

**Este artículo puede ser usado únicamente para uso personal o académico. Cualquier otro uso requiere permiso del autor y editor. El siguiente artículo fue publicado en *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(3), 293-305 (2007); y lo puede consultar en:**

**<http://rmcg.geociencias.unam.mx/ojs/index.php/rmcg/article/view/85>**

## Evidencias hidrogeoquímicas de mezcla de flujos regionales en el acuífero de La Muralla, Guanajuato

**José Alfredo Ramos-Leal<sup>1,\*</sup>, Jaime Durazo<sup>2</sup>, Tomás González–Morán<sup>2</sup>, Faustino Juárez–Sánchez<sup>2</sup>, Alejandra Cortés–Silva<sup>2</sup>, y Karen H. Johannesson<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.  
Presa San José #2055, Lomas 4<sup>a</sup>. Sección, 78216 San Luis Potosí, S. L. P., México.

<sup>2</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México,  
Ciudad Universitaria, 04510 México, D. F., México.

<sup>3</sup> Department of Earth and Environmental Sciences, The University of Texas at Arlington,  
Arlington, Texas 76019-0049, EE. UU.

\* jalfredo@ipicyt.edu.mx

### RESUMEN

*La ciudad de León, Guanajuato, México, se abastece de agua de la batería de pozos La Muralla, entre otras fuentes. En este estudio son utilizadas muestras de agua subterránea de 18 pozos y dos de manantial localizados al sur de León. El análisis hidrogeoquímico de las concentraciones de iones mayores y litio permitieron identificar que el agua extraída allí es producto de un proceso secuencial de mezcla binaria en la que intervienen tres miembros extremos: El primero, "Comanjilla" (C), es agua termal proveniente de un flujo vertical ascendente profundo y tiene las concentraciones más altas de cloruros y litio; su recarga ocurre en la Sierra de Guanajuato al NE de La Muralla. El segundo miembro, "Tultitlán" (T) tiene valores altos del cloruro y bajo del litio y se origina en la Sierra de Pénjamo. El tercer miembro, "Muralla" (M), tiene bajas concentraciones tanto de cloruros como de litio y representa a la recarga local. La interpretación del diagrama bivariado de dispersión litio vs. cloruro indica que la mezcla de los tres miembros extremos no se produce de forma simultánea, sino que el proceso inicialmente se lleva a cabo a profundidad entre C y T, es decir  $C + T = CT$ , y posteriormente se realiza una segunda mezcla a nivel del acuífero más somero entre  $CT + M$  para dar una mezcla final, CTM, que representa el agua que se extrae en la batería La Muralla.*

*Palabras clave: hidrogeoquímica, mezcla, miembros extremos, elementos conservativos, flujo regional, Guanajuato, México.*

### ABSTRACT

*One of the sources that supplies water to the city of León, Guanajuato, Mexico, is La Muralla well field. Hydrochemical analyses, including major ions and lithium, of well and spring water samples suggest a sequential mixing process of three different end members. The first one, Comanjilla (C), is characterized by thermal influence and a deep vertical flow and has the highest chloride and lithium concentrations; its recharge occurs in the Sierra de Guanajuato, located to the NE of La Muralla. The second one, Tultitlán (T), has high chloride and low lithium concentrations and comes from the recharge area in the Sierra de Pénjamo. The third one, Muralla (M) has low chloride and lithium contents and is related to meteoric and local recharge. A bivariate scatter diagram of lithium vs. chloride shows that the mixing process may not be produced simultaneously between the three types of waters. Mixing is first accomplished between the end members  $C + T = CT$ , and later, in the second mixture, a dilution process*

*occurs with shallow flows  $CT + M = CTM$ . The final mixture, CTM, represents the water extracted from the La Muralla well field.*

*Key words: hydrogeochemistry, mixing, end members, conservative elements, regional flow, Guanajuato, Mexico.*

## INTRODUCCIÓN

Para la investigación de sistemas hidrogeológicos complejos o difíciles de observar, la hidrogeoquímica es una herramienta importante. En las últimas décadas se han desarrollado aspectos como el de facies hidrogeoquímicas, definición, identificación y cuantificación de mezclas entre dos miembros extremos (Verma, 1998; 2000), uso de la termodinámica del equilibrio geoquímico, investigación de los procesos de oxidación–reducción y el fechamiento de las aguas subterráneas (Yurtsever, 1975; Yurtsever y Gat, 1981; Zuber *et al.*, 2004; Glynn, 2004).

Hoy en día existe una amplia variedad de técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas que ayudan a identificar las fuentes y los sumideros de solutos y contaminantes, así como a interpretar el origen y forma de recarga de los acuíferos (Rice y Hornberger, 1998; Fryar *et al.*, 2001). Otras investigaciones permiten acotar las estimaciones de periodos de recarga (Yehdegho y Reichl, 2002), los flujos del agua subterránea (MacDonald *et al.*, 2003), evolución de acuíferos (Ramos-Leal *et al.*, 2005), descifrar los procesos de mezclas y las reacciones en el agua subterránea (Wallick, 1981; Apello y Postma, 1996; Verma, 1998, 2000; Laaksoharju *et al.*, 1999; Douglas *et al.*, 2000; Abu-Jaber 2001; Lee y Krothe, 2001; Skalbeck *et al.*, 2002; Valentino y Stanzione, 2002). La información hidrogeoquímica puede incluir concentraciones de elementos menores y tierras raras (Horton *et al.*, 2001; Valentino y Stanzione, 2002; Johannesson *et al.*, 2005) e isótopos estables (Generaux, 2004).

Con la finalidad de facilitar la comprensión de ciertos procesos a que el agua subterránea se ve sometida desde su origen hasta su explotación se realizó un estudio de naturaleza cualitativa, con un enfoque hidrogeoquímico, hidrogeológico y geológico en la zona de La Muralla (Figura 1). El propósito fue mostrar las condiciones geológicas e hidrogeológicas muy particulares que dan lugar a una mezcla compleja, anteriormente poco estudiada. Los miembros extremos que interactúan para formar mezclas de agua en el acuífero se definieron con base en el contenido de elementos conservativos como Li y Cl, los cuales no reaccionan con el medio.

El poblado de La Muralla, en el Estado de Guanajuato, se localiza en la región central de la República Mexicana (Figura 1). El abastecimiento de agua para uso urbano a la ciudad de León, Guanajuato, con un millón de habitantes en el año 2000, recae en seis baterías de pozos denominadas

Oriente, Poniente, Sur, Río Turbio, Ciudad y La Muralla. Esta última consta de 19 pozos con profundidades de 182 a 500 m, y localmente es la más importante debido a que aporta 700 L/s de agua de buena calidad. En el área de estudio convergen tres subcuencas hidrográficas: valles de León, Río Turbio y Silao–Romita. La batería de La Muralla se ubica en una zona parteaguas de lomeríos que rodean a una pequeña serranía de elevaciones de hasta 1,850 msnm (Figura 1).

## GEOLOGÍA

En la región de estudio afloran rocas de tipo sedimentario, metamórfico y volcánico (Figura 2). El intervalo cronológico de la columna estratigráfica varía desde el Jurásico hasta el Reciente. Considerando la distribución espacial de las unidades litoestratigráficas, la región puede subdividirse de la siguiente manera (Martínez–Reyes, 1992): 1) Sierra de Guanajuato, donde aflora el complejo ígneo–metamórfico–sedimentario del Mesozoico; y 2) depresiones formadas por los valles de Silao–Romita, León y Río Turbio, constituidas por productos volcánicos y clásticos continentales del Cenozoico superior.

En la Sierra de Guanajuato, según Dávila–Alcocer y Martínez–Reyes (1987), la secuencia sedimentaria está formada por sedimentos marinos, principalmente calizas arcillosas y lutitas que han tenido metamorfismo regional de bajo grado y es conocida como Complejo Vulcanosedimentario de la Sierra de Guanajuato (Kcvs). En la parte basal de la Sierra de Guanajuato, las rocas del Mesozoico comprenden varios plutones de edades diferentes (Hernández–Silva *et al.*, 2000). Dentro de este conjunto basal mesozoico y de la cubierta vulcanoclástica cenozoica de la Sierra de Guanajuato se observa la presencia de un intrusivo de composición ácida, conocida como Granito Comanja (Tcgo), cuyo emplazamiento ocurrió en el Terciario y marca el límite entre las subdivisiones de esa región (Martínez–Reyes, 1992).

## Estratigrafía del Cenozoico

El Cenozoico se desarrolló en ambiente continental con actividad volcánica y plutónica, así como periodos de sedimentación (Nieto–Samaniego *et al.*, 1996; Hernández–Silva *et al.*, 2000).

Se han identificado siete distintos pulsos magmáticos en la región (Aranda-Gómez *et al.*, 2003). El primero se relaciona con el magmatismo pre-Sierra Madre Occidental (SMO), al cual se asocia el emplazamiento del Granito Comanja hace aproximadamente unos  $53 \pm 3$  y  $51 \pm 1$  Ma (Zimmermann *et al.*, 1990). El segundo pulso fue un breve episodio de emisión de lavas andesíticas pre-SMO hace 49 Ma (Aranda-Gómez y McDowell, 1998). Estos eventos fueron contemporáneos con la acumulación del Conglomerado Guanajuato. El tercer pulso es calificado como una fase temprana de la actividad magmática de la SMO (Aranda-Gómez *et al.*, 2003). El cuarto pulso es considerado como la fase de máxima actividad de la SMO y se asocia con una serie de emisiones riolíticas (formaciones Chichindaro, El Ocote e Ignimbrita Cuatralba). El quinto pulso magmático, que tuvo lugar entre 27 y 24 Ma, corresponde a la fase tardía de la SMO. El sexto pulso es considerado como la transición entre la SMO y la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) que sucedió entre 16 y 13 Ma (Cerca-Martínez *et al.*, 2000). Finalmente, el séptimo pulso que incluye la fase inicial del Complejo Volcánico Terciario ocurrió entre 12 y

8 Ma (Aranda-Gómez *et al.*, 2003). Aunque el Cenozoico se encuentra ampliamente distribuido en la región, sólo algunas unidades sedimentarias y volcánicas juegan un papel importante en el modelo hidrogeológico de los acuíferos en la región.

El Conglomerado Guanajuato (Tcg) es una unidad de coloración rojiza y de estratificación masiva que aflora en los alrededores de la ciudad de Guanajuato. Presenta clastos sedimentarios, ígneos y metamórficos y muestra una matriz arenosa con óxidos, carbonatos e intercalaciones de derrames andesíticos (Edwards, 1955) que, mediante fósiles, se le asignaba una edad del Eoceno-Oligoceno (Fries *et al.*, 1955; Ferrusquía-Villafranca, 1987). Sin embargo, el fechamiento de una andesita intercalada con esta unidad arrojó una edad de  $49.3 \pm 1$  Ma (Aranda-Gómez y McDowell, 1998) que lo ubica a finales del Eoceno temprano. Sobreyace discordantemente al Granito Comanja y subyace a la Ignimbrita Cuatralba y es correlacionable con el Conglomerado Duarte (Tcd) que aflora al norte de la población de Duarte.

Las unidades litoestratigráficas agrupadas en el

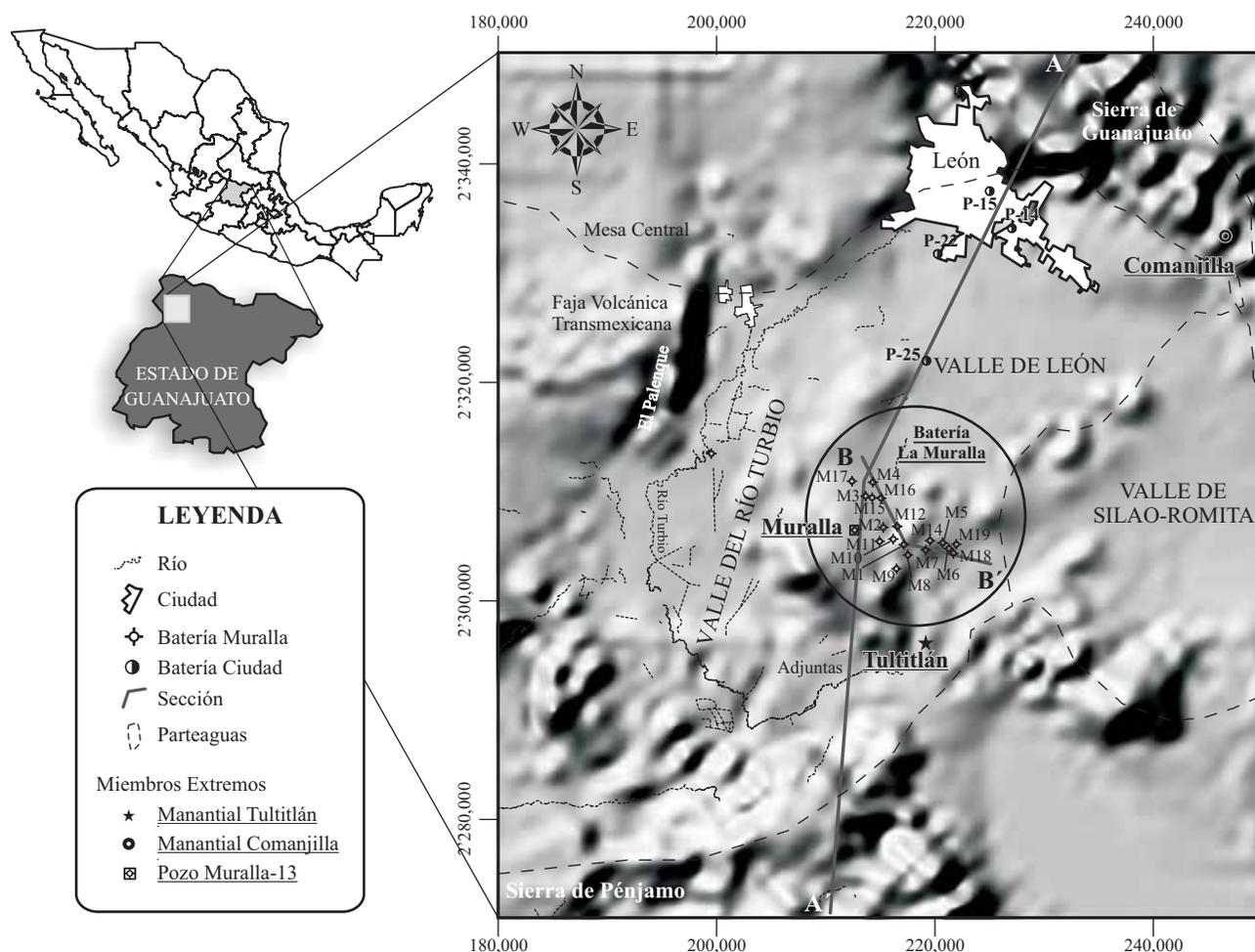


Figura 1. Localización del área de estudio en el Estado de Guanajuato. Modificado de CEASG (1999).

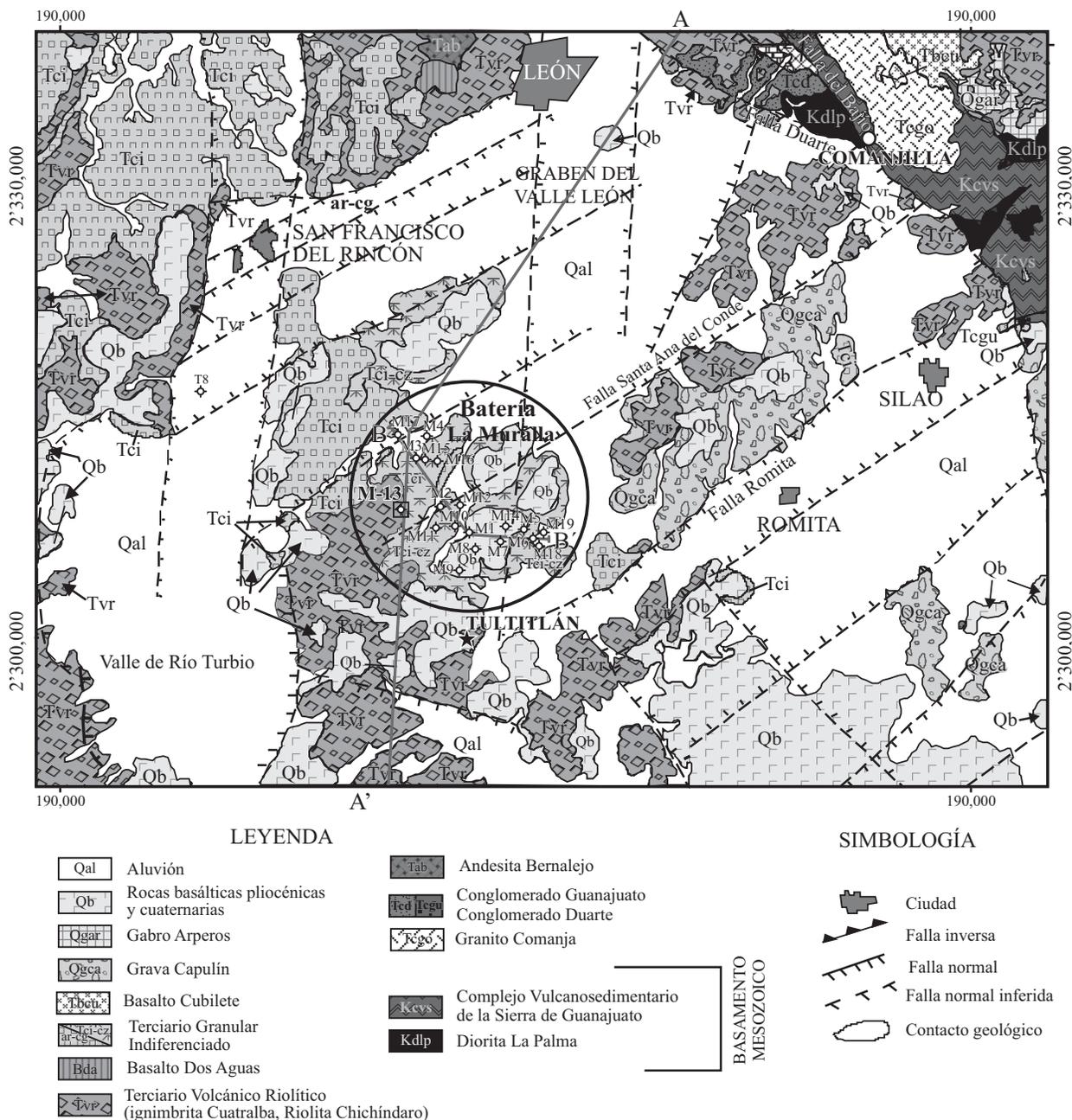


Figura 2. Geología regional del área de estudio mostrando la localización de los pozos de la batería La Muralla. Modificado de CEASG (1999).

Terciario Volcánico Riolítico (Tvr) corresponden a un conjunto de rocas volcánicas extrusivas de composición ácida, distribuidas ampliamente en la Sierra de Guanajuato y en las sierras que interrumpen los valles de León y Silao–Romita. Se incluyen riolitas, ignimbritas, tobas y vidrio volcánico de la Riolita Chichindaro de  $30.1 \pm 0.8$  Ma e Ignimbrita Cuatralba de edad  $28.2 \pm 0.7$  (Nieto-Samaniego *et al.*, 1996). Esta última aflora en la zona de La Muralla, Sierra de Guanajuato y Pénjamo, y se encuentra sepultada en las fosas tectónicas de León, Silao y Río Turbio (Martínez-Reyes, 1992 y Figuras 2 y 3).

Con el término de Terciario Granular Indiferenciado (Tci) se describe informalmente al paquete sedimentario continental de gran espesor que rellena las fosas tectónicas de León, Río Turbio, Silao–Romita y Pénjamo–Abasolo. Está formado por conglomerados, areniscas, limonitas y lutitas carbonatadas depositadas en ambientes de abanicos aluviales con algunas facies lacustres (SARH, 1991; Hernández-Laloth, 1991).

El Basalto El Cubilete (Tbcu) de 13.5 Ma (Aguirre-Díaz *et al.*, 1997) representa las últimas manifestaciones volcánicas del Mioceno. Además de basaltos de olivino,

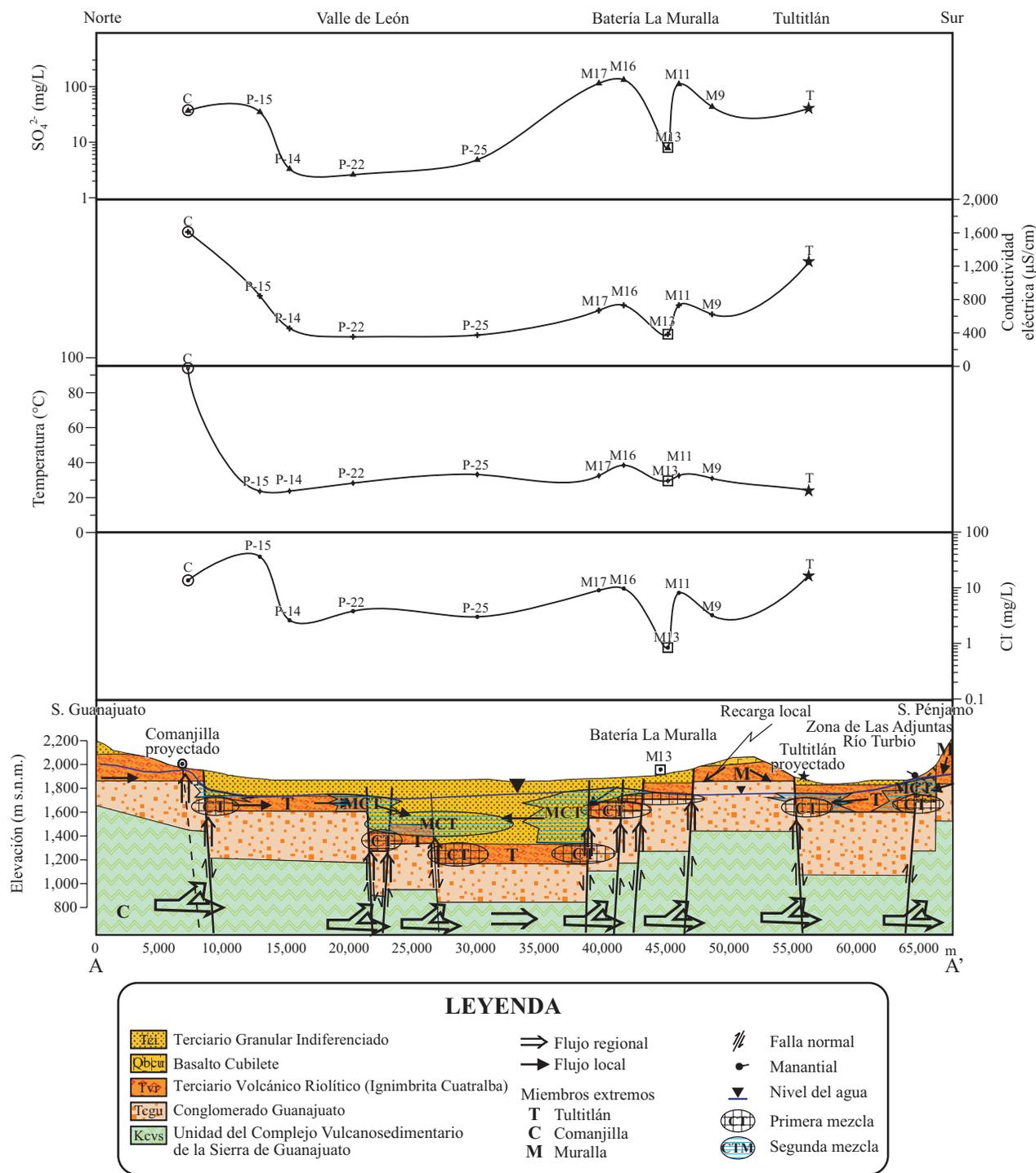


Figura 3. Sección geológica regional mostrando las principales zonas de recarga, principales unidades hidrogeológicas, procesos de mezcla y respuesta geoquímica a lo largo de los flujos principales. La localización de la sección y de los pozos se muestra en las Figuras 1 y 2. Actualización y modificación de un modelo propuesto por CEASG (1999).

contiene andesitas de augita (Martínez-Reyes, 1992). Bajo el término de rocas volcánicas pliocénicas y cuaternarias (Qb) se agrupan los derrames de basalto y aparatos centrales de composición andesítica y basáltica más jóvenes del área de estudio (Nieto-Samaniego et al., 2005).

### Geología Estructural

La geología estructural de la región está conformada por tres sistemas de fracturas y fallas normales con orientación preferente NW-SE, NE-SW y N-S. Dichas

estructuras revelan procesos en la geodinámica continental producto de un régimen tectónico distensivo, activo durante distintas épocas del Cenozoico, incluido el Cuaternario (Nieto-Samaniego, 1992). Según Vasallo-Morales *et al.* (1996), estos procesos tectónicos han favorecido el vulcanismo, así como los potentes espesores de las rocas clásticas y lacustres que afloran en toda el área de estudio.

La Falla del Bajío es una falla normal muy importante que separa dos provincias fisiográficas en la parte central de México (Aranda-Gómez *et al.*, 2003; Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2005). Al sur de la Falla El Bajío se distribuye la FVTM y al norte se encuentra la Mesa Central (Figuras 1 y 2). Su desplazamiento vertical se estima entre 500 y 850 m (Quintero-Legorreta, 1989; Hernández-Laloth, 1991). Esta estructura está formada por una serie de fallas normales escalonadas entre las que se encuentra la Falla Duarte (Figura 2). Al oriente del área de estudio se localiza el valle del Río Turbio que es delimitado por el sistema N-S. En los alrededores de San Francisco del Rincón, el valle es limitado por este sistema de fallas NW-SE. Estos sistemas han sido interpretados a partir de estudios geofísicos como sondeos eléctricos verticales (SARH, 1991; CEASG, 1995) y sondeos electromagnéticos (CEASG, 1998a; 1998b).

Algunos pozos localizados en las proximidades de las fallas que delimitan los valles del Río Turbio, León y Los Gómez presentan temperaturas de 30 a 32°C y 94°C en

el caso del manantial Comanjilla (SAPAL, 2001), lo que evidencia la permeabilidad a largo de estas fallas.

### HIDROGEOLOGÍA

Como se ha mencionado anteriormente, la región ha estado expuesta a numerosos procesos tectónicos y volcánicos que juegan un papel muy importante en la hidrodinámica de los acuíferos. Evidencias de alta permeabilidad secundaria en las unidades litoestratigráficas, generada por los procesos tectónicos, pueden relacionarse con la presencia de manantiales alineados a lo largo de ellas, algunos de ellos con características termales, como el manantial Comanjilla.

El acuífero en explotación se localiza en los valles de León, Río Turbio y Silao-Romita, donde operan cientos de pozos agrícolas profundos (CEASG, 1998a y 1998b). Este acuífero se desarrolla en un medio granular de gran espesor constituido por depósitos vulcanosedimentarios (Tci) que rellenaron las fosas tectónicas. Por su parte, el acuífero fracturado constituido por la Ignimbrita Cuatralba sólo se aprovecha en la zona de La Muralla y en las márgenes de los valles mencionados (SAPAL, 2001).

Basados en los estudios disponibles de la geología regional (Martínez-Reyes, 1992) se ha inferido la presencia de

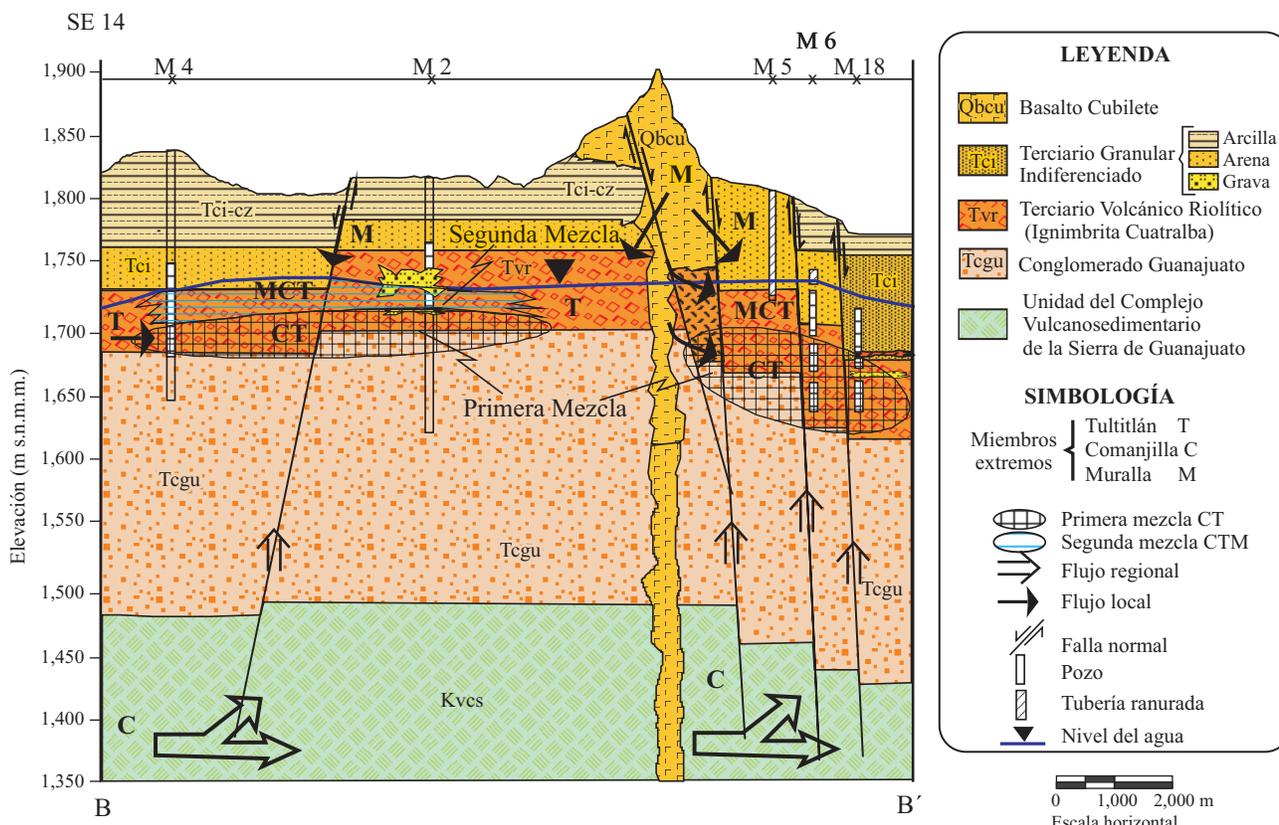


Figura 4. Sección geológica en la zona de La Muralla utilizando cortes litológicos de pozos. Modificada de Johannesson *et al.* (2005).

una unidad más permeable bajo el Conglomerado Guanajuato, la cual pertenece al Complejo Vulcanosedimentario de la Sierra de Guanajuato (Figuras 3 y 4). Las perforaciones para suministro de agua en el área de estudio no han atravesado esa unidad.

A partir del nuevo conocimiento geológico, la reinterpretación de los cortes litológicos y la piezometría disponible para la zona de estudio, el presente trabajo ha actualizado y modificado un modelo conceptual sobre el funcionamiento hidrodinámico que fue presentado por CEASG (1999). El modelo actualizado se esquematiza en la Figura 3. Esta sección hidrogeológica se inicia en la Sierra de Guanajuato, pasa por La Muralla y termina en la Sierra de Pénjamo. En la Figura 4 se muestra la zona de La Muralla con mayor detalle. Mediante el análisis de este modelo conceptual actualizado es posible establecer las características medulares del flujo regional en estudio.

La dirección horizontal de flujo subterráneo regional tiene una tendencia general N-S, presentando cambios de dirección locales debido a la presencia de los grandes conos de abatimiento, productos éstos de la intensa explotación acuífera en los valles de León y Silao-Romita (Figura 5).

En la zona de La Muralla se observa un notable domo piezométrico con un radio aproximado de 5 km<sup>2</sup> que CEASG (1999) considera relacionado con el aporte de flujos a través de las fallas profundas (Figuras 4 y 5).

El flujo intermedio, consideramos, circula a través de la Ignimbrita Cuatralba y los sedimentos terciarios (Tci). Este flujo presenta dos zonas principales de recarga: en la Sierra de Guanajuato, donde aflora la mencionada ignimbrita, y hacia el valle de León, donde ésta se localiza a profundidades de 500 m (CEASG, 1999). En la zona de La Muralla (Figura 3), esta unidad acuífera fracturada se encuentra cercana a la superficie, mientras que en la Sierra de Pénjamo está expuesta en superficie (Figura 2).

La descarga natural del sistema ocurre en la parte topográficamente más baja de la zona, en el área de Las Adjuntas (Figura 1). En efecto, hacia la margen derecha del Río Turbio existen manantiales activos hoy en día (INEGI, 1980), así como un pozo que se mantuvo artesiano hasta la década de 1960 (Hernández-Laloth, 1991). A profundidad, los flujos intermedios convergen.

Respecto a la recarga del sistema hidrogeológico, se han identificado tres zonas importantes (CEASG, 1999),

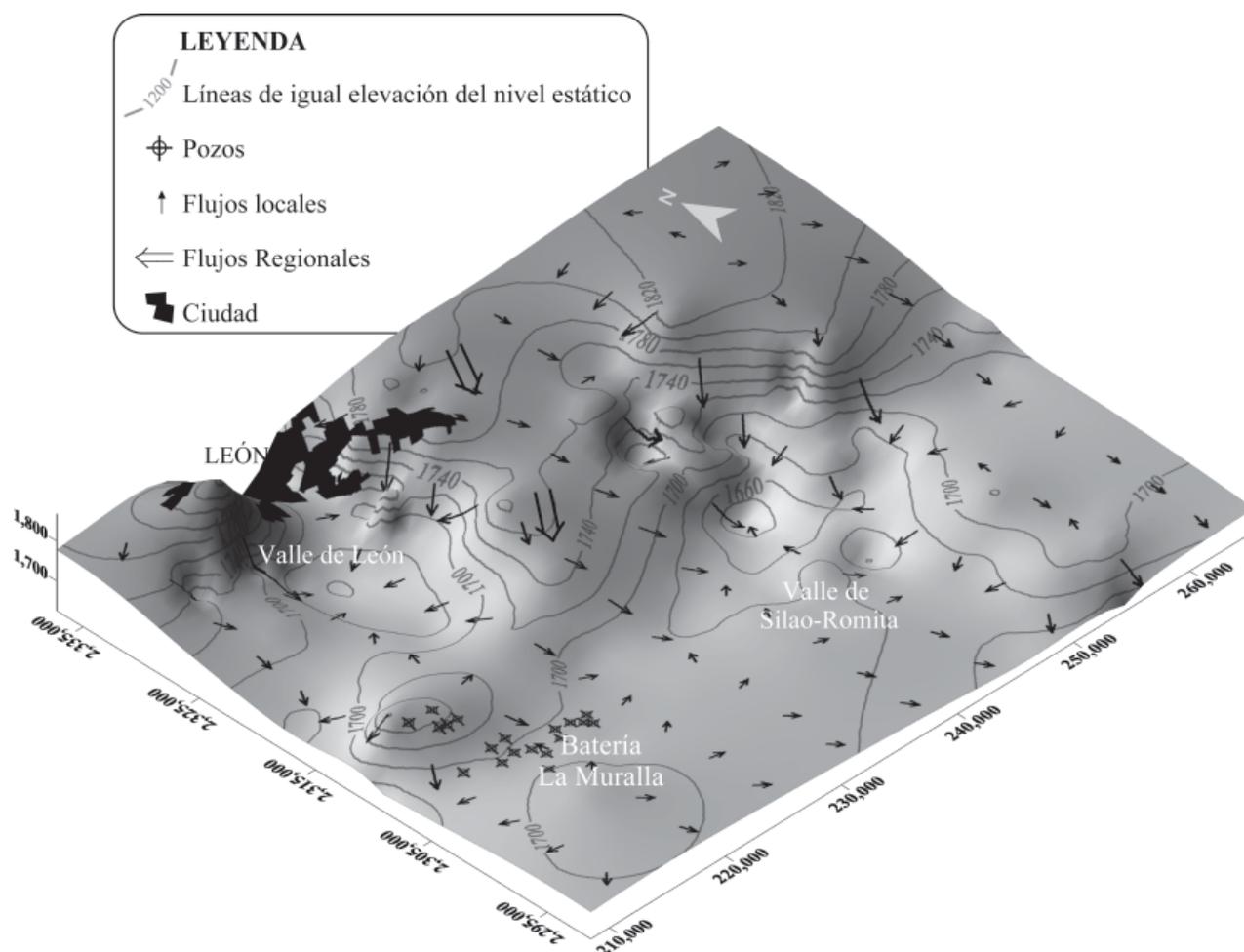


Figura 5. Elevación piezométrica y direcciones de flujo en el área de estudio. Modificado de CEASG (1999).

una local, en la zona de La Muralla, otra al sur en la Sierra de Pénjamo y la última al NW de la Sierra de Guanajuato (Figura 3). En las cercanías de La Muralla se localizan lomeríos y pequeñas sierras formadas por derrames basálticos muy fracturados (Qb) que funcionan como transmisores de la infiltración (Figura 4). El acuífero presenta variaciones temporales en la dinámica y química de su agua durante la época de lluvia y secas (Ramos-Leal *et al.*, 2003, 2005).

La zona de recarga en la parte sur (Sierra de Pénjamo) se caracteriza por tener elevaciones de hasta 2,400 msnm. Está constituida principalmente por rocas volcánicas fracturadas de composición riolítica (Tvr), brechas volcánicas y basaltos.

La zona de recarga norte (NW de la Sierra de Guanajuato) con elevaciones de hasta 2,800 msnm, presenta en su parte central una gran distribución de rocas plutónicas y metamórficas de baja conductividad hidráulica, restringiendo la recarga a la periferia de la Sierra. Hacia el NW de la Sierra de Guanajuato, debido a que predominan rocas volcánicas fracturadas, las condiciones de recarga cambian radicalmente (CEASG, 1999).

## METODOLOGÍA

El muestreo para los análisis fisicoquímicos en los que se basa este estudio se realizó en la zona de La Muralla en 1999. Se tomaron muestras de agua en 14 de los 19 pozos que constituyen la batería (CEASG, 1999). Para observar la relación del valle con la zona de La Muralla se construyeron secciones hidrogeoquímicas (Figura 3), para lo cual se utilizó información complementaria, del 2002, de cuatro pozos de la batería Ciudad (CEAG, 2002).

La selección de los pozos de La Muralla, fue aleatoria y las muestras de agua se tomaron a la salida del pozo. El pH y alcalinidad fueron medidos *in situ* con un equipo de titulación marca Hach usando 0.05N HCl; así mismo, se midieron la temperatura del agua y su conductividad eléctrica.

Los contenidos de cationes mayores y del ion litio fueron analizados con un cromatógrafo de iones Dionex DX-500 en los laboratorios de la Old Dominion University, de Norfolk, Virginia, EE. UU., utilizando columnas Ion Pac AS11 CS12A y CG12A, con supresor de membrana autoregenerativa CSRS-ULTRA (4mm) y 20 mL de ácido metano sulfónico como eluyente.

El contenido de aniones se determinó usando una columna Ion Pac AS11, con supresor de membrana autoregenerativa ASRS-ULTRA (4mm) y agua MilliQ (18M $\Omega$ ) como eluyente. El almacenamiento y la preservación de las muestras, así como los análisis en el laboratorio se realizaron utilizando las metodologías establecidas en Welch *et al.* (1996) y APHA *et al.* (2005). El error analítico calculado por electroneutralidad de los iones mayores, fue menor al 10 %. En el caso del litio, el límite de detección fue de 50  $\mu\text{g/L}$ , para el caso de iones mayores los límites de detección se muestran en la Tabla 1.

## HIDROGEOQUÍMICA

Con los resultados de los análisis químicos de las muestras de la zona La Muralla (Tabla 1) se construyeron un diagrama de Piper (Figura 6) y un diagrama bivariado de dispersión para  $\text{Cl}^-$  vs. Li (Figura 7), en los cuales se observan algunas diferencias en las características de las muestras analizadas.

El agua del manantial de Comanjilla (C) es agua del tipo  $\text{Na-HCO}_3^-$  con altas concentraciones en Li y  $\text{Cl}^-$  (Figuras 1, 6 y 7; Tabla 1). Ese manantial se localiza al norte de la zona de La Muralla, en las proximidades de la Sierra de Guanajuato (Figura 1), y está asentado sobre una de las fallas que limitan a la Sierra de Guanajuato. En época de secas el manantial brotante alcanza hasta 110 °C y en épocas de lluvia 94 °C; la disminución en la temperatura del agua indica que llega a haber interacción con flujos locales. Utilizando la ecuación modificada de Fouillac y Michard (1981) para la relación molar de Na/Li (Verma y Santoyo, 1997) se obtuvo una temperatura de equilibrio de 162 °C. Las relaciones  $\text{Na/Li} > 30 \times 10^{-4}$  reflejan fuentes termales o largos tiempos de residencia en el acuífero (Lyons y Welch, 1997), como en el caso de Comanjilla donde la relación Na/Li es de  $107 \times 10^{-4}$ .

El agua muestreada en el manantial frío Tultitlán (T) es de tipo  $\text{Na-Ca-HCO}_3^-$  y presenta contenidos altos de  $\text{Cl}^-$  y bajos de Li (Figuras 1, 6 y 7; Tabla 1). Este manantial se localiza al sur de la zona de La Muralla, muy próximo a la margen norte del Río Turbio y cercano a la Sierra de Pénjamo. Topográficamente corresponde a la parte más baja del sistema hidrológico (Figuras 1 y 3).

El agua muestreada del pozo M-13 (M) pertenece a la batería de La Muralla y se ubica en la cercanía de un pequeño aparato volcánico (Figuras 1 y 3), sometido a un intenso fracturamiento que facilita la infiltración del agua meteórica. El agua se caracteriza por ser de tipo  $\text{Na-Ca-HCO}_3^-$  y tener bajo contenido de Li y  $\text{Cl}^-$  (Figuras 6 y 7; Tabla 1), presentando una composición similar al agua de lluvia local (CEASG, 1999).

Finalmente, el producto extraído del acuífero de La Muralla presenta características  $\text{Na-HCO}_3^-$  y contenidos de Li y  $\text{Cl}^-$  intermedios respecto a las muestras C, T y M, lo cual indica que representan una mezcla de esos tres tipos como se discute más adelante.

## Modelo hidrogeoquímico de mezcla

Con la finalidad de visualizar las variaciones en las características fisicoquímicas del agua subterránea, éstas se representan a lo largo de una sección geológica-geoquímica, que va de la Sierra de Guanajuato y pasa por La Muralla (Figura 3). Analizando esta sección se tiene que, hacia la parte norte, el manantial Comanjilla presenta valores mayores en sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), conductividad eléctrica (CE), temperatura (T) y cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) que las muestras de agua

Tabla 1. Concentración de iones mayores y menores en muestras de agua subterránea del acuífero de La Muralla (CEASG, 1999) y de la batería Ciudad en el área de León (\*\*CEAG, 2002) utilizadas en el presente estudio.

Muestra	X	Y	Tubería	Ca	Mg	Na	K	Li	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	pH	CE	T
	UTM	UTM	m	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L		μS/cm	°C
L.D.				1.00	1.00	1.00	1.00	0.005	0.30	2.50	1.00	0.10			
M3	213,600	2'309,950	52-255	35.08	3.20	77.80	3.90	0.13	6.36	209.90	68.50	5.75	7.27	584	32.4
M5	220,520	2'305,760	0-153	38.68	4.62	88.75	5.90	0.13	7.04	180.60	115.30	5.98	7.58	594	36.5
M6	221,120	2'305,200	96-300	41.07	5.55	93.95	6.29	0.13	5.46	380.38	83.30	7.53	7.41	633	37.0
M7	219,040	2'305,120	114-288	44.91	6.40	71.60	5.18	0.14	3.27	239.00	66.60	8.04	7.58	648	31.2
M8	217,400	2'304,640	84-180	50.43	6.06	67.60	4.85	0.12	4.13	156.08	59.00	7.92	7.32	657	30.3
M9	216,400	2'303,440		35.70	7.87	62.65	4.96	0.11	3.22	326.86	43.30	6.57	7.32	623	31.0
M10	216,070	2'306,080		44.05	7.86	73.65	5.21	0.18	6.75	280.53	91.00	14.30	7.37	720	28.6
M11	214,880	2'305,840		41.40	4.87	88.65	4.80	0.16	8.10	248.83	110.90	8.81	7.44	732	32.6
M13	212,640	2'306,920		34.85	4.67	35.00	4.22	0.06	0.84	257.07	7.80	7.76	7.13	384	29.6
M14	219,440	2'305,920	108-300	39.40	5.50	85.90	5.46	0.14	5.90	243.95	92.00	7.75	7.42	628	32.4
M16	215,000	2'309,800		49.80	4.52	96.20	4.35	0.14	9.68	285.29	132.40	7.74	7.25	731	38.5
M17	212,400	2'311,200	132-222	46.05	5.60	89.40	5.77	0.17	9.00	241.51	114.20	7.68	7.73	670	32.5
M18	221,550	2'304,800	114-282	36.25	6.15	76.65	5.73	0.15	4.48	263.47	65.80	8.88	7.45	522	34.8
M19	221,760	2'305,520	120-309	36.25	6.04	75.50	6.65	0.12	4.89	197.60	80.70	7.07	7.94	577	34.2
Tultitlán	217,939	2'298,403	-	41.70	11.50	21.65	17.48	0.01	16.70	96.77	40.60	95.70	6.13	1248	24.2
Comanjilla	243,422	2'331,540	-	1.94	0.04	148.00	6.96	0.48	13.60	341.51	36.70	nd	8.32	1610	94.0
**P-15	224,792	2'337,508		na	28.23	31.85	5.00	na	36.40	358.80	34.80	18.30	6.84	844	23.6
**P-14	227,048	2'334,106		na	24.54	14.81	6.19	na	2.60	270.20	3.30	3.00	7.31	455	23.7
**P-22	220,264	2'331,760		na	9.66	19.38	6.11	na	3.80	186.20	2.60	1.10	7.42	354	28.3
**P-25	219,233	2'321,978		na	8.61	29.79	7.02	na	3.00	198.70	4.80	1.30	7.46	374	33.2

CE: Conductividad eléctrica; na: no analizado; nd: no detectado; L.D.: Límites de detección.

pertenecientes a los pozos de la batería Ciudad en el Valle de León. Se manifiestan así los flujos profundos de carácter regional, cuyas características hidrogeoquímicas revelan a las facies más sódico bicarbonatadas (Na-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>; Figura 3, 4, 6 y 7). En el modelo hidrogeológico conceptual, el flujo subterráneo asociado con *C* se representa como flujo vertical ascendente (Figuras 3 y 4).

En la parte central del Valle de León se aprovecha el acuífero en medio granular (Tci). Las características químicas que se registran son diferentes al manantial Comanjilla. En general, se notan valores bajos en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, CE, T y Cl<sup>-</sup> que indican un menor grado evolutivo y/o una mayor influencia de la recarga local (Figura 3). Cabe mencionar que el pozo P-15 tiene valores más altos de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Cl<sup>-</sup> pero una temperatura similar; esto puede explicarse en términos de contaminación, debido a que el pozo se localiza en la zona urbana, lo cual lo hace vulnerable a la contaminación.

El agua extraída en la zona de La Muralla proviene de un medio fracturado (Ignimbrita Cuatralba) y presenta valores ligeramente más altos de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, CE, T y Cl<sup>-</sup> que los encontrados en el Valle de León, con excepción de la muestra M-13, que presenta los valores más bajos de la región debido a la influencia dominante de la recarga local (Figura 3 y 4).

Por su parte, el manantial Tultitlán presenta valores más altos en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, CE, Cl<sup>-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Figura 3; Tabla 1) que las muestras del Valle de León, lo que indica tiempos de residencia mayores y/o grandes distancias de recorrido.

Las observaciones anteriores y el análisis de los diagramas de Piper y de Cl<sup>-</sup> vs. Li (Figura 6 y 7) permiten inferir la ocurrencia de un proceso complejo de mezcla, el cual le da unidad y coherencia a toda el agua muestreada. En estos diagramas se distinguen los puntos *C*, *M* y *T* como representativos de los miembros extremos del proceso de mezcla.

Para establecer evidencias de las mezclas binarias se utilizaron las concentraciones de cloruro y litio, ambos elementos conservativos. El análisis de la Figura 7 permite identificar que el agua subterránea presente en el acuífero de La Muralla representa una mezcla secuencial binaria de los miembros extremos mencionados anteriormente. Se puede observar que la mezcla binaria entre los miembros Comanjilla (*C*) y Muralla (*M*) no ocurre en la zona, ya que de ocurrir la mezcla entre esos miembros extremos se presentaría una mayor dispersión entre los tres vértices formados por *C*, *T* y *M* en la Figura 7. Entonces, el proceso de mezcla se lleva a cabo inicialmente entre los flujos profundos *C* y *T* (*C+T*) en condiciones en donde no interviene la componente *M*; al producto de la mezcla inicial (*C+T*) lo denominaremos *CT*. Posteriormente se realiza una segunda mezcla de *CT* con los aportes de agua más somera (*CT+M*), que denominaremos *CTM* y que representa al agua muestreada en La Muralla.

Este tipo de procesos complejos de mezcla ha sido descrito también por Carrillo-Rivera *et al.* (1996, 2002) en el acuífero del Valle de San Luis Potosí, en donde flujos

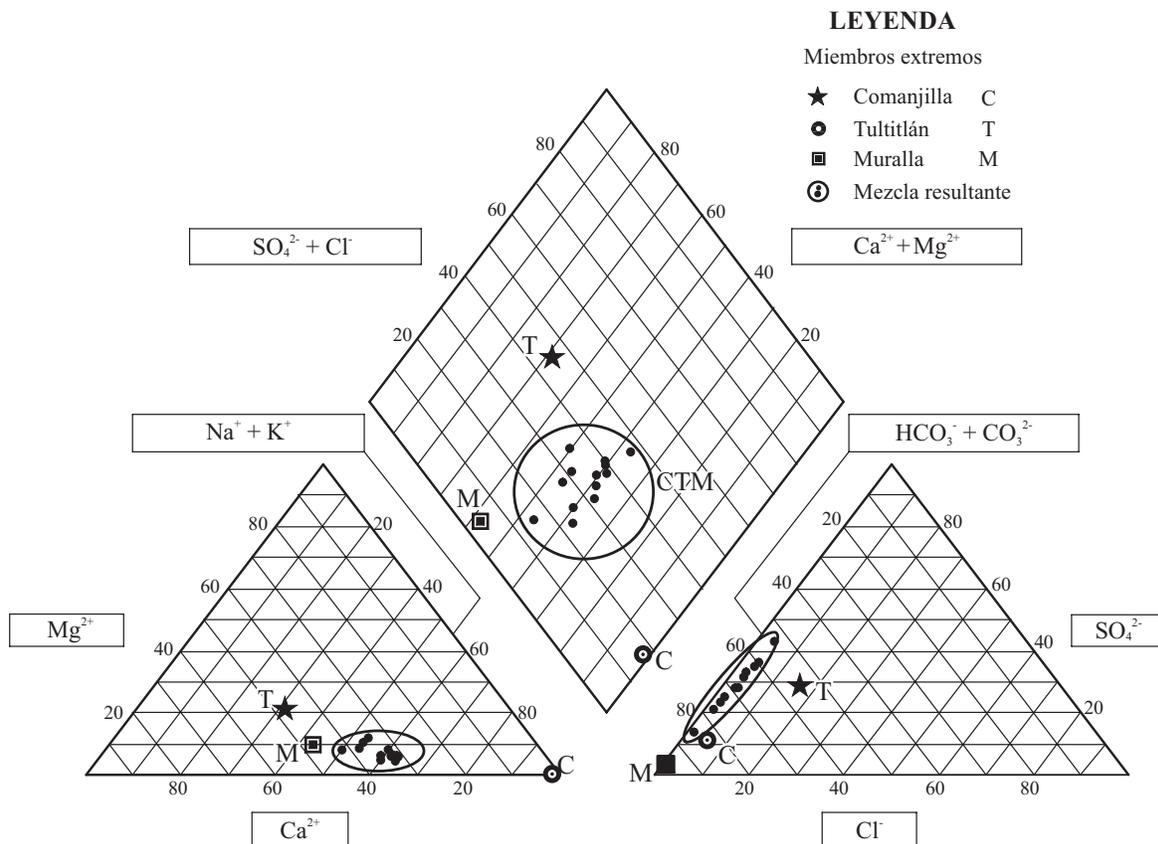


Figura 6. Diagrama de Piper que muestra los miembros extremos y mezclas para el acuífero de La Muralla.

regionales con características termales cambian la calidad química del agua subterránea en el acuífero del valle, generando zonas anómalas como la descrita en el presente trabajo (Figura 3).

El carácter de este trabajo es cualitativo, sin embargo, los procesos de mezcla pueden ser abordados desde el punto de vista cuantitativo para estimar la proporción en que cada miembro final contribuye a la mezcla final (Wallick, 1981; Verma, 1998; Laaksoharju *et al.*, 1999; Douglas *et al.*, 2000; Verma, 2000; Abu-Jaber 2001; Skalbeck *et al.*, 2002; Valentino y Stanzione, 2002; Genereux, 2004).

**DISCUSIÓN**

Con la finalidad de validar el modelo conceptual hidrogeológico propuesto se analizaron tres hipótesis.

La primera considera la recarga local en la zona de La Muralla y la existencia de flujos laterales procedentes de las inmediaciones de la Sierra de Guanajuato en donde aflora la Ignimbrita Cuatralba. En la zona de La Muralla, el aporte recibido por esta unidad permeable es facilitado por el fracturamiento regional (Figuras 3 y 4).

La segunda considera el aporte de flujos en tránsito, más profundos y de carácter regional. Estos flujos son canalizados a través de las fallas que lo conectan hidráulicamente

con el acuífero en explotación por debajo del Conglomerado Guanajuato. Se genera así el alto piezométrico característico de La Muralla (Figuras 3 y 5).

Finalmente, el tercer planteamiento considera una combinación de las dos hipótesis anteriores. Se incorporan aportes de flujos regionales, flujos laterales y recarga local (Figuras 3 y 4).

De acuerdo a las hipótesis antes mencionadas es posible plantear los escenarios hidrogeológicos correspondientes. El análisis de los mismos permitirá seleccionar el escenario que mejor explique el comportamiento observado en el sistema y que valide el modelo funcional propuesto.

El escenario de la primera hipótesis se esquematiza en la Figura 5. Aunque se justifica la presencia de un domo piezométrico producido por la recarga local en La Muralla, solo puede ser construido mediante la mezcla de componentes M+T. Dado que estos miembros extremos no tienen características termales, no pueden explicar el proceso termal involucrado. Esta característica tampoco se observa en la sección hidrogeoquímica y gráficas de mezcla (Figuras 3 y 7). Por lo tanto, este escenario no explica de manera satisfactoria el proceso global.

El escenario de la segunda hipótesis explica adecuadamente el efecto termal. En este esquema, la presencia de fallas profundas facilitan la conexión hidráulica con el acuífero constituido por la Ignimbrita Cuatralba (Figuras 3 y

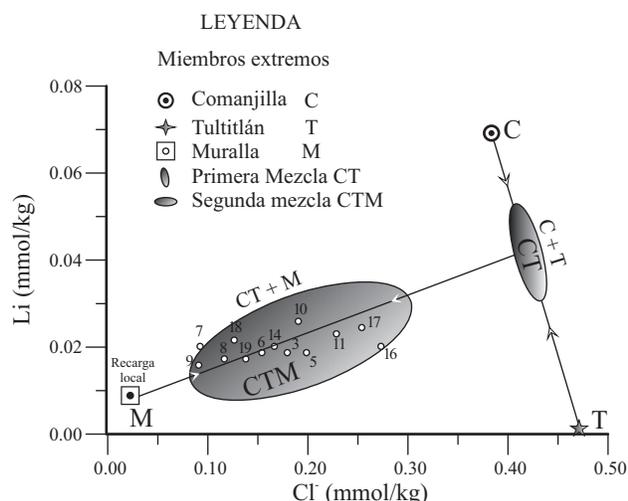


Figura 7. Modelo de mezcla secuencial en la zona de La Muralla, usando las concentraciones de litio y cloruro (CEASG, 1999).

4). Como resultado se tiene una mezcla de agua ( $C+T=CT$ ), con características de mayor temperatura, carga hidráulica y concentración de cloruro y litio (SAPAL, 2001; Johannesson *et al.*, 2002; Ramos-Leal *et al.* 2004; Johannesson *et al.* 2005). Sin embargo, en la gráfica de Li vs. Cl (Figura 7), no se identificaron mezclas de  $C+M$ , ni  $T+M$ , debido a que primero ocurre la mezcla del flujo profundo  $C+T$  para posteriormente combinarse con  $M$  (Figura 7). Este escenario tampoco es del todo satisfactorio.

El escenario de la tercera y última hipótesis resulta ser el más completo y explica adecuadamente el comportamiento termal y piezométrico. Aquí se consideran los escenarios anteriores, proporcionando un modelo secuencial de dos mezclas binarias. La primera mezcla se produce a profundidad, entre los dos flujos profundos de Comanjilla y Tultitlán que ascienden hacia el acuífero en explotación a través de fallas. Como resultado se tiene un flujo ascendente de calidad química bastante homogénea que representa a la recarga profunda del acuífero de La Muralla. En este acuífero ocurre la segunda mezcla entre  $CT$  y agua proveniente de la recarga local ( $M$ ), teniéndose finalmente una dilución en las concentraciones hidrogeoquímicas de la mezcla profunda (Figuras 3, 4, 6 y 7).

Este escenario es también concordante con el complejo escenario hidrogeológico de la zona. En el área de La Muralla, el acuífero en explotación está cubierto por sedimentos continentales del Cenozoico (Tci) y productos volcánicos fracturados del Plioceno-Cuaternario (Qb). Estos últimos funcionan como transmisores de la recarga local. Bajo la base del acuífero fracturado se encuentra el Conglomerado Guanajuato, unidad granular de gran espesor y baja permeabilidad primaria, que actúa como acuitardo (Figuras 3 y 4).

El modelo de mezcla presentado establece que a profundidades mayores a la de los actuales niveles de ex-

plotación, el sistema hidrogeológico es poco sensible a la influencia de la recarga local, predominando el aporte de los flujos profundos  $C$  y  $T$ . Tomando en cuenta estas consideraciones, si se extrae agua de mayores profundidades, ésta tendería a presentar características de la mezcla teórica  $CT$  (Figuras 3, 4 y 7).

## CONCLUSIONES

El agua extraída de los pozos de la batería de La Muralla se origina en tres zonas de recarga. Su carácter hidrogeoquímico es producto de un proceso secuencial de dos mezclas binarias entre tres miembros extremos,  $C$ ,  $T$  y  $M$ , cuyos orígenes fueron identificados en congruencia con un modelo hidrogeológico conceptual propuesto. A saber:  $C$ , Comanjilla, agua de tipo  $\text{Na-HCO}_3^-$ , con altas concentraciones en Li y Cl, y temperaturas mayores al promedio de la región; se presenta en el modelo hidrogeológico como un flujo regional profundo que se origina en la Sierra de Guanajuato y Altos de Jalisco y que, a través de fallas, se transforma en un flujo vertical ascendente.  $T$ , Tultitlán, agua de tipo  $\text{Na-Ca-HCO}_3^-$ , con contenidos altos de Cl y bajos en Li; se presenta como un flujo regional profundo que se origina en la Sierra de Pénjamo y que, también, converge a la zona de La Muralla donde se transforma en flujo vertical ascendente que se mezcla con  $C$  para así convertirse en la recarga profunda del acuífero en explotación.  $M$ , Muralla, agua de tipo  $\text{Na-Ca-HCO}_3^-$ , baja en Li y Cl, que se presenta como un flujo intermedio relacionado con la recarga local.

El conocimiento geológico e hidrogeológico, en conjunción con información hidrogeoquímica de agua de pozos, ha permitido establecer diferencias sustanciales en los tres grupos. De esta manera se ha identificado en la región que los tres tipos de agua, Comanjilla, Tultitlán y Muralla se combinan en una mezcla no simultánea que se inicia con la mezcla de aguas de Comanjilla y Tultitlán a través de fallas profundas. El producto resultante se mezcla posteriormente con aguas locales más someras, dando como resultado el agua con características  $\text{Na-HCO}_3^-$  y bajos contenidos de Li y Cl que se extrae de los pozos relativamente someros que hoy operan en La Muralla y que abastecen parcialmente a la ciudad de León.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las autoridades de la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG) y del Sistema de Agua Potable de León (SAPAL) por las facilidades que otorgaron para obtener la información empleada en la elaboración del presente trabajo. Así mismo, los autores hacen patente su reconocimiento a los dos árbitros por proporcionar comentarios constructivos que permitieron mejorar el trabajo.

## REFERENCIAS

- Abu-Jaber, N., 2001, Geochemical evolution and recharge of the shallow aquifers at Tulul al Ashiqif, NE Jordan: *Environmental Geology*, 41, 372-383.
- Aguirre-Díaz, G. J., Nelson, S. A., Ferrari, L., López-Martínez, M., 1997, Ignimbrites of the central Mexican Volcanic Belt, Amealco and Huichapan Calderas (Querétaro-Hidalgo), *en* Aguirre-Díaz, G.J., Aranda-Gómez, J.J., Carrasco-Núñez, G., Ferrari, L. (eds.), *Magmatism and tectonics of central and northwestern Mexico a selection of the 1997 IAVCEI General Assembly Excursions: México*, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 151 p.
- Alaniz-Álvarez, Susana A., Nieto-Samaniego, Angel F., 2005, El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 65-82.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF), 2005, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*: Washington, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation (WEF), 21st Edition, 1368 p.
- Apello, C.A., Postma, D., 1996, *Geochemistry, Groundwater and Pollution*: Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema, 536 p.
- Aranda-Gómez, J.J., McDowell, F.W., 1998, Paleogene extension in the southern Basin and Range province of Mexico: syndepositional tilting of Eocene red beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato mining district: *International Geology Review*, 40, 116-134.
- Aranda-Gómez, J.J., Henry, C.D., Luhr, J., McDowell, F.W., 2003, Cenozoic volcanic-tectonic development of northwestern Mexico – a transect across the Sierra Madre Occidental volcanic field and observations on extension-related magmatism in the southern Basin and Range and Gulf of California tectonic provinces, *en* *Geologic transects across Cordilleran Mexico*, 99th Annual Meeting of the Cordilleran Section of the Geological Society of America, Guidebook: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Centro de Geociencias, Publicación Especial 1, 71-121.
- 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, Mexico: *Journal of Hydrology*, 185, 23-44.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona-Benavides, A., Edmonds, 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 Hydrology*, 261, 24-47.
- Cerca-Martínez, L.M., Aguirre-Díaz G., López-Martínez M., 2000, The Geologic evolution of the southern Sierra de Guanajuato, Mexico, A documented example of the transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: *International Geology Review*, 42, 131-151.
- Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG), 2002, Definición de red para la caracterización y monitoreo de calidad química de agua subterránea de la zona de estudio León: Guanajuato, Gto., México, Universidad de Guanajuato, Contrato realizado para la CEASG, reporte inédito, 76 pp.
- Comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Guanajuato (CEASG), 1995, Resultados de los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos realizados dentro del Valle del Río Turbio: Guanajuato, Ingeniería Geológica Computarizada S.A. de C.V. (I.G.C.), informe técnico, 115 p.
- Comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Guanajuato (CEASG), 1998a, Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del valle de León: Guanajuato, Guysa, Geofísica de Exploraciones, S.A. de C.V., Contrato CEAS-APA-GTO-97-023, informe técnico, 125 p.
- Comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Guanajuato (CEASG), 1998b, Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del valle de Silao – Romita, Gto.: Guanajuato, Lesser y Asociados S. A. de C.V., Contrato CEAS-APA-GTO-97-025, informe técnico, 132 p.
- Comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Guanajuato (CEASG), 1999, Estudio isotópico para la caracterización del agua subterránea en la zona de La Muralla, Guanajuato, Gto., México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, contrato realizado para la CEASG, reporte inédito, 82 pp.
- Dávila-Alcocer, V.M., Martínez-Reyes, J., 1987, Una edad cretácica para las rocas basálticas de la Sierra de Guanajuato, *en* Simposio sobre la geología de la Sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 19-20.
- Douglas, M., Clark, I.D., Raven, K., Bottomley, D., 2000, Groundwater mixing dynamics at a Canadian Shield mine: *Journal of Hydrology*, 235, 88-103.
- Edwards, J.D., 1955, *Studies of some early Tertiary red conglomerates of central Mexico*: Washington, United States Geological Survey, Professional Paper 264-H, 153-183.
- Ferrusquia-Villafranca, I., 1987, Reubicación geocronológica del conglomerado Guanajuato basada en nuevos mamíferos, *en* Simposio sobre la geología de la Sierra de Guanajuato, resúmenes y guía de excursión: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 21-23.
- Fouillac, C., Michard, G., 1981, Sodium/litium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs: *Geothermics*, 10, 55-70.
- Fries, Carl, Jr., Hibbard, C.W., Dunkle, D.H., 1955, Early Cenozoic vertebrates in the Conglomerate at Guanajuato, Mexico: *Smithsonian Miscellaneous Collection*, 123(7), 25 p.
- Fryar, A.E., Mullican, W.F., Macko S.A., 2001, Groundwater recharge and chemical evolution in the southern High Plains of Texas, USA: *Hydrogeology Journal*, 9(6), 522-542.
- Genereux, D., 2004, Comparison of naturally-occurring chloride and oxygen-18 as tracers of interbasin groundwater transfer in lowland rainforest, Costa Rica: *Journal of Hydrology*, 295(1-4), 17-27.
- Glynn, P.D., 2004, Geochemistry and the understanding of ground-water systems: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 36(5), p. 26.
- Hernández-Laloth, N., 1991, *Modelo Conceptual del Funcionamiento Hidrodinámico del Sistema Acuífero del Valle de León*, Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura, 75 p.
- Hernández-Silva, G., Solorio-Munguía, G., Vasallo-Morales, L., Flores-Delgadillo, L., Maples-Vermeersch, M., Hernández-Santiago, D., Alcalá-Martínez, R., 2000, Dispersión de Ni y Cr en sedimentos y suelos superficiales derivados de piroxenita, serpentinas y basaltos de la cuenca de San Juan Otates, Estado de Guanajuato, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 17(2), 125-136.
- Horton, T.W., Becker, J.A., Craw, D., Koons, P.O., Chamberlain, C.P., 2001, Hydrothermal arsenic enrichment in a active mountain belt: Southern Alps, New Zealand: *Chemical Geology*, 177, 323-339.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1980, *Carta Topográfica Manuel Doblado, F14C61, Escala 1: 50000*: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Johannesson, K.H., Cortés-Silva, A., Ramos-Leal, J.A., Durazo-Lozano, J., 2002, Chemical geothermometry and enthalpy-chloride relationships indicate mixing/dilution of meteoric and geothermal waters in Guanajuato, Mexico: *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 34(6), 442.
- Johannesson, K.H., Cortés-Silva, A., Ramos-Leal, J.A., Ramírez-Guzman, H., Durazo-Lozano, J., 2005, Geochemistry of rare earth elements in groundwater from a rhyolite aquifer, central México: *en* Johannesson, K.H. (ed.), *Rare Earth Elements in Groundwater Flow Systems*: Dordrecht, Springer Verlag, Water Science and Technology Library, 51, 188-222.
- Laaksoharju, M., Skarman, C., Skarman, E., 1999, Multivariate mixing and mass balance (M3) calculations, a new tool for decoding

- hydrogeochemical information: *Applied Geochemistry*, 14, 861-871.
- Lee, E.S., Krothe, N.C., 2001, A four component mixing model for water in a karst terrain in south central Indiana, USA using solute concentration and stable isotopes as tracers: *Chemical Geology*, 179, 129-143.
- Lyons W.B., Welch, K.A., 1997, Lithium in waters of a polar desert: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 4309-4319.
- MacDonald, A.M., Darling, W.G., Ball, D.F., Oster, H., 2003, Identifying trends in groundwater quality using residence time indicators: an example from the Permian aquifer of Dumfries, Scotland: *Hydrogeology Journal*, 11(4), 504-517.
- Martínez-Reyes J., 1992, Mapa Geológico de la Sierra de Guanajuato, Escala 1:100 000: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas de México, serie 1:100,000, 1 mapa con texto.
- Nieto-Samaniego, A.F., 1992, Fallamiento y estratigrafía cenozoicos en la parte sudoriental de la Sierra de Guanajuato: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 9(2), 146-155.
- Nieto-Samaniego, A.F., Macías-Romo, C., Alaníz-Álvarez, S.A., 1996, Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13(1), 117-122.
- Nieto-Samaniego A.F., Alaníz-Álvarez, S.A., Camprubí-Cano, A., 2005, La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 285-318.
- Quintero-Legorreta, O., 1989, Contribución al conocimiento de la Geología de la Sierra de Guanajuato en la región de Comanja de Corona, Jalisco: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Tesis de Maestría, 87 p.
- Ramos-Leal, J.A., González-Morán, T., Durazo-Lozano, J., 2003, La inversión del gradiente hidráulico y sus efectos en la hidrogeoquímica de dos grupos bien diferenciados en la zona de La Muralla, Guanajuato, México: Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), *Revista Geofísica*, 59, 5-17.
- Ramos-Leal, J.A., Juárez-Sánchez, F., Durazo-Lozano, J., González-Morán, T., Ramírez-Guzmán, A.H., Cortés-Silva, A., Johannesson, K.H., 2004, Evidencias de mezcla secuencial binaria en el acuífero de La Muralla, Guanajuato, México, en XXXIII Congreso de la Internacional Association of Hydrogeologists y 7º Congreso de la Asociación Latinoamericana de Hidrogeología Subterránea, 11-15 Octubre 2004, Zacatecas, Resúmenes: México, 1-4.
- Ramos-Leal, J.A., Durazo, J., González-Morán, T., Ramírez-Guzmán, A., Johannesson, K.H., Cortés, A., 2005, Decay in chloride content of ground water associated to excessive production of a well field near Leon, Mexico: *Geofísica Internacional*, 44, 385-390.
- Rice, K.C., Hornberger G.M., 1998, Comparison of hydrochemical tracers to estimate source contributions to peak flow in a small, forested, headwater catchment: *Water Resources Research*, 34(7), 1755-1766.
- Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León (SAPAL), 2001, Estudio isotópico e hidrogeoquímico de la zona de León-Río Turbio: León, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, contrato realizado para el SAPAL, informe técnico (inédito), 75 p.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1991, Estudio hidrogeoquímico y modelación matemática del acuífero del Río Turbio para definir las acciones encaminadas a proteger de contaminantes la fuente de abastecimiento de la Ciudad de León Gto.: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, contrato CC-88-306-D, informe técnico, 104 p.
- Skalbeck, J.D., Shevenell, L., Widmer, M.C., 2002, Mixing of thermal and non thermal waters in the Steamboat Hills area, Nevada, USA: *Geothermics*, 31, 60-90.
- Valentino, G.M., Stanzione, D., 2002, Source process of the thermal waters from the Phlegraean Fields (Naples, Italy) by means of selected minor and trace elements distribution: *Chemical Geology*, 245, 245-274.
- Vasallo-Morales, L.F., Martínez-Reyes, J., Paris, J.P., 1996, Estructuras circulares y lineales en el Distrito Minero de Guanajuato, México, y su significado en la prospección minera: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13(2), 252-257.
- Verma, S.P., 1998, Error propagation in geochemical modeling of trace elements in two-component mixing: *Geofísica Internacional*, 37(4), 327-338.
- Verma, S.P., 2000, Error propagation in equations for geochemical modeling of radiogenic isotopes in two-component mixing: *Proceedings of the Indian Academy of Sciences (Earth and Planetary Sciences)*, 79-88.
- Verma, S.P., Santoyo, E., 1997, New improved equations for Na/K, Na/Li and SiO<sub>2</sub> geothermometers by outlier detection and rejection: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 79, 9-23.
- Wallick, E.I., 1981, Chemical evolution of groundwater in a drainage basin of Holocene age, east-central Alberta, Canada: *Journal of Hydrology*, 54, 245-283.
- Welch, K.A., Lyons, W.B., Graham, E., Neuman, K., Thomas, J.M., Mikesell, D., 1996, Determination of major element chemistry in terrestrial waters from Antarctica by ion chromatography: *Journal of Chromatography*, A739, 257-263.
- Yehdgho, B., Reichl, P., 2002, Recharge areas and hydrochemistry of carbonate springs issuing from Semmering Massif, Austria, based on long-term oxygen-18 and hydrochemical data evidence: *Hydrogeology Journal*, 10(6), 601-609.
- Yurtsever, Y., 1975, Worldwide survey of stable isotopes in precipitation: Vienna, International Atomic Energy Agency, *Isotopic Hydrology Section, Report*, 40 p.
- Yurtsever, Y., Gat, J.R., 1981, *Atmospheric Waters*, en Gat, J.R., Gonfiantini, R. (eds.), *Stable isotope hydrology, deuterium and oxygen-18 in the water cycle*: Vienna, International Atomic Energy Agency, *Technical Reports Series*, 210, 103-142.
- Zimmermann, J.L., Stein, G., Lapierre, H., Vidal, R., Campa, M.F., Monod, O., 1990, *Données géochronologiques nouvelles sur les granites laramiens du centro et l'ouest du Mexique (Guerrero et Guanajuato)*: Société Géologique de France, 13e Réunion des Sciences de la Terre, Grenoble, France, p. 127.
- Zuber, A., Weise, S.M., Motyka, J., Osenbrück, K., Rózański, K., 2004, Age and flow pattern of ground water in a Jurassic limestone aquifer and related Tertiary sands derived from combined isotope, noble gas and chemical data: *Journal of Hydrology*, 286(1), 87-112.

Manuscrito recibido: Mayo 19, 2006

Manuscrito corregido recibido: Marzo 12, 2007

Manuscrito aceptado: Junio 18, 2007