánicas más recientes. La zona mineralizada contiene algo de pirita (1%) (Carrillo-Chávez *et al.*, 2003). Al parecer el área carece de problemas ambientales. Los jales mineros presentan concentraciones de arsénico de unos  $20 \text{mg kg}^{-1}$ , lo cual es similar a los niveles encontrados en otras partes del mundo para sedimentos promedio de grano fino. Los correspondientes niveles de arsénico disuelto en el agua subterránea fueron también bajos ( $2\text{--}10 \mu\text{g L}^{-1}$ ).



### 3 AGUAS GEOTÉRMICAS

Se han detectado altas concentraciones de arsénico en zonas geotérmicas, principalmente en aquellas asociadas a la Franja Volcánica Trans-Mexicana. Los casos bien documentados se presentan en dos campos geotérmicos: Los Azufres, Michoacán (Birkle and Merkel, 2000) y Los Humeros, Puebla (González-Partida *et al.*, 2001), en donde se detectaron concentraciones de arsénico de hasta 800 y 736  $\mu\text{g L}^{-1}$ , respectivamente, en pozos geotérmicos. En ambos casos, las aguas geotérmicas están afectando la calidad de las aguas de más baja temperatura que podrían representar una fuente de abastecimiento para las poblaciones cercanas.

A fin de proteger los pozos de agua potable existentes, se requieren más estudios precisos para comprender las interacciones entre las aguas geotérmicas y las aguas subterráneas de menor temperatura.

### 4 ALGUNAS ACCIONES PARA MITIGAR EL IMPACTO EN LA SALUD HUMANA DE LAS ALTAS CONCENTRACIONES DE ARSÉNICO EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Con base en los estudios realizados y en los que se tienen programados o en proceso, sobre la ocurrencia y comportamiento del arsénico en el agua subterránea de ambientes hidrogeológicos comunes en México y con el fin de prevenir o atenuar riesgos o daños a la salud pública, se han implantado varias medidas para reducir la concentración de ese elemento en el agua suministrada, principalmente, para consumo humano y para prácticas agrícolas que pudieran generar productos que lo contengan en concentraciones nocivas. Entre las principales acciones se cuentan:

a) La sustitución de las fuentes con contenido de arsénico superior a la respectiva norma de calidad, por otras aptas para el consumo humano, técnica y económicamente accesibles. En muchas zonas rurales de la porción árida de México, esta acción no es viable por limitaciones financieras o por inexistencia de fuentes alternativas.

b) La combinación de las fuentes ricas en arsénico con otras de mejor calidad, para obtener una mezcla de calidad aceptable para el consumo humano. Esta acción es aplicada, principalmente, en el caso de ciudades mayores que reciben agua de varias fuentes de diferente calidad.

c) La relocalización o modificación de las características constructivas de pozos, para captar estratos acuíferos con aceptable contenido de arsénico.

d) A falta de las opciones anteriores, el tratamiento del agua para reducir la concentración de arsénico y otros elementos nocivos para la salud. Los métodos de tratamiento varían según la magnitud del volumen de agua a tratar, desde las grandes plantas de tratamiento en los casos de las grandes ciudades hasta las plantas portátiles en las pequeñas poblaciones del medio rural.

e) La recopilación y generación de datos estadísticos sobre los probables efectos del alto contenido de arsénico en el agua subterránea sobre la salud humana, discriminándolos en lo posible de los efectos causados por otras vías de exposición.

## 5 CONCLUSIONES

Se requiere de una completa comprensión de la presencia de arsénico en las aguas subterráneas de México. Es obvio que los problemas por la presencia de arsénico tanto en zonas mineras como en áreas geotérmicas son mucho más fáciles de detectar que en los acuíferos aluviales. En este caso, el análisis de las muestra de agua colectadas de pozos representa un método seguro para identificar o anticipar la presencia de arsénico en el agua subterránea. Sin embargo, se requiere de la definición de la distribución espacial del arsénico, de la identificación de sus fuentes y de la completa evaluación del ambiente hidrogeoquímico, a fin de diseñar las estrategias necesarias para el manejo óptimo de los acuíferos y mitigar los riesgos a la salud humana. Así, es necesario definir la distribución del arsénico con la profundidad y relacionarlo con la correspondiente distribución espacial de parámetros clave tales como pH, Eh, temperatura, TSD, oxígeno disuelto, iones principales, Fe, Mn, y F. En este sentido, se realizaron estudios de esta naturaleza en el área de la Mesilla, Chihuahua por CONAGUA & JMAS-JUAREZ (2000). Sin embargo, se requieren estudios completos para identificar las fuentes de arsénico y sus reacciones de adsorción-desorción, a través del estudio de los sedimentos (*i.e.*: composición de los minerales arcillosos, contenidos de óxidos de Fe, Mn y Al, así como niveles de carbonatos y carbono orgánico). Tales estudios son necesarios principalmente en los acuíferos aluviales como es el caso de la Comarca Lagunera, Coahuila y Durango.

En el caso mexicano, diversas acciones se están emprendiendo para suministrar agua apta para el consumo humano; pero sin duda, en algunos casos, una mayor comprensión de la distribución espacial y comportamiento del elemento, contribuirán a definir otras acciones más efectivas y menos onerosas.

## 6 REFERENCIAS

- Anderson, T.W., Welder, G.E., Lesser, G. & Trujillo, A. 1988. Region 7, Central alluvial basins. In *The Geology of North America, Hydrogeology*. W. Back, J.S. Rosenshein & P.R. Seaber, (eds). O-2. The Geological Society of America.
- Armienta, M.A., Rodríguez, R., Aguayo, A., Ceniceros, N., Villaseñor, G. & Cruz O. 1997. Arsenic contamination of groundwater at Zimapan, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 5: 39-46.
- Armienta, M.A., Villaseñor, G., Rodríguez, R., Ongley, L.K. & Mango, H. 2001. The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapán Valley, Mexico. *Environmental Geology*, 40: 571-581.
- Birkle, P. & Merkel, B. 2000. Environmental impact by spill of geothermal fluids at the geothermal field Los Azufres, Michoacán, Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 124:371-410.
- Carrillo-Chávez, A., Morton-Bermea, O., González-Partida, E., Rivas-Solórzano, H., Oesler, G., García-Meza, V., Hernández, E., Morales, P. & Cienfuegos, E. 2003. Environmental geochemistry of the Guanajuato Mining District, Mexico. *Ore Geology Reviews*, 23: 277-297.
- Carrillo, A. & Drever, J.I. 1998a. Adsorption of arsenic by natural aquifer material in the San Antonio El Triunfo mining area, Baja California, Mexico. *Environmental Geology*, 35: 251-257.
- Carrillo, A. & Drever, J.I. 1998b. Environmental assessment of the potential for arsenic leaching into groundwater from mine wastes in Baja California Sur, Mexico. *Geofísica Internacional*, 37: 35-39.
- Carrillo-Chávez, A., Drever, J.I. & Martínez, M. 2000. Arsenic content and groundwater geochemistry of the San Antonio El Triunfo, Carrizal and Los Planes aquifers in southernmost Baja California, Mexico. *Environmental Geology*, 39: 1295-1303.

- CONAGUA, 1997. *Estudio hidrogeológico, hidrogeoquímico y de la incidencia de arsénico, flúor y hierro en las zonas acuíferas de Delicias-Meoqui y Jiménez-Camargo en el Estado de Chihuahua*. (Hydrogeological and hidrogeochemical study on the presence of arsenic, fluoride and iron in the Delicias-Meoqui y Jiménez-Camargo aquifers, Chihuahua State). Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. 1999. *Estudio de la simulación hidrodinámica de los acuíferos de la Comarca Lagunera, Coahuila y Durango y de la Cuenca Alta del Río Aguanaval, Zac. Tomo 1: Acuífero de la Comarca Lagunera, Coahuila y Durango*. (Volume 1: Study on the Hydrodynamic Simulation of Comarca Lagunera Aquifer, Coahuila and Durango States). Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. 2000. *Estudio de la contaminación difusa del acuífero de la Comarca Lagunera, Coahuila*. (Study on diffusive contamination at the Comarca Lagunera Aquifer, Coahuila State). Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. 2004. *Mapa nacional de calidad del agua subterránea en términos de salinidad*. (National map on groundwater salinity). Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. 2005. *Estudio hidrogeoquímico del acuífero del Valle del Guadiana, Durango*. (Hydrogeochemical study of the Valle del Guadiana Aquifer, Durango State). Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA & IMTA. 1992. *Estudio hidroquímico y isotópico del acuífero granular de la Comarca Lagunera* (Hydrochemical and Isotopic study for the Comarca Lagunera Aquifer). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- CONAGUA & JMAS-JUAREZ. 2000. *Prospección hidrogeológica e hidrogeoquímica en el bolsón de la Mesilla, Chihuahua, Zona de Conejos-Médanos* (Hydrogeological and Hydrogeochemical Exploration at the Mesilla Bolson, Conejos-Medanos Zone). Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Juárez.
- Del Razo, L. M., Arellano, M. A. & Cebrián, M. E. 1990. The oxidation states of arsenic in well water from a chronic arsenicism area of northern Mexico. *Environmental Pollution*, 64: 143-153.
- Del Razo, L. M., Corona, J. C., García-Vargas, G., Albores, A., & Cebrián, M. E. 1993. Fluoride levels in well-water from a chronic arsenicism area of northern Mexico. *Environmental Pollution*, 80: 91-94.
- Díaz-Barriga, F., Santos, M. A., Mejía, J. D., Batres, L., Yáñez, L., Carrizales, L., Vera, E., Del Razo, L. M. & Cebrián, M. E. 1993. Arsenic and cadmium exposure in children living near a smelter complex in San Luis Potosi, Mexico. *Environmental Research*, 62: 242-250.
- González-Partida, E., Hinojosa, T.E. & Verma, M.P. 2001. Interacción agua geotérmica-manantiales en el campo geo-térmico de Los Humeros, Puebla, México. (Geothermal water-spring water interaction at Los Humeros geothermal field, Puebla, Mexico). *Ingeniería Hidráulica en México*, XVI: 185-194.
- Lara, F. 2003. Feasibility study for artificial aquifer recharge at the Comerca Lagunera Aquifer, Coahuila, Mexico. *Proc. of the Eleventh Biennial Symposium on Groundwater Recharge, Tempe, Arizona, 5-7 June*. National Research Council. 1999. *Arsenic in Drinking Water*. National Academy Press, Washington, DC.
- Planer-Friederich, B., Armienta, M.A. & Merkel, B.J. 2001. Origin of arsenic in the groundwater of the Rio Verde Basin, Mexico. *Environmental Geology*, 40: 1290-1298.
- Robertson, F.N. 1989. Arsenic in groundwater under oxidizing conditions, south-west United States. *Environmental Geochemistry and Health*, 11: 171-185.
- Rosas, I., Belmont, R., Armienta, M.A. & Baez, A. 1999. Arsenic concentrations in water, soil, milk and forage in Comarca Lagunera, Mexico. *Water Air and Soil Pollution*, 112: 133-149.
- Secretaría de Salud (Ministry of Health). 2000. *Modificación a la 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*. (Modification to Official Standard NOM-127-SSA1-1994, Environmental health. Water for human use and consumption. Water quality limits and treatments for water potabilization). Diario Oficial de la Federación (Official Journal of Mexico). November 22.
- Smedley, P.L. 2003. *Arsenic occurrence in Mexican groundwater: towards a better understanding and mitigation*. Report OMM/PROMA No. 17 for the World Meteorological Organisation & CONAGUA.
- Smedley, P.L. & Kinniburgh, D.G. 2002. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17: 517-568.
- Smedley, P.L., Nicolli, H.B., MacDonald, D.M.J., Barros, A.J. & Tullio, J.O. 2002. Hydrogeochemistry of arsenic and other inorganic constituents in groundwaters from La Pampa, Argentina. *Applied Geochemistry*, 17: 259-284.
- Wyatt, C.J., Fimbres, C., Romo, L., Mendez, R.O. & Grijalva, M. 1998. Incidence of heavy metal contamination in water supplies in Northern Mexico. *Environmental Research*, 76: 114-119.