

Hidrodinámica regional de Los Ríos, Tabasco, México

Regional hydrodynamics of Los Ríos, Tabasco, Mexico

Roger González-Herrera^{1,*}, Iván Cámara-Yamá¹, Ismael Sánchez y Pinto¹

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Avenida Industrias no Contaminantes por Periférico Norte, Tablaje Catastral 12685. Mérida, 97302, Yucatán, México.

*Autor para correspondencia: (R. González-Herrera) roger.gonzalez@correo.uady.mx

Cómo citar este artículo:

González-Herrera, R., Cámara-Yamá, I., Sánchez y Pinto, I., 2022, Hidrodinámica regional de Los Ríos, Tabasco, México; Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 74 (2), A170222. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2022v74n2a170222>

Manuscrito recibido: 22 de Agosto de 2021
Manuscrito corregido: 30 de Diciembre de 2021
Manuscrito aceptado: 15 de Febrero de 2022

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

La interacción del agua subterránea con el agua superficial es importante para estudiar los flujos tanto físicos como químicos en el ciclo hidrológico. Los sistemas de agua subterránea y agua superficial se han estudiado, por lo general, de manera separada, lo que dificulta la cuantificación de los flujos existentes entre ellos. Sin embargo, cada vez más se reconoce la importancia de entender cómo influye esta interfase en los balances hidrológicos, los ciclos geoquímicos, los ecosistemas y el cambio global. Para contribuir a este entendimiento, se llevó a cabo un estudio de la hidrodinámica regional de la zona de Los Ríos, Tabasco, México, en el que se siguió un enfoque de investigación de campo para estimar las interacciones entre el agua superficial y subterránea. El objetivo fue determinar la naturaleza actual de la interacción del agua subterránea con el agua superficial en la zona de estudio, enfocándose en la cuantificación del flujo de agua subterránea con base en información histórica. El análisis de los datos piezométricos indica que los gradientes hidráulicos son altos y sugiere tasas de recarga altas hacia los cuerpos de agua superficiales, incrementando significativamente el caudal de las corrientes. Se logró delimitar las zonas de recarga y descarga de aguas subterráneas utilizando una red de flujo.

Palabras clave: Interacción aguas subterráneas - aguas superficiales, hidrodinámica, piezometría, caudales, Tabasco.

ABSTRACT

Groundwater-surface water interaction is important to study both physical and chemical flows in the hydrological cycle. Groundwater and surface water systems have generally been studied separately, making the flows between them difficult to quantify. However, the importance of understanding the influence of this interface on hydrological balances, geochemical cycles, ecosystems, and global change, is increasingly recognized. To contribute to this understanding, a study of the regional hydrodynamics of the Los Ríos area, Tabasco, Mexico, was conducted. A field research approach was followed to estimate the interactions between surface water and groundwater. The objective was to determine the current nature of the interaction of groundwater with surface water in the study area, and focused on quantifying the former's flow based on historical information. The analysis of the piezometric data indicates that the hydraulic gradients are high, suggesting high recharge rates towards the surface water bodies that increase streamflow rates significantly. The groundwater recharge and discharge zones were delimited using a flow network.

Keywords: Groundwater - surface water interaction, hydrodynamics, piezometry, flow rates, Tabasco.

1. Antecedentes

Los asentamientos humanos se han establecido históricamente en torno a los recursos hídricos superficiales: costas, ríos, lagos y manantiales (Chapelle, 1997; Pastore *et al.*, 2010). A su vez, los asentamientos humanos han afectado el ciclo hidrológico a través del cambio de uso de la tierra, el cambio climático, el uso excesivo del agua, la redirección del agua y los cambios en la calidad del agua (Pastore *et al.*, 2010; Vörösmarty *et al.*, 2013). Por lo tanto, una buena comprensión de la interacción agua subterránea - agua superficial ayuda a comprender, analizar y trazar no solo la historia pasada, sino también la futura.

Los usuarios de los recursos hídricos aún visualizan los sistemas de aguas superficiales y subterráneas como elementos independientes. Para efectos legales y de política pública, el agua superficial está desvinculada del agua subterránea (Carmona-Lara *et al.*, 2017).

Es común que las autoridades que administran los recursos hídricos se refiere a la transferencia de agua de un río a un acuífero como “pérdidas” y, en el caso contrario como “recuperaciones”. Esto pone de manifiesto una evidente desvinculación entre ambos sistemas que causa problemas y conflictos en la administración y manejo de los recursos hídricos. Si bien toda Ley Nacional de Aguas debe perseguir la gestión integral de las aguas superficiales y subterráneas, en la práctica no siempre es posible el utilizar de manera coordinada las distintas fuentes de agua para satisfacer las demandas hídricas en algunas regiones del mundo (Levy y Xu, 2012).

El tema de la interacción del agua superficial con el agua subterránea ha recibido mucha atención como pieza clave de investigación ya que incrementa el entendimiento del ciclo hidrológico en una región (Lin *et al.*, 2018; Barthel y Banzhaf, 2016; Levy y Xu, 2012). En lugar de estudiar cada una de estas fuentes de agua de manera separada, entender su interacción da una mejor idea de las respuestas tanto a la dinámica natural como al cambio global (Saha *et al.*, 2017; Fleckenstein *et al.*, 2010).

Asimismo, entender el ciclo hidrológico implica estudiar tanto los receptores del recurso como el agua superficial, el agua subterránea y la atmósfera, y los intercambios de un receptor a otro. Se ha definido al agua subterránea como aquella que satura los poros en el subsuelo. El flujo del agua entre el subsuelo y la superficie está gobernado por la ecuación de Darcy para flujo en medios porosos saturados (ecuación 1).

$$q = K * i \quad (1)$$

Donde: q es la descarga específica [L/T], K es la conductividad hidráulica en el lecho del cuerpo de agua superficial [L/T], e i es el gradiente hidráulico en la interfase [-].

Aunque esta ecuación tiene potencial para cuantificar las interacciones, los flujos entre el agua subterránea y el agua superficial no están bien caracterizados (Winter *et al.*, 1998). Por definición, la frontera se encuentra bajo el agua, dificultando las mediciones que al ser puntuales, son insuficientes para caracterizar los flujos de agua al recargar al acuífero o descargar el agua subterránea.

La interfase entre el agua subterránea y el agua superficial ocurre cuando el nivel freático (el límite superior de la zona saturada de un acuífero libre) intersecta la superficie del terreno. En otras palabras, la interfase agua subterránea - agua superficial ocurre en las corrientes de los ríos, lagos, humedales y océanos. Las descargas ocurren debajo del nivel superficial del agua y prácticamente sólo se ven en los manantiales que son descargas puntuales. Independientemente del caso, se sabe que la descarga ocurre porque el agua superficial es una manifestación de la descarga del agua subterránea. Muchas corrientes se secarían entre períodos de lluvia si no recibieran descargas de aguas subterráneas, sin considerar aquellas que reciben descargas inducidas por el hombre o deshielo de glaciares. Al descender el nivel freático, los lagos y humedales pueden secarse. Aún en los grandes cuerpos de agua superficiales, la descarga de agua subterránea se ha reconocido como un componente importante del ciclo hidrológico

(Moore, 2010). Así, el agua subterránea es clave para la sustentabilidad de todos los recursos de agua superficiales (Alley *et al.*, 1999).

La interfase puede involucrar flujos de agua en ambas direcciones, es decir que los cuerpos de agua superficiales pueden ganar así como perder agua proveniente del acuífero. Por lo general, las descargas de agua subterránea ocurren en la orilla de estos receptores, según el concepto de sistema de flujo (Winter *et al.*, 1998; Moore, 2010; Alley *et al.*, 1999; McBride y Pfannkuch, 1975), que pueden ganar agua (recibiendo flujo del agua subterránea) en una orilla y perder agua (recargar flujo al acuífero) en la otra. Las corrientes también pueden ganar o perder agua y ambos procesos pueden ocurrir a lo largo de diferentes tramos de un río.

Las estimaciones de la descarga de agua subterránea son muy variables para los ríos debido a la amplia variedad de escenarios naturales en los que se encuentran. Zektser y Loaiciga (1993) proporcionaron estimaciones del porcentaje de la escorrentía de los ríos como flujo base de agua subterránea en todo el mundo que oscilan entre el 35 y el 55 %.

En 24 regiones de los Estados Unidos, delineadas por Winter *et al.* (1998), la contribución del agua subterránea al caudal fluvial osciló entre el 14 y el 90 % con una media del 55 %. Por otro lado, Rudolph *et al.* (2007) determinaron que la disminución progresiva de la extensión superficial de la zona lacustre en el sur de la Cuenca del Valle de Toluca, México, podría estar asociada a la explotación intensiva del agua subterránea en las proximidades. Así, la disminución de la recarga de agua superficial y el flujo lateral de las montañas circundantes serían los factores principales que incrementan el drenaje superficial y/o aumentan las pérdidas por infiltración, como resultado de la despresurización de los sedimentos subyacentes a la zona lacustre.

Otro caso de explotación intensiva del acuífero y sus consecuencias ocurre en el área de Los Sotos, del Parque Nacional Doñana (Huelva), España, que ha sufrido cambios notables. y que fueron

simulados en función de los efectos a mediano y largo plazo (Juárez *et al.*, 2012). Arumi *et al.*, (2012) presentan casos de estudio en Chile en los que se enfatiza que el uso de modelos simples como la transposición de caudales, crecidas o supuestos de igualdad de rendimiento específico pueden generar resultados erróneos cuando existen cuencas donde las condiciones geológicas producen importantes trasvases de agua subterránea. Durante el período de flujo base el agua del río generalmente se deriva del agua subterránea, a menos que existan descargas de aguas por actividades humanas.

Debido a la evidente predominancia de los flujos superficiales en el Estado de Tabasco, es común encontrar una amplia variedad de investigaciones enfocadas al estudio de ríos y lagos. En contraparte, la hidrología subterránea ha sido relegada a un segundo plano, incluso para las instituciones públicas relacionadas con la administración del agua. Se conoce poco acerca de la dinámica que presenta el agua subterránea de la región.

Gracias a la abundancia y proximidad de los ríos y lagos, la población tabasqueña no necesitó explotar el recurso del subsuelo sino hasta las décadas de 1970 y 1980 debido al incremento de la población. Este fenómeno obligó a los asentamientos a aumentar el número y el volumen de los pozos de extracción para abastecerse de agua (INEGI, 2001).

La fama de Tabasco como un territorio hídricamente abundante se debe a sus condiciones geológicas - climáticas que resultan favorables para la renovación del agua (CONABIO, 2019; Ramos-Herrera *et al.*, 2012). En las porciones sur - sureste (en el municipio de Tenosique), y suroeste (en el municipio de Huimanguillo), es donde se presentan las principales elevaciones de terreno que conforman una zona de recarga importante debido a las altas precipitaciones que registran (INEGI, 2001).

Esta investigación se llevó a cabo para comprender mejor el movimiento del agua subterránea y su interacción con el agua superficial. La información y conocimiento generados apoyarán a las autoridades a nivel municipal, estatal y federal

en la gestión del agua de la región “Los Ríos”, al poniente del municipio Balancán en Tabasco. Se pretende que este estudio sea útil en la toma de decisiones durante contingencias hídricas y ambientales como son inundaciones por desborde de ríos y el transporte de contaminantes a los cuerpos de agua superficiales y al acuífero.

1.1. ZONA DE ESTUDIO

Tabasco es uno de los territorios más importantes de la República Mexicana en materia hídrica (CONABIO, 2019). Sus numerosos cuerpos de agua superficial, vegetación y consecuentes paisajes naturales le han valido el sobrenombre de “El Edén”. La región de Los Ríos, se ubica en la porción oriental del estado de Tabasco, hacia

el poniente del municipio de Balancán (Figura 1). La zona de estudio se encuentra en el área que corresponde en su totalidad a la provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur; estructura llana formada por grandes cantidades de aluvión acarreado desde la Sierra de Chiapas por el Río Usumacinta y sus afluentes (CONAGUA, 2015). Geomorfológicamente la zona está constituida por una llanura costera de relieve escaso con altitudes menores a los 100 m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar) como resultado de la acumulación de grandes depósitos fluviales que la han moldeado. Geológicamente está representada por formaciones sedimentarias del Terciario, como calizas y areniscas, y del Cuaternario, como conglomerados y depósitos palustres, lacustres y aluviales (CONAGUA, 2015).

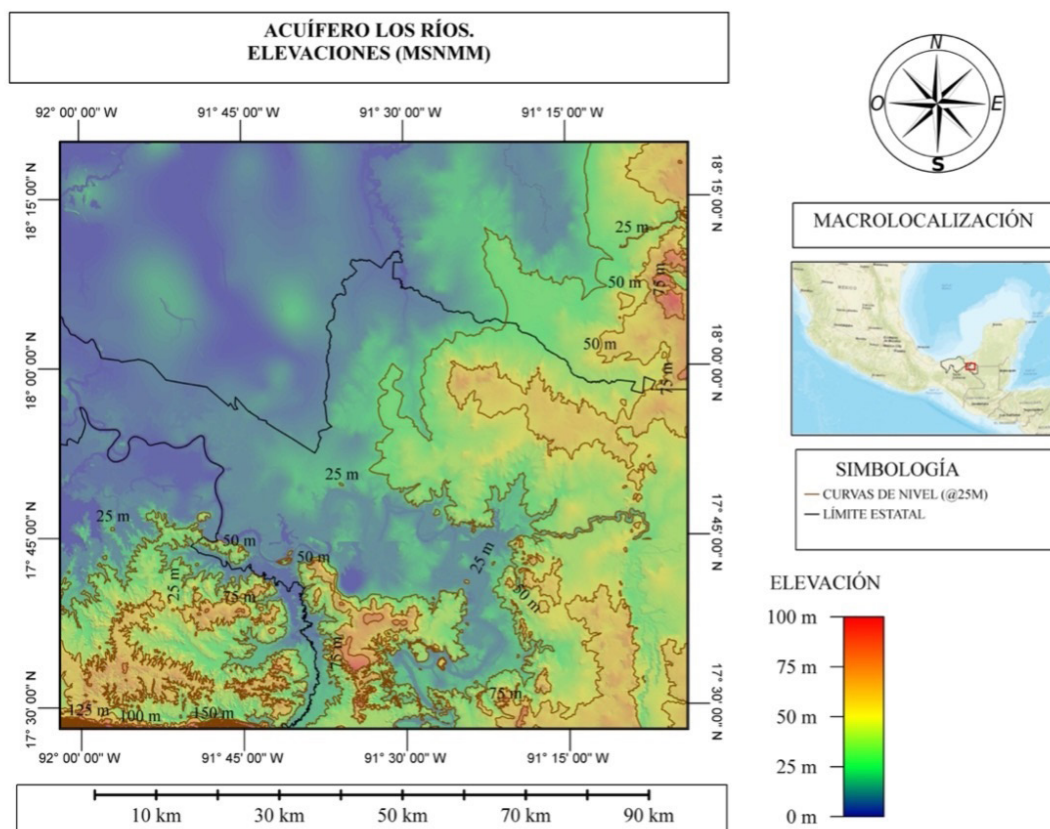


Figura 1 Localización de la zona de estudio en el municipio de Balancán, Tabasco, México.

El clima de la región de Los Ríos se caracteriza por ser cálido con régimen normal, debido a sus parámetros de temperatura y humedad (CONAGUA, 2015). La temperatura en Balancán oscila anualmente entre los 21.1 y los 32.6 °C, registrándose mínimas promedio de hasta 18.2 °C y máximas promedio de 36.3 °C. Además, se identifican regímenes anuales promedio para la precipitación (1,670.8 mm) y evaporación (1,158 mm). El proceso de evapotranspiración está principalmente regulado por la temperatura, su valor promedio anual ronda los 1,628 mm; se sugiere que la evapotranspiración real sobrepasa este valor debido a la deficiencia de humedad en los meses de abril y mayo (CONAGUA, 2015).

La figura 2 muestra un climograma representativo de Balancán, obtenido de un análisis estadístico realizado a los parámetros registrados en estaciones climáticas de la zona de estudio, el cual corrobora que este municipio cumple con el patrón estatal de lluvias y temperatura.

Se observa la presencia de precipitación todo el año, siendo más abundante en el período junio

- octubre, mismo que el INEGI (2019) indica como temporada de lluvias; además, se ratifica que la evaporación más pronunciada se registra en los meses con mayores temperaturas (abril y mayo), los cuales coinciden con la temporada de estiaje (noviembre - mayo) en la zona de interés (CONAGUA, 2015).

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el territorio de la entidad representa apenas el 1.3% de la superficie nacional y, sin embargo, cuenta con 129,331.2 hectáreas de cuerpos de agua divididas entre 33 ríos y 17 lagunas (INEGI, 2014), que ocupan aproximadamente 5.25 % de la superficie de Tabasco. Entre los ríos principales se encuentran el Grijalva, el Usumacinta y el Mezcalapa (Figura 3).

El sistema geohidrológico subyacente abarca una superficie de 1,329 km² en su totalidad, y cubre parcialmente los municipios de Balancán, Centla, Jonuta y Emiliano Zapata (CONAGUA, 2015).

En su mayoría, los aprovechamientos que han sido monitoreados por la Comisión Nacional del

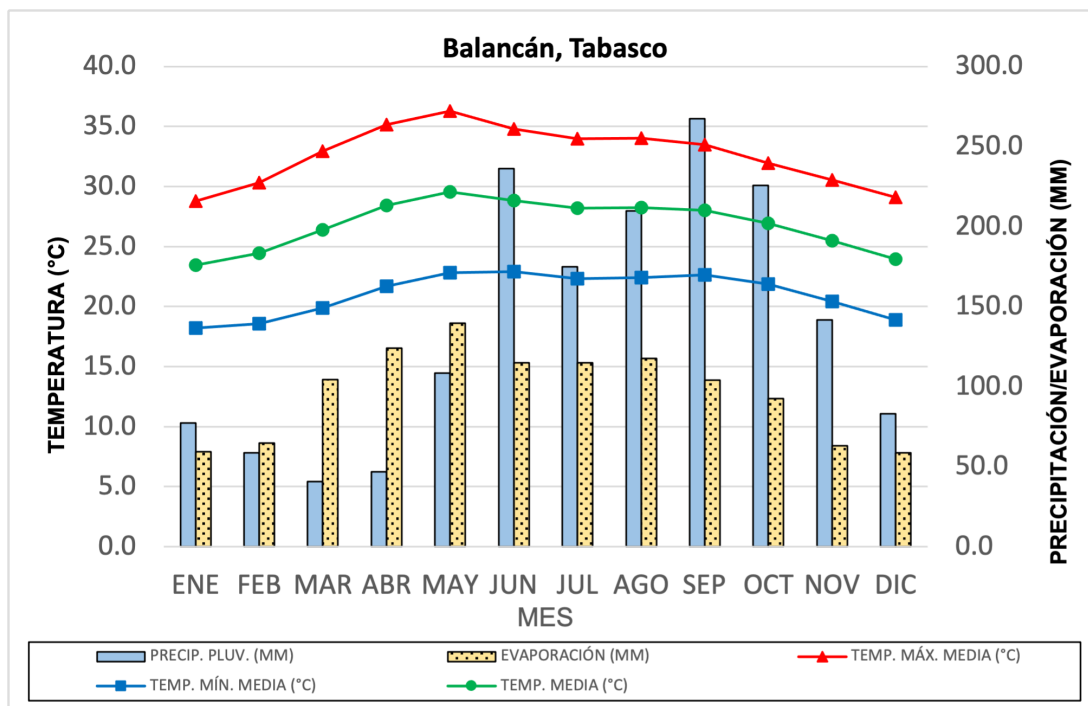


Figura 2 Climograma característico Municipal de Balancán, Tabasco. (Elaboración propia con datos de Díaz-Padilla *et al.*, 2006).

Agua (CONAGUA) desde la década de 1990 se encuentran en el municipio de Balancán (Figura 1). En términos generales, Tabasco puede considerarse un solo acuífero debido a la uniformidad de sus condiciones, con excepción de las zonas con altas elevaciones al sur de la entidad. Debido a la gran capacidad de infiltración del subsuelo, las aguas precipitadas son transportadas a través del acuífero después de la recarga hasta desembocar en el Golfo de México (INEGI, 2001).

2. Métodos

Para el análisis de las variables involucradas en esta investigación se requirieron herramientas computacionales entre las cuales se distinguen un software de interpolación y representación gráfica

de los parámetros piezométricos y un sistema de información geográfica (SIG) para la ubicación espacial de los sitios de interés.

La Subgerencia Técnica de la Dirección Local de CONAGUA, en Villahermosa, Tabasco, proporcionó datos del nivel freático históricos del acuífero que representan escenarios temporales en intervalos de tres años para el período que va de 2002 - 2017. La dependencia también suministró la ubicación georreferenciada de cada uno de los pozos censados en la zona.

En cuanto al marco cartográfico, se recuperó información ráster y vectorial del portal electrónico del INEGI. Entre las principales contribuciones figuran: el modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) de tipo LiDAR (Light Detection and Ranging, por sus siglas en inglés) en alta resolución (cinco metros) a escala

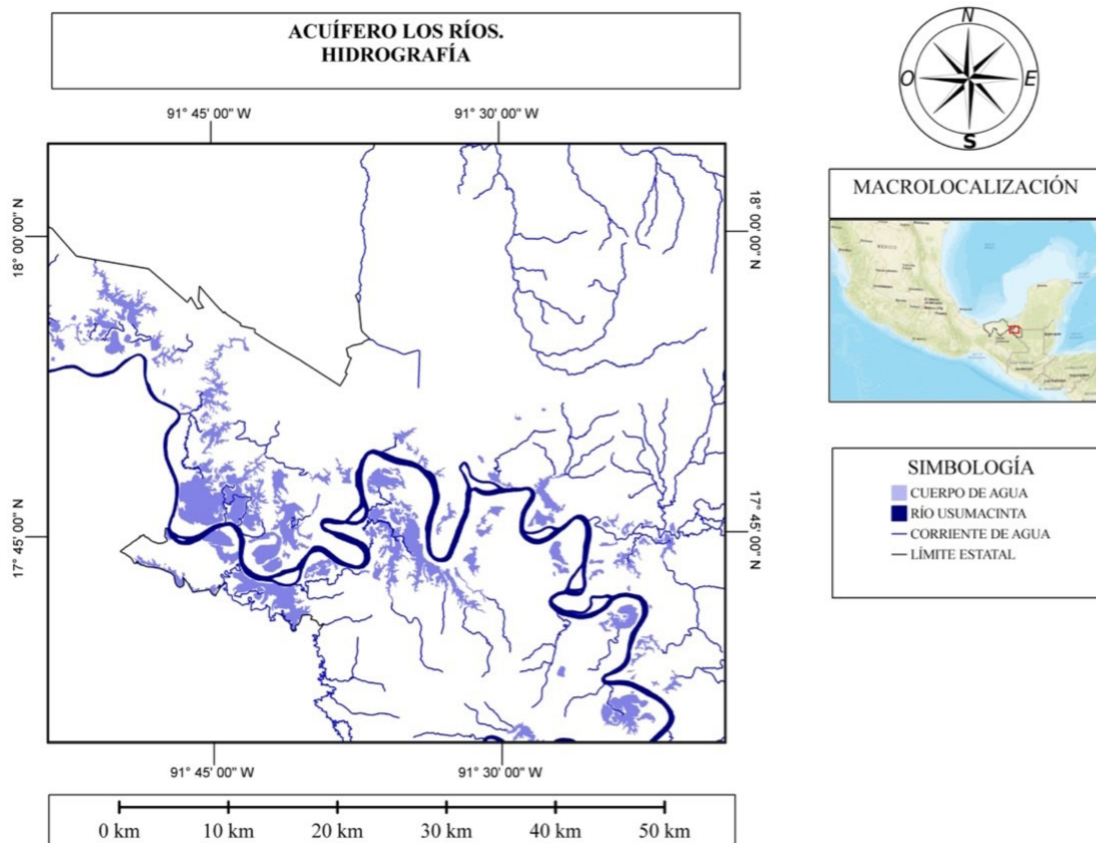


Figura 3 Distribución espacial de los cuerpos y corrientes de agua en la zona de estudio.

1: 10,000; límites geopolíticos del municipio de Balancán y sus similares circundantes; y mapas de características físicas y demográficas.

Los registros históricos de 49 puntos de monitoreo del agua subterránea fueron complementados con otros 284 puntos propuestos que se localizaron en las márgenes de cuerpos de agua superficial. Al tratarse de un acuífero libre, los puntos complementarios corresponden a puntos de nivel freático cuyos valores fueron estimados mediante el DEM.

Con los datos de profundidad de agua en pozos de la red piezométrica existente, los potenciales hidráulicos del acuífero para cada uno de los escenarios temporales fueron calculados. Los contornos equipotenciales para cada año fueron definidos mediante el análisis de los potenciales hidráulicos. Los datos fueron dispuestos en el área de estudio mediante un mallado que, al ser interpolado, genera las curvas de nivel freático. Adicionalmente, las cuadrículas se promediaron para obtener las curvas características de la zona para el período 2002 - 2017. Los vectores de dirección de flujo fueron determinados mediante la interpretación de cada uno de los escenarios modelados. Los gradientes hidráulicos resultan del cálculo de las pendientes de cada uno de los modelos piezométricos generados. Se han representado gráficamente en mapas para los escenarios correspondientes y para los valores característicos del lapso analizado.

La relación del acuífero con el sistema hidrográfico suprayacente se determinó analizando las diferencias de potenciales hidráulicos entre escenarios anuales consecutivos y comparando el resultado con la localización de los ríos y lagos circundantes. La estimación de los caudales de ingreso y egreso se realizó empleando una simplificación de la Ley de Darcy. Esta primera aproximación de los gastos se calculó mediante datos conocidos de los pozos “Provincia” (caudal de entrada) y “Chablé” (caudal de salida). Éstos corresponden a los puntos extremos de la red de flujo de agua subterránea, tanto aguas arriba como aguas abajo, respectivamente. La transmisividad fue tomada de las pruebas de bombeo ejecutadas

por CCT (1991), el gradiente hidráulico fue determinado al aproximar sus valores con los mapas correspondientes.

3. Resultados y discusión

Los datos obtenidos de la Subgerencia Técnica de la Dirección Local de CONAGUA, en Villahermosa, Tabasco, fueron depurados para seleccionar una red conformada por pozos de monitoreo ubicados en la zona de estudio. Los registros de la red piezométrica se realizaron de manera intermitente y discontinua, sin un patrón establecido en tiempo, pero contenían suficiente información para el análisis realizado. Es así que se establecieron escenarios temporales clave, según la frecuencia de lecturas, considerando los meses correspondientes a la época de lluvias. Se trató de tener una buena cobertura de la zona de estudio. Los pozos seleccionados fueron ubicados mediante el *SIG Global Mapper* (Blue Marble Geographics, 2016). Adicionalmente se ubicaron puntos auxiliares en los márgenes de los ríos y cuerpos de agua perennes, según se muestra en la figura 4. Estos puntos auxiliares complementaron la información para mejorar la precisión de la modelación ya que se ubicaron considerando una interacción directa entre los sistemas hidrológicos superficial y subterráneo. Los potenciales hidráulicos del acuífero se calcularon restando a la altitud del brocal del pozo de monitoreo la profundidad a nivel estático registrada. Con los valores resultantes, se generaron contornos equipotenciales anuales con el apoyo del programa *Surfer*, utilizando el interpolador *Kriging*.

Los niveles piezométricos máximos de cada escenario se presentaron en el extremo noreste de la zona de estudio; éstos tienen valores de hasta poco más de 45 m.s.n.m. Los valores mínimos se presentaron en la porción más occidental del municipio de Balancán coincidiendo con las llanuras de menor altitud y con las márgenes del Río Usumacinta, hacia el cual migra el agua subterránea. La Figura 5 muestra el mapa promedio para el período 2008 - 2017.

Se contrastaron las diferencias entre los contornos de curvas equipotenciales para diferentes periodos de tiempo que, al analizar los mapas, ponen de manifiesto una reducción paulatina del nivel freático. En particular, esto puede observarse en el extremo noreste de la zona de estudio hasta aproximarse a las márgenes del Río Usumacinta, principal cauce de la zona, lo cual sugiere que el acuífero aporta agua al sistema superficial suprayacente (Figura 6).

De manera similar a los contornos equipotenciales, se generaron mapas con los valores de gradientes hidráulicos calculados para los registros en los años considerados para el estudio. Una síntesis de lo anterior se presenta en la figura 7, como un mapa de contornos de gradientes hidráulicos promedio del acuífero para el período 2008 - 2017. Se resalta que los gradientes hidráulicos más pronunciados se presentan en la zona noreste donde se encuentran los relieves topográficos con mayor altitud.

Se distinguieron dos zonas principales, una al Este, con valores mayores a 50 m/km que presenta variaciones con tendencia a incrementar sin exceder 250 m/km; y otra al oeste, donde se observan las pendientes menos pronunciadas y que también permanecen presentes en algunas zonas que corresponden al Río Usumacinta y demás cuerpos de agua perennes.

Los mapas de curvas equipotenciales permiten identificar las zonas de entrada y salida natural de agua subterránea en la zona de estudio. Peñuela Arévalo y Carrillo Rivera (2013) aplicaron la teoría de sistemas de flujo como una herramienta para delimitar las zonas de recarga y descarga en la porción centro-sur de la Mesa-Central, México. Mostraron la utilidad de la herramienta analizando indicadores para obtener la localización de áreas prioritarias, aportando una aproximación del funcionamiento del acuífero.

El ingreso de volúmenes importantes de agua subterránea en la zona se da principalmente de

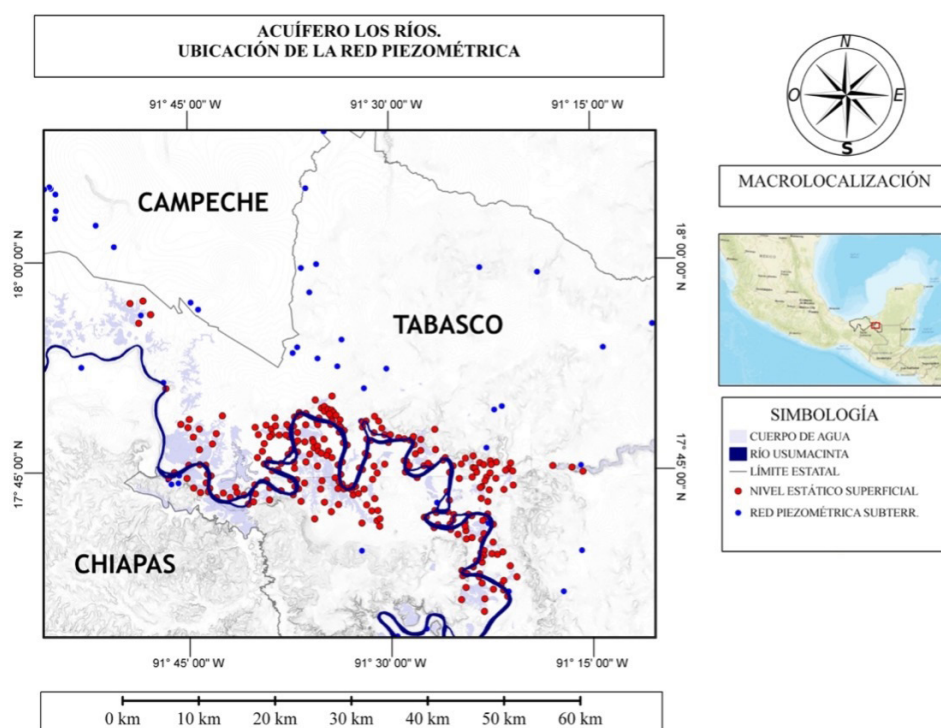


Figura 4 Ubicación de pozos de monitoreo en la zona de estudio.

tres maneras: (1) El agua subterránea que proviene de porciones circundantes al acuífero que aporta por flujo regional; (2) El agua superficial que escurre en la cuenca hidrológica suprayacente que aporta mediante el cauce al acuífero; y (3) La precipitación pluvial de la zona que se infiltra a través de las unidades hidrogeológicas más permeables. Los egresos del agua subterránea se dan principalmente mediante el flujo natural del acuífero, tal como se ha caracterizado anteriormente (Figuras 5 y 6).

El análisis histórico de los quince años correspondientes al período estudiado (2002 - 2017) indica que el agua subterránea fluye del noreste hacia el oeste.

INEGI (2012) sugiere la existencia de una unidad geohidrológica predominante en la zona, de material no consolidado con posibilidades altas. Ésta se compone de tres unidades geohidrológicas que difieren entre sí según el rendimiento del material: rendimiento bajo (8B, rendimiento menor a los 10 litros por segundo), rendimiento

medio (7M, cuyo gasto oscila entre los 10 y los 40 litros por segundo), y rendimiento alto (6A, cuyo rendimiento es mayor a los 40 litros por segundo). A grandes rasgos, se trata de unidades con permeabilidad variable, pero con capacidad para almacenar agua. De acuerdo a esta descripción, se puede interpretar que prácticamente toda la zona de estudio tiene condiciones favorables para la recarga y almacenamiento del agua.

Los suelos que componen esta unidad, en la zona de estudio, son principalmente aluviales en las áreas cercanas al Río Usumacinta, conglomerados en las zonas de mayor altitud, y la presencia esporádica de areniscas. Existen también suelos lacustres cercanos a cuerpos de agua menores. No se encontraron fallas geológicas lo suficientemente cercanas a la zona de estudio que puedan afectar el comportamiento hidrodinámico del acuífero. Se determinaron los caudales de entrada y salida de agua subterránea utilizando valores de transmisividad determinados en la zona de estudio mediante pruebas de bombeo, reportadas por CCT (1991).

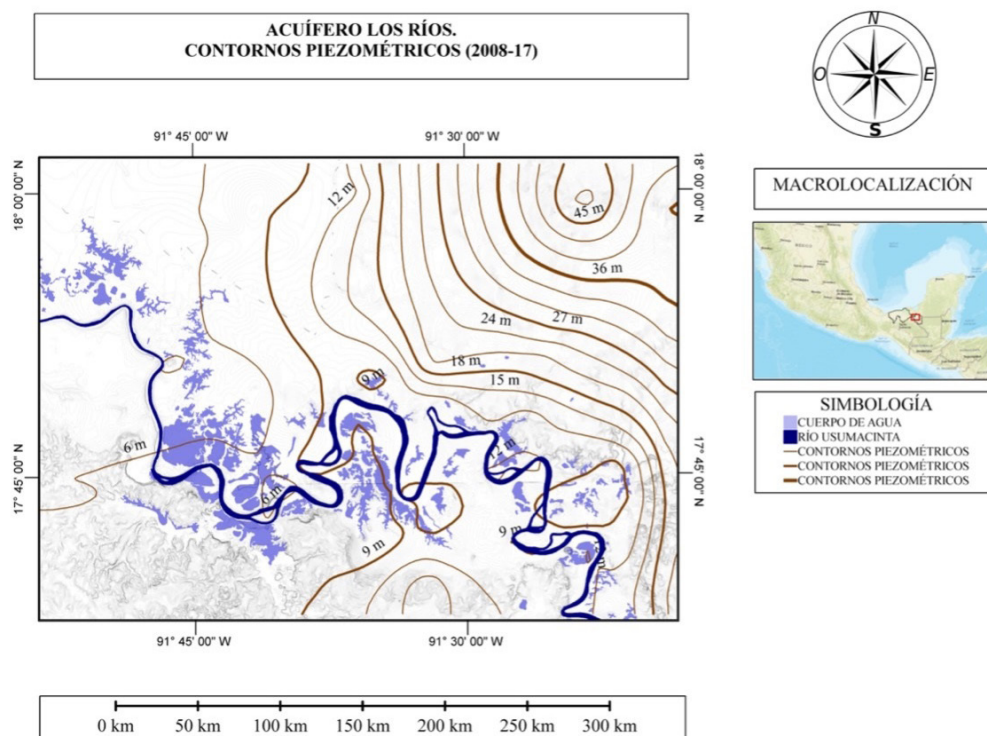


Figura 5 Potencial hidráulico promedio del Acuífero “Los Ríos”, Balancán, Tabasco (Período 2008 - 2017).

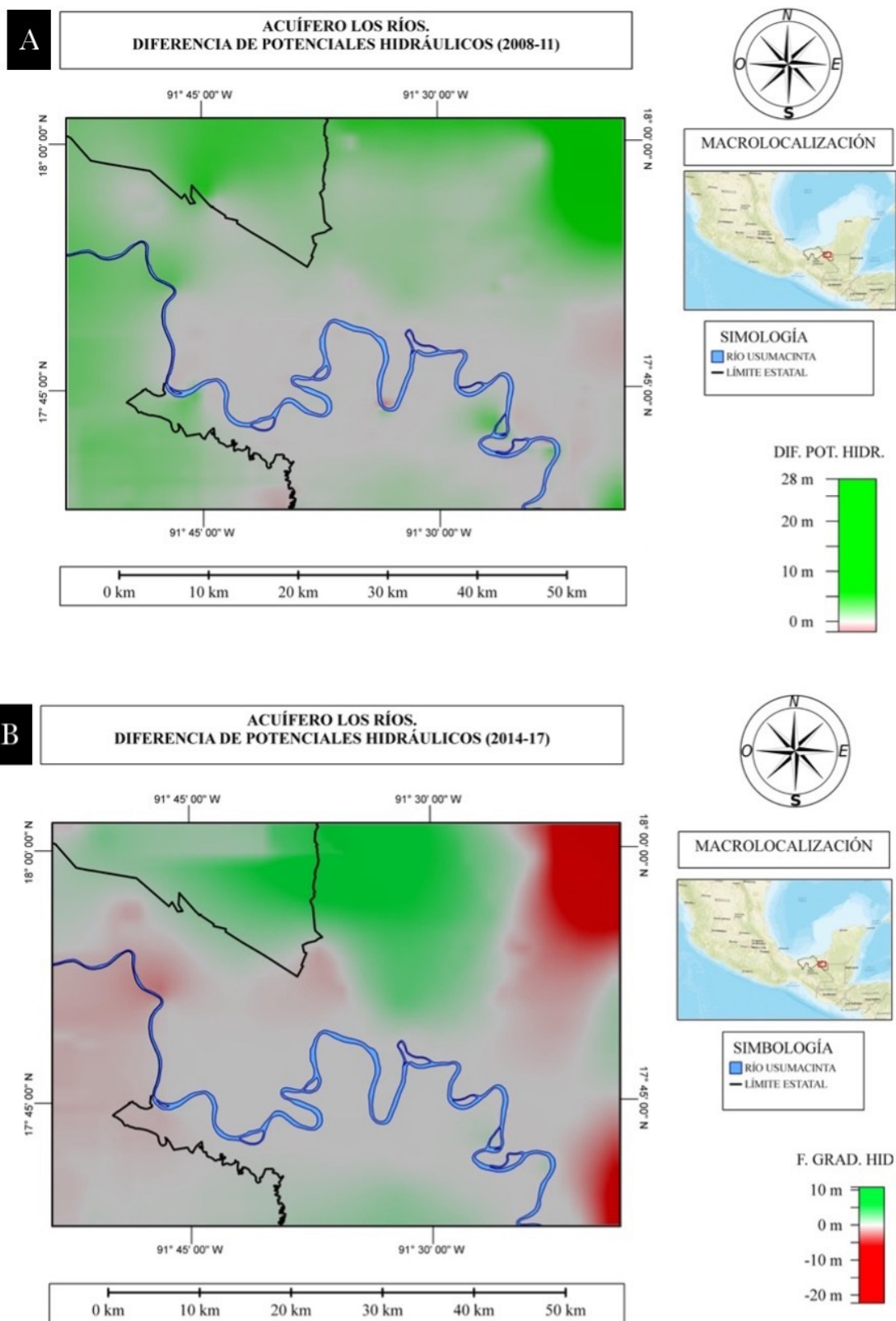


Figura 6 Diferencia del nivel freático entre: (A) 2008 y 2011 y (B) 2014 y 2017.

Aplicando la ecuación de Darcy (ecuación 1) se obtienen los resultados que se presentan en la tabla 1. Como primera aproximación, la entrada del agua subterránea al acuífero “Los Ríos” es de $5.57 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ por cada metro de longitud transversal al flujo, y la salida es de $3.03 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ por metro. Las redes de flujo constituyen una gran herramienta en el análisis de la interacción agua subterránea - agua superficial. La complejidad de este tipo de estudios radica en que: (i) Monitorear bajo el agua es difícil; la evaluación visual para ayudar a identificar la recarga o descarga es limitada. (ii) La interfase de recarga y descarga de agua subterránea es espacialmente heterogénea; la heterogeneidad geológica es muy difícil de caracterizar, pero puede afectar los flujos de agua a través de ésta. Pueden ocurrir variaciones de un orden de magnitud (o más) en el flujo en la escala de metros. Además, los sistemas de aguas superficiales pueden tener capas finas que ejercen control

sobre los flujos verticales y son particularmente difíciles de identificar. (iii) La naturaleza transitoria de la interfaz. Las zonas de recarga y descarga pueden variar con el tiempo, por lo que se necesitan datos continuos para capturar esta variación. Las zonas de recarga pueden convertirse en zonas de descarga y viceversa. Estas variaciones en el tiempo son causadas por diferentes factores, desde la variación natural de la precipitación hasta las alteraciones inducidas por el hombre en el uso de la tierra y el agua.

Un monitoreo de los flujos en la interfase de las aguas subterráneas y superficiales podría proporcionar un indicador de los impactos de la climatología. Es probable que el ciclo hidrológico se intensifique en escenarios de cambio climático al manifestarse tormentas más fuertes y sequías más prolongadas. Estos impactos combinados con posibles cambios en el uso de la tierra podrían tener efectos superpuestos y potencialmente

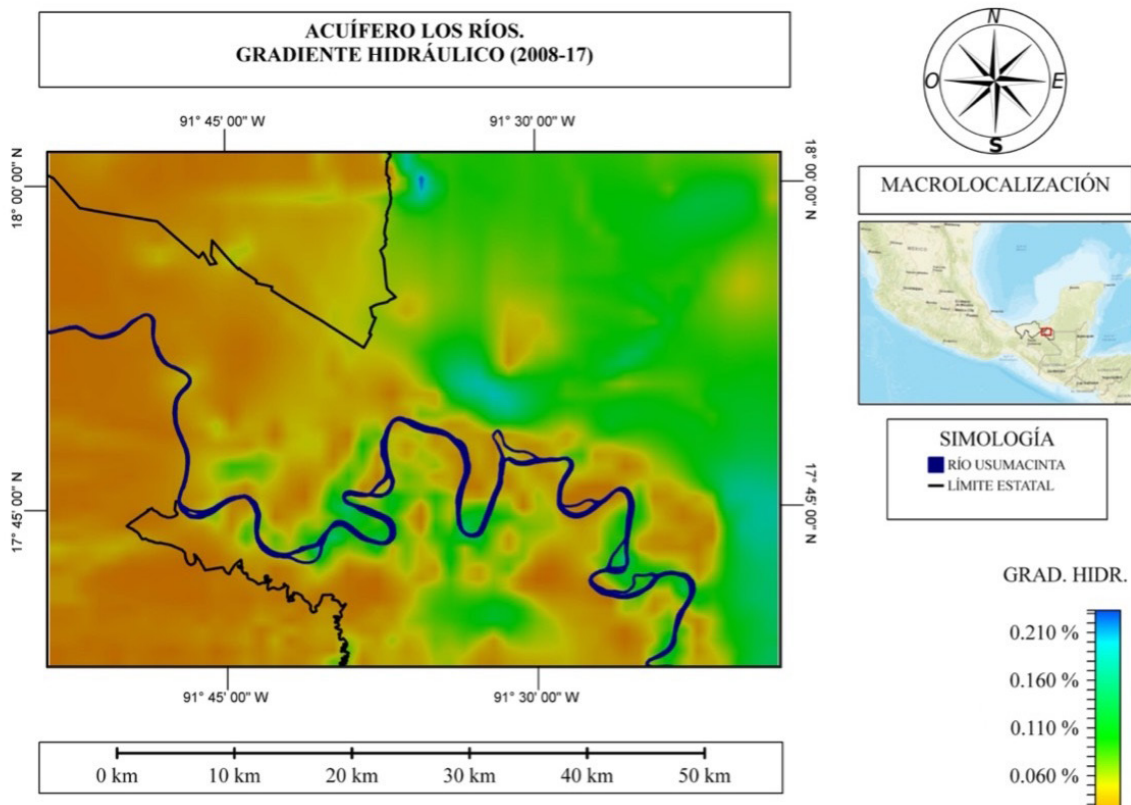


Figura 7 Gradientes hidráulicos promedio del Acuífero “Los Ríos”, Balancán, Tabasco (Período 2008 - 2017).

amplificados (Juckem *et al.*, 2008). En la década pasada Ca- rillo-Sosa *et al.*, (2012) estudiaron las inundaciones de la región con el objetivo de dar una solución con base en análisis hidráulicos realizados por medio de modelación matemática. Se comprobó que los esfuerzos dedicados a controlar las inundaciones no serían suficientes ya que ninguna de las alternativas, planteadas como medidas de mitigación de los niveles de inundación, las evitarían, por lo que entonces se concluyó rescatar la filosofía de convivencia con el agua (Alatríste-Domínguez, 2019). El cambio climático no representa la única presión sobre los recursos naturales y la abundancia del agua; el sistema hidrológico de la zona de estudio ha estado sujeto a varios procesos de degradación ambiental, una comprensión más profunda de estos temas a escala regional se puede consultar en Andrade-Velázquez y Medrano-Pérez (2020).

Nooren (2017) presenta un estudio sobre la influencia del clima y las actividades humanas enfocado a las cuencas de los ríos Usumacinta y Grijalva. Estudios previos han enfatizado el impacto de las sequías prolongadas y su posible relación con el declive social, así como el colapso de la cultura Maya en el preclásico y clásico dando como resultado el abandono de las ciudades (Hoggarth *et al.*, 2016; Medina-Elizalde *et al.*, 2016; Lentz *et al.*, 2014), pero se ha prestado muy poca atención a episodios de eventos de precipitación extraordinarios e inundaciones que también pudieron haber impactado la sociedad Maya. Esto puede probarse por el hecho de que las inundaciones, así como las sequías, son un tema importante representado en los antiguos códigos mayas (Thompson, 1972); sin embargo, la incertidumbre en el balance hidrológico y las diferentes escalas de los modelos climáticos dificultarían una evaluación de los impactos, y por ende, una predicción (Loaiciga *et al.*, 1996; Green *et al.*, 2011). Nooren *et al.*, (2017) plantearon la hipótesis de que el clima durante el Período Preclásico Medio pudo haber sido desfavorable para la intensificación de la agricultura basada en el maíz, que formó la economía de subsistencia responsable del desarrollo de muchas sociedades mesoamericanas vecinas, lo que explica

el desarrollo relativamente retrasado de la civilización Maya en esta área.

4. Conclusiones

Históricamente el acuífero de la región de “Los Ríos”, en su porción analizada, no presenta variaciones bruscas en cuanto a su dirección de flujo, la cual va de este - noreste a oeste. A pesar de que existen variaciones en los niveles freáticos, éstos suelen oscilar dentro de los mismos rangos de elevación.

Debido al comportamiento piezométrico en las márgenes del Río Usumacinta, se concluye que el agua subterránea recarga los cuerpos de agua superficiales en la zona.

Los gradientes hidráulicos han sido caracterizados, notándose un paralelismo entre sus zonas con mayor valor y las elevaciones más pronunciadas tanto de los niveles freáticos como del terreno natural. Existen zonas bajas que corresponden a los puntos de egreso del agua tanto superficial como subterránea, hacia el oeste - noroeste.

Las recargas del acuífero en la porción analizada se dan mediante precipitación y sus flujos de ingreso. Las descargas se dan mediante su aporte a los cuerpos de agua, los volúmenes subterráneos egresantes y en menor proporción por actividades antropogénicas.

El análisis de la evolución de los niveles piezométricos permite contar con las herramientas técnicas necesarias para la toma de decisiones en casos de contingencias ambientales, también provee información útil para la reglamentación del uso racional de las aguas subterráneas.

Se sugiere establecer programas de monitoreo que garanticen la cobertura total del área para mejorar la cantidad y calidad de los registros históricos. Es necesario ubicar estaciones piezométricas en las márgenes de los principales cuerpos de agua perennes para poder describir con mayor exactitud la relación que éstos guardan con el acuífero. De igual manera, el establecimiento de estaciones hidrométricas es importante para medir de manera indirecta el caudal base de las corrientes principales en la zona de estudio.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, análisis y adquisición de datos, redacción del manuscrito e interpretación: Roger González Herrera; *Conceptualización, análisis y adquisición de datos, redacción del manuscrito e interpretación:* Iván Cámara Yamá; *Análisis, redacción de manuscrito:* Ismael Sánchez y Pinto.

Financiamiento

Esta investigación no contó con algún financiamiento.

Agradecimientos

La investigación fue ejecutada gracias a las aportaciones de la Subgerencia Técnica de la Dirección Local de CONAGUA, en Villahermosa, Tabasco, la cual brindó los datos piezométricos históricos de la zona, así como antecedentes de sus estudios hidrogeológicos. Se agradecen la intervención y observaciones del Cuerpo Académico de Hidráulica e Hidrología de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán y al M.I. Irving Osorio-Santos quien apoyó en el procesamiento de los datos manipulados mediante el SIG.

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de interés relacionados con este manuscrito.

Referencias

Alatríste-Domínguez, A., 2019, Caso de estudio: Control de inundaciones en Tabasco, Universidad de las Américas Puebla Escuela de Ingeniería, Tesis de Licenciatura, 126 p.
Andrade-Velázquez, M., Medrano-Pérez, O.R., 2020, Precipitation patterns in Usumacinta

and Grijalva basins (southern Mexico) under a changing climate: *Revista Bio Ciencias* 7, e905. <https://doi.org/10.15741/revbio.07.e905>

Alley, W.M., Reilly, T.E., Franke, O.L., 1999, Sustainability of ground-water resources. US Department of the Interior, US Geological Survey Circular 1186. Denver, CO, USA.

Arumi, J.L., Rivera, D., Muñoz, E., Billib, M., 2012, Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile: *Obras y Proyectos*, 12, 4 – 13. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132012000200001>

Barthel, R., Banzhaf, S., 2016, Groundwater and surface water interaction at the regional-scale: A review with focus on regional integrated models: *Water Resources Research*, 30, 1 – 32. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-015-1163-z>

Blue Marble Geographics, 2016, GlobalMapper Versión 18.0. Getting Started Guide. Traducida al Español por ENGESAT. Enero de 2017. www.bluemarblegeo.com/global-mapper/product/download_complete.php

Carmona-Lara, C., Carrillo-Rivera, J.J., Hatch-Kuri, G., Huizar-Álvarez, R., Ortega-Guerrero, M.A., 2017, Ley del Agua Subterránea: una propuesta: Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, 87p.

Carrillo-Sosa, J.J., Domínguez-Mora, R., Pedrozo-Acuña, A., Gutiérrez-Aviña, G., Velázquez-Suárez, J.E., 2012, Estudio para determinar la viabilidad de mejorar el drenado en la cuenca baja de los ríos San Pedro y San Pablo, Usumacinta, Macuspana, Tulijá y Palizada (modelo zona de “Los Ríos”) y análisis del funcionamiento hidráulico de la zona de Los Pantanos de Zentla, en Acciones complementarias del Plan Hídrico Integral de Tabasco. (Contrato SGIH-GDIT-SGOPR-UNAM-II-2012-01). Informe Final, Elaborado para la Comisión Nacional del Agua.

CCT (Compañía Consultores de Ciencias de la Tierra S. A. de C. V.), 1991, Estudio Geohidrológico de la Zona Los Ríos Estado de

- Tabasco, Tomo Tabasco: México, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Chapelle, F.H., 1997, *The hidden sea: Ground water, springs, and wells*: Geoscience Press, Tucson, AR, USA.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), 2019, *La biodiversidad en Tabasco. Estudio del Estado*, Vol. 1, Primera edición: Tlalpan, Estado de México, CONABIO.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2015, *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Los Ríos (2707), Estado de Tabasco*. México: Diario Oficial de la Federación, 20 de abril de 2015.
- Díaz-Padilla, G., Ruiz-Corral, J.A., Medina-García, G., Cano-García, M.A., Serrano-Altamirano, V., 2006, *Estadísticas climatológicas básicas del Estado de Tabasco 1961-2003*. Campo Experimental Cotaxtla. Libro Técnico Núm. 12: Veracruz, México, INIFAP, CIRGOC.
- Fleckenstein, J.H., Krause, S., Hannah, D.M., Boano, F., 2010, Groundwater-surface water interaction: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics: *Advances in Water Resources*. 33(11), 1291-1295. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.09.011>
- Green, T.R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J.J., Allen, D.M., Hiscock, K.M., Treidel, H., Aureli, A., 2011, Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater: *Journal of Hydrology*, 405(3-4), 532-560. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.002>
- Hoggarth, J.A., Breitenbach, S.F.M., Cullerton, B.J., Ebert, C.E., Masson, M.A., Kennet, D.J., 2016, The political collapse of Chichén Itzá in climatic and cultural context: *Global and Planetary Change*, 138, 25-42. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.12.007>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2001, *Síntesis de Información Geográfica del Estado de Tabasco*: Aguascalientes, México, INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2012, *Guía para la interpretación cartográfica hidrológica*, Serie II. Aguascalientes, México, INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2014, *Conociendo México*, 4 edición: Aguascalientes, México, INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2019, *Cuéntame sobre México. Información por Entidad*, México, INEGI. Recuperado el 31 de julio de 2021, disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tab/territorio/clima.aspx>
- Juárez, I., Custodio, E., Manzano, M., Higuera, H., 2012, Relación aguas superficiales-aguas subterráneas y recarga del acuífero de Los Sotos, Doñana, España, en *Simpósio del Agua en Andalucía*. "Agua y Constitución: VIII Simposio del Agua en Andalucía": Cádiz, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 1479-1489.
- Juckem, P.F., Hunt, R.J., Anderson, M.P., Robertson, D.M., 2008, Effects of climate and land management change on streamflow in the driftless area of Wisconsin: *Journal of Hydrology*, 355(1-4), 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.010>
- Lentz, D.L., Dunning, N.P., Scarborough, V.L., Magee, K.S., Thompson, K.M., Weaver, E., Carr, C., Terry, R.E., Islebe, G., Tankersley, K.B., Grazioso-Sierra, L., Jones, J.G., Buttles, P., Valdez, F., Ramos-Hernandez, C.E., 2014, Forests, fields, and the edge of sustainability at the ancient Maya city of Tikal: *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)*, 111(52), 18513-18518. <https://doi.org/10.1073/pnas.1408631111>
- Levy, J., Xu, Y., 2012, Review: Groundwater management and groundwater/surface-water interaction in the context of South African water policy: *Hydrogeology Journal*, 20, 205-226. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0776-4>
- Lin, J., Ma, R., Hu, Y., Sun, Z., Wang, Y., McCarter, C.P.R., 2018, *Groundwater*

- sustainability and groundwater/surface-water interaction in arid Dunhuang Basin, northwest China: *Hydrogeology Journal*, 26, 1559–1572. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1743-0>
- Loaiciga H.A., Valdes J.B., Vogel R., Garvey J., Schwarz H., 1996, Global warming and the hydrologic cycle: *Journal of Hydrology*, 174(1-2), 83-127. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02753-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02753-X)
- McBride, M.S., Pfannkuch, H.O., 1975, The distribution of seepage within lakebeds. *U.S. Geological: Survey Journal of Research*, 3(5), 505-512.
- Medina-Elizalde, M., Burns, S.J., Polanco-Martínez, J.M., Beach, T., Lases-Hernández F., Shen, C., Wang, H., 2016, High-resolution speleothem record of precipitation from the Yucatan Peninsula spanning the Maya Preclassic Period: *Global and Planetary Change*, 138, 93-102. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.10.003>
- Moore, W.S., 2010, The effect of submarine groundwater discharge on the ocean: *Annual Review of Marine Science*, 2, 59-88. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081019>
- Nooren, K., 2017, Holocene evolution of the Tabasco delta – Mexico; impact of climate, volcanism and humans: *Utrecht, Netherlands, The Netherlands Organization for Scientific Research: Utrecht Studies in Earth Sciences*, 144.
- Nooren, K., Hoek, W.Z., Winkels, T., Huizinga, A., van der Plicht, H., van Dam, R.L., van Heteren, S., van Bergen, M.J., Prins, M.A., Reimann, T., Wallinga, J., Cohen, K.M., Minderhoud, P., Middelkoop, H., 2017, The Usumacinta-Grijalva beach-ridge plain in southern Mexico: a high-resolution archive of river discharge and precipitation: *Earth Surface Dynamics*, 5, 529-556. <https://doi.org/10.5194/esurf-5-529-2017>
- Pastore, C.L., Green, M.B., Bain, D.J., Muñoz-Hernandez, A., Vörösmarty, C.J., Arrigo, J., Brandt, S., Duncan, J.M., Greco, F., Kim, H., Kumar, S., Lally, M., Parolari, A.J., Pellerin, B., Salant, N., Schlosser, A., Zalal, A., 2010, Tapping environmental history to recreate America's colonial hydrology: *Environmental Science and Technology*, 44(23), 8798-8803. <https://doi.org/10.1021/es102672c>
- Peñuela Arévalo, L.A., Carrillo Rivera, J.J., 2013, Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México: *Boletín del Instituto de Geografía*, 81, 18-32.
- Ramos-Herrera, S., Broca-Martínez, L.F., Laines-Canepa, J.R., Carrera-Velueta, J.M., 2012, Tendencia de la calidad del agua en ríos de Tabasco, México: *Ingeniería – Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, UADY*, 16(3), 2017-217.
- Rudolph, D., Sultan, R., Garfias, J., McLaren, R., 2007, Análisis de la interacción del agua superficial y subterránea, y su influencia en la extinción de zonas húmedas: *Ingeniería Hidráulica en México*, 22(1), 15 – 30.
- Saha, G.C., Li, J., Thring, R.W., Hirshfield, F., Paul, S.S., 2017, Temporal dynamics of groundwater-surface water interaction under the effects of climate change: A case study in the Kiskatinaw River Watershed, Canada: *Journal of Hydrology*, 551, 440-452. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.008>
- Thompson, J.E.S., 1972, A commentary of the Dresden codex. A Maya hieroglyphic book: Philadelphia, Pennsylvania, USA, American Philosophical Society.
- Vörösmarty, C.J., Pahl-Wostl, C., Bunn, S.E., Lawford, R., 2013, Global water, the anthropocene and the transformation of a science: *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 539-550. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.005>
- Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., Alley, W.M., 1998, Ground water and surface water: A single resource. U.S. Geological Survey circular 1139. Denver, CO, USA.
- Zektser, I.S., Loaiciga, H.A., 1993, Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past, present and future: *Journal of Hydrology*, 144(1-4), 405-427. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90182-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90182-9)