

ENTENDIENDO EL ACUÍFERO DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN A TRAVÉS DEL DIAGNÓSTICO, MONITOREO Y MODELACIÓN

ERICK SOTO-GARCÍA, ROGER PACHECO-CASTRO,
ELSA NOREÑA-BARROSO, CÉSAR CANUL-MACARIO
Y PAULO SALLES

Con el fin de avanzar en el conocimiento del acuífero de la Península de Yucatán y entender sus complejas interacciones con los diversos socioecosistemas de la región es fundamental diagnosticar, establecer una línea base, modelar y eventualmente predecir los procesos de flujo y transporte en el mismo, así como los efectos del cambio climático y el aumento demográfico, en los sistemas socioecológicos que dependen del agua subterránea en la región. Para ello, primero debemos conocer las características de: a) la composición y estratigrafía del subsuelo, así como su comportamiento en presencia de agua, y de b) los aportes de agua dulce (principalmente precipitación e infiltración). Además, para tener una idea más precisa de la hidrodinámica del acuífero en la costa, es necesario estudiar la interacción del acuífero con el mar y ecosistemas acuáticos costeros (ciénegas, humedales, lagunas): descargas de agua dulce e intrusión salina.

Las rocas del acuífero de la península de Yucatán están principalmente compuestas por carbonato de calcio, el cual se disuelve fácilmente. Es decir, la roca caliza o roca kárstica se va disolviendo gradualmente cuando es alcanzada por el agua de lluvia que tiene un pH ligeramente ácido. Sin embargo, existe una variabilidad importante, ya que por un lado, el agua no precipita de manera espacialmente uniforme (el viento, la temperatura y la humedad influyen en su distribución); por otro lado, la matriz kárstica presenta irregularidades a diferentes escalas espaciales (fracturas geológicas, anillo de cenotes, cavernas, ríos subterráneos, fracturas puntuales de la capa confinante costera, entre otras). Por tanto, la infiltración del agua en el subsuelo y su distribución tampoco son

uniformes. Esas heterogeneidades y el gradiente hidráulico debido a la topografía del terreno, da lugar a flujos subterráneos hasta la zona costera donde el agua del acuífero es finalmente descargada al mar, sea aflorando directamente del subsuelo marino, sea en los cuerpos de agua costeros.

En un río, podemos observar y medir la velocidad, la dirección y el volumen del flujo de agua, pero estas mismas variables son más difíciles de medir si el agua está bajo tierra y no se puede ver. Para conocer la dirección del flujo subterráneo, utilizamos métodos indirectos. Por ejemplo, si medimos el nivel del agua (nivel freático) en pozos y obtenemos valores distintos, el agua se moverá desde el pozo con el nivel más alto hacia los puntos más bajos, similar a niveles de agua en un río. En ese sentido, instalando sensores que miden la presión ejercida por el agua en cada pozo, podemos calcular la carga hidráulica y determinar la dirección del flujo subterráneo. Sin embargo, los datos existentes de estos parámetros son escasos y dispersos en cuanto a cobertura espacial y temporal.

Si a eso le sumamos los crecientes y profundos efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico del acuífero de la península de Yucatán (IPCC, 2010; Loaiciga *et al.*, 2012), el estudio de la hidrodinámica del acuífero costero es aún más complejo. Por ejemplo, Canul-Macario *et al.* (2020) estimaron una disminución del agua dulce del acuífero costero y que la cuña salina se desplazaría entre 11 y 18 km tierra adentro debido exclusivamente al aumento del nivel del mar en este siglo, sin considerar posibles disminuciones en la recarga y aumentos en las extracciones, lo cual hará seguramente que la intrusión salina aumente a ritmos aún mayores. Además, Rodríguez-Huerta (2020) estimó una disminución del 23% en la recarga del acuífero debido a cambios en la temperatura y la precipitación.

Entre los esfuerzos realizados para comprender mejor el acuífero de la península de Yucatán, destacan las iniciativas desde 2017 del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) de la UNAM (www.lipc.unam.mx; www.osce.mx), en colaboración con el Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (www.lanresc.mx) y se tienen tres proyectos vigentes*. Estas instituciones mantienen y expanden actualmente una red instrumentada de 19 pozos y un cenote, que abarcan distintas zonas de los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo (Fig. 1). La base de datos resultante se complementa con bases de datos de CONAGUA y otras instituciones y asociaciones en la Península de Yucatán.

* Yucatan Peninsula Aquifer: diagnosis, modeling and monitoring (financiado por National Geographic Society); Herramientas de gestión del recurso hídrico para tomadores de decisiones basadas en red de monitoreo y modelo numérico interactivo regional de flujo del acuífero de la Península de Yucatán (PAPIIT IT102623); Sistemas de alerta temprana a salinización e inundaciones de origen terrestre (subproyecto del GII "Sisal, Yucatán: hacia una ciudad sustentable y resiliente").

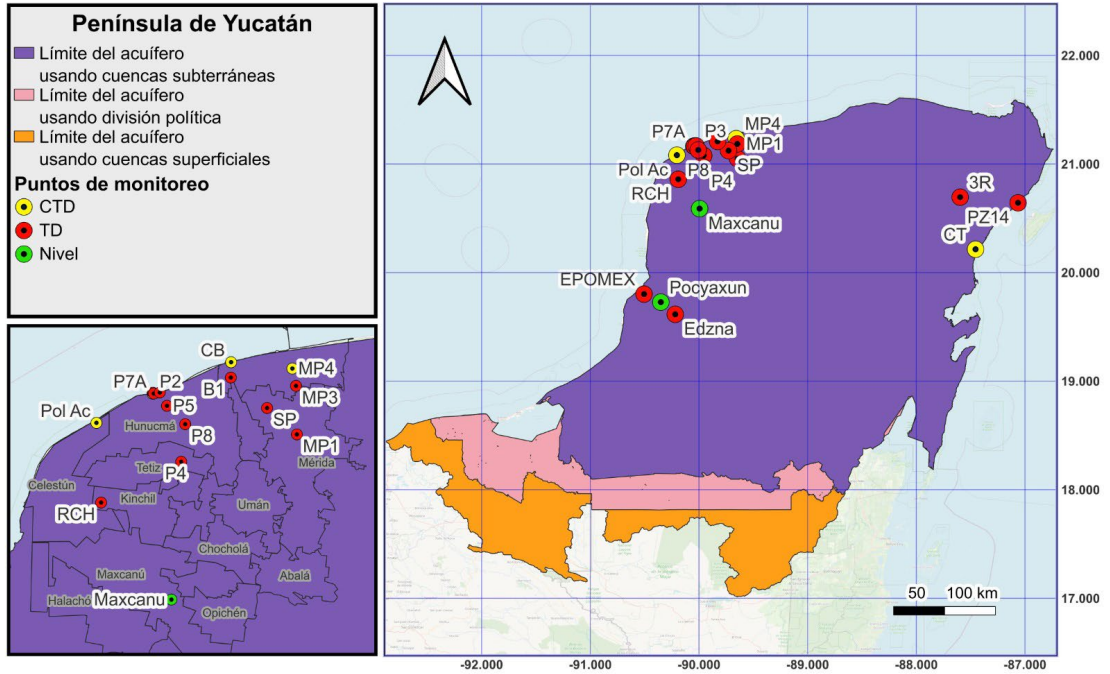


Figura 1. Mapa de la red de monitoreo del acuífero de la Península de Yucatán y límites del acuífero establecidos por modelación numérica. CTD: Sensor de conductividad, temperatura y presión; TD: sensor de temperatura y presión. Fuente: Chablé Martínez (2024).¹⁸

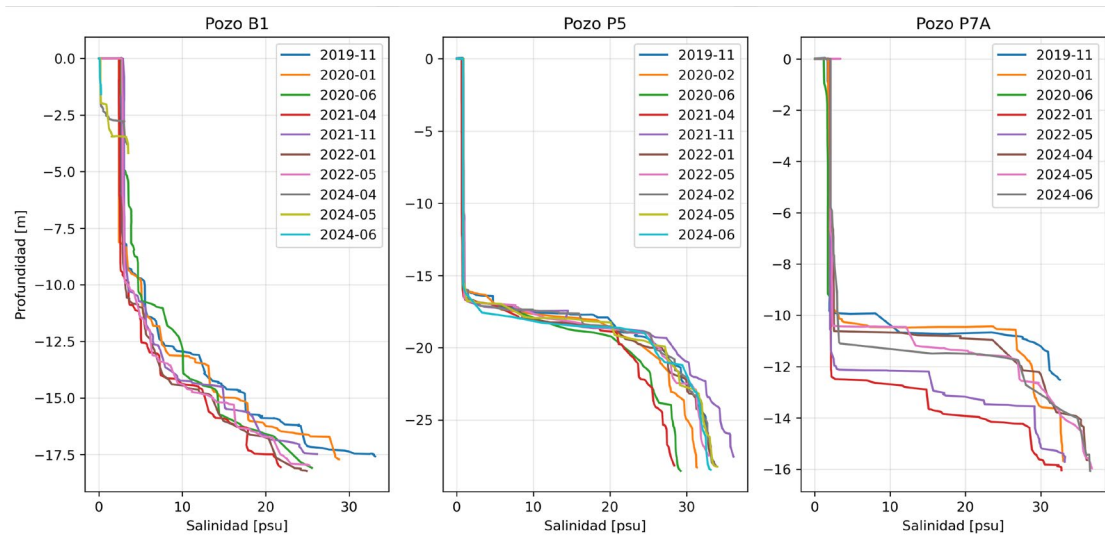


Figura 2. Perfiles verticales de salinidad en los pozos B1, P5 y P7A en el noroeste de Yucatán

La instrumentación de esta red se lleva a cabo mediante el uso de sensores de presión y temperatura en todos los pozos, sumando sensores de conductividad en los pozos costeros para monitorear la fluctuación de la interfase salina. Cabe señalar que algunas de las sondas utilizadas han sido desarrolladas por el LANRESC y fabricadas actualmente en el LIPC. Además, se realizan cada 4-6 semanas perfiles de conductividad en cada uno de los pozos, como se ilustra en la Fig. 2, la cual muestra variabilidades estacionales y anuales importantes en los perfiles de salinidad para cada pozo. Por ejemplo, para el pozo P5 (cercano al pozo de abastecimiento de agua potable para Sisal), para una misma salinidad las profundidades varían hasta 9 m (28 psu, entre 04/2021 y 11/2021), y para una misma profundidad la salinidad varía hasta 15 psu en el pozo B1 (a 17.5 m, entre 11/2019 y 04/2021) y hasta 32 psu en el pozo P7A (a 12.5 m, entre 11/2019 y 04/2021). Un análisis más detallado es motivo de un artículo en preparación. Los datos de todos los pozos se pueden ver en el portal del Observatorio Costero del Sureste (www.ocese.mx) del LIPC.

Modelo numérico

La carga hidráulica representa la energía necesaria para mantener el movimiento del agua, es decir, el agua fluye hacia donde se requiere menos energía. Esta variable es fundamental para generar modelos de flujo que nos ayuden a predecir el comportamiento del agua subterránea bajo diversas condiciones, incluyendo el cambio climático.

A pesar de que existen algunos estudios desde los años 90 y el LIPC desarrolla actualmente varios esfuerzos de modelación de flujo del acuífero la península a diferentes escalas, aún persiste incertidumbre en algunos componentes que integran el modelo numérico debido a la complejidad y tamaño del sistema. Es por esto que, para reproducir numéricamente el flujo y predecirlo con menor incertidumbre, es necesario mejorar en varios frentes: a) monitoreo con mayor resolución y distribución espacial, particularmente en zonas aún desatendidas por la red actual, para mejorar la calibración y validación, b) mejorar la definición de las fronteras, c) considerar otros modelos numéricos que consideren heterogeneidades de pequeña escala del karst, d) incluir en el modelo regional de toda la península la interacción con el océano, e) estimaciones mejoradas del volumen de recarga y extracciones, y f) implementar escenarios regionalizados de aumento del nivel del mar y variabilidad de la precipitación debido al cambio climático.

Los esfuerzos de modelación numérica representan una evolución significativa para el acuífero de la península de Yucatán, abarcando mayor extensión del dominio y mejorando la resolución, además de integrar modelos de recarga. Estos

avances posibilitan la simulación de escenarios de cambio climático, variaciones en los regímenes de precipitación y eventos meteorológicos extremos. Un desarrollo reciente y crucial ha sido el establecimiento de los límites del acuífero basados en las cuencas superficiales y subterráneas, lo que permite orientar los nuevos puntos de monitoreo y establecer la dirección de flujo del acuífero (Fig. 1; Chablé Martínez, 2024). La modelación numérica no sólo mejora nuestra comprensión actual, también, sienta las bases para futuros proyectos, como la integración con modelos de transporte, el acoplamiento con modelos de simulación hidrodinámica a superficie libre y la caracterización de las interacciones entre el océano y el acuífero para fines predictivos.

Calidad de agua

Además de los esfuerzos en monitoreo y modelación numérica del acuífero de la península de Yucatán, la necesidad de conocer la calidad del agua provista por el acuífero ha sido un tema de interés en la comunidad. Existen informes de contaminación bacteriológica (Pacheco *et al.*, 2000), presencia de nitratos en pozos por encima de los límites máximos permitidos por las regulaciones mexicanas (Pacheco *et al.*, 1997), plaguicidas como el clorpirifos y contaminantes orgánicos volátiles (Ramos-Alcocer, 2014; Puch-Hau, 2014), presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (López-Macías *et al.*, 2019), plaguicidas organoclorados (Giacomán-Vallejos *et al.*, 2018), así como concentraciones de cadmio y arsénico por encima de los niveles permitidos por la normatividad (Árcega-Cabrera *et al.*, 2014).

En estudios realizados en el anillo de cenotes se han detectado niveles de plaguicidas organoclorados en agua superiores a valores considerados como seguros para los humanos y la biota (Polanco *et al.*, 2015; Rodríguez-Fuentes y Noreña-Barroso, 2021); productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs), incluyendo cafeína como trazador químico de presencia de aguas residuales de origen humano (Kiel-Martínez, 2012); esteroides fecales como trazadores químicos de aporte de materia orgánica por fuentes urbanas y pecuarias (Árcega-Cabrera *et al.*, 2014; Derrien *et al.*, 2015); e hidrocarburos aromáticos y alifáticos (Martínez-Trejo, 2018).

De los 20 puntos de muestreo instrumentados por el LIPC y en conjunto con el Laboratorio de Ciencias Ambientales y Costeras de la Unidad de Química en Sisal de la Facultad de Química de la UNAM, se han recolectado muestras de agua en 16 puntos y dos profundidades (Fig. 3) durante la temporada de secas (mayo de 2024) y se realizará un segundo muestreo en época de lluvias (octubre de 2024), con el propósito de ampliar la información existente de presencia de contaminantes en el acuífero incluyendo análisis bacteriológicos, iones

mayores, nutrientes y contaminantes orgánicos (plaguicidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, trihalometanos, BTEX y contaminantes emergentes), así como la determinación de cafeína como trazador químico de presencia de aguas residuales de origen humano.

Con relación a los contaminantes orgánicos volátiles, los primeros resultados sugieren la presencia de 10 de los 15 contaminantes orgánicos volátiles (VOCs) individuales analizados en las muestras de agua colectadas en mayo de 2024 (época de secas) en 16 diferentes sitios del acuífero de la PY (15 pozos y un cenote); las concentraciones de VOCs estuvieron por debajo de los límites máximos permitidos considerados en la NOM-127-SSA1-2021 para agua de uso y consumo humano, con excepción de los niveles de bromoformo y de tetracloruro de carbono detectados en un sitio de muestreo. En la Figura 4 se presentan los compuestos individuales considerados en el estudio y la frecuencia de detección en términos de número de sitios de muestreo.

De los contaminantes encontrados en el agua subterránea destacan los compuestos pertenecientes al grupo de los BTEX que estuvieron presentes en todos los sitios (con excepción del benceno que no fue detectado) (Fig 4), siendo el tolueno el BTEX con niveles más altos con un máximo de 21.4 µg/L. Asimismo, se detectó la presencia de los cuatro trihalometanos (THMs) con menor frecuencia, pero destacando el cloroformo y el bromoformo con concentraciones máximas de 96.1 y 103.2 µg/L, respectivamente. Los VOCs son sustancias que pueden causar daños a la salud a corto y largo plazo, algunas fuentes de estos compuestos son: pinturas y barnices, conservantes de madera, limpiadores y desinfectantes, combustibles, productos empleados en tintorerías, aerosoles, entre otros.

Diagnóstico y línea base

Además de la obtención de datos para la modelación numérica y para la evaluación de la calidad del agua, para ampliar nuestro conocimiento sobre el acuífero, es importante que la información y el diagnóstico con respecto a la salud del acuífero esté disponible para el público de diversos sectores y para los tomadores de decisiones, además de la academia. En este sentido, se está continuando con el esfuerzo iniciado por el Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera para realizar Tarjetas de Reporte (TR) de los siete socioecosistemas costeros que forman parte del LANRESC, siguiendo la metodología propuesta por Costanzo *et al.*, 2017, la cual evalúa que los "productos que comparan información ecológica, social y económica con objetivos predefinidos, integrando información extensa y compleja en puntuaciones simples que pueden comunicarse a los tomadores de decisiones y al público, facilitando la interacción entre personas, gobiernos e industrias con agendas, perspectivas y niveles de conciencia diferentes"



Figura 3. Recolección de muestras de agua en estación CT en mayo 2024.

(https://lanresc.mx/publicaciones/tarjetas_reporte/). De esta manera, se contempla la elaboración de la primera Tarjeta de Reporte del acuífero de la península de Yucatán, convocando a actores de diferentes sectores (academia, gobierno, empresas privadas, ONGs y sociedad civil) para delimitar el área de estudio y seleccionar una serie de indicadores y umbrales que permitan evaluar el estado de salud del acuífero, generándose un documento que estará disponible para todos los sectores interesados. Este proceso está en marcha y las primeras reuniones y talleres en los tres estados que conforman la península se llevaron a cabo en agosto de 2024.

Conclusiones

El incremento acelerado de la población y las actividades antrópicas en la península de Yucatán y el cambio climático, aunado a las características kársticas del acuífero, hacen imperativo el estudio de la cantidad y calidad del agua subterránea. La problemática del acuífero es compleja y multifactorial, por lo que se requiere monitoreo constante y obtención de datos de calidad que abarquen series largas de tiempo y con buena representación espacial, modelación numérica, colaboración inter y transdisciplinaria, así como una comunicación efectiva de los resultados y recomendaciones. Este enfoque integral no

Contaminantes orgánicos volátiles (VOCs) en el APY en mayo de 2024 (n = 16 sitios de muestreo)

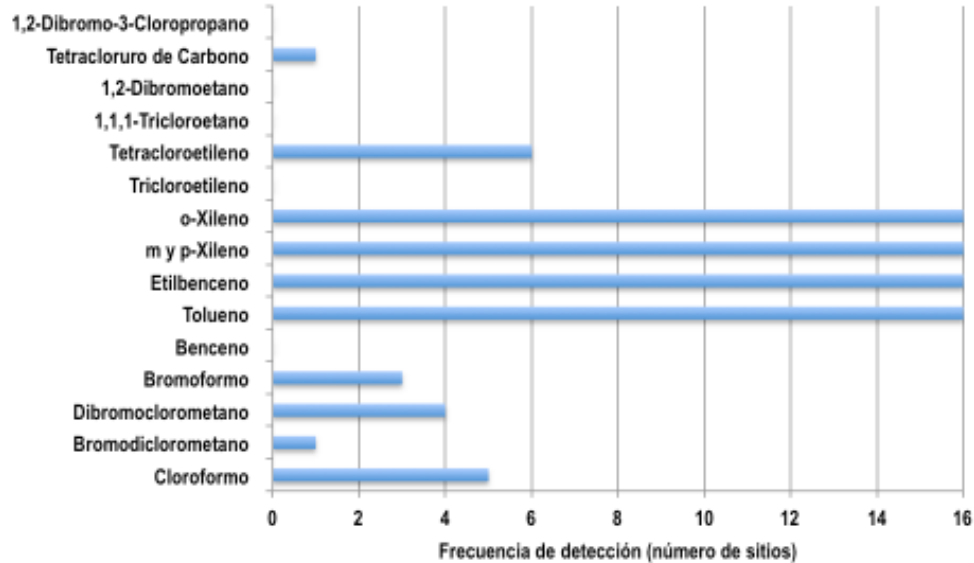


Figura 4. Frecuencia de detección (número de sitios) de contaminantes orgánicos volátiles (VOCs) en muestras de agua subterránea colectadas en el acuífero de la Península de Yucatán (APY) en mayo de 2024 (n=16 sitios de muestreo)

sólo permitirá una comprensión más profunda de la calidad de agua de la región, sino también, sentará las bases para abordar los desafíos ambientales prioritarios identificados en la zona de estudio. A pesar de que la obtención de financiamiento para la realización de este tipo de estudios no es fácil, la colaboración y la integración de diferentes proyectos hacen posible la generación de información para tener mayor conocimiento del acuífero y hacer predicciones con escenarios futuros sobre el flujo, transporte y disponibilidad, que serán de gran relevancia para conservar las reservas hídricas y los ecosistemas presentes en la península de Yucatán. |

Referencias

