

Caracterización química de aguas subterráneas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán, Estado de Hidalgo, México

Chemical characterization of groundwaters in wells and a water distributor of Zimapán State of Hidalgo, Mexico

Fidel Pérez Moreno¹, Francisco Prieto García¹, Alberto Rojas Hernández², Carlos A. Galán Vidal¹, Yolanda Marmolejo Santillán¹, Claudia Romo Gómez¹, Araceli Castañeda Ovando¹, José Antonio Rodríguez Ávila¹ y Enrique Barrado Esteban³

¹Centro de Investigaciones Químicas. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Carr. Pachuca-Tulancingo, km 4.5. Pachuca, C.P. 42076. Hidalgo. México .

²Departamento de Química Analítica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. San Rafael Atlixco 186, Col. Vicentina, México, D.F., C.P. 09340, México.

³Departamento de Química Analítica. Facultad de Ciencias. Universidad de de Valladolid, c/Prado de la Magdalena s/n, 47005. Valladolid. España.

Pérez Moreno, F., F. Prieto García, A. Rojas Hernández, C. A. Galán Vidal, Y. Marmolejo Santillán, C. Romo Gómez, A. Castañeda Ovando, J. A. Rodríguez Ávila y E. Barrado Esteban, 2003. Caracterización química de aguas subterráneas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán, Estado de Hidalgo, México. *Hidrobiológica* 13 (2): 95-102.

RESUMEN

En este trabajo se llevó a cabo la caracterización de las aguas subterráneas que abastecen al distribuidor general de agua de la ciudad de Zimapán Hidalgo, México y del propio distribuidor. Para ello se seleccionaron 11 puntos de muestreo en los que se determinaron 28 parámetros físico-químicos de las aguas colectadas durante 10 muestreos distribuidos a lo largo de un año (marzo de 1999-marzo de 2000). De forma general, estas aguas presentaron propiedades fisicoquímicas normales clasificadas como aguas bicarbonatadas-cálcicas y bicarbonatadas-mixtas con bajos niveles de sulfatos, cloruros, sodio y potasio; pero presentaron concentraciones de As muy elevadas de hasta 550 $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, superando en más de 10 veces la norma NOM-127-SSA1-1994 para aguas potables (Secretaría de Salud, 1996). En el estudio de variación temporal se observaron cambios significativos de carácter estacional con incremento en las concentraciones de los elementos totales durante los meses de febrero y marzo (temporada de escasas lluvias) y una disminución de los mismos durante el período abril a julio (temporadas de lluvias), ésto último probablemente debido a efectos de la dilución causada por la precipitación pluvial que se infiltra al manto freático, además, se han correlacionado los pozos de suministro y los puntos de muestreo del distribuidor general mediante un análisis multivariado de las propiedades fisicoquímicas.

Palabras clave: Aguas subterráneas, aguas potables, Zimapán, parámetros hidroquímicos, arsénico, calidad del agua.

ABSTRACT

The characterization of the ground waters that supply the general distributor of water of Zimapán city, State of Hidalgo, Mexico and the distributor itself, is carried out in this work. Eleven sampling points have been selected in which 28 physical-chemical parameters of the collected water have been determined during 10 samplings distributed along one year (March of 1999-March of 2000). In general these waters present normal physical-chemical properties and are classified as bicarbonated-calcic and bicarbonated-mixed waters, with low levels

of sulfates, chlorides, sodium and potassium; with very high concentrations of As up to $550 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, exceeding in more than 10 times the norm NOM-127-SSA1-1994 for drinking water (Secretaría de Salud, 1996). The study of temporal variation showed significant seasonal variations with an increase in the concentrations of the total elements during the months of February and March (season of scarce rains) and a decrease in the months of April to July (season of rains), this is probably due to dilution effects caused by pluvial precipitation, which is infiltrated to the phreatic mantle. In addition, the supply wells and the points of sampling of the general distributor were correlated by means of a multi-varied analysis of physical-chemical properties.

Keywords: Groundwaters, drinking waters, Zimapán, hydrochemical parameters, arsenic, water quality.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Zimapán está ubicada en la parte occidental del Estado de Hidalgo, México (Fig. 1), forma parte de la subcuenca del río Moctezuma en la Cuenca Hidrológica del río Pánuco, este último desemboca en el Golfo de México (DGG, 1983). Es una región eminentemente minera donde se realiza la extracción de minerales importantes que contienen Pb, Zn, Cu y Ag (Cárdenas, 1992). El municipio de Zimapán cuenta con una población aproximada de 37,500 habitantes (INEGI, 2000), el 32% de la población se concentra en la cabecera municipal, 5% en la zona conurbada a ésta y el 19% en los alrededores de la misma; las principales fuentes de suministro de agua son pozos profundos, manantiales y norias.

Estudios realizados a las aguas de Zimapán han revelado que se encuentran contaminadas con arsénico (Armienta *et al.*, 1997), elemento altamente tóxico que en el agua se presenta predominantemente como As (+5) en sus formas químicas de H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-} , que son menos tóxicas que las de As (+3) (Wasay *et al.*, 1996; Hemmings *et al.*, 1991; Harper *et al.*, 1992) pero que pueden acarrear diversos problemas de salud, debido a que el riesgo de intoxicación con arsénico por consumo de agua potable es alto, ya que concentraciones del orden de 300 a $500 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ de As han sido suficientes para desarrollar cuadros graves de intoxicación (Galvão y Corey, 1987). Investigaciones realizadas por la Organización Mundial de la Salud sobre la calidad del agua potable han demostrado que una persona de cada 10,000 habitantes presenta riesgo de adquirir cáncer de piel por ingestión diaria de agua con concentraciones de $2 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ de As (Batsheba, 1996). El As es capaz de atravesar la barrera placentaria provocando acumulaciones de importancia y efectos en el desarrollo de fetos (Galvão y Corey, 1987), el problema se agrava si hay presentes otros componentes como por ejemplo el plomo, que conjuntamente con el As causa efectos aditivos en los tejidos pulmonares y afecciones al sistema nervioso central (Hutchins *et al.*, 1999). Por estos motivos, los límites máximos permisibles de As y Pb en agua destinada al consumo humano se han reducido sistemáticamente, de tal modo que en España se han establecido valores máximos de $10 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ para ambos elementos (Ministerio de Sanidad y Consumo, 1997) y en Mé-

xico de $50 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ de As y $25 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ de Pb (Secretaría de Salud, 1996) con disminuciones graduales de $5 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ de As por año durante los siguientes 5 años y una disminución en el límite máximo permisible de $10 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ para el plomo a partir del año 2000 (Secretaría de Salud, 2000). Por consiguiente, en poblaciones expuestas al impacto de As como es el caso de la Región de Zimapán, es necesario considerar la forma química del elemento, principalmente en los compuestos de As (+3) que son los más tóxicos, aunque compuestos arsenicales insolubles o pentavalentes menos tóxicos en medios reductores o por procesos biológicos pueden ser transformados en As (+3) de alto riesgo toxicológico para el ser humano lo que provocaría hidroarsenicismo crónico regional endémico.

El agua extraída de los pozos profundos es el objeto de estudio, en virtud de que el 95% de los habitantes de la cabecera municipal, zona conurbada y alrededores, utilizan el agua de éstos para sus necesidades cotidianas; además, en 1998 la Gerencia Estatal en Hidalgo de la Comisión Nacional del Agua después de varios estudios decidió cerrar el pozo IV por contener niveles de hasta $1.5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ de As, disminuyen-

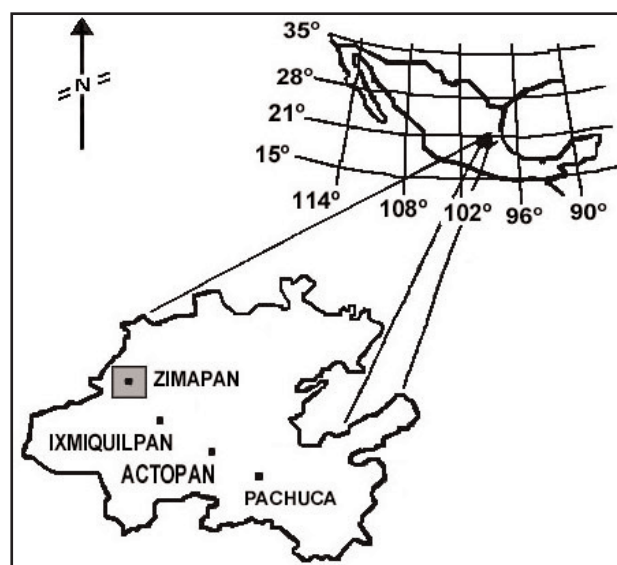


Figura 1. Localización del municipio de Zimapán en el Estado de Hidalgo, México.

do el volumen de agua suministrado hacia la población de Zimapán hasta en un 50%.

Con el fin de controlar la potabilidad química del agua y de encontrar posibles relaciones entre la composición que llega al distribuidor con las fuentes originales de suministro, se planteó como objetivo llevar a cabo un control de la calidad del agua subterránea en los pozos que abastecen al distribuidor general de agua de Zimapán y de los diversos puntos de entrada al propio distribuidor. En función de los resultados, podrán proponerse medidas adecuadas para la captación y tratamientos necesarios que minimicen las concentraciones de elementos tóxicos que ponen en riesgo la salud humana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de los puntos de muestreo.- Los sitios de muestreo seleccionados son los pozos II al VI, la llegada del agua de los pozos II, III y V al distribuidor general, dos áreas del distribuidor y la salida del mismo (Fig. 2), siendo un total de 11 puntos de muestreo.

Localización de los pozos y del distribuidor.- Los pozos II, V y distribuidor de agua se encuentran en la Cabecera Municipal de Zimapán, el pozo III se localiza en el barrio de Tierra colorada, el IV en el barrio de El Muhí y el VI en el barrio de Venustiano Carranza, todos ellos en este Municipio.

Colecta y toma de muestras.- Se realizaron muestreos mensuales colectando cantidades de muestras representativas. Para el cálculo del tamaño de muestras de agua se utilizó la siguiente expresión (Münch y Angeles, 1997):

$$n = [Z^2 p \cdot q \cdot N] / [Ne^2 + Z^2 p \cdot q]$$

donde:

n , es volumen de agua a tomar en litros (l)

N , es volumen total de agua (l) en el distribuidor al momento de tomar la muestra.

$p = 0.90$ y $q = 0.10$, son factores de probabilidad de muestra representativa.

$Z = 1.645$; valor estadístico para un 90% de nivel de confiabilidad

$e = 0.1$; como nivel de error de estimación.

Se tomaron de 3-4 litros de agua de cada uno de los puntos indicados en los 10 muestreos que se realizaron durante el periodo marzo de 1999 a marzo del 2000.

La colecta de muestras de agua se realizó en recipientes de polipropileno lavados cuidadosamente primero con agua y después con mezcla de HNO_3 (1:1) y enjuagados posteriormente

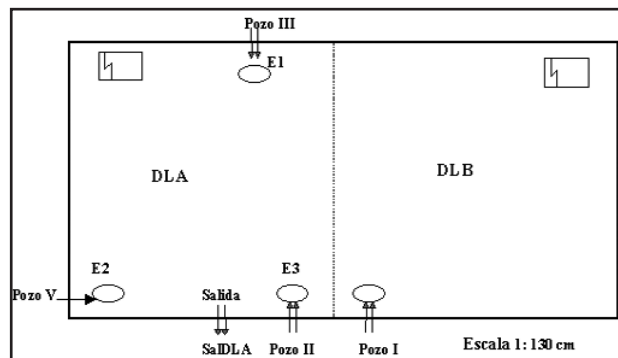


Figura 2. Esquema del distribuidor general de agua potable de Zimapán, Hidalgo (18 m de largo, 8 m de ancho y 3.75 m de profundidad). Sitios de muestreo: Distribuidor lado A (DLA); distribuidor lado B (DLB); salida del distribuidor por lado A (SalDLA) y entrada de agua al distribuidor (E1, E2 y E3).

con abundante agua bidestilada, además en el momento de tomar las muestras cada recipiente fue enjuagado con abundante agua del sitio. La muestra fue trasladada al laboratorio donde se realizaron los análisis físico-químicos y de elementos totales.

Procedimientos de los análisis.- El análisis de los parámetros fisicoquímicos del agua, las determinaciones de las concentraciones de los iones y de los elementos totales se realizaron siguiendo la Norma Oficial Mexicana (Secretaría de Salud, 1995) y de evaluación de aguas (Cunniff, 1995; Janjic *et al.*, 1997; Clesceri *et al.*, 1998a, 1998b, 1998c; 1998d).

Algunas pruebas fueron realizadas *in situ*, como el pH que se determinó con un potenciómetro marca Corning, modelo pH meter 220 con una precisión de 0.01 unidades de pH, equipado con un electrodo de vidrio combinado y calibrado a dos puntos con soluciones amortiguadoras de 4.00 y 7.00 unidades de pH; la temperatura fue medida con un termómetro de mercurio con una precisión de 1°C; la conductividad, fue determinada en forma directa con un conductímetro marca Orión, modelo 130 previamente calibrado con solución estándar de $1413 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ y el cloro residual fue determinado por el método de la ortotoluidina; los parámetros restantes fueron evaluados en el laboratorio.

Para la determinación de metales totales se tomaron 45 ml de muestra de agua, se le adicionaron 5 ml de HNO_3 bidestilado y se digirió en un horno de microondas marca Questron, modelo Q. Wave 1000 siguiendo la norma de la EPA-3015 para aguas en dos pasos; en el primero se elevó la temperatura desde la ambiente hasta 160°C en un tiempo de 10 min y en el segundo paso de 160°C a 170°C en 5 min con una potencia de 1000 Watts.

Las muestras de agua digeridas y enfriadas se aforaron a volumen adecuado y el análisis elemental se realizó en un espectrofotómetro de plasma con acoplamiento inductivo, marca Perkin-Elmer, modelo 3000 XL. Las curvas de calibrado para ca-

da elemento se realizaron a partir de soluciones estándar de multielementos y/o unielemento de alta pureza. Para eliminar las interferencias de ionización en análisis de los elementos de Ca, Na, K, y Mg se agrega LaCl_3 a las soluciones (Cunniff, 1995).

Para analizar As en las muestras de agua se realizó una pre-reducción del As presente a As(III) adicionando KI, ácido ascórbico y HCl (Davidowsky, 1993) y se dejó reposar 20 min antes del análisis por la técnica de generación de hidruros combinada con la espectrofotometría de plasma con acoplamiento inductivo.

Una parte de la muestra fué tratada con HCl para analizar Hg mediante generación de hidruros a flujo continuo combinado con la espectrofotometría de emisión atómica con acoplamiento inductivo (Nölte, 1991).

Los análisis para determinar pH, conductividad, turbidez, sólidos disueltos totales, cloro residual, dureza total, dureza cálcica, sólidos totales, cloruros, sulfatos, fenoles, nitrógeno amoniacal, nitrógeno de nitritos, nitrógeno de nitratos, carbonatos y bicarbonatos se realizaron siguiendo la Normativa Oficial Mexicana (Secretaría de Salud, 1995) complementada con técnicas de evaluación de aguas (Cunniff, 1995; Clesceri *et al.*, 1998a, 1998c, 1998d).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas

Las propiedades físico-químicas del agua a la salida de los pozos II-VI y del agua que llega al distribuidor general a

través de sus entradas: Distribuidor lado A, entrada 1 (DLAE1); Distribuidor lado A, entrada 2 (DLAE2); Distribuidor lado A, entrada 3 (DLAE3); distribuidor lado A (DLA); distribuidor lado B (DLB) y salida del distribuidor hacia la población por lado A (SalDLA) se encontraron dentro de los límites permisibles por la normativa mexicana como se indica en la tabla 1 donde se muestran los valores promedio. El porcentaje de desviación estándar relativa (%DER) de los valores medios se encuentran entre el 5 y 10%.

Caracterización Hidroquímica de las aguas subterráneas

Desde el punto de vista hidroquímico las aguas subterráneas de Zimapán se pueden clasificar como aguas bicarbonatadas-cálcicas típicas, debido a que presentaron bajas concentraciones de sulfatos, cloruros, sodio, potasio y magnesio como se puede observar en la tabla 2 y en el diagrama de Piper (Fig. 3), el cual es ampliamente utilizado en evaluaciones de aguas subterráneas (Rawlins *et al.*, 1999; Hutchins *et al.*, 1999). Éste, también indica que las aguas muestreadas en Zimapán son cálcicas (Fig. 3a), con excepción de las aguas de los pozos IV y VI que mostraron una composición mixta con contenidos minoritarios en calcio, lo cual se puede explicar por el hecho de que el pozo IV se ubica sobre roca caliza al igual que los pozos II, III, y V; pero en reposo (pozo cerrado) y consecuentemente los iones calcio tuvieron bajas movilidades hacia la superficie, el pozo VI está en un área de roca volcánica por lo que las concentraciones de calcio en las aguas son menores. Se muestra que las aguas son predominantemente bicarbonatadas (Fig. 3b) en virtud de que se infiltran en rocas cálcicas las cuales lixivian iones bicarbonato a las mismas.

Tabla 1. Valores promedio de parámetros fisicoquímicos en agua potable de Zimapán, Hidalgo, México. Periodo 03/99-03/00.

¹Límites permisibles para agua potable (Secretaría de Salud, 1996).

Parámetros Fisicoquímicos	Norma Mexicana ¹	Pozo II	Pozo III	Pozo IV	Pozo V	Pozo VI	DLAE1	DLAE2	DLAE3	DLA	DLB	SalDLA
Temperatura en °C	—	22.3	21.2	23.4	25.6	21.6	22.1	22.8	24.1	23.0	22.1	22.8
pH en unid. pH	6.5-8.5	7.2	7.0	8.0	7.3	7.6	7.1	7.2	7.5	7.7	7.6	7.5
Conductividad en ms. cm ⁻¹	—	449	639	485	497	383	646	498	445	530	515	517
Turbidez en UTN	5	0.24	0.72	0.35	0.47	0.68	0.27	0.39	0.34	23.46	0.97	0.72
SDT en mg. l ⁻¹	1000	220	314	238	244	188	317	245	219	260	253	254
Cl ₂ residual en mg. l ⁻¹	0.2-1.50	0.02	3.00	0.02	0.02	0.02	3.0	0.02	0.02	1.33	1.5	0.33
Dureza total en mg. l ⁻¹	—	312.7	324.3	150.8	348.6	267.3	333.4	335.5	303.6	393.5	341.4	331.1
Dureza cálcica en mg. l ⁻¹	—	93.6	112.6	57.5	106.6	107.0	125.8	98.4	82.36	109.8	120.1	146.2
Sólidos totales en mg. l ⁻¹	—	247.6	397.2	285.2	307.3	261.9	402.7	319.0	270.7	353.6	314.1	321.4
N-NO ₃ ⁻ en mg. l ⁻¹	10	0.27	1.28	0.13	0.04	3.17	1.37	0.04	0.10	0.53	0.34	0.33
N-NO ₂ ⁻ en mg. l ⁻¹	0.05	0.001	0.002	0.001	0.002	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
N-NH ₄ ⁺ en mg. l ⁻¹	0.5	0.02	0.05	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Fenoles en mg. l ⁻¹	0.001	0.001	0.007	0.003	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001

Distribuidor lado A (DLA); entradas al distribuidor por el lado A (DLAE1, DLAE2 y DLAE3);

Distribuidor lado B (DLB) y salida del distribuidor por lado A (SalDLA).

Tabla 2. Concentraciones promedio de elementos totales (mg · l⁻¹) en agua potable de Zimapán, México en el periodo 03/99-03/00.

Sitios de Muestreo	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
Norma Mexicana ¹	—	—	200	—	—	400	250
Pozo II	29.32	8.41	11.41	2.16	301.43	45.11	4.45
Pozo III	30.97	4.62	5.90	4.22	301.43	25.85	5.94
Pozo IV	15.61	6.02	10.00	1.21	232.01	54.84	4.23
Pozo V	28.32	6.81	5.70	2.24	323.39	48.48	1.11
Pozo VI	13.69	7.23	8.13	1.87	248.59	42.01	3.67
DLAE1	26.62	6.92	9.42	2.75	422.60	27.40	6.80
DLAE2	25.51	6.71	5.80	2.22	248.59	49.90	1.06
DLA	26.80	7.34	5.53	1.85	278.24	44.37	4.10
DLB	25.70	6.80	4.98	1.70	248.59	46.48	3.83
SalDLA	26.71	7.12	5.33	1.70	273.44	44.62	4.38
DLAE3	29.01	8.44	10.62	2.16	300.00	19.03	4.96

¹Límites permisibles para agua potable (Secretaría de Salud, 1996). Distribuidor lado A (DLA); entradas al distribuidor por lado A (DLAE1, DLAE2 y DLAE3); salida del distribuidor por lado A (SalDLA) y distribuidor lado B (DLB).

Contenido de elementos de importancia ambiental en aguas subterráneas.

Los elementos que se han considerado de importancia ambiental son Cd, Hg, Pb, Cr y As debido a su alta toxicidad. En el estudio realizado a las aguas de los pozos de Zimapán se obtuvieron concentraciones de mercurio, cadmio y cromo menores a lo establecido en la normativa mexicana (Secretaría de Salubridad, 2000) como se aprecia en la tabla 3, mientras que la concentración de arsénico en el agua de los pozos y del distribuidor general presentaron una situación crítica ya que es muy superior a lo establecido; sólo en el agua del pozo VI se determinaron concentraciones de arsénico dentro de los límites permisibles. En cuanto al contenido de plomo en las aguas de los pozos y del distribuidor los valores fueron normales y dentro de los límites permisibles.

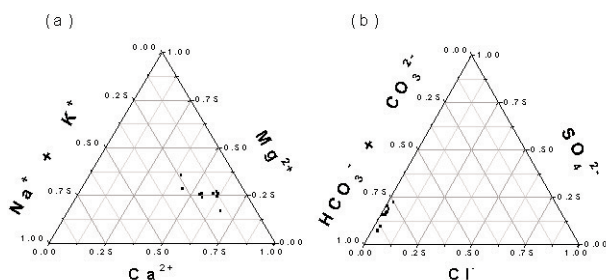


Figura 3. Diagrama trilineal de Piper para aguas muestreadas en los sitios seleccionados de Zimapán, Hidalgo, México. (a) cationes y (b) aniones.

Las concentraciones de los elementos Zn, Al, Ba y Fe de menor toxicidad se encontraron dentro de los niveles permisibles (tabla 3); sin embargo, la concentración del Mn está por arriba de lo normado, a pesar de tratarse de un elemento considerado como no tóxico, ni peligroso, ni acumulativo como el As (Rawlins *et al.*, 1999). No debe menospreciarse la contribución de los niveles de Mn en relación con el posible desarrollo de enfermedades en la población expuesta (Galvão y Corey, 1987).

Los pozos con mayores índices de contaminación por arsénico fueron II, IV, V y VI, que tienen profundidades mayores de 100 m; en tanto que el pozo III que tiene una profundidad de 3 a 4 m tuvo concentraciones de arsénico dentro de los límites permisibles por la norma mexicana, además de que este pozo es transversal.

Es importante señalar que el pozo V es uno de los más críticos en cuanto a los contenidos de As, ya que su concentración es el doble de la del pozo IV que está cerrado actualmente pero que alcanzó una concentración de hasta 1.5 mg·l⁻¹ de As en el agua durante el tiempo que estuvo funcionando (CNA, 1993).

El pozo VI aporta una mínima cantidad de agua al distribuidor ya que es consumida fundamentalmente en la comunidad aledaña a él y en las que se hallan en su trayecto hacia el distribuidor como es la comunidad de El Muhí.

Tabla 3. Concentraciones promedio de elementos totales (µg · l⁻¹) en aguas potables de Zimapán, Hidalgo, México. Periodo 03/99-03/00.

Sitios de muestreo	Hg	Cd	Cr	Pb	As	Zn	Mn	Fe	Al	Ba
Norma Mexicana ¹	1	5	50	25	50	5000	150	300	200	700
Pozo II	< 0.5	1	10	30	70	41	360	120	60	72
Pozo III	< 0.5	1	0.1	4	40	17	320	60	4	66
Pozo IV	< 0.5	1	6	11	240	20	210	1200	146	14
Pozo V	< 0.5	5	< 0.1	12	480	8	330	260	22	48
Pozo VI	< 0.5	2	< 0.1	10	80	23	380	220	210	90
DLAE1	< 0.5	< 1	15	2	120	11	320	40	22	126
DLAE2	< 0.5	< 1	< 0.1	9	420	26	370	170	33	10
DLAE3	< 0.5	1	4	4	70	20	110	5	57	150
DLA	< 0.5	3	< 0.1	13	360	14	340	310	142	72
DLB	< 0.5	< 1	1	23	280	8	330	480	40	71
SalDLA	< 0.5	< 1	1	< 2	300	7	336	183	23	155

¹Límites permisibles para agua potable (Secretaría de Salud, 1996). Distribuidor lado A (DLA); distribuidor lado B (DLB); salida del distribuidor por lado A (SalDLA) y entradas al distribuidor (DLAE1, DLAE2 y DLAE3).

Por otra parte, el pozo VI, está ubicado en la comunidad de Venustiano Carranza sobre roca volcánica de alta resistencia y no permeable, correspondiente a la franja Este de la cuenca de Zimapán (Cárdenas, 1992), mientras que los pozos II, III, IV y V están sobre roca caliza del tipo conglomerado, material blando de alta permeabilidad a la que se le asocian minerales arsenopiríticos próximos a zonas de altos flujos de corrientes superficiales y a mayores profundidades.

Variación temporal de la composición de aguas subterráneas.

De los parámetros físico-químicos, iónicos y elementos analizados a las aguas de los pozos y distribuidor general de Zimapán se apreció que prácticamente sus concentraciones se mantienen constantes y dentro de los límites establecidos por la norma mexicana, con la excepción de los elementos As y Mn que alcanzaron concentraciones superiores; el primero en un rango de 2 a 10 veces por encima de los límites permisibles, esto lo hace extremadamente peligroso para la salud de los habitantes de la región de Zimapán y el segundo en 2 veces el límite permisible, por lo que se requiere tomar las precauciones necesarias.

La figura 4 indica el comportamiento promedio a lo largo de un año de muestreo de los elementos As, Pb, Fe y Mn a la salida del distribuidor (SaDLA).

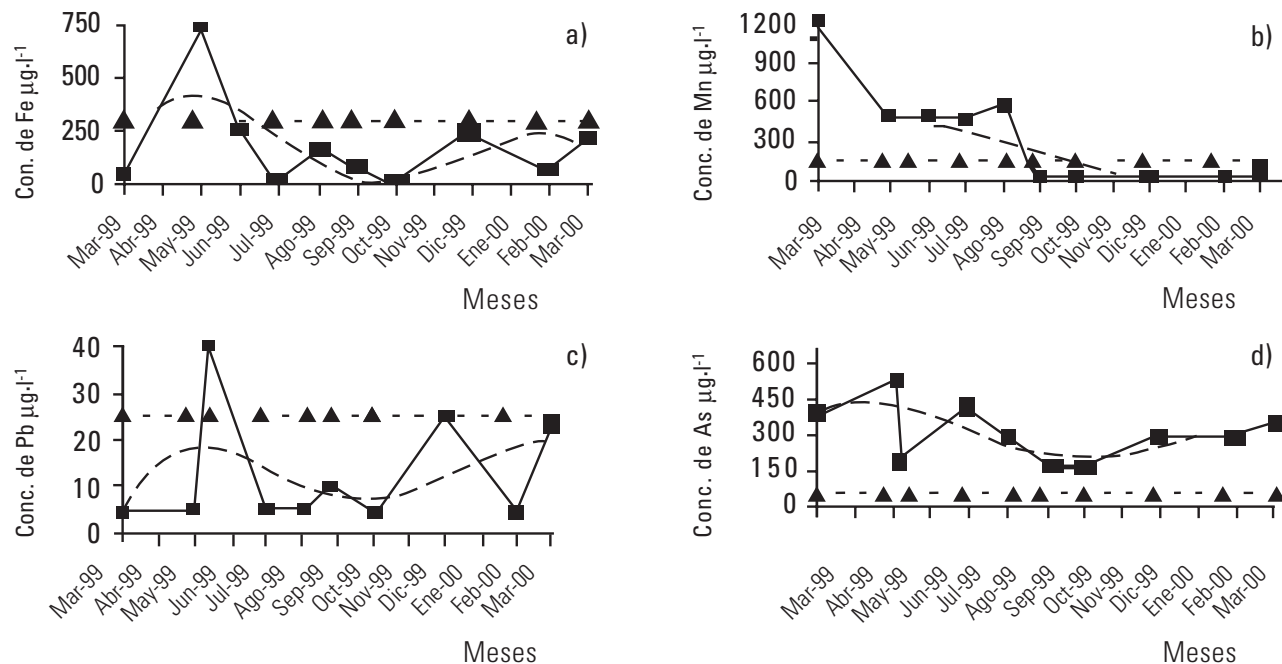


Figura 4. Valores medios de las concentraciones de los elementos: a) hierro, b) manganeso, c) plomo y d) arsénico, durante el periodo de muestreo a la salida del distribuidor por lado A (SaDLA). ____ Valor promedio mensual del elemento; - - -▲- - - Valor establecido por la Norma Mexicana; Tendencia.

Los primeros tres elementos estudiados mostraron variaciones significativas de carácter estacional dependientes de los períodos de lluvia y sequía, ya que existió una tendencia generalizada de incremento en sus concentraciones durante los meses de febrero a marzo (temporada de escasas lluvias) y una disminución relativa en el periodo abril- julio (temporadas de lluvias), aparentemente debido a efectos de dilución causada por la precipitación pluvial que se infiltra al manto freático, mientras que para el manganeso la tendencia de disminución no está afectada por el periodo estacional y sus concentraciones tienden a aproximarse a los límites máximos permisibles.

Análisis multivariado

La matriz de correlación de los parámetros químicos (pH, cloro libre residual, dureza, cloruros, sulfatos, aluminio, etc.) muestra un grado de correspondencia entre las distintas variables de $r^2 = 0.4438$. En la tabla 4 se aprecia la elevada correlación de la concentración de arsénico con cloro residual; concentración de aluminio con pH y hierro; cadmio con plomo y zinc; entre otros.

Los resultados del análisis en componentes principales (ACP) nos indican que la dimensionalidad de la matriz de datos puede reducirse a siete variables con valores propios que oscilan desde 5.93 a 1.0 y que explican el 95% de la varianza. El dendograma obtenido por análisis cluster utilizando el mé-

Tabla 4. Matriz de correlación multivariado del análisis de aguas de pozos de Zimapán, Hgo.

	pH	Cl ₂	Dza.	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Al	Cd	Fe	Mn	Pb	As
	res.	tot.									
Cl ₂	-0.44										
Dureza total	-0.50	0.34									
Dureza	-0.39	0.44	0.68								
Ca	-0.12	0.66	-0.10								
Al	0.68	-0.37	-0.46	-0.06	-0.42						
Ca	-0.64	0.36	0.71	0.14	0.27	-0.82	0.22				
Cr	-0.23	0.27	-0.21	0.57	0.14	-0.14	0.24				
Fe	0.25	-0.47	-0.28	-0.17	-0.25	0.78	0.18				
Pb	0.12	-0.26	0.02	-0.25	0.56	0.16	0.71	0.07	0.11		
Zn	-0.17	-0.37	-0.28	-0.05	0.16	0.26	0.63	0.35	-0.08	0.50	
As	0.17	0.69	0.33	0.37	-0.04	-0.21	-0.13	-0.36	-0.35	0.02	
Mg	0.12	-0.54	0.18	-0.09	0.17	0.19	0.45	0.30	0.61	0.34	-0.12

Abreviaciones: res. = residual; Dza.= dureza; tot. = total. En negritas se presentan altas correlaciones.

todo de "linkage" de Ward y la distancia media de Pearson (Fig. 5) muestra la correlación que existe entre el pozo II y el distribuidor lado A entrada 3 (DLAE3), lo que permite afirmar que este punto esta en correspondencia con el bombeo de dicho pozo. Lo mismo se aprecia entre el pozo III y el distribuidor del lado A entrada 1 (DLAE1) y entre el pozo V y el distribuidor lado A entrada 2 (DLAE2).

La conexión entre los puntos 9 y 11 (DLA y DLB), es igualmente válida toda vez que ambos lados del distribuidor se comunican por la parte inferior del mismo, así también la que existe entre los puntos 9 y 11 con el 10 que corresponde con el punto de salida hacia la población (SalDLA).

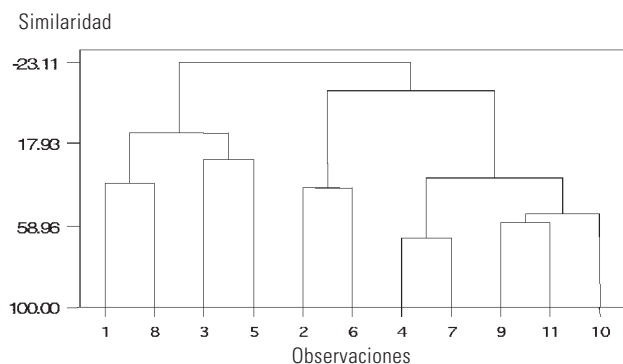


Figura 5. Dendrograma obtenido con las variables fisicoquímicas de aguas potables en los sitios de muestreo: pozo II (1), pozo III (2), pozo IV (3), pozo V (4), pozo VI (5), DLAE1 (6), DLAE2 (7), DLAE3 (8), DLA (9), SalDLA (10), DLB (11).

CONCLUSIONES

Por los resultados obtenidos del análisis físico-químico que presentan las aguas de Zimapán podemos concluir que éstas se comportan como aguas normales y potables del tipo bicarbonatadas cálcicas y mixtas aptas para el consumo humano, a no ser por los elevados valores de la concentración de arsénico presente.

Se ha corroborado que los niveles de contaminación por As en estas aguas están entre 2-10 veces por encima de lo permitido en la normatividad mexicana.

Los pozos con profundidades mayores a 100 m asociados a rocas carbonatadas presentan los niveles más altos de contaminación por As, mientras que aquellos pozos con profundidades menores de 100 m, norias, manantiales superficiales y pozos que están sobre rocas de origen volcánico, los niveles de concentración de As son menores o ligeramente superiores a lo normado.

La correlación de parámetros químicos que existe entre el agua en los puntos de muestreo del distribuidor general con los pozos que le suministran a éste, puede permitir controlar la composición del agua en el distribuidor en función del tiempo de bombeo de cada uno de los pozos, de los análisis del agua de los mismos y del flujo permitido para cada uno de ellos.

El arsénico presente en el agua subterránea es de origen natural mayoritariamente y antropogénico, debido a que en la región se realiza la extracción de minerales económicamente importantes asociados a minerales arsénopíricos, por lo que no disminuirá su concentración y podría incrementarse con el tiempo ya que las condiciones de oxidación de los minerales en el subsuelo están siendo favorecidas y consecuentemente su solubilidad en el agua subterránea.

Se considera necesario un monitoreo más amplio para el manganeso en virtud de que se encontraron en algunos meses concentraciones muy altas que pueden estar relacionadas con un error aleatorio de método ó a partículas sólidas presentes.

El nivel de concentración de plomo en las aguas está dentro de los límites normados, pero debido a la disminución gradual establecida para este elemento se requiere, junto con el arsénico, que sean removidos del agua de consumo mediante algún procedimiento de floculación, precipitación, intercambio iónico, adsorción o combinación de éstos, para que el único recurso acuífero con que cuenta esta región tenga posibilidades de ser explotado sin riesgo para la salud.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONACYT-SIZA por el apoyo financiero al proyecto "Estudio de la concentración y disminu-

ción de la toxicidad por arsénico y plomo en aguas y lodos acompañantes en pozos de Zimapán, Estado de Hidalgo, México", Clave: SIZA/98/19980806018. También agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, en especial a la Unidad Central de Laboratorios y al Centro de Investigaciones Químicas por su apoyo en el desarrollo del trabajo.

REFERENCIAS

- ARMIENTA, M. A. RODRIGUEZ, R. AGUAYO, A. CISNEROS, N. VILLASEÑOR, G. y O. CRUZ. 1997. Arsenic contamination of groundwater at Zimapán, Mexico. *J. Hydrogeology* 5: 39-46.
- BATSHEBA, A. G. 1996. Drinking water regulations in the United States of America. Government Affairs Coordinator. *Dallas Water Utilities*, pp. 1-15.
- CÁRDENAS, V. J. 1992. *Monografía Geológico-Minera del Estado de Hidalgo*. Secretaria de Energía Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaria de Minas e Industria básica. Consejo de Recursos Minerales. Pub. M-3e. Hidalgo, México. 96 p.
- CLESCERI, L. S. GREENBERG, A. E. y A. D. PATO. 1998a. *Standard methods for examination of water and wastewater*. Part 2000. Physical and aggregate properties 20th Edition. Edit. APHA-AWWA-WPCF. Washington, pp. 44-61.
- CLESCERI, L. S. GREENBERG, A. E. y A. D. PATO. 1998b. *Standard methods for examination of water and wastewater*. Part 3000. Metals. 20th Edition. Edit. APHA-AWWA-WPCF. Washington, pp. 1-51.
- CLESCERI, L. S. GREENBERG, A. E. y A. D. PATO. 1998c. *Standard methods for examination of water and wastewater*. Part 4000. Inorganic non-metallic constituents. 20th Edition. Edit. APHA-AWWA-WPCF. Washington, pp. 66-179.
- CLESCERI, L. S. GREENBERG, A. E. y A. D. PATO. 1998d. *Standard methods for examination of water and wastewater*. Part 5000. Aggregate organic constituents. 20th Edition. Edit. APHA-AWWA-WPCF. Washington, pp. 40-44.
- CNA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). Junio/1993. Análisis fisicoquímicos realizados a las aguas del Municipio de Zimapán, Hgo. Subgerencia de Administración del Agua. Reporte de la Gerencia Estatal de Hidalgo, México. 18 p.
- CUNNIFF, P. (Ed.). 1995. Chapter 11. *Waters and salts in Official methods of analysis of AOAC international*. 16th Ed. Arlington, Virginia, pp. 1-31.
- DAVIDOWSKI, L. 1993. A simple continuous flow hydride generator for ICP-OES. *Perkin Elmer*, Connecticut, pp. 1-7.
- DGG (DIRECCIÓN GENERAL DE GEOGRAFÍA). 1983. *Carta Hidrológica de aguas subterráneas*. Esc: 1:250,000 Mapa: Pachuca F-14-11. Ed. Secretaría de Programación y Presupuesto, México.
- GALVÃO, L. A. C. y G. COREY. 1987. *Arsénico*. Serie Vigilancia N° 3. Edit. CPEHS-PPS-OMS. Metepec, México, 70 p.
- HARPER, T. R. y N. W. KINHAM. 1992. Removal of arsenic from wastewater using chemical precipitation methods. *Water Environ. Res.* 64: 200-203.
- HEMMINGS, M. J. y E. A. JONES. 1991. The speciation of arsenic (V) and arsenic (III), by ion-exclusion chromatography, in solutions containing iron and sulphuric acid. *Talanta* 38: 151-155.
- HUTCHINS, M. G. SMITH, B. RAWLINS, B. G. y T. R. LISTER. 1999. Temporal and spatial variability in stream waters of wales, the welsh borders and part of the west midlands, UK. 1. Major ion concentration. *Water Res.* 33: 3479-3491.
- INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA). 2000. *XII Censo General de Población y Vivienda*. Ed. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Hidalgo, México.
- JANJIC, J. CONKIC, L. J. KIURSKI, J. y J. BENAK. 1997. A method for arsenic level determination and a device for arsenic reduction in drinking water. *Water Res.* 31: 419-428.
- MINISTERIO DE SANIDAD Y CONSUMO. 1997. Calidad de las aguas destinadas al consumo humano. *Boletín Oficial del Estado* (BOE), España, octubre 16, pp. 1-19.
- MÜNCH, L. y E. ANGELES. 1997. *Métodos y técnicas de Investigación*. Edit. Trillas. México, pp. 99-114.
- NÖLTE, J. 1991. Continuous flow hydride generation combined with conventional nebulization for ICP-AES determination. *Atomic Spectroscopy* 12: 199-203.
- RAWLINS, B. G. SMITH, B. HUTCHINS, M. G. y T. R. LISTER. 1999. Temporal and spatial variability in stream waters of wales, the welsh borders and part of the west midlands, UK. 2. Alumino-silicate mineral stability, carbonate and gypsum solubility. *Water Res.* 33: 3492-3502.
- SECRETARÍA DE SALUD. 1995. Bienes y Servicios. Especificaciones sanitarias del agua purificada envasada NOM-041-SSA1-1993. *Diario Oficial de la Federación*, México. pp. 14-66.
- SECRETARÍA DE SALUD. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. *Diario Oficial de la Federación*, 18-01-96. México. Primera sección, pp. 41-46.
- SECRETARÍA DE SALUD. 2000. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. *Diario Oficial de la Federación*, 22-11-00. México. Primera sección, pp. 73-79.
- WASAY, A. S. HARON, J. UCHIUMI, A. y S. TOKUNAGA. 1996. Removal of arsenite and arsenate ions from aqueous solution by basic yttrium carbonate. *Water. Res.* 30: 1143-1148.

Recibido: 4 de octubre de 2002.

Aceptado: 30 de junio de 2003.