

# Arsénico en el valle de Zimapán (México). Problemática ambiental (\*)



M. A. ARMIENTA  
R. RODRÍGUEZ

*Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México.*

## SUMARIO

*En el valle de Zimapán (Hidalgo), zona semiárida, se han detectado concentraciones de arsénico en el agua subterránea y en suelos superiores a la normativa internacional. Las fuentes generadoras del contaminante son naturales y antropogénicas. El origen geológico se asocia a minerales de arsénico en áreas de skarn provocadas por intrusivos ígneos en rocas calizas. Los humos de las fundidoras que funcionaron en el área de Zimapán acarrearon arsénico y contaminaron pozos someros. Los residuos mineros, jales, también actúan como fuentes antropogénicas. La definición de las fuentes y mecanismos de migración permiten proponer esquemas de remediación.*

**Palabras clave:** Medio ambiente, contaminación acuífera, arsénico.

## ANTECEDENTES

La presencia de compuestos de arsénico en el valle de Zimapán, en el edo. de Hidalgo, se hizo evidente en el año de 1992, al realizar determinaciones analíticas de muestras de agua potable, en una campaña emprendida en la zona para conocer el avance del cólera en el país. Anterior a esta fecha, no se cuenta con datos de la presencia de este elemento en el agua subterránea de la región, ya que su determinación no se realiza de manera rutinaria en la mayoría de los laboratorios que se ocupan de aspectos relacionados con la calidad del agua (entre las principales razones se puede citar que el procedimiento analítico no es simple).

(\*) Este artículo es el resumen del trabajo presentado a la Fundación MAPFRE como resultado final de la investigación desarrollada durante el año 1994, a raíz de la beca de Ayuda a la Investigación concedida en su Convocatoria 1994.

Si bien se detectó su presencia en el agua abastecida a la población y en algunos de los pozos urbanos, los resultados de los diferentes muestreos realizados por las diversas instancias oficiales que intervienen en esta acción no se presentaron en documentos donde se postule su origen y sus posibles niveles de afectación ambiental. Al conocerse los datos de los muestreos se produjo intranquilidad en los habitantes de la zona, ya que se cuenta con antecedentes nacionales sobre la toxicidad y el grado de afectación provocada por la ingesta de agua con altos contenidos de As, en particular en la comarca Lagunera, en los estados de Durango y Coahuila, donde se dieron diferentes afectaciones a la salud, incluso casos mortales (Espinoza, 1963; Sánchez de la Fuente, 1979; Albores *et al.*, 1979; Cebrián *et al.*, 1983).

La riqueza minera de Zimapán generó importantes estudios geológicos en la periferia de la actual mancha urbana. Se cuenta con descripciones geológicas del área desde el siglo XVIII, las cuales excluyen el área urbana por no localizarse en ésta vetas susceptibles de explotarse. Los estudios mineros cubren preferencialmente el norte, noroeste y oeste del valle. El proyecto hidroeléctrico de Zimapán se soportó por estudios geológicos de detalle en la región comprometida por la presa, la cual se encuentra al occidente de la zona urbana. La ciudad de Zimapán representa un enorme vacío de información geológica. Igual situación ocurre con los estudios de tipo hidrogeológico. La información estratigráfica y de diseño de los pozos profundos del valle se ha perdido. En ciudades pequeñas como ésta no existe una política clara en cuanto al manejo y resguardo de información geológica, hidrogeológica o hidroquímica; los datos sobre la evolución de la calidad del agua se encuentran diseminados en diferentes instituciones (CNA y Sector Salud a niveles municipal, estatal y federal, Consejo de Recursos Minerales, compañías mineras).

## CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y ASPECTOS TÓXICOS DEL ARSÉNICO

El arsénico es el elemento número 33 de la tabla periódica. Este elemento está ampliamente distribuido en la naturaleza en minerales tales como la arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), realgar ( $\text{As}_2\text{S}_2$ ), orpimento ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), arsenolita ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ), mimetita  $\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{AsO}_4)_3$ , cobaltita ( $\text{CoAsS}$ ). Los principales países produc-

*La riqueza minera de Zimapán generó importantes estudios geológicos en la periferia de la actual mancha urbana. Se cuenta con descripciones geológicas del área desde el siglo XVIII, las cuales excluyen el área urbana por no localizarse en ésta vetas susceptibles de explotarse.*

tores de arsénico en el mundo son Suecia, México, Francia, Estados Unidos, Rusia y Namibia.

El arsénico se encuentra con grados de oxidación 3-, 3+ y 5+ en la mayoría de sus compuestos. El trióxido de arsénico ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ), en el cual el arsénico se presenta con grado de oxidación 3+, existe en diversas formas, como la arsenolita, claudetita y amorfo. Este compuesto se produce también por el proceso de tostado de diversas menas. El arsénico se encuentra con grado de oxidación 5+ en compuestos tales como pentóxido de arsénico ( $\text{As}_2\text{O}_5$ ), pentasulfuro de arsénico ( $\text{As}_2\text{S}_5$ ) y arsenatos (Leonard, 1991).

En las aguas naturales, las especies importantes del arsénico son  $\text{As}^0$ ,  $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HAsO}_4^{2-}$ , con estados de oxidación 0, III, V y V, respectivamente. La presencia de arsénico en el agua depende principalmente de la disponibilidad del arsénico en los materiales geológicos en contacto con el agua o de la existencia de fuentes de contaminación (Cherry *et al.*, 1979).

Las sales de arsénico se han utilizado ampliamente en la preparación de insecticidas, principalmente como arsenato de plomo. Estas sales se

han aplicado también como herbicidas, fungicidas, rodenticidas e insecticidas. El arsénico también se utiliza en la industria del vidrio, en la electrónica, industria textil, curtiduría, en la manufactura de cosméticos y en la industria cerámica. Los compuestos de arsénico se han utilizado con fines curativos desde hace dos milenios; los usos más conocidos son en el tratamiento de dermatosis, sífilis y como antiparasitario (Carson *et al.*, 1986).

Las principales fuentes de arsénico en la atmósfera son: fundición de metales, combustión de carbón, pesticidas y emanaciones volcánicas. El arsénico es móvil en el medio ambiente, y puede circular varias veces por la atmósfera, agua y suelo hasta llegar a los sedimentos. La Unión Europea recomienda que los niveles de arsénico en el suelo no excedan las 20 ppm (Leonard, 1991). En el agua de río, las concentraciones normales de arsénico se encuentran entre 10 y 50  $\mu\text{g/l}$  de arsénico, aunque en algunos lugares llegan a alcanzar 1.000  $\mu\text{g/l}$ . Los desechos industriales, las actividades mineras y el uso de compuestos a base de arsénico en la agricultura pueden aportar cantidades importantes de arsénico al agua.

## Toxicología

El arsénico y sus compuestos pueden introducirse al organismo por las siguientes vías:

- Inhalación, con una eficiencia de absorción del 50 por 100.
- Ingestión con una eficiencia de absorción por el sistema gastrointestinal del 80 por 100.
- A través de la piel, aunque no se tienen datos de la eficiencia de absorción por esta vía.

El arsénico, una vez absorbido, se distribuye a través de la sangre por todo el cuerpo y pasa a muchos tejidos, principalmente al hígado, riñones, pulmones, bazo y piel (Galvao y Corey, 1987; Carson *et al.*, 1986).

La intoxicación aguda debida al arsénico se presenta por una gran sobredosis, ya sea accidental, suicida u homicida. Los principales efectos se observan en el sistema gastrointestinal. Éstos incluyen constricción de la garganta, seguida por dificultad para tragar, vómitos, diarrea, dolores abdominales, cefalea, crisis convulsivas y pérdida del conocimiento. Mayores dosis producen hipotensión severa, convulsiones, coma y la muerte, a menudo por fallo cardíaco. En la ma-

yoría de los casos, los efectos tóxicos del arsénico se observan después de exposiciones crónicas a dosis bajas, ya sean ambientales u ocupacionales.

Las lesiones en la piel son los efectos clásicos de las intoxicaciones crónicas. Estas lesiones se ubican principalmente en las palmas de las manos y en las plantas de los pies, y están constituidas por hiperqueratosis, ulceraciones simétricas, hipopigmentación, hiperpigmentación y prurito. El arsenicismo también produce una línea blanca en las uñas. El arsénico, además, ocasiona conjuntivitis, que puede terminar en necrosis y ulceración de la córnea. La irritación del aparato respiratorio puede producir rino-faringotraqueobronquitis crónica y perforación del tabique nasal.

El arsenicismo crónico es causa también de neuritis periférica, que afecta principalmente a las extremidades inferiores. Se ha observado también anemia moderada y leucopenia en personas con lesiones en la piel debidas al arsénico. Otras alteraciones a la salud son: desviaciones del electrocardiograma normal y trastornos relacionados con la circulación periférica, como la gangrena de extremidades o enfermedad de *pies negros*.

Se ha demostrado la asociación entre el arsenicismo crónico y el cáncer de piel y pulmón. Aunque el papel del arsénico en el desarrollo del cáncer en otros órganos, tales como el hígado y los nódulos linfáticos, está todavía en estudio, hay muchas posibilidades de que lo produzca. La carcinogenicidad y toxicidad del arsénico es resultado principalmente de la exposición a arsénico trivalente más que a arsénico pentavalente o a compuestos orgánicos de arsénico (Bahmra y Costa, 1992).

El primer valor límite de arsénico en el agua potable fue de 108  $\mu\text{g/l}$ , el cual fue establecido en 1903 por la Royal Commission of London en Gran Bretaña. Quince años antes, en 1888, Sir Jonathan Hutchinson identificó al arsénico como un cancerígeno. La forma activa del arsénico es el metaarsenito trivalente. Éste acila los grupos cisteína en las proteínas, pero no reacciona electrofílicamente con los ácidos nucleicos. El arsénico también activa a los virus Herpes simplex y Herpes zoster.

El arsenicismo crónico tiene un período largo durante el cual las afectaciones son reversibles y desaparecen si cesa la ingestión de arsénico. Se ha estimado en tres años la latencia del arsenicismo y en veinticuatro la del cáncer arsenical. A partir de diver-



*Los protocolos de investigación para determinación del arsénico en suelos, jales y agua están fuertemente soportados por los resultados analíticos y de un adecuado protocolo de monitoreo.*

sos estudios epidemiológicos se ha llegado a la conclusión de que se requiere la ingestión de más de 400  $\mu\text{g}$  de arsénico al día para que se produzcan enfermedades debidas al mismo (Stöhrer, 1991). Esto equivaldría a ingerir dos litros de agua con 0,2 mg/l de arsénico al día, sin considerar ninguna otra vía de entrada del contaminante al organismo.

Con base en la información disponible sobre la toxicología del arsénico, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y la Organización Mundial de la Salud han

establecido un límite máximo permisible de 0,050 mg/l de As en el agua potable, que es el mismo que se ha adoptado en México, considerando sus efectos cancerígenos (DOF, 13 de diciembre de 1989).

## **MARCO GEOLÓGICO**

El valle de Zimapán se encuentra localizado en las estribaciones de la sierra Madre oriental. El valle está limitado al norte por la sierra El Monte, y al sur, por la barranca Tolimán. És-



Acumulación de jales en la barranca Tolimán.

ta constituye el drenaje del río del mismo nombre, el cual es afluente del río Moctezuma, que bajo el nombre de Pánuco desemboca en el golfo de México. Hacia el surponiente, la sierra de Daxi delimita al valle.

Las rocas del área se han visto sometidas a intensos esfuerzos tectónicos. Esto ha originado que las rocas calizas (formaciones Las Trancas, Tamaulipas, Abra y Soyatal) presenten pliegues, fallamientos y deformaciones estructurales. La intrusión de rocas volcánicas complica aún más la geometría de las rocas del valle. Los antecedentes tectónicos regionales hacen suponer que, a nivel subterráneo, se encuentre una gran heterogeneidad geológica, con fuertes contrastes laterales.

### Geología local

El valle de Zimapán comprende gran parte de un abanico aluvial de espesor variable, el fanglomerado Zimapán, presente en la mitad norte de la zona urbana y en el flanco occidental. Entre el material detrítico del fanglomerado se encuentran diseminados fragmentos de los diques y de las

*La presencia de compuestos de arsénico en el valle de Zimapán se hizo evidente en el año 1992, al realizar determinaciones analíticas de muestras de agua potable, en una campaña emprendida en la zona para conocer el avance del cólera en el país.*

aureolas de mineralización que contienen minerales de arsenopirita.

La parte central de la mancha urbana se encuentra sobre rocas volcánicas terciarias, formación Las Espinas. La porción oriental de la ciudad se caracteriza por la presencia de aluviones cuaternarios de escaso espesor, más desarrollados en los cauces de las escurrientías, los cuales en algunos casos cubren el fanglomerado (Fig. 1).

Al norte del valle se localiza la falla El Malacate, que delimita a las calizas cretácicas del fanglomerado, que, como se verá, juega un papel importante en la dinámica subterránea, al igual que la falla El Muhi, localizada al noroeste.

### Hidrodinámica de los compuestos de arsénico

El marco geológico del valle define un sistema acuífero local complejo, cuya composición hidroestratigráfica puede inferirse a partir de la geología regional, del comportamiento piezométrico de algunas obras hidráulicas y de la hidrogeoquímica local. En la zona central norte, el fanglomerado actúa como una formación permeable

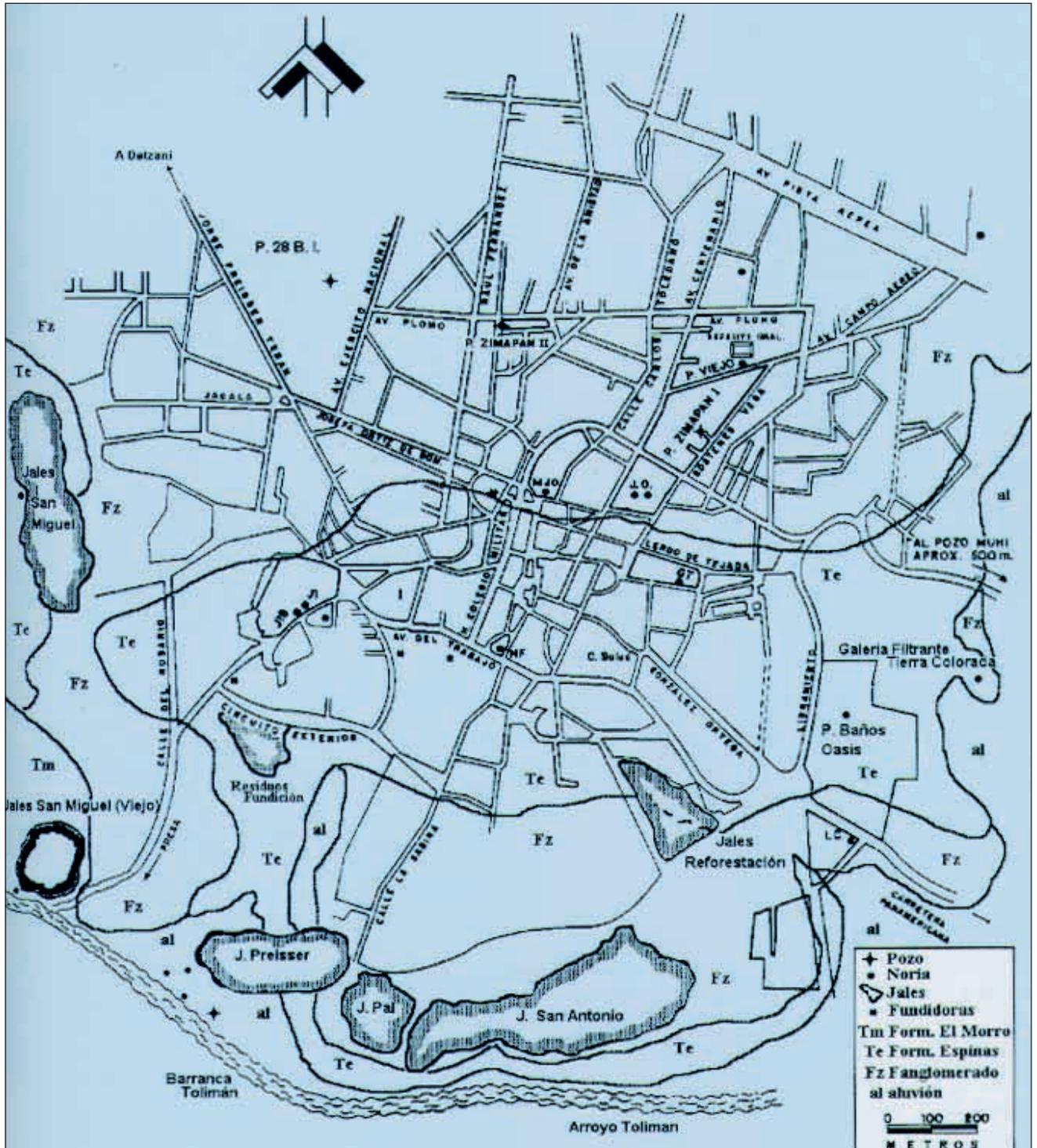
libre, en comunicación hidráulica parcial con las calizas cretácicas fracturadas, de permeabilidad variable, que constituyen la formación actualmente en explotación por los pozos profundos. El acuífero profundo debe comportarse como confinado en algunas partes del valle, pasando a semiconfinado y libre hacia las márgenes del mismo.

En las zonas de fallamiento, la permeabilidad se incrementa, direccionando el flujo subterráneo. La falla El Malacate actúa como un canal preferencial de circulación del agua subterránea, facilitando el contacto con los minerales de arsenopirita y favoreciendo el arrastre de iones calcio y carbonato y de compuestos de arsénico. Este fallamiento se comunica hi-

dráulicamente con la falla El Muhi, lo que explica que el pozo Detzani, ubicado en la primera, presente menores contenidos de As que el pozo El Muhi, cuyos contenidos son generalmente mayores.

La presencia de norias, donde se ha detectado As, en las calizas al lado de pozos profundos con concentraciones superiores de As a las per-

FIGURA 1. Geología del área urbana del municipio de Zimapán.



mitidas, permite suponer la presencia de acuíferos colgados (1) de extensión variable. Este tipo de acuíferos también existen en la parte superior de las rocas volcánicas. En ambos casos sus caudales no son importantes.

El flujo subterráneo regional presenta una dirección preferencial NO-SE (Armienta *et al.*, *op. cit.*) y localmente N-S y NE-SO. La principal recarga del sistema acuífero proviene de las zonas altas de la sierra, aunque no se descartan volúmenes provenientes de infiltraciones en el valle originadas por la escasa precipitación local.

## PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE As EN AGUA, JALES Y SUELOS

En una zona minera pueden actuar simultáneamente tanto fuentes naturales como antropogénicas de As. La diferenciación del As proveniente de cada una de ellas sólo es factible por la integración de los resultados de estudios geológicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos. Este tipo de investigación está fuertemente soportado por los resultados analíticos de muestras de suelos, jales y agua, por lo que es importante establecer una adecuada escala de muestreo. En el valle de Zimapán se analizaron 34 obras entre pozos, norias y manantiales. Las muestras de suelo se tomaron a dos y a tres profundidades (superficial, 30 cm y, en algunos casos, 50 cm). De igual manera se obtuvieron las muestras de jales. Los puntos de muestreo de suelo alrededor de las fundidoras y depósitos de jales se ubicaron tomando en cuenta la dirección preferencial de los vientos y su accesibilidad.

Se tomaron muestras testigo de suelo en dos lugares con diferente tipo de suelo, Milpa Alta y Ciudad Universitaria en la Ciudad de México. Estos suelos se utilizaron para la obtención de valores de fondo de arsénico en zonas no contaminadas.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### Arsénico en suelo y jales

Los valores de As para los suelos testigo de Milpa Alta y Ciudad Universitaria oscilaron entre **21,3 a 44,2**

*Una de las hipótesis populares sobre la presencia de arsénico en la zona eran las lixiviaciones provenientes de los jales mineros foráneos a la zona urbana y los ubicados en la periferia de la actual mancha urbana. Sin embargo, como ya se había demostrado en un estudio previo, los primeros poco o nada tienen que ver con el arsénico presente en el valle.*

ppm de As total y **0,65 a 4,59 ppm** de As soluble.

En el municipio de Zimapán se obtuvieron muestras de suelo en lugares próximos a depósitos de jales, donde existieran residuos de fundición o cascos de fundidoras y en zonas no comprometidas con ninguna de estas fuentes de arsénico. Las muestras de jales se obtuvieron de los jales: San Miguel Nuevo, Reforestación y Circuito Exterior (Fig. 1).

Las concentraciones más altas de arsénico total para algunas muestras de suelo obtenidas a un lado de los depósitos de jales fueron de **1.072 a 1.507 ppm**. Se cuantificó también el contenido de arsénico soluble en agua; para estos suelos el mismo fue de **1,77 a 1,88 ppm**. Los contenidos de arsénico total son del orden de cientos o miles de ppm, es decir, uno o dos órdenes de magnitud mayores que los de suelos sin contaminar. Los contenidos de arsénico soluble son mucho menores que los de arsénico total, inferiores a 10 ppm, y sus valores son comparables a los de los sue-

los testigo. Los valores encontrados hacen evidente el acarreo aéreo proveniente de los depósitos de jales hacia los suelos aledaños, el cual provoca el incremento en los contenidos de arsénico de los mismos.

Los contenidos de As total en los suelos de los terrenos próximos a las fundidoras fueron de **26 a 4.176 ppm** en tanto que el soluble fue de **1 a 13,2 ppm**. Cabe destacar las diferentes concentraciones obtenidas para dos muestras cercanas a la misma fundidora, pero localizadas en diferentes direcciones, lo que demuestra la importancia de la dirección preferencial de los vientos, que en este caso provocó un depósito 10 veces mayor en uno de los sitios para las muestras superficiales.

Los contenidos de arsénico soluble son mucho menores que los de arsénico total, aunque en algunos puntos llegan a ser de una magnitud de uno o dos órdenes superiores a los suelos testigo. Cabe destacar el incremento de arsénico soluble con la profundidad en todos los puntos muestreados, excepto el más alejado de una fundidora, lo cual indica la posibilidad del transporte del contaminante por el agua de lluvia o de riego desde la superficie hasta el agua subterránea.

Las concentraciones de arsénico soluble en suelos no comprometidos con algunas de las fuentes detectadas en Zimapán se encuentran en el mismo rango que las de suelos obtenidos en Milpa Alta y CU, alejados de fuentes de contaminación de este elemento. Sin embargo, las concentraciones de arsénico total son mayores que las de los suelos testigo de la ciudad de México.

Las concentraciones de arsénico obtenidas en unas muestras de jales reflejan la variabilidad de los materiales que conforman estos residuos. En este caso, el rango de valores va de **10.000 a 22.000 ppm** de As total, en tanto que el As soluble es de **2,5 a 3,4 ppm**.

Las diferencias entre As total y As soluble se debe a que el As en este tipo de material se encuentra principalmente en compuestos poco solubles, como sulfuros, que requieren procesos de oxidación para aumentar su solubilidad en el agua.

### Arsénico en agua

Las concentraciones de arsénico en agua subterránea variaron desde

(1) Formaciones permeables someras de escasa extensión que no presentan comunicación hidráulica con otras formaciones acuíferas más profundas o laterales.

inferior al límite de detección analítico (n.d.), menor a 0,014 mg/l, hasta **1,12 mg/l**. Quince presentaron cantidades mayores a 0,014 mg/l, y de éstas, 9 contuvieron arsénico en concentraciones superiores a la norma para agua potable (0,05 mg/l). Todas las muestras tomadas de pozos o norias localizados en la zona de rocas volcánicas no presentaron concentraciones de arsénico por encima del límite de detección analítico. Uno de estos pozos, Maguey, a pesar de contar con un bajo caudal (0,5 l/seg), abastece los poblados de San Pedro, Carrizos, Xindho y la manzana de Los Ángeles desde el año 1993.

Por otro lado, los manantiales ubicados en calizas o en contactos calizas-volcánicas tampoco mostraron arsénico o lo contuvieron en bajas concentraciones, a pesar de estar algunos de ellos cerca de pozos conteniendo este contaminante. Las muestras ubicadas cerca de algunos jales contuvieron arsénico, aunque en concentraciones variables, desde 0,055 hasta 0,2371 mg/l de As.

El agua de pozos de abastecimiento, que en el estudio anterior (Armienta y cols., 1993) mostró altos contenidos de arsénico, presentó variaciones en su concentración a lo largo del tiempo. En el gráfico 1 se muestran contenidos de As para el pozo El Muhi y Detzaní. Los contenidos del

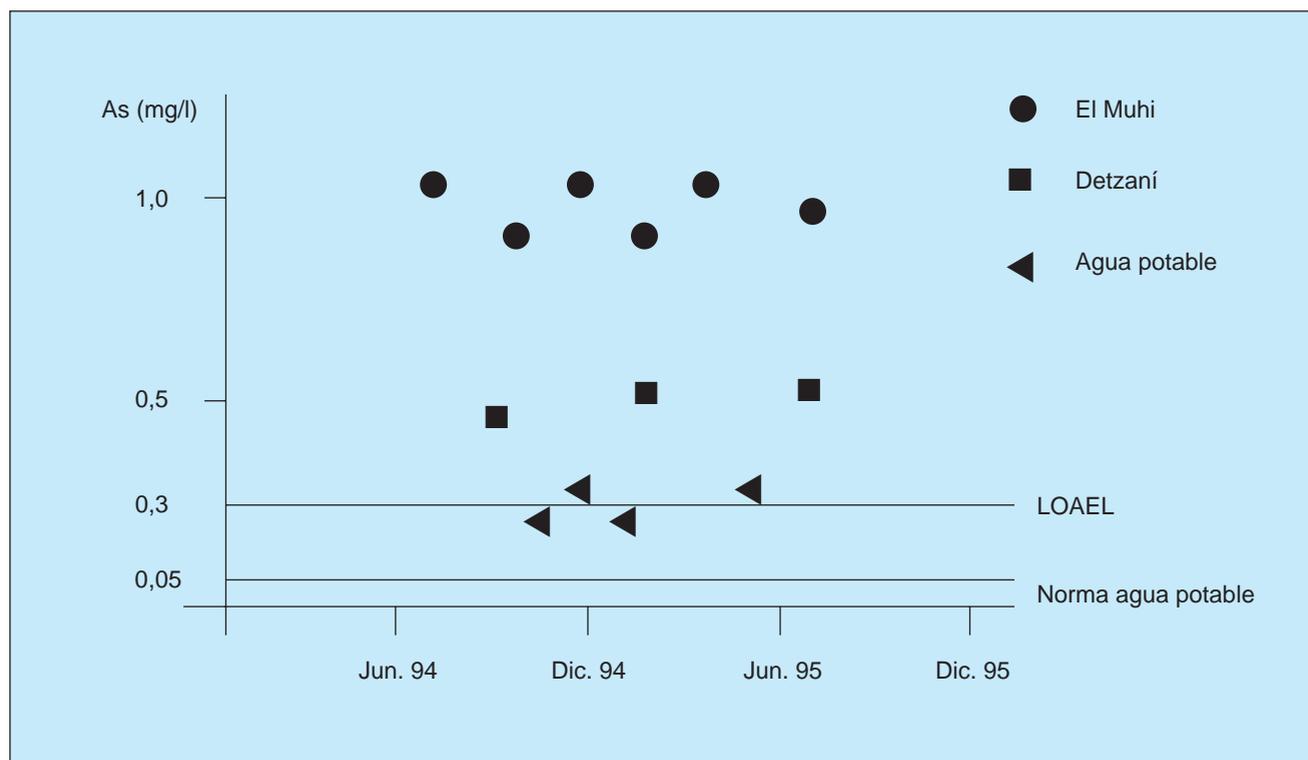
*El carácter semiárido de la zona limita la disponibilidad de otras fuentes de abastecimiento de agua, por lo que el agua subterránea debe administrarse de manera tal que su calidad sea aceptable. Una alternativa viable es el tratamiento con sales de hierro. Esta metodología requiere aún de estudios específicos para su implementación.*

primero oscilan alrededor de 1,0 mg/l, y los del segundo, de 0,5 mg/l. La mezcla de estas aguas con las de otros pozos de menor o nulo contenido de As da lugar a que el agua de abastecimiento de la población tenga contenidos de As del orden del valor mostrado por la literatura especializada (Low Adverse Effect Level, LOAEL), apareciendo entonces los primeros síntomas de afectación a la salud.

Cabe destacar que el pozo más contaminado (El Muhi) es el principal abastecedor de la red de agua potable de Zimapán, aunque antes de distribuirse se mezcla con otros pozos con menor contenido de As, lo que provoca la disminución en la concentración final de arsénico, dando un promedio **0,30 mg/l**, lo que equivale a seis veces la norma para agua potable. Además, las viviendas localizadas en los alrededores de este pozo se surten directamente del mismo, consumiendo entonces agua con contenidos cercanos o superiores a 1 mg/l de arsénico. Por otro lado, el pozo Detzaní, con concentraciones de As que han fluctuado entre **0,746 mg/l** y **0,48 mg/l**, abastece directamente la red de agua potable de la población de Detzaní y otros poblados cercanos.

Manantiales cercanos a los pozos altamente contaminados (El Muhi y

**GRÁFICO 1. Variaciones del contenido de As en los pozos El Muhi y Detzaní, y en el agua abastecida a la población.**





*La principal recarga del sistema acuífero proviene de las porciones altas de la sierra.*

Detzaní) tuvieron concentraciones mucho menores de arsénico. Manantiales ubicados al norte de Detzaní, alineados a lo largo de la falla del mismo nombre, no presentaron arsénico.

Cabe destacar que la noria Alberca, a pesar de estar a 500 m de los jales San Miguel Nuevo, tuvo una elevada concentración de arsénico (0,2371 mg/l), lo que indica la capacidad de lixiviación y transporte del contaminante a pesar de los jales, mayor que la de otros componentes, como el sulfato, que no llegó a ser el anión principal.

La ausencia o bajo contenido de arsénico en los manantiales emplazados en calizas, cercanos a pozos muy contaminados (Detzaní y El Muhi), indican que el aporte de agua proviene de un acuífero diferente al explotado por los pozos profundos.

## **CONCLUSIONES GENERALES**

Es posible que el arsénico contamine el agua subterránea en zonas mineras que explotan minerales de diversos metales asociados a sales de arsénico y donde existan condiciones geológicas que permitan la comunicación entre los lixiviados generados en superficie y el acuífero, o entre el agua subterránea y los compuestos de As. Por esta razón se deben realizar estudios geológicos e hidrogeológicos a nivel regional y local que proporcionen un modelo físico del área de estudio y que den validez a las medidas que pudieran aplicarse posteriormente para su remedio.

En dichas áreas, la economía está basada en la minería, algunas veces desde el siglo XVI, como es el caso de la zona de Zimapán. Al inicio de las actividades mineras en esas épocas,

la explotación se realizaba en forma intensiva y con un bajo rendimiento, comparándola con los procedimientos actuales. Aquellos procedimientos, de baja eficiencia, generaban gran cantidad de residuos (jales), mucho mayor que la producida actualmente. En ocasiones, a pesar de que el contenido de los residuos era rico en metales, su precio en el mercado no justificaba su comercialización, por lo que su destino eran los jales. Además, si el contenido de As era alto, el precio se «castigaba» y, consecuentemente, se prefería depositar en los jales que venderlo. El conocimiento de la historia de las actividades mineras en áreas con este tipo de problemas es indispensable para poder categorizar adecuadamente las fuentes y los mecanismos de contaminación.

La riqueza económica generada por las actividades de extracción mi-

neral, procesadoras de minerales y fundiciones propició el desarrollo de centros urbanos en el entorno de estos lugares. En el caso especial de las fundidoras, la población resultaba potencialmente expuesta a los humos de las mismas, sin sospechar las afectaciones adversas a la salud que podrían resultar como consecuencia de la inhalación de polvos con alto contenido de ácido arsenioso. Debido a un gran número de razones, los tiempos de operación y la localización de las fundidoras pueden variar espacial y temporalmente. Un censo de las fundidoras que han operado en una zona con estas características permite programar un muestreo eficiente de suelos y evaluar la capacidad de migración del arsénico a través de los mismos hasta el nivel freático, contaminando las aguas subterráneas.

La realización de cada una de las actividades citadas constituye una fuente potencial de contaminación por As. La diferenciación del As proveniente de cada una de ellas requiere la integración de la información geológica e hidrogeológica con los resultados de análisis químicos, tanto de muestras de agua como de suelo, a diferentes profundidades. Se precisa un muestro específico, que puede incluir determinaciones *in situ*. Además del origen antropogénico del As en el flujo subterráneo, éste puede originarse naturalmente. Esto se debe al tipo de mineralización y a la circulación del agua subterránea por esta clase de roca. Siempre se tiene que considerar en las zonas mineras que ambos tipos de fuentes potenciales de contaminación pueden estar activos.

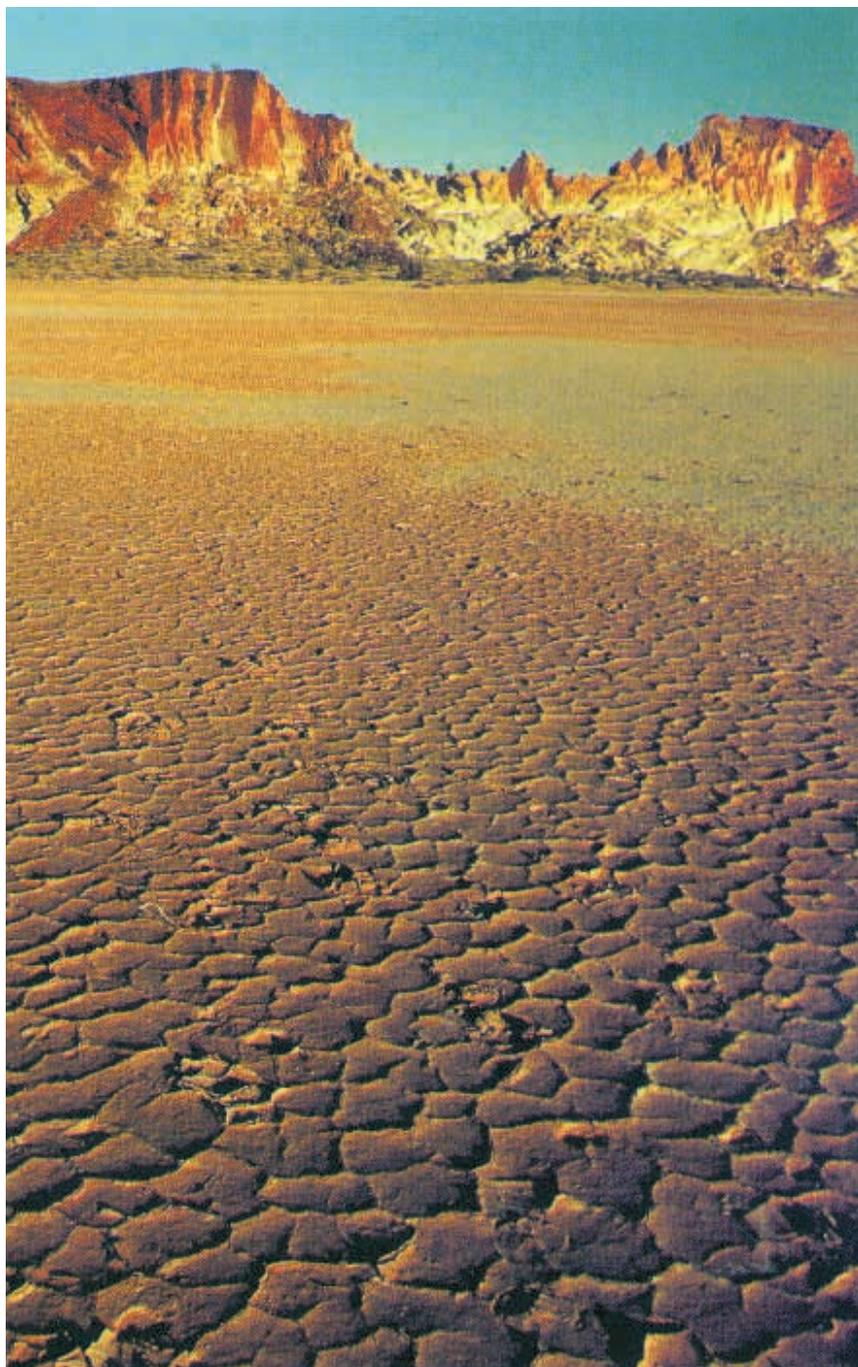
La hidráulica subterránea puede permitir la comunicación entre diferentes tipos de formaciones acuíferas. En medios calizos, el agua circula potencialmente a través de sistemas de fracturas; si éstas se encuentran localizadas en zonas de mineralización, se favorece el arrastre del As. Pueden existir, además, formaciones permeables de materiales detríticos provenientes de la roca madre, que también pueden contener minerales con As. El conocimiento de la composición del sistema acuífero permitirá entonces diferenciar los orígenes del As.

La presencia conjunta de las fuentes citadas requiere un manejo cuidadoso del tipo de roca en el cual se localizan las obras hidráulicas. Un pozo profundo tiene más probabilidades de ser contaminado por As de manera natural que una obra somera (bastante frecuente en los países en vías de

desarrollo), que resulta más vulnerable a las actividades humanas; aunque habría que tener una buena información geológica para conocer las rocas en las que estén ubicados estos pozos someros, ya que no debe descartarse de entrada el origen natural del mismo.

Muchas veces estas poblaciones se encuentran localizadas en zonas áridas o semiáridas en las cuales el agua subterránea es la principal o

única fuente de abastecimiento de agua potable. Si se añade a este factor la posición topográfica de las zonas mineras, los acuíferos se convierten en la única posibilidad de suministro del vital líquido. No siempre se cuenta con suficiencia económica para sustituir las fuentes locales por otras alejadas. La ingestión continua de agua con concentraciones elevadas de As durante períodos prolongados puede afectar a la salud. Si no se



*El carácter semiárido de la zona limita la disponibilidad de otras fuentes de abastecimiento de agua, por lo que el agua subterránea debe administrarse de manera tal que su calidad sea aceptable.*

*En el municipio de Zimapán se obtuvieron muestras de suelo en lugares próximos a depósitos de sales, donde existieran residuos de fundición o cascos de fundidoras y en zonas no comprometidas con ninguna de estas fuentes de arsénico.*

el costo que esto implica. La riqueza generada por la minería no retroalimenta necesariamente las economías locales, además de que no existe el compromiso tácito entre las actuales compañías mineras y las posibles soluciones del problema.

La falta de sintomatologías concretas asociadas a la toxicidad del As no implica que éste no afecte a la salud, lo que conlleva a que se aplacen indefinidamente las medidas adecuadas para remediarlo. La solución se tiene que dar a corto plazo, pues el arsénico no perdona.

## CONCLUSIONES PARTICULARES

En el valle de Zimapán se detectó la presencia de tres fuentes de contaminación por arsénico al agua subterránea. Con ella se abastece a una población de 9.000 habitantes, aproximadamente. La precaria condición económica de la mayoría de sus habitantes restringe la compra diaria de agua embotellada, por lo que es obligado el uso del agua municipal. Las mayores concentraciones se asocian a la circulación del agua en un sistema de fallas intercomunicado hidráulicamente. La ubicación de los pozos profundos de mayor caudal en este sistema garantiza cantidad, pero no calidad.

El origen geológico del arsénico se vincula a la presencia de aureolas de mineralización en las calizas como consecuencia de intrusivos ígneos. No sólo se tienen minerales de arsénico, como la arsenopirita, en la zona de diques, sino también los detritos de éstos, que forman parte del fanglomerado.

Prácticamente, la mitad de la zona urbana se ubica sobre rocas volcánicas terciarias; es por ello que las norias que no están en las cercanías de jales ni fundidoras no presentan contenidos de arsénico. Los resultados obtenidos de algunas perforaciones en estas rocas hacen ver que la permeabilidad de las mismas disminuye rápidamente con la profundidad. Sólo en la parte somera se encuentran acuíferos colgados de pequeña magnitud, cuya principal recarga es la precipitación en las partes altas de la sierra.

La ubicación de las fallas está soportada por la presencia de manantiales alineados a lo largo de las mismas: manantiales Barrón y Barrón 2, y Detzaní, en la falla Malacate, y manantial Huerta en la falla El Muhi.

El papel contaminante de las fundidoras fue comprobado a lo largo de este estudio. Las altas concentraciones de arsénico en suelos próximos a

*En el valle de Zimapán se detectó la presencia de tres fuentes de contaminación por arsénico al agua subterránea. Con ella se abastece a una población de 9.000 habitantes, aproximadamente.*

las mismas se originaron como consecuencia del acarreo aéreo de los humos conteniendo ácido arsenioso. Su radio de influencia parece ser menor a un kilómetro; no obstante, habría que considerar que hace cuarenta y cinco años que han cesado sus operaciones en la zona. El incremento del arsénico soluble de la profundidad del suelo demuestra su movilidad y su capacidad de migrar hacia las formaciones acuíferas someras.

Una de las hipótesis populares sobre la presencia de arsénico en la zona eran las lixiviaciones provenientes de los jales mineros foráneos a la zona urbana y los ubicados en la periferia de la actual mancha urbana. Sin embargo, como ya se había demostrado en un estudio previo (Amienta *et al.*, *op. cit.*), los primeros poco o nada tienen que ver con el arsénico presente en el valle. Los jales urbanos contribuyen a la alteración de la calidad del agua de obras hidráulicas localizadas en su vecindad, por lo menos hasta una distancia de 500 m. El arsénico encontrado en los pozos profundos no proviene de esta fuente.

Los valores de arsénico en el agua potable oscilaron entre 0,25 y 0,35 mg/l. Estas concentraciones se encuentran muy por encima de lo permitido por la norma (0,05 mg/l), y el consumo diario de dos litros o más de agua durante períodos prolongados puede afectar a la salud humana.

cuenta con estudios como el aquí presentado es muy difícil asociar las sintomatologías mostradas debidas a la toxicidad del As con la ingesta de agua, que en casos extremos puede llegar a inducir cáncer hepático. El desconocimiento de la presencia de arsénico en el agua dificulta e incluso imposibilita definir causa-efecto, y la conclusión médica no la relacionará necesariamente con el agua. Sumado a esto se encuentra el hecho de que la determinación analítica de As no se realiza de manera rutinaria, debido, por un lado, a la complejidad del procedimiento, y por otro, a una falta de tradición por parte de las autoridades encargadas del manejo y administración del agua.

Para tomar medidas que eviten daños a la salud de la población abastecida es indispensable determinar con veracidad la(s) fuente(s) de contaminación y el grado en el que afectan la calidad del agua, tanto en extensión como en concentración del As. Esto se hace particularmente importante cuando las condiciones económicas son precarias. Pareciera obvio el esquema de solución: el establecimiento de una planta de tratamiento. Sin embargo, la solución no es tan simple, ya que el sistema de distribución del agua extraída de los pozos puede complicar el manejo de tratamiento (pueden existir diferentes redes de distribución), pero principalmente por



En el valle de Zimapán, zona semiárida, se han detectado concentraciones de arsénico en el agua subterránea.

El carácter semiárido de la zona limita la disponibilidad de otras fuentes de abastecimiento de agua, por lo que el agua subterránea debe administrarse de manera tal que su calidad sea aceptable. Una alternativa viable es el tratamiento con sales de hierro (Morales, 1994). Esta metodología precisa aún de estudios específicos para su implementación.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALBORES, A.; CEBRIÁN, M. E.; TÉLLEZ, I., y VALDEZ, B. (1979): «Estudio comparativo de hidroarsenicismo crónico en dos comunidades rurales de la región Lagunera de México». *Bol. Of. Sanit. Panam.*, vol. 86, pp. 196-203.
- ARMIENTA, M. A.; RODRÍGUEZ, R., y VILLASEÑOR, G. (1993): «Estudio de reconocimiento de la Contaminación por arsénico en la zona de Zimapán, Hidalgo». *Reporte Técnico*, il., Instituto de Geofísica, UNAM, Municipio de Zimapán, noviembre 1993, 85 páginas.
- BAHMRA, R. K., y COSTA, M. (1992): «Trace Elements Aluminium, Arsenic, Cadmium, Mercury and Nickel». En LIPPMAN, M. (editor): *Environmental Toxicants: Human Exposure and Their Health Effects*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 575-631.
- CARSON, B. L.; ELIS III, H. V., y McCANN, J. L. (1986): *Toxicology and Biological Monitoring of Metals in Humans*. Lewis Publishers Inc., Chelsea, pp. 27-33.
- CEBRIÁN, M.; ALBORES, A.; AGUILAR, M., y BLAKELY, A. (1983): «Chronic Arsenic Poisoning in the North of Mexico». *Human Toxicology*, vol. 2, pp. 121-133.
- CHERRY, J. A.; SHAIKH, A. U.; TALLMAN, D. E., y NICHOLSON, R. V. (1979): «Arsenic Species as an Indicator of redox Conditions in Groundwater». *Journal of Hydrology*, vol. 43, pp. 373-392.
- CONTRERAS, M. F. (1994): «Coagulación con sales de hierro y su eficiencia en la remoción de arsénico del agua subterránea destinada al consumo humano en Zimapán, Hidalgo». *Tesis Profesional*, Ingeniería Ambiental, UAM Azcapotzalco.
- ESPINOZA, G. E. (1963): «Mass arsenic poisoning in Torreón Coahuila State». *Bol. Epidemiol.*, vol. 27, pp. 213-220.
- GALVAO, L. A. C., y COREY, G. (1987): *Arsénico*. Serie Vigilancia 3, Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, Organización Panamericana de la Salud, Metepec, México, 70 páginas.
- LÉONARD, A. (1991): «II.3 Arsenic». En: MERIAN, E. (Editor): *Metals and Their Compounds in the Environment. Occurrence, Analysis and Biological Relevance*, VCH, Alemania, pp. 751-774.
- SÁNCHEZ DE LA FUENTE, E. (1979): *Arsenicismo crónico en el medio rural de la comarca Lagunera, servicios médicos rurales cooperativos en la comarca Lagunera*, SSA, México.
- STÖRER, G. (1991): «Arsenic, opportunity for risk assessment». *Arch. Toxicol.*, vol. 65, pp. 525-531.