

Caracterización fisicoquímica y direcciones de flujo del agua subterránea en la zona noroeste de la península de Yucatán

Physicochemical Characterization and Directions of Underground Water Flow in the Northwest Area of the Yucatan Peninsula

Ismael del Carmen Sandoval Montes* y José Daniel Heredia Escobedo**

* INEGI, Dirección Regional Sur (DRS), ismael.sandoval@inegi.org.mx

** INEGI, Dirección Regional Sureste (DRSE), jose.heredia@inegi.org.mx



Sumidero o Cenote en la Riviera Maya, Yucatán - México/cinoby/Getty Images

Parte de la información hidrogeológica generada en el 2014 por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para la realización del Estudio Integral del Acuífero Cárstico Península de Yucatán se analizó para el noroeste de la península de Yucatán. Las muestras de agua subterránea colectadas en estiaje y lluvia fueron 101 y 109, respectivamente, a las cuales se les identificaron sus componentes fisicoquímicos. Los resultados fueron procesados con herramientas geoestadísticas y diagramas de Stiff, Piper, Gibbs y Wilcox para analizar su comportamiento geoespacial y plantear hipótesis que identifiquen los factores naturales y antrópicos como fuente de las anomalías reportadas. Con los resultados obtenidos se propone la hidrodinámica de los flujos subterráneos basada en la interpretación de la evolución fisicoquímica a lo largo de esquemas de flujos, considerando la litología, estructuras geológicas, el anillo de cenotes, la Sierrita de Ticul y la falla Hecelchakán-Campeche.

Palabras clave: cárstico; geoestadística; hidrodinámica; diagramas.

Recibido: 14 de junio de 2017.
Aceptado: 8 de enero 2018.

Generalidades

Localización

La zona de estudio se ubica al sureste de la República Mexicana en el extremo noroeste de la península de Yucatán; comprende la mitad poniente del estado que le da nombre y una pequeña porción del norte de Campeche; abarca una superficie de 24 803.39 km² (ver mapa 1); se encuentra dentro de la Región Hidrológica 32, donde —por sus características topográficas, geológicas y capacidad de infiltración del terreno— prácticamente no se presentan escurrimientos superficiales y si los hay, son de corto recorrido, sin embargo, sí se reflejan en flujos subterráneos que descargan en la línea de costa del suroeste, poniente y norte del área, dando origen a cuerpos de agua lagunares que bordean la zona delimitada.

Part of the hydrogeological information generated in 2014 by INEGI for the implementation of the Comprehensive Study of Karst Aquifer in Yucatan Peninsula is analysed with the northwest of the Yucatan Peninsula in mind. The universe of water samples collected in both rain and dry seasons are of 101 and 109, respectively. From these, physiochemical analyses were performed. The results were processed using geostatistical tools and Stiff, Piper, Gibbs, and Wilcox diagrams to analyse behaviour and geospatial hypothesize that identify natural and anthropogenic factors as the source of detected anomalies. From these results, we propose groundwater-flow hydrodynamics based on the interpretation of the physicochemical evolution along the flow scheme and after considering the geological environment, lithology and main geological structures, the deep pools ring, the Sierrita de Ticul territory, and Hecelchakán-Campeche.

Key words: Karst aquifer; Geostatistics; Hydrodynamics; Diagrams.

Mapa 1

Localización de la zona de estudio



Fisiografía

El área de estudio se caracteriza por presentar tres grandes rasgos fisiográficos distintivos: el primero (y que ocupa más de las tres cuartas partes de la zona) es la llanura, que va desde los cero metros de elevación en la línea de costa, hasta una decena de metros conforme se interna hacia el centro de la península, predominando la de tipo rocoso sobre la aluvial y ésta, a su vez, sobre los sedimentos de playa, los cuales ocupan una menor extensión, y paralelas a la línea de costa también se presentan llanuras con hondonadas y lomeríos de hasta 50 m de altitud; el segundo lo representa el lomerío bajo con hondonadas, que se ubica al sur-sureste de la zona, con altitudes entre los 10 y 50 m; como tercer rasgo, sumamente distintivo, es la Sierrita de Ticul, que se desarrolla en una franja noreste-suroeste con altitudes de 100 a 200 m como máximo (ver mapa 2).

Geología

El rango cronológico de la columna estratigráfica en la zona comprende del Paleoceno al Holoceno (ver mapa 3), representado por rocas marinas de tipo calcáreo de diferentes ambientes de depósito, donde el principal control de la sedimentación son los cambios eustáticos del nivel del mar o diferentes grados de subsidencia (López-Ramos, 1975), así como la influencia de la actividad neotectónica, lo que originó el levantamiento en forma basculada y con mayor intensidad en el sur de la península de Yucatán (Lugo-Hubb, 1992).

Litología

Caliza-Yeso (TpaCz-Y)

Constituida por rocas calcáreas y evaporitas; son consideradas como parte de la Formación Icaiché del Paleoceno y se ubican al sur-suroeste de la zona de estudio. Su desarrollo más importante se presenta en la parte central de la península.

Caliza-Marga (TeCz-Mg)

Identificada como Formación Chichen Itzá del Eoceno, está formada por una secuencia de calizas tipo *grainstone* y *wackestone*, horizontes de margas y brechas calcáreas, las cuales afloran prácticamente al sur y todo el sureste del área.

Caliza-Coquina (ToCz-Cq)

Paquete de rocas carbonatadas de diferentes texturas (*mudstone*, *grainstone* y *budstone*); López-Ramos las describe como margas blancas, grises y gris-crema, margas con intercalaciones de arcillas, así como calizas gris-crema compactas. En algunos cortes litológicos, éstas no se presentan (*hiatus*); el afloramiento principal se ubica al oriente y solo un pequeño manchón se localiza al sur.

Caliza-Coquina (TmplCz-Cq)

La Formación Carrillo Puerto del Mioceno-Plioceno se encuentra representada por un paquete de rocas carbonatadas de diversas texturas y brechas calcáreas; presenta abundancia de macrofósiles. Se encuentra ampliamente distribuida desde el noreste hasta el sureste del área.

Coronando de manera discordante la columna litológica se ubica una serie de depósitos sedimentarios que han sido catalogados como del Holoceno: Lagunar (*Qholg*), Litoral (*Qholi*), Aluvial (*Qhoal*) y Lacustre (*Qholq*).

Geología estructural

Las unidades litológicas no presentan deformaciones significativas que revelen procesos tectónicos, ya que solo manifiestan ligeras inclinaciones interpretadas como un basculamiento originado por una tectónica distensiva reciente (SGM, 2006), cuya estructura más representativa es la falla de Ticul, frontera entre las formaciones Carrillo Puerto y Chichen Itzá (ver mapa 3).

Característica principal es la presencia de cenotes dispuestos en forma semicircular, que ha sido interpretada como un reflejo de una estruc-

Fisiografía del noroeste de la península de Yucatán



tura de impacto, originada por la colisión de un meteorito hace 65 millones de años (Urrutia-Fukugauchi *et al.*, 2008), que el SGM registra como un curvilineamiento de 5 a 10 km de ancho, en un semicírculo de más o menos 80 km de radio; la cuenca sedimentaria que se formó por este fenómeno a profundidad pudiera presentar importantes cambios estratigráficos debido a su posterior relleno con parte del material eyectado y la precipitación de los carbonatos del agua de mar.

Al suroeste del área (en los límites con Campeche), el SGM marca una deformación frágil representada por una falla normal (Campeche-Hecelchakán) que se manifiesta en una traza de 45 km de longitud con rumbo N30° E y un echado de 60° NO, localmente, la superficie del espejo de falla se presenta con estrías, fracturamiento, brechas y cataclasitas (SGM, 2006).

Precipitación

Con base en el *Atlas climático digital de México* publicado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la temporada de lluvias en la zona de estudio es de mayo a octubre; la distribución de las precipitaciones presenta un direccionamiento general sureste-noroeste, registrándose lluvias mayores a 1 000 mm anuales en la mayor parte; conforme se acerca a la línea de la costa, éstas disminuyen, lo que origina una franja de varios kilómetros de ancho con precipitaciones entre 700 y 1 000 mm anuales; la disminución en las precipitaciones conforme se acerca a la línea de la costa da origen a climas hasta de tipo seco en la zona.

Desarrollo del trabajo de campo

Logística

Previo al trabajo de campo se definieron sitios y espaciamiento del muestreo, el cual se sistematizó en lo posible a una rejilla y que lo permitiera la

presencia de alumbramientos de agua subterránea y su acceso, con el fin de estar en la posibilidad de utilizar algún método geoestadístico que pudiera apoyar en el análisis temporal y espacial de las variables identificadas; para ello, se adoptaron las *Recomendaciones del Grupo de Trabajo de la Directiva del Agua de la Unión Europea* (Rentier, 2006).

Colecta de muestras y parámetros de campo

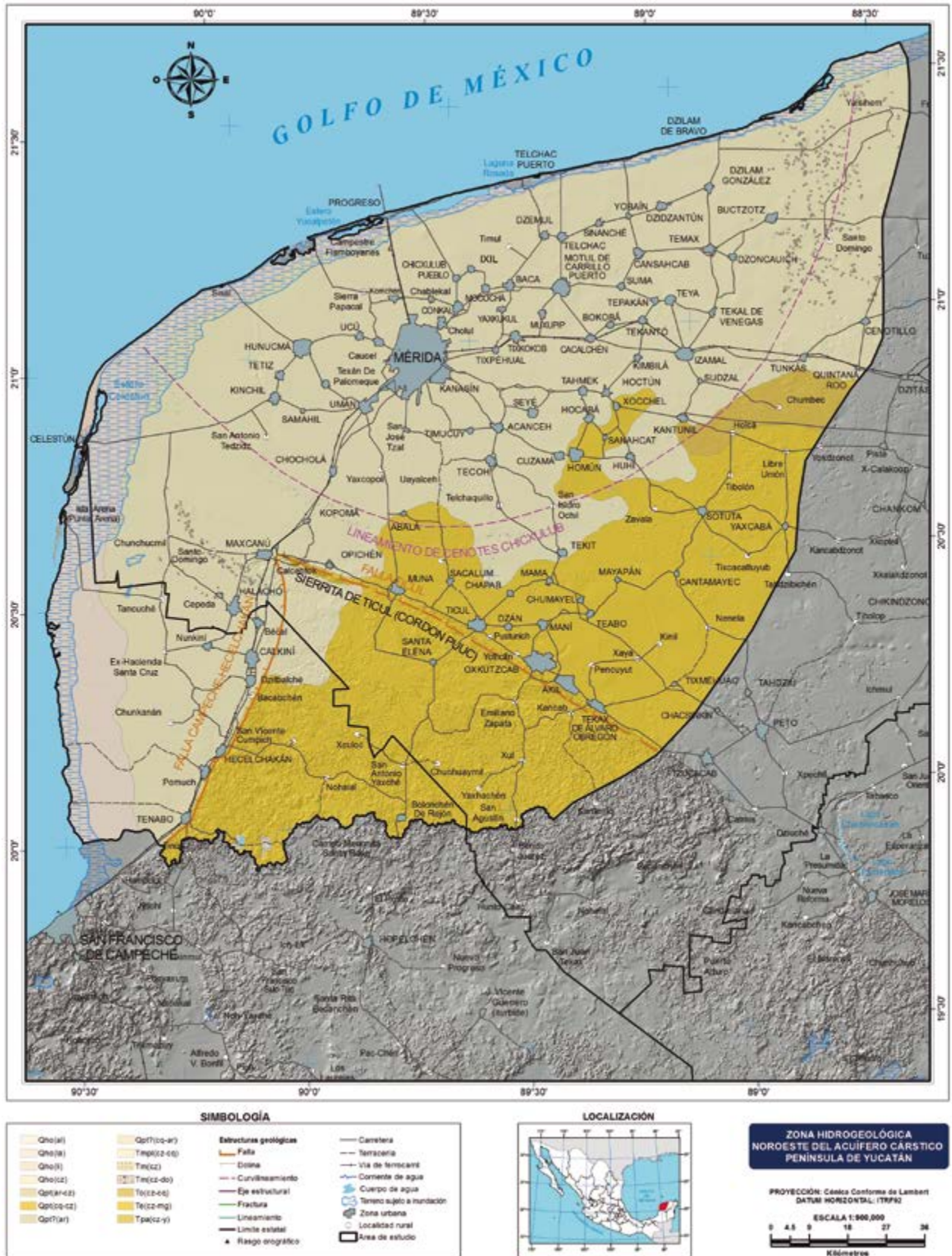
El muestreo se realizó en dos temporadas, la primera en mayo (estiaje) y la segunda en octubre (posterior a la temporada de lluvias) con el fin de conocer la posible respuesta de los acuíferos a los eventos hidrometeorológicos que se pudieran presentar en la zona e identificar alguna posible variabilidad en su composición química.

Las muestras de agua se obtuvieron de manera directa de las descargas de los equipos de bombeo o de los cuerpos de agua (101 en la primera etapa y 113 para la segunda), mismas que fueron preparadas de acuerdo con el protocolo de muestreo implementado por el Laboratorio de Análisis de Materiales del INEGI y enviadas para su análisis. Durante el trabajo de campo se utilizó un equipo GPS para su geoposicionamiento, así como uno multiparamétrico de campo marca HATCH modelo HQ40d, con el que se identificó *in situ* el pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE) y los sólidos totales disueltos (STD).

Resultados de laboratorio

Con la información reportada por el laboratorio de la primera y segunda etapa de muestro, en la que se les identificaron los cationes y aniones mayoritarios (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , SO_4^- , HCO_3^- , CO_3^- , Cl^- y NO_3^-), se procedió a conocer su electroneutralidad, misma que resultó inferior a 6%, por lo que los resultados fueron considerados como aceptables (Hem, 1985); a cada muestra también se le determinó la dureza, la Relación de Adsorción de Sodio

Litología y estructuras geológicas



(RAS), pH, CE y STD; es de mencionar que, a solicitud especial, a las muestras de la segunda etapa se les identificó el contenido de fosfatos (PO_4^{3-}).

Distribución espacial e interpretación de parámetros fisicoquímicos

A la información reportada se le aplicó un procesamiento geoestadístico, que consistió en el análisis exploratorio de los datos, el análisis estructural y las predicciones o simulaciones del comportamiento espacial de las variables analizadas. El método de interpolación fue el Kriging; como referencia, se utilizó 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*.

Los resultados se presentan en mapas de distribución espacial, en los que se identifican las anomalías hidrogeoquímicas de origen geogénico y antropogénico (para su consulta favor de remitirse al documento original: *Estudio integral del acuífero cárstico península de Yucatán* en <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825086886>).

Representación gráfica de calidad y evolución química del agua subterránea

Los métodos gráficos más utilizados para representar la composición química del agua son los diagramas de Stiff, Piper, Wilcox y Gibbs, entre otros, los cuales permiten apreciar, clasificar y comparar los diferentes tipos de agua y analizar cambios en su comportamiento debido a factores climáticos, geohidrológicos o antrópicos.

Diagramas de Stiff

Es un sistema de tres ejes horizontales paralelos con origen en el centro; en los de la izquierda se ubican las concentraciones de los cationes (Na^+K^+ , Ca^{++} y Mg^{++}) y en el de la derecha, los

aniones (Cl^- , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{=} \text{y } \text{SO}_4^{=}$), los cuales se unen mediante líneas contiguas para generar polígonos que representan patrones hidrogeoquímicos en los que se infieren cualitativamente procesos geoquímicos presentes en la zona y que ayudan a definir el origen y evolución de la composición química del agua (el mapa 4 presenta las dos temporadas de muestreo).

Diagramas de Piper

Con el fin de conocer los procesos evolutivos que presentan las muestras de agua en la zona, se utilizó este diagrama, interpretado por Kelly (2005), en el que se identifican las muestras de agua de reciente precipitación e infiltración, así como los procesos geoquímicos evolutivos y de mezclas con agua de mar (ver figura 1).

Diagrama de Wilcox

Con respecto a la clasificación del agua para riego de las muestras colectadas, este diagrama ayudó a identificar las evoluciones que presentan y su tendencia (ver figura 2).

Diagrama de Gibbs

Mediante él se identificaron algunos procesos de evolución, desde la interacción agua-roca, evaporación-precipitación y agua de mar (ver figura 3), lo que confirma los procesos de mezcla e intrusión marina que se presentan en la zona.

Conclusiones

Con base en la información recopilada y analizada, se magnifica la importancia del agua de lluvia en la zona, debido a que es la fuente principal de abastecimiento de la capa de agua dulce que flota sobre la salada debido a la diferencia de densidades (1.0 kg/L vs. 1.033 kg/L), de donde se extrae el líquido para uso y consumo humano, por lo que cualquier desequilibrio pudiera acrecentar la invasión con agua de menor calidad fisicoquímica.

La distribución espacial de elementos químicos identificados en el agua subterránea pone en evidencia la vulnerabilidad del acuífero cárstico,

Diagramas de Stiff de la primera etapa de muestreo

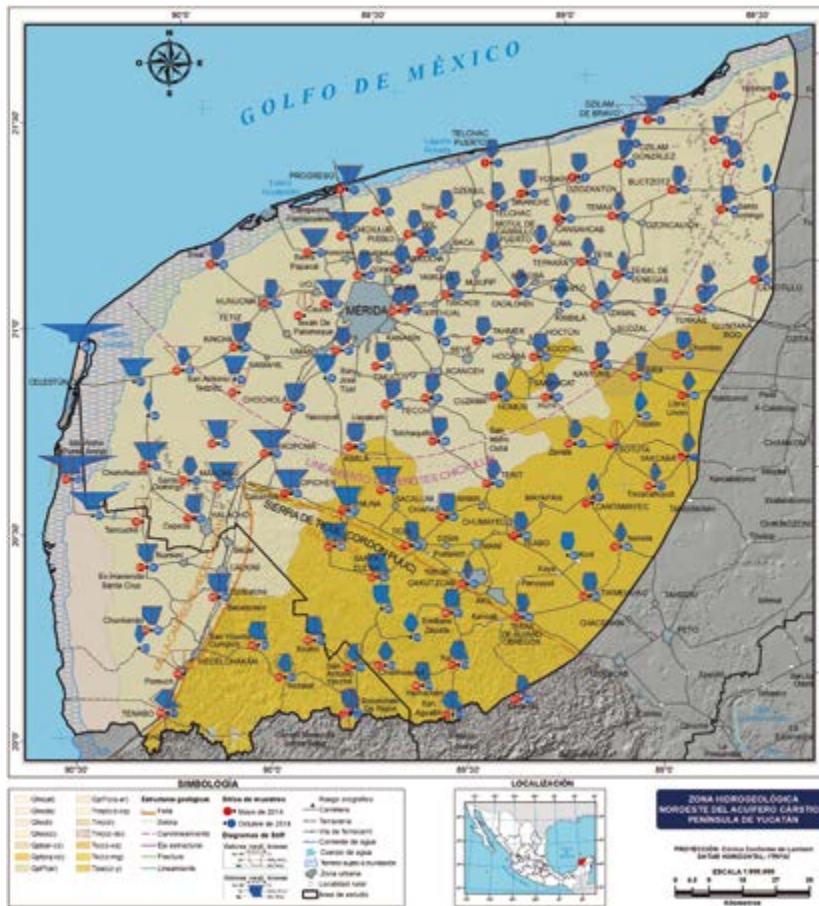


Figura 1
Diagramas de Piper con interpretación de Kelly
para las muestras colectadas en la primera
etapa de campo

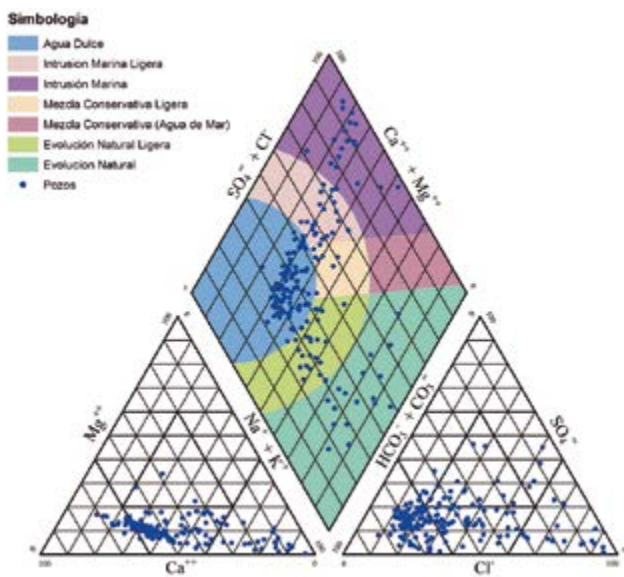


Figura 2
Diagramas de Wilcox para clasificar las aguas de
riego e identificar la evolución química del agua
de la primera temporada de muestreo

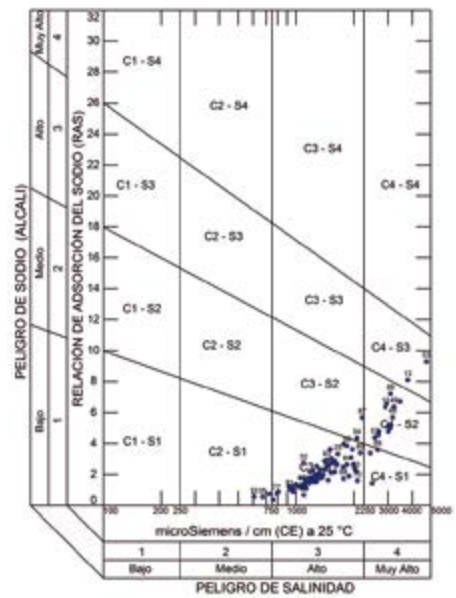
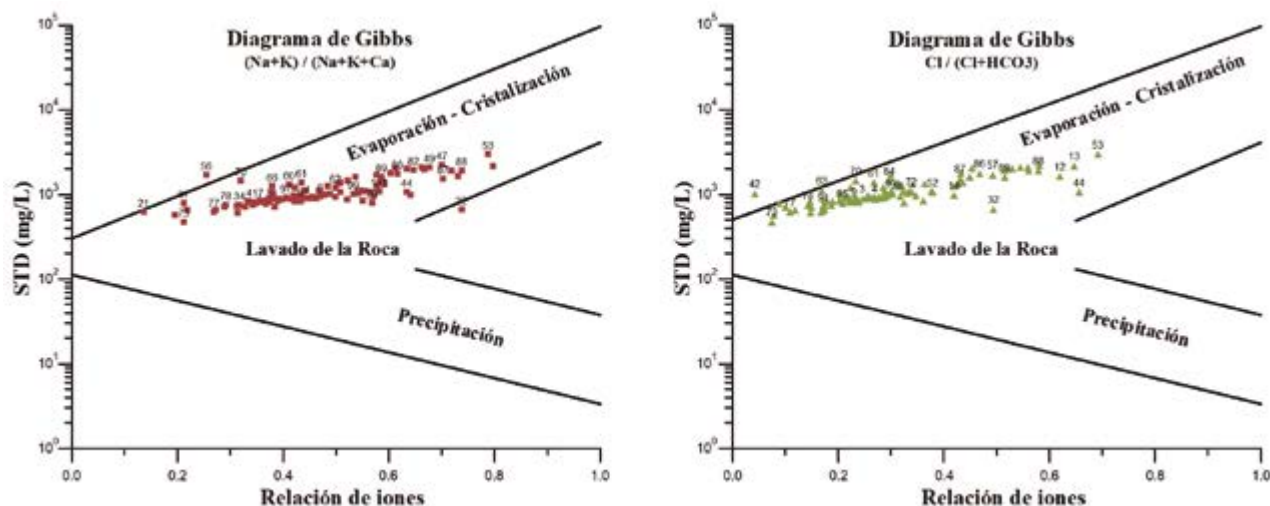


Figura 3

Diagramas de Gibbs para identificar procesos geoquímicos y evolución química del agua subterránea de la primera etapa de campo



lo cual obliga a su conocimiento, difusión y monitoreo con el fin de evitar su deterioro.

El curvilineamiento formado por el anillo de cenotes no presenta desviaciones en las direcciones de los flujos subterráneos, cambios en la calidad del agua o desequilibrios en los niveles, por lo que la zona presenta continuidad geohidrológica.

Las direcciones de los flujos subterráneos obtenidos con base en la hidroquímica no son radiales (ver mapa 5), sino que tienden a seguir cambios litológicos, estructuras geológicas y conductos de disolución (ríos subterráneos).

Fuentes

Gibbs, R. J. "Mechanisms Controlling World Water Chemistry", en: *Science, New Series*. Vol. 170, núm. 3962, 1970, pp. 1088-1090.
 Hem, J. D. "Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water", en: *U.S. Geological Survey*. 1985, 272 p.

INEGI. *Estudio integral del acuífero cárstico península de Yucatán*. Aguascalientes, Ags., 2016.
 Kelly, D. *Seawater intrusión topic paper (Final)*. Island County/WRIA 6 Watershed Planning Process, 2005.
 López Ramos, E. "Estudio geológico de la península de Yucatán", en: *Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros. Boletín*. V. 25, 1973, pp. 23-76.
 Lugo-Hubp, J., J. F. Aceves-Quesada y R. Espinasa-Pereña. "Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán", en: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 10, núm. 2, 1992, pp. 143-150. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.
 Rentier, C., F. Delloye, S. Brouyere y A. Dassargues. "A framework for an optimised groundwater monitorin network and aggregated indicators", en: *Environmental Geology*. 2006, p. 20.
 Servicio Geológico Mexicano. *Carta geológico-minera Mérida F16-10, Yucatán*. 2006.
 Urrutia-Fucugauchi, J., J. M. Chávez-Aguirre, L. Pérez-Cruz y J. L. de la Rosa. *Impact ejecta and carbonate sequence in the Eastern sector of the Chicxulub crater*. Académie des Sciences, Elsevier Masson SAS, 2008.

Definición de los flujos subterráneos con base en la química del agua subterránea en el noroeste de la península de Yucatán

