

# Hidroquímica del Agua de los manantiales de San Joaquín, Querétaro, México.

Gilberto Ledesma Ledesma<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Docente del Plantel No. 13 del Colegio de Bachilleres de Querétaro. Espeleólogo del grupo EXCAV de San Joaquín Qro. Laboratorio de Aguas Kársticas.

## RESUMEN

El presente trabajo se realizó con la finalidad de conocer, ampliar y generar información en relación al conocimiento de la hidroquímica del agua de algunos de los manantiales o surgencias más importantes y representativos del Municipio de San Joaquín Querétaro, así como conocer algunos de sus aspectos fisicoquímicos y poder establecer alguna relación con el medio geológico en donde se encuentran. Así mismo el presente trabajo, se convierte en una especie de censo, cuyos resultados e información generada pueda ser de utilidad para los años que vienen, en donde el tema “agua” será de vital importancia.

Se colectaron muestras de 16 manantiales del área mencionada. Los muestreos fueron llevados a cabo durante los meses de Noviembre de 2010 a Julio de 2011, considerados como periodos de lluvia y estiaje. Se llevaron a cabo mediciones de altimetría y ubicación de cada una de las surgencias, así como sus respectivos caudales durante los dos periodos de muestreo.

Los parámetros que se analizaron fueron: dureza total, calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), Sodio y Potasio ( $\text{Na} + \text{K}^{+1}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ). En campo fueron determinados: alcalinidad total, p H, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y potencial redox. Estos análisis son suficientes para el conocimiento químico del agua de la zona y su relación con el medio kárstico o calizo donde se encuentran cada una de las surgencias analizadas.

## ABSTRACT

This work was carried out with the purpose of know, expand and generate information in relation to the knowledge of the hydrochemistry of water some of the springs or upwelling important and representative of the municipality of San Joaquin Querétaro, as well as meet some of its physico-chemical aspects and to establish any relationship with the geologic environment where.

The parameters discussed were: total hardness, calcium ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesium ( $\text{Mg}^{+2}$ ), sodium and potassium ( $\text{Na} + \text{K}^{+1}$ ), bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ), sulphate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), chloride ( $\text{Cl}^-$ ). In field were determined: total alkalinity, p H, temperature, electrical conductivity, total dissolved solids and redox potential. These analyses are sufficient for the chemical knowledge of the water of the area and its relationship with the karst or limestone environment where each of the analyzed upwelling.

**Palabras clave:** manantiales o surgencias, carso (o karso), aguas kársticas, diagramas de Piper y Stiff, familias de agua, índices de saturación, evolución química del agua.

## INTRODUCCION

El agua es esencial para la vida. El agua y la vida son inseparables. La vida en el planeta se originó en el agua. En algunas partes el agua es tratada con respeto, en otras su importancia es ignorada. Se usa y se abusa de ella causando su destrucción, algunas veces por ignorancia y otras por falta de comprensión (Mere, 2003).

El tema del agua siempre será de vital importancia, sobre todo cuando los asentamientos humanos cada día son mayores y las grandes urbes requieren de mayores cantidades de agua. Es un problema de todos. Es por ello que ante un panorama no muy claro, es de vital importancia fomentar el estudio de este recurso, así como también, buscar alternativas para su máximo cuidado. En ese sentido, el presente trabajo, es una contribución al fomento del estudio y preservación de éste vital líquido.

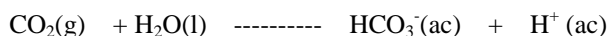
Una proyección de la UNESCO, establece que para el año 2030 más del 80% de las aguas necesarias para los usos hidropotables deberán ser extraídos de los acuíferos kársticos o calizos que pueden considerarse los más ricos y productivos del mundo, no del todo explotados, y en gran parte todavía desconocidos ( Giulivo, 1999).

El agua subterránea, sus fuentes y manantiales, han suscitado la curiosidad del hombre desde hace miles de años. Para Platón el agua de los ríos y manantiales procedía de una serie de conductos interconectados entre si que comunicaban con una gran caverna. Aristóteles apuntaba que el agua de los manantiales procedía de un conjunto de aberturas y conductos, producto de la condensación que circulaba a su través. Vitrubio establece que, es el agua de la lluvia y la fusión de la nieve la que infiltrándose en el terreno, aflorará nuevamente en las zonas bajas de la montaña. ( Ugalde, 1997).

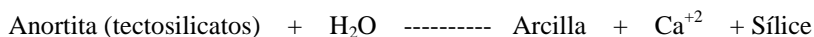
Las aguas subterráneas kársticas se generan como consecuencia de la filtración de parte de la lluvia caída sobre un macizo, representando un estadio del ciclo hidrológico. Si la lluvia cae sobre un terreno muy permeable como las calizas karstificadas, una parte de la misma se evaporará y la restante se filtrará en el subsuelo a través de las miles de fisuras, grietas, diaclasas y fallas que presentan los terrenos calizos.

El agua en contacto con los distintos minerales constructivos del medio rocoso por donde transita adquiere una composición que es característica del mismo. El proceso de disolución de las rocas carbonatadas en terrenos calizos da lugar fundamentalmente a iones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  ( Fagundo, 1996).

Durante las lluvias, el agua de infiltración que contiene una cierta cantidad de  $\text{CO}_2$  que depende de la materia orgánica disponible, de las condiciones estructurales del suelo y del desarrollo de la actividad microbiológica del mismo, disolverá más o menos la caliza hasta llegar a un equilibrio. Por tanto, la etapa de infiltración a través del suelo es muy importante para la composición química del agua subterránea kárstica. Esto debido a que el agua del suelo es ácida por la reacción entre el  $\text{CO}_2$  y el agua:



Esta acidez hace que el agua de infiltración sea muy agresiva con los silicatos y carbonatos. En las reacciones de disolución de estos minerales intervienen los  $\text{H}^+$ , y la acidez disminuye:



Por lo tanto, el pH, el contenido de iones mayoritarios, la dureza y el grado de saturación de los minerales presentes, pueden brindar una valiosa información sobre las condiciones geológicas de la zona, el modo de tránsito por el macizo y el tiempo de residencia del agua en el sistema. Así por ejemplo, un agua insaturada con poco contenido de iones disueltos puede indicar que el tiempo de tránsito a través del sistema kárstico no ha sido suficientemente largo. Si el agua está sobre saturada, puede indicar que la misma ha permanecido más tiempo en el interior del karst ( Fagundo, 1996).

Desde que el agua se filtra a través del subsuelo kárstico y alcanza la superficie freática más próxima y hasta que sale al exterior a través de un manantial, pueden transcurrir unos días o hasta cientos de años, y el recorrido puede ser muy corto o de varios kilómetros. Por lo tanto la evolución química de esa agua dependerá de los minerales con los que entre en contacto y del tiempo. Hay aspectos obvios: por ejemplo, si el agua atraviesa yesos (anhidritas) se obtendrán aguas con mayores cantidades de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), si encuentra a su paso niveles salinos con sales cloruradas adquirirá mayor concentración de cloruros ( $\text{Cl}^{-1}$ ) y sodio + potasio ( $\text{Na}+\text{K}^{+1}$ ), si pasa por formaciones calizas el agua adquiere mayor cantidad de bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{-1}$ ).

Aunque las reacciones y procesos químicos que se desarrollan son muy variados y complejos, como norma general se observa que las aguas subterráneas kársticas con menor tiempo de permanencia son generalmente bicarbonatadas. Después predomina el ion sulfato, y las más salinas son más cloruradas.

	Recorrido y tiempo de permanencia en el acuífero >>>>>>>				
Aniones que predominan	Bicarbonato --->	Bicarbonato Sulfato --->	Sulfato --->	Sulfato Cloruro --->	Cloruro
	Aumento de la salinidad >>>>>>>				

El propósito del presente estudio, es conocer la hidroquímica del agua subterránea del Municipio de San Joaquín Querétaro, en la Sierra Gorda. A través del estudio de la calidad química del agua procedente de los 16 manantiales que fueron muestreados en el área. El 100% del agua potable que se consume en el municipio de San Joaquín procede de manantiales kársticos.

## AREA DE ESTUDIO

El municipio de San Joaquín, se encuentra delimitado geográficamente entre los paralelos: 21°07' y 20°53' de latitud norte y entre los meridianos 99°22' y 99°40' de longitud oeste.

El municipio colinda al norte con los municipios de Pinal de Amoles y Jalpan de de Serra; al este con el estado de Hidalgo y Cadereyta de Montes; al sur con el municipio de Cadereyta de Montes; al oeste con Cadereyta y Pinal de Amoles. (INEGI, 2008).

San Joaquín representa aproximadamente el 2.2% de la superficie del Estado de Querétaro. La cabecera municipal se encuentra a 2450 msnm (metros sobre el nivel del mar). La elevación más alta (Cerro de San Antonio) se encuentra por el orden de los 2680 msnm.



Fig. 1 Ubicación del Municipio de San Joaquín Querétaro, en la Sierra Gorda Querétana. (Monografía Geológica Minera del Estado de Querétaro-INEGI-EXCAV)

### Geología de la zona.

El 9.12% de la superficie municipal corresponde a rocas del Jurásico Superior (Js) de la formación “Trancas”, consideradas las rocas más antiguas de la zona. Consisten de una alternancia de estratos margosos y arcillosos, cuya localidad tipo se encuentra en el rancho Las Trancas, Estado de Hidalgo. Son calizas microcristalinas en bancos medianos y gruesos y en algunos casos margosas. Formada también por lutitas delgadas calcáreas, calizas arcillosas y limonitas y en parte por calizas piritíferas.

El 55.44% está representado por rocas calizas de la formación “El Abra” del cretácico inferior (Ki); que son estratos de caliza criptocristalina, compacta, de color gris oscuro, que se presentan en espesores entre 1.50 y 3.0 m, conteniendo abundantes nódulos y lentes de pedernal negro, presentando algunas intercalaciones de de lutitas calcáreas ( Carbonell 1997).

El 33.14% de la superficie corresponde a la formación “Soyatal” del cretácico superior (Ks).. Esta representada por una alternancia de calizas y lutitas calcáreas de color amarillento y también por un conjunto de estratos arcillosos de color crema, separados por intercalaciones delgadas de lutitas color ocre. Los estratos de esta formación son formados por numerosos y delgados pliegues sedimentarios y estructuras nodulares, causados por ruptura de roca no consolidada. Morfológicamente ésta formación, está representada por lomeríos bajos de pendientes suaves, comúnmente localizados en los valles sinclinales.

El 2.30% restante, corresponde a rocas intrusivas del terciario que afloran sobre superficies muy limitadas. Son rocas intrusivas granodioríticas o “stocks” cuarzo-dioríticos.

El área San Joaquín; altiplanicie con más de 700 km<sup>2</sup> que fue originada por dos estructuras geológicas: El anticlinorio Piñón y el anticlinal Bonanza, ambas paralelas entre sí. Se encuentran flanqueadas por dos cabalgaduras, la del Doctor, al occidente y la del Fraile al oriente. En el macizo San Joaquín predominan las rocas calizas arrecifales de la formación “El Abra” (cretácico inferior). La formación “Trancas” (del Jurásico Superior), que subyace en aparente discordancia al formación “El Abra”. Y la formación “Soyatal” (del cretácico superior) que aflora descansando sobre la formación “El Abra” (Lazcano, 1983).

En el macizo San Joaquín, predominan las rocas calizas del cretácico inferior (Ki) (Albiano- Cenomaniano), representadas por estratos de roca caliza de cuenca color gris oscuro, compacta de estratificación gruesa, presentándose en algunas zonas estratos de caliza de hasta tres metros y que contienen abundantes nódulos y franjas de pedernal. (Fig. 2)

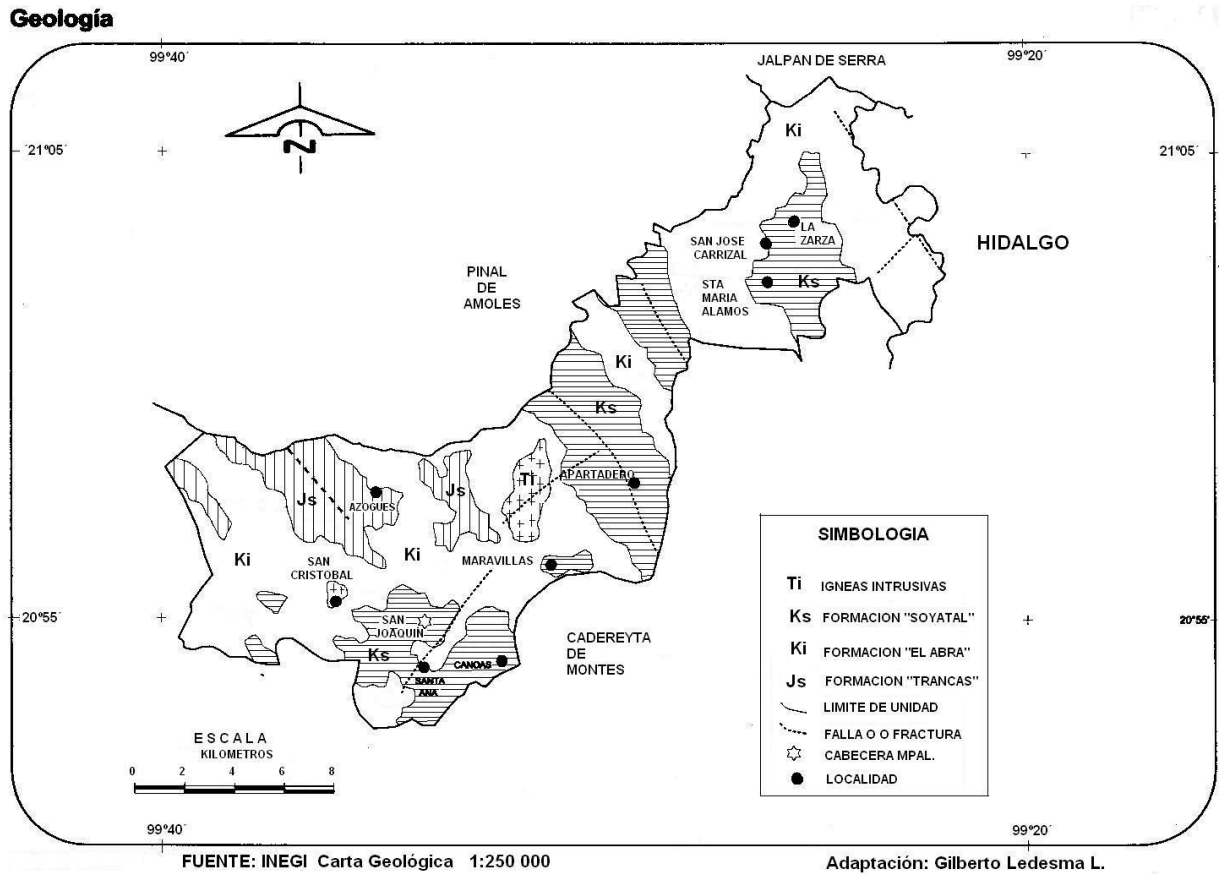


Fig. 2 Mapa geológico del municipio de San Joaquín Querétaro. (INEGI- Gilberto Ledesma Ledesma, 2011).

### Corrientes superficiales de agua

Hidrológicamente, el Estado de Querétaro es un parte aguas: hacia el Golfo de México, formando parte de la cuenca RH-26-Pánuco y hacia el pacífico a través de la cuenca RH-12 Lerma-Santiago.

La región hidrológica Pánuco (RH-26), es la más importante, ya que representa el 79% del territorio estatal. Esta región se divide a su vez en dos cuencas: La del río Tamuín (IV) y la del río Moctezuma (III).

El macizo calcáreo de San Joaquín, está formando parte de la cuenca III, a través del Arroyo de La Orduña y Rancho Quemado que hacia el NW, entrega sus aguas al Río Extoráz y por el Sur a través del Arroyo de Maconí, que entrega sus aguas al río Moctezuma. La parte norte del macizo San Joaquín a través de los arroyos: El Naranjo, Las Tinajas, San Lorenzo, Gatos, entregan sus aguas al Extoráz.

El municipio de San Joaquín pertenece a la región hidrológica del Panuco (RH26) a través de la cuenca (D) del Río Moctezuma; en donde la Sub-cuenca (a) del Río Moctezuma le corresponde un 13.30% de la superficie municipal y la Sub-cuenca (c) del Río Extoráz un 86.70% . (INEGI, 2008).

Las principales corrientes superficiales de agua del municipio se presentan en la Tabla 1.

NOMBRE	UBICACION	CAUDAL
EL NARANJO	RH26Dc	0.390 m <sup>3</sup> /s (promedio anual)
RIO MOCTEZUMA	RH26Da	2 m <sup>3</sup> /s (promedio anual)
RIO EXTORAZ	RH26Dc	0.798 m <sup>3</sup> /s (promedio anual)
LAS TINAJAS	RH26Da	Flujo intermitente
SAN LORENZO	RH26Dc	Flujo intermitente
AZOGUES	RH26Dc	Flujo intermitente
TRINCHERAS	RH26Dc	Flujo intermitente
AGUA DE LEON	RH26Dc	Flujo intermitente
LA ORDUÑA	RH26Dc	Flujo intermitente

Tabla 1. Corrientes superficiales de agua más importantes del municipio de San Joaquín Querétaro. (EXCAV-2011).

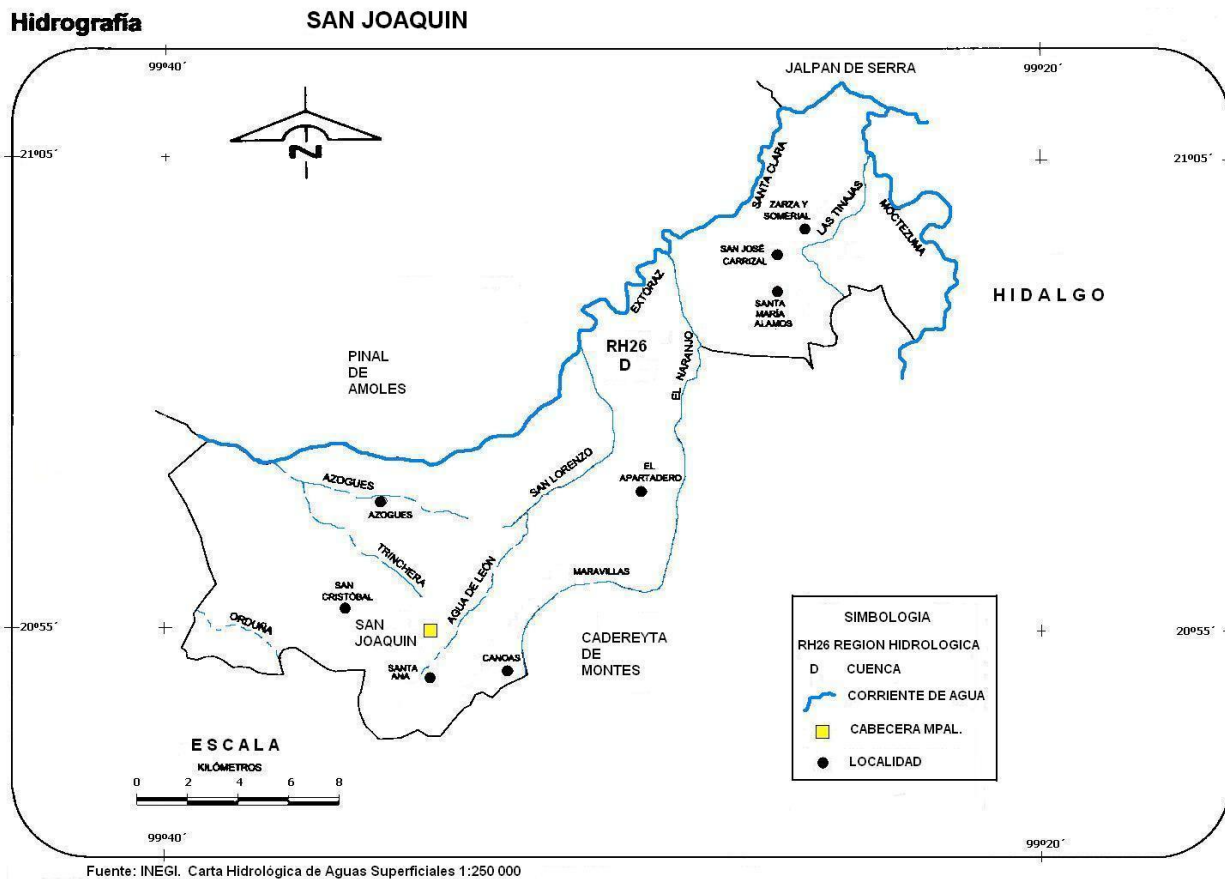


Fig. 3 Mapa hidrológico del Municipio de San Joaquín Querétaro. (INEGI- Gilberto Ledesma Ledesma, 2011).

### Precipitaciones Pluviales en la zona

El estado de Querétaro se localiza dentro de la zona tropical, influenciado por los vientos húmedos del Golfo. La Sierra Gorda, por su altitud y orientación, obstaculiza el paso de estas corrientes, originando precipitaciones en la vertiente oriental, lo que provoca, que los vientos secos absorban la humedad en la vertiente interior, creando condiciones de sequedad en la zona.

En la región serrana, encontramos alturas que van desde los 300 msnm hasta condiciones de montaña por arriba de los 3000 msnm, esto aunado a la humedad atmosférica y a la temperatura entre otros factores, da lugar a fenómenos meteorológicos un tanto complejos.

En los macizos el Doctor-San Joaquín, cuyas altitudes medias oscilan entre los 1900 msnm y por arriba de los 2500 msnm, se presentan precipitaciones anuales que fluctúan entre los 800 y mil milímetros, con una temperatura media anual de 13 a 15 °C.

Con los datos proporcionados por la estación climatológica El Doctor durante 2007, se registraron cerca de 1132 milímetros de precipitación pluvial anual.

Durante el período comprendido entre Noviembre de 2010 y Noviembre de 2011, se llevaron a cabo mediciones con pluviómetros ubicados en la cabecera municipal de San Joaquín y El Doctor, Cadereyta. En la Fig. 4, se muestran las precipitaciones pluviales medias durante 2010-2011.

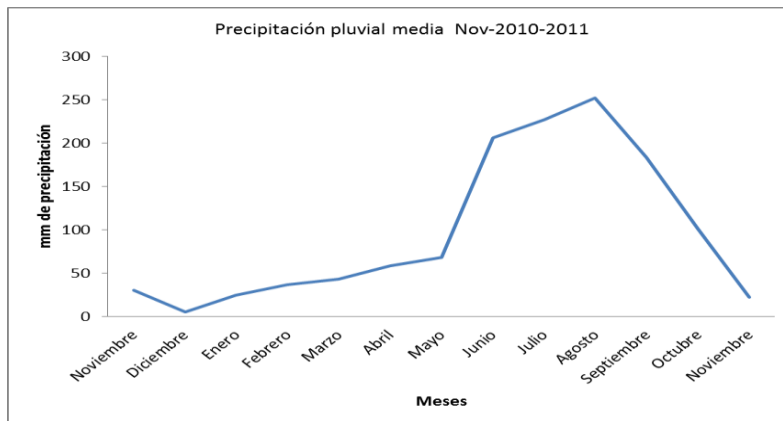


Fig.4 Precipitaciones pluviales medias en la zona de El Doctor-San Joaquín durante el período Noviembre de 2010-Noviembre de 2011. (Estación climatológica El Doctor-Pluviómetro EXCAV).

### Manantiales de San Joaquín

Cuando el flujo natural de aguas subterráneas o provenientes de partes más profundas del interior del planeta (aguas fósiles) aparece en la superficie de los continentes, se forman los manantiales; pero cuando ese flujo hídrico llega a cursos de agua se une a ellos. También puede formar lagunas o lagos.

Los manantiales son las fuentes de agua natural de mejor calidad. Esto se debe al hecho de que el recurso, antes de surgir a la superficie terrestre, ha viajado por kilómetros de rocas, sedimentos y suelos que sirven como filtros naturales para remover de él todo tipo de contaminantes y, en muchos casos, lo han enriquecido con preciosos minerales y sustancias que los seres humanos necesitan.

Es probable que todos los pueblos tengan historias tendientes a rendir homenaje a los manantiales, o a declararlos prodigios básicos de su cultura. Así, y además de sus particularidades locales, los países de Europa y América, a la vez que algunos asiáticos, tienen por patrimonio común en tal sentido el pasaje bíblico por el que el patriarca Moisés salva de la sed a su pueblo sacando agua de las piedras, cuando lo conducía a la Tierra Prometida a través del desierto de Sin, habiendo pedido antes al faraón egipcio su anuencia para abandonar su país, que durante un largo tiempo había ofrecido a los israelitas seguridad y sustento (IMTA).

En 1872, Mariano Bárcena fundador del Observatorio Meteorológico de México en su recorrido por esta parte de la Sierra Gorda y precisamente en la comunidad de Ranas, actualmente San Joaquín, describe la existencia de un manantial que ahora en la actualidad se conoce bajo el nombre de “Las Pilas”. En ese entonces se describía así: *.....”Al pie de ésta colina está una encina frondosa que los habitantes del lugar llaman El Arbol Bendito, por que según la tradición, bajo su sombra decía misa y explicaba la doctrina cristiana a los indígenas el padre Soriano, religioso dominico. El altar era una roca calcárea que domina grande especie de terreno. Próximo a ella está un manantial circular de dos metros de diámetro, sus aguas son diáfanas y de sabor calcáreo. En ellas fueron bautizados los nuevos cristianos....”* (Velasco,1997).

En el presente trabajo fueron registrados 16 manantiales dentro del Municipio de San Joaquín. No son todos, pero consideramos que dadas las características de cada uno de ellos, si podemos establecer que se trata de algunos de los más representativos en el municipio por la importancia que ellos tienen para cada una de las zonas en donde estos manantiales se encuentran.

En el mapa de la Fig. 5 se muestra la ubicación de cada uno de estos manantiales que fueron muestreados para éste trabajo; y en la tabla número 2 se muestran las ubicaciones de estos manantiales utilizando las coordenadas geográficas y

UTM NAD 27. En esa misma tabla se presentan las mediciones de caudal (en litros por segundo) que se realizaron en dos momentos: una en el período final de lluvias del 2010 y la otra medición realizada a mediados de la época de estiaje del 2011.

No.	Manantiales	Ubicación	Altitud (msnm)	Caudal (L/s) Nov-2010	Caudal (L/s) Jul-2011
1	La Zarsa	21° 01' 38'' N 99° 25' 15'' W	1660	0.702	0.175
2	Las Moras	21° 03' 02'' N 99° 26' 15'' W	1325	9.17	0.9
3	Los Alamos	21° 02' 11'' N 99° 26' 01'' W	1560	22.76 *	5.78 *
4	San Sebastián	21° 01' 30'' N 99° 28' 14'' W	870	7.43	7.39
5	El Naranjo	20° 59' 35'' N 99° 28' 16'' W	1140	553.18 *	229.2 *
6	El Chino	20° 56' 40'' N 99° 36' 01'' W	1470	8.34	5.27
7	La Huerta	20° 56' 43'' N 99° 36' 52'' W	1670	126.6	73.2
8	Gatos	20° 57' 24'' N 99° 36' 37'' W	1375	35.4	22.4
9	Tierra Colorada	20° 58' 15'' N 99° 34' 03'' W	1915	4.23	0.585
10	Agua de León	20° 54' 31'' N 99° 33' 26'' W	2315	0.003	0.00194
11	Agua del Viejo	20° 55' 08'' N 99° 33' 32'' W	2350	1.8	0.4
12	La Yerbabuena	20° 55' 48'' N 99° 28' 52'' W	1470	22.1	15.47
13	Trincheras	20° 56' 08'' N 99° 34' 17'' W	1970	16.4	6.91
14	El Potrero	20° 55' 11'' N 99° 33' 49'' W	2340	0.06	0.048
15	Las Pilas	20° 54' 47'' N 99° 33' 47'' W	2411	-	-
16	El Chepé	20° 54' 47'' N 99° 31' 55'' W	2384	-	-

Tabla 2. Ubicación y altimetría de los manantiales muestreados en el Municipio de San Joaquín Querétaro. Así también se presentan los caudales medidos durante Noviembre de 2010 y Julio de 2011. Los caudales de Alamos y El Naranjo fueron medidos sobre la corriente de los arroyos a los que pertenecen. El agua de los manantiales Las Pilas y El Chepé, que están localizados en la cabecera Municipal de San Joaquín están conectados a tanques de almacenamiento.

## METODOLOGIA Y RESULTADOS

Para conocer la hidroquímica del agua de los manantiales de la zona de San Joaquín, se hizo en primer término reconocimientos de campo para ubicar los manantiales del Municipio, utilizando monografías editadas por Gobierno del Estado, fotografías aéreas (de Google) y mapas regionales editados por el INEGI. Se realizaron recorridos guiados por la gente de la zona que conocía la existencia de manantiales y surgencias.

Se colectaron 32 muestras de agua procedente de los diferentes manantiales ubicados en el Municipio de San Joaquín, realizándose dos muestreos: En Noviembre de 2010 y Julio de 2011, que corresponden a periodos de lluvia y estiaje para la zona. Los manantiales localizados, fueron ubicados mediante GPS, utilizando coordenadas geográficas y coordenadas UTM, según el sistema de referencia NAD 27 para la República Mexicana (Fig. 5) De la misma forma se registraron las altimetrías para cada uno de los manantiales, utilizando la medida promedio entre los altímetros Magellan y Casio 3202.

En cada uno de los manantiales muestreados se realizaron medidas de caudal (en litros por segundo) utilizando el “método del objeto flotante” (Ortiz, 2001) con un factor de corrección del 0.8. Se hicieron dos medidas de caudal puntual: la primera en época de lluvia (Noviembre de 2010) y en la época de estiaje (Julio de 2011).

Entre los parámetros hidroquímicos que se consideran importantes por ser mayoritarios, se encuentran: calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), sodio ( $\text{Na}^{+1}$ ), potasio ( $\text{K}^{+1}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{-1}$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), cloruros ( $\text{Cl}^{-1}$ ), y como parámetros de campo, la conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, temperatura, pH, potencial redox (ORP). Tales análisis son suficientes para el estudio de los principales procesos químicos en la mayoría de los acuíferos y sus relaciones con los sistemas hidrológicos.

## Hidrografía

## SAN JOAQUIN (MANANTIALES)

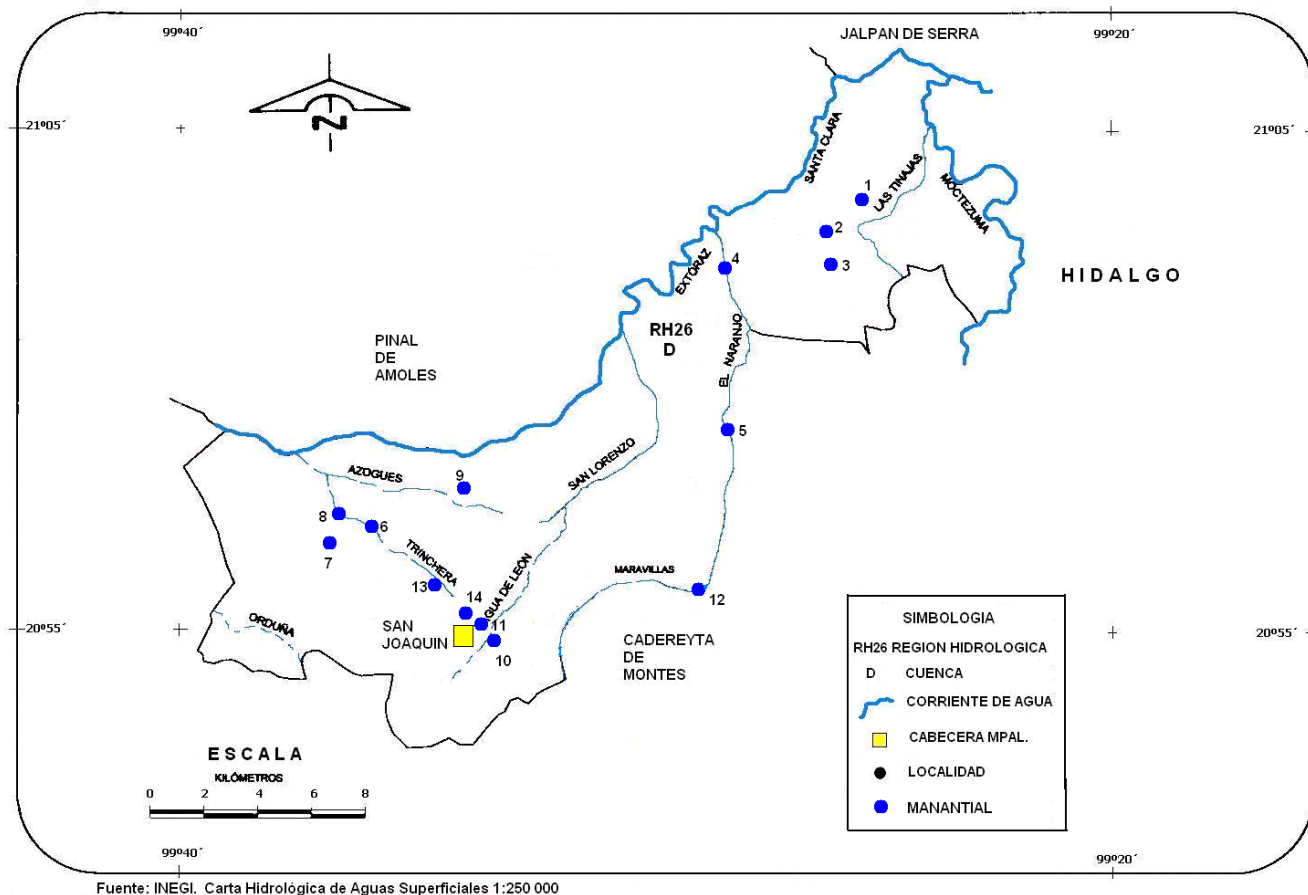


Fig. 6 Ubicación de los 16 manantiales más representativos del Municipio de San Joaquín Qro. 1 La Zarza, 2 Las Moras, 3 Alamos, 4 San Sebastián, 5 El Naranjo, 6 El Chino, 7 La Huerta, 8 Gatos, 9 Tierras Coloradas, 10 Agua de León, 11 Agua del Viejo, 12 La Yerbabuena, 13 Trincheras, 14 El Potrero. 15 y 16 Las Pilas y el Chepé están localizados en la Cabecera Municipal de San Joaquín. (INEGI-Gilberto Ledesma Ledesma 2011).

Las muestras de agua fueron colectadas en recipientes de polietileno de 500 ml, sin adicionar alguna sustancia para su preservación, ya que los análisis se realizaron en un tiempo no mayor de 48 horas. Las muestras fueron colocadas en hielo para su transporte.

En cada uno de los manantiales, se determinaron los parámetros de campo: La temperatura fue tomada con termómetro multifunción digital OTTO UT-23. El pH con el potenciómetro OAKLON. La conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales (SDT) con el medidor HANNA, HI 98 3000. El potencial redox (ORP), con el potenciómetro KOREA ORP sensor (KDS-1039).

Los parámetros químicos por analizar, dado que se tratan de aguas dulces fueron: Alcalinidad, Dureza Total, Calcio, Magnesio, Sulfatos, Cloruros y Sodio + Potasio.

La alcalinidad fue determinada por titulación, utilizando  $H_2SO_4$  0.02N y naranja de metilo como indicador. (Hernández-Morán 2003)

La dureza total y calcio, fueron determinadas por el método de titulación con EDTA 0.01M, utilizando Negro de Eriocromo T como indicador para la dureza y murexida para el Calcio. El Magnesio fue determinado por diferencia entre dureza y calcio. (Ledesma, 2008)

Los sulfatos fueron determinados por método turbidimétrico, utilizando  $BaCl_2$  como precipitante. (HANNA)

Los cloruros por titulación con nitrato de mercurio (II), utilizando como indicador: difenilcarbazona. (HANNA)

El Sodio + Potasio fue calculado a partir de la diferencia entre los mili equivalentes de aniones y cationes (Castillo 1996).



La confiabilidad y validez de los datos analíticos obtenidos ha sido controlada mediante el cálculo del error del balance eléctrico (Romero,1999).

El tratamiento de los datos hidroquímicos se realizaron con el programa AqQA de la RockWare Since (2006), para la realización de los diagramas de Piper y Schoeller.

Además el programa incorpora un código de modelación para el cálculo de los índices de saturación de la calcita (ISC) y la aragonita (ISA).

Para la determinación de si un agua está o no en equilibrio con el  $\text{CaCO}_3$  y que permite medir el grado de agresividad de un agua natural se calculó el índice de Langelier (ISL) mediante el empleo de un calculador de la Water Treatment Solutions Lenntech corregido y ajustado mediante el índice de saturación de Carrier.

Tabla 3. Análisis químicos de las aguas procedentes de algunos manantiales del Municipio de San Joaquín Qro. Nov-Dic 2010.

Nov-Dic 2010			$\text{Ca}^{+2}$	$\text{Mg}^{+2}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	Na + K	SDT	Dureza	ISL
Muestra	T°C	pH	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	
La Zarza	15	7.7	124.2	4.03	336.6	63	2	0.352	302	326.6	<b>0.51</b>
Las Moras	17	7.1	82.2	2.43	250	30	4	0.546	222	216.6	<b>-0.32</b>
Los Álamos	18	7.2	110.8	4.04	323.3	27	2	0.43	266	293.3	<b>0.024</b>
San Sebastián	19	7.3	77.4	4.86	260	70	4.5	1.69	195	213.3	<b>-0.79</b>
El Naranjo	18	7.1	73.48	7.28	226	65	2	0.852	188	213.3	<b>-0.38</b>
El Chino	17	7.6	77.48	7.28	226.6	80	3	1.0	193	223.3	<b>0.12</b>
La Huerta	19	7.9	84.16	8.10	286.6	40	2	0.304	222	243.3	<b>0.59</b>
Gatos	16	7.4	82.8	4.04	206.6	70	3	0.465	197	223.3	<b>-0.12</b>
T. Coloradas	16	7.9	76.14	6.49	236.6	80	2	0.416	192	223.3	<b>0.41</b>
Agua de León	16	7.6	128.3	1.60	293.3	110	2	0.423	293	326.6	<b>0.35</b>
Agua del Viejo	14	7.5	122.9	1.6	303.3	70	4	0.268	256	313.3	<b>0.25</b>
La Yerbabuena	18	7.8	70.8	7.28	233.3	10.5	2	0.373	193	206.6	<b>0.31</b>
Trincheras	17	7.8	80.2	4.03	233.3	25	2	0.06	156	216.6	<b>0.36</b>
El Potrero	17	7.8	86.8	4.04	255.2	45	2	0.832	214	233.3	<b>0.21</b>
Las Pilas	14	7.9	120.2	4.04	306.6	86	10	0.768	310	316.6	<b>0.63</b>
El Chepé	16	7.0	106.8	4.89	226.6	100	12	0.408	297	286.6	<b>-0.4</b>

Tabla 4. Análisis químicos de las aguas procedentes de algunos manantiales del Municipio de San Joaquín Qro. Jun-Jul 2011

Jun-Jul 2011			Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na + K	SDT	Dureza	ISL
Muestra	T°C	pH	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	
La Zarza	16	7.0	105.5	3.24	333.3	60	2	1.23	296	276.6	<b>-0.24</b>
Las Moras	18	7.1	84.8	1.61	266.6	60	2	1.2	252	218.3	<b>-0.27</b>
Los Álamos	19	7.6	66.8	12.1	303	45	4	1.65	259	216.6	<b>0.20</b>
San Sebastián	20	7.4	70.4	7.54	183.3	90	4	0.848	231	206.9	<b>-0.16</b>
El Naranjo	19	7.9	60.81	8.37	206.6	58	4	0.982	202	186.2	<b>0.31</b>
El Chino	22	7.7	72.14	2.43	186.6	75	2	0.877	180	190	<b>0.22</b>
La Huerta	20	7.8	82.83	1.61	250	40	2	0.72	216	213.3	<b>0.45</b>
Gatos	18	7.2	72.4	7.29	190	70	2	0.429	186	210	<b>-0.36</b>
T. Coloradas	18	7.8	74.81	1.61	200	70	2	0.926	186	193.3	<b>0.27</b>
Agua de León	15	7.7	103.7	3.4	266.6	120	2	1.46	320	272.4	<b>0.33</b>
Agua del Viejo	15	7.7	98.12	5.4	266.6	80	6	0.859	262	267.2	<b>0.32</b>
La Yerbabuena	20	7.7	65.3	7.1	175.6	9	3	0.989	193	206.7	<b>0.099</b>
Trincheras	16	7.8	62.79	3.24	183.3	50	2	0.707	166	170	<b>0.12</b>
El Potrero	18	7.7	75.3	7.85	233.3	50	2	0.527	204	233.4	<b>0.24</b>
Las Pilas	16	7.3	91.9	8.38	260	96	8	1.21	329	263.8	<b>-0.14</b>
El Chepé	17	7.6	81.54	12.14	233.3	85	10	1.0	355	253.4	<b>0.11</b>

#### Familias de agua predominantes en la región.

Mediante la utilización de los diagramas triangulares de Piper, es posible determinar las familias de agua que predominan en el área de estudio de acuerdo con el contenido iónico. Este diagrama permite representar a un mismo tiempo varias muestras de agua y por consiguiente facilita la comparación visual de sus calidades químicas en función de los iones predominantes de cada una de las muestras de los manantiales. Por lo tanto, aguas del mismo tipo o familia química aparecerán en el diagrama formando agrupamientos de puntos en zonas bien determinadas de éste diagrama triangular. Para elaborar este diagrama se utilizaron los valores químicos obtenidos durante los dos muestreos de los manantiales. Es decir, durante la época de finales de lluvia (Nov- Dic-2010) y la época de estiaje (Jun-Jul.2011). Las figuras 7 y 8 muestran los diagramas de Piper para los manantiales de San Joaquín durante los dos muestreos.

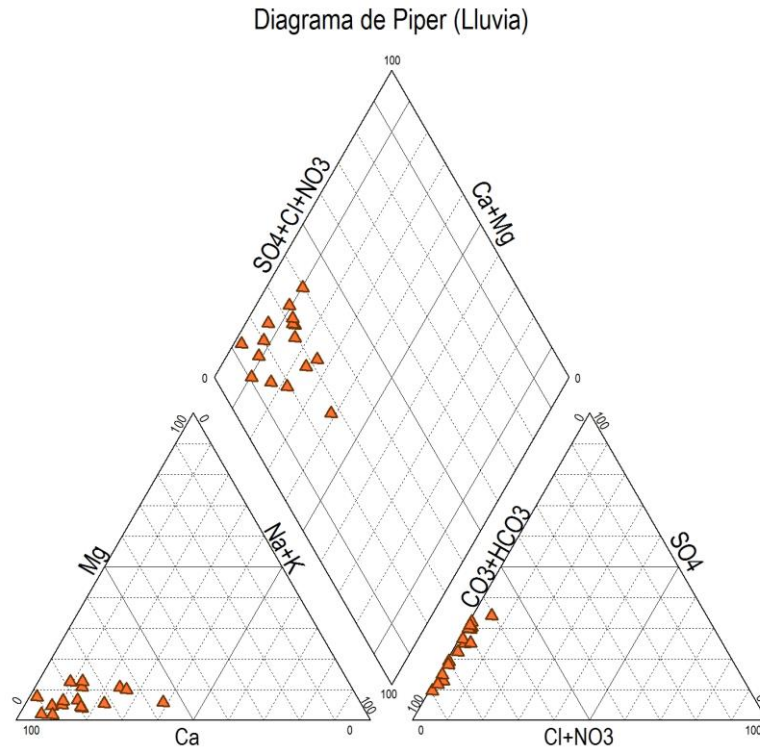


Fig.7 Familias de agua identificadas mediante el diagrama de Piper, para las muestras de agua de los manantiales de San Joaquín obtenidas durante el periodo de lluvia, comprendido entre Noviembre de 2010 y Diciembre de 2010. (EXCAV).

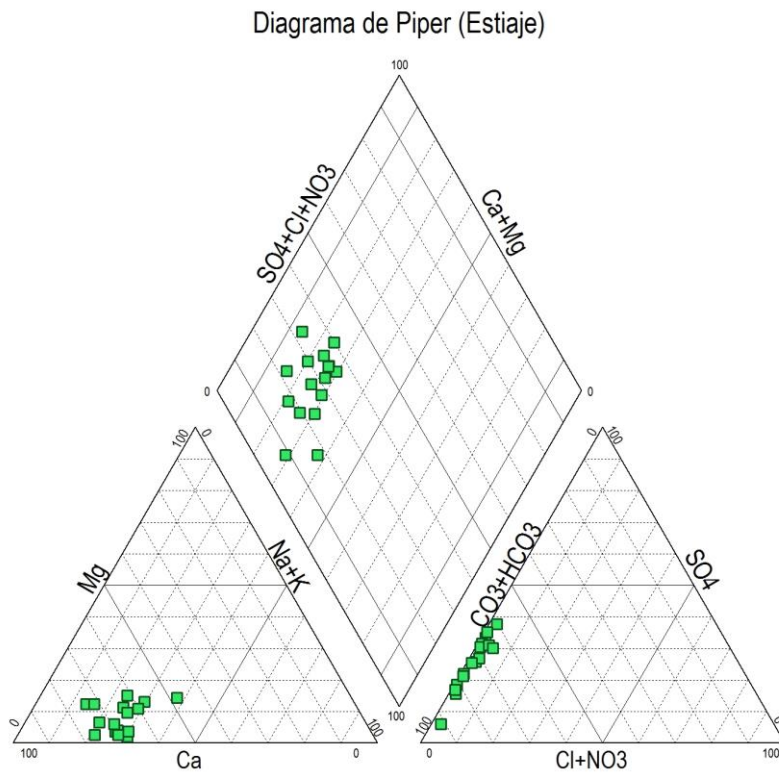


Fig.8 Diagrama de Piper y familias de agua para las muestras de agua de los manantiales de San Joaquín obtenidas durante el periodo de estiaje comprendido entre Junio y Julio de 2011. (EXCAV)

De los datos obtenidos de las tablas 3 y 4 y figuras 7 y 8 podemos decir que el agua de los manantiales de la zona de San Joaquín, corresponden a la familia de aguas denominadas **Bicarbonatadas-Cálcicas**, en donde predominan los iones calcio y bicarbonato. Son aguas que presentan una elevada dureza por los altos contenidos de Calcio, ya que son aguas que proceden de manantiales kársticos donde el agua ha tenido un contacto directo con rocas calizas del cretácico inferior.

Podemos observar además que no hay cambios químicos considerables durante los dos periodos de muestreo; sin embargo de acuerdo a los resultados obtenidos, podemos ver y comprobar, que durante el periodo de lluvia existe una mayor disolución de las rocas calizas de la zona ya que el contenido de iones es mayor durante este intervalo de tiempo y durante la época de estiaje el contenido de iones disueltos es menor en la mayoría de los casos.

Durante la época de estiaje la concentración de los iones mayoritarios se ve disminuida sin embargo la composición química relativa no experimenta cambios apreciables; las aguas se mantuvieron en todo momento como bicarbonatadas cálcicas.

En la época de lluvias el agua es un poco más “agresiva” ya que disuelve rápidamente los minerales carbonatados elevando la dureza y mineralización (Fig. 9) que son directamente proporcionales entre si. Sin embargo la composición química relativa experimenta poca variación; manteniéndose en todo momento el mismo tipo hidroquímico de agua.

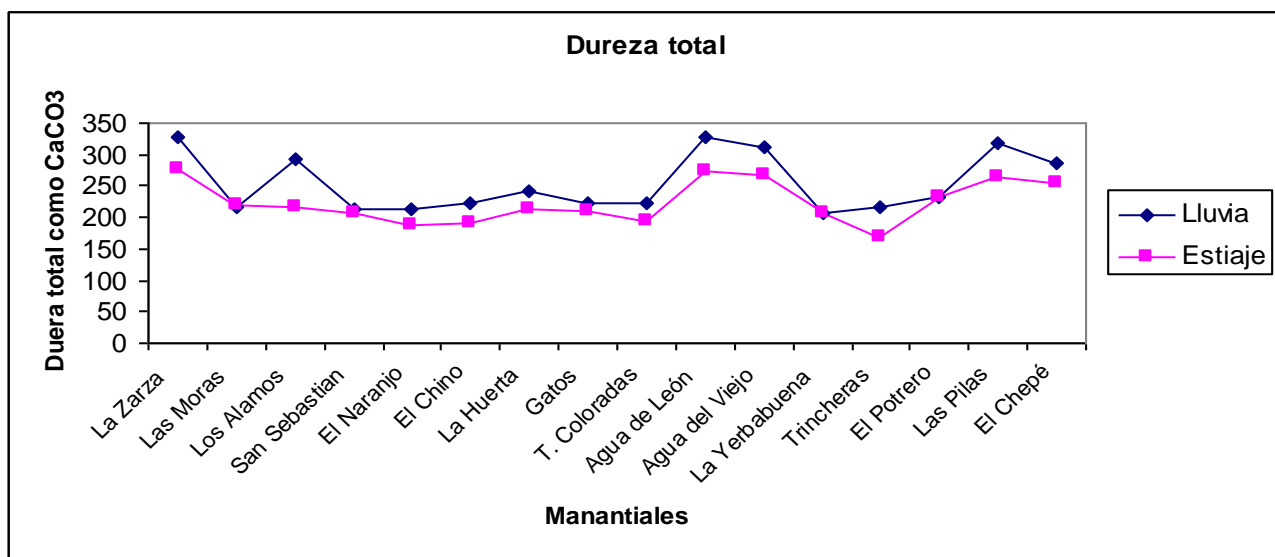


Fig. 9 Variación de la dureza total como CaCO<sub>3</sub> del agua de los manantiales de San Joaquín, durante el periodo de lluvia (Nov-Dic 2010) y el periodo de estiaje (Jun-Jul 2011). EXCAV.

### Indices de saturación

El problema de la determinación de si un agua está o no en equilibrio con el carbonato de calcio CaCO<sub>3</sub> se puede enfocar determinando el llamado *índice de Langelier (ISL)* o índice de saturación (Tablas 3 y 4). Si un agua tiene un ISL de cero, se dice que está en equilibrio con el CaCO<sub>3</sub>; si el ISL es positivo, el agua está sobresaturada respecto al CaCO<sub>3</sub> y tiende a precipitar; si el ISL es negativo, el agua está subsaturada con respecto a la CaCO<sub>3</sub> y este tiende a disolverse (Jenkins, 1990). El ISL será entonces una medida del grado de saturación del carbonato de calcio en agua. Los valores prácticos del ISL nos darán una medida de la tendencia de un agua a ser de tipo “incrustante” o “corrosiva”, bajo ciertas condiciones de dureza, alcalinidad, SDT, pH y temperatura.

Un agua con tendencias “corrosivas” puede disolver con más facilidad los metales, es decir favorece la oxidación. Si por el contrario, el agua tiende a ser “incrustante” se producirán depósitos calcáreos.

Si el resultado para un ISL = 0, se dice que el agua está “balanceada” y no supondrá ningún problema de corrosión o incrustación. Si el ISL > 0, significa que el agua tiene propiedades incrustantes y si el ISL < 0, el agua será “corrosiva”. Cuanto más distante de cero sea el valor del ISL más incrustante o corrosiva será el agua.

Un ISL bastante positivo provoca incrustaciones en superficies y tuberías, el agua no es “corrosiva” y las películas de sales calizas depositadas protegen contra la corrosión. En las tuberías se disminuye la sección efectiva que puede provocar la obstrucción total. En depósitos o tanques las paredes y el suelo se van blanqueando con los depósitos de calca.

Un ISL bastante negativo, no causa incrustaciones (el  $\text{CaCO}_3$  permanece en solución) pero es corrosiva. Si existieran incrustaciones, estas serían disueltas dejando las superficies más expuestas a la corrosión.

Un ISL próximo a cero establece que en el agua existe un equilibrio entre la incrustación y la corrosión que favorece la formación de superficies más limpias y las tuberías libres de incrustaciones obstructivas.

En la Fig: 10 se presenta la gráfica con los valores de los índices de Langelier, para los manantiales de San Joaquín, durante el período de lluvias y el período de estiaje.

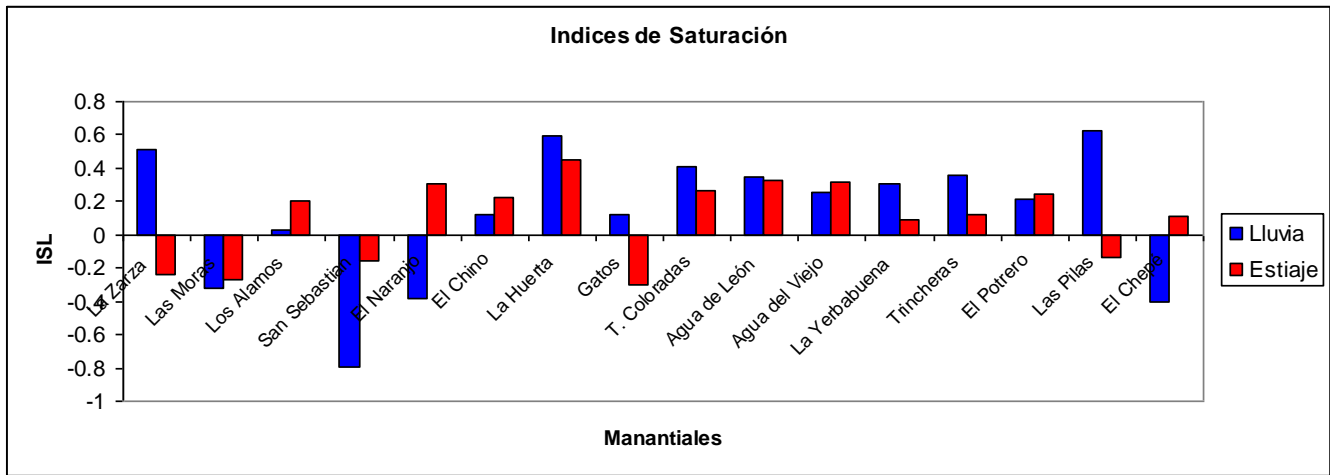


Fig. 10 Índices de saturación de Langelier (ISL) de los manantiales del Municipio de San Joaquín, Querétaro, durante el período de lluvias (Nov-Dic 2010) y la temporada de estiaje (Jun-Jul 2011). (EXCAV).

Según estos índices de saturación, el 80% de los manantiales de San Joaquín, durante la temporada de lluvia presenta índices de saturación mayores que cero ( $\text{ISL} > 0$ ) con propiedades de tipo “incrustantes” o sobresaturadas con respecto a la calcita  $\text{CaCO}_3$  y el 25% presenta índices de saturación menores que cero ( $\text{ISL} < 0$ ) con características de tipo “corrosivas” o subsaturadas con respecto a la calcita. Durante la época de estiaje, se mantiene el mismo porcentaje. La representación de los índices de saturación en función de la conductividad eléctrica se muestra en la Figura 11.

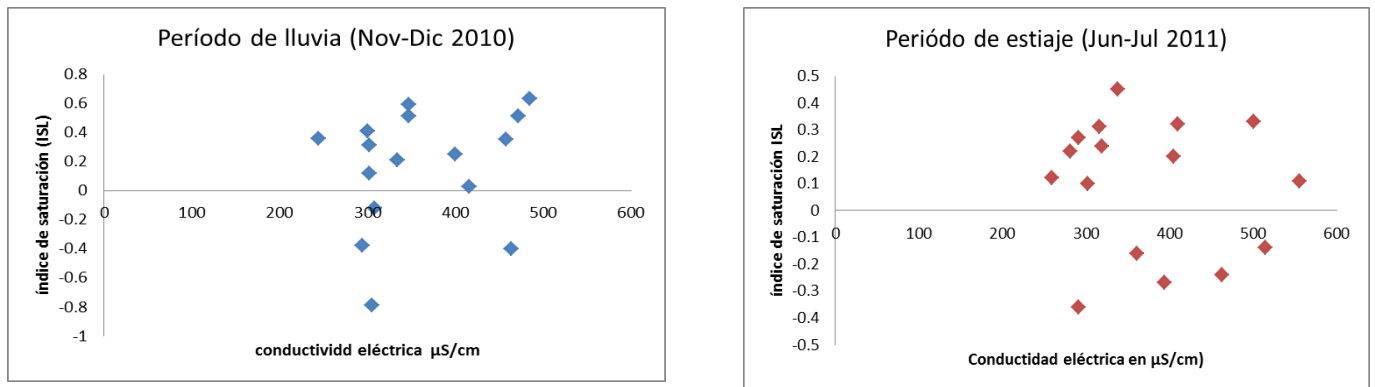


Fig. 11 Comportamiento de las aguas de los manantiales de San Joaquín Querétaro respecto a las relaciones de índices de saturación de la calcita (ISL) en función de la conductividad eléctrica.

### Consideraciones finales

Las zonas cársticas deberán jugar un papel de suma importancia durante los próximos años, ya que serán fuentes productoras de agua subterránea, tal como lo ha proyectado la UNESCO. Por lo tanto, el estudio y cuidado de los manantiales en zonas cársticas deberán formar parte de programas estatales y municipales para su cuidado y preservación.

San Joaquín, Querétaro ubicado en la Sierra Gorda, en donde las precipitaciones pluviales están por el orden de los 900 a 1220 mm anuales, es una zona de filtración cárstica, en donde casi cerca del 80% de su superficie corresponde a formaciones geológicas del tipo carso en donde predominan calizas del Jurásico Superior (Js) y Kretácico Inferior (Ki). Esta consideración, provoca que las aguas subterráneas, tengan contacto directo con las calizas y cuya disolución establezca que son aguas del tipo **Bicarbonatadas-Cálcicas**, con altos contenidos de calcio, resultando aguas con dureza elevada (Fig. 12)

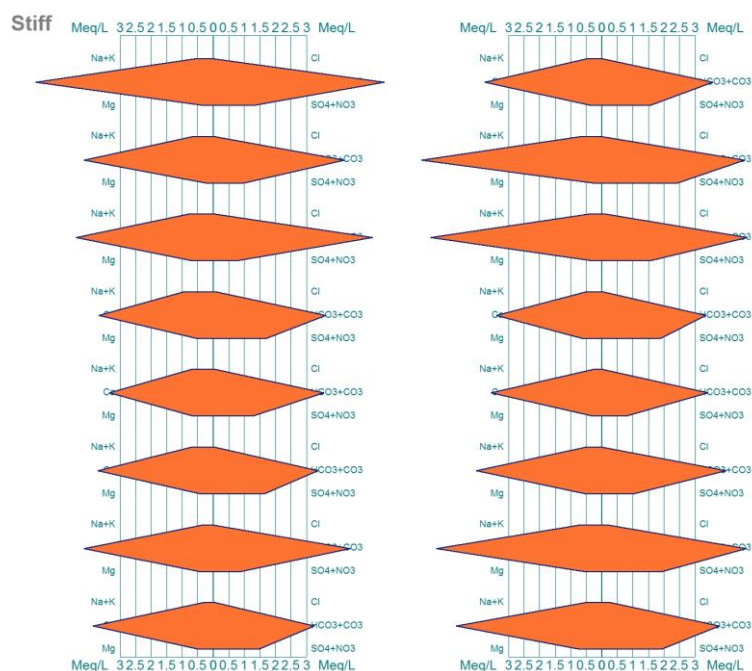
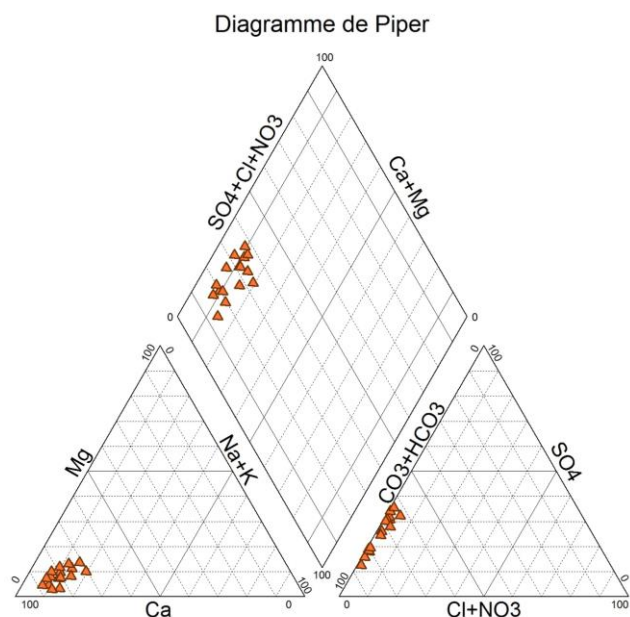


Fig. 12 Diagramas de Piper y Stiff para los análisis de agua promedio para cada uno de los manantiales de San Joaquín Querétaro. Se trata de aguas del tipo Bicarbonatada-Cálcica. EXCAV(2011-2012).

El movimiento de las corrientes superficiales, así como el de las aguas subterráneas en el municipio de San Joaquín, dadas las condiciones geográficas y geológicas se desplazan en dirección hacia la corriente del Río Extoráz, por la parte Norte y con dirección hacia el Río Moctezuma por la parte Noreste (NE). El curso de San Joaquín tiene varias cavidades o cavernas de gran magnitud, en algunas de ellas se han localizado importantes corrientes de agua cuya dirección principal es hacia la parte norte sobre el Río Extoráz.

Los análisis químicos de las aguas de los manantiales de la zona de San Joaquín, considerando que son de elevada dureza debido a los altos contenidos de calcio; los parámetros de los principales constituyentes están todos dentro de las normas establecidas para usarse como agua potable. Sin embargo, la alta dureza de las aguas de los manantiales de San Joaquín hace que sean aguas con alto contenido de “sarro” y por lo tanto debe considerarse este punto en el diseño de tomas directas de manantial, ya que por la alta dureza o “sarro” las tuberías tenderán a taparse por precipitados de calcio y magnesio.

El análisis de ion cloruro (Cl<sup>-</sup>), nos muestra algún tipo de problema por contaminación antropogénica; por diversas actividades humanas, en los manantiales: Las Pilas, El Chepé y Agua del Viejo, ya que son manantiales que prácticamente se localizan dentro de la zona urbana de San Joaquín y posiblemente estén recibiendo filtraciones de algún tipo de residuos orgánicos producto de la misma actividad humana. Sin embargo, todos los demás parámetros están dentro de las normas.

El manantial con menor dureza total y por lo tanto con menor cantidad de iones disueltos es el de Trincheras. Además con un caudal durante la época de lluvia de 16.4 L/s y de 6.9 L/s durante la época de estiaje, lo hacen ser unos de los manantiales con mejores calidades químicas, hidrológicas y topográficas para usarse en un futuro como otra fuente de agua potable para la cabecera municipal de San Joaquín.

Los manantiales: La Huerta y El Naranjo, son manantiales con muy buen caudal durante todo el año; por lo tanto es necesario generar programas municipales para su cuidado ya que pueden representar importantes fuentes de agua natural para la zona de Gatos en el Norte del Municipio y en la zona NE como San Sebastian, El Naranjo, Los Álamos, etc.

Durante la época de lluvia y estiaje, en la mayoría de los manantiales, observamos una importante variación en el caudal, sin embargo: una vez que las precipitaciones pluviales de la zona, se encuentren dentro del orden de los 900 mm anuales, podemos establecer que los caudales de cada uno de los manantiales serán suficientes.

En los meses con mayores precipitaciones pluviales, se observan en la mayoría de los manantiales un incremento en la dureza total, lo que lleva consigo un aumento en la cantidad de iones disueltos presentes. En estas circunstancias los índices de saturación tienden a elevarse un poco formando aguas del tipo incrustantes formando el llamado “sarro”. Casi cerca del

80% de los manantiales, presentan aguas con índices de saturación elevados ( sobresaturadas ) (Fig.13) y tienden a precipitar el carbonato de calcio, esto debido definitivamente a la elevada dureza, producto del contacto del agua subterránea con las rocas calizas del Jurásico Superior (Js) y Cretácico Inferior (Ki).

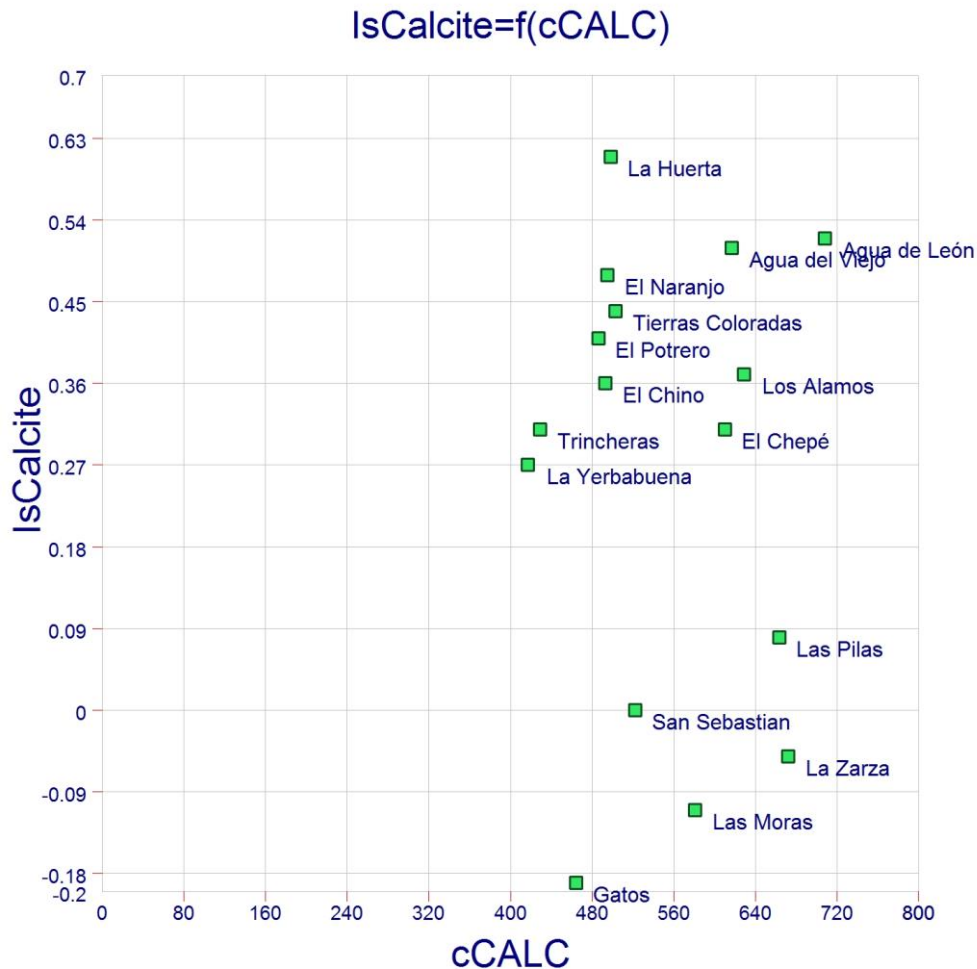


Fig.13 Comportamiento promedio de las aguas de los manantiales de San Joaquín, Querétaro con respecto a la relación que guardan entre el índice de saturación de la calcita (ISC) y la conductividad eléctrica. (EXCAV 2011-2012).

Los manantiales de San Joaquín son una fuente natural de agua, aunque se vean muchas veces perturbados por actividades humanas mal diseñadas y sin un previo análisis.

Es importante señalar, que existen varios manantiales que no fueron tratados en el presente estudio y que se localizan en la zona del Aguacatillo, que es donde están los manantiales que actualmente forman parte del sistema de agua potable de la cabecera municipal de San Joaquín y de otras comunidades. Así como también algunos otros localizados cerca de la comunidad de San Juan Tetla, El Durazno, El Plátano, Puerto Hondo y Medias Coloradas.

El desarrollo sostenible de estas fuentes naturales de agua deberá estar sustentado en la preservación del equilibrio natural de los manantiales y cuidar los espacios naturales que los rodean. De éste modo deberá ser imperativo legal que la zona que rodea al manantial ha de estar absolutamente protegida para preservar y asegurar la pureza original del acuífero y su entorno. En ese empeño de preservar el entorno del manantial se deben poner en marcha acciones encaminadas a este fin como el mantenimiento de árboles y la limpieza de los ríos próximos y micro cuencas, cuidando su flora y fauna; además desarrollar planes de reforestación y pequeñas obras civiles para el cuidado y protección de los manantiales.

Estos acuíferos son altamente permeables por fracturas y por el fenómeno kárstico, que tienen un tiempo de recarga relativamente rápido; sin embargo presentan una alta vulnerabilidad a la contaminación. Estos acuíferos kársticos constituyen las reservas de agua del tercer milenio. La disponibilidad de los recursos hídricos será el factor limitativo del cual dependerá en los próximos años el desarrollo social y económico de las poblaciones que habitan el planeta. ( Giulivo, 1999).

## **Agradecimientos:**

Al H. Ayuntamiento de San Joaquín Querétaro (2009-2012), por el apoyo con el medio transporte para el muestreo de los diferentes manantiales.

A los compañeros de exploración: Hageo Maximiliano González González y Jose Pérez Reséndiz (Tacho), por el apoyo técnico para realizar las mediciones y muestreos.

A la gente de las diferentes comunidades que nos acompañaron para ubicar con facilidad los manantiales analizados.

## **Bibliografía**

Carbonell, Manuel., Zamora Salvador, Langenscheidt Adolphus. (1970) Minería Prehispánica en la Sierra Gorda de Querétaro. Secretaría del Patrimonio Nacional

Fagundo Castillo JR, Valdez Ramos, Rodríguez Rubio. (1996). Hidroquímica del Karst. Recursos Hídricos y Geología Ambiental, Ediciones Osuna. La Habana Cuba

HANNA instruments (1999) Instruction Manual HI 38000, HI 3815

Hernández E. Margarita – Morán M. Ma. Teresa.(2003), Taller de experimentos de Química Ambiental en Micro escala. Universidad Iberoamericana A.C: Centro de Química en Micro escala.

INEGI (1996) Cuaderno Estadístico Municipal de San Joaquín Qro.

Giulivo Italo (1999). Río La Venta, tesoro de Chiapas. LA VENTA esplorazioni geografiche. Padova Italia.

Jenkis David. (1999), Química del Agua. Editorial LIMUSA

Lazcano Sahagún Carlos (1982) Las Cavernas de la Sierra Gorda (Tomo I) UAQ

Ledesma Ledesma Gilberto (2008). Análisis químico de aguas naturales, utilizando técnicas a micro escala. (Inédito).

Meré Alcocer Fco. Javier (2003). Tratamiento y control de la contaminación de las aguas urbanas. CPPEQ.

Monografía Geológico Minera del Estado de Querétaro (1992) Consejo de Recursos Minerales.

Ortiz Flores Ramiro (2001). Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. McGrawHill.

Programa AqQA de la RockWare Since 1983. Earth Science & GIS Software (2006)

Romero Rojas Jairo Alberto (1999). Calidad del Agua, 2ª Edición, Alfaomega. Escuela Colombiana de Ingeniería.

Ugalde Txomin (2003). El Mundo Subterráneo en Euskal Herria (Ostoa)

Velasco Mireles Margarita (1997) La Sierra Gorda: Documentos para su historia Vol. II. INAH



