

# OBSERVATORIO PARA EL ESTUDIO DE LA RESILIENCIA AL CAMBIO CLIMÁTICO DEL ACUÍFERO DE YUCATÁN

ROGER PACHECO, PAULO SALLES,  
CESAR CANUL-MACARIO, MARIANA GÓMEZ

## La importancia del acuífero de Yucatán

Resulta crucial tener líneas base para el estudio de sistemas naturales y el acuífero de Yucatán no es la excepción. Dada su importancia y vulnerabilidad, es primordial establecer un monitoreo continuo del acuífero para conocer su estado actual y evolución, así como realizar estudios que nos permitan entender mejor este complejo sistema y su resiliencia.

## Un poco de historia

La importancia del agua para los pobladores de la península de Yucatán se remonta desde nuestros ancestros, los mayas. Según los historiadores, los mayas fueron una de las primeras civilizaciones en usar el agua subterránea ampliamente, dada la inexistencia de agua superficial en ríos y lagos en Yucatán. Muchas de las ciudades mayas se desarrollaron cerca de cenotes (estructuras naturales en roca caliza parcialmente inundadas resultado de la disolución y el derrumbamiento de la bóveda de cavernas cercanas a la superficie del terreno), los cuales eran usados como abastecimiento. Resulta que los españoles tuvieron serios problemas durante la conquista por la falta de fuentes de agua de fácil acceso: una forma de resistencia de la población maya era tapar el acceso a los cenotes antes de abandonar sus poblaciones. Aún en la actualidad, el acuífero sigue siendo la fuente de abastecimiento más importante de agua para la población, y prácticamente la única. Los pueblos de la península Yucatán obtienen su agua del acuífero, ya sea de sistemas municipales de abastecimiento o de pozos artesanales.

## ¿Qué hace vulnerable a este acuífero?

Aunque el concepto de vulnerabilidad puede ser complejo, podemos señalar que, en el caso del acuífero de la península de Yucatán, tres factores influyen decisivamente en ella: su naturaleza kárstica, que sea un acuífero costero y que sea

altamente heterogéneo. El acuífero es kárstico porque se desarrolla en rocas altamente solubles como la calcita y el yeso, componentes principales de la geología de la península. Los cenotes son una expresión de esta naturaleza que en ocasiones presentan una conexión directa de la superficie al agua subterránea, por lo que cualquier residuo vertido en este entrará en contacto directo con el valioso recurso del agua. La heterogeneidad hace referencia a que las propiedades del acuífero varían en el espacio. Esta heterogeneidad se produce por lo “fácil” que se disuelven las rocas que conforman el acuífero y se expresa, además de los cenotes, en cuevas y conductos de disolución por donde el agua puede moverse más rápido y cuya ubicación es difícil de conocer con precisión.

En lo que respecta a la intrusión salina, esta se da de manera natural por ser un acuífero costero: el acuífero es un lente de agua dulce que flota sobre agua salada. Pero, incrementos en el nivel medio del mar y las extracciones pueden hacer que el agua de mar penetre más tierra adentro y disminuya el espesor de agua dulce afectando directamente la cantidad de agua disponible para el aprovechamiento humano.

## ¿Cómo se estudia desde el punto de vista hidrogeológico un acuífero costero kárstico?

Los estudios en acuíferos kársticos son un reto por la limitada aplicabilidad de las técnicas clásicas usadas en hidrogeología. Por ejemplo, los modelos de estimación de direcciones de flujo son buenos para estudios regionales, pero tienen mayor incertidumbre a menor escala, por lo que se requiere de modelos especializados y más complejos para su estudio. En cualquier caso, los modelos hacen uso de datos de calidad para lograr sus objetivos. Desafortunadamente, no existen programas de monitoreo continuo del acuífero. Los esfuerzos para su monitoreo lo han realizado algunas instituciones educativas o gubernamentales en distintas ubicaciones por periodos cortos, usualmente, por la falta de recursos económicos.

## ¿Cómo obtener datos confiables sobre el acuífero de Yucatán?

Nosotros creemos que la respuesta reside en un programa de monitoreo. Es así como el Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (LANRESC) y el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) del Instituto de Ingeniería de la UNAM, establecen un programa de monitoreo en el Observatorio Costero para la Resiliencia (OCR) en Sisal, Yucatán. Este es uno de los siete OCR que se encuentran en implementa-

ción por parte del LANRESC. Uno de los objetivos principales del OCR en Sisal es estudiar la resiliencia al cambio climático en la costa de Yucatán, específicamente, los efectos del cambio climático en la erosión, inundación costera e intrusión salina, sus repercusiones socioambientales y la capacidad de respuesta ante estresores y *shocks*. Esto se realiza mediante los siguientes objetivos específicos: 1) caracterizar la dinámica actual mediante la medición y retroanálisis de variables atmosféricas, oceanográficas, morfológicas y geohidrológicas; 2) estimar la dinámica futura mediante la modelación de escenarios futuros; 3) ligarlo a procesos químicos, ecológicos y socio-económicos de forma interdisciplinaria para hacer partícipes a otros actores no académicos; y 4) evaluar la capacidad de adaptación y proponer medidas de mitigación a partir de los resultados obtenidos.

## ¿Qué se monitorea en el OCR de Sisal en materia de hidrogeología?

Nuestro monitoreo comenzó en 2017. Actualmente, se monitorean nueve pozos, los cuales, se pueden observar en la Figura 1. Se tiene planeado extender esta red conforme los recursos humanos y económicos lo permitan. En el OCR de Sisal se realiza el monitoreo continuo de salinidad en pozos costeros a diferentes profundidades y niveles piezométricos, así como perfiles mensuales de salinidad como variables base. Este monitoreo nos permitirá conocer el estado del acuífero

y la intrusión salina, así como su evolución, además de que estos datos son importantes en estudios de resiliencia y de modelación para proponer mejores estrategias de manejo del acuífero. Con estos datos, se ha producido una tesis de doctorado de la cual se derivaron dos artículos relacionados con la dinámica de este acuífero costero (Canul-Macario *et al.* 2020; Canul-Macario *et al.* 2021). Todos los resultados de los monitoreos en el OCR en Sisal se pueden visualizar en la siguiente liga: <http://ocse.mx/es/experimento/geohidrologia>.

Además de estas variables, de manera esporádica se han realizado otros monitoreos que también miden variables relacionadas al acuífero. Por ejemplo, en colaboración con la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), se realizó un estudio para caracterizar las propiedades hidráulicas de la duna de arena (Medina, 2020). También, se han realizado mediciones continuas de parámetros fisicoquímicos en manantiales para realizar una caracterización del acuífero costero, así como mediciones tanto en lagunas costeras como en manantiales que en ellas descargan para estudiar el fenómeno de intrusión de agua salina en dichos manantiales (Pacheco, 2018), y estudios para obtener información de la geomorfología de la costa yucateca usando datos de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT, Gómez-Nicolás *et al.*, 2018). Finalmente, en colaboración con la Facultad de Química de la UNAM, se han hecho campañas de colección de muestras de agua subterránea para la determinación de contaminantes emergentes.

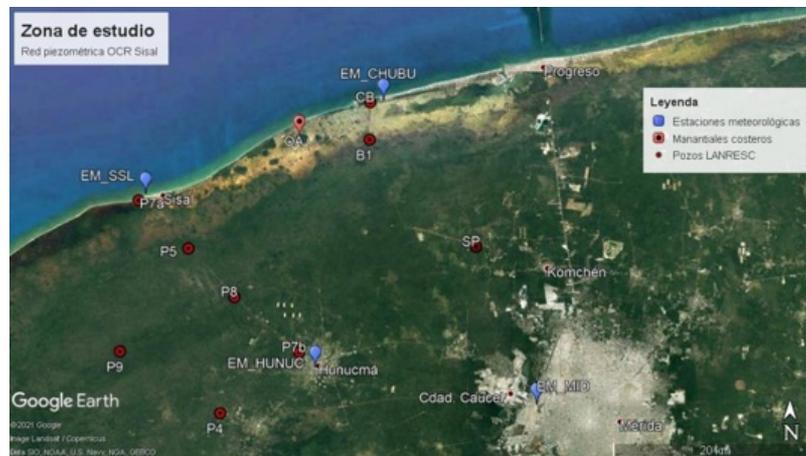


Figura 1. Pozos de monitoreo del Observatorio Costero para la Resiliencia en Sisal

## Herramientas computacionales, el pan de cada día del hidrogeólogo

Actualmente, nos hemos centrado en estudiar la disponibilidad de agua del acuífero de la costa yucateca, y el entendimiento de las interacciones entre el acuífero costero y el mar, a través de modelos numéricos. Por ejemplo, la figura 2 muestra los resultados de un modelo numérico regional para el acuífero de la península de Yucatán. Este modelo es desarrollado en MODFLOW usando la aproximación de medio poroso equivalente, y la paquetería FloPy de Python. Esta librería permite generar el modelo numérico usando *rasters* y otras herramientas de Sistemas de Información Geográfica que pueden ser fácilmente obtenidas usando el *software* libre Quantum Geographical Information System (QGIS). Los datos de precipitación usados son un promedio de la precipitación anual de 1902 a 2015, tomados del Atlas Climático Digital de México (Fernandez *et al.* 2015), asumiendo que la recarga es un porcentaje de 20% de la precipitación. Este es un mapa preliminar, el cual se mejorará al incorporar las diferentes metodologías que nos permiten estimar la recarga del acuífero, además de un análisis de incertidumbre según los datos usados para su generación.

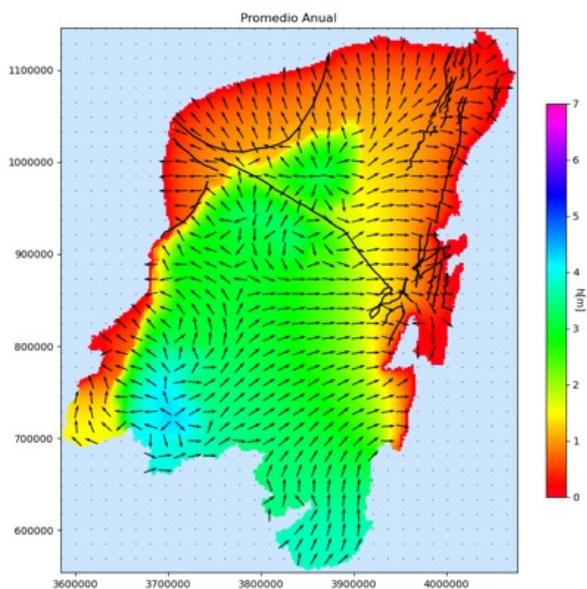


Figura 2. Modelo regional de flujo para la península de Yucatán

## ¿Qué podemos decir de la resiliencia del acuífero de Yucatán?

El estudio de resiliencia en el acuífero ha sido abordado de manera exploratoria con el concepto de *resiliencia ecológica*, considerando perturbaciones en la carga hidráulica y la salinidad del acuífero. Este concepto se ha basado en: 1) los umbrales de cambio de las variables estudiadas, 2) el tiempo de permanencia de los efectos de los estresores, 3) la interacción de escalas y 4) la capacidad de recuperación-adaptación del acuífero. Los resultados preliminares pueden ser observados en la Figura 3, la cual sugiere que el acuífero costero de Yucatán muestra resistencia y tiempos de recuperación menores a un día a perturbaciones de las mareas astronómicas (AT) e inversión de flujo en manantiales (FR); mientras que para el bombeo (P) y las mareas de tormenta (SS), se tienen permanencia de estas perturbaciones por períodos mayores. Particularmente, los eventos de corta duración como los huracanes (H) muestran la capacidad de reorganizar el ecosistema ofreciendo nuevos estados de equilibrio en la carga hidráulica y salinidad del acuífero por un período prolongado. Finalmente, el cambio climático muestra cambios importantes a futuro en el acuífero, considerando un aumento de la carga hidráulica y salinidad, por lo que las poblaciones en esta zona costera deberán considerar estrategias de adaptación para estas condiciones futuras, como la extracción de agua de pozos más lejanos de la costa o tratamientos de desalinización del agua marina.

## Oportunidades de investigación, tesis y colaboración

En definitiva, los trabajos de este observatorio han rendido frutos. Sin embargo, existe mucho potencial tanto con los datos como con nuestros estudiantes y colaboradores para sacar más provecho de la información generada: modelos más complejos que incorporen las características del acuífero kárstico que puedan ser usados para estudios locales, y que incorporen la incertidumbre en los resultados de las simulaciones; los efectos del cambio climático en este importante recurso son otros aspectos de la resiliencia. Esperamos que estos estudios sean de utilidad para la sociedad, hacia un mejor manejo y conservación de este importante recurso. |

# UNIDAD ACADÉMICA SISAL

## Referencias

---

Canul Macario, C. (2020). Dinámica de la interfase salina del acuífero de la costa noroeste de Yucatán y escenarios frente al incremento del nivel medio del mar, tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.

Canul-Macario, C.; Salles, P.; Hernández-Espriú, A. y Pacheco-Castro, R. (2021). Numerical modelling of the saline interface in coastal karstic aquifers within a conceptual model uncertainty framework. *Hydrogeol J.*

Fernández, A.; Zavala J.; Romero, R.; Conde, A. y Trejo R. (2015). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional

de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Gómez-Nicolás, M.; Ojeda, E.; Salles, P. y Flores-Orozco, A. (2018). Structural characterization of a coastal aquifer using time-lapse electrical resistivity tomography. *EGUGA*, 11853.

Medina J. (2020). Caracterización geohidrológica del acuífero de la Duna costera de Sisal, Yucatán. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Yucatán.

Pacheco, R.; Salles, P.; Canul-Macario, C. y Paladio-Hernández, A. (2018). Flow reversal in the coastal lagoon “La Carbonera” AGU Fall Meeting 2018.