



Revista Mexicana de Ciencias
Geológicas

ISSN: 1026-8774

rmcg@geociencias.unam.mx

Universidad Nacional Autónoma de
México
México

Huizar-Álvarez, Rafael; Varela-González, Gricelda Gabriela; Espinoza Jaramillo,
Magdalena
Sistemas de flujo subterráneo y contenido de fluoruro en el agua de Tenextepango,
Morelos, México
Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 31, núm. 2, 2014, pp. 238-247
Universidad Nacional Autónoma de México
Querétaro, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57231524007>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Sistemas de flujo subterráneo y contenido de fluoruro en el agua de Tenextepango, Morelos, México

Rafael Huizar-Álvarez^{1,*}, Gricelda Gabriela Varela-González² y Magdalena Espinoza Jaramillo²

¹ Universidad Nacional Autónoma de México Instituto de Geología, Cd. Universitaria, Coyoacán, 04510 México, D.F., México.

² Posgrado en Ciencia de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cd. Universitaria, Coyoacán, 04510 México, D.F., México.

* huizar@unam.mx

RESUMEN

En la región de Tenextepango, estado de Morelos, el agua subterránea que consume la población tiene un contenido de fluoruro que varía de 0.3 a 1.9 mg/L, el mayor contenido de fluoruro se observa en los pozos ubicados en el sector noreste. El objetivo de este trabajo es: (i) identificar los sistemas de flujo de agua subterránea en la región y (ii) qué sistema de flujo subterráneo presenta el mayor contenido de fluoruro. Para este estudio fue necesario establecer el marco geológico, obtener el valor de la temperatura del agua en campo, determinar el contenido de elementos mayores, menores, de isótopos estables y de tritio en el agua subterránea extraída. Esta información permitió identificar la zona de recarga y la posible relación entre el contenido de fluoruro y el tipo de sistema de flujo de agua subterránea. El contenido de fluoruro en el agua y la temperatura de ésta son mayores en los pozos que extraen agua de forma continua, y son menores en pozos que bombean agua unas siete hrs/día. El contenido de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ y tritio evidencia dos tipos de sistemas de flujo subterráneo. El primero corresponde a un agua enriquecida en $\delta^2\text{H}$ -66‰ y $\delta^{18}\text{O}$ -8.2‰, que se recarga a una altitud de 1,500 m s.n.m., el contenido de tritio varía entre 1.1 ± 0.7 y 2.4 ± 0.6 TU, indicando la presencia de agua con tiempo de residencia relativamente reciente, menor de 40 años, cuya temperatura es de 23 a 25 °C, pudiendo asociarla con un flujo subterráneo de tipo local. El segundo corresponde a un agua empobrecida en $\delta^2\text{H}$ -71‰ y en $\delta^{18}\text{O}$ -9.9‰, que se infiltra a una altitud de 3,500 m s.n.m.; el contenido de tritio es $< 0.8 \pm 0.6$ TU, lo cual sugiere un agua antigua de más de 40 años. Dicha agua tiene una temperatura de 25 a 33.0 °C, asociándose con un flujo de tipo local a intermedio. Lo anterior muestra que el agua extraída en los pozos representa una mezcla de agua antigua con agua más joven, y que el alto contenido de fluoruro se asocia principalmente al sistema de flujo de tipo local-intermedio.

Palabras clave: sistemas de flujo subterráneo; fluoruro; Tenextepango; México.

ABSTRACT

In Tenextepango region, Morelos state, the fluoride content in drinking groundwater population varies from 0.3 to 1.9 mg/L, highest fluoride content is observed in located wells in the northeast sector. Therefore,

the objective of this study is to identify: (i) the groundwater flow systems involved and (ii) which groundwater flow system has highest fluoride content. Chemical analysis results of extracted groundwater were used as well as groundwater field temperature, stable isotope content and tritium. Data permit to identify possible relationship between fluoride content and the hierarchy of the groundwater flow system type as well as to identify the recharge zone. Fluoride content and water temperature are higher in wells that extract water continuously, and are lower in wells that pump water about seven hrs/day. $\delta^2\text{H}$, tritium and $\delta^{18}\text{O}$ content, shows two types of groundwater flow system. The first corresponds to an enriched water, $\delta^2\text{H}$ -66‰ and $\delta^{18}\text{O}$ -8.2‰ to recharged at low altitude about 2,500 meters. The tritium content varies between 1.1 ± 0.7 y 2.4 ± 0.6 TU indicating the existence of water with residence time less than 40 years, associated with a relatively recent local flow whose temperature is 23 to 25 °C. The second corresponds to a depleted water content of -71‰ $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ -9.9‰, compared to the previous one, recharged to a higher altitude about 3,500 m a.s.l.; while tritium content is $< 0.8 \pm 0.6$ TU, and a well head temperature of 25 to 33 °C, suggesting a residence time older than 40, associated to a flow of local-intermediate type. Also, these values indicate that extracted water in these wells is a mixture of old water with younger water, and the higher fluoride content is mainly present in the local-intermediate flow.

Key words: fluoride; groundwater flow system; Tenextepango; Mexico.

INTRODUCCIÓN

El flúor (F) es uno de los elementos traza importantes para la salud humana, se obtiene principalmente a través del consumo de agua. La evaluación de las causas de la elevada concentración natural del ion fluoruro en el agua subterránea implica identificar las fuentes de F, y comprender la solubilidad, el transporte y la precipitación del ion. En consecuencia, se han realizado numerosos estudios geoquímicos sobre diversos aspectos del fluoruro en el agua subterránea, particularmente respecto a la relación entre la concentración de fluoruro y la interacción agua-roca en acuíferos con diferentes escenarios geológicos (Nordstrom y Jenne, 1977; Edmunds *et al.*, 1984; Nordstrom *et al.*, 1989; Gaciri y Davies, 1993; Saxena y Ahmed, 2003; Gi-Tak *et al.*, 2006).

El flúor se incorpora a una variedad de minerales como: fluorita, criolita, itrio fluorita, maladrita, quiolita, topacio y villiamita entre

otros (Bailey 1980). Esta ocurrencia abarca secuencias ígneas peraluminicas y peralcalinas (Horbe *et al.*, 1991; Marshall *et al.*, 1998; Pauly y Bailey, 1999; Dolejs y Baker, 2004), pegmatitas (London, 1987) y gneises o aureolas de skarn (Pollard *et al.*, 1987). A pesar de la amplia ocurrencia natural del flúor y de la gran cantidad de estudios físico-químicos sobre los sistemas que lo aportan, aún se desconocen los controles fundamentales de cristalización de sus minerales en entornos magmáticos.

Altas concentraciones de fluoruro en agua subterránea se encuentran en áreas donde el sustrato rocoso tiene minerales con flúor (Handa, 1975; Wenzel y Blum, 1992). Las posibles fuentes de fluoruro en agua subterránea incluyen varios minerales del suelo y de las rocas, como fluorita, apatito, anfíboles y micas (Handa, 1975; Pickering, 1985; Wenzel y Blum, 1992; Bårdsen *et al.*, 1996; Subba Rao y Devadas, 2003), considerando a la fluorita (CaF_2), como la fuente predominante (Deshmukh *et al.*, 1995).

El flúor presente en minerales enriquecidos con flúor se disuelve gradualmente en agua y se vuelve uno de los principales elementos traza. Sin embargo, Nordstrom y Jenne (1977) indican que su solubilidad en agua dulce es baja y su velocidad de disolución es notablemente lenta. Por esto, algunos autores asumen que las altas concentraciones de fluoruro en el agua subterránea posiblemente son resultado de la disolución de la biotita, que puede contener cantidades significativas de flúor en los sitios de OH^- de su capa octaédrica (Nordstrom *et al.*, 1989; Li *et al.*, 2003). Según Kullenberg y Sen (1973) y Handa (1975), la existencia de fluoruro disuelto sólo es posible en condiciones físico-químicas favorables y cuando el tiempo de residencia es suficientemente largo.

El flúor libre es inestable y reacciona muy rápido para formar compuesto de fluoruro. Químicamente los iones de fluoruro y de OH^- son de carga negativa y tienen también casi el mismo tamaño iónico. Por esto, en las reacciones químicas el fluoruro puede sustituir fácilmente a los iones OH^- en muchos minerales (Saxena y Ahmed, 2003).

Lo anterior muestra que, no obstante los cuantiosos estudios relativos al fluoruro en el agua subterránea y la geoquímica del ion fluoruro, aún es poca la investigación referente a su procedencia desde la perspectiva de los tipos de sistema de flujo de agua subterránea. Por ejemplo, se documenta que en Corea del Sur y algunas áreas de China (Lee *et al.*, 1997; Kim, 2001) las concentraciones de fluoruro son de hasta 23 mg/L en pozos, y que se presentan típicamente en los pozos más profundos, así como en los acuíferos de litología granítica y gnéissica, tendencia que ha sido reconocida en muchos estudios sobre agua subterránea en terrenos graníticos (White *et al.*, 1963; Yun *et al.*, 1998). El aumento de la concentración de fluoruro en los pozos más profundos, posiblemente se debe al incremento de la temperatura, del tiempo de residencia y de la profundidad, lo que mejora la disolución de los minerales de la roca que contienen flúor (Nordstrom *et al.*, 1989; Saxena y Ahmed, 2003).

En México es abundante la literatura referente a la presencia de fluoruro en el agua subterránea. Sin embargo, únicamente Carrillo-Rivera *et al.* (2002, 2007 y 2008), Sánchez-Días (2007), Ortega-Guerrero (2009) y Varela-González *et al.* (2013), han documentado la presencia de fluoruro en el agua en el contexto de la teoría de los sistemas de flujo de agua subterránea propuesta por Tóht (1962, 1963 y 2000). Sánchez-Días (2007) reporta que las rocas ígneas de composición ácida aportan mayor cantidad de fluoruro al agua subterránea con respecto a las rocas de composición intermedia y básica.

Es importante destacar el papel de la hidrogeología en el conocimiento y evaluación de los diferentes aspectos químicos del agua y su posible incidencia en la salud de la población ya que, además del fluoruro, existen varios iones que ocasionan enfermedades al encontrarse disueltos en el agua de consumo humano (Selinus *et al.*, 2005; Edmunds y Smedley, 2005).

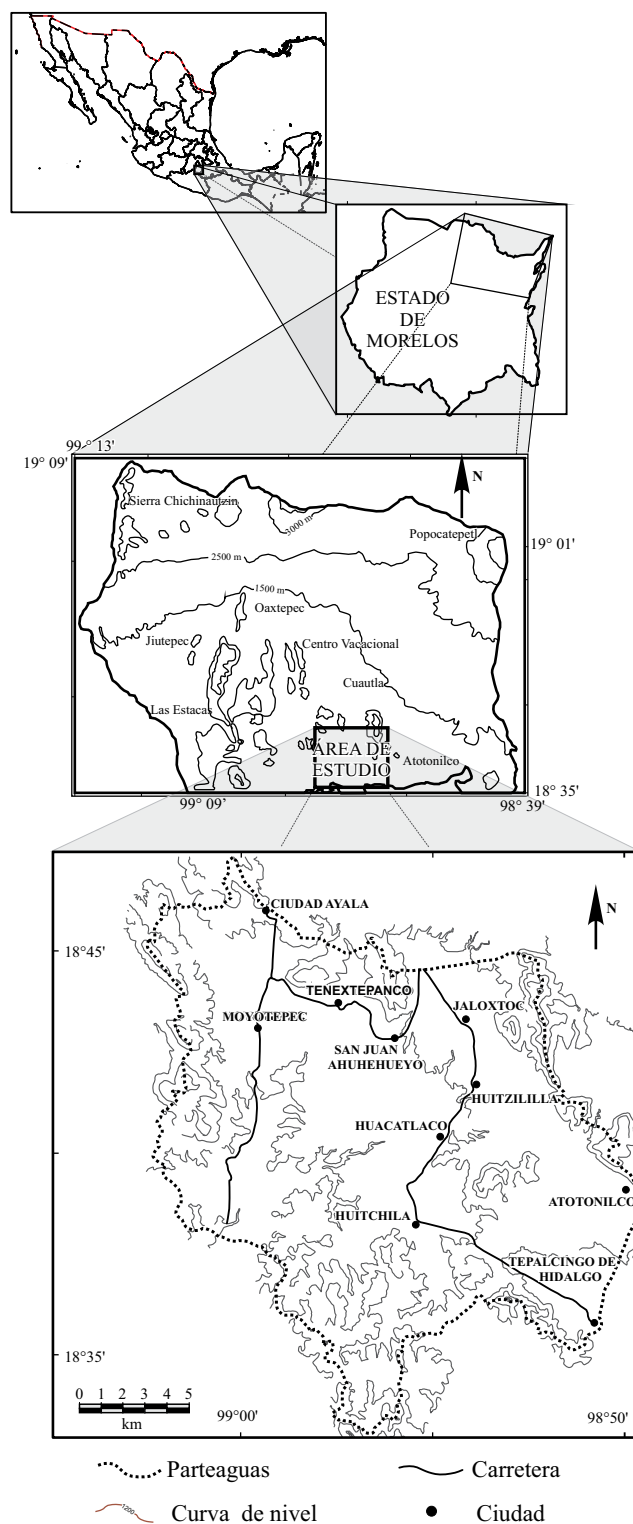


Figura 1. Localización de la región de Tenextepango al interior del Estado de Morelos.

En este estudio se propone: i) identificar los sistemas de flujo subterráneo en la región de Tenextepango y ii) conocer el sistema de flujo que presenta el mayor contenido de fluoruro, en la región de Tenextepango, Morelos (Figura 1).

METODOLOGÍA

Para este estudio, a partir del reconocimiento en el campo de la geología superficial y con base en la literatura preexistente consultada, se elaboró el marco geológico que fue la base del modelo hidrogeológico conceptual; se realizaron dos periodos de monitoreo del nivel estático del agua subterránea, cinco pruebas de bombeo, se colectaron 12 muestras de agua subterránea en pozos y dos en manantiales para cuantificar el contenido de aniones, cationes y elementos traza (Figura 2). Las muestras fueron filtradas con un filtro de celulosa de 0.45 μm de diámetro de poro; durante la obtención de cada muestra de agua se registró en campo el valor de la temperatura, pH, y C.E. En nueve muestras se determinó el contenido de isótopos estables (^2H y ^{18}O); la abundancia de (^2H y ^{18}O), fue medida con respecto al estándar VSMOW (Viena Standart Mean OceanWater), y se expresa en partes por mil (Clark y Fritz, 1997). La precisión de las mediciones fue de $\pm 0.08 \text{ ‰}$ para $\delta^2\text{H}$ y $\pm 0.9 \text{ ‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$. En seis muestras de agua subterránea se determinó el contenido de tritio enriquecido. La determinación de los iones mayores y menores se hizo mediante ICP-MS, el contenido isotópico se obtuvo por espectrometría de masas y por espectrómetro de centelleo líquido para tritio.

A partir de la interpretación de la información aquí generada y considerando el valor de la temperatura del agua registrada en campo, así como el contenido isotópico en la misma, se trató de establecer el área de recarga y el posible tipo de sistema de flujo de agua subterránea.

CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

Litoestratigrafía

De abajo hacia arriba, la columna litoestratigráfica (Figura 3) consta de: una secuencia de rocas caliza y dolomía en estratos gruesos que contienen pedernal en forma de nódulos, fósiles de rudistas y de gasterópodos; estas rocas constituyen la Formación Morelos de edad Cretácico Temprano (Fries, 1960; Aguilera-Franco, 1995). Sus afloramientos corresponden a núcleos de anticlinales dispuestos en orientación NW-SE que afloran en los sectores noroeste, oeste y este del área de estudio y se extienden fuera de ésta hacia el NW, SW y W. Su espesor medio es de 400 m.

Sobreyaciendo a la Fm Morelos, está la Formación Cuautla del Cretácico Superior, que consta de: i) caliza en estratos medianos, ii) caliza laminada en estratos delgados y iii) caliza clástica en estratos delgados (Fries, 1960; Hernández-Romano, 1995). Las rocas forman núcleos de anticlinales orientados de NW- SE que se extienden hacia el noroeste, suroeste y oeste del área de interés. Tienen un espesor de 350 m.

A los depósitos clásticos continentales terciarios integrados por; conglomerados calcáreo, volcánico, toba, caliza lacustre, arcilla y brechas, que cubren a las Formaciones Cuautla y Morelos, Fries (1960) los llamó Grupo Balsas y calculó un espesor de hasta 400 m, para esta secuencia que está distribuida en toda el área de estudio y también cubre una extensión regional fuera de ésta hacia el sur, suroeste, oeste y

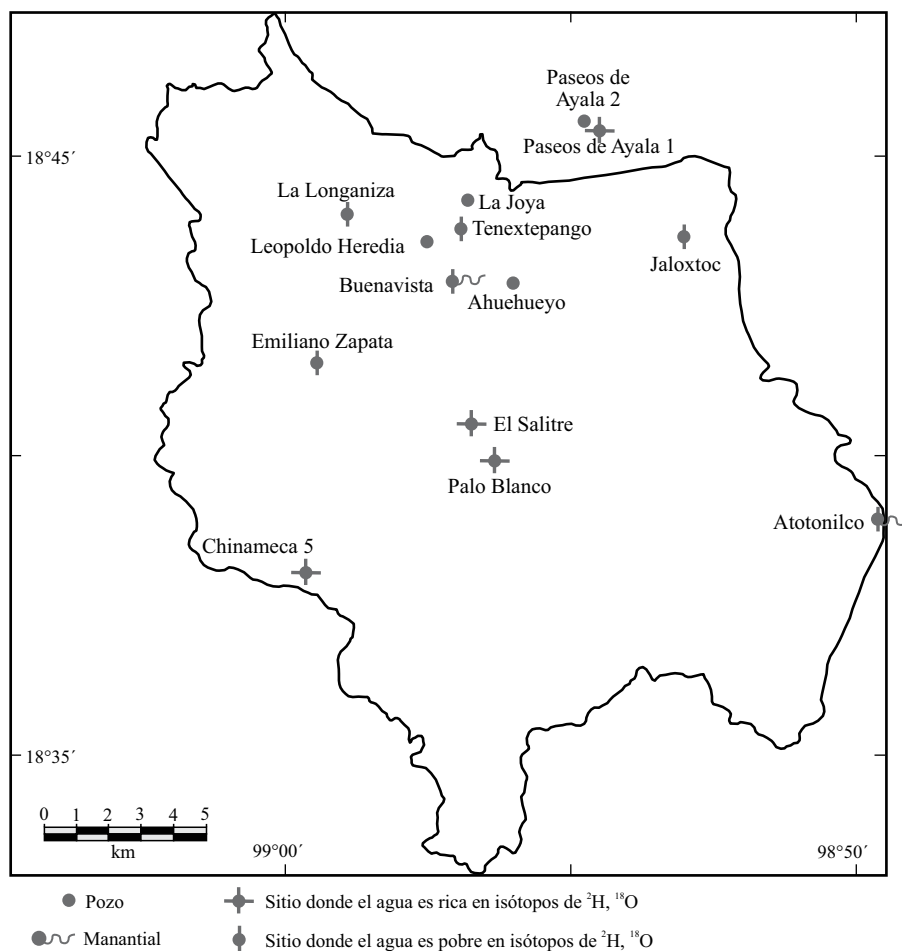


Figura 2. Ubicación de los sitios donde se colectó muestra de agua subterránea para análisis químico e isotópico, indicados por círculos. Los círculos cruzados por líneas señalan los sitios donde el agua es rica o pobre isotópicamente en ^2H y ^{18}O .

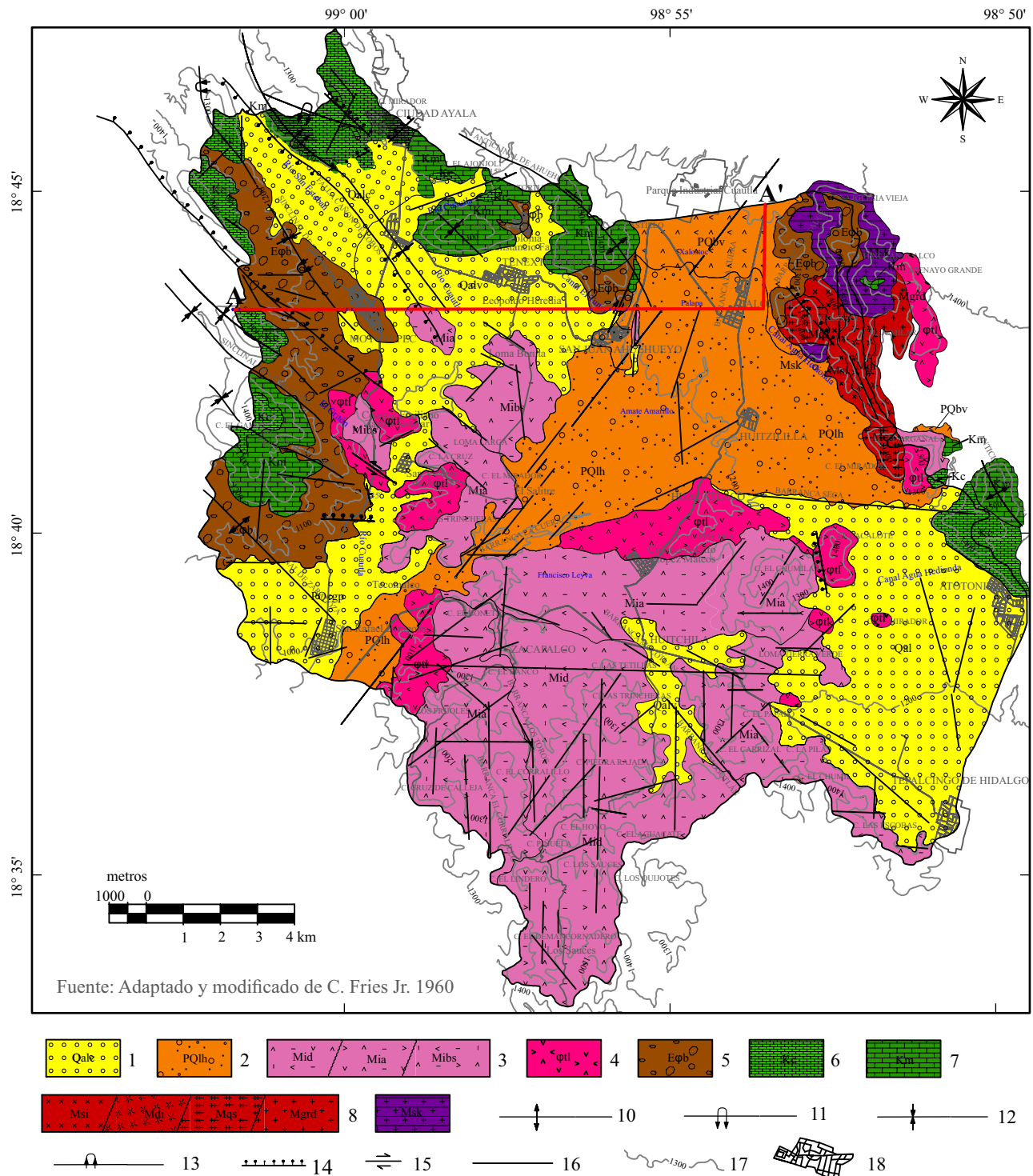


Figura 3. Mapa geológico de la región de Tenextepango, Morelos, tomado de Varela-González (2011). 1) Qalcv= aluvión: clásticos poligenéticos, 2) PQlh= Formación Tlayepac: volcanoclásticos poligenéticos (Reciente), 3) Mid, Mia, Mibs= grupo Ixtilco: derrames de lavas y material volcanoclástico asociado de composición intermedia a básica (Mioceno), 4) qtl= Formación Tlaica: principalmente ignimbritas, en cantidades menores lava y material volcanoclástico y riolitas (Oligoceno), 5) Efb= grupo Balsas: capas continentales compuestas de conglomerado, arena y brecha calcárea (Eoceno), 6) Kc= Formación Cuautla: calizas en capas gruesas a delgadas, con o sin nódulos de pedernal y fósiles silicificados (Cretácico Superior), 7) Km= Formación Morelos: caliza y dolomía interestratificadas, contiene fósiles de foraminíferos y rudistas (Cretácico Inferior), 8) Msi= sienita, Mdi= diorita, Mqs= cuarzo sienita, Mgrd= granodiorita Jantetelco, rocas intrusivas: diversos cuerpos irregulares intrusionando a las formaciones cretácicas y grupo Balsas (Mioceno), 9) Msk= rocas metamórficas: skarn (Mioceno), 10) anticlinal con traza del plano axial, en línea interrumpida donde el trazo es inferido, 11) anticlinal recostado con traza del plano axial, en línea interrumpida donde el trazo es inferido, 12) sinclinal con traza de plano axial, en línea interrumpida donde el trazo es inferido, 13) anticlinal recostado mostrando la traza del plano axial y el buzamiento de los flancos 14) falla normal, 15) falla lateral, 16) fractura, 17) curva topográfica, 18) área urbana.

norte. Dentro y fuera del área objeto de este estudio en algunos lugares el Grupo Balsas está cubierto por los sedimentos clásticos recientes del aluvión. Fries *et al.* (1955) proponen que el Grupo Balsas pertenece al Eoceno Tardío – Oligoceno Temprano.

Asimismo, dentro del área de estudio, el Grupo Balsas está cubierto parcialmente por una secuencia de rocas de ignimbrita y lavas de composición riolítica y riodacítica, que en conjunto tienen 150 m de espesor y que Fries (1960) llamó Formación Tlaica. Esta formación también presenta una alta densidad de fracturas cuyas orientaciones preferenciales son NE-SW, NW-SE y E-W, así como en unidades subyacentes.

Fries (1960) nombró como Grupo Ixtlilco a las rocas volcánicas no diferenciadas de composición química intermedia del Terciario medio, intensamente fracturadas que afloran en el centro y sur de la planicie. Varela-González (2011) indica que la secuencia consta de derrames de andesita de hornblenda y augita, basalto con hiperstena y olivino, y dacita con biotita, que en conjunto tienen un espesor aproximado de 200 m, que hacia el sur, fuera del área de interés forma una gran región volcánica.

La Formación Tlayecac consta de depósitos volcanoclásticos, lahars, conglomerados, brecha volcánica, arena y limo, que forma estratos de espesores variables con un espesor total de 150 m. Se extiende hacia el norte y noreste del área de estudio. La edad de esta Formación es pleistocénica (Fries, 1965).

Las rocas intrusivas están representadas por diques y troncos de diorita y granodiorita del Terciario medio (Fries, 1965; de Cserna y Fries, 1981) que afloran en el extremo oriente de la planicie. Como roca encajonante de estos intrusivos existe un cuerpo de skarn que afloran en el extremo noreste de la planicie.

Finalmente, el aluvión, constituido por depósitos fluviales (arcilla, limo, arena, conglomerado y bloques de hasta 1.5 m de diámetro). Se presentan en paquetes alternados con espesores variables y a menudo interdigitados. En el norte y noroeste de la planicie el aluvión es predominantemente calcáreo, mientras que en el resto del área es principalmente volcánico. El espesor estimado es de 100 m.

Unidades hidrogeológicas

La columna litoestratigráfica arriba descrita, indica que el marco geológico del área estudiada está constituido por sedimentos clásticos y volcanoclásticos de edades diferentes depositados por procesos fluviales, están interestratificados y forman el relleno de la planicie de Tenextepango. Asimismo están intercalados con paquetes de rocas volcánicas y sobreyacen a rocas carbonatadas, ígneas y metamórficas (Figura 4). Todas estas unidades litológicas se extienden hacia fuera del área de interés.

Desde el punto de vista hidrogeológico estas litologías se clasifican como unidades intergranulares y unidades de roca dura fisurada, cuyas propiedades se describen en seguida.

i) Unidades intergranulares: comprenden a los materiales clásticos y volcanoclásticos cuyos tamaños varían desde arcilla hasta conglomerado, forman estratos cuyo espesor varía desde 15 cm hasta 20 m, presentan estratificación cruzada y horizontes arcillo-limosos con espesor de 4 m, que originan condiciones semiconfinantes locales. Estas unidades intergranulares se extienden fuera del área estudiada hacia el norte, noreste, este y sur; mientras que hacia el W, su extensión se interrumpe por las rocas carbonatadas de la unidad fisurada.

El valor de la conductividad hidráulica de estos sedimentos se estimó mediante pruebas de bombeo, interpretadas mediante el método de Cooper y Jacob (1946), y varía de 1×10^{-3} a 5.8×10^{-4} m/s. Las pruebas de bombeo se realizaron en los pozos Tenextepango, Jaloxtoc, la Joya, Leopoldo Heredia y Paseos de Ayala 1. Actualmente, el abasto de agua para la población de esta región se obtiene a través de pozos que extraen agua de las unidades intergranulares (aluvión, Fm. Tlayecac o del Grupo Balsas).

ii) Unidades fisuradas: comprenden las rocas calizas, ígneas, volcánicas y metamórficas, mismas que presentan una alta densidad de fracturas que corresponden a las tres siguientes familias de fracturas regionales NE-SW, NW-SE y E-W. Éstas tienen abertura de hasta 30 cm, y hacen posible la intercomunicación hidráulica dentro de estas rocas; asimismo, originan una importante conductividad hidráulica.

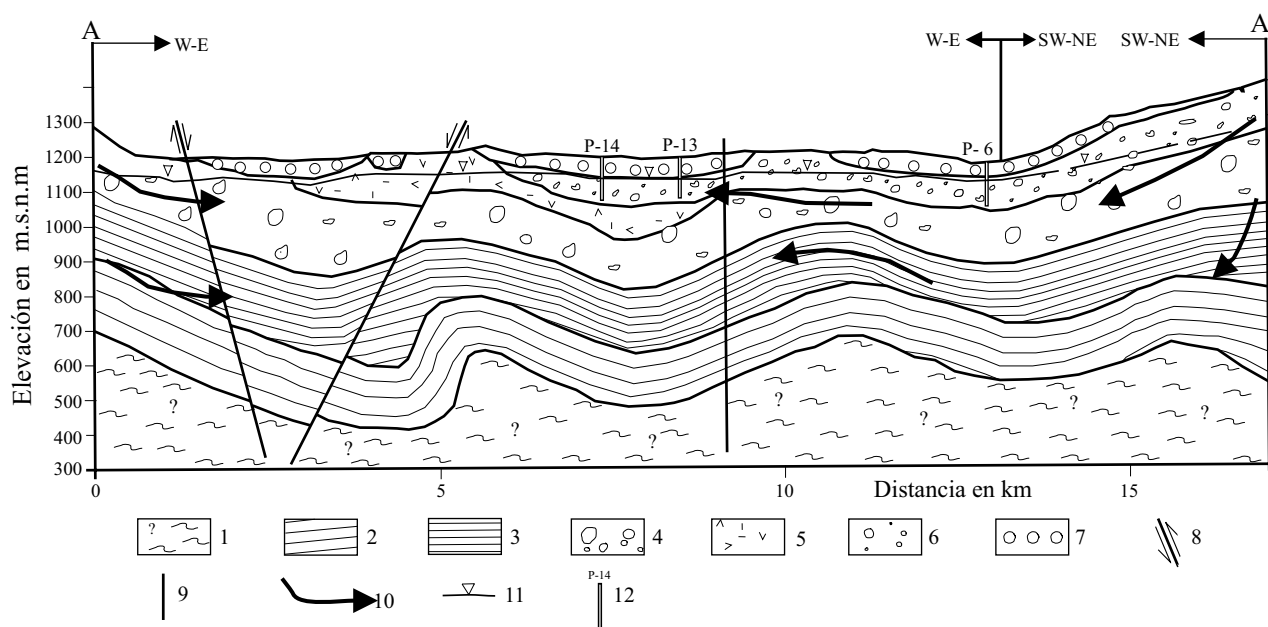


Figura 4. Sección hidrogeológica mostrando la disposición de los materiales en el subsuelo, nivel estático del agua subterránea y la circulación de flujo subterráneo (ver ubicación en la Figura 3). 1) Metamórfico indeterminado, 2) Fm. Morelos (caliza-dolomía), 3) Fm. Cuautla (Caliza), 4) Grupo Balsas (sedimentos clásticos poligenéticos), 5) Grupo Ixtlilco (basalto), 6) Fm. Tlayecac (sedimentos volcanoclásticos), 7) Aluvión, 8) falla normal, 9) falla lateral, 10) dirección del flujo subterráneo, 11) nivel estático, 12) pozo de extracción.

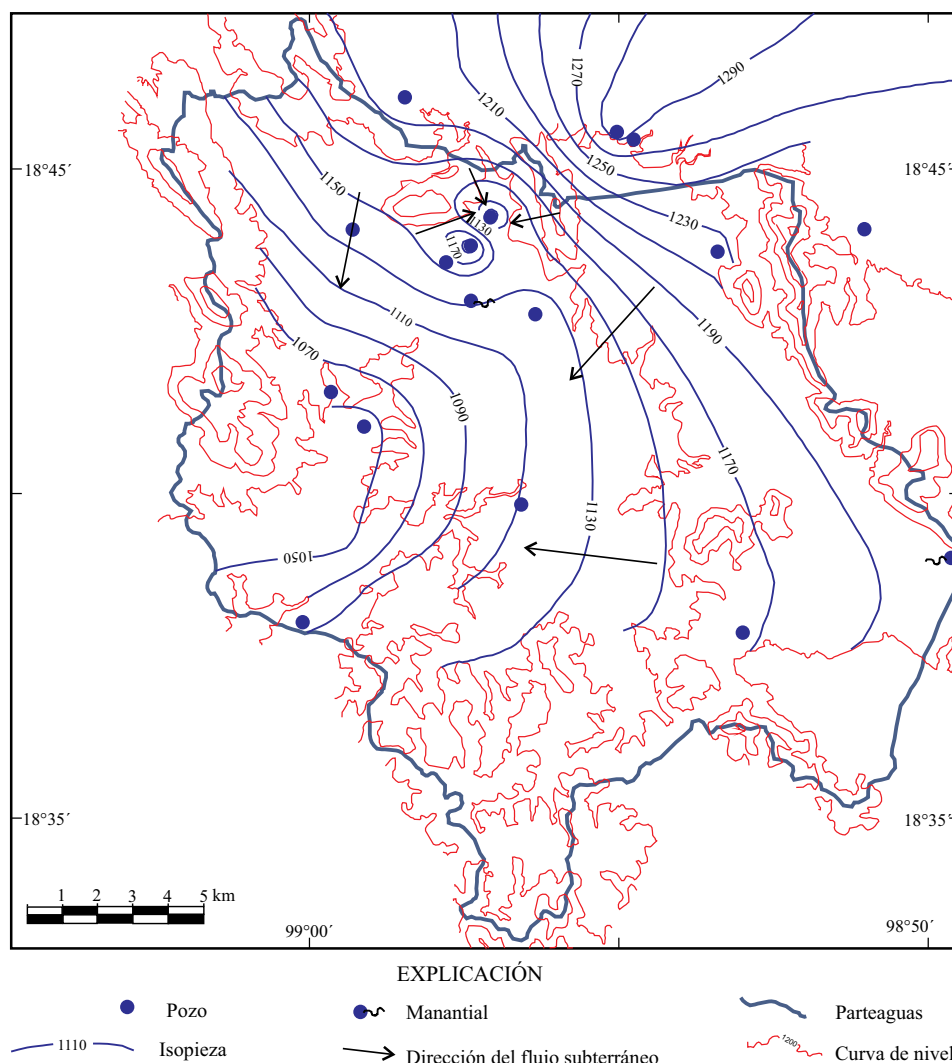


Figura 5. Dirección del flujo subterráneo de la región de Tenextepango, Morelos.

Debido a la ausencia de pozos en las rocas de estas unidades, el valor de la conductividad hidráulica se estimó considerando el grado de fracturamiento que presentan y varía entre 3×10^{-5} y 1.25×10^{-4} m/s (Domenico y Schwartz, 1998; Freeze y Cherry, 1979).

Por lo anterior, el modelo hidrogeológico está constituido de arriba hacia abajo por: i) una unidad intergranular integrada por los sedimentos del aluvión y de la Formación Tlayecac; ii) una unidad fisurada que agrupa las rocas duras de la Formación Tlaica y del Grupo Ixtlilco; iii) la unidad intergranular que corresponde al Grupo Balsas; iv) una unidad fisurada que incluye las rocas de las Formaciones Morelos y Cuautla; y finalmente, v) el posible basamento de origen metamórfico.

Considerando las características litológicas y las propiedades petrofísicas de los sedimentos y rocas duras arriba descritas, se deduce, que ambos tipos de litologías tienen una importante porosidad. En el primero por la poca compactación y cementación que presenta y en el segundo, debido al intenso fracturamiento que presenta.

Todo lo anterior permite decir que las unidades fisuradas e intergranulares tienen conexión hidráulica a través de las fracturas y, de esta manera, constituyen un gran acuífero de mixto (intergranular – fisurado), heterogéneo y anisótropo de condiciones hidrodinámicas libres.

La configuración de las líneas equipotenciales (Figura 5) muestra

pequeños conos de abatimiento en el sector norte y que el flujo subterráneo fluye principalmente de noreste a suroeste y de norte a sur, por lo que, la principal recarga proviene desde el relieve ubicado en esa dirección fuera del área de interés, así como desde el relieve local que delimita la planicie.

La elevación del nivel estático en los pozos Paseos de Ayala 1 y 2 está a 1,307 y 1,281 m s.n.m., respectivamente; mientras que en el pozo Chinameca 5 la elevación es de 1,042 m s.n.m., ubicados en el sector noreste y suroeste respectivamente, originando un gradiente hidráulico en esa dirección de 0.024 ‰.

HIDROQUÍMICA

El análisis químico del agua subterránea indica que los iones predominantes en orden descendente de su concentración son: bicarbonato (2.2 a 8.5 meq/L), sodio (2.0 a 7.9 meq/L), calcio (1.2 a 7.7 meq/L), magnesio (1.0 a 4.1 meq/L) y cloruro (1.7 a 3.3 meq/L) (Tabla 1). Al graficar en el diagrama de Piper (1944) los valores de concentración, se observa la presencia de una mezcla de agua en la cual hay pozos donde predomina muy ligeramente el ion sodio, en otros el calcio y en algunos

Tabla 1. Composición química del agua subterránea y su contenido de isótopos estables y tritio en la región de Tenextepango, Morelos (P = Pozo, M = Manantial, N/D = No disponible, UT = Unidades Tritio).

Muestra	Sitio	Temp °C	pH	Ca ²⁺ meq/L	Mg ²⁺ meq/L	Na ⁺ meq/L	K ⁺ meq/L	HCO ₃ ⁻ meq/L	Cl ⁻ meq/L	SO ₄ ²⁻ meq/L	F ⁻ mg/L	δ ¹⁸ O ‰	δD ‰	Tritio UT
T- 1	Atotonilco	M 33.31	7.1	2.188	1.941	2.834	0.133	2.564	1.976	2.186	1.20	-9.9	-69	<8
T- 2	Buenavista	M 24.00	7.22	4.502	1.580	4.148	0.382	5.806	2.205	1.824	0.84	-9.6	-69	N/D
T- 3	Chinameca 5	P 25.70	7.28	4.037	1.661	4.069	0.726	6.526	1.839	1.774	0.47	-8.7	-64	0.8 ± 0.7
T- 4	E.Zapata	P 23.10	7.13	6.771	1.752	5.041	0.388	5.922	1.727	3.331	0.20	-9.2	-66	N/D
T- 5	El Salitre	P 25.90	7.3	5.817	2.887	7.162	0.372	6.638	3.399	2.825	0.98	-8.1	-65	1.5 ± 0.6
T- 6	Jaloxtoc	P 25.30	7.01	7.750	1.252	7.575	0.567	8.556	1.721	1.901	0.75	-9.5	-71	1.1 ± 0.7
T- 7	La Joya	P 25.13	7.02	4.815	4.178	5.694	0.388	8.363	2.076	1.823	1.09			N/D
T- 8	La Loganiza	P 23.63	7.28	4.784	2.072	4.437	0.516	6.577	2.894	2.073	0.71	-9.8	-70	2.4±0.6
T- 9	Leopol-Heredia	P 24.80	7.35	5.023	2.519	7.962	0.387	7.540	2.965	1.978	1.05			N/D
T- 10	Palo Blanco	P 25.10	7.32	1.387	1.382	3.210	0.256	3.286	1.977	0.375	0.28	-8.7	-61	N/D
T- 11	P. Ayala 2	P 26.18	7.43	1.636	2.500	2.488	0.634	3.599	1.580	1.321	1.50			N/D
T- 12	P. Ayala 1	P 26.14	7.43	1.283	2.589	2.852	0.503	2.399	1.580	1.773	1.50			0.8 ± 0.7
T- 13	Sn J. Ahuehuevo	P 24.90	7.71	3.276	2.641	3.367	0.564	5.376	2.269	2.088	0.60			N/D
T- 14	Tenextepango	P 26.40	7.24	4.746	1.069	6.322	0.308	8.036	2.542	1.364	1.90	-9.8	-70	<0.8 ± 0.6

el magnesio (Figura 6). Esta mineralización en el agua en Tenextepango sugiere que el agua extraída fluye en parte por los materiales volcánicos de composición intermedia, que son los predominantes en esta región, y en parte por rocas carbonatadas; los primeros están constituidos principalmente por plagioclasa sódica, calcita y anfíboles, mientras que las segundas por calcita, mismos que por intemperización y disolución aportan estos iones al agua.

Fluoruro

Entre los elementos menores cuantificados predomina el fluoruro. El mayor contenido de este ion en el agua subterránea se presenta en el norte y noreste del área estudiada, donde el agua que se extrae de los pozos Paseos de Ayala 1 y 2, Tenextepango, Heredia y la Joya, contiene 1.5, 1.9, 1.09 y 1.05 mg/L de fluoruro respectivamente y tiene una temperatura > 25 °C; el agua que se extrae de los pozos restantes contiene de 0.2 a 0.8 mg/L de fluoruro y tiene una temperatura < 25 °C (Tabla 1). Los pozos Paseos de Ayala 1, 2, Tenextepango, Heredia y la Joya, operan de forma ininterrumpida, mientras los demás pozos operan unas siete hrs/día. Esta variación en el contenido de fluoruro en el agua y la diferencia de la temperatura indica que estos últimos pozos extraen agua de un flujo subterráneo más somero con respecto al agua extraída por los primeros.

Además, la temperatura del agua subterránea registrada en campo permite establecer dos intervalos: el primero de 20 a 25 °C y el segundo de 25 a 30 °C, correspondiendo a un agua tibia y a una moderadamente caliente respectivamente. Con base en esos intervalos de temperatura, Varela-González (2011) sugiere la posible existencia de dos sistemas de flujo subterráneo; el primero de tipo local, captado en los pozos que extraen agua sólo algunas horas al día y el segundo de tipo local-intermedio, captado en los pozos que extraen agua sin interrupción. Esa interpretación concuerda con la de Van-Lanen y Carrillo-Rivera (1998), quienes documentan que el uso de la temperatura del agua como un trazador natural para definir la presencia de un flujo de agua somero frío, y uno profundo más caliente, se considera una herramienta válida.

Por otra parte, la configuración de las isolíneas del contenido de fluoruro en el agua, el tiempo de bombeo en los pozos, así como la temperatura del agua en éstos (Figura 7), evidencian que el contenido de fluoruro en el agua se incrementa de NE a SW y de N a S, por inducción del bombeo. Es decir, el bombeo del pozo por tiempo indeterminado

induce el arribo de agua más profunda con un contenido de fluoruro sensiblemente mayor respecto al de agua más somera. Efecto que también ha sido documentado en otros lugares de México (Carrillo-Rivera *et al.*, 1996, 2002; Ortega-Guerrero, 2009; Huizar-Álvarez *et al.*, 2004).

Este comportamiento hidrogeoquímico del agua en el área estudiada es contrario a lo que se espera, ya que la evolución geoquímica no coincide con la dirección de flujo. Esto es un indicador de la presencia de componentes verticales inducidos por el bombeo, es decir, debido al bombeo se produce una mezcla de dos sistemas de flujo.

Isótopos estables Deuterio y Oxígeno 18

Con base en el contenido de deuterio y oxígeno 18 en el agua subterránea, empleando las técnicas isotópicas de Craig (1961), Gonfiantini (1978) y Rozanski *et al.*, (1993) y, considerando que la firma isotópica del agua aporta información acerca de su evolución a lo largo del sistema de flujo, se establecieron las áreas de recarga.

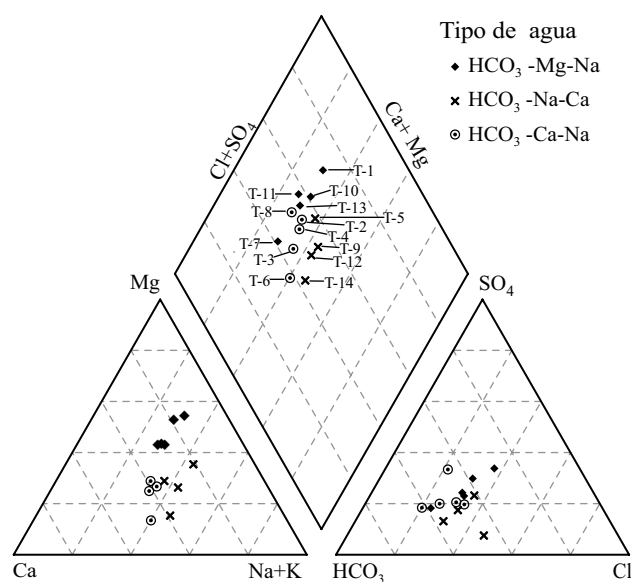


Figura 6. Ubicación de los tipos de agua subterránea en el diagrama de Piper.

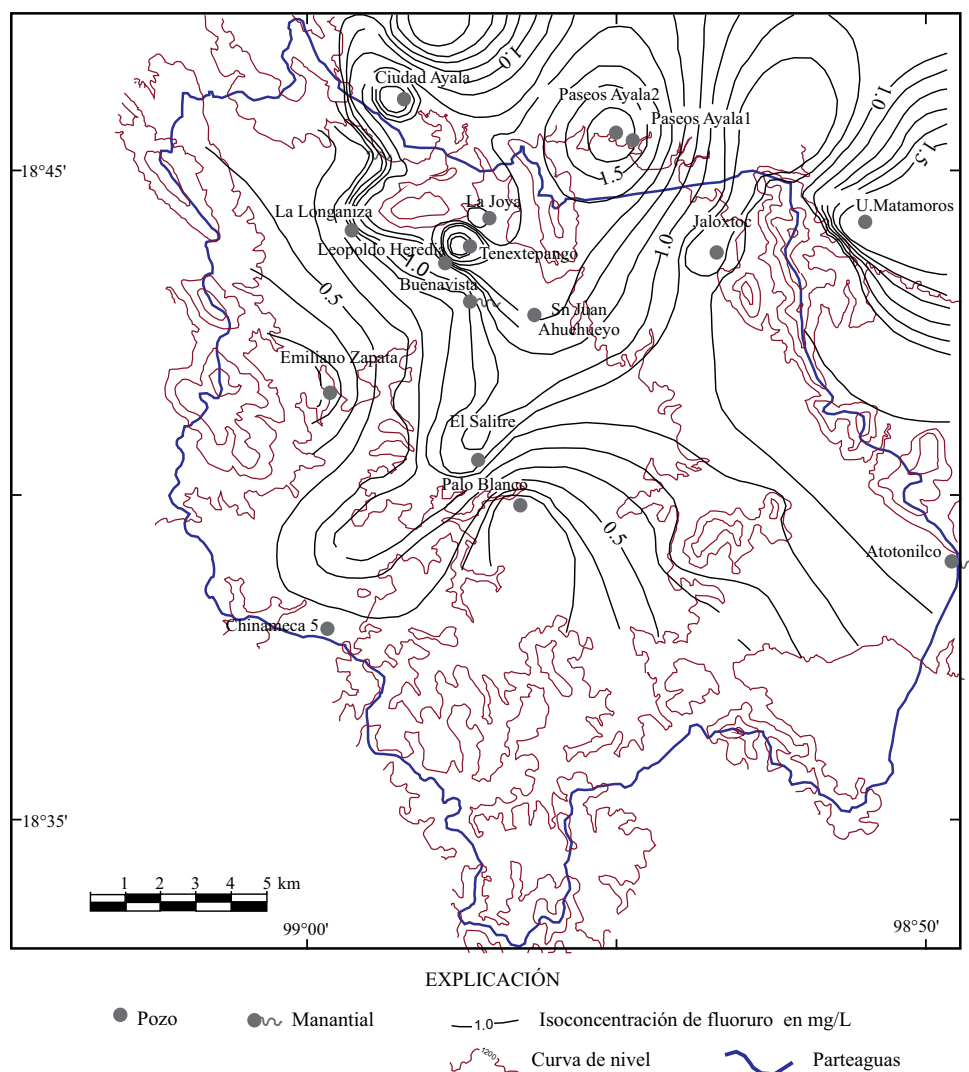


Figura 7. Distribución espacial del contenido de Fluoruro en el agua subterránea en la región de Tenextepango, Morelos.

El contenido isotópico de cada una de las muestras se graficó usando como referencia la línea meteórica mundial (LMM) y la línea meteórica local de la Sierra de las Cruces (LMLSC) (Cortes y Farvolden, 1988). En la Figura 8 se observa que todos los resultados se ubican en la línea meteórica mundial y muestran mínimos efectos de evaporación. Se identifican dos grupos, el primero formado por manantiales y pozos, y el segundo por pozos.

La firma isotópica del primer grupo varía de -69‰ a -71‰ en $\delta^2\text{H}$, y de -9.5‰ a -9.9‰ en $\delta^{18}\text{O}$. Es un agua empobrecida en isótopos, las muestras caen junto a la LMM, lo cual significa que el agua se infiltra rápidamente a través de fracturas en la parte alta de la montaña y es poco afectada por evaporación. El empobrecimiento isotópico de esta agua sugiere que la infiltración se debe efectuar a los 3,000 m s.n.m., y presenta el efecto de la elevación en el control isotópico como también sucede en zonas adyacentes al área estudiada, documentado por Jaimes-Palomera *et al.*, (1989), Vázquez-Sánchez *et al.*, (1989), Cortés y Durazo (2001; Edmunds *et al.*, (2002).

Los pozos del segundo grupo extraen agua más enriquecida en isótopos cuyas concentraciones varían de -61‰ a -66‰ en $\delta^2\text{H}$ y de -8.2‰ a -8.7‰ en $\delta^{18}\text{O}$. Esto indica que estos pozos están influenciados por agua superficial que se infiltra a menor elevación (1,500 m s.n.m.)

respecto de aquella que extraen los pozos del primer grupo y que el agua del segundo grupo es afectada por evaporación y puede asociarse con una recarga de tipo local. Asimismo, de acuerdo con Craig (1961), el contenido isotópico de ^{18}O aquí reportado hace suponer que existe una mezcla de un agua que se infiltra a baja altitud con agua que entra a una mayor altitud.

De las muestras aquí analizadas, el agua más empobrecida isotópicamente se encuentra en el norte y noreste de la zona y se relaciona con una mayor altitud del afloramiento de la roca donde se efectúa la recarga, mientras que el agua más enriquecida se ubica en la porción sur y centro, relacionada a una menor altitud del relieve, lo que concuerda con condiciones similares reportadas al norte de la zona de interés por Jaimes-Palomera *et al.* (1989) y Vázquez-Sánchez *et al.* (1989).

Tritio

El contenido de tritio en las muestras analizadas varía entre 2.4 ± 0.6 unidades tritio (UT) y $< 0.8 \pm 0.6$ UT, evidenciando la existencia de agua con un tiempo de residencia en el sistema menor a 40 años y de agua cuya antigüedad es mayor de 40 años (Tabla 1). De esta manera, los valores de tritio entre 1.1 ± 0.7 y < 8 UT se asocian con un sistema de flujo somero y relativamente reciente (flujo local), que presenta también

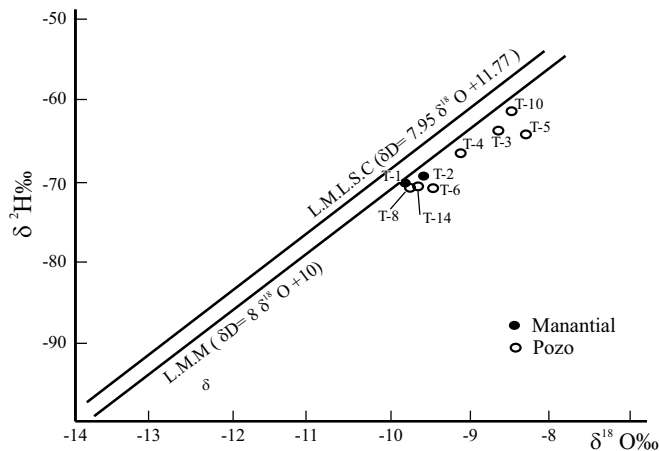


Figura 8. Correlación del $\delta^{18}\text{O}$ y δD , contenidos en el agua subterránea, en la región de Tenextepango, Morelos. L.M.M: línea meteórica mundial; L.M.L.S.C: línea meteórica local de la Sierra de las Cruces, establecida por Cortes y Farvolden (1988). Los sitios de muestreo se indican en la gráfica.

la influencia de una mezcla de agua joven y agua antigua captada por pozos que extraen agua únicamente una hora al día o el manantial Atotonilco cuya temperatura es de 33.3 °C. El agua con valores de tritio de < 0.8 UT y temperatura > a 25 °C se asocia con un sistema de flujo más profundo que el anterior (flujo local a intermedio), que también muestra la presencia de mezcla de agua joven y agua antigua, que es captado en los pozos que operan sin interrupción.

CONCLUSIONES

El modelo hidrogeológico de la región estudiada está constituido por dos unidades intergranulares interestratificadas con dos unidades fisuradas; estas dos últimas presentan las tres siguientes familias de fracturas: NE-SW, NW-SE y E-W, que afectan toda la secuencia de rocas duras y hacen posible una continuidad hidráulica en toda esa secuencia litoestratigráfica, formando de esta manera un acuífero de tipo mixto (intergranular-fisurado), cuya recarga tiene lugar en el relieve que delimita la planicie de Tenextepango y en aquel situado al exterior de la misma en sus lados N y NE.

El contenido de fluoruro y la temperatura del agua subterránea son menores en los pozos que bombean unas horas al día y mayores en los pozos que extraen agua de manera continua. Esto indica que el incremento de estos parámetros es inducido por el bombeo. Es decir, al bombear el pozo por tiempo indefinido se induce el arribo de agua más profunda con un contenido de fluoruro sensiblemente mayor respecto del agua más somera. Por lo tanto, se puede asociar el primer caso a flujo de tipo local y el segundo a un flujo local-intermedio. Esta interpretación es consistente con el valor de la temperatura del agua subterránea registrado en campo, misma que se clasifica como i) agua tibia (20–25 °C) y ii) moderadamente caliente de (25–33 °C), evidenciando la correspondencia de estos intervalos de temperatura con los sistemas de flujo subterráneo, arriba mencionados.

La firma isotópica del agua confirma lo anterior, ya que los datos isotópicos obtenidos indican que existe un agua empobrecida en isótopos que presenta poco efecto de evaporación, que se infiltra a una elevación de 3,000 m s.n.m., y un agua enriquecida en isótopos con efectos de evaporación, que se infiltra a menor altitud, en un relieve con elevación de 1,500 m s.n.m.

Asimismo, los valores de tritio entre 1.1 y < 8 UT, en un agua que

está enriquecida isotópicamente pueden asociarse con un sistema de flujo local relativamente reciente y somero, donde se presenta la influencia de mezcla de agua joven y antigua. Mientras los valores < 0.8 UT, son reflejo de un sistema de flujo de local a intermedio, más profundo que el anterior con más de 40 años de residencia en el sistema hidrogeológico, que presenta una mezcla de agua joven y antigua, y que fluye por rocas de las unidades fisuradas.

Es recomendable realizar una perforación de al menos 300 m de profundidad para hacer pruebas de extracción de agua a diferentes profundidades y obtener el perfil de fluoruro en la vertical para conocer la variación de este ion y, de esta forma, recomendar el esquema de operación de pozos profundos para controlar el contenido de fluoruro en el agua.

AGRADECIMIENTOS

Reconocemos al Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México el apoyo logístico para este trabajo, agradecemos al Dr. Thierry Calmus, su muy cuidadosa revisión y sus valiosos comentarios que ayudaron a mejorar este manuscrito.

REFERENCIAS

- Aguilera-Franco, N., 1995, Litofacies, paleoecología y dinámica sedimentaria del Cenomaniano-Turoniano en el área de Zotoltilán-La Esperanza, Estado de Guerrero, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Tesis de Maestría, 137 pp.
- Bailey J.C., 1980, Formation of cryolite and other aluminofluorides: a petrologic review: Bulletin of the Geological Society of Denmark, 29, 1-45.
- Bårdsen, A., Bjorvatn, K., Selving, K.A., 1996, Variability in fluoride content of subsurface water reservoir: Acta Odontologica Scandinavica, 54 (6) 343-347.
- Clark, I., Fritz, P., 1997, Environmental Isotopes in Hydrogeology: Lewis Publishers, CRC press, New York, 328 pp.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona, A., Moss, D., 1996, Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrogeochemical approach in the valley of San Luis Potosi, México: Journal of Hydrology, 185, 23-44.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona, A., Edmunds, W.M., 2002, Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosi basin, Mexico: Journal of Hydrology, 261, 24-47.
- Carrillo-Rivera, J.J., Huizar-Álvarez, R., Cardona, A., Varela-González, G.G., Graniel, C.E., Zenteno, G., 2007, Impactos ambientales relacionados al uso ineficiente del agua subterránea en México, Mapa NA XI-1 escala 1:5'000,000: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Nuevo Atlas Nacional de México, 1 mapa con texto.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona, A., Huizar-Álvarez, R., Graniel-Castro, E., 2008, Response of the interaction between groundwater and others components of the environment in Mexico: Environmental Geology, 55, 303-319.
- Cooper, H.H., Jacob, C.E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history: Transactions, American Geophysical Union, 27, 526-534.
- Cortes, A., Farvolden, R.N., 1988, Isotope studies of precipitation and groundwater in the Sierra de las Cruces, Mexico: Journal of Hydrology, 107, 147-153.
- Cortés, A., Durazo, J., 2001, Sobre la hidrogeología de la Cuenca de México: Ingeniería Hidráulica en México, 16 (2), 195-198.
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters: Science, 133, 1702-1703.
- De Cserna, Z., Fries, C., Jr., 1981, Hoja Taxco 14Q-h(7), con resumen de la hoja Taxco, estados de Guerrero, México y Morelos: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, Serie 1:100,000, 1 mapa con texto, 47 pp.
- Deshmukh, A.N., Valadaskar, P.M., Malpe, D.B., 1995, Fluoride in environment; a review: Gondwana Geological Magazine 9, 1-20.

- Dolejs, D., Baker, D., 2004, Thermodynamic analysis of the system (Na₂O-K₂O-CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O₂): Stability of fluorine-bearing minerals in felsic igneous suites Contribution: Mineral Petrol, 146, 762-778.
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W., 1998, Physical and Chemical Hydrogeology: New York, John Wiley and Sons, 506 pp.
- Edmunds, W.M., Smedley, P.L., 2005, Fluoride in natural waters, *en* Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J.A., Finkelman, R.B., Fuge, R., Lindh, U., Smedley, P.L. (eds.), *Essentials of Medical Geology: impacts of the natural environment on public health*: Amsterdam, Elsevier Academic Press, 301-329.
- Edmunds, W.M., Andrews, J.N., Burgess, W.G., Kay, R.L.F., Lee, D. J., 1984, The evolution of saline and thermal groundwater in the Carnmenellis granite: *Mineralogical Magazine* 48, 407-424.
- Edmunds, W.M., Carrillo-Rivera, J.J., Cardona, A., 2002, Geochemical evolution of groundwater beneath México City: *Journal of Hydrology*, 258, 1-24.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*: New Jersey Prentice Hall, Inc, Englewood, Cliffs, 602 pp.
- Fries, C.Jr., 1960, Geología del estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología Boletín 60, 236 pp.
- Fries, C.Jr., 1965, Hoja Cuernavaca (14Q-h (8), Resumen de la geología de la hoja Cuernavaca, estado de Morelos, México, Guerrero y Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, serie 1: 100 000, mapa y texto.
- Fries, C. Jr., Hibbard, C.W., Dunkle, D.H., 1955, Early Cenozoic vertebrates in the red conglomerates at Guanajuato, Mexico: *Smithsonian Miscellaneous Collection* 123 (7), 1-25.
- Gaciri, S.J., Davies, T.C., 1993, The occurrence and geochemistry of fluoride in some natural waters of Kenya: *Journal of Hydrology*, 143, 395-412.
- Gi-Tak, C., Seong-Taek, Y., Man-Jae Kwon., Yi-Seop Kim., Bernhard Mayer., 2006, Batch dissolution of granite and biotite in water. Implication for fluorine geochemistry in groundwater: *Geochemical Journal*, 40, 95-102.
- Gonfiantini, R., 1978, Standards for stable isotope measurement in natural compounds: *Nature*, 271:534-536.
- Handa, B. K., 1975, Geochemistry and genesis of fluoride containing groundwater in India: *Ground Water*, 13(3), 275-281.
- Hernández-Romano, U., 1995, Evolución sedimentológica de la secuencia cretácica en el área de Huitziltepec, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Tesis Maestría, 147 pp.
- Horbe, M.A., Horbe, A.C., Costi, H.T., Teixeira, J.T., 1991, Geochemical characteristics of cryolite-tin-bearing granites from Pitingamine, northwestern Brazil-a review: *Journal of Geochemical Exploration*, 40, 227-249.
- Huizar-Alvarez, R., Carrillo-Rivera, J.J., Ángeles-Serrano, G., Hergt, T., Cardona, A., 2004, Chemical response to groundwater extraction southeast of Mexico City: *Hydrogeology Journal*, 12(4), 436-450.
- Jaimes-Palomera, R., Cortes-Silva, A., Vázquez-Sánchez, E., Aravena, R., Fritz, P., Drimmie, R., 1989, Geoquímica isotópica del sistema hidrogeológico del valle de Cuernavaca, estado de Morelos, México: *Geofísica Internacional*, 28 (2), 219-244.
- Kim, S.Y., 2001, Hydrogeochemical, geostatistical and thermodynamical studies on deep thermal groundwater: Korea, Korea University, Ph.D, thesis, 180 pp.
- Kullenberg, B., Sen, G.R., 1973, Fluoride in Beltic: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37, 1327-1337.
- Lee, J.U., Chon, H.T., John, Y.W., 1997, Geochemical characteristics of deep granitic groundwater in Korea: *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, 4, 199-211. (en Coreano).
- Li, Z., Tainosho, Y., Shiraishi, K., Owada, M., 2003, Chemical characteristics of fluorine-bearing biotite of early Paleozoic plutonic rocks from the Sor Rondane Mountains, East Antarctica: *Geochemical Journal*, 37 (2), 145-161.
- London, D., 1987, Internal differentiation of rare-element pegmatites, effects of boron, phosphorus, and fluorine: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 403-420.
- Marshall, A.S., Hinton, R.W., MacDonald, R., 1998, Phenocrystic fluorite in peralkaline rhyolites, Olkaria, Kenya Rift Valley: *Mineral Mag*, 62, 477-486.
- Nordstrom, D.K., Jenne, E.A., 1977, Fluoride solubility in selected geothermal waters: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41, 175-188.
- Nordstrom, D.K., Ball, J.W., Donahoe, R.J., Whittemore, D., 1989, Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 1727-1740.
- Ortega-Guerrero, M.A., 2009, Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 143-161.
- Pauly, H., Bailey, J.C., 1999, Genesis and evolution of the Ivigtut cryolite deposit, SW Greenland: *Meddelelser om Grønland, Geoscience* 37, 37, 1-60.
- Pickering, W.F., 1985, The mobility of soluble fluoride in soils: *Environmental Pollution*, 9, 281-308.
- Piper, A. M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analysis: *Transactions American Geophysical Union*, 25, 914-923.
- Pollard, P.J., Pichavant, M., Charoy, B., 1987, Contrasting evolution of fluorine- and boron-rich tin systems: *Mineral Deposita*, 22, 315-321.
- Rozanski, K., Araguas-Araguas, L., Gonfiantini, R., 1993, Isotopic patterns in modern global precipitation, *en* Swart, P.K., Lohwan, K. L., McKenzie, J. A., Savin, S., (eds.), *Isotopic Record*: Washington, D.C, American Geophysical Union Monograph, 78, 1-37.
- Sánchez-Díaz, L.F., 2007, Origen, transporte distribución y concentración de los fluoruros en el Sistema hidrogeológico volcánico, Atemajac- Toluquilla, Jalisco, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis Doctoral, 128 pp.
- Saxena, V.K., Ahmed, S., 2001, Dissolution of fluoride in groundwater, a water-rock interaction study: *Environmental Geology*, 40, 1084-1087.
- Saxena, V.K., Ahmed, S., 2003, Inferring the chemical parameters for the dissolution of fluoride in groundwater: *Environmental Geology*, 43, 731-736.
- Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J.A., Finkelman, R.B., Fuge, R., Lindh, U., Smedley, P., 2005, *Essential of Medical Geology -Impacts of natural environment on public health*: Amsterdam Elsevier, Academic Press, 812 pp.
- Subba Rao, N., Devadas, D.J., 2003, Fluoride incidence in groundwater in an area of Peninsula India: *Environmental Geology*, 45, 243-251.
- Tóth, J., 1962, Theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta, Canada: *Journal of Geophysical Research*, 67 (11), 4375-4387.
- Tóth, J., 1963, Theoretical analysis of groundwater in small drainage basins: *Journal of Geophysical Research*, 68, 4791-4812.
- Tóth, J., 2000, Las aguas subterráneas como agente geológico causas, procesos y manifestaciones: *Boletín Geológico y Minero, Revista de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*, 111 (4), 9-27.
- Van-Lanen, A.J.H., Carrillo-Rivera, J.J., 1998, Framework for groundwater monitoring in (semi-) arid regions: UNESCO, Book Monitoring for groundwater management in (semi-) arid regions: *Studies and reports in Hydrology*, 57, 7-20.
- Varela-González, G.G., 2011, Niveles de fluoruro en el agua subterránea y condiciones de fluorosis en la región Tenextepango-Tepalcingo, Morelos: Universidad Nacional Autónoma de México Instituto de Geología, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis Maestría, 152 p.
- Varela-González, G.G., García-Pérez, A., Huizar-Alvarez, R., Irigoyen-Camacho, M.E., Espinoza-Jaramillo, M.M., 2013, Fluorosis and Dental Caries in the Hydrogeological Environment of Southeastern Communities in the State of Morelos, Mexico: *Journal of Environmental Protection*, 4, 994-1001.
- Vázquez-Sánchez, E., Cortes, A., Jaimes Palomera, R., Fritz, P., Aravena, R., 1989, Hidrogeología isotópica de los valles de Cuautla y Yauatepec, México: *Geofísica Internacional*, 28 (2), 245-264.
- Wenzel, W.W., Blum, W.E.H., 1992, Fluoride speciation and mobility in fluoride contaminated soil and minerals: *Soil Science*, 153(5), 357-364.
- White, D.E., Hem, J.D., Warming, G.A., 1963, Chemical composition of subsurface water: United States Geological Survey, Professional Paper, 440-F.
- Yun, S.T., Chae, G.T., Koh, Y.K., Kim, S.R., Choi, B.Y., Lee, B. H., Kim, S.Y., 1998, Hydrogeochemical and environmental isotope study of groundwater in the Pungki area: *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, 5, 177-191.

Manuscrito recibido: Octubre 12, 2012
 Manuscrito corregido recibido: Agosto 23, 2013
 Manuscrito aceptado: Marzo 21, 2014