

Calidad del agua del acuífero Guadalupe-Bañuelos, Estado de Zacatecas, México

Diego Alonso Padilla-Reyes¹, Ernesto Patricio Núñez-Peña^{2*}, Felipe de Jesús Escalona-Alcázar² y Jorge Bluhm-Gutiérrez²

¹ Departamento de Geología, CICESE,
Carretera Ensenada-Tijuana 3918, Zona Playitas, C.P. 22860,
Ensenada, Baja California

² Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas,
Calzada de la Universidad 108, Col. Progreso, C.P. 98058,
Zacatecas, Zacatecas

* epnunez@yahoo.com.mx

RESUMEN

El acuífero Guadalupe-Bañuelos está ubicado en la cuenca hidrológica del mismo nombre, en la región central del Estado de Zacatecas. Ahí se llevó a cabo un estudio de la hidrodinámica y de la calidad del agua a partir del examen de las concentraciones de los iones mayoritarios, litio y elementos traza determinados por medio de análisis químicos en 14 muestras de agua subterránea. Las obras muestreadas son nueve pozos profundos, tres norias, un manantial y un canal. La importancia de este acuífero es muy grande, ya que es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable para las ciudades de Zacatecas y Guadalupe, así como para las demás poblaciones distribuidas dentro de la cuenca. La secuencia estratigráfica de la cuenca -de la base a la cima- está formada por el Complejo Las Pilas del Cretácico Inferior, el Conglomerado Zacatecas del Paleoceno-Eoceno, el Grupo Volcánico Superiordel Terciario y un Conglomerado Indiferenciado del Plioceno. Estas dos últimas unidades litológicas poseen propiedades hidráulicas de porosidad y permeabilidad que dan lugar a la zona saturada que conforma el acuífero. La calidad del agua fue determinada a partir de las concentraciones de los iones mayores (e.g. pH, Sólidos Totales Disueltos, Na, cloruros, sulfatos, nitratos) y de elementos traza (e.g. As, Pb, Hg, Li). Los resultados obtenidos fueron comparados con los parámetros establecidos en la NOM-127-SSA-1994 y sus modificaciones del año 2000. Fue posible llegar a la conclusión de que el agua se encuentra dentro de los límites permisibles para uso y consumo humano. Con la información de campo se desarrollaron bases de datos en el programa ArcGIS Ver. 9.3, con el que se realizó el análisis espacial de la hidrodinámica y de la calidad del agua. La interpretación de la caracterización de los flujos de agua subterránea fue apoyada con gráficas de sodio vs. litio y temperatura vs. litio, definiéndose dos sistemas de flujo local, uno que fluye de sureste a noroeste cuya área de recarga está en la parte sur del acuífero en las poblaciones de San Antonio y San Francisco las Cumbres, y la descarga está en las cercanías de la población de Bañuelos, hacia la parte centro. El otro flujo tiene su área de recarga en la margen oriental de la Sierra de Zacatecas, sigue una dirección suroeste-noreste hasta llegar a la zona de descarga en las poblaciones de La Zacatecana y Laguna de Arriba.

Palabras clave: acuífero Guadalupe-Bañuelos, hidrodinámica, Zacatecas, calidad del agua, NOM-127-SSA-1994.

ABSTRACT

The Guadalupe-Bañuelos aquifer is located in the center-southeast part of the state of Zacatecas, México. In this aquifer a hydrodynamics and water quality study based on the concentrations of major ions, lithium and trace elements measured in 14 groundwater samples was conducted. The samples were taken from nine deep wells, three draw-wells, one spring and one channel. This aquifer is important because is the major source of fresh water for the Zacatecas and Guadalupe cities. The stratigraphic sequence of the basin, from bottom to top, is made up by the Lower Cretaceous Las Pilas Complex, the Paleocene Zacatecas Conglomerate, the Tertiary Upper Volcanic Group and a Pliocene Undifferentiated Conglomerate. The last two lithological units have hydraulic properties that form the saturated zone. Water quality was defined by using the concentrations of the following parameters: hydrogen potential, total dissolved solids, chlorides, sulfates, fluorides, nitrates, sodium, arsenic, lead, lithium and mercury. The results were compared with those defined in the NOM-127-SSA-1994 and its amendments of 2000, concluding that the groundwater has good quality. Characterization of groundwater flows was supported by graphics of temperature vs. lithium and sodium vs. lithium, concluding the existence of two local groundwater flow systems: one from southeast to northwest having its recharging area in the southern part of the aquifer. Its discharge area is near Bañuelos towards the center of the basin. The other groundwater flow has its recharging area in the Sierra de Zacatecas foothills. The flow moves from southwest towards northeast, in the area located in La Zacatecana and Laguna de Arriba.

Keywords: Guadalupe-Bañuelos aquifer, hydrodynamics, Zacatecas, water quality, NOM-127-SSA-1994.

INTRODUCCION

En los últimos diez años la población de las ciudades de Zacatecas y Guadalupe se ha incrementado un 28%, lo que representa un incremento de 65,200 habitantes (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI, 2000 y 2010). Este aumento ha propiciado una mayor presión en el uso del territorio principalmente en vivienda, lo que conlleva a la demanda creciente de servicios, especialmente el abastecimiento de agua potable.

El acuífero Guadalupe-Bañuelos, localizado dentro de la cuenca hidrológica del mismo nombre, es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable de estas ciudades. La cuenca hidrológica está ubicada en la parte central del estado de Zacatecas (Fig. 1). Al norte limita con la cuenca de Chupaderos y al sur con la de Ojo Caliente. Sus límites occidentales y oriental son las sierras de Zacatecas y de Tolosa, respectivamente.

Los conocimientos de la hidrodinámica y de la calidad del agua subterránea se basan en reportes inéditos de la Comisión Nacional del Agua (e.g. Investigaciones Técnicas del Subsuelo, 1982, Estudios y Proyectos Moro, 1997). Con la creciente demanda en el consumo de agua, es indispensable actualizar la información hidrogeológica para que, tanto las instancias gubernamentales, como los usuarios de los aprovechamientos hidráulicos del acuífero Guadalupe-Bañuelos, tengan datos exactos que les permitan planificar su uso. De esta manera se podrán prevenir y atender oportunamente los problemas de calidad de agua, de posible contaminación ambiental y de uso eficiente y sustentable del agua subterránea. En este trabajo se presentan los resultados del muestreo hidrogeoquímico de 14 sitios del acuífero Guadalupe-Bañuelos. El análisis de esta información permitió actualizar la información de la calidad del agua y las características hidrodinámicas del acuífero.

METODOLOGÍA

La realización de este trabajo fue en campo y gabinete. El trabajo de gabinete consistió en la recopilación y revisión bibliográfica y cartográfica de la zona de estudio y áreas circunvecinas, con el fin de contar con un referente general que apoyara en la planeación de las actividades a seguir.

El trabajo de campo consistió en el muestreo de nueve pozos, tres norias, un manantial y un canal que conducía agua extraída del acuífero, y que en conjunto suman 14 aprovechamientos hidráulicos (Fig. 1).

El muestreo se realizó siguiendo el protocolo para la toma de muestras propuesto por Cardona (2003), que consiste en:

1. mediciones y registros hidrogeológicos (profundidad al nivel estático y profundidad al nivel dinámico);
2. toma de la muestra;
3. filtrado y preservación de la muestra;
4. mediciones fisicoquímicas de la muestra de agua in situ;
5. almacenamiento y
6. uso de blancos.

En cada aprovechamiento hidráulico se tomaron datos de oxígeno disuelto con un equipo de la marca Conductronic modelo Ox25. Los datos de pH, temperatura y conductividad eléctrica se tomaron con un Conductronic modelo PC18.

Los envases en los que se tomaron las muestras son de polietileno y fueron lavados con jabón libre de sulfatos, enjuagándolos primero con agua directa de la llave y por último dos veces con agua destilada.

El agua colectada en campo se tomó adaptando a las tuberías de descarga de los pozos un sistema de embudo con mangueras conectadas a una

celda de aislamiento. Para el caso del manantial y el canal, el sistema se adecuó al flujo de la corriente de agua. Se eligió un área donde hubiese la menor turbulencia para evitar en lo posible la presencia de sólidos en suspensión. Se eliminaron las burbujas de aire llenando por completo el recipiente para evitar la interacción del aire con la muestra, y se procedió inmediatamente a su cerrado hermético utilizando tapa y contratapa.

En cada aprovechamiento se tomaron tres muestras en envases diferentes. La muestra para la determinación de aniones y cationes fue de 500 mL, y no se añadió ningún conservador; para la determinación de nitratos fue de 120 mL y se añadió un mililitro de H_2SO_4 al 97.9% como estabilizador para evitar la precipitación de los elementos en solución y la disolución de los sólidos contenidos en suspensión.

Para el análisis de los elementos traza se utilizó un envase de 60 mL y se filtró con una membrana de acetato de celulosa con aberturas de 45 μm de diámetro y se le agregó un mililitro de HNO_3 al 70% como estabilizador, para evitar la precipitación de óxidos e hidróxidos metálicos. Todas las muestras fueron refrigeradas a 4°C para inhibir la acción bacteriana y retardar los cambios químicos que pudieran derivar como consecuencia del cambio de las condiciones originales en que se encontraba el agua dentro del acuífero.

La determinación de los parámetros físicos y los análisis químicos de aniones y cationes se realizaron en el Laboratorio AgroLab ubicado en el municipio de Morelos, Zacatecas, utilizando los métodos indicados en la Tabla I. La determinación de los elementos traza fue realizada en los laboratorios ActLabs en Ontario, Canadá, utilizando el método de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS).

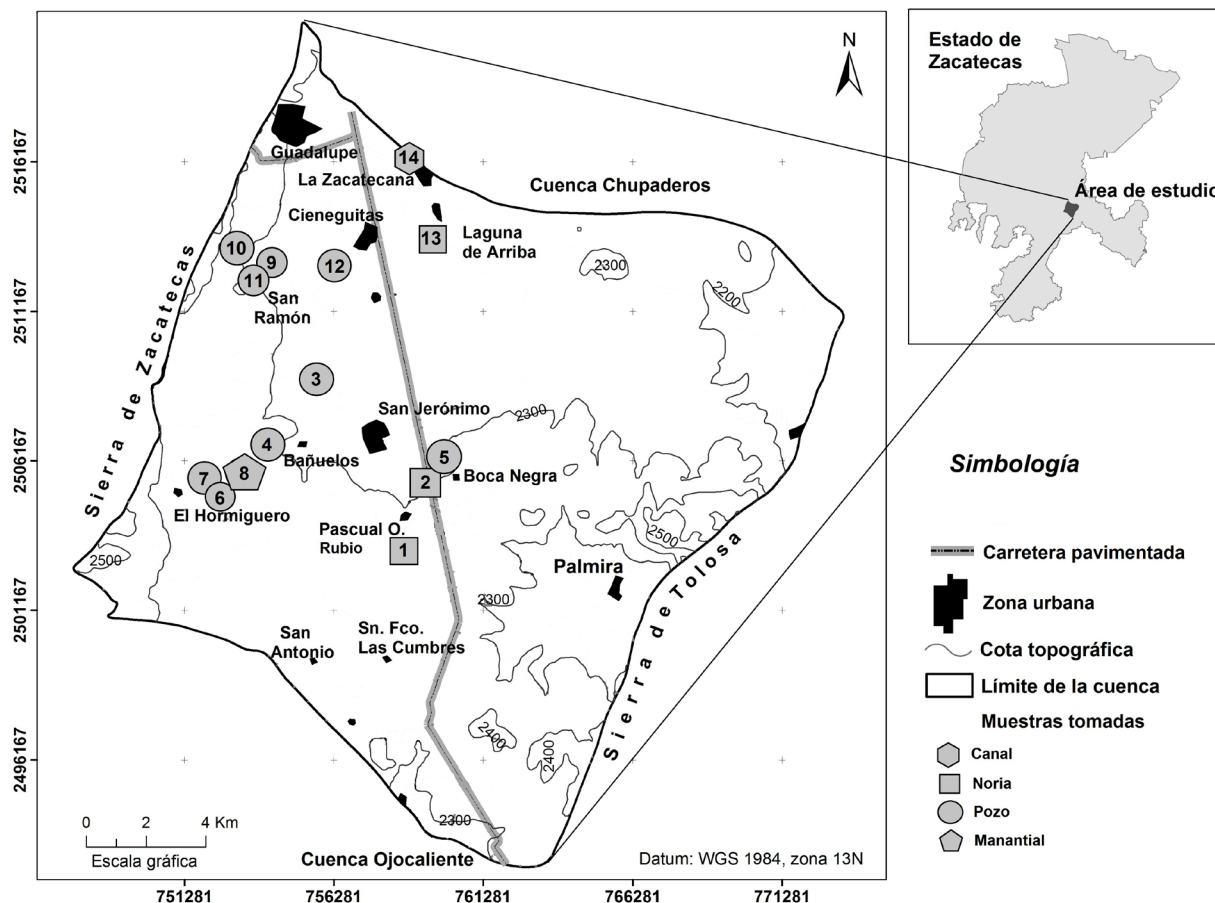


Figura 1. Mapa de localización de la cuenca hidrológica Guadalupe-Bañuelos. Se muestran la ubicación de las muestras y el tipo de aprovechamiento.

Tabla I. Métodos utilizados para la medición de los elementos mayores.

Parámetro medido	Método utilizado
Cationes mayoritarios (Na^+ , Ca^{+2} , K^+ y Mg^{+2})	Espectrofotometría de absorción atómica
Sulfatos (SO_4)	Turbidimétrico
Fluoruros (F)	Potenciométrico
Cloruros (Cl)	Argentométrico
Nitratos (NO_3)	Espectrofotométrico
Carbonatos y bicarbonatos (CO_3 y HCO_3)	Volumétrico de neutralización

La información obtenida en este estudio y la proporcionada por la Comisión Nacional del Agua fue procesada en el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGis 9.3.

GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

Estratigrafía

La descripción de la estratigrafía está basada en las cartas geológico-mineras F13-B68 Guadalupe, y F13-B58 Zacatecas, escala 1:50000 editados por el Consejo de Recursos Minerales (1997) (COREMI), y en el trabajo de Escalona-Alcázar y colaboradores (2009) (Fig. 2). En el área de estudio afloran unidades volcánicas del Cretácico al Oligoceno que, por su trama son prácticamente impermeables (Investigaciones Técnicas del Subsuelo, 1982). Sin embargo, las unidades en donde se encuentra el acuífero son depósitos sedimentarios del Pleistoceno y períodos posteriores, caracterizados por su porosidad y permeabilidad y por su consolidación que varía de poca a moderada. A continuación se presenta una síntesis de la secuencia estratigráfica que de la base a la cima es:

Cretácico

Las unidades litológicas más antiguas son del Cretácico Temprano y son la Formación Zacatecas y el Complejo Las Pilas (Escalona-Alcázar et al., 2009). La primera está formada por wackas y grauvacas, con algunos lentes de caliza, conglomerado y derrames de lava. El Complejo Las Pilas es una sucesión de flujos de lava de composición máfica, escasas tobas, diques, sills y lacolitos dioríticos interestratificados con grauvacas feldespáticas, lodolitas y calizas (Escalona-Alcázar et al., 2009). La edad de esta secuencia fue definida como del Cretácico Temprano a partir de edades U-Pb obtenidas en circones detríticos (Escalona-Alcázar et al., 2009).

Paleoceno

Durante el Paleoceno-Eoceno Temprano se depositó un conglomerado polimíctico, el conglomerado Zacatecas (Loza-Aguirre et al., 2008) el cual es de color rojo y consiste de clastos subangulares a subredondeados de cuarcita, filita, esquisto, diorita y rocas máficas, soportados por una matriz arcillo-arenosa. Varía

de moderado a bien consolidado (Escalona-Alcázar et al., 2009).

Eoceno

El Conglomerado Zacatecas está cubierto en contacto transicional por el Grupo Volcánico Superior (GVS) de edad Eoceno-Oligoceno (Edwards, 1955; Escalona-Alcázar et al., 2003). El GVS está formado por la interestratificación de depósitos de piroclásticos de caída y de flujo que contienen cantidades variables de pómez y de fragmentos líticos. Los fragmentos de cristales son principalmente de plagioclasa y cuarzo y en menor proporción hay biotita y sanidino (Escalona-Alcázar et al., 2003).

Oligoceno

De acuerdo con la descripción realizada por Escalona-Alcázar et al. (2003), derrames riolíticos en varios tonos de rosa sobreyacen a las rocas del Eoceno. Las texturas dominantes son, en todos los casos, porfídica, esferulítica y brechada, en ese orden de abundancia, con una estructura bandeada. Los fenocristales son fragmentos de cristales de plagioclasa, biotita y escaso cuarzo. Cortan a la secuencia estratigráfica domos de composición presumiblemente riolítica que varían de color rosa a negro verdoso. La textura dominante es porfídica, perlítica y ocasionalmente esferulítica. La mineralogía está constituida por fenocristales de plagioclasa y escasos de cuarzo y biotita, en una matriz que varía de vítrea a afanítica (Escalona-Alcázar et al., 2003).

Plioceno

A las unidades litológicas antes mencionadas las cubre un Conglomerado indiferenciado formado por clastos de ignimbritas, tobas riolíticas y en menor grado por filitas, areniscas y andesitas (COREMI, 1997). Esta unidad solamente es mencionada por el COREMI (1997) y es probable que se trate de depósitos de abanicos aluviales y fluviales. Es en esta unidad en donde se encuentra el acuífero Guadalupe Bañuelos. Su

espesor varía de 20 m a 600 m CONAGUA (2002). El punto de salida de la cuenca que está ubicado en la comunidad de La Zacatecana.

Geología Estructural

En este trabajo los rasgos estructurales del área de estudio se tomaron de las cartas geológico-mineras F13-B68 Guadalupe, y F13-B58 Zacatecas editadas por el Consejo de Recursos Minerales (1997) y del trabajo realizado por Escalona-Alcázar y colaboradores (2009) (Fig. 2).

En el área de estudio hay dos eventos de deformación; el más antiguo es del Mesozoico y corresponde a la compresión debida a la Orogenia Laramide que formó fallas inversas y plegamientos de gran amplitud. Durante el Cenozoico la deformación fue extensional (Escalona-Alcázar et al., 2009). En el área de estudio solamente aflora una falla inversa de aproximadamente 7.3 km de longitud que se localiza al sur de Palmira y que afecta a las rocas del Cretácico Temprano.

La deformación extensional del Cenozoico de la parte centro y norte de México incluye al menos cinco eventos que formaron estructuras de rumbo NW-SE y NE-SW. De éstos, la deformación de Cuencas y Sierras es la más reciente y formó horst y grabens cuya orientación varía de NNE a NNW (Aranda-Gómez et al., 2000; Nieto-Samaniego et al., 2005). Las sierras de Zacatecas y de Tolosa (Fig. 2) son dos horst que limitan al poniente y al oriente, respectivamente con el acuífero Guadalupe-Bañuelos. En el interior del área de estudio se observan dos sistemas de fallas normales, uno dirigido hacia el NW y el otro hacia el NNE cuyas dimensiones varían de 390 m a 3.7 km y de 300 m a 1.7 km, respectivamente. Estas estructuras afectan el flujo subterráneo porque ponen en contacto a las rocas volcánicas del Cretácico y Terciario Temprano, impermeables, con el Conglomerado Indiferenciado del Plioceno que es permeable. La distribución de estas estructuras define la configuración estructural de la cuenca en donde está el acuífero, por lo que,

aunque en la Fig. 2 solamente se observan unas pocas estructuras, no significa que no existan más estructuras que estén sepultadas por los sedimentos recientes y afecten el flujo del agua subterránea.

Hidrogeología

El acuífero Guadalupe-Bañuelos ha sido estudiado con diferentes niveles de detalle por algunas dependencias del Gobierno Federal. El primer trabajo fue realizado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados (1978) y estableció que el agua subterránea de este acuífero cumple con las normas de calidad para su clasificación como agua potable.

En 1982, Investigaciones Técnicas del Subsuelo estableció que la transmisibilidad del acuífero, determinada en pruebas de bombeo de corta duración en pozos y norias en el Conglomerado Indiferenciado, varía entre 0.015 y 0.0443 m²/s. En el trabajo de Investigaciones Técnicas del Subsuelo (1982) se mostró por primera vez la configuración del nivel piezométrico del acuífero Guadalupe-Bañuelos en donde se observa que la dirección del flujo subterráneo va de sur a norte. Unos años después, Ingeniería de Evaluación y Prospección (1986) describió que el nivel piezométrico se localiza entre los cinco y 100 m de profundidad, y que el acuífero se mantiene en equilibrio hidrodinámico. Cabe hacer mención que los estudios referidos en este apartado y otros mencionados más adelante solamente pudieron ser consultados en las oficinas de la Comisión Nacional del Agua, sin que se haya obtenido el permiso para publicarlos.

Estudios y Proyectos Moro, S.A. de C.V., en 1997, definió con base en la configuración piezométrica, que existen dos zonas de recarga, una al sur del acuífero y la otra al oeste, y que el sentido de los flujos subterráneos se orientan de sur a norte y de oeste a este. Ambos flujos confluyen hacia La Zacatecana.

El acuífero de Guadalupe-Bañuelos es de tipo libre y ocupa aproximadamente el 90% de la Cuenca de

Guadalupe-Bañuelos. Tiene un espesor que varía de 20 m a 600 m. Las partes más someras son las ubicadas en los bordes de las sierras, mientras que las más profundas están en la parte central y norte. La única determinación del coeficiente de almacenamiento dio un valor de 0.2 a 0.29 (Investigaciones Técnicas del Subsuelo, 1982).

A partir de las observaciones hechas durante la perforación de los pozos se definieron tres unidades hidrogeológicas que agrupan a la litología de acuerdo con su permeabilidad y funcionamiento hidrogeológico (Ingeniería de Evaluación y Prospección S.A., 1986). De la base a la cima las unidades hidrogeológicas que forman el acuífero Guadalupe-Bañuelos están formadas

por materiales de piamonte que se encuentran en el límite entre las sierras de Zacatecas y de Tolosa y el valle. Por su granulometría formada por la interestratificación de gravas y arenas, estos sitios son permeables y facilitan la filtración de agua hacia el acuífero. La segunda la constituyen depósitos fluviales formados por gravas y arenas con matriz arcillosa que están interestratificados. Esta unidad representa el receptáculo más importante de aguas subterráneas debido a que es permeable y a que fue detectada en toda la cuenca. Por último, está la unidad formada por el Complejo Las Pilas que constituye el basamento impermeable de la cuenca hidrológica (Ingeniería de Evaluación y Prospección S.A., 1986).

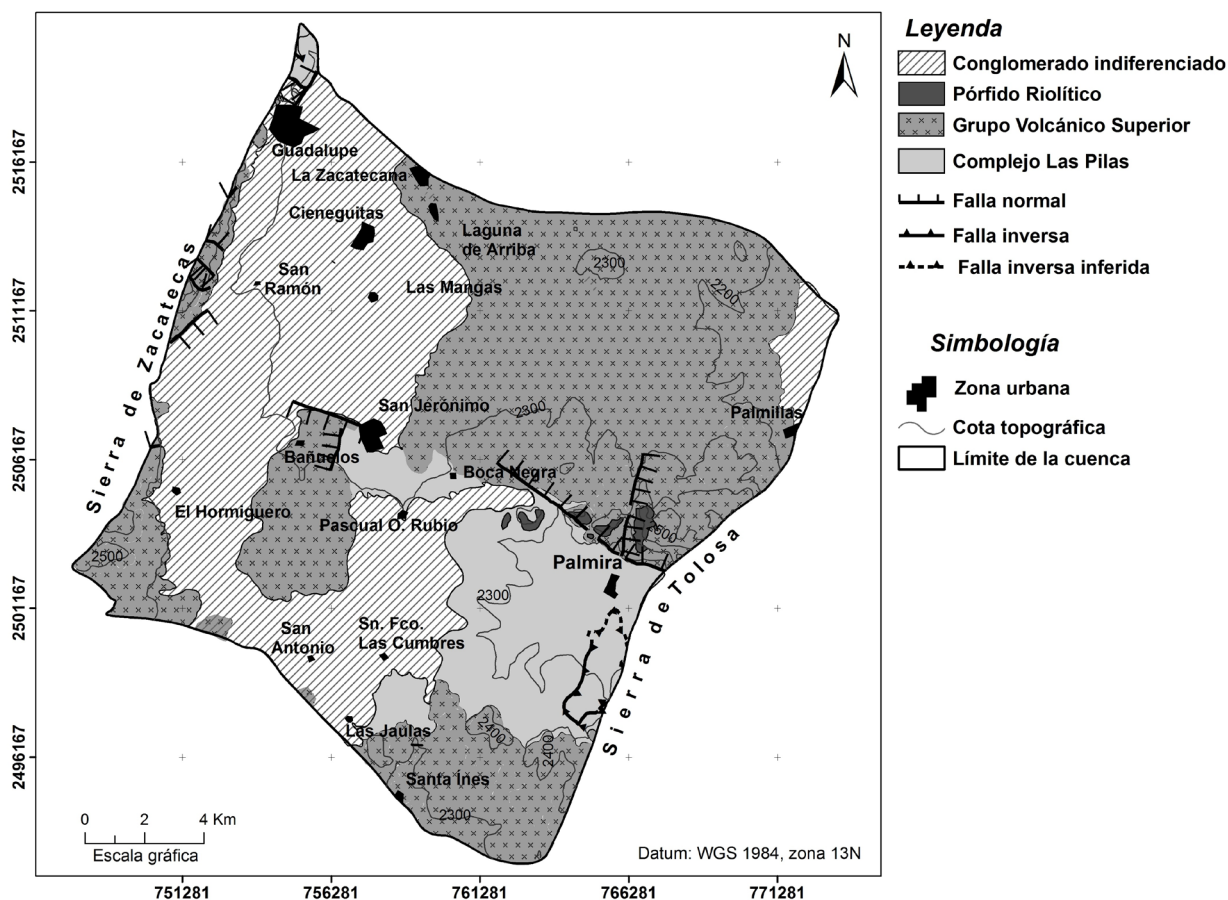


Figura 2. Mapa geológico de la cuenca hidrológica Guadalupe-Bañuelos (Modificado de Consejo de Recursos Minerales, 1997 y Escalona-Alcázar et al., 2009).

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS

Los parámetros fisicoquímicos permiten conocer de una manera general las características del agua asociadas a la cantidad de sólidos totales disueltos, interacción con las condiciones atmosféricas, profundidades diferentes de

circulación y la actividad del ion hidrógeno. Estos parámetros deben ser medidos en el campo y, aunque sean menos precisos que las medidas hechas en el laboratorio, son más exactos porque reflejan las condiciones originales del agua dentro del acuífero. Los resultados de las mediciones hechas en campo se muestran en la Tabla II.

Tabla II. Resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos en el campo.

Muestra	Tipo de aprovechamiento	Localidad	Conductividad eléctrica ($\mu\text{mhos/cm}$)	Oxígeno disuelto		Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	pH
				%	mg/L		
1	Noria	Pascual O. Rubio	644	38	3.5	16.1	8.43
2	Noria	Boca Negra	425	115	11.5	15.6	8.3
3	Pozo	San Jerónimo	433	106	8.2	26	7.76
4	Pozo	Bañuelos	492	129	9.4	27.7	8.25
5	Pozo	Boca Negra	480	142	12.8	16.8	7.85
6	Pozo	El Hormiguero	412	142	9.8	31.3	7.49
7	Pozo	El Hormiguero	455	152	10.8	29.1	7.74
8	Manantial	Bañuelos	506	98	9.3	13.2	8.37
9	Pozo	San Ramón	440	143	10.3	26.3	7.67
10	Pozo	San Ramón	595	137	9.9	27.4	8.1
11	Pozo	San Ramón	452	154	10.9	30.1	8.6
12	Pozo	Cieneguitas	467	154	9.1	26.7	7.85
13	Noria	Laguna de Arriba	1502	95	8.3	18.5	7.84
14	Canal	La Zacatecana	1035	44	4.1	19.1	7.2

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del agua está determinada por la cantidad de iones disueltos en ella, por lo tanto, sirve como una medida indirecta de la concentración de sólidos disueltos totales. Las conductividades varían de 425 $\mu\text{mhos/cm}$ a 1502 $\mu\text{mhos/cm}$. En la figura 3 se observa que existen dos zonas de baja conductividad, una está en la parte sureste del acuífero y la otra hacia la parte noroeste. También se pueden ver dos zonas de alta conductividad. Una está en el centro y la otra en la región noreste. Ya que la conductividad eléctrica está directamente

relacionada a la concentración del total de sólidos disueltos (STD), se infieren éstas áreas como las de mayor concentración de (STD) y podrían estar relacionadas a zonas de descarga del acuífero.

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto en el agua subterránea generalmente indica la exposición del agua a la influencia de la atmósfera, por lo tanto, este parámetro da una noción relativa de una incorporación reciente o no del agua al flujo subterráneo. A mayor cantidad de oxígeno disuelto, menor es la profundidad de circulación, o menor el tiempo de haberse incorporado al

flujo subterráneo. En caso contrario, con un porcentaje menor de oxígeno disuelto se indica, ya sea que la circulación se encuentra a gran profundidad, o que ha tenido un mayor tiempo de residencia relativa (Edmunds y Smedley, 2000), lo cual nos ayuda en la identificación de posibles zonas de descarga.

Las cantidades de oxígeno disuelto medido en los 14 aprovechamientos varían de 38% y 3.5 mg/L hasta 154% y 10.9 mg/L. En la figura 3 se puede observar una zona de alto contenido de oxígeno disuelto cerca de San Jerónimo y Boca Negra hacia el sureste del acuífero, y otra también de alto contenido en la parte noroeste. Hacia la zona noreste se encuentra una zona de bajo contenido de oxígeno disuelto. Estas diferencias de oxígeno disuelto coinciden con los valores de la conductividad eléctrica señalados en el apartado anterior.

Temperatura

Las mediciones del agua subterránea varían de 13°C en la parte sureste del acuífero cerca de las comunidades de El Hormiguero y Pascual O. Rubio, hasta 31°C en la porción noroeste del mismo, en los alrededores de San Ramón (Fig. 3).

La clasificación de Schöeller (1962) establece las condiciones para caracterizar el agua subterránea de acuerdo a su temperatura en hipothermal, ortothermal e hipotermas de acuerdo a lo siguiente:

1. Sí la temperatura del agua subterránea es mayor a la temperatura media anual +4°C, entonces se consideran como aguas termales.
2. Sí la temperatura del agua subterránea es mayor a la temperatura media anual pero menor a la temperatura media anual +4°C, entonces se consideran aguas ortotermas o normales.
3. Sí la temperatura del agua subterránea es menor a la temperatura media anual, entonces se clasifica como aguas frías o hipotermas.

Dado que la temperatura media en superficie para el periodo 2000-2008 (los años 2009 y 2010 se omitieron por no tener los datos completos al momento de realizar éste estudio) es de 15.0°C en la estación San Jerónimo y de 16.5°C en la estación Guadalupe, se obtuvo que la temperatura media en superficie de la cuenca hidrológica es de 15.75°C. Bajo las condiciones de la clasificación de Schöeller (1962) y definida la temperatura media, se obtuvo que el 57% de las muestras recolectadas tienen temperatura superior a 19.75°C, valor mínimo para que se consideren como aguas termales. La elevada temperatura puede deberse a reacciones exotérmicas del agua con los minerales que forman la roca encajonante; este proceso estaría favorecido por la cercanía con el Distrito Minero de Zacatecas. Otro origen podría ser la circulación del agua a mayor profundidad, es decir, proceder de un flujo regional. La comprobación de cualquiera de estas hipótesis está más allá del objetivo de este trabajo. El 28% de las muestras se encuentran en la clasificación de aguas ortotermas y el restante 15% referido a las muestras dos y ocho tienen temperatura menor a los 15.75°C, y por lo tanto se clasifican como aguas frías.

Potencial hidrógeno

Las muestras analizadas tienen un pH que varía de 7.2 a 8.6 y se encuentran dentro del rango permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 y sus modificaciones en el año 2000, en la cual se establece como límites permisibles para el consumo humano el valor mínimo de 6.5 y como valor máximo 8.5, a excepción de la muestra número 11 que presenta un valor de 8.6.

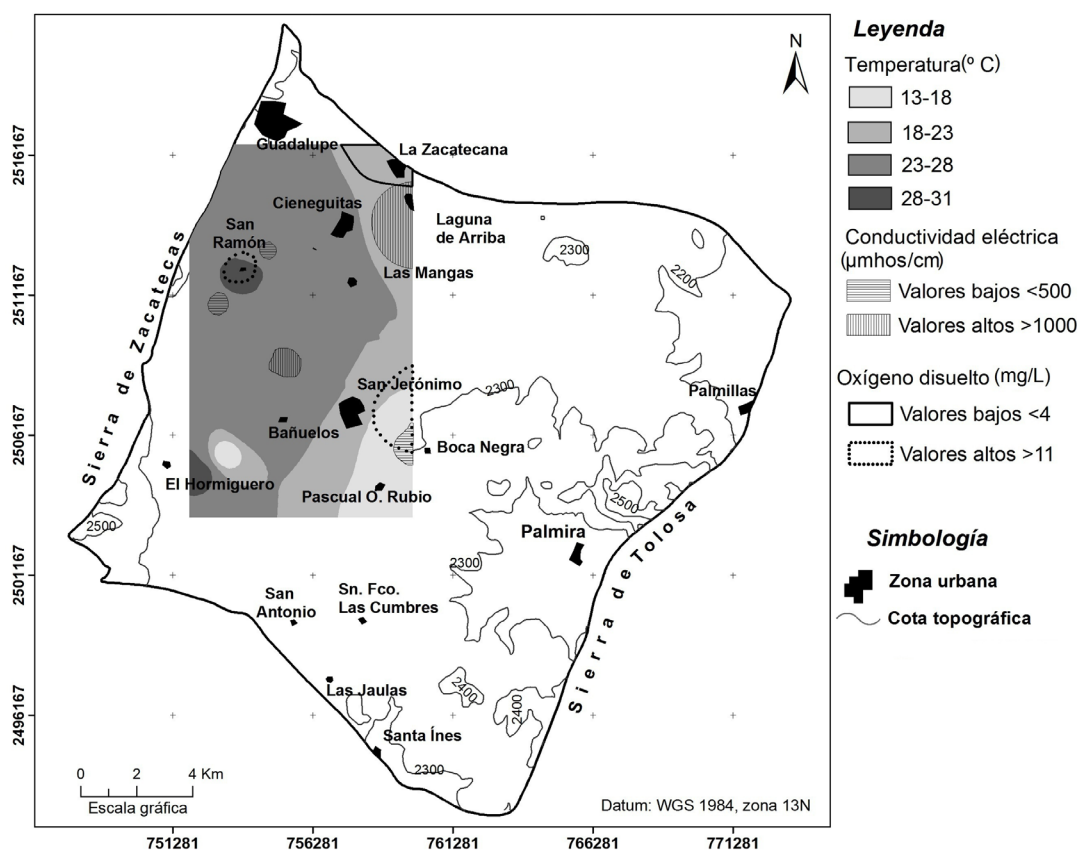


Figura 3. Distribución de los parámetros físicoquímicos medidos en los aprovechamientos hidráulicos muestreados.

CALIDAD DEL AGUA

En México la Secretaría de Salud a través de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994: "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización", y sus modificaciones en el año 2000 (en adelante sólo Norma), establece las características microbiológicas, físicoquímicas y radiactivas que debe cumplir el agua para su uso potable. Esta Norma fue la referencia para la comparación de los resultados de los análisis físicoquímicos obtenidos en las muestras.

Familias de agua

Los aniones: bicarbonato (HCO_3^-), cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-), fluoruro (F^-) y carbonato (CO_3^{2-}) y los cationes: sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) se utilizaron para identificar las familias de agua (Fig. 4). Las muestras se agruparon considerando las concentraciones de aniones (HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-}) y las concentraciones de los cationes ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+}) en miliequivalentes por litro. La clasificación que se utilizó fue definida utilizando una hoja de Excel, considerando para ello los porcentajes de las concentraciones de aniones (Ec. 1) y cationes mayores (Ec. 2), en donde el grupo y su composición se establece si la muestra

sobrepasa el 50% de un anión o catión. El cálculo de las concentraciones fue utilizando la Ecuación de Balance de Iones:

$$\%anión = \frac{anión}{HCO_3^- + Cl^- + SO_4^{2-}} [1]$$

$$\%catión = \frac{catión}{Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}} [2]$$

Los resultados permitieron definir cuatro familias de agua: bicarbonatada-cálcica, bicarbonatada-mixta, mixta-cálcica y sulfatada. Los primeros dos grupos contienen el 86% del total de las muestras. Las dos familias restantes solo representan una por muestra.

Sólidos totales disueltos (STD)

Los valores de sólidos totales disueltos contenidos en las muestras varían de 188 mg/L a 709 mg/L

(Tabla III), es decir, debajo de los 1,000 mg/L que es el límite oficial permisible según la Norma para que el agua sea apta para consumo humano.

Cloruros

Los valores de Cloruros obtenidos en las muestras analizadas varían de 32 mg/L a 222 mg/L (Tabla III) que están debajo de lo establecido por la Norma. Se observa que solo los valores más altos y cercanos al límite oficial se localizan en los alrededores de las poblaciones de Laguna de Arriba y la Zacatecana. Este aumento en las concentraciones de cloruros podría ser de origen antrópico, ya que se tiene conocimiento de que anteriormente en esta región se descargaban aguas residuales.

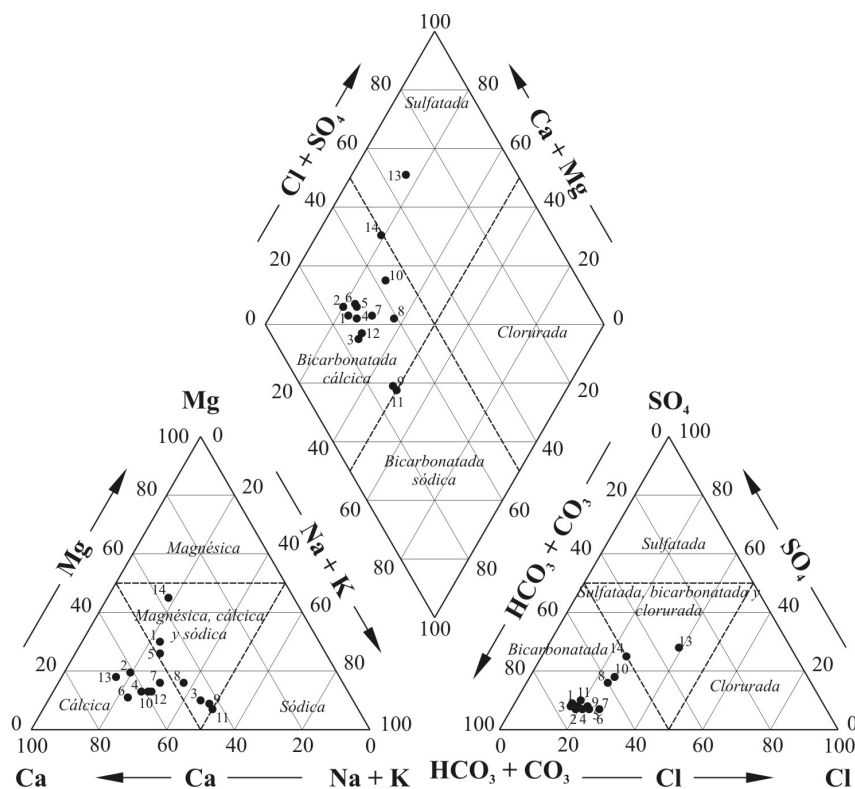


Figura 4. Diagrama de Piper con las familias de agua de las muestras analizadas.

Sulfatos

En lo que se refiere a los sulfatos, el contenido de las muestras analizadas se varía de 18.7 mg/L a 212 mg/L, esto es, debajo de los 400 mg/L establecidos por la Norma (Tabla III). Al igual que con los cloruros, los valores más altos están en los alrededores de las localidades Laguna de Arriba y La Zacatecana. Este incremento podría deberse a una alteración antrópica, debido a las descargas de aguas residuales que anteriormente se realizaban en esta región. Además, en tiempos de la Colonia, en La Zacatecana se depositaban los residuos de las minas, por lo que la alteración de los antiguos jales, ahora sepultados por sedimentos y cubiertos por el agua de la laguna, podría ser la causa de este aumento.

Fluoruros

El contenido de fluoruro varía de 0.48 mg/L a 3.20 mg/L, el valor más alto corresponde a la muestra

número diez, recolectada en San Ramón (Fig. 5). El resto se encuentra dentro del rango permitido para agua potable por la Norma que tiene como límite oficial 1.5 mg/L (Tabla III).

Arsénico

Los valores de arsénico varían de 0.00147 mg/L a 0.3 mg/L, lo que en general los ubica debajo del límite de 0.05 mg/L establecido por la Norma. Solamente la muestra diez, cuyo valor es de 0.3 mg/L (Tabla III), rebasa el límite definido por la Norma. Esta muestra está en las inmediaciones de San Ramón (Fig. 5). La muestra contiene seis veces más arsénico que lo permitido para que el agua sea aceptable para consumo humano. Además, considerando que no es zona agrícola ni de alguna otra actividad antrópica que pudiera generar esos valores, se sugiere contaminación de naturaleza geogénica; no se cuenta con más datos que permitan tener una mejor idea del tipo de roca o estructura que lo pudiera generar.

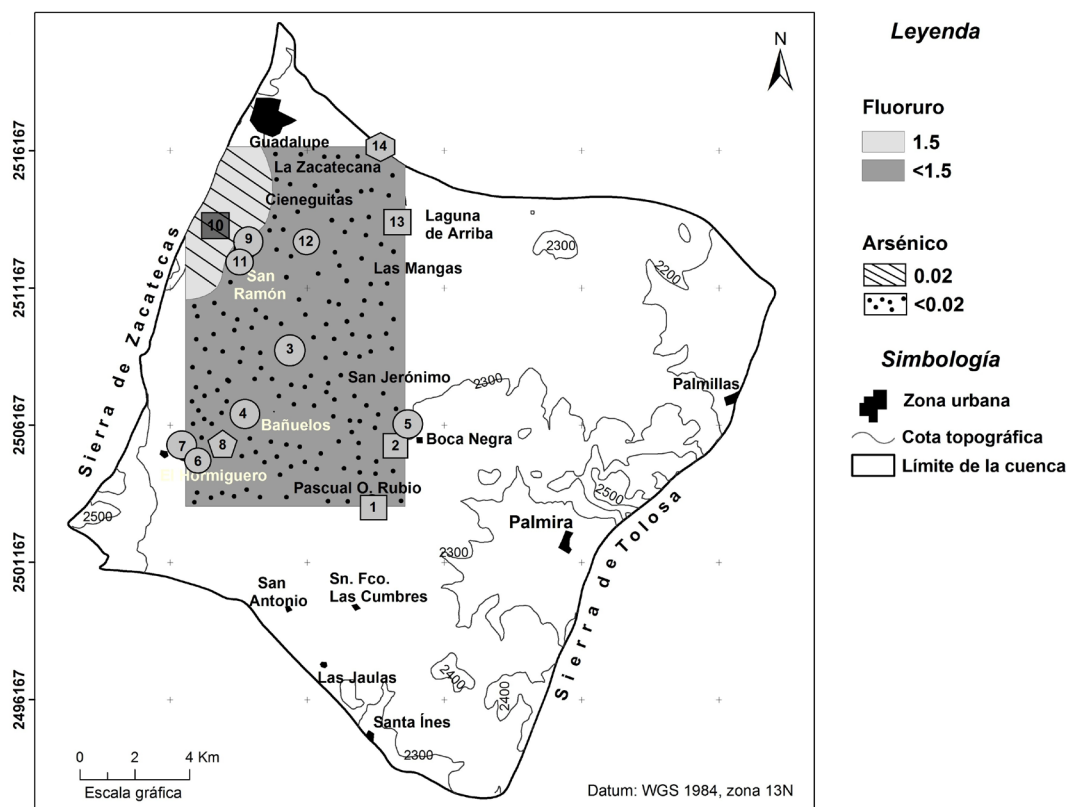


Figura 5. Mapa que muestra la zona de influencia debida a la muestra diez, la cual sobrepasa la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 en el contenido de fluoruro y arsénico.

Plomo

El contenido de plomo de las muestras varía de 0.00445 mg/L a 0.00986 mg/L. El total de las muestras se localiza por debajo del límite oficial permitido de 0.01 mg/L. Las concentraciones más altas relativas se localizan en la parte noroeste del acuífero, cerca de la población de San Ramón; mientras que los más bajos están en la parte noreste del acuífero, donde se localizan las poblaciones de Laguna de Arriba y La Zacatecana (Tabla III).

Mercurio

Los resultados de los análisis de las muestras recolectadas tienen valores dentro del rango 0.0003 mg/L a 0.0006 mg/L. Esto significa que

todas están debajo del límite oficial permitido de 0.001 mg/L para calificar como agua potable según la Norma (Tabla III).

Como puede observarse en la Tabla III la mayoría de los parámetros se encuentran por debajo del límite permitido por la Norma, a excepción de la muestra número diez que tiene valores elevados de arsénico y flúor. Si tomamos en cuenta que la muestra fue tomada en los alrededores de San Ramón (que no es zona agrícola ni de alguna otra actividad antrópica) podemos sugerir que los valores elevados de arsénico y flúor se deben a contaminación de carácter geogénico. Finalmente, el agua del acuífero Guadalupe-Bañuelos califica como agua potable de buena calidad según la Norma.

Tabla III. Resultados de los análisis químicos de las muestras de agua. Los límites permisibles corresponden a los establecidos en la Norma, (ne= no establecido en la Norma). Todos los valores están expresados en mg/L. En negritas los valores que están sobre el límite permitido.

Mues- tra	Localidad	STD	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	HCO ₃ ⁻	As	Pb	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Li	Hg
1	Pascual O. Rubio	323	49.01	33.2	0.81	366.35	0.00514	0.00807	31.4	15.5	74.0	28.1	0.014	0.0005
2	Boca Negra	229	42.88	21.6	0.48	282.88	0.00364	0.00758	15.4	20.7	72.4	13.6	0.016	0.0004
3	San Jerónimo	199	32.67	20.7	1.12	252.73	0.0154	0.00634	28.6	9.4	60.5	6.3	0.04	0.0004
4	Bañuelos	195	42.88	18.7	1.13	250.41	0.0101	0.00491	21.2	8.6	52.8	6.9	0.038	0.0004
5	Boca Negra	232	53.09	20.2	1.16	272.44	0.00464	0.00473	21.4	10.3	48.2	15.8	0.02	0.0003
6	El Hormiguero	188	46.97	20.6	0.92	253.89	0.00667	0.00497	22.4	6.3	65.5	7.0	0.044	0.0003
7	El Hormiguero	202	57.18	22.6	0.93	257.37	0.00955	0.00481	26.7	9.2	49.6	9.0	0.021	0.0003
8	Bañuelos	240	53.09	50.6	0.65	238.82	0.00147	0.00549	37.8	11.4	49.5	10.4	0.002	0.0004
9	San Ramón	206	44.93	21.8	1.28	246.94	0.0163	0.00507	41.0	7.2	32.4	3.1	0.075	0.0003
10	San Ramón	283	63.3	62.4	3.2	244.62	0.3	0.00986	34.9	7.9	73.1	9.5	0.169	0.0006
11	San Ramón	215	38.8	29.4	1.34	252.73	0.0166	0.00778	44.6	5.0	34.3	3.1	0.081	0.0003
12	Cieneguitas	201	36.76	21.7	0.94	248.10	0.0126	0.0056	21.2	10.4	46.1	6.2	0.031	0.0003
13	Laguna de Arriba	709	222.59	212	0.8	322.29	0.00698	0.00733	43.4	22.3	204.6	33.5	0.03	0.0006
14	La Zacatecana	487	110.27	150	0.73	374.46	0.0272	0.00445	68.2	26.5	143.2	105.9	0.063	0.0005
Límite permisible		1000	250	400	1.5		0.05	0.025	200	ne	ne	ne	ne	0.001

CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO

El agua, a medida que fluye por el subsuelo, interactúa con los distintos tipos de roca y así incorpora al líquido los elementos que le proporcionan al acuífero sus características hidrogeoquímicas. La interpretación de los datos hidrogeoquímicos aporta valiosos recursos para una correcta caracterización de los sistemas de flujo (Custodio y Llamas, 1983).

Las zonas con mayor contenido de oxígeno disuelto se localizan hacia la parte sureste del acuífero, cerca de las poblaciones de San Ramón, San Jerónimo y Boca Negra (Fig. 3). Con base en el alto contenido de oxígeno disuelto, concentraciones bajas de STD y bajas temperaturas del agua subterránea se sugiere que la margen occidental de la Sierra de Tolosa y en los alrededores de la localidades de San Jerónimo y Boca Negra podrían ser zonas potenciales de recarga. Los valores bajos de oxígeno disuelto obtenidos en La Zacatecana, aunados a la presencia de las mayores concentraciones de STD sugieren que es una zona de descarga.

La conductividad eléctrica está directamente relacionada con la cantidad de sólidos disueltos totales en el agua, los cuales se incorporan a medida que el agua interactúa en su recorrido por el medio geológico. En la Tabla III los valores más bajos de STD están en la población El Hormiguero, en la base occidental de la Sierra de Zacatecas. La margen occidental de la Sierra de Zacatecas se considera de recarga debido al bajo contenido de STD y alto contenido de oxígeno disuelto en el agua (Fig. 3). Además, siguiendo con el desnivel topográfico, hacia las poblaciones de La Zacatecana y Laguna de Arriba se incrementa la cantidad de STD, es decir hacia la zona de descarga. Otra zona que presenta los mayores contenidos en STD se localiza en la parte centro del acuífero, hacia el norte de Bañuelos, lo cual puede representar otra zona de descarga.

La piezometría también es un recurso importante en la caracterización de los sistemas de flujo subterráneo pues mide las variaciones de las cargas hidráulicas, y permite una interpretación de la configuración de los flujos del agua subterránea. En el mapa de elevación del nivel piezométrico se observan dos flujos (Fig. 6). Uno representa un flujo con dirección sureste-noroeste (A-A' en la Fig. 6) variando desde la elevación más alta de 2350 m.s.n.m. en el sureste a 2230 m.s.n.m. en la parte central de la cuenca, cerca de la población de Bañuelos. Se define otro flujo subterráneo (B-B' en la Fig. 6) que está en la porción occidental del acuífero y fluye de suroeste a noreste, hacia La Zacatecana, variando el nivel piezométrico de 2320 m.s.n.m. hasta 2230 m.s.n.m.. Como se señaló en párrafos anteriores, los STD se incrementan en esta misma dirección y el oxígeno disuelto disminuye siguiendo esta misma tendencia.

A lo largo de cada uno de los flujos anteriormente indicados se realizaron las secciones hidrogeoquímicas, A-A' y B-B' (Fig. 7). Estas secciones son la base para interpretar la evolución química del agua subterránea a partir de los parámetros temperatura y litio. La temperatura y el litio pueden ser utilizados como parámetros que indican el tiempo de residencia relativa del agua en un sistema de flujo; a mayor temperatura y concentración de litio, mayor será el tiempo de residencia relativa, por el contrario a menor temperatura y concentración de litio, su residencia relativa será menor. Esto se debe a que el litio de las rocas ígneas félsicas es fácilmente liberado y no se incorpora a la formación de nuevos minerales, ni es sometido al proceso de precipitación, además de que la concentración de litio en el agua subterránea tampoco es afectada por procesos de oxidación-reducción (Edmunds y Smedley, 2000).

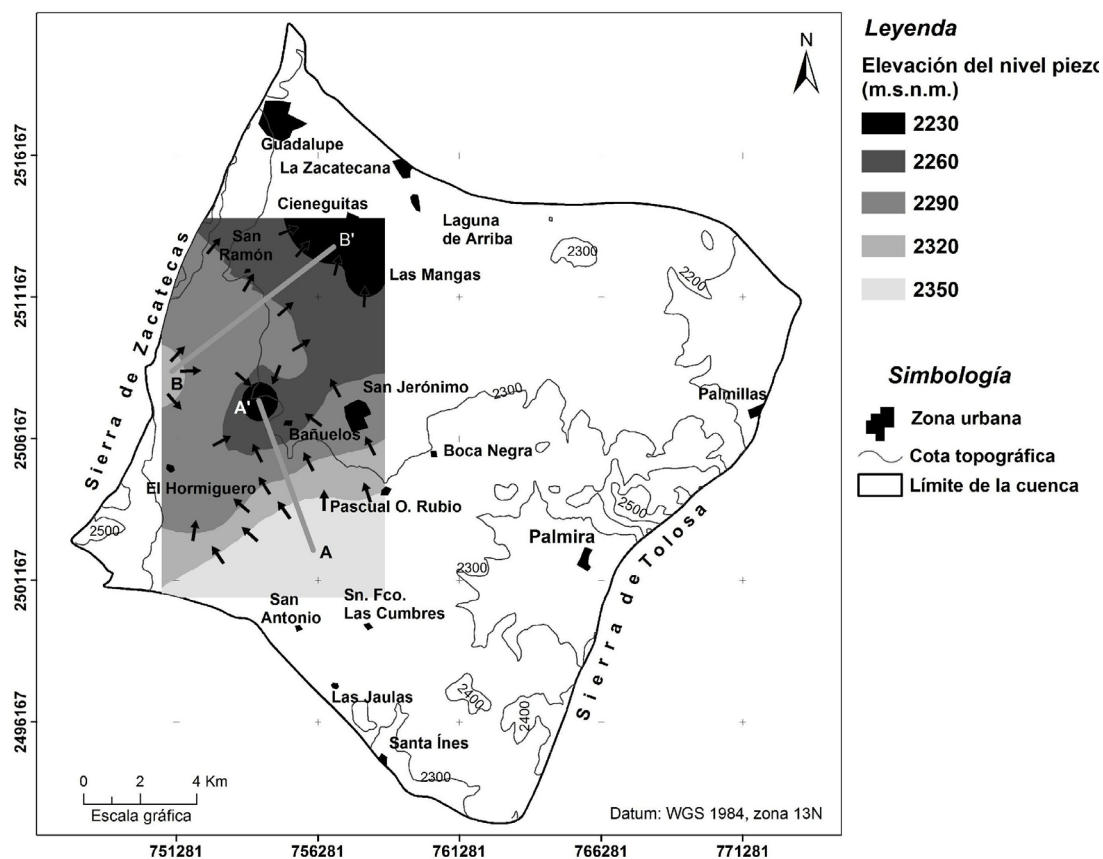


Figura 6. Mapa de elevación del nivel piezométrico para el año 2001 (datos proporcionados por la Comisión Nacional de Agua). A-A' y B-B' son las secciones hidrogeoquímicas.

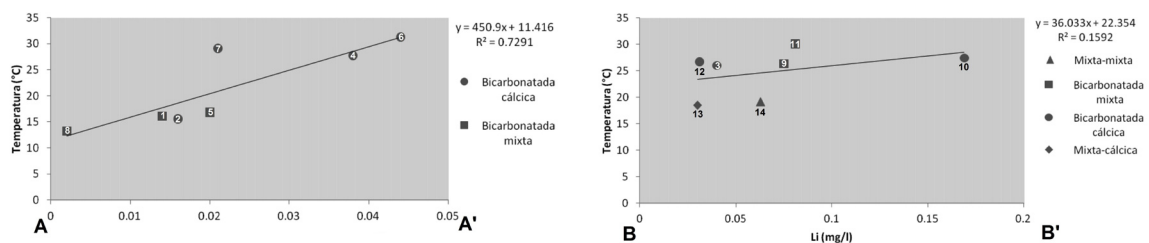


Figura 7. Gráficas con la relación de la temperatura vs litio para las secciones A-A' y B-B', respectivamente.

En la Fig. 7 se representa la relación temperatura-litio para la sección A-A', la cual muestra una tendencia lineal positiva a lo largo del flujo. Esto representa mayores tiempos de residencia relativa en el sistema hidrogeológico, pues las concentraciones aumentan siguiendo la dirección del flujo (Edmunds y Smedley, 2000). Las mayores concentraciones de litio y de temperatura están representadas por la familia bicarbonatada cálcica. El grupo del agua bicarbonatada mixta, presenta temperaturas bajas y concentraciones pobres de litio, por tanto podemos concluir que estos dos grupos, aunque están asociados al mismo sistema de flujo, poseen tiempos de residencia diferentes en el acuífero.

En la sección B-B' (Fig. 7) la familia bicarbonatada mixta tiene las mayores temperaturas y concentraciones de litio, a excepción de la muestra 10, caso contrario de lo que sucede en la sección A-A', lo que indica que las dos secciones representan dos flujos distintos entre sí. La familia bicarbonatada cálcica presenta un amplio rango en cuanto a concentración de litio. Se observa que el comportamiento de la relación temperatura-litio en la sección B-B' también muestra un comportamiento lineal. Esto indica que la familia bicarbonatada mixta posee un mayor tiempo de residencia relativa en el sistema.

CONCLUSIONES

La hidrodinámica y la calidad del agua del acuífero Guadalupe-Bañuelos se obtuvieron a partir de las muestras obtenidas en nueve pozos profundos, tres norias, un manantial y un canal, así como de niveles piezométricos de estudios anteriores.

Las muestras fueron analizadas por elementos mayores, lo que permitió definir 4 familias de agua: bicarbonatada mixta, bicarbonatada cálcica, mixta-mixta y mixta-cálcica, en ese orden de abundancia.

El agua del acuífero clasifica como agua potable ya que los valores de pH, STD, cloruros, sulfatos, arsénico, plomo y mercurio están por debajo de lo establecido por la Norma y sus modificaciones en el año 2000. Aunque el agua es de buena calidad, una muestra presentó valores altos en flúor y arsénico. El origen de estos valores altos podría ser de carácter geogénico.

Con base la piezometría, los STD, el oxígeno disuelto y las secciones hidrogeoquímicas A-A' y B-B', se definieron dos sistemas de flujo subterráneo. Uno cuya área de recarga está en la parte sureste de la cuenca, en la margen occidental de la Sierra de Tolosa. Este flujo mantiene una dirección de sureste-noroeste y tiene su área de descarga en las inmediaciones de la población Bañuelos. El otro flujo posee su área de recarga en la parte noroeste de la cuenca y hacia la margen oriental de la Sierra de Zacatecas, sigue una dirección suroeste-noreste hasta llegar a la zona de descarga localizada en los alrededores de las poblaciones La Zacatecana y Laguna de Arriba.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo fue posible gracias al proyecto "Calidad del agua del acuífero Guadalupe-Bañuelos, Estado de Zacatecas" coordinado por Ernesto P. Núñez Peña y financiado por la Dirección de Protección Civil y Bomberos del Estado de Zacatecas, con registro U.A.Z.-2010-35786. Los autores agradecen el apoyo de José de Jesús de Fernández Ávalos, ex-director de la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra. Asimismo, agradecen al Ing. Rafael Guardado Flores, de la Gerencia Estatal Zacatecas de la CONAGUA por su amabilidad y gran disponibilidad para la consulta de información. Por último, agradecen los comentarios y sugerencias hechos por Jorge Ramírez-Hernández y un árbitro anónimo que ayudaron a mejorar este manuscrito.

REFERENCIAS

- Aranda-Gómez, J. J., Henry, C. D. y Luhr, J. F., 2000. Evolución tectonomagmática post-Paleocénica de la Sierra Madre Occidental y la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIII: 59-71
- Cardona, A., 2003. Curso: Evaluación de la contaminación difusa en el agua subterránea. 4° Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, San Luis Potosí, S.L.P. 26 pp.
- CONAGUA, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Guadalupe-Bañuelos, Estado de Zacatecas. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. México D. F. 17 pp. (Inédito).
- Consejo de Recursos Minerales, 1997. Carta geológica-minera F13-B68 Guadalupe, escala 1:50000.
- Consejo de Recursos Minerales, 1997. Carta geológica-minera F13-B58 Zacatecas, escala 1:50000.
- Custodio, E. y Llamas, M. R. 1983. Hidrología subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, 2350 pp.
- Edmunds, W. M., and Smedley, P. L., 2000. Residence time indicators in groundwater: The East Midlands Triassic Sandstone aquifer. *Applied Geochemistry*, 15 (6): 737-752.
- Edwards, J. D., 1955. Studies of some early Tertiary red conglomerates of central Mexico. United States Geological Survey, Professional Paper 264-H: 153-183.
- Escalona-Alcázar, F. J., Suarez-Plascencia, C., Pérez-Román, A. M., Ortiz-Acevedo, O. y Bañuelos-Álvarez, C., 2003. La secuencia volcánica terciaria del Cerro La Virgen y los procesos geomorfológicos que generan riesgo en la zona conurbada Zacatecas-Guadalupe. *GEOS*, 23 (1): 2-16.
- Escalona-Alcázar, F. J., 2009. Evaluación preliminar de los riesgos debidos a la geomorfología de la zona urbana Zacatecas-Guadalupe y sus alrededores. *GEOS*, 29 (2): p. 252-256.
- Escalona-Alcázar, F. J., Delgado-Argote, L. A., Weber, B., Núñez-Peña, E. P., Valencia, V. A. y Ortiz-Acevedo, O., 2009. Kinematics and U-Pb dating of detrital zircons from the Sierra de Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26 (1): 48-64.
- Estudios y Proyectos Moro, S.A. de C.V. 1997. Estudio para la reactivación de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de: Calera-Benito Juárez, Chupaderos, Guadalupe-Bañuelos, Cuenca del Aguanaval, Ojocaliente y La Blanca, en el estado de Zacatecas. Comisión Nacional del Agua. Inédito. Contrato: GAS-003-PRO-97.
- Ingeniería de Evaluación y Prospección S.A. 1986. Estudio geohidrológico para la ciudad de Zacatecas, Zacatecas. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Inédito. Contrato: 86-G-DC-A-018-Y-0-6.
- Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A. 1978. Estudio de fuentes de abastecimiento en Zacatecas, Zacatecas. Dirección General de Construcción de Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado. Secretaria de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. Inédito. Contrato: BIOU-08/079-78.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. XII Censo de población y vivienda, Tomo I, 577 pp.

Manuscrito recibido: 1 de noviembre de 2011.

Recepción del manuscrito corregido: 26 de septiembre de 2012.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010. XIII Censo de población y vivienda. Inédito.

Manuscrito aceptado: 14 de octubre de 2012.

Investigaciones Técnicas del Subsuelo S.A. 1982. Estudio geohidrológico de la zona de Guadalupe-Bañuelos, Zacatecas. Secretaría de agricultura y recursos hidráulicos. Dirección general de aprovechamientos hidráulicos. Inédito. Contrato: GZA-82-86-EG.

Loza-Aguirre, I., Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Iriondo, A., 2008. Relaciones estratigráfico-estructurales en la intersección del sistema de fallas San Luis-Tepehuanes y el graben de Aguascalientes, México central. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 25 (3): 533-548.

Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Alvarez, S. A. y Camprubí í Cano, A., 2005. La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LVII (3): 285-318.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. 2000. "Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". Diario Oficial de la Federación. 20octubre 2000. 21 pp.

Schöeller H. 1962. Les eaux souterraines. Ed. Masson, Paris, 642 pp.