

Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sur del Estado de Quintana Roo, México

Joan Alberto Sánchez-Sánchez^{1,*}, Teresa Álvarez-Legorreta¹, Julia G. Pacheco-Ávila², Roger A. González-Herrera² y Laura Carrillo-Briebzeca¹

¹ El Colegio de la Frontera Sur, Ave. Centenario Km 5.5, Chetumal, Quintana Roo México.

² Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, Av. Industrias no Contaminantes por Periférico Norte, Apartado Postal 150 Cordemex, 97310 Mérida, Yucatán, México.,

* joan_ss21@yahoo.com

RESUMEN

Con el fin de identificar los procesos que controlan la evolución geoquímica de las aguas subterráneas en la zona sur del estado de Quintana Roo, en los meses de octubre y noviembre de 2012 (temporada de lluvias) se muestrearon 53 pozos de abastecimiento con una profundidad promedio de 29 m. Los parámetros físicos medidos en campo fueron pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales. Los constituyentes químicos analizados incluyeron los cationes calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), potasio (K^+) y los aniones bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^-) y nitrato (NO_3^-). Estadísticos descriptivos, matrices de correlación, análisis de factores, junto con el análisis de conglomerados se utilizaron para obtener una comprensión de los procesos hidrogeoquímicos en el área de estudio. El área de estudio se caracteriza por presentar una heterogeneidad en cuanto a sus características hidrogeológicas (karst), con cambios litológicos y geológico-estructurales que dan lugar a zonas acuíferas independientes de los acuíferos de extensión regional. De acuerdo con el análisis geoquímico a través del diagrama de Piper se observaron cuatro tipos de aguas predominantes en el área de estudio: cálcica-bicarbonatada (Ca-HCO_3), mixta cálcica magnésica clorurada (mixta Ca-Mg-Cl), cálcica sulfatada (Ca-SO_4) y sódica clorurada (Na-Cl). A través del análisis de conglomerados se identificaron siete grupos predominantes en el área de estudio. Dichos grupos muestran valores contrastantes en aprovechamientos cercanos, propiciados por la propia heterogeneidad del medio acuífero en donde el agua transita por diferentes rocas: calizas, dolomías y evaporitas. Se identificaron además tres factores que explican el 74.68% de la varianza observada en la composición química. Los parámetros que definen estos factores indican que los procesos hidrogeoquímicos dominantes son (1) la disolución de calizas y dolomías y el intercambio iónico; (2) la mezcla con agua marina y (3) el aporte de nutrientes por actividades humanas.

Palabras clave: karst, estadísticos multivariados, hidrogeoquímica, aguas subterráneas, Quintana Roo, México.

ABSTRACT

In order to identify the processes controlling the geochemical evolution of groundwater in the southern part of the state of Quintana Roo, Mexico, 53 drinking water wells were sampled in the months of October

and November 2012 (rainy season). Physical parameters measured in the field were pH, temperature, electrical conductivity and total dissolved solids. Chemical constituents analyzed include the cations calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+) and the anions bicarbonate (HCO_3^-), sulfate (SO_4^{2-}), chloride (Cl^-) and nitrate (NO_3^-). Descriptive statistics, correlation matrices, factor analysis, along with cluster analysis were used to gain an understanding of the hydrogeochemical processes operating in the study area. The study area is characterized by heterogeneity in their hydrogeological characteristics (karst), with lithological and geological-structural changes that result in water-bearing zones isolated from the aquifers of regional extent. Four predominant types of water were identified in the study area: calcium-bicarbonate type (Ca-HCO_3), mixed calcium-magnesium-chloride type (mixed Ca-Mg-Cl), sulfate-calcium type (Ca-SO_4) and sodium-chlorided type (Na-Cl). Through cluster analysis, seven predominant groups were identified in the study area. These groups show contrasting values for nearby sites, favored by the heterogeneity of the aquifer medium where the water flows through different rocks: limestone, dolomite and evaporite. Three factors were identified through factor analysis, accounting for 74.68% of the cumulative variance. The parameters associated to these factors indicate that the dominant hydrogeochemical processes in the study area are (1) the dissolution of limestone and dolomite and ionic exchange; (2) mixing with seawater; and (3) anthropogenic nutrient input.

Key words: karst, hydrogeochemistry, multivariate statistics, groundwater, Quintana Roo, Mexico.

INTRODUCCIÓN

La composición química de las aguas subterráneas es controlada por muchos factores que incluyen la composición de la precipitación, la mineralogía de las cuencas hidrográficas y los acuíferos, el clima y la topografía (Güler *et al.*, 2002). Estos factores se combinan para crear diversos tipos de agua que cambian espacial y temporalmente. Esto se explica a través de la evolución química que sufre el agua subterránea mediante la interacción con los minerales de los acuíferos o las mezclas internas entre los diferentes tipos de aguas a lo largo de las trayectorias de flujo en el subsuelo (Kumar *et al.*, 2009). Los procesos hidrogeoquímicos, en ese sentido, ayudan a obtener una visión de la distribución y origen del agua subterránea, la interacción agua-roca, las mezclas e interconexiones de agua de diferentes orígenes (aguas superficiales

y subterráneas, entre acuíferos), los fenómenos de intrusión salina y las influencias antropogénicas sobre la calidad del agua subterránea (Custodio, 1983; Pernía-Llera *et al.*, 1993). Frecuentemente es determinada a través de la medición de constituyentes fisicoquímicos tales como los cationes: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) potasio (K^+) y los aniones bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^-) y nitrato (NO_3^-) (Custodio y Llamas, 1983; Cuevas *et al.*, 2001).

El sur del Estado de Quintana Roo se caracteriza por la presencia de rocas calcáreas que, entre otras cosas, se distinguen por sufrir un proceso altamente dinámico conocido como karstificación, el cual consiste en la disolución de rocas (compuestas de CaCO_3), en presencia de ácido carbónico (HCO_3^-), producto de la reacción entre el bióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O) (Suárez-Morales y Rivera-Arriaga, 2000). Estas características propician zonas de gran permeabilidad debido al desarrollo de fracturas y canales de disolución por donde se filtra rápidamente el agua al acuífero, espesores de suelo muy reducidos y limitada existencia de corrientes de agua superficiales (Matthes, 2008; Marín *et al.*, 2001; Schmitter-Soto *et al.*, 2002; Granel-Castro y Gáñez-Hita, 2002; Escolero *et al.*, 2002; Perry *et al.*, 2002). Debido a estas características existe un riesgo de contaminación del acuífero por las diversas actividades humanas, por lo que es importante el estudio de las características hidrogeoquímicas del acuífero en la región, con la finalidad de identificar los procesos que controlan la evolución geoquímica de las aguas subterráneas, ya que este recurso hídrico representa la única fuente de agua dulce para uso y consumo humano.

El enfoque de este estudio incluye representaciones gráficas convencionales y técnicas estadísticas multivariadas como el análisis de factores y de conglomerados con el objetivo de caracterizar en términos físicos y químicos las aguas subterráneas de la Subregión Hidrológica No. 33-A y poder ampliar el conocimiento hidrogeoquímico del acuífero kárstico así como analizar los factores que influyen en la variabilidad espacial y su posible relación con otros factores hidrogeológicos y ambientales. Los análisis multivariados fueron empleados por su utilidad como herramienta para reducir y organizar grandes conjuntos de datos hidrogeoquímicos en grupos con características similares y luego relacionarlos con cambios específicos en el proceso hidrológico. Las técnicas estadísticas multivariadas han sido ampliamente aceptadas en la evaluación de los procesos hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas en sistemas kársticos (Holland y Witthüser, 2009; Abello *et al.*, 1992; Moral *et al.*, 2008).

Características del área de estudio

El área de estudio forma parte de la Subregión Hidrológica No. 33-A conocida como Bahía de Chetumal y Otras (Figura 1) (UQROO, 2002). Se enmarca geográficamente en las coordenadas $17^\circ 49'$ a $20^\circ 12'$ de latitud norte y entre los $87^\circ 30'$ y los $89^\circ 27'$ de longitud oeste, cubriendo una extensión total de 37,896,420 km^2 . Colinda al occidente con la Subregión Hidrológica RH33-B (Cuencas Cerradas-B), hacia el nororiente con el mar Caribe y hacia el suroccidente por una línea que está definida por la bahía de Chetumal, por el límite nacional con Belice en un tramo de límite natural constituido por el río Hondo y enseguida por el límite político con Belice (UQROO, 2002). El área de estudio contiene un notable contraste topográfico: hacia el norte y en la franja costera se observa un relieve topográfico plano con elevaciones que van de 0 a 20 m s.n.m., mientras que al sur-suroccidente se observa un relieve ondulado con elevaciones que van de 50 a 340 m s.n.m. (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). En esta última zona concurre un aumento gradual de nororiente a suroccidente con elevaciones de 20 a 50 m s.n.m. (Lugo *et al.*, 1992). La temperatura promedio anual oscila entre 25.6°C y 26.7°C , con una temperatura máxima entre 36°C y 38°C y mínima entre 12°C y 14°C (BETSCO, 2012). La región cuenta con un clima aw2(i), cálido subhúmedo con abundantes lluvias

en verano y parte de invierno (CNA, 2006). La precipitación media anual es de 1365 mm, casi 600 mm más alta que el promedio nacional, el cual es 772 mm (JICA, 2004; Alcocer *et al.*, 1999). La temporada de lluvias se presenta en los meses de mayo a octubre, con una lámina media mensual desde 150 a 220 mm, mientras que la temporada de estiaje o secas comprende los meses de noviembre a abril, durante los cuales las láminas llovidas son menores que 60 mm (UQROO, 2002).

Marco hidrogeológico

El área de estudio se define como una unidad geológica cubierta casi en su totalidad de sedimentos calcáreos de origen marino del Paleoceno al Plioceno (Butterlin y Bonet, 1960; López-Ramos, 1973). Se encuentra constituida de evaporitas intercaladas con rocas calizas y minerales como la dolomita, aragonita, yeso y halita (Isphording, 1975). Estas rocas carbonatadas son altamente permeables y solubles por lo que al ser disueltas dejan escaso residuo, razón por la cual se presentan espesores de suelo muy reducidos, que a su vez resultan en la presencia de un sistema acuífero kárstico maduro con amplias fisuras, fracturas y cuevas (JICA, 2004; Hausman, 2009; Beddows *et al.*, 2002).

Fisiográficamente, el área de estudio se ubica en la unidad "Planicie Central" caracterizada por tener una superficie plana ligeramente rugosa y ondulada (López-Ramos, 1973). Se identifica por una superficie kárstica con un escenario de erosión dentro de su ciclo geomorfológico donde concurren pequeños lomeríos semirredondeados distribuidos en forma irregular y por otros alineados con orientación NE-SO, limitados por zonas prácticamente planas y bajas (CCPY, 2012). Asimismo, existen cavidades y conductos en las rocas calcáreas variando desde poros y fracturas, hasta grandes cavernas cuyas profundidades van de los 12 m a los 30 m. Contempla además numerosas depresiones paralelas a la costa (dolinas menores) que resultan del colapso de las cubiertas de las cavernas que cuando no poseen agua son conocidas como "sumideros", y cuando el agua es visible se les llama "cenotes" (Lugo *et al.*, 1992). Estos últimos, al igual que las dolinas, las fracturas y las fallas, funcionan como medios de absorción e infiltración recargando al sistema acuífero (CNA, 2001).

Estratigráficamente, la unidad sedimentaria más antigua que aflora en región de estudio (Figura 2) corresponde a la Formación Icaiché (TpaCz-Y) del Paleoceno constituida por calizas con yesos, horizontes de arcillas y fragmentos de sílice (SGM, 2007). Esta unidad es sobreyacida discordantemente por la Formación Estero Franco (TmCz-Do) del Mioceno, constituida por calizas y dolomías y horizontes de yeso, la cual cambia de facies lateralmente a la Formación Bacalar (TmCz), formada por caliza, que a su vez es sobreyacida concordantemente por calizas y coquinas de la Formación Carrillo Puerto (TmplCz- Cq) de edad Mioceno-Plioceno, constituida por caliza, boudstone (coquina) y brecha calcárea. Cubriendo a la unidad anterior se tienen depósitos lacustres (Qhola) constituidos por sedimentos y fragmentos no consolidados de limo, arena, arcilla, grava y material calcáreo suelto, lodos calcáreos y materia orgánica. Y cubriendo indistinta y parcialmente a todas las unidades se tienen depósitos aluviales (Qhoal) constituidos por limos y arcillas; depósitos lacustres (Qhola) formados por una cantidad de restos vegetales mezclados con limos y arcillas, y depósitos palustres (Qhopa) formados por arcillas y limos con alto contenido de materia orgánica.

Las unidades litológicas se encuentran prácticamente sin deformación significativa (SGM, 2007). La secuencia de rocas paleógenas que aflora consiste principalmente en calizas, areniscas y evaporitas del Paleoceno que forman capas con una posición prácticamente horizontal, cuyo eje estructural tiene orientación NNE-SSO (Butterlin y Bonet, 1962; López-Ramos, 1972; Velázquez-Aguirre, 1986; Lugo-Hubp *et al.*, 1992) y su conjugado ortogonal NO-SE. Estas estructuras han contribuido significativamente a establecer una serie de aportes y drenaje de

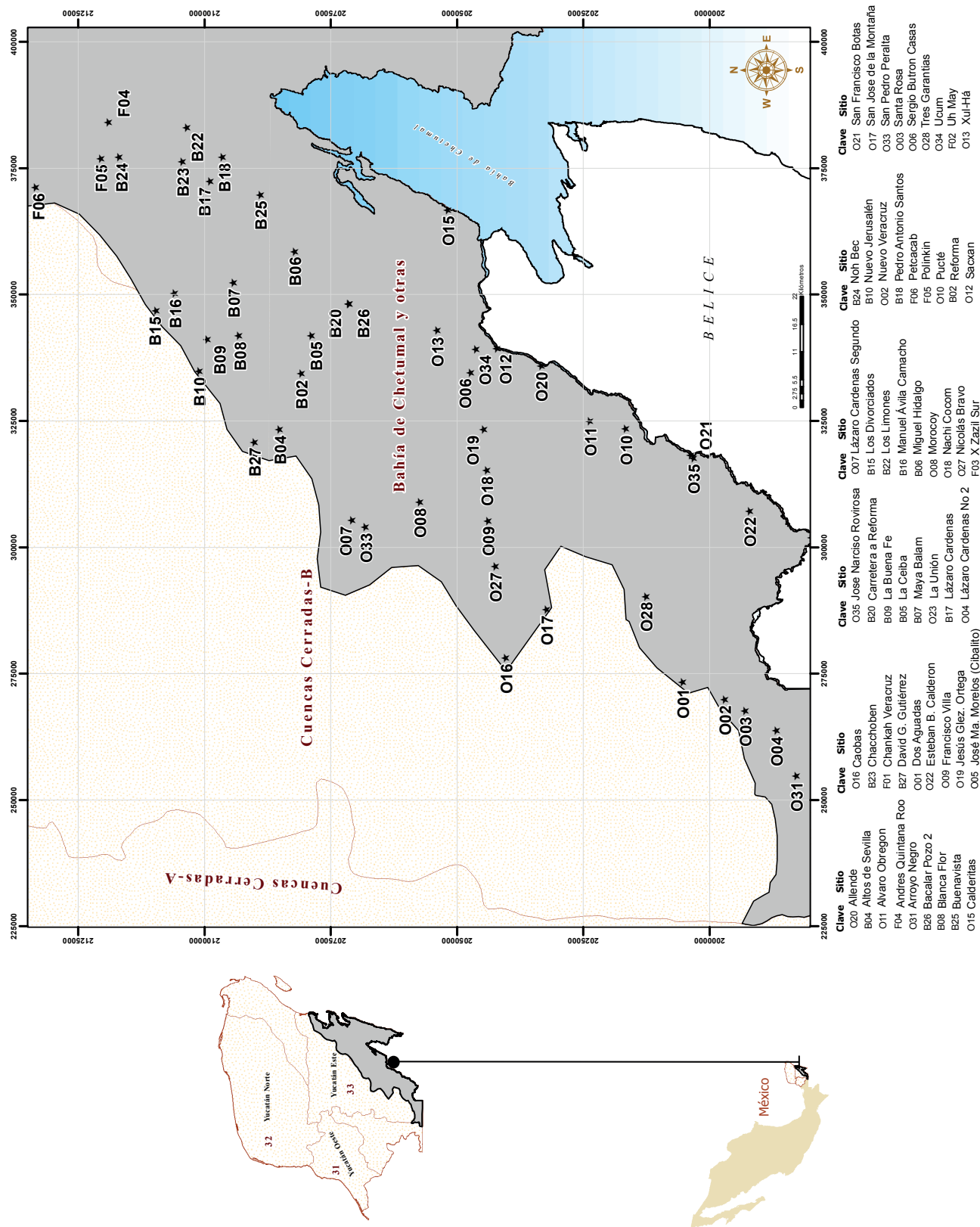


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio. Los puntos negros indican los sitios de muestreo. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversal de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

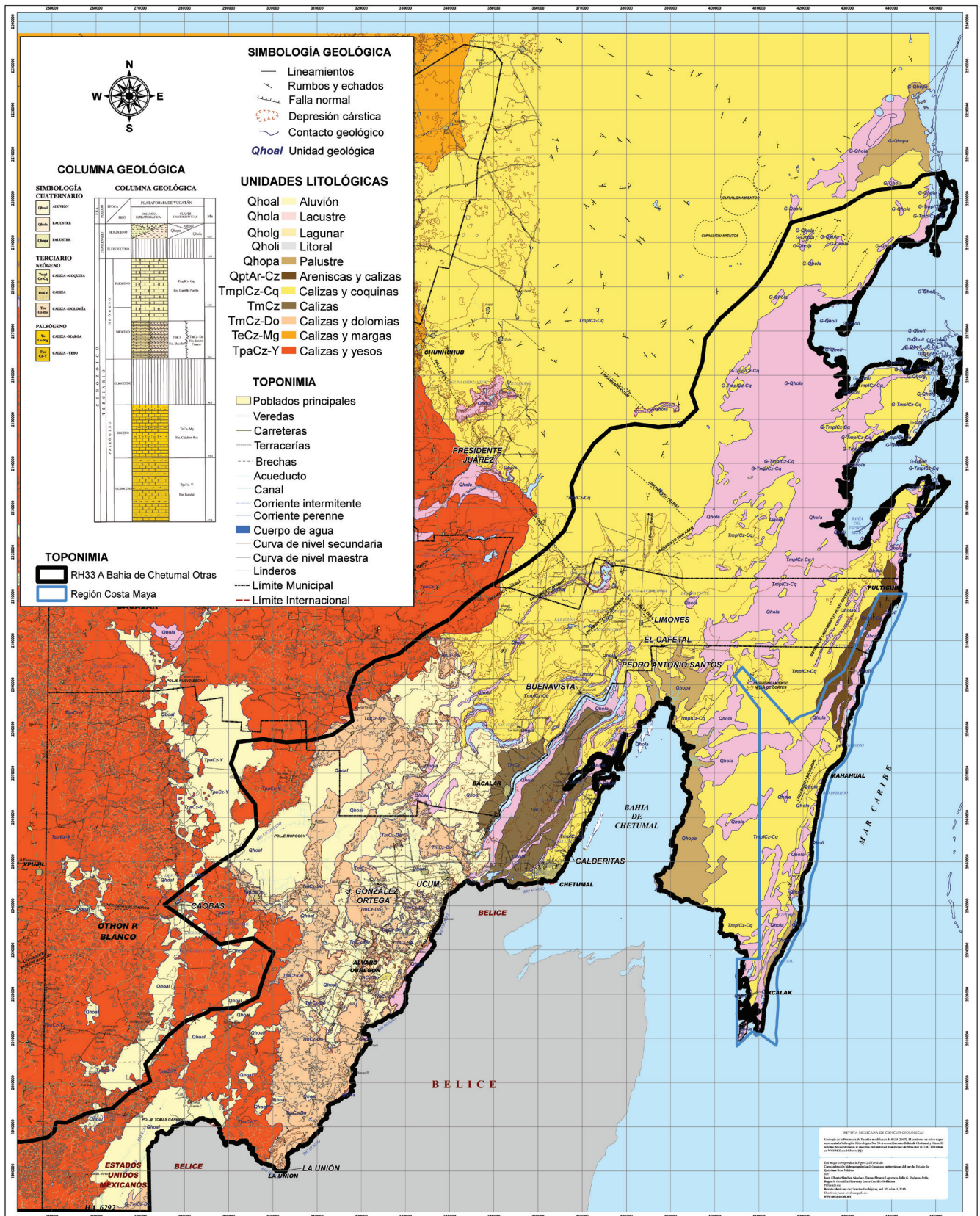


Figura 2. Geología de la Península de Yucatán modificada de SGM (2007). El contorno en color negro representa la Subregión Hidrológica No. 33-A conocida como Bahía de Chetumal y Otras. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversal de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q). Para descargar en mayor tamaño esta figura pulse sobre la siguiente dirección: < http://satori.geociencias.unam.mx/32-1/Sanchez-Sanchez_et al-2015-FIG02.pdf >.

agua dulce desde la porción continental hacia la costa (CNA, 2007). De las diferentes formaciones que componen la estructura geológica regional presentadas por Weidie (1974) destacan con mayor influencia en la región de estudio la Formación Bacalar, la Formación Carrillo Puerto y la Formación Estero Franco. Parte de estas formaciones aflora en el área de Limones-Cafetal (Figura 2), donde se han reportado afloramientos de las calizas microcristalinas de la Formación Carrillo Puerto (SARH, 1989) y hacia la zona del sistema lacustre de Bacalar se reportan calizas poco compactas y margas de la Formación Bacalar (CNA 2007). Asimismo, se ha reportado un lineamiento denominado Chetumal, que presenta una dirección de NE 26° SO y cuya traza presenta una longitud de 40 km, afectando a rocas de la Formación Carrillo Puerto; del mismo modo, se reportan los lineamientos Río Escondido, El Chorro y Narciso Mendoza ubicados en las porciones internas de la zona sur del estado, al oeste del Río Hondo (CCPY, 2012).

De acuerdo con las características físicas y litológicas de las rocas que afloran hacia la porción sur (carretera federal Ucum-J. González Ortega) de la región de estudio (Figura 2), el área se encuentra ubicada en un acuífero de calizas de características variadas y depósitos aluviales, cuya permeabilidad depende de la litología y es mayor en porciones con fracturamiento y karsticidad (permeabilidad secundaria) y menor en los estratos de caliza masiva, por lo que en general presenta cambios laterales y verticales de manera irregular (Perry et al., 2009; IMEXSUR, 2012). Por su parte, la litología reportada hacia la región Costa Maya (Figura 2) se identifica por un comportamiento homogéneo hasta los 12 m, distinguiéndose de manera general una secuencia calcárea-arenosa de baja porosidad y escasa disolución. A partir de los 19 m y hasta los 50 m, la caliza se vuelve más porosa y más permeable debido a que aumenta su grado de disolución, lo que genera conductos preferenciales de circulación de agua subterránea (FONATUR, 2004).

En general, la mayor parte de la región carece de un sistema de drenaje superficial y solo en algunas áreas se ha formado una red hidrológica desintegrada no muy bien definida que desaparece en resumideros o en cuerpos de agua superficial. Gran parte de la precipitación pluvial se infiltra al subsuelo a través de fracturas, oquedades y conductos kársticos en las calizas y evaporitas (CCPY, 2012). Posteriormente es extraída mediante la evapotranspiración y el resto fluye por el subsuelo alcanzando las costas por donde es descargada al mar. Dominan las cuencas alargadas, sin desagüe superficial; además, son comunes las grandes depresiones con bordes escarpados ocupadas por lagunas salobres (Lugo et al., 1992). El espesor saturado de agua dulce decrece desde el interior hacia la costa. Así, en las partes con mayor altitud en donde se han reportado profundidades mayores a los 100 m ((Bauer-Gottwein, et al., 2011) los espesores de agua dulce alcanzan entre 400 m y 800 m (CNA, 2009), mientras que dentro de una distancia de 20 km a partir de la costa el espesor es menor que 30 m (CNA 2006). La recarga del acuífero de esta región tiene lugar durante los meses de mayo a octubre (UQROO, 2002). La recarga por unidad de área es más abundante en las rocas del Paleoceno que en las rocas del Mioceno, porque en aquéllas es menos densa la cobertura vegetal, más delgada la franja arcillosa y mayor el desarrollo kárstico superficial (UQROO 2002; Bauer-Gottwein, et al., 2011). El acuífero se explota por medio de múltiples alumbramientos; los tipos de captación son norias, pozos someros y pozos profundos que se utilizan para diferentes usos como son el público urbano, el agrícola y los servicios, entre otros (JICA, 2004).

En el subsuelo, el agua sigue diferentes trayectorias de flujo controladas por el desarrollo o evolución del karst profundo (Velázquez-Aguirre, 1986). El agua subterránea se presenta tanto en la matriz rocosa como en los conductos de disolución a diferentes profundidades ((Bauer-Gottwein et al., 2011). La dirección del flujo de agua subte-

rránea se presenta de SO-NE en las zonas de mayor altitud y de O-E hacia la costa (Marín et al., 2001; CNA, 2001, 2007, 2009; Perry et al., 2002; JICA, 2004; Charvet 2009; Gondwe et al., 2010). La tendencia es en relación a la mayor densidad de fracturamiento de las formaciones geológicas que lo conforman (Figura 3), moviéndose de las zonas de mayor precipitación hacia la costa, constituyendo hacia esta zona su área de descarga y alimentando a su vez al sistema Bacalar-Río Hondo, la Bahía de Chetumal y Mar Caribe (Velázquez-Aguirre, 1986; CNA, 2007).

En el área de estudio se identifican dos regiones de acuíferos. La primera corresponde a un acuífero compuesto por rocas carbonatadas del período Paleoceno ubicado hacia las porciones con mayor altitud del sur-suroccidente; la segunda, está compuesta por rocas carbonatadas del período del Mioceno-Plioceno distribuida a largo de la costa (JICA, 2004). De acuerdo con Marín et al. (2004), ambas regiones se pueden describir como acuíferos de porosidad triple donde el flujo del agua subterránea circula a través de la matriz, fracturas y un sistema de cavernas interconectadas con orientación NNO-SSE, casi perpendicular a la costa. Las rocas del Paleoceno se caracterizan por la gran heterogeneidad que presenta el medio kárstico, sobretudo en sentido vertical, lo que supone la existencia de pequeñas unidades acuíferas independientes de los acuíferos de extensión regional (CCPY, 2012). Estas facciones son conocidas como acuíferos colgados y se identifican porque su nivel estático está a menor profundidad que el acuífero regional; además, el agua que contienen es por lo general de baja salinidad, lo que indica reciente infiltración (Velázquez-Aguirre, 1986). Gondwe et al. (2010) reportaron elevaciones del nivel estático del agua de 4 hasta 260 m s.n.m., con cambios abruptos en el nivel de agua en algunas localidades (Presidente Juárez; Figura 2) que reaccionan inmediatamente a los eventos de precipitación local. Igualmente se ha reportado la existencia de porciones acuíferas confinadas, en donde se presenta el fenómeno de artesianismo (CNA, 2009). Por otra parte, las rocas del Mioceno-Plioceno corresponden a acuíferos kársticos de tipo freático muy permeables con una transmisividad calculada de 3×10^7 m²/día y gradientes hidráulicos de 5.19×10^{-5} hasta 9.25×10^{-5} (Beddows, 2004). Los niveles de agua subterránea en estos últimos son bajos (<3 ms.n.m.) y de transición ligera (CNA, 2007; Gondwe et al., 2010).

METODOLOGÍA

Un total de 53 muestras de agua subterránea (Tabla 1) fueron colectadas de pozos de abastecimiento uniformemente distribuidos en el área de estudio, los cuales tienen una profundidad promedio de 29 m. La colecta se realizó durante los meses de octubre y noviembre del año 2012, correspondientes a la temporada de lluvias. Cada sitio fue localizado usando un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) marca Magellan Mobile Mapper 6 empleando el sistema de coordenadas UTM (del inglés *Universal Transverse Mercator*). Las muestras se recolectaron después de bombear durante 10 min. Esto se hizo para eliminar el agua subterránea que pudiera estar almacenada en las tuberías. Los contenedores usados para la toma de muestras de cationes y aniones fueron envases de polietileno de 2 litros. Todas las muestras se transportaron y preservaron a una temperatura entre 4 °C y 10 °C hasta la realización de su análisis (NOM-014-SSA1-1993). Las mediciones de temperatura (T), pH y conductividad eléctrica (CE) fueron tomadas en campo inmediatamente después de la colección de las muestras usando un equipo Hydrolab Quanta G. Subsecuentemente, las muestras fueron analizadas en el laboratorio para sus constituyentes químicos: alcalinidad total y alcalinidad a la fenoltaleína por titulación con ácido sulfúrico 0.02 N (NMX-AA-36-SCFI-2001), dureza total y dureza de calcio por titulación con EDTA (NMX-AA-072-SCFI-2001),

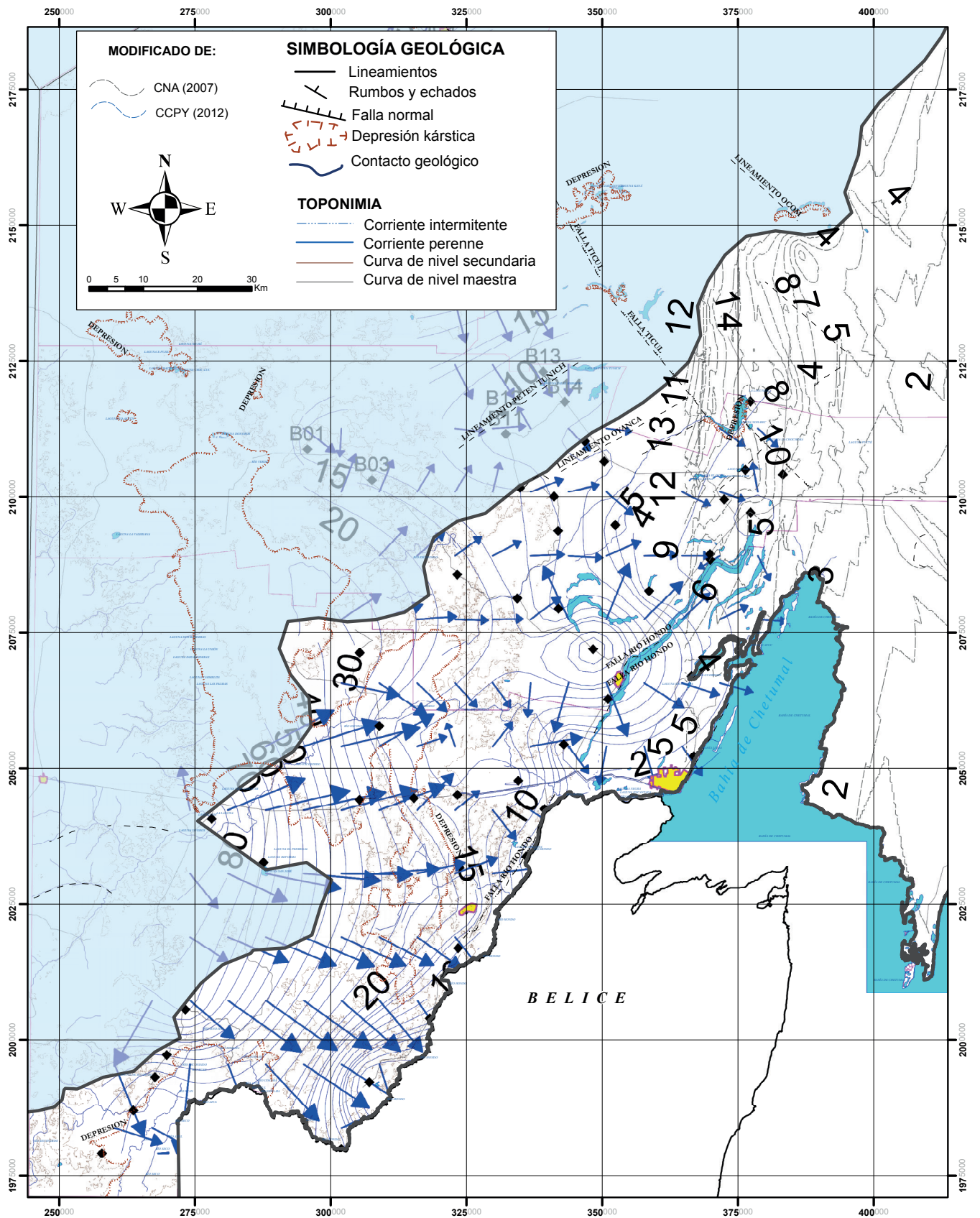


Figura 3. Mapa de flujo de agua subterránea a escala regional, elaborado con información de CCPY (2012) y CNA (2007). Las flechas indican las direcciones de flujo de agua subterránea y el contorno en color gris oscuro representa la Subregión Hidrológica No. 33-A. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversal de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

Tabla 1. Características fisicoquímicas de los aprovechamientos de agua subterránea en la Subregión Hidrológica No. 33-A.

| Clave | Sitio | Coordenadas (UTM) | | pH | T (°C) | CE (µS/cm) | SDT (mg/L) | Na ⁺ (mg/L) | K ⁺ (mg/L) | Mg ²⁺ (mg/L) | Ca ²⁺ (mg/L) | Cl ⁻ (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) | HCO ₃ ⁻ (mg/L) | NO ₃ ⁻ (mg/L) |
|-------|-----------------------------|-------------------|---------|-----|-----------|---------------|---------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---|---|--|
| | | X | Y | | | | | | | | | | | | |
| B02 | Reforma | 334278 | 2080878 | 7.0 | 28.5 | 980.0 | 785.0 | 36.0 | 7.4 | 43.7 | 104.0 | 51.0 | 51.0 | 490.4 | 0.4 |
| B04 | Altos de Sevilla | 323245 | 2085225 | 7.4 | 27.0 | 1127.0 | 716.0 | 41.0 | 3.9 | 35.7 | 101.2 | 108.0 | 35.0 | 418.5 | 0.1 |
| B05 | La Ceiba | 341872 | 2078944 | 6.7 | 26.5 | 1415.0 | 1012.0 | 92.0 | 5.5 | 45.7 | 128.0 | 128.0 | 190.0 | 402.6 | 0.1 |
| B06 | Miguel Hidalgo | 358514 | 2082213 | 7.3 | 26.3 | 967.0 | 684.0 | 69.0 | 4.5 | 31.6 | 84.0 | 69.0 | 100.0 | 329.4 | 0.2 |
| B07 | Maya Balam | 352319 | 2094329 | 7.0 | 28.3 | 1590.0 | 1198.0 | 132.0 | 5.2 | 42.5 | 156.0 | 98.0 | 370.0 | 428.2 | 0.1 |
| B08 | Blanca Flor | 341804 | 2093278 | 7.1 | 27.7 | 877.0 | 632.0 | 15.0 | 2.8 | 46.9 | 82.0 | 35.0 | 20.0 | 446.5 | 0.5 |
| B09 | La Buena Fe | 341043 | 2099540 | 7.0 | 27.3 | 1760.0 | 1168.0 | 151.0 | 4.6 | 57.8 | 120.0 | 197.0 | 150.0 | 540.5 | 0.1 |
| B10 | Nuevo Jerusalén | 334801 | 2101153 | 7.0 | 27.2 | 1600.0 | 956.0 | 112.0 | 5.3 | 47.4 | 86.0 | 98.0 | 110.0 | 477.0 | 0.2 |
| B15 | Los Divorciados | 346735 | 2109676 | 7.1 | 26.3 | 1530.0 | 1040.0 | 98.0 | 5.2 | 65.6 | 116.0 | 137.0 | 240.0 | 438.0 | 0.1 |
| B16 | Manuel Ávila Camacho | 350268 | 2105980 | 6.9 | 27.3 | 2340.0 | 1576.0 | 235.0 | 8.5 | 64.4 | 134.0 | 333.0 | 260.0 | 508.7 | 0.1 |
| B17 | Lázaro Cárdenas | 372332 | 2099014 | 7.1 | 29.2 | 886.0 | 648.0 | 46.0 | 3.5 | 21.4 | 84.0 | 55.0 | 26.0 | 389.2 | 0.1 |
| B18 | Pedro Antonio Santos | 377215 | 2096557 | 7.1 | 26.9 | 5120.0 | 3180.0 | 626.0 | 16.0 | 113.0 | 270.0 | 1117.0 | 570.0 | 359.9 | 0.4 |
| B20 | Carretera Reforma | 348230 | 2071528 | 6.9 | 27.2 | 1780.0 | 1704.0 | 316.0 | 4.7 | 50.5 | 118.0 | 157.0 | 620.0 | 412.4 | 0.2 |
| B22 | Los Limones | 383140 | 2103584 | 6.9 | 27.5 | 2600.0 | 1620.0 | 331.0 | 12.8 | 41.8 | 147.2 | 608.0 | 120.0 | 355.0 | 0.3 |
| B23 | Chacchoben | 376228 | 2104455 | 7.5 | 28.7 | 690.0 | 490.0 | 66.0 | 5.2 | 9.7 | 64.0 | 104.0 | 29.0 | 213.5 | 0.2 |
| B24 | Noh Bec | 377164 | 2117000 | 7.8 | 29.3 | 370.0 | 317.0 | 25.0 | 4.3 | 3.9 | 49.6 | 23.0 | 18.0 | 184.2 | 0.5 |
| B25 | Buenavista | 369752 | 2088991 | 6.9 | 26.4 | 6540.0 | 5030.0 | 1060.0 | 31.5 | 165.2 | 392.0 | 1578.0 | 1400.0 | 384.3 | 0.1 |
| B26 | Bacalar Pozo 2 | 348242 | 2071411 | 6.9 | 27.8 | 1217.0 | 791.1 | 75.8 | 3.0 | 46.2 | 110.5 | 121.3 | 59.5 | 482.6 | 0.7 |
| B27 | David Gustavo Gutiérrez | 320827 | 2090225 | 7.7 | 28.8 | 1321.0 | 858.7 | 127.4 | 3.0 | 41.5 | 95.3 | 203.8 | 9.5 | 527.8 | 2.2 |
| F01 | Chankah Veracruz | 395689 | 2155853 | 7.1 | 25.6 | 1790.0 | 1685.0 | 10.5 | 5.4 | 35.3 | 48.5 | 63.5 | 63.2 | 187.2 | 0.1 |
| F02 | Uh May | 389958 | 2147279 | 7.1 | 26.1 | 1180.0 | 1029.0 | 7.3 | 4.5 | 21.1 | 91.7 | 95.1 | 70.0 | 176.9 | 0.1 |
| F03 | X Zazil Sur | 386584 | 2144606 | 7.1 | 25.7 | 1340.0 | 1267.0 | 10.2 | 4.7 | 32.4 | 77.3 | 106.9 | 58.0 | 195.7 | 0.1 |
| F04 | Andrés Quintana Roo | 384044 | 2119076 | 6.9 | 26.1 | 2530.0 | 2520.0 | 22.2 | 10.9 | 14.3 | 166.4 | 174.6 | 155.0 | 179.8 | 0.1 |
| F05 | Polinkín | 376826 | 2120576 | 7.2 | 26.9 | 1370.0 | 1296.0 | 13.8 | 9.9 | 22.7 | 97.0 | 73.0 | 73.0 | 266.4 | 0.1 |
| F06 | Petcacab | 371272 | 2133494 | 7.1 | 26.5 | 1290.0 | 1278.0 | 99.5 | 9.1 | 40.2 | 88.5 | 229.8 | 86.0 | 268.9 | 0.2 |
| O01 | Dos Aguadas | 273206 | 2005411 | 7.1 | 25.8 | 439.0 | 331.0 | 13.0 | 0.8 | 9.7 | 58.0 | 14.0 | 12.0 | 220.8 | 1.0 |
| O02 | Nuevo Veracruz | 269802 | 1997084 | 7.0 | 27.0 | 1097.0 | 815.0 | 56.0 | 5.7 | 43.7 | 102.0 | 39.0 | 190.0 | 379.4 | 0.7 |
| O03 | Santa Rosa | 267623 | 1993014 | 6.9 | 27.3 | 1118.0 | 784.0 | 102.0 | 6.5 | 23.1 | 74.0 | 82.0 | 40.0 | 431.9 | 0.1 |
| O04 | Lázaro Cárdenas No 2 | 263659 | 1986873 | 6.8 | 27.4 | 980.0 | 756.0 | 72.0 | 1.9 | 24.3 | 98.0 | 59.0 | 33.0 | 470.9 | 0.1 |
| O05 | Jose María Morelos (Cibali) | 257852 | 1979020 | 7.1 | 27.3 | 1173.0 | 724.0 | 40.0 | 4.3 | 47.4 | 98.0 | 86.0 | 62.0 | 412.4 | 0.1 |
| O06 | Sergio Butrón Casas | 334467 | 2047374 | 7.1 | 27.2 | 1680.0 | 1136.0 | 94.0 | 5.5 | 91.1 | 96.0 | 145.0 | 210.0 | 491.7 | 0.1 |
| O07 | Lázaro Cárdenas Segundo | 305314 | 2070885 | 7.0 | 28.4 | 798.0 | 570.0 | 48.0 | 1.9 | 17.0 | 80.0 | 51.0 | 32.0 | 339.2 | 0.1 |
| O08 | Morocoy | 308885 | 2057460 | 7.0 | 28.1 | 952.0 | 668.0 | 57.0 | 3.4 | 30.4 | 92.0 | 86.0 | 140.0 | 281.8 | 0.1 |
| O09 | Francisco Villa | 305258 | 2043924 | 7.0 | 28.2 | 929.0 | 660.0 | 25.0 | 1.9 | 32.8 | 104.0 | 74.0 | 10.0 | 411.1 | 1.1 |
| O10 | Pucté | 323379 | 2016653 | 7.0 | 26.1 | 891.0 | 729.0 | 18.3 | 0.5 | 19.0 | 144.0 | 37.0 | 7.0 | 507.5 | 0.1 |
| O11 | Álvaro Obregón | 324891 | 2023751 | 6.9 | 26.8 | 849.0 | 662.0 | 15.0 | 0.4 | 34.0 | 120.0 | 35.0 | 35.0 | 451.4 | 0.1 |
| O12 | Sacxan | 339287 | 2042225 | 6.8 | 28.3 | 1980.0 | 1841.0 | 171.0 | 2.4 | 68.0 | 300.0 | 65.0 | 950.0 | 389.2 | 0.1 |
| O13 | Xul-Ha | 342832 | 2054036 | 7.0 | 28.1 | 1870.0 | 1707.0 | 179.0 | 3.2 | 70.5 | 248.0 | 139.0 | 750.0 | 402.6 | 1.8 |
| O15 | Calderitas | 366741 | 2051913 | 6.8 | 29.4 | 4290.0 | 3200.0 | 150.0 | 12.0 | 155.5 | 608.0 | 192.0 | 2000.0 | 169.6 | 0.7 |
| O16 | Caobas | 278078 | 2040399 | 6.9 | 29.0 | 2630.0 | 2810.0 | 159.0 | 2.5 | 77.8 | 568.0 | 67.0 | 1750.0 | 261.1 | 0.8 |
| O17 | San José de la Montaña | 287588 | 2032374 | 7.3 | 28.8 | 840.0 | 657.0 | 68.0 | 4.1 | 23.3 | 81.6 | 80.0 | 70.0 | 350.1 | 0.1 |
| O18 | Ñachi Cocom | 315265 | 2044202 | 7.1 | 27.7 | 850.0 | 816.0 | 55.0 | 2.0 | 23.3 | 137.6 | 34.0 | 260.0 | 309.9 | 0.7 |
| O19 | Jesús González Ortega | 323252 | 2044805 | 7.1 | 27.2 | 1590.0 | 1562.0 | 124.0 | 2.8 | 38.9 | 264.0 | 63.0 | 700.0 | 361.1 | 0.8 |
| O20 | Allende | 335901 | 2033446 | 7.2 | 28.1 | 1520.0 | 1510.0 | 97.0 | 2.3 | 55.9 | 244.0 | 45.0 | 650.0 | 389.2 | 0.7 |
| O21 | San Francisco Botas | 318186 | 2003773 | 6.9 | 26.5 | 870.0 | 726.0 | 36.0 | 0.6 | 35.2 | 98.0 | 27.0 | 12.0 | 510.0 | 0.9 |
| O22 | Esteban Baca Calderón | 307054 | 1992081 | 7.4 | 26.9 | 910.0 | 745.0 | 49.0 | 0.7 | 26.7 | 108.0 | 51.0 | 21.0 | 479.5 | 0.8 |
| O23 | La Unión | 301877 | 1979801 | 6.9 | 27.6 | 1890.0 | 2268.0 | 239.0 | 1.6 | 40.1 | 366.0 | 27.0 | 1250.0 | 341.6 | 0.3 |
| O27 | Nicolás Bravo | 296134 | 2042513 | 7.4 | 25.0 | 1050.0 | 780.0 | 6.7 | 4.4 | 19.1 | 76.8 | 60.4 | 70.0 | 166.2 | 0.1 |
| O28 | Tres Garantías | 290295 | 2012636 | 7.5 | 25.7 | 670.0 | 603.0 | 1.4 | 2.4 | 27.2 | 53.9 | 59.6 | 52.0 | 168.4 | 0.1 |
| O31 | Arroyo Negro | 254705 | 1982891 | 7.2 | 26.0 | 528.0 | 400.0 | 17.3 | 2.4 | 2.3 | 55.2 | 24.3 | 4.3 | 196.0 | 4.0 |
| O33 | San Pedro Peralta | 303972 | 2068192 | 7.3 | 29.5 | 819.0 | 635.0 | 58.0 | 1.1 | 30.6 | 91.4 | 92.8 | 28.6 | 407.1 | 1.9 |
| O34 | Ucum | 339182 | 2046276 | 6.8 | 29.0 | 1498.0 | 1178.0 | 48.5 | 4.9 | 55.4 | 217.1 | 77.6 | 395.9 | 497.6 | 4.1 |
| O35 | José Narciso Rovirosa | 317567 | 2003270 | 6.9 | 29.0 | 970.0 | 756.0 | 30.3 | 4.0 | 39.4 | 133.3 | 48.5 | 24.1 | 558.0 | 7.9 |

cloruros por titulación con nitrato de plata (NMX-AA-073-SCFI-2001), sólidos disueltos totales (SDT) por el método gravimétrico (NMX-AA-034-SCFI-2001), nitratos por el método de reducción con cadmio cuperizado (NMX-AA-079-SCFI-2001), sulfatos por el método turbidimétrico (NMX-AA-074-1981), sodio por espectrometría de absorción atómica (NMX-AA-051-SCFI-2001) y potasio por el método turbidimétrico (Hach 8049). Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Análisis de datos geoquímicos

Se utilizó el diagrama de Piper con el objeto de establecer los posibles orígenes del agua subterránea y la identificación de los principales procesos geoquímicos. Este diagrama consiste de dos triángulos equiláteros (en uno de ellos se representan los cationes y en el otro los aniones), complementados con un rombo ubicado entre la porción superior de los triángulos (Appelo y Postma, 2005). Los tres campos tienen escalas de lectura de 100 partes. En el campo triangular izquierdo se grafica el porcentaje de los valores de los tres grupos de cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$) como un punto singular acorde a sus coordenadas trilineares. De forma similar, en el campo triangular derecho, se grafican como un punto singular el grupo de los aniones (HCO_3^{-} , SO_4^{2-} y Cl^{-}). El diamante central es usado para mostrar todo el carácter químico del agua subterránea como un tercer punto, el cual representa la intersección de los puntos graficados en los campos triangular derecho e izquierdo (Güler *et al.*, 2002). El diagrama de Piper fue obtenido a través del paquete informático AquaChem v.12.1.

Análisis estadístico multivariado

El análisis estadístico multivariado es un enfoque cuantitativo e independiente de la clasificación de las aguas subterráneas que permite el agrupamiento de muestras de aguas subterráneas y la creación de correlaciones entre los parámetros químicos (Cloutier *et al.*, 2008). El uso combinado del análisis de componentes principales (ACP) y el análisis de conglomerados (AC) permitió la clasificación de las muestras de agua en distintos grupos con base en sus características hidroquímicas.

Análisis de conglomerados (AC)

El AC es una herramienta estadística ampliamente utilizada para clasificar datos auténticos en grupos de acuerdo con “similitudes” que los hacen más o menos homogéneos y distintos de otros grupos (Subyani y Al-Ahmadi, 2009; Huang *et al.*, 2010). En el estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas, los conglomerados comprenden una agrupación diferente de las técnicas gráficas geoquímicas conven-

cionales tales como los diagramas de Piper, Schoeller y Stiff (Holland y Witthüser, 2009). Esta distinción radica en que para realizar el AC se emplea una combinación aún mayor de parámetros físicos y químicos (por ejemplo, temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, entre otras) para clasificar las muestras de agua (Kim *et al.*, 2003). En el AC, la clasificación de las muestras acorde a sus parámetros se conoce como clasificación *Q-mode* y la clasificación de acuerdo con la interacción entre las variables lleva el nombre de clasificación *R-mode* (Belkhiri *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2010). En el presente estudio se utilizó *Q-mode* para clasificar las muestras de cada sitio en distintos grupos hidroquímicos. Esta clasificación se aplica comúnmente a las investigaciones químicas del agua con el fin de definir grupos de muestras que tengan características físicas y químicas similares debido a que rara vez un solo parámetro será suficiente para distinguir entre diferentes tipos de agua (Güler *et al.*, 2002). Se utilizó además, el método de Ward (1963 en Güler *et al.*, 2002) para analizar las distancias entre los vínculos para todo el grupo de observaciones y la distancia euclidiana cuadrada para determinar la distancia entre las observaciones. Este conjunto de métodos promueve los grupos más distintivos en los que cada miembro del grupo es más similar a su compañero que a cualquier otro fuera del grupo (Güler *et al.*, 2002).

En este trabajo se utilizaron 12 variables hidroquímicas (CE, T, pH, SDT, Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} , K^{+} , HCO_3^{-} , Cl^{-} , SO_4^{2-} , NO_3^{-}) para el AC. Los datos fueron sometidos a la prueba de normalidad ajustándolos a una distribución normal bajo la premisa de que las observaciones son independientes y están idénticamente distribuidas sobre el área y período de muestreo. En la Tabla 2 se compilan los parámetros estadísticos descriptivos para las variables químicas y físicas de las 53 muestras de agua subterránea. Las distribuciones de la mayoría de las variables químicas (en mg/L) presentan un sesgo positivo alto (Tabla 2) y no siguen una distribución normal. De esta manera, todos los parámetros químicos excepto la temperatura (T) y los bicarbonatos que sí presentaron una distribución normal, fueron transformados logarítmicamente. Subsecuentemente, todas las variables fueron normalizadas mediante el cálculo de las puntuaciones normalizadas (*z-score*) de la siguiente manera (Holland y Witthüser, 2009):

$$Z_i = \frac{X_i - \mu}{S} \quad (1)$$

Donde Z_i es la puntuación estándar de la muestra i , X_i es el valor de la muestra, μ es la media y S es la desviación estándar. La normalización escala los datos crudos o transformados logarítmicamente a un rango aproximado de ± 3 desviaciones estándar, centrados alrededor

Tabla 2. Parámetros estadísticos descriptivos de las características fisicoquímicas del agua subterránea de la Subregión Hidrológica No. 33-A durante la temporada de lluvias de 2012.

| Parámetro | Unidad | Núm. de muestras | Mínimo | Máximo | Media | Desviación estándar | Sesgo |
|--------------------|--------|------------------|--------|---------|---------|---------------------|-------|
| CE | uS/cm | 53 | 370.00 | 6540.00 | 1507.38 | 1100.34 | 2.88 |
| T | °C | 53 | 25.00 | 29.50 | 27.40 | 1.13 | 0.07 |
| SDT | mg/L | 53 | 317.00 | 5030.00 | 1198.30 | 858.84 | 2.38 |
| pH | | 53 | 6.71 | 7.84 | 7.08 | 0.23 | 1.16 |
| Ca^{2+} | mg/L | 53 | 48.52 | 608.00 | 145.81 | 116.69 | 2.52 |
| Mg^{2+} | mg/L | 53 | 2.31 | 165.24 | 43.44 | 31.45 | 2.18 |
| Na^{+} | mg/L | 53 | 1.39 | 1060.00 | 110.33 | 169.79 | 4.09 |
| K^{+} | mg/L | 53 | 0.40 | 31.50 | 5.05 | 4.92 | 3.41 |
| Cl^{-} | mg/L | 53 | 14.00 | 1578.00 | 147.65 | 261.30 | 4.38 |
| HCO_3^{-} | mg/L | 53 | 166.24 | 558.00 | 366.39 | 115.58 | -0.38 |
| SO_4^{2-} | mg/L | 53 | 4.27 | 2000.00 | 276.27 | 447.01 | 2.43 |
| NO_3^{-} | mg/L | 53 | 0.05 | 7.93 | 0.67 | 1.33 | 3.91 |

de una media de cero. Por lo tanto, cada variable tuvo el mismo peso en el análisis estadístico.

Análisis de factores (AF)

Uno de los métodos principales del proceso estadístico multivariado es el AF. Esta herramienta se explica como un método estadístico poderoso utilizado para valorar la interrelación entre los distintos parámetros dentro de un gran conjunto de datos y resumir la información en un conjunto más pequeño de factores o componentes para fines de predicción (Davis, 2002 *en* Subyani y Al-Ahmadi, 2009). Dentro del método de AF, el enfoque analítico más utilizado es el ACP, el cual se define como una transformación lineal ortogonal que convierte las variables a un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos en el cual la varianza de mayor tamaño dada por cualquier proyección de las variables es situada en la primera coordenada (primer componente principal), la segunda varianza más grande en la segunda coordenada, y así sucesivamente (Subyani y Al-Ahmadi, 2009). La interpretación geoquímica de los factores determinados proporciona una visión de los procesos dominantes que pueden controlar la distribución de las variables hidrogequímicas (Huang *et al.*, 2005).

En este caso, el número de componentes extraído fue determinado a partir de los datos obtenidos de los análisis de campo y laboratorio. Antes del análisis, los datos se estandarizaron para producir una distribución normal de todas las variables (Jayakumar y Siraz, 1997; Davis, 2002 *en* Subyani y Al-Ahmadi, 2009). Los pesos de las variables originales en cada factor son llamados "cargas" y cada factor está asociado con una variable en particular (Subyani y Al-Ahmadi, 2009). Para facilitar la interpretación de los factores seleccionados se utilizó una rotación ortogonal de los ejes factoriales a través del método Varimax (Belkhiry *et al.*, 2010). Para la determinación de la cantidad de factores, se utilizaron aquéllos que presentaron un valor propio (eigenvalor) mayor que 1 (criterio de Kaiser-Guttman). El eigenvalor de un factor indica la cantidad de dispersión de todas las variables del modelo de factores que está explicado por este factor (Kaiser, 1960). Como la varianza de una variable estandarizada tiene un máximo de 1, entonces un eigenvalor mayor que 1 explica por lo menos dos variables. El análisis estadístico de los datos de todas las muestras hidroquímicas, incluyendo el ACP y el AC, se realizó a través del paquete informático Statgraphics Centurion XV.II.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis estadístico descriptivo

El resumen estadístico de la composición química de las muestras del agua subterránea se presenta en la Tabla 2. Las muestras de agua subterránea del área de estudio estuvieron en un rango de pH de 6.7 – 7.8 con una media de 7.1 y una desviación estándar de 0.23, lo cual indicó que el agua subterránea fue ligeramente alcalina. Los valores de CE oscilaron de 370 a 6540 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con una media de 1507.38 y una desviación estándar de 1100.3. Los valores de SDT oscilaron entre 317 y 5030 mg/L con una media de 1198 y una desviación estándar de 858.8. El patrón que siguieron ambos parámetros permitió corroborar la diversidad en la salinidad de las muestras analizadas estableciendo diferentes niveles de mineralización del agua. La temperatura presentó valores desde 25 a 29.5 °C con una media de 27.4 y una desviación estándar de 1.13. El orden de abundancia de los cationes mayores fue $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ y la de los aniones mayores fue $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. Los valores máximos y mínimos de los cationes y aniones permiten mostrar la heterogeneidad espacial del medio acuífero debido al cambio dinámico entre los diferentes procesos hidrogequímicos presentes en el área de estudio.

Análisis de factores

Los resultados del análisis de factores para los datos hidrogeoquímicos de la temporada de lluvias se resumen en la Tabla 3. Existen reglas para determinar el número de factores adecuado a conservar, por ejemplo, el que se conoce como criterio de Kaiser (Kaiser, 1960), el cual indica que hay que conservar los componentes principales cuyos valores propios son mayores que la unidad o que el porcentaje de varianza total explicada por cada componente o factor (varianza acumulada) sea lo suficientemente alto (Holland y Witthüser, 2009; Belkhiry *et al.*, 2010; Kanade y Gaikwad, 2011). Bajo estos criterios, sólo los factores con valores propios mayores o iguales a 1 fueron aceptados como posibles fuentes de varianza en los datos, con la más alta prioridad atribuida al factor que tiene la suma más grande del eigenvector (Belkhiry *et al.*, 2010). En este estudio se identificaron tres factores que explican el 74.68% de la varianza acumulada, los cuales se asocian a los procesos hidrogeoquímicos dominantes en el área de estudio. De manera general, en términos de la varianza total, la matriz de cargas y el eigenvalor, se observa una amplia diferencia entre el Factor 1 con respecto a los factores 2 y 3. El Factor 1 explica el 47.9% de la varianza en los datos. Las variables presentes en este factor son Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , SDT, CE, Cl^- , las cuales indican mezcla con agua marina y un posible proceso de intercambio iónico como fuente enriquecedora del ion Na^+ . El Factor 2 explica el 16.72% de la varianza de los datos. Las variables que lo incluyen son pH, HCO_3^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} , que indican la disolución de calizas y dolomías en el área de estudio. El Factor 3, con 10.06% de la varianza, está integrado por las variables de T y NO_3^- . Los nitratos podrían provenir del aporte de nutrientes por actividades humanas en rancherías y áreas agrícolas cercanas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los procesos hidrogeoquímicos dominantes en la región de estudio fueron la disolución, la mezcla y el intercambio iónico. Adicionalmente, se tiene el aporte antropogénico. En conjunto, estos procesos determinaron las características del acuífero durante la época de lluvias.

Tipos de agua

El diagrama de Piper fue utilizado en lugar de otros gráficos convencionales, debido a que permite una identificación más precisa de las muestras de agua y de algunos procesos geoquímicos dominantes (Figura 4).

Tabla 3. Análisis de factores con rotación Varimax. Los valores en negritas representan las variables identificadas en cada factor.

| | Factor 1 | Factor 2 | Factor 3 | Comunalidad estimada | Varianza específica |
|------------------------|-------------|--------------|-------------|----------------------|---------------------|
| T | 0.09 | 0.04 | 0.85 | 0.73 | 0.27 |
| Na^+ | 0.63 | 0.42 | 0.42 | 0.75 | 0.25 |
| K^+ | 0.87 | -0.21 | -0.09 | 0.80 | 0.20 |
| SO_4^{2-} | 0.70 | 0.46 | -0.02 | 0.71 | 0.29 |
| NO_3^- | -0.15 | -0.02 | 0.70 | 0.52 | 0.48 |
| SDT | 0.79 | 0.48 | -0.14 | 0.88 | 0.12 |
| CE | 0.84 | 0.47 | -0.09 | 0.95 | 0.05 |
| pH | 0.13 | 0.82 | -0.16 | 0.71 | 0.29 |
| HCO_3^- | -0.15 | 0.60 | 0.46 | 0.59 | 0.41 |
| Cl^- | 0.86 | 0.09 | -0.03 | 0.75 | 0.25 |
| Ca^{2+} | -0.44 | -0.76 | -0.23 | 0.83 | 0.17 |
| Mg^{2+} | 0.57 | 0.66 | 0.08 | 0.76 | 0.24 |
| Eigenvalor | 5.75 | 2.01 | 1.21 | | |
| Varianza (%) | 47.90 | 16.72 | 10.06 | | |
| Varianza acumulada (%) | 47.90 | 64.62 | 74.68 | | |

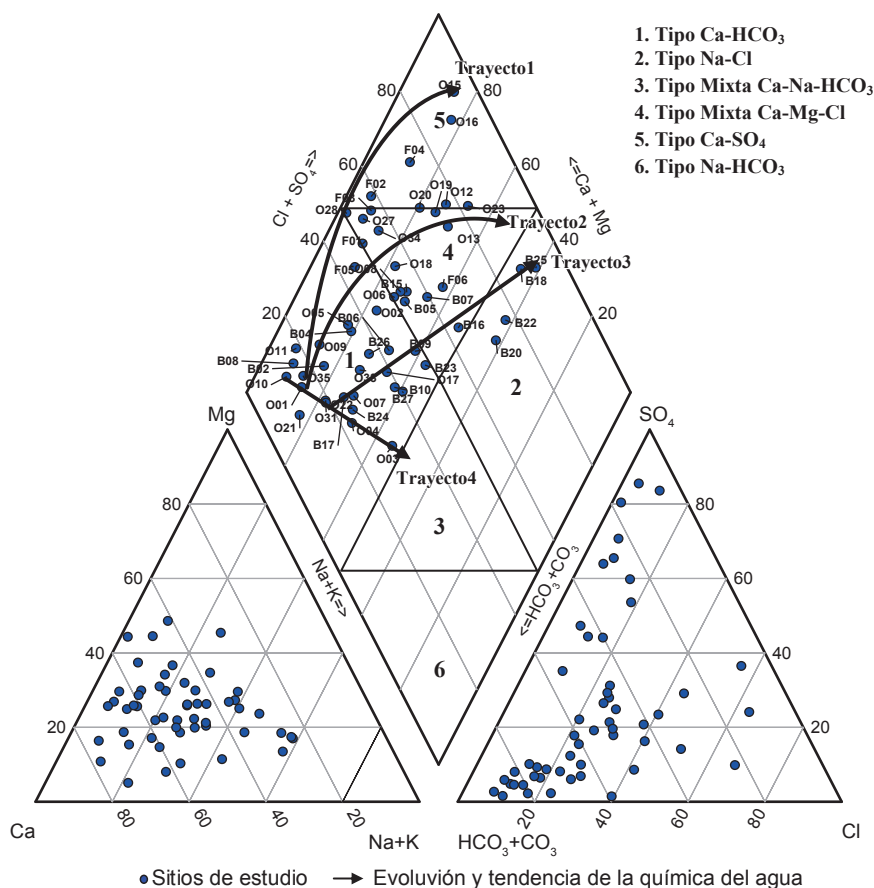


Figura 4. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea. La nomenclatura que acompaña a los puntos en azul dentro del rombo central indican los sitios de muestreo. Las flechas indican la evolución y tendencia de la química del agua. Los números en negritas corresponden a la clasificación por tipos de familias de agua.

En general, se determinaron cuatro tipos de aguas predominantes en el área de estudio. La primera corresponde al tipo cálcica-bicarbonatada (Ca-HCO_3) con el 50.94% del total de las muestras, ubicadas en zonas donde prevalecen las calizas. La segunda fue la mixta cálcica-magnésica clorurada (mixta Ca-Mg-Cl) con el 28.3% de los pozos ubicados en zonas con yesos intercalados con calizas, principalmente. Un tercer tipo de agua se refiere a la cálcica sulfatada (Ca-SO_4) con el 13.21% de las muestras, provenientes de sitios que se encuentran en las zonas internas altas en las que prevalecen los materiales evaporíticos (yeso y anhidrita). Por último, se observó la sódica clorurada (Na-Cl) con el 7.55% de muestras ubicadas en porciones cercanas a las franjas costeras en donde la influencia de aguas saladas marinas es importante.

La anterior clasificación en el diagrama de Piper muestra varias trayectorias de reacción (Figura 4). Primero, la de disolución de carbonatos en zonas altas cercanas a la zona de recarga, que evoluciona a la disolución de yesos (Trayecto 1) y que pasa finalmente a una posible mezcla con aguas marinas (Trayecto 2). La otra reacción (Trayecto 3) va directamente de la disolución de carbonatos (en zonas de recarga) a la mezcla con aguas marinas. Una última reacción (Trayecto 4) que parte de las zonas de recarga a una posible presencia de procesos de intercambio iónico.

Interpretación del análisis de conglomerados

La clasificación de las muestras en grupos se basa en una observación visual del dendrograma (Figura 5). En este trabajo, la línea

fenotípica (línea punteada) se estableció a través del dendrograma a una distancia cuadrada de vinculación de aproximadamente 230 (Figura 5). Por lo tanto, las muestras con una distancia cuadrada de vinculación inferior a 230 fueron agrupadas en la misma categoría. Esta posición de la línea fenotípica permitió una división del dendrograma en siete grupos (1-7) usando 12 variables. Un número mayor o menor de grupos podría definirse moviendo la posición de la línea fenotípica arriba o abajo en el dendrograma (Güler *et al.*, 2002).

La Tabla 4 muestra los valores promedio de cada parámetro para cada grupo identificado en el AC. Esos valores revelan algunas tendencias entre los grupos identificados. La ubicación geográfica de los grupos de muestras definidos en el AC muestra la información más importante que contienen los conjuntos de datos geoquímicos, es decir, la variación en su distribución regional (Reimann *et al.*, 2005 en Holland y Witthüser, 2009). El mapeo de los grupos con base en su similitud química permitió identificar la relación espacial de los procesos hidroquímicos. De manera general, se observa una correspondencia entre los sitios geográficos y los grupos determinados por el AC (Figura 6). Las muestras compuestas por los grupos 2, 4, 5 y 6 son las que mejor agrupamiento geográfico presentaron.

Con base en el mapa de distribución espacial, las muestras compuestas por el Grupo 1 se ubicaron en las zonas internas de mayores elevaciones topográficas con aguas del tipo Ca-HCO_3 en su mayoría, y en menor proporción tipo mixta Ca-Mg-Cl , indicando la disolución de carbonatos que evoluciona a la disolución de yesos. Las aguas

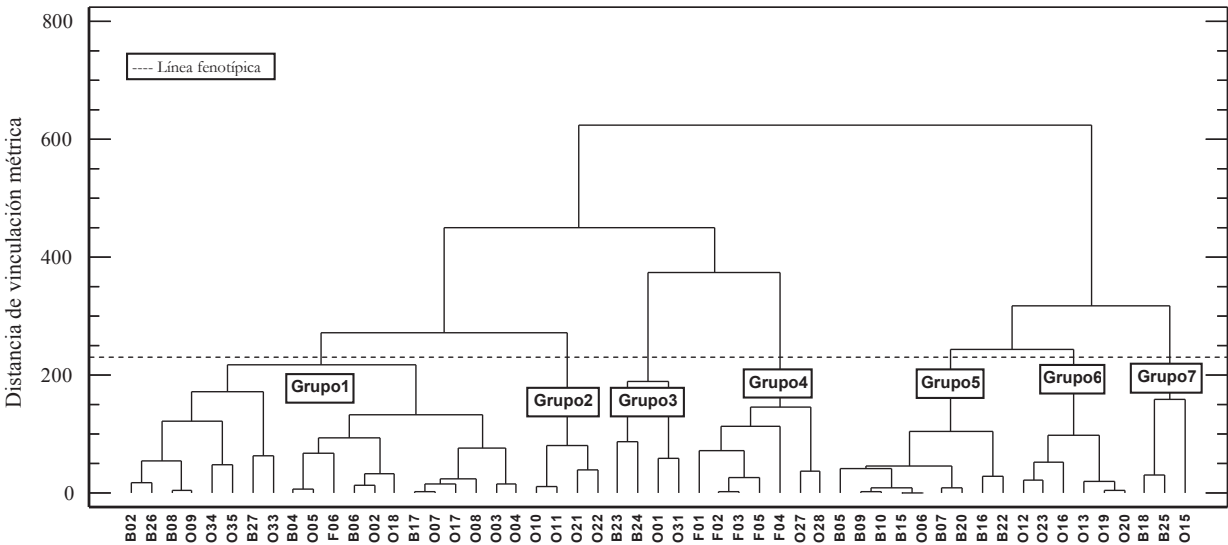


Figura 5. Dendrograma de las 53 muestras hidrogeoquímicas del área de estudio. La línea punteada horizontal define la “línea fenotípica”, la cual fue elegida para seleccionar el número de grupos.

subterráneas Ca-HCO₃ se distinguen por presentar bajas salinidades, con cortos tiempos de recorrido y permanencia en el subsuelo (Custodio, 1983). Las muestras compuestas por el Grupo 2, con agua del tipo Ca-HCO₃, se ubicaron todas a lo largo del sistema de fallas Río Hondo, indicando zonas de recarga. Las muestras pertenecientes al Grupo 3, con agua del tipo Ca-HCO₃, se ubicaron en dos porciones del área de estudio, una porción al nororiente y otra al suroccidente. La característica principal de ambas regiones fue que las muestras de agua presentaron los menores valores de CE, SDT, Mg²⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻ y NO₃⁻. Estos sitios, ubicados a poca distancia de los reportados por Gondwe *et al.* (2010), permiten reforzar el planteamiento que a hacia estas porciones se tiene la presencia de acuíferos colgados donde existe una respuesta más abrupta a los efectos de precipitación y escorrentía, debido al medio altamente transmissivo, que en un acuífero regional. Lo anterior concuerda con los cambios temporales en el nivel estático reportados por Gondwe *et al.* (2010), que para estas zonas fueron en su mayoría de varios metros.

Las muestras del Grupo 4 quedaron ubicadas en un 71.4% hacia el norte del área de estudio y el otro 28.6% en las zonas altas del suroccidente. Los tipos de aguas de este grupo fueron Ca-HCO₃, mixta Ca-Mg-Cl y Ca-SO₄ mostrando claramente la evolución de las aguas subterráneas desde la disolución de carbonatos hacia la disolución de yesos (Trayecto 1). Las muestras del Grupo 5 se conjuntaron en un 87.5% hacia el noroccidente del área de estudio, el otro 12.5% quedó ubicado en la parte centro-oriental. Los tipos de agua de este grupo fueron la mixta Ca-Mg-Cl y la Na-Cl indicando la evolución desde la disolución de carbonatos hacia la mezcla con aguas marinas. Las muestras del Grupo 6 se ubicaron en su mayoría (66.75%) en la porción centro-oriental del área de estudio; el otro 33.25% quedó dividida en dos zonas, una hacia las zonas altas del occidente (porción lacustre) y la otra hacia el sur-suroriente, hacia la desembocadura más al sur del río Hondo. Los tipos de aguas de este grupo son la mixta Ca-Mg-Cl y la Ca-SO₄, indicando la primera la mezcla con aguas marinas y la segunda, la disolución de yesos (localidades de Caobas y La Unión;

Tabla 4. Valores promedio y desviación estándar (en paréntesis) para los grupos determinados por el análisis de conglomerados.

| Grupo | n | pH | T (°C) | CE (µS/cm) | SDT (mg/L) | Na ⁺ (mg/L) | K ⁺ (mg/L) | Mg ²⁺ (mg/L) | Ca ²⁺ (mg/L) | Cl ⁻ (mg/L) | SO ₄ ²⁻ (mg/L) | HCO ₃ ⁻ (mg/L) | NO ₃ ⁻ (mg/L) |
|-------|----|-----------------|------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---|---|--|
| 1 | 20 | 7.09 (±0.22) | 27.97 (±0.93) | 1034.45 (±190.27) | 770.59 (±174.36) | 58.47 (±27.48) | 3.94 (±2.01) | 34.9 (±10.69) | 102.93 (±31.43) | 84.14 (±51.23) | 83.63 (±97.34) | 410.14 (±80.67) | 1.05 (±1.91) |
| 2 | 4 | 7.03 (±0.24) | 26.57 (±0.34) | 880 (±26.34) | 715.5 (±36.63) | 29.58 (±15.9) | 0.55 (±0.13) | 28.75 (±7.5) | 117.5 (±19.82) | 37.5 (±9.98) | 18.75 (±12.28) | 487.09 (±27.52) | 0.46 (±0.46) |
| 3 | 4 | 7.43 (±0.31) | 27.44 (±1.82) | 506.75 (±138.23) | 384.5 (±79.14) | 30.33 (±24.29) | 3.18 (±1.97) | 6.41 (±3.88) | 56.71 (±5.99) | 41.33 (±42.03) | 15.82 (±10.43) | 203.64 (±16.61) | 1.42 (±1.76) |
| 4 | 7 | 7.18 (±0.2) | 25.87 (±0.59) | 1418.57 (±596.5) | 1311.43 (±641.15) | 10.31 (±6.52) | 6.02 (±3.15) | 24.57 (±7.48) | 87.37 (±39.15) | 90.45 (±41.37) | 77.32 (±35.06) | 191.5 (±34.56) | 0.08 (±0.04) |
| 5 | 9 | 6.97 (±0.12) | 27.2 (±0.56) | 1810.56 (±395.64) | 1267.78 (±286.37) | 173.44 (±95.9) | 6.37 (±2.67) | 56.32 (±15.78) | 122.36 (±22.35) | 211.22 (±165.02) | 252.22 (±159.36) | 450.45 (±58.52) | 0.13 (±0.1) |
| 6 | 6 | 6.98 (±0.15) | 28.06 (±0.62) | 1913.33 (±394.9) | 1949.67 (±501.16) | 161.5 (±48.94) | 2.47 (±0.54) | 58.52 (±16.34) | 331.67 (±124.34) | 67.67 (±38.17) | 1008.33 (±424.76) | 357.46 (±52.16) | 0.73 (±0.6) |
| 7 | 3 | 6.91 (±0.17) | 27.54 (±1.6) | 5316.67 (±1137.82) | 3803.33 (±1062.37) | 612 (±455.16) | 19.83 (±10.3) | 144.59 (±27.79) | 423.33 (±171.17) | 962.33 (±705.83) | 1323.33 (±718.08) | 304.59 (±117.56) | 0.38 (±0.31) |

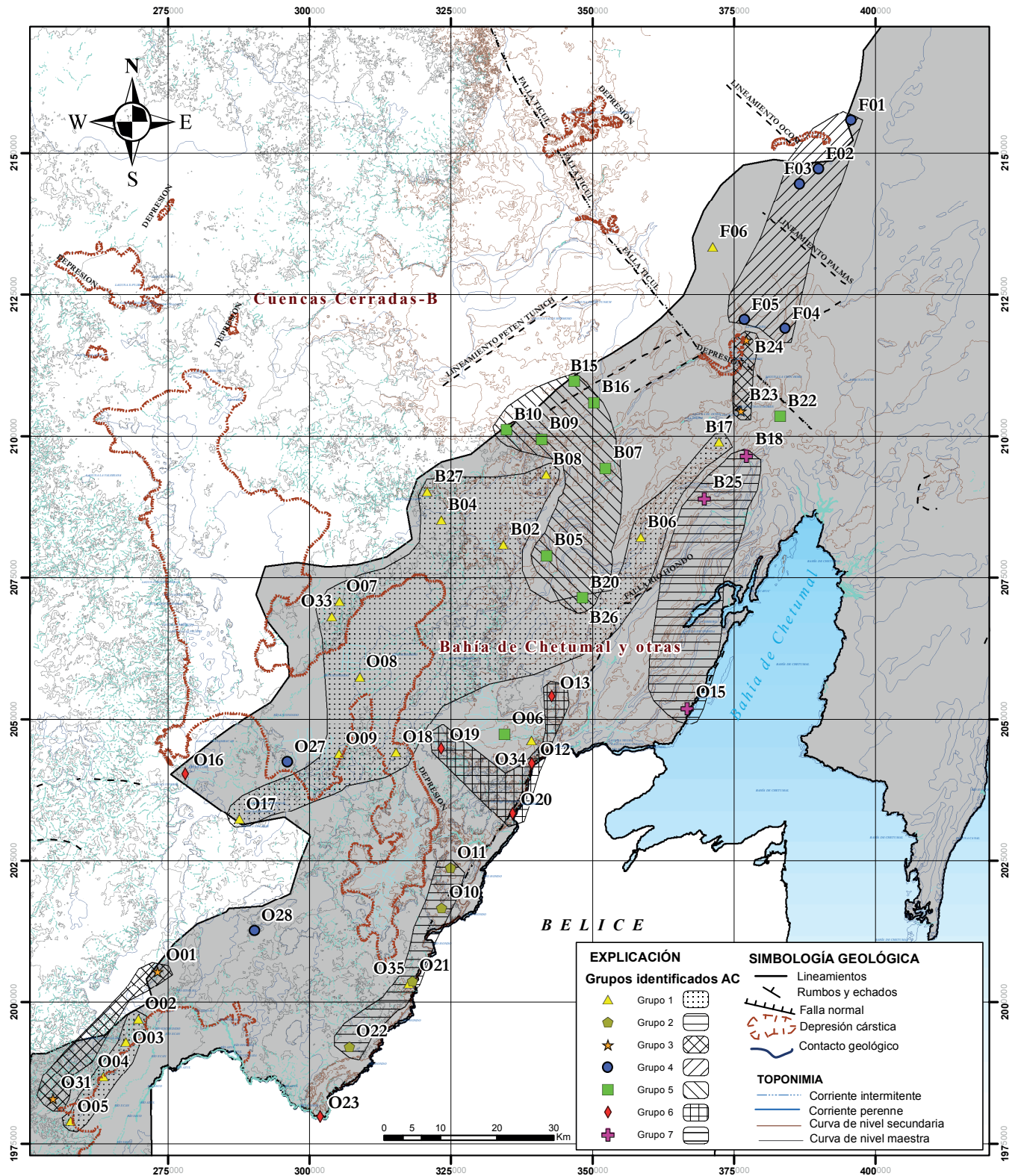


Figura 6. Mapa vista de los grupos identificados a partir del análisis de conglomerados. Modificado de SGM (2007). Se identifican con distintos símbolos los sitios de muestreo pertenecientes a cada uno de los siete grupos reconocidos en el área de estudio y con diferentes achurados se representan las áreas de distribución de esos grupos. El sistema de coordenadas se muestra en Universal Transversal de Mercator (UTM). El Datum en WGS84 Zona 16 Norte (Q).

Figura 2). Por último, las muestras del Grupo 7 se agruparon todas hacia el oriente del área de estudio, cercanas a la franja costera de la bahía de Chetumal en donde la influencia de aguas salobres es importante. Los tipos de aguas subterráneas identificadas para este grupo fueron la Na-Cl y la Ca-SO₄. La Na-Cl corresponde a las localidades de Buenavista y Pedro Antonio Santos (Figura 2) y la Ca-SO₄ a la localidad de Calderitas (Figura 2). Las características principales de este último grupo fueron los valores más altos de CE, SDT, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻ y SO₄²⁻ y el valor más bajo de pH.

De acuerdo a lo anterior, se establece que esta región del sur de Quintana Roo presenta heterogeneidad del acuífero debido a que el agua transita por diferentes rocas: calizas, dolomías y evaporitas. Las primeras generarán aguas cálcicas y magnésicas con valores medios a bajos de dureza total y las últimas generan aguas sulfatadas con valores altos de salinidad. En algunas zonas es posible encontrar aguas sódicas asociadas a procesos de intercambio iónico y a la presencia de materiales arcillosos someros (CCPY, 2012).

CONCLUSIONES

Los procesos más importantes en el acuífero de la zona sur del Estado de Quintana Roo son la disolución de minerales de rocas carbonatadas, dolomías y evaporitas, además de los procesos de intercambio iónico, la presencia de materiales arcillosos someros y los procesos de mezcla de agua dulce y marina. El orden de abundancia de los cationes mayores fue: Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺ y de los aniones HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻.

A través del diagrama de Piper se encontró que las muestras de agua colectadas pueden agruparse en cuatro familias de aguas denominadas del tipo cálcica-bicarbonatada (Ca-HCO₃), del tipo mixta cálcica magnésica clorurada (mixta Ca-Mg-Cl), del tipo cálcica sulfatada (Ca-SO₄) y del tipo sódica clorurada (Na-Cl).

El dendrograma del análisis de conglomerados (*Q-mode*) identificó la existencia de siete grupos hidroquímicos. Estos grupos estadísticos tuvieron patrones espaciales distintos en el área de estudio. De acuerdo con el análisis, las muestras compuestas por los grupos 2, 4, 5 y 6 son las que mejor agrupamiento geográfico presentaron. Cada grupo reveló diferentes patrones hidrogeoquímicos que demuestran la heterogeneidad del acuífero.

Los parámetros asociados a los tres factores obtenidos por medio del análisis de factores indican que los procesos hidrogeoquímicos que controlan la composición de las aguas son la disolución de calizas y dolomías, la mezcla con agua marina y el aporte de nutrientes por actividades humanas.

Por último, los resultados de este estudio demuestran claramente la utilidad del análisis estadístico multivariado en la caracterización hidrogeoquímica de acuíferos kársticos.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de doctorado del primer autor en El Colegio de la Frontera Sur. A los ingenieros Luis Velázquez Aguirre, Raúl Muñoz y Marco Jiménez García por su valioso apoyo y atinadas sugerencias en la revisión de este artículo. Los recursos para esta investigación fueron proporcionados por el Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán a través de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo mediante el contrato CAPA-CCPY-SE-001/2012.

REFERENCIAS

- Abelló-Ugalde, I.A., Lauces, P., Fagundo, J.R., Guérón, J., 1992, Estudio estadístico multivariado sobre datos hidroquímicos de las diferentes litologías de la cuenca del Río San Marcos, *en* Llanos, H.J., Antigüedad, I., Morell, I., Eraso, A. (eds.), I Taller Internacional sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas, Cuba, 6-11 de abril de 1992, Libro de Comunicaciones: Universitat Jaume I de Castelló, 205-214.
- Alcocer-Durand, J., Lugo-Vázquez, A., Sánchez-Reyes, M., Escobar-Briones, E., 1999, Contaminación del agua subterránea en la Península de Yucatán, México: *Imagen Veterinaria*, 1(1), 41-50.
- Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005, *Geochemistry, Groundwater and Pollution*: Rotterdam, Balkema, 2a ed., 672 pp.
- Back, W., Hanshaw, B.B., 1970, Comparison of chemical hydrogeology of the carbonate peninsulas of Florida and Yucatan: *Journal of Hydrology*, 10(4), 330-368.
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B.R.N., Charvet, G., Marín L.E., Rebolledo-Vieyra, M., Merediz-Alonso, G., 2011, Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico: *Hydrogeology Journal*, 19, 507-524.
- Beddows, P.A., Smart, P.L., Whitaker, F.F., Smith, S., 2002, Density stratified groundwater circulation on the Caribbean Coast of Yucatan peninsula, Mexico, *en* Martin, J.B., Wicks, C.M., Sasowsky, I.D. (eds.), *Hydrogeology and Biology of Post-Paleozoic Carbonate Aquifers*: Karst Waters Institute, Special Publication 7, 129-134.
- Beddows, P.A., 2004, *Groundwater Hydrology of a Coastal Conduit Carbonate Aquifer: Caribbean Coast of the Yucatán Peninsula*, México: Reino Unido, University of Bristol, School of Geographical Sciences, Ph. D. Thesis, 303 pp.
- Belkhir, L., Boudoukha, A., Mouni, L., Baouz, T., 2010, Multivariate statistical characterization of groundwater quality in Ain Azel plain, Algeria: *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4(8), 526-534.
- Butterlin, J., Bonet, F., 1960, Información básica para la interpretación geohidrológica de la Península de Yucatán: México, D.F., Secretaría de Recursos Hidráulicos, 28 pp.
- CCPY (Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán), 2012, Evaluación de la calidad del agua subterránea en varias localidades de los Municipios de Othón P. Blanco, Bacalar y José María Morelos del Estado de Quintana Roo: Gerencia Regional Península de Yucatán, Informe Final, 122 pp.
- Charvet, G., 2009, Exploration, modeling and management of groundwater resources in northern Quintana Roo, Mexico: Denmark, Technical University of Denmark, MSc Thesis, 94 pp + apéndices.
- Cloutier, V., Lefebvre R., Therrien R., Martine M.M., 2008, Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system: *Journal of Hydrology*, 353, 294-313.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 2001, Actualización geohidrológica del acuífero de la zona norte del Estado de Quintana Roo, (poligonal comprendida entre Cancún, Nuevo Xcan, Coba y Tulum): Gerencia Regional Península de Yucatán, Subgerencia Técnica, Informe técnico.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 2006, Ampliación de la red piezométrica en la región costera norte del Estado de Quintana Roo, segunda parte: Gerencia Regional Península de Yucatán, Subgerencia técnica, Informe Final, 256 pp.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 2007, Reactivación de la red piezométrica de la zona Costa Maya, Quintana Roo: Gerencia Regional Península de Yucatán, Subgerencia técnica, Informe final, 142 pp.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 2009, Establecimiento de una red piezométrica de la zona cañera de Álvaro Obregón, municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo: Gerencia Regional Península de Yucatán, Subgerencia técnica, Informe final, 68 pp.
- Cuevas E., Pacheco J., Cabrera A., Coronado V., Vázquez J., Comas M., 2001, Calidad química y bacteriológica del agua subterránea en el principal campo de pozos para el abastecimiento de Mérida, Yucatán, México: *Revista Ingeniería*, 5(3), 10 pp.
- Custodio E., 1983, Hidrogeoquímica, *en* Custodio E., Llamas M. (eds.), *Hidrología Subterránea*, Tomo 1: Barcelona, España, Omega S.A., 2a edición, 1005-1091.
- Escolero, O.A., Marín, L.E., Steinich, B., Pacheco, A.J., Cabrera, S.A., Alcocer, J., 2002, Development of a protection strategy of karst limestone aquifers:

- the Mérida Yucatan, Mexico case study: Water Resources Management, 16, 351-367.
- FONATUR (Fondo Nacional de Fomento al Turismo), 2004, Estudio geohidrológico para conocer la disponibilidad y calidad de las aguas subterráneas para el suministro de agua potable al Proyecto Turístico Integral Costa Maya, ubicado en el Municipio Othon P. Blanco, Estado de Quintana Roo: Delegación Federal en Quintana Roo, Subgerencia Técnica Regional, 53 pp.
- Gondwe, B.N., Hong, S.H., Wdowski, S., Bauer-Gottwein P., 2010, Hydrologic dynamics of the ground-water-dependent Sian Ka'an wetlands, Mexico, derived from InSAR and SAR data: Wetlands, 30(1), 1-13.
- Grael-Castro, E., Gálvez-Hita, L., 2002, Deterioro de la calidad del agua subterránea por el desarrollo poblacional: Cancún, Q. Roo: Ingeniería, 6(3), 41-43.
- Güler, C., Thyne, G.D., McCray, J.E., Turner, A.K., 2002, Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data: Hydrogeology Journal, 10, 455-474.
- Matthes, L., 2008, Analysis and evaluation of ground and surface water quality and groundwater flow in the northern aquifer of Quintana Roo, Mexico en Gutiérrez-Aguirre, M.A., Cervantes-Martínez, A. (comp.), Estudio geohidrológico del norte de Quintana Roo: México, Universidad de Quintana Roo y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 59-99.
- Hausman, H., 2009, Responsible development in Tulum, Mexico: Considering water quality and subaqueous cave locations: Durham, North Carolina, Nicholas School of the Environment of Duke University, Tesis de Maestría, 55 pp.
- Holland, M., Witthüser, K.T., 2009, Geochemical characterization of karst groundwater in the Cradle of Humankind World Heritage Site, South Africa: Environmental Geology, 57, 513-524.
- Huang, Y.C., Wu, T.N., Cheng, P.J., 2005, Characterization of groundwater quality by multivariate statistical analysis: an example from Kaohsiung County, Taiwan, en Mathew K., Nhapi I. (eds.), Water and Wastewater Management for Developing Countries, WAMDEC 2004: London, IWA Publishing, Water and Environment Management Series, 39-49.
- Huang, Y.C., Yang, C.P., Lee, Y.C., Tang, P.K., Hsu, W.M., Wu, T.N., 2010, Variation of groundwater quality in seawater intrusion area using cluster and multivariate factor analysis, en The 6th International Conference on Natural Computation (ICNC), Yantai, Shandong: Taiwan, IEEE, 6, 3021-3025.
- Isphording, W.C., 1975, The physical geology of Yucatan: Transactions Gulf Coast Association of Geological Societies, 25, 231-262.
- Jayakumar, R., Siraz L., 1997, Factor analysis in hydrogeochemistry of coastal aquifers – a preliminary study: Environmental Geology, 31(3/4), 174-177.
- JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón), 2004, Estudio de manejo de saneamiento ambiental en la costa del Estado de Quintana Roo en los Estados Unidos Mexicanos: Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) y Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Informe final, 370 pp.
- Kaiser, H.F., 1960, The application of electronic computers to factor analysis: Educational and Psychological Measurement, 20, 141-151.
- Kanade, S.B., Gaikwad, V.B., 2011, A Multivariate Statistical Analysis of Bore Well Chemistry Data-Nashik and Niphad Taluka of Maharashtra, India: Universal Journal of Environmental Research and Technology, 1(2), 193-202.
- Kim, J.H., Yum, B.W., Kim, R.H., Koh D.C., Cheong T.J., Lee J., Chang H.W., 2003, Application of cluster analysis for the hydrogeochemical factors of saline groundwater in Kimje, Korea: Geosciences Journal, 7(4), 313-322.
- Kumar, M., Kumari, K., Kumar Singh, U., Ramanathan, A.L., 2009, Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Muksar, Punjab: conventional graphical and multivariate statistical approach: Environmental Geology, 57 (4), 873-884.
- López-Ramos, E., 1973, Estudio Geológico de la Península de Yucatán: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 25(1-3), p. 25-72.
- Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada, J.F., Espinosa-Pereña, R., 1992, Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 10(2), 143-150.
- Marín, L.E., Perry, E.C., Essaid, H.I., Steinich, B., 2001, Hydrogeological investigations and numerical simulation of groundwater flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico, en Ouazar, D., Cheng, A.H.D. (eds.), Proceedings of the First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers: Monitoring, Modeling, and Management SWICA-M³, abril 2001, Essaouira, Morocco: <<http://www.olemiss.edu/sciencenet/saltnet/swica1/swica1.html>>.
- Marín, L.E., Perry, E.C., Essaid, H., Steinich, B., 2004, Hydrogeological investigations and numerical simulation of groundwater flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico, en Cheng A.H.D., Ouazar D. (eds) Coastal aquifer management: monitoring, modeling and case studies: Boca Raton, FL., Lewis Publishers, CRC press, 257-277.
- Moore, Y.H., Stoessell, R.K., Easley, D.H., 1992, Fresh-water/sea-water relationship within a ground-water flow system, northeastern coast of the Yucatan Peninsula: Groundwater, 30(3), 343-350.
- Moral, F., Cruz-Sanjulián, J.J., Olías, M., 2008, Geochemical evolution of groundwater in the carbonate aquifers of Sierra de Segura (Betic Cordillera, southern Spain): Journal of Hydrology, 360, 281-296.
- NMX-AA-074-1981, 1981, Análisis de agua - Determinación del ión sulfato: México, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Dirección General de Normas, 10 pp.
- NMX-AA-034-SCFI-2001, 2001, Análisis de agua - Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba: México, Secretaría de Economía, Dirección General de Normas, 22 pp.
- NMX-AA-036-SCFI-2001, 2001, Análisis de agua- Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba: Secretaría de Economía, Dirección General de Normas, 22 pp.
- NMX-AA-051-SCFI-2001, 2001, Análisis de agua - Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba: Secretaría de Economía, Dirección General de Normas, 52 pp.
- NMX-AA-072-SCFI-2001, 2001, Análisis de agua - Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba: México, Secretaría de Economía, Dirección General de Normas, 19 pp.
- NMX-AA-073-SCFI-2001, 2001, Análisis de agua - Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba: México, Secretaría de Economía, Dirección General de Normas, 18 pp.
- NMX-AA-079-SCFI-2001, 2001, Análisis de agua - Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba: México, Secretaría de Economía, Dirección General de Normas, 27 pp.
- NOM-014-SSA1-1993, 1994, Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados: México, Secretaría de Salud, 6 pp.
- Pernía-Llera, J.M., Cuesta-Peiro, F., Ballesteros-Navarro, B., Barba-Romero Muñoz, J., García-Sánchez, E., 1993, Las aguas subterráneas: Importancia y perspectivas: Madrid, Instituto Geológico y Minero de España, <http://aguas.igme.es/igme/publica/libros3_RHS/libro34/lib34.htm>, consulta: 16 de agosto de 2013.
- Perry, E., Velazquez-Oliman, G., Marín, L., 2002, The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico: International Geology Review, 44, 191-221.
- Perry, E., Paytan, A., Pedersen, B., Velazquez-Oliman, G., 2009, Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on stratigraphy and hydrogeology: Journal of Hydrology, 367, 27-40.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), 1989, Sinopsis geohidrológica del Estado de Quintana Roo: México, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica, Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos, 43 pp.
- Schmitter-Soto, J.J., Comín, F.A., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L.E., Steinich, B., 2002, Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico): Hydrobiologia, 467, 215-228.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2007, Carta Geológica de México, escala 1:2,000,000: Pachuca, México, Servicio Geológico Mexicano, 6ta ed, 1 mapa.

- Suárez-Morales, E., Rivera-Arriaga, E., 2000, The aquatic fauna of karstic environment in the Yucatan Peninsula, Mexico: an updated overview, *en* Gutiérrez-Aguirre M., 2007, Biología y calidad del agua del acuífero norte de Quintana Roo: Teoría y Praxis, 135-141.
- Subyani, A.M., Al-Ahmadi, M.E., 2009, Multivariate Statistical Analysis of Groundwater Quality in Wadi Ranyah, Saudi Arabia: Journal of King Abdulaziz University Earth Sciences, 21 (2), 29-46.
- UQROO (Universidad de Quintana Roo) 2002, Entorno Geográfico: Los Entornos: Chetumal, Q. Roo: México, Universidad de Quintana Roo, Publicación Especial, 90 pp.
- Velázquez-Aguirre, L., 1986, Aplicación de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la Península de Yucatán: Ingeniería Hidráulica en México, 1(3): 21-29.
- Weidie, A.E., 1974, Note on the regional geology of Yucatán Peninsula, *en* Weidie A.E. (ed.), Field Seminar On Water and Carbonate Rocks of the Yucatan Peninsula, Mexico, Field trip 2, 1974 Annual Meeting, Miami, of the Geological Society of America: New Orleans Geological Society, 2-9.
- Manuscrito recibido: Febrero 11, 2014
Manuscrito corregido recibido: Noviembre 23, 2014
Manuscrito aceptado: Noviembre 27, 2014