






Caracterización hidroquímica y geofísica de una descarga de agua subterránea en Quintana Roo, México

Hydrochemical and geophysical characterization of a submerged groundwater discharge in Quintana Roo, Mexico

Eduardo Cejudo^{1*} ,
 Gilberto Acosta-González¹ ,
 Daniela Ortega-Camacho¹ ,
 Jorge Adrián Perera-Burgos¹ ,
 Rosa María Leal-Bautista¹ 

¹CONACYT- Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., Unidad de Ciencias del Agua. Calle 8, No. 39, Mz 29, SM 64. CP. 77524. Cancún, Quintana Roo, México

*Autor de correspondencia:
 eduardo.cejudo@cicy.mx

Artículo científico

Recibido: 01 de diciembre 2021

Aceptado: 03 de junio 2022

Como citar: Cejudo E, Acosta-González G, Ortega-Camacho D, Perera-Burgos JA, Leal-Bautista RM (2022) Caracterización hidroquímica y geofísica de una descarga de agua subterránea en Quintana Roo, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 9(2): e3211. DOI: 10.19136/era.a9n2.3211

RESUMEN. Las descargas de agua subterránea (DAS) aportan información para entender la hidrogeología local dentro de una región. El objetivo de este estudio fue describir de manera integral una DAS en la zona costera de Quintana Roo para contribuir al conocimiento del acuífero kárstico costero en Quintana Roo. La DAS es una cavidad ovalada con un área aproximada de 0.0507 m² donde mensualmente se cuantificaron elementos mayores, silicatos, metales e isótopos estables del agua ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$). Se calculó el aporte de la precipitación pluvial mensual acumulada (Q_p) en el caudal de la descarga, se realizaron tomografías de resistividad eléctrica para identificar zonas saturadas y zonas de flujo. En lo general el Na, K, Ca, Mg y Cl tendieron a disminuir cuando Q_p aumenta. SiO_2 , ORP y salinidad no tuvieron una relación evidente con Q_p durante el tiempo de medición. El agua es de tipo clorurada sódico potásica; domina el aporte de agua subterránea, el agua de mar contribuyó entre 2 y 16% del caudal. El mayor aporte del agua de mar se observó cuando el caudal de la DAS es bajo. La contribución de Q_p fue de entre 1 y 15% y no se observó de manera inmediata. La geofísica apunta a un lente de agua dulce libre de aproximadamente 2.5 m de espesor y zonas de recarga, así como la existencia de pequeños canales de conducción por donde fluye el agua subterránea. Los resultados capturan eventos locales y regionales de recarga del acuífero.

Palabras clave: Agua subterránea, flujo, isótopos, karst, mezcla.

ABSTRACT. Groundwater discharges (GD) provide information for understanding the local hydrogeology of a region. This study comprehensively describes a GD in the coast of Quintana Roo, quantifying the volumetric discharge and describing the hydrochemistry and geophysics of the site in order to contribute to the knowledge of the coastal karst aquifer in Quintana Roo. The GD described is an oval opening with an approximate area of 0.0507 m² where major elements, silicates, metals and stable isotopes of water ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) were quantified monthly. The contribution of the accumulated monthly rainfall (Q_p) in the discharge flow was calculated; electrical resistivity tomography was performed to identify saturated zones and flow zones. In general, Na, K, Ca, Mg, and Cl tend to decrease as Q_p increases. SiO_2 , ORP and salinity do not show clear relations with changes in Q_p , only in some sampling events there was a positive relationship, while the rest of the time is negative or null. The water is sodium-potassium-chloride type. The contribution of groundwater dominates, seawater contributes between 2 and 16% of the flow. The greatest contribution of seawater is observed when the flow of the GD is low. The contribution of Q_p is between 1 and 15% and is not measured immediately. Geophysics survey suggest the existence of a lens of free fresh water approximately 2.5 m thick and recharge zones, as well as the existence of small dissolution channels where groundwater flows. The results capture local and regional aquifer recharge events.

Key words: Groundwater, flow, isotopes, karst, mix.

INTRODUCCIÓN

En la costa oriental de la península de Yucatán, en Quintana Roo, el acuífero kárstico costero es no confinado o freático, donde la zona no saturada está entre la superficie del terreno y el nivel freático, por lo cual el agua subterránea se encuentra a presión atmosférica (Perez-Flores *et al.* 2019), lo cual, aunado al relieve (con incrementos de elevaciones de oeste a este y de norte a sur) y los patrones de precipitación, influyen en la recarga y descarga del agua subterránea en diversas partes del paisaje, presentando frecuentemente manifestaciones de flujos locales (Fleury *et al.* 2007). Las descargas de agua subterránea (DAS) pueden ser completamente de agua subterránea, agua salina recirculada o una mezcla de ambas (Bakti 2018). Las DAS pueden ser submarinas o terrestres (Burnett *et al.* 2006); estas últimas se pueden presentar en depresiones del terreno (Fragoso-Servón *et al.* 2014) o como conductos de disolución o fracturas (Bauer-Gottwein *et al.* 2011). Las DAS son importantes para los ecosistemas costeros por el aporte de sustancias disueltas, los efectos en la productividad y biomasa locales y en la composición y zonificación de las especies de organismos vegetales y animales (Bakti 2018). Se conoce que en la zona costera las fracturas controlan gran parte del flujo local (Zamora-Luria *et al.*, 2020) y la descarga volumétrica es variable (Null *et al.* 2014). Para el estudio de las DAS, se sugieren sitios donde se conoce la variabilidad temporal y espacial de la descarga, se tiene conocimiento básico de la hidrogeología y geología local, se cuenta con información climática local, tienen fácil acceso, hay proximidad a instalaciones de laboratorio y, probablemente lo más importante, es un área cerrada o semi-cerrada, protegida de corrientes de marea, que permite la toma de muestras y mediciones con mayor facilidad (Burnett *et al.* 2006).

El estudio de las DAS tiene un espacio de oportunidad para evaluarse de una manera extensiva y exhaustiva. De acuerdo a la recopilación de la información, pocas investigaciones han realizado una caracterización, ya que derivan la descarga volumétrica a partir del caudal y realizan las medi-

ciones de la superficie de la descarga (Charideh y Rahman 2007, Sánchez y Pinto *et al.* 2015). Otros trabajos han estimado la descarga volumétrica por unidad de longitud en porciones de la zona costera con estimados entre 0.5 y $8 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Hanshaw y Back 1980, Smith *et al.* 1999, Hernández-Terrones *et al.* 2011). La mayor parte de los trabajos publicados reportan parámetros físico-químicos (salinidad, conductividad eléctrica, pH y temperatura) como parte de la descripción del agua subterránea (Mutchler *et al.* 2007, Crook *et al.* 2012); no obstante, la importancia de las DAS como fuentes puntuales de nutrientes o contaminantes en la zona costera ha sido poco evaluada. Esta investigación es relevante dada la dificultad de identificar, medir y entender el funcionamiento de acuíferos kársticos costeros como una contribución al estudio hidrogeológico detallado de la zona costera de Quintana Roo. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue describir de forma integral una descarga de agua subterránea (DAS) en la zona costera del municipio de Solidaridad, Quintana Roo, cuantificando la descarga volumétrica, detallando la hidroquímica y la geofísica del sitio. La información generada será de ayuda para mejorar las estimaciones de recarga y descarga de agua subterránea en el acuífero kárstico costero de Quintana Roo, así como ampliar el conocimiento del efecto local de la descarga en la zona costera del Caribe mexicano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio de estudio

El sitio de estudio está ubicado en la playa pública Playa Esmeralda, ubicada en el extremo norte de la ciudad de Playa del Carmen (Solidaridad, Quintana Roo; $20.648507^\circ \text{ N}$, $-87.050624^\circ \text{ O}$); en la provincia Fisiográfica XI península de Yucatán, sub-provincia kárstica yucateca. La conformación geológica está compuesta por rocas sedimentarias de la formación Carrillo-Puerto del Terciario (TmplCz-Cq). Esta unidad es una secuencia de coquinas y calizas con un espesor promedio de 25 m afectadas por karsticidad (SGM 2016). La DAS se encuentra aproximadamente a 30 metros de la costa dentro de

una pequeña ensenada con boca y barra de arena que se modifica con el flujo de la descarga y los eventos meteorológicos como el viento durante los frentes fríos. El agua emerge a través de una grieta en la roca caliza que mantiene permanentemente una poza de agua. La cavidad es de forma ovalada con un área aproximada de 0.0507 m^2 ($r_a = 0.095 \text{ m}$, $r_b = 0.17 \text{ m}$). El sitio de estudio cumple con la mayor parte de las características deseables de sitios insignia enunciados por la iniciativa IAEA/UNESCO SGD (Burnett et al. 2006).

Muestreo y análisis de agua

El muestreo del agua se realizó cada mes de septiembre de 2019 a octubre de 2020. La velocidad de flujo del agua o caudal se midió con un caudalímetro modelo 2030R de General Oceanics en conteos por segundo, los cuales se convierten a velocidad (cm s^{-1}) usando la constante del rotor proporcionada para el medidor de flujo (umbral de medición del rotor de 10 cm s^{-1}). Por último, considerando el área superficial estimada y asumiendo que fluye un volumen igual en esta área, se obtuvo un caudal expresado en L s^{-1} . Los datos de la precipitación pluvial mensual acumulada se obtuvo de la estación 23163 de CONAGUA de los años 2019 y 2020.

En el sitio se midió la temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$), conductividad eléctrica (CE en mS cm^{-1}), salinidad (UPS), pH y potencial de óxido reducción (ORP en mV) con un medidor multiparamétrico (Hanna HI98195) previamente calibrado. Las muestras de agua se colectaron para los análisis de óxido de silicio (SiO_2), iones (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+}), metales (Al, Cu, Fe, Zn) e isótopos estables del agua ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$). El SiO_2 se cuantificó con el método de molibdosilicato (SECOFI 1982); los iones mediante cromatografía iónica con un Cromatógrafo Iónico 822 IC (Metrohm) con límite de detección de 0.1 mg L^{-1} , todas las concentraciones se expresaron como mg L^{-1} y meq L^{-1} . Los metales se cuantificaron con un ICP-OES Perkin Elmer Optima 8000 con intervalos de cuantificación de 0.01 a 40 mg L^{-1} para Fe y Zn y de 0.005 a 20 mg L^{-1} para Al y Cu, mediante curvas de calibración con siete puntos con un estándar multielemento TraceCERT. Los

análisis de isótopos estables del agua se realizaron en el Laboratorio de Isótopos Ambientales de la Universidad de Waterloo (UW-EIL, Canadá) con un analizador de isótopos de agua líquida (LWIA) Los Gatos Research modelo T-LWIA-45-EP con precisiones de $\delta^2\text{H} = \pm 0.3 \text{ ‰}$ y $\delta^{18}\text{O} = \pm 0.1 \text{ ‰}$. La composición isotópica del agua subterránea previa a los eventos de lluvia (δ_{ap}) fue obtenida de pozos del municipio de Tulum localizados entre 1.5 y 3 km de la costa (2235289.111 N, 452506.753 E; 2267991.279 N, 474392.470 E, UTM Q16).

Hidroquímica y modelos de mezcla

El tipo de agua se obtuvo por medio de un diagrama de Piper (software Diagrammes, Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon). La contribución de agua de mar (f_{mar}) respecto al agua subterránea en la DAS se estimó mediante un cálculo de mezcla conservativa, asumiendo que el agua de mar es la única fuente de cloruros.

$$f_{mar} = m_{\text{Cl}^- \text{ muestra}} \div 565$$

Donde: $m_{\text{Cl}^- \text{ muestra}}$, es la concentración ($\text{mmol Cl}^- \text{ L}^{-1}$) de cloruros en la muestra; y 565 es la concentración de cloruros en el agua de mar (Appelo y Postma 2005). Adicionalmente, se implementó un modelo de mezcla de dos componentes con los isótopos estables al agua para conocer la contribución relativa de la precipitación pluvial al caudal de la DAS (Lee y Krothe 2001), utilizando la siguiente expresión:

$$Q_p = Q_{p_{das}} \frac{\delta_{das} - \delta_{ap}}{\delta_p - \delta_{ap}}$$

Donde: Q_p es la precipitación pluvial mensual acumulada, $Q_{p_{das}}$ es la precipitación pluvial incorporada al caudal de la DAS, δ_{das} es la composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) del agua del acuífero o subterránea depositada en la DAS, δ_{ap} es la composición isotópica del agua del acuífero o subterránea antes de la precipitación pluvial, δ_p es la composición isotópica del agua proveniente de la precipitación pluvial. A partir de esta ecuación, se despeja $Q_{p_{das}}$ para estimar la contribución relativa de la precipitación pluvial en el DAS.

Geofísica

Se realizaron tomografías de resistividad eléctrica con un equipo Super-Sting R1/IP AGI (Advances Geosciences Inc., Austin, Texas). Se emplearon dos arreglos geométricos, dipolo-dipolo, que es más sensible a detectar cambios horizontales, por lo que se emplea para detectar heterogeneidades verticales, y un arreglo Wenner, que es más sensible a detectar cambios verticales, por lo que permite una mejor delineación de la zona de transición agua dulce/agua salada. La longitud total del transecto fue de 54 con 1.5 m de espaciamiento entre los electrodos. Las secciones geoeléctricas de resistividad real del subsuelo se obtuvieron invirtiendo los datos de resistividad aparente medidos en el campo, utilizando el software de inversión EarthImager 2D v2.4.0 (Advances Geosciences Inc. 2005), siguiendo el procedimiento recomendado por Zamora-Luria *et al.* (2020).

Análisis estadísticos

Se generaron gráficos para identificar las tendencias temporales entre la precipitación pluvial mensual acumulada (Q_p), el caudal ($L s^{-1}$), la concentración de elementos químicos disueltos ($mg L^{-1}$ y $meq L^{-1}$) y los isótopos estables del agua ($\delta^{18}O$, δ^2H). Se realizó un análisis de correlación de Pearson de dos colas (r) para identificar las asociaciones entre el caudal, la precipitación mensual y todos los parámetros.

RESULTADOS

El caudal de descarga en la superficie estimada ($0.0507 m^2$) es de entre 1 y $900 m^3 día^{-1}$ (1.6 y $4.7 L s^{-1}$), que representa entre 3 y $49 m^3 m^{-2} día^{-1}$. La salinidad muestra una tendencia a disminuir su concentración en los meses de mayor precipitación (octubre y noviembre del 2019, mayo y octubre del 2020) y cuando hay bajo caudal (enero a junio de 2020); pero no siempre baja la concentración de la salinidad. Por su parte, el SiO_2 sigue una tendencia similar a la salinidad de agosto 2019 a febrero de 2020; después, entre marzo y septiembre 2020 parece más relacionado con la precipitación pluvial mensual, aumentando y disminuyendo con una

tendencia similar a la precipitación registrada (Figura 1). El potencial de óxido reducción (ORP) muestra incremento (hasta 300 mV) en noviembre de 2019, sugiriendo entrada de agua en condiciones oxidantes (recarga reciente). De manera similar los iones sodio y cloruro muestran señales de efecto de dilución por precipitación en noviembre 2019, marzo, mayo, junio, y agosto 2020 (Figura 2). Aunque también varían de acuerdo a la conexión del mar con la poza de agua salobre, evidenciando la conectividad de los ecosistemas a través del acuífero. Los cationes calcio y magnesio están más acoplados a las variaciones en precipitación (octubre-noviembre 2019, mayo y octubre 2020), aunque algunos picos de magnesio sugieren mayor aporte de agua de mar (abril 2020). Los iones potasio, magnesio y sodio aportan información clara sobre la temporada donde el aporte del agua de mar es más relevante al tener concentraciones mayores en abril 2020 (Figura 3). Los metales Cu (enero 2020) y Fe (marzo 2020) solo se detectaron en una ocasión, mientras que el Al mostró concentraciones entre 0.019 y $0.49 mg L^{-1}$ sin relación con la precipitación pluvial mensual o el caudal. En el caso del Zn, se detectó en concentraciones de $2.4 mg L^{-1}$ en marzo y julio de 2020; este último incremento se relaciona con aumento en el caudal.

En cuanto a los isótopos estables del agua (δ^2H y $\delta^{18}O$), se obtuvieron valores relativamente estables, entre -2.5 y $-4.24 ‰$. El caudal está correlacionado de manera significativa ($p < 0.05$) con la conductividad eléctrica y la salinidad. Mientras que la conductividad eléctrica se correlaciona con la salinidad y los isótopos estables ($p < 0.05$). En tanto que la salinidad mostró correlación con los isótopos estables, SiO_2 y los sulfatos ($p < 0.05$). En lo correspondiente con el pH se encontró correlación con los isótopos estables; y estos con los sulfatos. Los iones sodio, magnesio, potasio, sulfatos y cloruros están relacionados entre ellos por efecto de las variaciones en la contribución de agua de mar (Tabla 1). El diagrama de Piper muestra agua del tipo clorurada sódico potásica, que sugiere la influencia del agua de mar por la cercanía con la costa (Figura 4). La mezcla hidroquímica conservativa estima que la fracción de agua de mar (f_{mar}) en la descarga es-

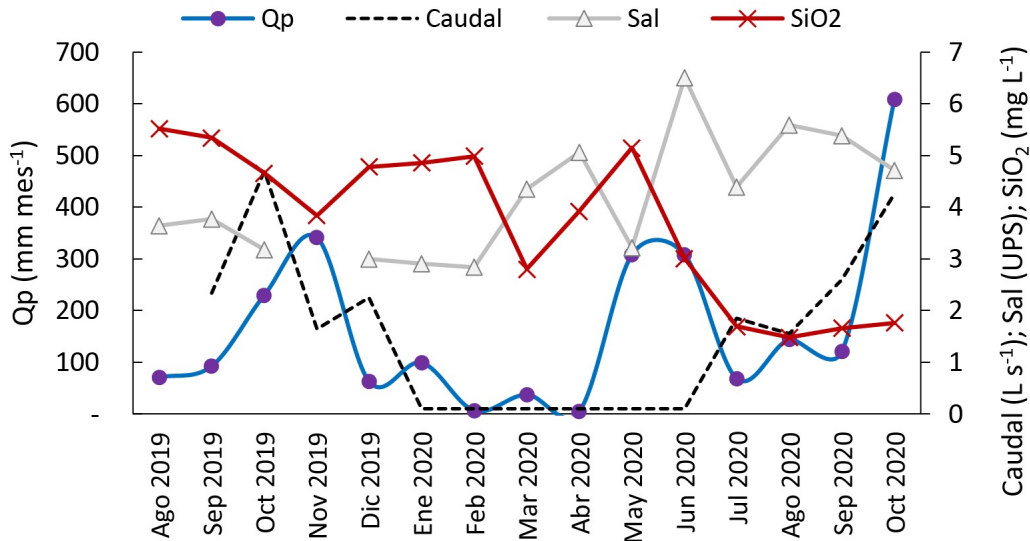


Figura 1. Cambios anuales del caudal, salinidad (Sal) y óxido de silicio (SiO_2) con los aportes de la precipitación pluvial acumulada mensual (Q_p) en la descarga de agua subterránea de Playa Esmeralda, Solidaridad, Quintana Roo.

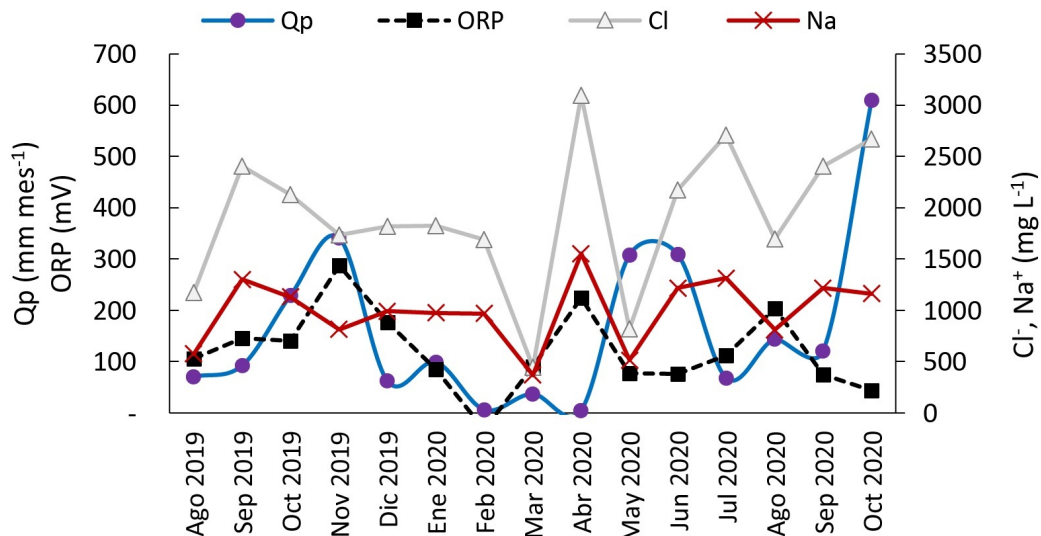


Figura 2. Tendencia del potencial de óxido-reducción (ORP), cloruros (Cl^-) y sodio (Na^+) de acuerdo a la precipitación acumulada mensual (Q_p , mm mes^{-1}) en la descarga de agua subterránea de Playa Esmeralda, Solidaridad, Quintana Roo.

tuvo entre 2 y 15% (Figura 5).

Los resultados del modelo de mezcla del caudal y composición isotópica, indican que la contribución de agua de precipitación pluvial es baja, menos del 1% en la descarga instantánea, salvo en ocasiones excepcionales, cuando su contribución fue ligeramente mayor, hasta 15% en enero 2020 (Figura

5). Como se observa en las Figuras 1 y 2, la mayor precipitación acumulada fue en noviembre de 2019 ($341.5 \text{ mm mes}^{-1}$) y fue hasta enero del 2020 que se cuantificó el incremento en contribución en un comportamiento similar a las curvas de recesión desfasadas (Figura 5). Es decir, el aporte de agua de precipitación es parte del flujo base de la descarga,

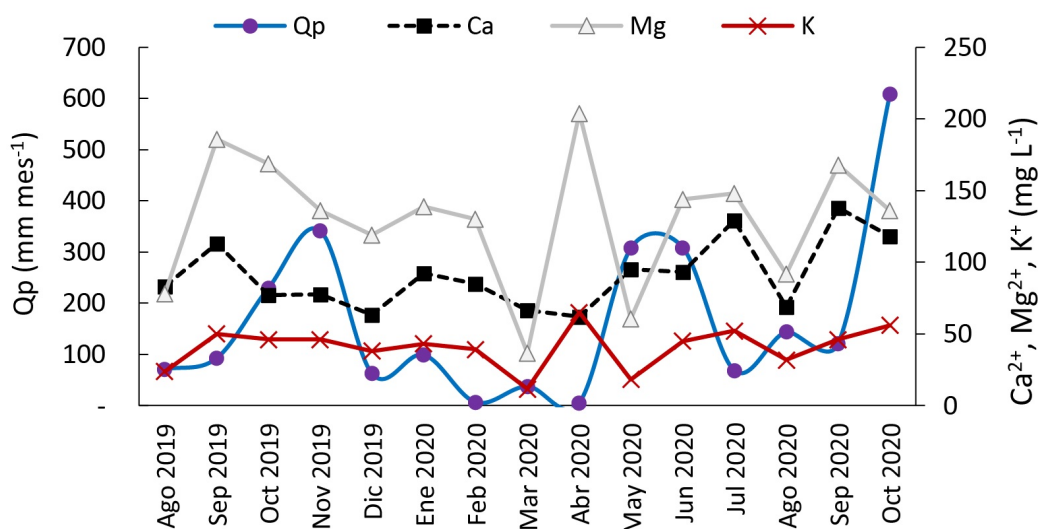


Figura 3. Tendencia de calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+) de acuerdo a la precipitación acumulada mensual (Q_p , mm mes^{-1}) en la descarga de agua subterránea Playa Esmeralda, Solidaridad, Quintana Roo.

Tabla 1. Correlación de Pearson (r) de los parámetros fisicoquímicos analizados en la descarga de agua subterránea en Playa Esmeralda, Solidaridad, Quintana Roo. Se muestran únicamente los parámetros correlacionados entre ellos. * $p < 0.05$.

	Qp	EC	Salinidad	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	Na^+	K^+	SiO_2	Cl^-	SO_4^{2-}
Caudal	0.499	0.407	0.398	-0.518	-0.429	0.223	0.358	-0.281	0.432	0.281
p	0.172	0.043*	0.049*	0.188	0.289	0.564	0.343	0.463	0.245	0.465
N	9	27	27	8	8	9	9	9	9	9
EC			0.996	0.515	0.644	0.285	0.231	-0.71	0.327	0.731
p			0.001*	0.05*	0.01*	0.324	0.426	0.004*	0.254	0.003*
N			43	15	15	14	14	14	14	14
Salinidad				0.529	0.653	0.292	0.237	-0.707	0.327	0.725
p				0.042*	0.008*	0.311	0.414	0.005*	0.254	0.003*
N				15	15	14	14	14	14	14
pH				0.763	0.752	0.425	0.34	-0.123	0.38	0.406
p				0.001*	0.001*	0.115	0.214	0.664	0.163	0.133
N				16	16	15	15	15	15	15
$\delta^2\text{H}$					0.977	0.454	0.417	-0.202	0.417	0.566
p					0.001*	0.119	0.156	0.509	0.156	0.044*
N					16	13	13	13	13	13
$\delta^{18}\text{O}$						0.459	0.415	-0.344	0.445	0.651
p						0.115	0.159	0.25	0.127	0.016*
N						13	13	13	13	13
Mg^{2+}						0.943	0.933	-0.017	0.908	0.532
p						0.001*	0.001*	0.951	0.001*	0.041*
N						15	15	15	15	15
Na^+							0.942	-0.201	0.972	0.692
p							0.001*	0.472	0.001*	0.004*
N							15	15	15	15
K^+								-0.197	0.97	0.57
p								0.482	0.001*	0.026*
N								15	15	15
Cl^-									1	0.699
p										0.004*
N										15

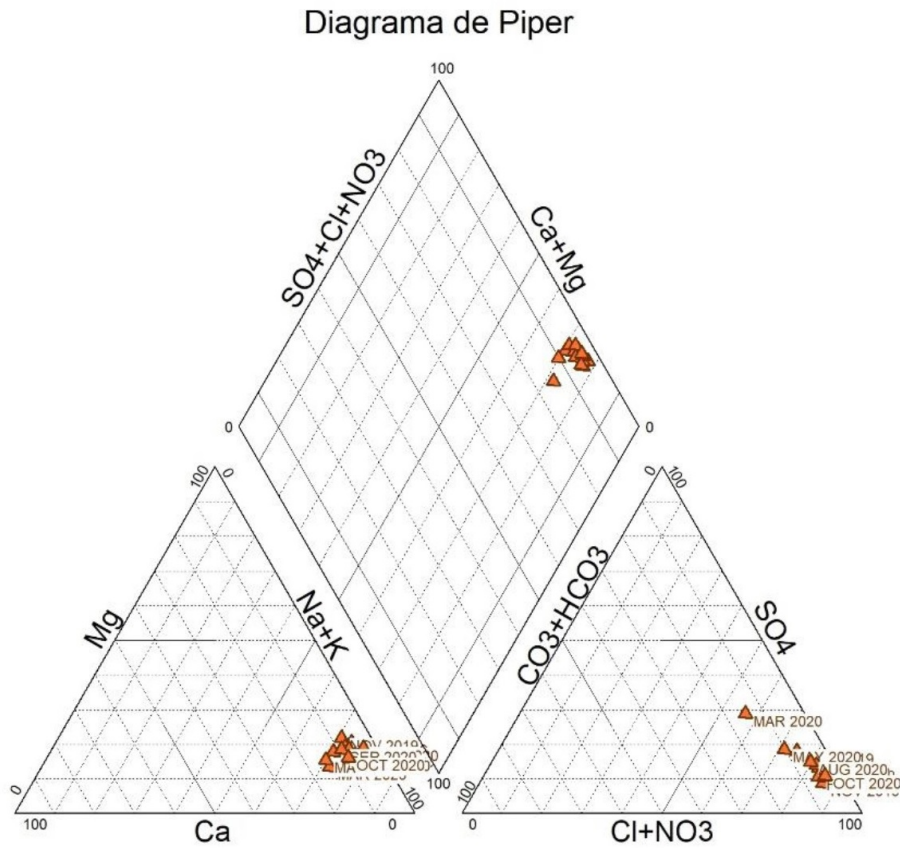


Figura 4. Diagrama de Piper con agua del tipo clorurada sódico potásica cuantificada en la descarga de agua subterránea de Playa Esmeralda, Solidaridad, Quintana Roo.

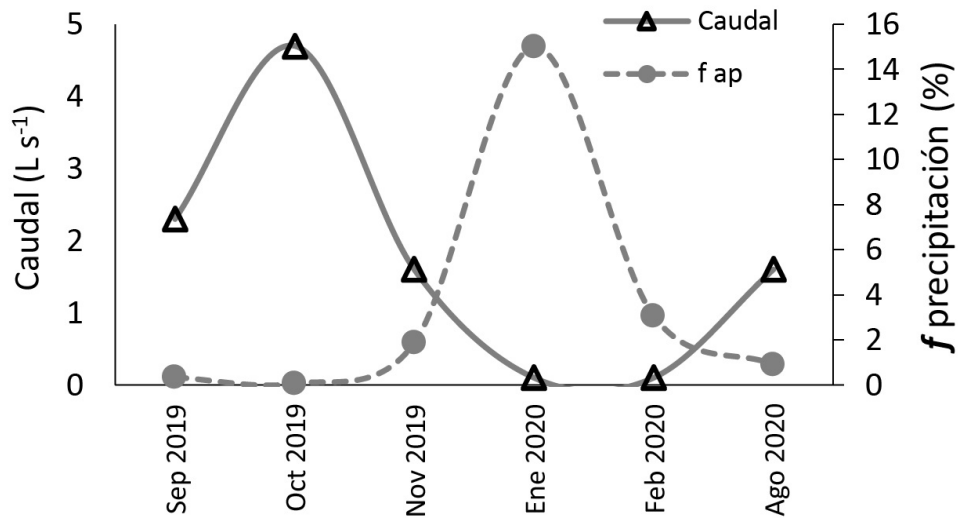


Figura 5. Desfase del caudal (L s⁻¹) y la fracción de agua de precipitación pluvial (%) estimados en la descarga de agua subterránea de Playa Esmeralda, Solidaridad, Quintana Roo.

incluso cuando su volumen es reducido. El modelo de mezcla de isótopos de dos componentes es evidencia adicional a la influencia de la precipitación no se observa de manera inmediata en la descarga, es decir, no es necesariamente una respuesta de escala local. No obstante, cuando el caudal disminuye (enero y febrero 2020), se nota mayor proporción del aporte de la precipitación, que sugiere que esta es una respuesta de escala regional (Figura 6). Es importante resaltar que el valor $Q_{p_{das}}$ es mayor a la precipitación pluvial acumulada (Tabla 2). Esto se atribuye a que la cantidad de agua pluvial incorporada y cuantificadas mediante este modelo de mezcla, es mayor a la precipitación de la estación meteorológica más cercana; ya que hay contribuciones de precipitación pluvial regional.

La inversión de datos de resistividad muestra una matriz saturada con un lente de agua dulce hasta aproximadamente 7 m bajo la superficie (verde a amarillo), por debajo del cual se tiene saturación con agua salada. También se observa la presencia de zonas de recarga (24 a 27 m del origen del transecto horizontal), así como potenciales regiones de roca remineralizada que impiden que el agua se infiltre de forma rápida en ciertas secciones, conformando así las pozas donde desembocan las DAS (naranja y rojo). Puede observarse la presencia de posibles conductos de disolución que conformarían canales de conducción de agua a los 12, 42 y 45 a 48 m del transecto (azul). En la tomografía con datos combinados se pueden observar zonas a los 18 y 24 m, donde el agua de las DAS se infiltra con mayor rapidez mezclándose con el agua de intrusión salina (Figura 7).

DISCUSIÓN

La variación del caudal en la DAS esta en función de la escala de medición, ya que se aprecian respuestas locales como la respuesta del caudal a la precipitación pluvial (octubre 2019, mayo y junio 2020), lo que sugiere una respuesta pronta a precipitación y recarga local. En el caso de las respuestas a escala regional, se presenta incremento en caudal sin aparente efecto de la pre-

cipitación pluvial local (diciembre 2019, julio 2020). El caudal responde a la precipitación sugiriendo un efecto de precipitación pluvial y recarga local (octubre 2019, mayo y junio 2020), pero en otras ocasiones pudiera ser el resultado de eventos alejados pues, ya que se presenta incremento en el caudal sin efecto de precipitación pluvial local (diciembre 2019, julio 2020). También se observó que el agua subterránea se acumula en una poza durante meses de barra cerrada, cuando una barra de arena impide el flujo bidireccional de agua entre febrero y abril 2020. La correlación del caudal con salinidad, conductividad eléctrica, isótopos estables, SiO_2 y los sulfatos apoyan la interpretación de que estas relaciones se deben a mezclas de agua subterránea con el agua de mar. Desafortunadamente estos cálculos no son directamente comparables con estimaciones previamente hechas en la zona costera de la península de Yucatán. Por ejemplo, Null *et al.* (2014) estimaron el flujo de agua con modelos de balance de masa isotópicos (actividad promedio de $^{224}\text{Ra}/^{223}\text{Ra}$) con estimaciones entre 30 y 900 $\text{m}^3 \text{ día}^{-1} \text{ m}^{-1}$ en la zona costera de Quintana Roo. Para la costa norte de Yucatán, los cálculos basados en Ra, estimaron descargas entre 40 y 95 $\text{m}^3 \text{ día}^{-1} \text{ m}^{-1}$ (Gonneea *et al.* 2014). La incertidumbre de cuantificar el caudal mediante medición de velocidad de flujo en una DAS confinada es menor a la de otros métodos puesto que se puede cuantificar mediante una combinación de métodos físicos y químicos. Por ejemplo, la incertidumbre asociada a cálculos de Null *et al.* (2014) es elevada debido al tiempo de residencia estimado. Al respecto, Street *et al.* (2008), mencionan que cálculos confiables del tiempo de residencia de agua en la zona costera permiten obtener mediciones de caudales y flujos subterráneos difusos conservadores y más cercanos a la realidad, evitando sobre estimaciones.

La existencia de la ensenada con boca y barra tiene efecto en las mediciones realizadas, apoyado en la separación de efectos de mezcla de agua subterránea y agua de mar. El aumento en la salinidad y la concentración de los iones sodio, cloruro, magnesio y potasio, indican cuando hay mayor aporte de agua de mar, observándose

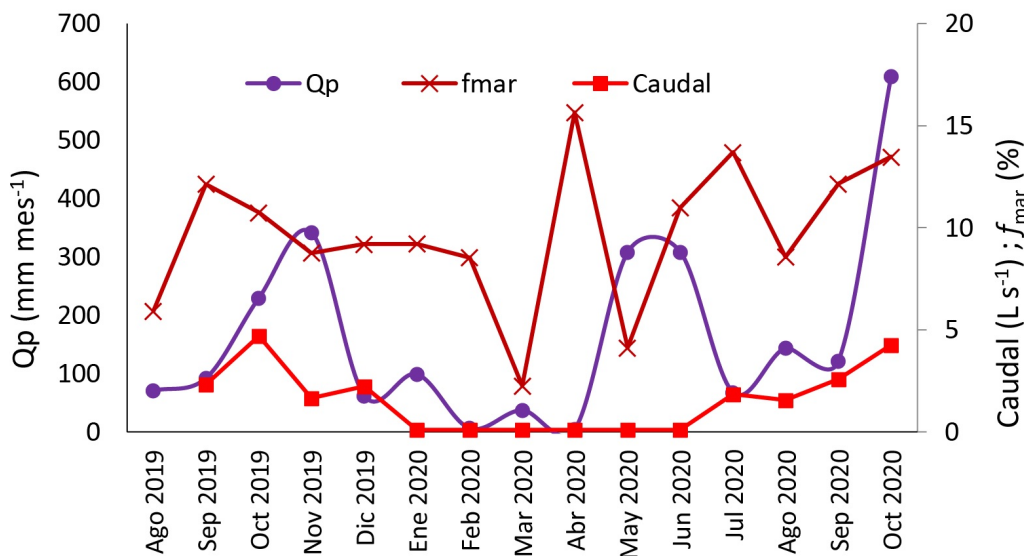


Figura 6. Relación de la fracción de agua de mar (f_{mar} %) estimada en la descarga de agua subterránea de Playa Esmeralda, Solidaridad, Quintana Roo. Q_p - precipitación mensual acumulada (mm mes^{-1})

Tabla 2. Fracción estimada de agua de precipitación pluvial incorporada al caudal de la descarga de agua subterránea (DAS) de Playa Esmeralda, Solidaridad, Quintana Roo.

	Caudal (L mes^{-1})	Q_p (L mes^{-1})	$Q_{p_{das}}$ (L mes^{-1})	f_{ap} (%)
SEP 2019	5961600	92.5	198.3	0.33
OCT 2019	12182400	229.5	75.8	0.06
NOV 2019	4147200	341.5	775.6	1.87
ENE 2020	259200	99	388.6	14.99
FEB 2020	259200	6.4	76.3	3.06
AGO 2020	4147200	143.8	377.3	0.91

Q_p - total de la precipitación pluvial mensual acumulada; $Q_{p_{das}}$ - precipitación pluvial incorporada al caudal de la DAS, f_{ap} - fracción de agua de precipitación estimada en Q_{das} .

el menor aporte en marzo e incrementos puntuales en abril y julio de 2020 con la barra abierta. Una buena parte de los acuíferos kársticos costeros tienen conexión con el mar, por lo cual podría haber intrusión de agua de mar constante y con relativa facilidad, resultando una mezcla con el agua dulce que fluye desde la costa hacia el mar (Fleury *et al.* 2007).

La concentración de SiO_2 (de 24 a 92 μM) y el porcentaje de contribución de agua subterránea (85 a 98%) cuantificados son similares a los resultados publicados para esta zona del Caribe mexicano (Hernandez-Terrones *et al.* 2011, Null *et al.* 2014, Kantún Manzano *et al.* 2018). Mientras que el caudal es similar a lo reportado por Sánchez y Pinto *et al.* (2015) en Cozumel (2.6 a 6.3 L s^{-1}). Estos mismos

autores, basados en pruebas de trazador, sugieren que el acuífero en estas zonas costeras del Caribe mexicano es un sistema con excelente mezcla y alta transmisividad, con la potencial existencia de flujos preferenciales a modo de ramales, lo cuales pueden ser las secciones con menor resistividad de los resultados de las secciones de tomografías de resistividad eléctrica (ERT por sus siglas en inglés) medidas a 12 m, donde se encuentra la DAS.

El incremento en potencial redox hasta 300 mV en noviembre de 2019 indica la hay recarga reciente por el efecto de entrada de agua (precipitación pluvial) en condiciones oxidantes (Smith *et al.* 2020). Mientras que la estimación de la mezcla conservativa indica que entre el 2 y 16% es contribución del

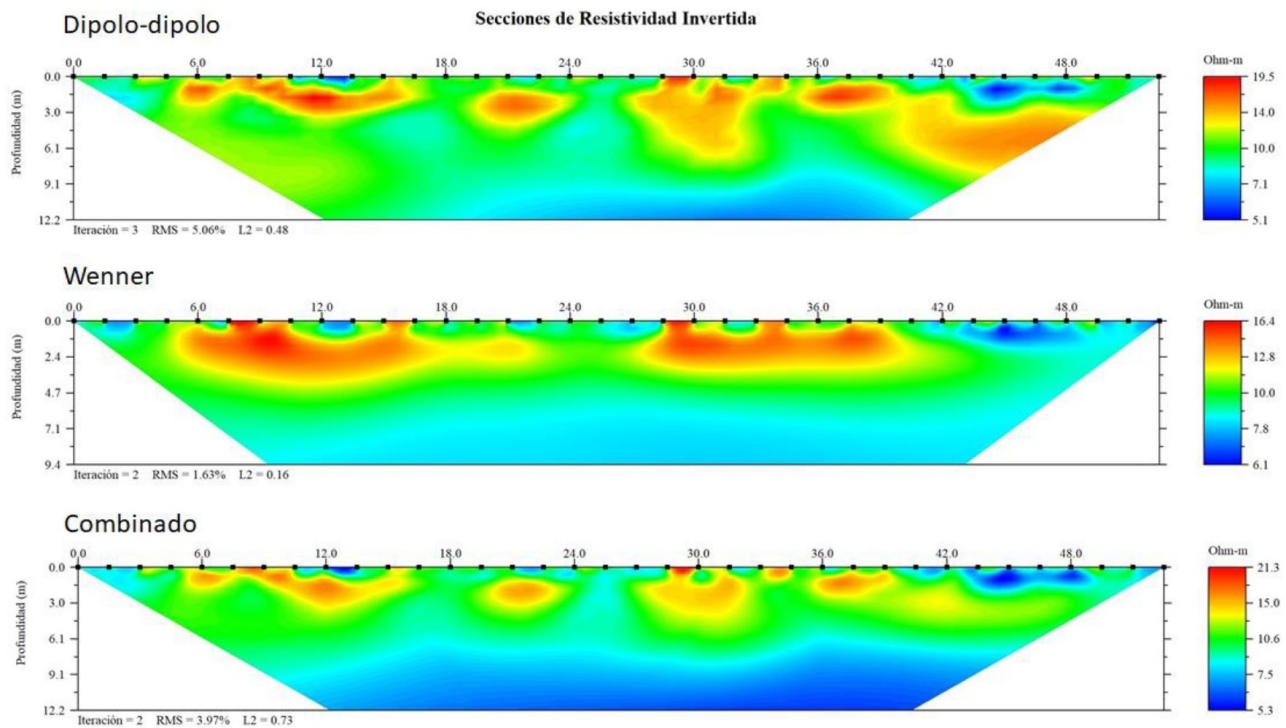


Figura 7. Tomografías de resistividad eléctrica de secciones paralelas a la línea de playa en la descarga de agua subterránea de Playa Esmeralda, Solidaridad, Quintana Roo. Se muestran las secciones de resistividad real correspondientes a los arreglos geométricos dipolo-dipolo y Wenner y la sección de resistividad real obtenida con la combinación de datos de ambos arreglos geométricos. Distancia entre electrodos: 1.5 m.

agua de mar, por lo cual la DAS está dominada por aguas subterráneas, incluso durante el tiempo en que no fue posible medir el caudal, ya que la velocidad de flujo fue menor a 10 cm s^{-1} que es el umbral de medición del caudalímetro usado. Algunos cambios se deben al incremento del aporte del agua de mar, especialmente en abril 2020, cuando se abre de nuevo la barra. A pesar de que la mezcla es baja, la elevada concentración de iones en el agua de mar, no obstante de que es una masa de agua pequeña, es suficiente para alterar el tipo de agua medido en la DAS. Adicionalmente, los isótopos estables ($\delta^{2}\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) de la DAS son similares al agua subterránea de la región a una distancia de entre 1.5 y 3 km de la costa. El valor de $\delta^{18}\text{O}$ alrededor de -4 ‰ indica relativa estabilidad en las características del agua subterránea en la zona (Cejudo *et al.* 2022), el ligero incremento a -2.5 ‰ en abril 2020 sugiere mezcla de masas de agua de diferente composición isotópica, lo más probable es que sea agua de mar

(Gat 2010).

La resistividad real obtenida de las secciones geoléctricas, hacen suponer la existencia de una matriz de arena o caliza, saturada entre 2.5 y 7 m de profundidad con agua salobre (Zamora-Luria *et al.* 2019), y completamente saturada con agua salada por debajo de esta profundidad; una lente de agua dulce libre de aproximadamente 2.5 m de espesor y la presencia de zonas de baja resistividad que se asocian a recarga (24 a 27 m en el eje horizontal). Una de las secciones de mayor resistividad, a los 12 m del transecto, coincide con el sitio de medición de la DAS. De acuerdo a lo obtenido mediante las mediciones de resistividad eléctrica, es probable que las regiones con resistividad mayores de $15 \text{ } \Omega \text{ m}$ en las posiciones identificadas como 12, 22, 42 y 45 a 48 m, sean pequeños canales de conducción de agua por donde fluye el agua subterránea ($\approx 5 \text{ } \Omega \text{ m}$). Este tipo de interpretación se ha empleado previamente para la identificación de la descarga de agua en ambientes

de transición terrestre-marino (Hermans y Paepen 2020).

Se han tenido evidencias de la mezcla de agua de mar con agua subterránea en diferentes proporciones; donde el agua subterránea que descarga en la playa muestra señales químicas de interacción con rocas de diferente edad, identificando la descarga de agua del acuífero somero, claramente diferente del acuífero profundo (Hernández-Terrones *et al.* 2021). Por lo que las regiones identificadas como roca remineralizada o canales de conducción cerca de la superficie de la playa son pequeñas zonas de flujo de agua subterránea somera o reciente que sugiere la existencia de recarga local. De acuerdo a la clasificación propuesta por Fleury *et al.* (2007) la DAS puede considerarse del tipo 2, donde la karstificación está desarrollada, abierta al mar y puede ser extensa por debajo del nivel actual del mar. En este grupo de descargas, típicamente los conductos son grandes en comparación con la descarga volumétrica observada, que es débil para evitar la intrusión del agua de mar, por lo cual se presentan mezclas de agua subterránea con agua de mar. En la DAS se observó flujo bajo ($< 5 \text{ L s}^{-1}$), con una importante variabilidad estacional y con salinidad baja durante los periodos de alto flujo. La posible existencia de varios canales de conducción de agua subterránea sugiere que, de estar extendidos en una superficie amplia en esta zona de playa, pudieran ser parte de una red de recarga - descarga, respaldado por evidencia reciente en la zona costera del municipio.

Cualquier cambio en la cantidad y calidad del agua subterránea debido al comportamiento humano en esta zona costera urbana dará como resultado cambios en la química del agua y probablemente aumento en los niveles de contaminantes y otras sustancias disueltas. Aunque no se presenta información sobre el nitrógeno y fósforo, son elementos a considerar a nivel local y global para el monitoreo de nutrientes en la zona costera (Liu *et al.* 2010). Debido a que la DAS de muestra preferencialmente los procesos hidrogeológicos del acuífero somero, es de suma importancia su monitoreo para identificar posibles impactos locales ($\approx 1\text{-}10 \text{ km}$) que se presenten en la porción continental de la ciudad de

Playa del Carmen, Quintana Roo. Es importante integrar el efecto de mareas en la variación de la descarga volumétrica de agua subterránea en esta zona del Caribe, compararla con otras DAS identificadas y caracterizadas en la región, además de estimar el aporte de elementos terrígenos a zona costera (como N, P y Si) dada la relevancia que tiene en la conformación de microambientes o impactos locales en las concentraciones de los nutrientes (Carruthers *et al.* 2005, Kantun-Manzano *et al.* 2018). También se debe explorar otros modelos de mezcla de 3 o 4 componentes que permitan entender la dinámica temporal del movimiento de agua subterránea en la zona costera para incrementar el conocimiento del ciclo hidrológico en estas zonas de delicado equilibrio hídrico, especialmente bajo la expectativa del incremento en demanda de agua por crecimiento poblacional y cambios en los regímenes meteorológicos por efecto del cambio climático global.

CONCLUSIONES

Las descargas de agua subterránea (DAS) son variables en el espacio y el tiempo, los iones Na, K, Ca, Mg y Cl tienden a disminuir cuando la Q_p aumenta y el SiO_2 , ORP y salinidad no tienen relación clara con el aumento o la disminución de la Q_p . En algunos meses hay una relación positiva o directa, pero en otros es inversa o no hay relación evidente. El trayecto entre las zonas de recarga y descarga y la presencia de zonas de flujos preferencial puede identificarse mediante el uso de herramientas hidroquímicas, isotópicas y geofísicas. La descarga de agua subterránea (DAS) de Playa Esmeralda permite distinguir entre eventos de escala local y regional, identificar la contribución continua de agua subterránea a la zona costera y estimar que el aporte de la precipitación pluvial en la descarga instantánea es de hasta 15%.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección Zona Federal Marítimo Terrestre (ZOFEMAT) del Municipio de Solidaridad. A Jesús Al-

varado por su apoyo en campo. Investigación financiada por el proyecto CONACYT CB 286049 “Línea de agua meteórica de la península de Yucatán” y

proyecto Cátedras CONACYT 2944 “Modelación del ciclo del agua en la península de Yucatán”.

LITERATURA CITADA

- Appelo CAJ, Postma D (2005) *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. 2nd edition. CRC Press London. 683p.
- Bakti H (2018) Submarine groundwater discharge in the coastal zone. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 118: 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/118/1/012016.
- Bauer-Gottwein P, Gondwe BR, Charvet G, Marín LE, Rebolledo-Vieyra M, Merediz-Alonso G (2011) The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal* 19: 507-524.
- Burnett WC, Aggarwal PK, Aureli A, Bokuniewicz H, Cable JE, Charette MA, Kontar E, Krupa S, Kulkarni KM, Loveless A, Moore WS (2006) Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. *Science of the total Environment* 367: 498-543
- Carruthers TJB, Van Tussenbroek BI, Dennison WC (2005) Influence of submarine springs and wastewater on nutrient dynamics of Caribbean seagrass meadows. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64: 191-199.
- Cejudo E, Acosta González G, Leal Bautista RL, Estrada Medina H (2022) Water stable isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua* 13: 502-558.
- Charideh A, Rahman A (2007) Environmental isotopic and hydrochemical study of water in the karst aquifer and submarine springs of the Syrian coast. *Hydrogeology Journal* 15: 351-364.
- Crook ED, Potts D, Rebolledo-Vieyra M, Hernandez L, Paytan A (2012) Calcifying coral abundance near low-pH springs: implications for future ocean acidification. *Coral Reefs* 31: 239-245.
- Fleury P, Bakalowicz M, de Marsily G (2007) Submarine springs and coastal karst aquifers: a review. *Journal of hydrology* 339: 79-92.
- Fragoso-Servón P, Bautista F, Frausto O, Pereira A (2014) Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1: 50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 31: 127-137.
- Gat JR (2010) *Isotope hydrology*. Imperial College Press. Series on Environmental Science and Management 6. London. 200p.
- Gonnea ME, Charette MA, Liu Q, Herrera-Silveira JA, Morales-Ojeda SM (2014) Trace element geochemistry of groundwater in a karst subterranean estuary (Yucatan Peninsula, Mexico). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 132: 31-49.
- Hanshaw BB, Back W (1980) Chemical mass-wasting of the northern Yucatan Peninsula by groundwater dissolution. *Geology* 8: 222-224.
- Hermans T, Paepen M (2020) Combined inversion of land and marine electrical resistivity tomography for submarine groundwater discharge and saltwater intrusion characterization. *Geophysical Research Letters* 47(3): e2019GL085877. DOI: 10.1029/2019GL085877.
- Hernández-Terrones L, Rebolledo-Vieyra M, Merino-Ibarra M, Soto M, Le-Cossec A, Monroy-Ríos E (2011) Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems. *Water, Air, & Soil Pollution* 218: 517-528.

- Hernández-Terrones LM, Street J, Null K, Paytan A (2021) Groundwater chemistry and Sr isotope ratios shed light on connectivity and water-rock interactions in the coastal aquifer of the Caribbean coast, Mexico. *Continental Shelf Research* 212: 104293. DOI: 10.1016/j.csr.2020.104293.
- Kantún-Manzano CA, Herrera-Silveira JA, Arcega-Cabrera F (2018) Influence of coastal submarine groundwater discharges on seagrass communities in a subtropical karstic environment. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 100: 176-183.
- Lee ES, Krothe NC (2001) A four-component mixing model for water in a karst terrain in south-central Indiana, USA. Using solute concentration and stable isotopes as tracers. *Chemical Geology* 179: 129-143
- Liu KK, Atkinson L, Quiñones R, Talaue-McManus L (2010) Biogeochemistry of continental margins in a global context. In: Liu KK, Atkinson L, Quiñones R, Talaue-McManus L (ed) *Carbon and nutrient fluxes in continental margins: a global synthesis*. Global Change - The IGBP Series. Springer. Berlin. pp: 3-24.
- Mutchler T, Dunton KH, Townsend-Small A, Fredriksen S, Rasser MK (2007) Isotopic and elemental indicators of nutrient sources and status of coastal habitats in the Caribbean Sea, Yucatan Peninsula, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74: 449-457.
- Null KA, Knee KL, Crook ED, de Sieyes NR, Rebolledo-Vieyra M, Hernández-Terrones L, Paytan A. (2014) Composition and fluxes of submarine groundwater along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula. *Continental Shelf Research* 77:38-50.
- Perez-Flores MA, Ochoa-Tinajero LE, Villela y Mendoza A (2019) Three-dimensional inverse modeling of EM-LIN data for the exploration of coastal sinkholes in Quintana Roo, Mexico. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19: 1779-1787.
- Sánchez y Pinto IA, Cervantes-Martínez A, Herrera RAG, Campos MEV, Gutiérrez-Aguirre MA (2015) Evidencia de flujo preferencial al mar del Cenote Caletita, en Cozumel, México. *Ingeniería* 19: 1-12.
- SECOFI (1982) NMX-AA-075-1982 Análisis de agua - Determinación de sílice. Disponible en <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166792/NMX-AA-075-1982.pdf>. Fecha de consulta: 13 de julio de 2021.
- SGM (2016) Geological-Mining monograph of the state of Quintana Roo. Vol. 2. - Servicio Geológico Mexicano. Hidalgo, Mexico. 34 p. Disponible en https://mapserver.sgm.gob.mx/Publicaciones/MonografiasWeb/T232016SEGM0001_02.PDF. Fecha de consulta: 22 de noviembre de 2021.
- Smith DN, Ortega-Camacho D, Acosta-González G, Leal-Bautista RM, Fox III WE, Cejudo E (2020) A multi-approach assessment of land use effects on groundwater quality in a karstic aquifer. *Heliyon* 6(5): e03970. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03970.
- Smith SV, Marshall Crossland JI, Crossland CJ (1999) Mexican and Central American coastal lagoon systems: Carbon, nitrogen and phosphorus fluxes (Regional Workshop II). LOICZ Reports & Studies No. 13. LOICZ IPO, Texel. The Netherlands. 115p.
- Street JH, Knee KL, Grossman EE, Paytan A (2008) Submarine groundwater discharge and nutrient addition to the coastal zone and coral reefs of leeward Hawai'i. *Marine Chemistry* 109: 355-376.
- Zamora-Luria JC, Perera-Burgos JA, González-Calderón A, Marín Stillman LE, Leal-Bautista RM (2020) Control of fracture networks on a coastal karstic aquifer: a case study from northeastern Yucatán Peninsula (Mexico). *Hydrogeology Journal* 28: 2765-2777.