

# Caracterización hidroquímica de cenotes del Estado de Yucatán, México

Cruz Sánchez Misael<sup>1\*</sup>, Mora Mora Jennyfer<sup>1</sup>, Girón García Patricia<sup>2</sup>, Salcedo Luna Cecilia<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Ciudad del Conocimiento, Carr. Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Col. Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo. C.P. 42184. México.

<sup>2</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Geoquímica, Instituto de Geología. Circuito de la Investigación Científica S/N, Delegación Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04510. México.

<sup>3</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, USAI, Facultad de Química. Circuito de la Investigación Científica S/N, Delegación Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04510. México.

\* Autor para correspondencia: izaskm@yahoo.es

## Recibido:

13/mayo/2018

## Aceptado:

09/septiembre/2018

## Palabras clave:

Cenotes, hidroquímica, minerales.

## Keywords:

Cenotes, hydrochemistry, minerals.

## RESUMEN

El acuífero del Estado de Yucatán constituye uno de los más vulnerables en el país, debido a diversos factores tanto antropogénicos como naturales que afectan su calidad. En el presente trabajo de investigación, se evaluó un grupo de cenotes del Estado de Yucatán, estableciendo sus características mediante una serie de análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de agua y la integración de los datos obtenidos en diagramas hidroquímicos. La naturaleza de su composición química está relacionada a la interacción agua-roca con una facie dominante de Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> como resultado de la disolución de minerales como calcita, aragonita y dolomita. De acuerdo a su calidad para propósitos de irrigación se consideró que es adecuada para emplearse en cultivos salino tolerantes. Desafortunadamente, su calidad como agua de consumo no es favorable, al presentar salinidad, sólidos totales disueltos, dureza, amonio y arsénico con valores superiores a las normas definidas para este uso.

## ABSTRACT

The aquifer of the State of Yucatan is one of the most vulnerable in the country, due to various anthropogenic and natural factors that affect its quality. In the present research work, a group of cenotes from the State of Yucatan was evaluated, establishing its characteristics through a series of physicochemical analyzes performed on water samples and the integration of data obtained in hydrochemical diagrams. The nature of its chemical composition is related to water-rock interaction with a dominant Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> facie as a result of the dissolution of minerals such as calcite, aragonite and dolomite. According to its quality for irrigation purposes, it was considered suitable for use in saline tolerant crops. Unfortunately, its quality as drinking water is unsuitable, since it presents salinity, total dissolved solids, hardness, ammonium, and arsenic values higher than the standards defined for this use.

## Introducción

En México existen 653 acuíferos, donde 33 310 hm<sup>3</sup> de su volumen total se encuentra concesionado para usos consuntivos, distribuidos en los sectores agrícola (23 470 hm<sup>3</sup>), de abastecimiento público (7 320 hm<sup>3</sup>), en la industria autoabastecida (2 070 hm<sup>3</sup>) y en la producción de energía eléctrica (450 hm<sup>3</sup>), excluyendo la hidroelectricidad (CONAGUA, 2016). De esta manera, las aguas subterráneas constituyen un recurso natural de suma importancia en el desarrollo sostenible del país.

Desafortunadamente, las aguas subterráneas enfrentan diversos problemas que afectan su calidad: la contaminación, la sobreexplotación y la salinización. La contaminación se origina a partir de la infiltración de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales. Un acuífero se considera sobreexplotado cuando la extracción supera la recarga, de esta manera, el número de acuíferos sobreexplotados en el país ha aumentado dramáticamente de sólo 32 en el año de 1975 a 105 en el año 2015. La salinización de un acuífero depende tanto de factores antropogénicos (sobreexplotación) como naturales (intrusión marina, evaporación de aguas someras, disolución de minerales evaporíticos y la mezcla entre aguas antiguas y juveniles), a nivel nacional existen 18 acuíferos que presentan intrusión marina y 32 bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres (CONAGUA, 2016).

En el Estado de Yucatán no existen corrientes de agua superficiales debido a la elevada permeabilidad y reducida pendiente topográfica, siendo el agua subterránea la única fuente de abastecimiento de agua dulce. Las características hidrogeológicas del acuífero del Estado de Yucatán hacen de él uno de los más vulnerables a nivel nacional, no solo por la perturbación antropogénica, sino por la confluencia de diversos factores naturales que promueven su salinización (DOF, 2013).

Respecto a la contaminación antropogénica, se han identificado numerosas fuentes debido a la ausencia de un sistema integral de drenaje y alcantarillado para el emplazamiento de aguas negras y residuos domésticos, agropecuarios, industriales, hospitalarios, etc., que son descargados directamente al acuífero mediante la inyección a pozos de poca profundidad, generalmente a la región de agua salobre subyacente (Graniel et al., 1999; Marín et al., 2000; Torres et al., 2014; Gonzalez et al., 2014).

Por otra parte, el acuífero del Estado de Yucatán es afectado por la presencia de una intrusión marina subyacente al agua dulce, que bajo la influencia de las mareas y el

movimiento de la superficie del agua subterránea origina una zona de mezcla y en consecuencia, transforma el agua dulce en agua salobre, reduciéndose notablemente el espesor del agua aprovechable, particularmente en la costa. De esta manera, la salinidad se incrementa a lo largo de los patrones de flujo desde tierra adentro hasta la costa, limitando la extracción de agua dulce bajo el riesgo de provocar el ascenso de agua salobre contenida en la zona de mezcla, inutilizando temporal o totalmente los pozos de extracción, sobre todo si se considera que el espesor de la zona de agua dulce es bastante reducido (DOF, 2013).

Un factor adicional a la salinización por intrusión marina, lo constituye la disolución de las rocas de la región, las cuales dada su naturaleza, son bastante lábiles frente al agua. Así los minerales evaporíticos se incorporan lenta y gradualmente al acuífero, modificando su salinidad.

Debido a lo anterior, el objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar las características hidroquímicas de un grupo de cenotes del Estado de Yucatán, para establecer la naturaleza de su composición química, así como su calidad para propósitos de irrigación y consumo humano. Los resultados obtenidos demuestran que la composición química del agua depende sustancialmente de la interacción agua-roca, con una calidad favorable para la irrigación en cultivos salino tolerantes o salino semi tolerantes, pero desfavorable para su consumo.

## Descripción del área de estudio

### Localización

El Estado de Yucatán se ubica en el sureste de la República Mexicana, entre los paralelos 21°36' y 19°30' de latitud norte; y entre los meridianos 87°32' y 90°25' de longitud oeste. Limita al suroeste con el Estado de Campeche, al sureste con el Estado de Quintana Roo y al norte con el Golfo de México, cubriendo un área de 3 934 000 ha (Bautista et al., 2005).

### Clima

El Estado de Yucatán presenta un clima caliente subhúmedo con lluvias en verano (Aw) con una temperatura media anual de 26 °C. Los meses más calientes van de mayo a agosto con temperaturas medias de 25 a 28°C y los más fríos de diciembre a febrero con temperaturas medias entre 22 y 24°C.

La precipitación anual varía entre 444 y 1 227.3 mm, siendo mayor de norte a sur y de oeste a este. La temporada de lluvias inicia a finales del mes de mayo

y termina en octubre, siendo septiembre el mes más lluvioso (INEGI, 2002).

### **Geología**

La Península de Yucatán es una extensa plataforma carbonatada de aproximadamente 165 000 km<sup>2</sup> (Bauer et al., 2011), constituida por rocas sedimentarias que fueron originadas en el Terciario y Cuaternario. Las rocas más antiguas corresponden a calizas cretácicas y calizas dolomitizadas, silicificadas y recristalizadas del Paleoceno, con delgadas intercalaciones de margas y yeso que afloran en la porción sur del Estado de Yucatán. Las rocas más jóvenes están representadas por coquinas y calizas que afloran en áreas dispersas, mientras que en la parte noroeste de la península se observan depósitos de litoral areno-arcilloso, además de material residual arcilloso y calichoso de espesor despreciable que caracterizan a la costa (CONAGUA, 2015).

### **Hidrología**

El acuífero del Estado de Yucatán es de tipo libre, costero, kárstico, hidráulicamente heterogéneo y de permeabilidad elevada. Debido a la intrusión de una cuña de agua marina que subyace al acuífero, el espesor saturado de agua dulce es bastante reducido y varía desde 5 m en la faja costera hasta más de 30 m en el área de lomeríos.

El acuífero presenta dos tipos de porosidad, una primaria y otra secundaria. Se distingue una elevada porosidad primaria derivada de la sedimentación y litificación de fragmentos de organismos tales como conchas y esqueletos, sin embargo, se observa una baja porosidad primaria en estratos de caliza masiva. La porosidad secundaria se ha generado a través de largos periodos de tiempo, donde los procesos de disolución, fragmentación y fracturamiento han permitido el desarrollo de canales, grietas, cuevas, grutas, dolinas y cenotes con una distribución irregular tanto en sentido vertical como horizontal (DOF, 2013).

La dirección del flujo está determinada por la compleja morfología subterránea que presenta grietas, galerías de diferentes formas y diámetros, interespacios y niveles de estratificación. Sin embargo, de manera general se considera que el flujo de agua es radial, comenzando desde el sur del estado hacia la costa con dirección preferencial SE-NW, en un entorno cavernoso muy complejo (INEGI, 2002).

La principal fuente de recarga del acuífero lo constituye la elevada precipitación pluvial, misma que se infiltra casi en su totalidad en las llanuras y en menor proporción

en los lomeríos. La elevada porosidad y permeabilidad del suelo así como la pendiente topográfica favorecen significativamente este proceso. En contraparte, las principales descargas naturales lo constiuyen la transpiración vegetal, la evaporación del agua freática y la descarga hacia el mar.

De acuerdo a los principales usos del agua subterránea del Estado de Yucatán, del total de 1 313.3 millones de m<sup>3</sup> extraídos, el 62.1 % se destinan para uso agrícola, 32.9 % para uso público urbano, 4 % para uso industrial y 1 % para uso doméstico y de abrevadero (DOF, 2013).

### **Metodología**

#### **Descripción de las muestras**

Para el presente trabajo de investigación se colectaron 17 muestras de agua provenientes de diferentes cenotes, distribuidos en 8 municipios del Estado de Yucatán: Tekit, Homun, Cuzama, Sanahcat, Abala, Chemax, Yaxcaba y Tizimín (figura 1). La selección de los cenotes se realizó considerando su accesibilidad y su proximidad a las zonas conurbadas.

Las muestras fueron colectadas en el mes de junio de 2017, transportadas al laboratorio en botellas de polietileno y conservadas en refrigeración a 4 °C hasta el momento de su análisis, el cual no fue mayor a 72 h. Los cenotes a los cuales corresponden las muestras se indican en la tabla 1.

#### **Análisis fisicoquímicos**

Las muestras de agua provenientes de los cenotes fueron filtradas y separadas en tres fracciones: una se aciduló con HNO<sub>3</sub> hasta pH 3, otra se aciduló con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hasta pH 2 y la tercera fracción se conservó con su pH original.

La fracción de agua que no se aciduló fue utilizada para determinar el pH (potenciometría), conductividad eléctrica CE (conductivimetría), sólidos totales disueltos STD (evaporación y sequedad a 105 °C), Cl<sup>-</sup> (titulación), CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (titulación), PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (espectrofotometría) y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (espectrofotometría) de acuerdo a las técnicas descritas por Sadzawka (2006).

La fracción de agua acidulada con HNO<sub>3</sub> se utilizó para el análisis elemental por espectrofotometría de emisión atómica en plasma acoplado inductivamente (AES-ICP) en un equipo Perkin Elmer modelo Óptima 8300, empleando curvas de calibración estándar en el intervalo de concentración de 0 a 25 mg/L para cada elemento (Na, K, Mg, Ca, Si, Al y As).

La fracción de agua acidulada con  $H_2SO_4$  fue empleada para cuantificar nitrógeno amoniacal ( $NH_4^+$ ) por espectrofotometría de absorción de radiación visible mediante su complejación con reactivo de Nessler y análisis a 410 nm empleando curvas de calibración estándar (Welcher, 1995).

Cada análisis se realizó por triplicado, evaluando la calidad total de los análisis químicos mediante el error de balance de cargas iónicas % E, el cual fue  $\pm 5\%$  en todos los casos (APHA, 1999).



**Figura 1.** Características geológicas del Estado de Yucatán y ubicación de los cenotes, modificado de Villasuso y Méndez (2000).

**Tabla 1.** Nombre, clave y municipio de los cenotes muestreados.

No.	Nombre del cenote	Clave	Municipio
1	Xpakay	XK	Tekit
2	Papakal	PK	Homun
3	Subinteh	ST	Cuzama
4	Bebelchen	BE	Sanahcat

**Tabla 1.** Nombre, clave y municipio de los cenotes muestreados. (continuación)

5	Huolpoch	HP	Homun
6	Chulul	CL	Homun
7	Hoka	HK	Abala
8	Aymil	AM	Abala
9	Yoha	YH	Abala
10	Yaal Utzil	YU	Abala
11	Saac-ha	SH	Chemax
12	Choj-Ha	CJ	Chemax
13	Sambula	SM	Abala
14	Yokdzonot	YO	Yaxcaba
15	Manuel Carrera	MC	Tizimín
16	Montecristo 1	M1	Tizimín
17	Montecristo 2	M2	Tizimín

**Evaluación hidroquímica**

Las características hidroquímicas de los cenotes fueron definidas a partir de la composición química de las muestras de agua, empleando los diagramas geoquímicos de Chadha (1999), van Wirdum (1980) y Gibbs (1970), además se calculó el índice de saturación (IS) para las principales fases cristalinas presentes en el sistema empleando el programa PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999).

La evaluación de la calidad del agua para propósitos de irrigación se efectuó mediante la clasificación USSL (1954) empleando la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS), además se utilizó el diagrama de Wilcox (1948) que relaciona la conductividad eléctrica con el porcentaje de sodio (PS). Tomando en cuenta la cantidad de carbonato de sodio residual (CSR), las muestras de agua de los cenotes se clasificaron de acuerdo a los criterios de Lloyd y Heatcothe (1985). Para complementar el diagnóstico se utilizó a la clasificación de Doneen (1962) considerando los valores del índice de permeabilidad (IP).

La calidad del agua para consumo humano fue evaluada mediante la comparación de la composición química con los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011) y la NOM-1994 modificada (DOF, 1996). La clasificación de la dureza se realizó con el diagrama de Li et al. (2014), utilizando los valores de los sólidos totales disueltos (STD) y la dureza total (mg/L) estimada mediante la suma de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  (Weiner, 2013).

## Resultados y discusión

### Características químicas del agua

De acuerdo a los análisis fisicoquímicos realizados a las diferentes muestras de agua provenientes de los cenotes del Estado de Yucatán, se observó que el pH varió de 6.92 a 7.70, predominando una condición ligeramente alcalina. Los valores de la conductividad eléctrica se encontraron en el intervalo de 688 hasta 3 723  $\mu\text{S/cm}$ , mientras que los sólidos totales disueltos estuvieron presentes en concentraciones desde 515.77 hasta 2 381 mg/L, estimándose una dureza promedio de 508 mg/L (tabla 2).

La concentración de  $\text{Na}^+$  presentó un valor mínimo de 23.43 mg/L y un máximo de 461.60 mg/L, mientras que  $\text{Ca}^{2+}$  varió desde 78.81 hasta 201 mg/L, siendo estos dos cationes los más abundantes en las muestras. Respecto de los aniones, el ión  $\text{HCO}_3^-$  fue el más abundante con una concentración promedio de 679.68 mg/L, seguido de  $\text{Cl}^-$  con una concentración promedio de 138.74 mg/L. Destaca la presencia de componentes traza como  $\text{Al}^{3+}$ , As,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{PO}_4^{3-}$  cuyas concentraciones promedio fueron 0.28 mg/L, 0.04 mg/L, 0.23 mg/L y 1.60 mg/L, respectivamente.

### Facies hidroquímicas

La clasificación de las facies hidroquímicas mediante el diagrama de Chadha (1999) permitió establecer que la mayoría de las muestras presentan una facie Ca-Mg- $\text{HCO}_3^-$ , las muestras YU y YH se clasificaron con una facie mixta Ca-Mg- $\text{HCO}_3^-$ -Na-K- $\text{HCO}_3^-$ , siendo la facie Na-K-Cl y/o Na-K- $\text{SO}_4$  característica de las muestras HK y SM (figura 2).

### Interacción agua-roca

Las características químicas del agua subterránea dependen de diversos procesos fisicoquímicos tales como la disolución, precipitación, el intercambio iónico, la oxidación y la reducción manifestados durante la interacción agua-roca. De esta manera, el empleo de diagramas geoquímicos permite aproximarnos a la naturaleza de su composición química.

De acuerdo a van Wirdum (1980), el agua se clasifica como atmosférica (*At*) si procede principalmente de la precipitación pluvial, será litotrófica (*Li*) si su composición está relacionada con las rocas del acuífero y talasotrófica (*Ta*) si corresponde a agua de origen marino, existiendo categorías intermedias. Para las muestras analizadas se considera una clasificación atmosférica-litotrófica (figura

3), donde el agua proveniente de la lluvia interactúa con las rocas disolviéndolas e incorporando parte de sus iones al acuífero.

**Tabla 2.** Valores mínimos (Mín.), máximos (Máx.), promedio (Prom.) y desviación estándar (Desv. Est.) para los análisis fisicoquímicos de muestras de agua de cenotes del Estado de Yucatán.

PARÁMETROS	Mín.	Máx.	Prom.	Desv. Est.
<b>FISICOS</b>				
Temp. (°C)	20	28	23.29	2.05
pH	6.92	7.70	7.39	0.25
CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	688.0	3 723.0	1 607.46	705.15
STD (mg/L)	515.77	2 381.0	1 175.78	456.69
Dureza (mg/L)	258.05	693.46	508.00	139.65
<b>COMPONENTES MAYORES (mg/L)</b>				
$\text{Na}^+$	23.43	461.20	120.84	109.13
$\text{K}^+$	0.78	30.10	6.38	7.03
$\text{Mg}^{2+}$	14.87	64.03	40.33	14.82
$\text{Ca}^{2+}$	78.81	201.00	136.89	32.25
$\text{SiO}_2$	0.00	19.19	3.46	5.22
$\text{HCO}_3^-$	372.78	895.97	679.68	178.72
$\text{Cl}^-$	29.80	419.61	138.74	99.41
$\text{SO}_4^{2-}$	0.00	338.94	57.56	93.19
<b>COMPONENTES TRAZA (mg/L)</b>				
$\text{Al}^{3+}$	0.25	0.36	0.28	0.04
As	0.00	0.17	0.04	0.05
$\text{NH}_4^+$	0.05	0.48	0.23	0.13
$\text{PO}_4^{3-}$	0.00	3.55	1.60	1.08

La clasificación de las muestras empleando los diagramas de Gibbs (1970) indica que uno de los principales factores que influyen en la química del agua es la interacción roca-agua (figura 4), validando las observaciones realizadas mediante la clasificación de van Wirdum.

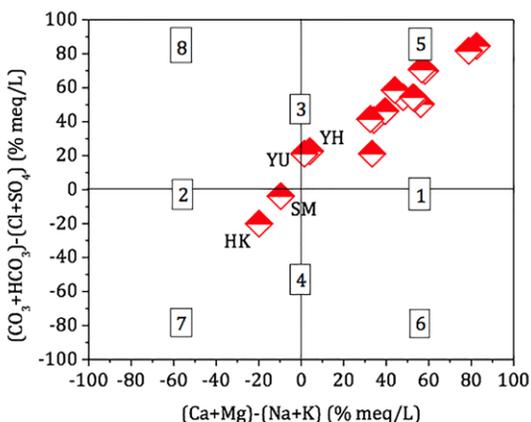


Figura 2. Clasificación de las muestras de agua con el diagrama de Chadha (1999).

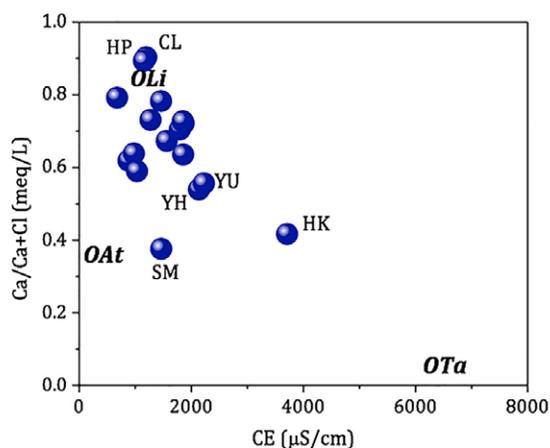


Figura 3. Clasificación de las muestras de agua en el diagrama de Van Wirdum (1980).

### Índice de saturación

Como se ha mencionado anteriormente, la química de las muestras de agua está definida por la interacción agua-roca, por ello se evaluó el índice de saturación para diferentes minerales que podrían participar en el enriquecimiento de ciertos componentes en el agua. El índice de saturación (IS) se calculó a partir de las actividades de los iones en solución y las constantes del producto de solubilidad (Kps) para albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), aragonita ( $\text{CaCO}_3$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), calcedonia ( $\text{SiO}_2$ ), dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), halita ( $\text{NaCl}$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y talco ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ). Un valor del IS negativo indica que el sistema no está saturado respecto de una fase propuesta; es positivo cuando el sistema está sobresaturado y adquiere el valor de cero cuando el acuífero está en equilibrio con una fase cristalina en particular (Drever, 2002).

De acuerdo a los valores del IS calculados para las muestras de agua, se observaron valores positivos para calcita, aragonita y dolomita, lo cual indica que se encuentran sobresaturadas con estas fases. Adicionalmente se presentaron pequeños valores positivos del IS para cuarzo en las muestras XK, HK, YH y YU, indicando saturación con esta fase cristalina; para el resto de los minerales propuestos se obtuvieron valores del IS negativos, asumiendo una condición de insaturación (figura 5).

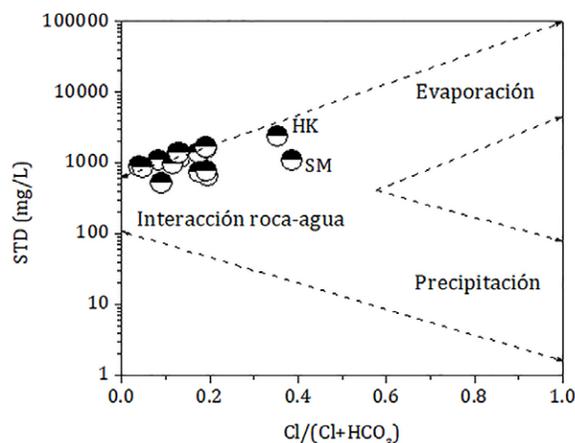
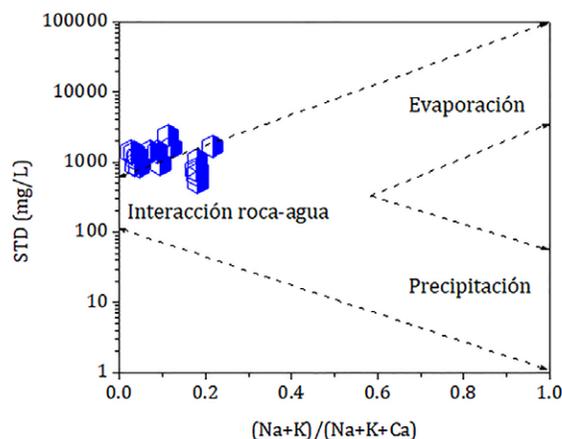
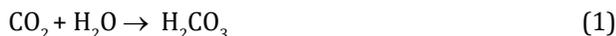


Figura 4. Clasificación de las muestras de acuerdo a los diagramas de Gibbs (1970).

El mecanismo de incorporación de iones al acuífero se podría explicar mediante la disolución de la roca y particularmente mediante la disolución de calcita, aragonita, dolomita, halita (la cual presenta una elevada solubilidad y por ello no se encuentra en condiciones sobresaturadas) y posiblemente caolinita (como precursor de aluminio y silicio en bajas concentraciones) presente en algunos estratos de la región (CONAGUA, 2015).

Inicialmente se considera que la reacción entre el CO<sub>2</sub> presente en el aire y el agua de lluvia, produce pequeñas cantidades de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (debido a que la solubilidad del CO<sub>2</sub> es relativamente baja 1x10<sup>-5</sup> M en equilibrio con una presión del orden de 1x10<sup>-3.5</sup> atm del gas en el aire) de acuerdo a la siguiente reacción:

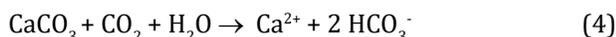


y posteriormente:

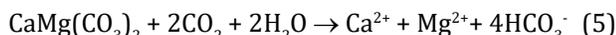


El diagrama de distribución de especies para este caso indica que por encima de pH 10.3 el ión CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> es la especie dominante; debajo de pH 6.3 el CO<sub>2</sub> disuelto es la especie dominante y para valores de pH comprendidos entre 6.3 y 10.3 la especie dominante es el ion HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Weiner, 2013).

Ya sea que se considere que la disolución de calcita y/o aragonita sea promovida por las reacciones (1) o (2), en ambos casos los productos obtenidos son similares, así que la disolución se puede representar mediante la siguiente reacción:

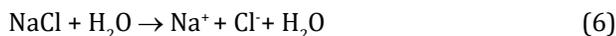


ocurriendo el mismo evento con dolomita:



Aquí es importante mencionar que la dinámica entre la disolución y precipitación de calcita, aragonita y dolomita es cíclica, dependiendo de que se alcance la sobresaturación del sistema con estas fases (Langmuir, 1997).

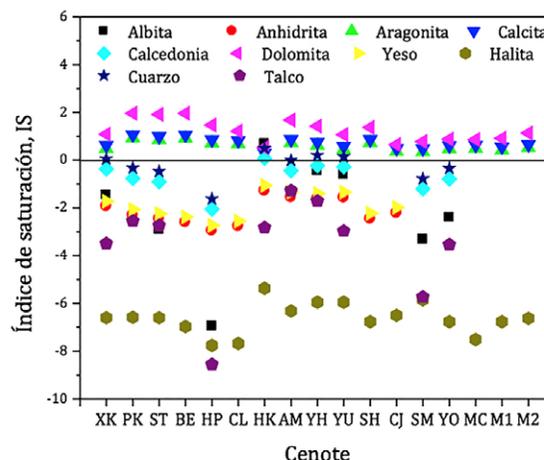
Para el caso de halita:



y para caolinita:



Congruentemente, las reacciones químicas anteriores permiten comprender la naturaleza de las muestras de agua de los cenotes y del acuífero, no solo respecto del pH, cationes y aniones dominantes, sino también la presencia de Al y Si, bajo la dinámica de la interacción agua-roca.



**Figura 5.** Índices de saturación calculados para las diferentes fases minerales.

### Calidad del agua para irrigación

Los parámetros de salinidad evaluados considerando el agua del acuífero del Estado de Yucatán para propósitos de irrigación se indican en la tabla 3. El valor promedio para la relación de adsorción de sodio (RAS) fue de 2.17; para el porcentaje de sodio (PS) 96.30, para el carbonato de sodio residual (CSR) fue 1 y para el índice de permeabilidad (IP) 27.93.

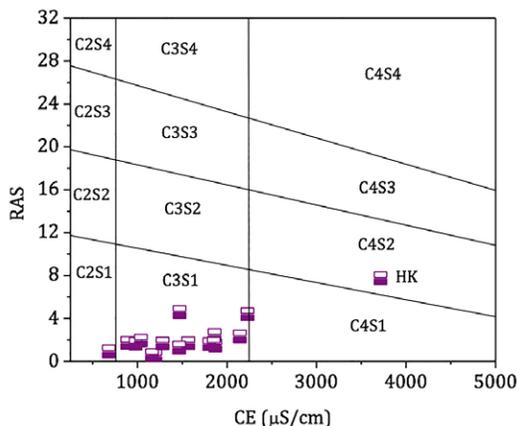
**Tabla 3.** Valores mínimos (Min.), máximos (Máx.), promedio (Prom.) y desviación estándar (Desv. Est.) de los índices de salinidad de los cenotes del Estado de Yucatán.

Índice	Mín.	Máx.	Prom.	Desv. Est.
RAS	0.43	7.68	2.17	1.80
PS	90.08	98.06	96.30	2.17
CSR	-1.06	3.30	1.00	1.08
IP	16.95	41.96	27.93	5.78

### Relación de adsorción de sodio, RAS

La clasificación de las muestras respecto de la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS) se realizó mediante los criterios de Richards (1954) y la gráfica de USSL (1954), identificando tres categorías (figura 6). El 6 % de las muestras se clasificó como C2S1, salinidad media y riesgo de sodicidad bajo; 6 % como C4S2, salinidad muy alta y riesgo de sodicidad medio y el 88 % restante como C3S1, elevada salinidad y riesgo de sodicidad bajo. Con este diagnóstico las muestras con categorías C2S1 y C3S1 pueden ser empleadas para riego en cultivos salino tolerantes o salino semi tolerantes bajo condiciones de drenaje

suficientemente buenas, para evitar la deposición de sales y la reducción de la permeabilidad de los suelos. Sin embargo, la muestra con categoría C4S2 no es apta para este propósito.



**Figura 6.** Clasificación de las muestras de acuerdo a USSL (1954).

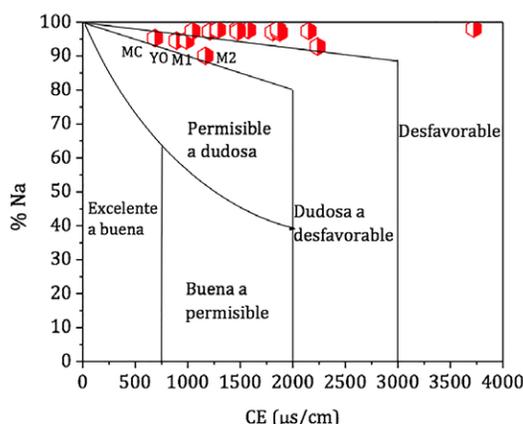
**Porcentaje de sodio (PS)**

La representación gráfica del porcentaje de sodio respecto de la conductividad eléctrica para cada muestra permitió identificar dos categorías de acuerdo a la clasificación de Wilcox (1948). El 23.5 % de las muestras poseen una calidad para la irrigación que va de dudosa a desfavorable (muestras MC, YO, M1 y M2), mientras que el 76.5 % de las muestras se clasifican como desfavorables para esta actividad (figura 7).

Las elevadas concentraciones de sodio en el agua favorecen la defloculación y pérdida de la estructura del suelo, modificando sensiblemente la porosidad y la permeabilidad del mismo, afectando el desarrollo normal de los cultivos.

**Carbonato de sodio residual, CSR**

Lloyd y Heathcote (1985) clasificaron el contenido de carbonato sodio residual en aguas de riego en tres categorías: favorables ( $CSR < 1.25$ ); marginales ( $1.25 \leq CSR \leq 2.5$ ) y desfavorables ( $CSR > 2.5$ ). En esta clasificación se considera que la elevada concentración de carbonatos y bicarbonatos en el agua promueven la precipitación de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , conservándose en la solución el  $Na_2CO_3$  o el  $NaHCO_3$  cuya solubilidad es mayor. En esta situación el  $Na^+$  puede desplazar al  $Ca^{2+}$  y al  $Mg^{2+}$  del complejo de intercambio, produciendo la defloculación del suelo. De acuerdo a esta evaluación el 70.6 % de las muestras se clasificó como favorable, el 17.6 % como marginales y el 11.8 % como desfavorables para la irrigación.



**Figura 7.** Clasificación de las muestras de agua de acuerdo al diagrama de Wilcox (1948).

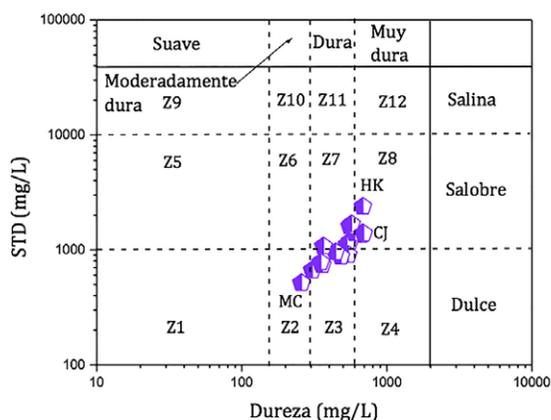
**Índice de permeabilidad (IP)**

El índice de permeabilidad (IP), de acuerdo a los criterios de Doneen (1962), permite clasificar la calidad del agua para irrigación en tres clases: excelente ( $IP > 75$ ), buena ( $25 < IP < 75$ ) e insatisfactoria ( $IP < 25$ ). De acuerdo con los valores de IP para las muestras, el 41.2 % se clasificaron con calidad insatisfactoria y el 58.8 % con buena calidad.

**Calidad del agua para consumo humano**

La comparación de la composición química de las muestras de agua de los cenotes respecto de las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011) y de la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1996) para aguas de consumo, permitieron establecer que el 47 % de las muestras poseen valores de conductividad eléctrica (salinidad) superiores a los límites máximos permitidos. Respecto de la cantidad de sólidos totales disueltos (STD) y la dureza, el 58.8 % de las muestras superan los valores máximos recomendados.

La representación gráfica de los sólidos totales disueltos contra la dureza de las muestras (figura 8), permitió clasificarlas en cuatro categorías (Li et al., 2014): agua dulce-moderadamente dura (5.88 % de las muestras), agua dulce-dura (35.29 %), agua salobre-dura (23.53 %) y agua salobre-muy dura (35.30 %). La Organización Mundial de la Salud ha considerado que el incremento en la salinidad, en la concentración de STD y en la dureza de las aguas para consumo, modifican el sabor de las mismas, sin embargo, no se han observado repercusiones importantes en la salud humana (WHO, 2011).



**Figura 8.** Clasificación de las muestras de agua en función de la dureza y los sólidos totales disueltos (Li et al., 2014).

Otros componentes químicos sobrepasan los valores establecidos en las normas, siendo para Na el 17.6 % de las muestras, el 70.6 % para  $\text{HCO}_3^-$  y el 11.8 % en el caso de Cl. Respecto a los componentes traza el 100 % de las muestras supera los límites máximos permisibles para aluminio, el 70.6 % respecto de arsénico y el 52.9 % amonio (WHO, 2011), destacando la presencia de fosfatos en el 82.35 % de las muestras. El resto de los componentes presentan valores permisibles.

Es importante mencionar que la mayoría de los componentes químicos del acuífero pueden tener un origen natural, sin embargo, la presencia de arsénico (uso de pesticidas), amonio (producto de la descomposición de materia orgánica) y fosfatos (presentes en fertilizantes y detergentes) sugieren un proceso de perturbación antropogénica, problemática que enfrenta el acuífero debido a sus características hidrogeológicas (DOF, 2013).

### Conclusiones

La evaluación de las características hidroquímicas de un grupo de cenotes del Estado de Yucatán permitió establecer que el agua presenta una naturaleza atmosférica-litotrófica con un dominio de interacción agua-roca, cuya facie dominante es  $\text{Ca-Mg-HCO}_3$ , siendo la disolución de minerales como calcita, aragonita, dolomita, halita y caolinita quienes aportan los principales constituyentes químicos al acuífero.

De acuerdo a sus características químicas, se considera que su aplicación para propósitos de irrigación es adecuada para cultivos salino-tolerantes y salino-semi-tolerantes, en virtud de que el drenaje de la región es adecuado para ello, sin embargo, las evaluaciones

periódicas son necesarias debido a que el proceso de salinización del acuífero podría limitar las actividades agrícolas en el largo plazo.

Respecto a la calidad del agua para consumo se considera que los valores de salinidad, dureza y sólidos totales disueltos pueden modificar sus propiedades organolépticas limitando su uso, sin embargo, la presencia de arsénico podría constituir un problema que se debe atender en el mediano plazo.

Desde una perspectiva de beneficio social, es importante el desarrollo de planes y estrategias para fomentar el desarrollo de plantas de tratamiento no solo para la depuración de aguas residuales, sino para la desalinización y purificación del acuífero, el cual es amenazado no solo por factores antropogénicos, sino también por procesos naturales tales como la disolución de las rocas y la intrusión marina.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Dpto. de Manejo de sistemas kársticos de la Secretaria de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (SEDUMA) por el apoyo brindado en la toma de muestras, así como a la Q. Verónica García Hernández por su apoyo en la realización de los análisis químicos.

### Referencias

APHA, American Public Health Association. (1999). Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th Ed. Washington DC: APHA, AWWA, WEF, p. 1-45.

Bauer G. P., Charvet G., Gondwe R. N. B., Marín E. L., Merediz A. G., Rebolledo V. M. (2011). The Yucatán Península karst aquifer, México. *Hydrogeol. J.*, 19: 507-524.

Bautista F., Palma L. D., Huchin M. W. (2005). Actualización de la clasificación de los suelos del Estado de Yucatán. p. 105- 122. En: Bautista F. y Palacio G. (Eds.) Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán.

Chadha D.K. (1999). A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. *Hydrogeol. J.*, 7: 431-439.

- CONAGUA. (2016). Estadísticas del agua en México. Edición 2016. México: Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 11 de Noviembre de 2017 en [http://201.116.60.25/publicaciones/EAM\\_2016.pdf](http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf)
- CONAGUA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Península de Yucatán (3105), Estado de Yucatán. Recuperado el 4 de octubre de 2017 en [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103392/DR\\_3105.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103392/DR_3105.pdf)
- Drever J. I. (2002). The geochemistry of natural waters: surface and groundwater environments. 3<sup>rd</sup> Ed. Prentice-Hall, p. 24-26.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (1996). Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. México: Secretaría de Salud. Consultado el 7 de Abril de 2018 en <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>
- DOF, Diario oficial de la Federación. (2013). Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero Península de Yucatán, clave 3105, estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo. Recuperado el 23 de Abril de 2018 en [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5312870&fecha=04/09/2013&print=true](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5312870&fecha=04/09/2013&print=true)
- Doneen L.D. (1962). The influence of crop and soil on percolating water. *Proc 1961 Biennial conference on Groundwater Recharge*, p. 156-163.
- Gibbs R.J. (1970). Mechanism controlling world water chemistry. *Science*, 170 (3962): 1088-1090.
- Graniel C. E., Morris L. B., Carrillo R. J. J. (1999). Effects of urbanization on groundwater resources of Merida, Yucatan, Mexico. *Environ. Geol.*, 37(4): 303-312.
- Gonzalez H. R., Martinez S. E., Pacheco A. J., Cabrera S. A. (2014). Leaching and dilution of fertilizers in Yucatan karstic aquifer. *Environ. Earth Sci.*, 72(8): 2879-2886.
- INEGI. (2002). Estudio Hidrológico del estado de Yucatán. Recuperado el 25 de Agosto de 2017 de [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224165/702825224165.df](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224165/702825224165.df)
- Langmuir D. (1997). Aqueous environmental geochemistry. 1<sup>st</sup> Ed. Prentice-Hall, p. 193-247.
- Li P., Wu J., Qian H. (2014). Hydrogeochemistry and quality assessment of shallow groundwater in the southern part of the Yellow River alluvial plain (Zhongwei Section), Northwest China. *Eart. Sci. Res. J.* 18 (1): 27-38.
- Lloyd J.W., Heathcote J.A. (1985). Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater: an introduction. 1<sup>st</sup> Ed. Clarendon, p.294.
- Marín L. E., Steinich B., Pacheco J., Escolero O.A. (2000). Hydrology of a contaminated sole-source karst aquifer, Mérida, Yucatán, México. *Geofis. Int.*, 39 (4): 359-365.
- Parkhurst D.L., Appelo, C.A.J. (1999). User's guide to PHREEQC (ver. 2): A computer program for speciation, batch reaction, one dimensional transport, and inverse geochemical calculations. USGS Water Resources Investigation Report, 99, 4259.
- Richards L.A. (1954). Diagnosis and improvement of saline alkali soils. Agriculture, Vol. 160. Handbook 60. Washington DC: US Department of Agriculture.
- Sadzawka R.A. (2006). Métodos de análisis de aguas para riego. (Serie Actas INIA No. 37). Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Torres D.M.C., Basulto S. Y.Y., Cortés E. J., García U. K., Koh S. A., Puerto R.F., Pacheco A. J.G. (2014). Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación del agua subterránea en Yucatán. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 1(3): 189-203.
- USSL. (1954). Classification of irrigation waters. US Department of Agriculture, Circu 969. Washington.
- Van Wirdum G. (1980). Description of water-quality changes in a hydrological cycle for the purpose of nature conservation. In J.C. Hooghart (Ed.). Water quality in groundwater-flow systems. (Reports and notes 5, p. 118-143). The Hague, The Netherlands: Commission for Hydrological Research TNO.
- Villasuso M. J., Méndez R.R. (2000). A conceptual model of the aquifer of the Yucatán Peninsula. In: Lutz, W.; Prieto, L.; Sanderson, W. C. (Eds.): Population, development, and environment on the Yucatán Peninsula. From ancient Maya to 2030 (00-14), chap. 6: p. 120-139. Luxemburg, Austria (International Institute for Applied Systems Analysis).

Weiner E.R. (2013). Applications of environmental aquatic chemistry: a practical guide. 3<sup>rd</sup> Ed. CRS Press, p. 74-94.

Welcher F.J. (Ed.). (1995). Standard methods of chemical analysis. 6<sup>th</sup> Ed. Vol. 2, Part B. New York: Krieger Publishing Company, p. 161-170.

WHO, World Health Organization. (2011). Guidelines for drinking-water quality. 4<sup>th</sup> Ed. WHO Press, p. 307-442.

Wilcox L.V. (1948). The quality of water for irrigation use. US Dept. of Agriculture, Tech. Bull., 962, Washington, D.C., p. 1-40.