

## Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio

### *Identification of Potential Groundwater Recharge and Discharge Areas in the Ayuquila-Armeria River Basin Using GIS and Multi-Criteria Analysis*

Rodrigo Alejandro Hernández-Juárez,\* Luis Manuel Martínez Rivera,\*\* Liliana Andrea Peñuela-Arévalo\*\*\* y Samuel Rivera-Reyes\*\*\*\*

Recibido 24/03/2019. Aprobado 14/01/2020. Publicado 31/03/2020.

**Resumen.** Esta investigación busca identificar las zonas de recarga y descarga del agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería en los estados de Jalisco y Colima. La identificación de estas zonas se logró mediante un análisis multicriterio con la teoría de los sistemas de flujo (TSF). Esta teoría permite obtener una visión sistémica del ambiente, integrando diversos elementos de la naturaleza, además de reconocer el agua subterránea como agente geológico causante de una gran variedad de procesos y manifestaciones en la superficie a través de condiciones naturales contrastantes entre la zona de recarga y descarga de agua subterránea. La integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Análisis Multicriterio (AMC) permitió identificar los sitios con mayor potencial de recarga y descarga analizando geología, suelo, topoformas, pendiente, vegetación e índice topográfico de humedad (ITH). La superficie con alto potencial de recarga varía de 21% a 80%, mientras que la superficie de descarga, de 4% a 30%. Las principales zonas potenciales de recarga son la sierra de Cacoma-Manantlán,

la sierra Verde, la sierra de Quila, la sierra de Tapalpa y el complejo volcánico del Nevado de Colima. Por su parte, las zonas de descarga se encuentran principalmente en las planicies costeras de Jalisco y Colima, así como en una zona de lagos interiores en San Marcos, Sayula y Zapotlán. Otras zonas de descarga las constituyen las planicies y los valles intermontanos de Unión de Tula y Autlán-El Grullo, así como los fondos de valles en V en determinadas zonas de la cuenca.

**Palabras clave:** Agua subterránea, sistemas de flujo, acuíferos, recarga, descarga, río Ayuquila.

**Abstract.** This research seeks to identify groundwater recharge and discharge areas in the administrative aquifers of the Ayuquila-Armeria river basin in the states of Jalisco and Colima, Mexico. The Ayuquila-Armeria river basin is one

\* Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara. Avenida Independencia Nacional núm. 151, Centro, C. P. 48900, Autlán de Navarro, Jalisco, México. Email: rambasu@yahoo.com.

\*\* Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara. Avenida Independencia Nacional núm. 151, Centro, C. P. 48900, Autlán de Navarro, Jalisco, México. Autor para correspondencia. Email: lmartinez@cucsor.udg.mx.

\*\*\* Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente (ITESO). Periférico Sur Manuel Gómez Morín núm. 8585, C. P. 45604, San Pedro Tlaquepaque, Jalisco, México. Email: lilianapenuela@gmail.com.

\*\*\*\* College of Science, Dept. of Biology, Utah State University 5305, Old Main Hill, Logan, UT, 84322-5305, E. U. Email: samuel.rivera@usu.edu.

of the 15 most important of the 100 rivers running across the Pacific slope, and is among the 43 most important rivers at the country level. The regional climate is warm-humid in lowlands and subhumid temperate in highlands, with a summer rainy season (June to October) and a dry season the rest of the year. The basin shows a striking relief: from sea level to 4260 m a.s.l. at Nevado de Colima. The identification of these areas was based on a multi-criteria analysis of surface indicators of recharge and discharge areas supported by the flow systems theory (FST). This allows a systemic view of the environment, integrating various elements of nature, in addition to acknowledging groundwater and geological agent that causes a wide variety of processes and manifestations on the surface. The integration of Geographic Information Systems (GIS) and the Multi-Criteria Analysis (MCA) made possible to evaluate the potential recharge/discharge at the regional level by analyzing physical variables such as lithology, soil, relief, slope, vegetation, precipitation, and a topographic humidity index. In the study area, the territory with high recharge potential ranges from 21% to 80%; the area with low and very low recharge potential, from 4% to 30%. The main potential recharge areas are located in the upper portion of mid-elevation and low mountains covered by pine-oak, oak, and tropical deciduous forests, and grasslands, and to a lesser extent, fir and mountain cloud forests. Soil types include mainly Regosol, Leptosol, Cambisol, Luvisol, Andosol, Umbrisol, and Phaeozem in slopes of 15%-30% covering units of rhyolitic tuff, andesite-basalt, andesite, lahar-pyroclastic rock, granite-granite diorite,

and limestone. These areas are located mainly in Sierra de Cacoma-Manantl, Sierra Verde, Sierra de Quila, Sierra de Tapalpa, and the Nevado de Colima volcanic complex. For its part, discharge areas are found mainly in the coastal plains of Jalisco and Colima, associated with Calcisol, Arenosol, Fluvisol, Planosol, Gleysol, Solonchak, and Vertisol soils, and with with halophytic-hydrophytic grassland, bulrush, and mangrove vegetation. These are located in inland-lake areas in San Marcos, Sayula, and Zapotlán. Other discharge areas are the plains and intermontane valleys of Union de Tula and Autlán-El Grullo, as well as the bottom of V-valleys in certain areas of the basin. These can act as natural hydraulic boundaries of flow systems, limiting the amount of groundwater in each zone. The lateral alternation of recharge and discharge areas implies that the water recharged in a particular region may flow to a number of discharge areas, i.e., the water discharged in a given region may come from different regions. The above has important implications in the estimation of the availability estimated from the water balance, since groundwater may flow to more than one discharge area within the same "administrative" aquifer. This type of studies are a first approach providing innovative evidence to the systemic study of groundwater, i.e., the recharge-discharge areas. Their application positively supplements the results of the water balance used in the official evaluation of groundwater availability in Mexico.

**Key words:** groundwater, flow systems, aquifers, recharge, discharge, Ayuquila river

## INTRODUCCIÓN

El agua subterránea tiene un papel cada vez más importante para satisfacer las necesidades de agua dulce; es una fuente confiable de agua en los tiempos de falta de lluvia y nieve, puede ser utilizada de manera flexible y es menos susceptible que el agua superficial a la contaminación (Siebert *et al.*, 2010, p. 1863). Sin embargo, en diferentes regiones del mundo las reservas de agua subterránea están bajo una gran presión. Muchos de los principales acuíferos del mundo están experimentando aceleradas tasas de reducción en sus reservas, ya que el agua subterránea se extrae a tasas más altas de las que se pueden reponer naturalmente (Famiglietti, 2014, p. 946).

De acuerdo con el World Water Development Report 2012 de la ONU, México es uno de los 10 países con mayor consumo de agua subterránea en el mundo (UNESCO, 2012, p. 85); actualmente ocupa el séptimo lugar, con  $33 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ , por encima de países como Arabia Saudita (FAO,

2016). La Comisión Nacional del Agua (Conagua) es la institución responsable de administrar, planificar y preservar el agua en México en los ámbitos federal, estatal y municipal. Esta institución delimitó 653 acuíferos en el país, los cuales, junto con las 731 cuencas hidrográficas y un cálculo de la disponibilidad media anual en estas unidades, son la base de la política hídrica (Hatch, 2017, p. 155). Sin embargo, el número de acuíferos catalogados por la Conagua como "sobreexplotados" ha incrementado con el tiempo, mientras otros enfrentan los fenómenos de intrusión salina o salinización de sus suelos, situación que ha obligado al gobierno federal a publicar una veda indefinida en 175 acuíferos (Carrillo-Rivera *et al.*, 2016, p. 7).

A pesar de la existencia de estas vedas, como en el caso de los acuíferos administrativos Autlán (1417) y Jiquilpan (1420) dentro de la cuenca del río Ayuquila-Armería, el número de concesiones y los volúmenes concesionados se han incrementado de manera importante en los últimos años,

lo que ha provocado que estas unidades pasen de una situación favorable de disponibilidad a una de déficit en tan sólo dos o tres años. El sistema de concesiones no se utiliza como instrumento de gestión y control del agua subterránea, lo que ha provocado el sobreconcesionamiento de los acuíferos (Hernández *et al.*, 2019, p. 16). El cálculo de la disponibilidad media anual de agua subterránea y su delimitación de los acuíferos son dos de los aspectos en los que converge la mayor parte de los conflictos sobre el agua subterránea en México. La metodología oficial establecida en la NOM-011-CNA-2015 incurre en errores considerables al pasar por alto la calidad química del agua y su movimiento en el subsuelo, entre otros. Los límites laterales y verticales de los acuíferos están fuera de los límites y la naturaleza geológica, hidráulica, de vegetación y suelo, así como de la trayectoria, dimensión, velocidad y jerarquía de los sistemas de flujo de agua subterránea; es necesario el conocimiento y la aplicación para definir realmente la superficie a administrar (Carrillo-Rivera *et al.*, 2016, p. 7), así como para el cálculo de volúmenes de agua subterránea que son base para la toma de decisiones en el país.

La TSF permite comprender el funcionamiento del agua subterránea, ya que logra un análisis sistémico y la evaluación de su interacción con otros componentes del ambiente. Reconoce el movimiento gravitacional de agua subterránea como un agente geológico causante de una gran variedad de procesos y fenómenos naturales que se manifiestan en la superficie a través de condiciones contrastantes entre las zonas de recarga y descarga, las cuales son uno de los componentes estratégicos del funcionamiento sistémico del agua subterránea (Tóth, 2009, p. 95). El presente trabajo busca identificar las zonas de recarga y descarga del agua subterránea en los acuíferos de la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el análisis de indicadores superficiales con la TSF. La identificación de estas zonas se basa en un AMC dentro de los SIG para evaluar el potencial de recarga y descarga a nivel regional, integrando diversos factores ambientales. La identificación de estas zonas permitirá obtener una primera aproximación al funcionamiento del agua subterránea y

su dinámica en los acuíferos de la cuenca del río Ayuquila-Armería.

## ANTECEDENTES

Los principales estudios relacionados con el agua subterránea en el área analizada son los hidrológicos, a nivel estatal, en Jalisco y Colima (Inegi, 1995; 2001); algunos estudios geohidrológicos en determinadas regiones, como el Valle Autlán-El Grullo (SARH, 1978); la información de las diferentes cartas geológicas-mineras del Servicio Geológico Mexicano (SGM), así como estudios hidrogeológicos con el enfoque del balance hídrico para la determinación y actualización de la disponibilidad en determinados acuíferos (Conagua, 2002a; 2002b; 2002c; 2008; 2010; 2011; SGM, 2007). No se encontró hasta ahora estudio alguno del agua subterránea según los sistemas de flujo, por lo que se trata de un enfoque inédito del estudio del agua subterránea en la región.

### Teoría de los sistemas de flujo

La TSF permite representar el ambiente hidrogeológico mediante un modelo conceptual que integra parámetros geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, edáficos y vegetación que influyen en el régimen del flujo de agua subterránea. El mapeo de fenómenos naturales generados por el flujo gravitacional de agua subterránea es uno de los métodos para estudiar y caracterizar los sistemas de flujos regionales de este tipo de agua, ya que sus manifestaciones en superficie se pueden asociar con los diferentes segmentos de los sistemas de flujo (Tóth, 2009, p. 92). Los sistemas de flujo se constituyen por líneas de flujo que se originan en una zona de recarga específica, desplazándose a través de una extensión territorial determinada por la profundidad de la roca basamento, y terminan en una zona de descarga específica. Este recorrido le otorga diferentes propiedades físico-químicas al agua por el grado de interacción agua-roca, de acuerdo con la profundidad y la longitud de recorrido (Figura 1).

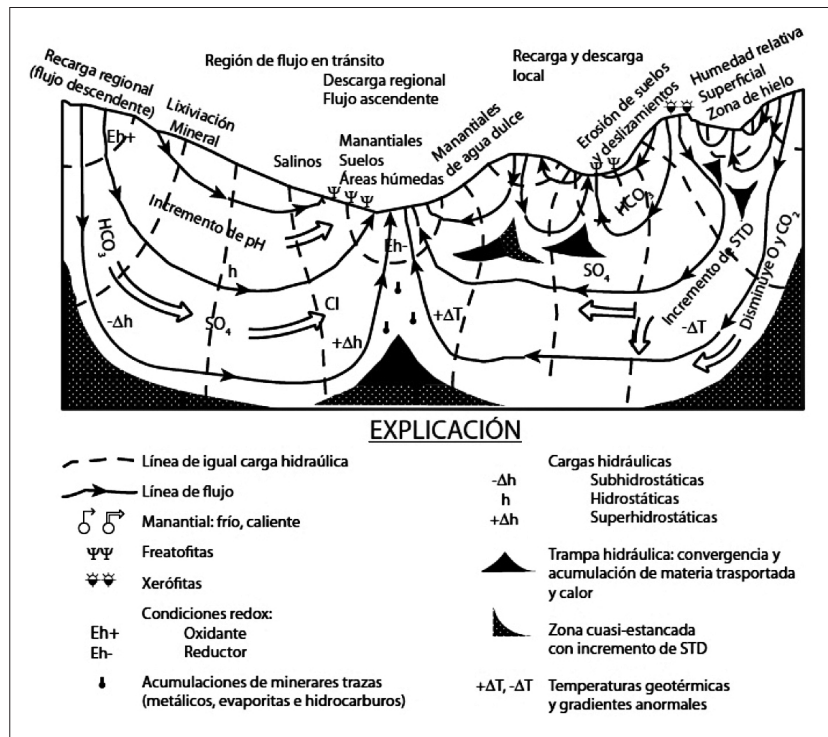


Figura 1. Efectos y manifestaciones de los flujos gravitacionales en la cuenca. Fuente: Tóth (2009).

### Descripción de las zonas de recarga y descarga

Las zonas de recarga reúnen una serie de características que propician la infiltración de agua hasta alcanzar el nivel freático.<sup>11</sup> Un primer indicador de estas zonas es la conductividad hidráulica de la roca, la cual permite la infiltración del agua de lluvia. En estas zonas el nivel freático es profundo, y el suelo es generalmente ácido y poco desarrollado, con poca cantidad de materia orgánica y bajas concentraciones de sodio y sales (Peñuela-Arévalo y Carrillo-Rivera, 2013, p. 24). En cambio, las zonas de descarga, cuyas propiedades son más visibles, se presentan en una elevación topográfica más baja respecto a donde se origina la recarga; el agua tiene un movimiento preferencial vertical ascendente desde el subsuelo, contribuyendo, junto con el escurrimiento superficial, a la formación de cuerpos de agua (lagos, caudal base de los ríos,

lagunas costeras, etcétera). Estas zonas pueden estar representadas por un manantial, un lago, un suelo salino y/o un nivel de agua subterránea somero. Los suelos asociados tienden a ser más salinos y alcalinos (posiblemente sódicos), tornándose, en general, más desarrollados, con mayor contenido de materia orgánica, y llegan a tener rasgos hidromórficos. La vegetación asociada sobrevive en regiones permanentemente inundadas (vegetación freatofita) y/o tolerantes a la salinidad (vegetación halófila), y/o yeso (vegetación gipsófila). Entre estas dos zonas se encuentra la zona de tránsito, con circulación lateral del agua (Peñuela-Arévalo y Carrillo-Rivera, 2013, p. 24).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La cuenca del río Ayuquila-Armería se encuentra entre los estados de Jalisco y Colima en las coordenadas 18.9 a 20.5 Lat N y 102.4 a 103.4 Long O, la cual se forma por la unión de las subcuencas

<sup>11</sup> El nivel freático es la superficie de un cuerpo de agua en subsuelo, donde la presión del agua es exactamente igual a la atmosférica y representa el límite superior de la zona saturada (Price, 2003, p. 27).

Ayuquila, Tuxcacuesco y Armería. El río Ayuquila-Armería es uno de los 15 ríos más importantes de 100 existentes en la vertiente del Pacífico, y se encuentra entre los 43 más importantes en el ámbito nacional (Graf-Montero *et al.*, 2002, p. 146). El clima en la región es cálido subhúmedo, aunque en las zonas más altas se encuentra el templado subhúmedo, con una estación lluviosa en verano

(junio a octubre), y una estación seca el resto del año. La precipitación media anual es 985 mm y la temperatura promedio anual es 22.2 °C, con una amplitud térmica de 5.4 °C. La cuenca presenta un intenso relieve: desde el nivel del mar a los 4 260 m s. n. m., el Nevado de Colima; 2 880 m s. n. m. en la Sierra de Manantlán, y 2 820 m s. n. m. en la Sierra de Tapalpa (Figura 2).

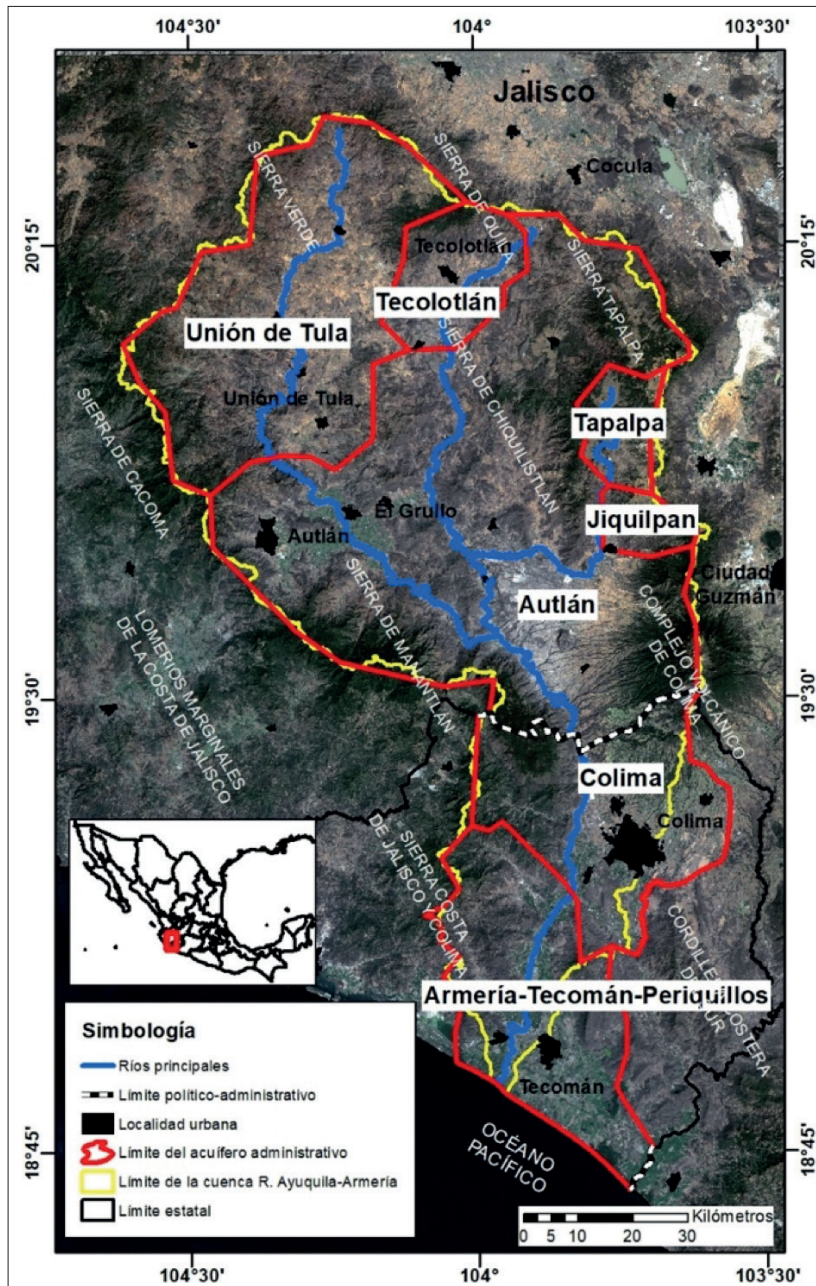


Figura 2. Límites de la cuenca y acuíferos administrativos de la cuenca del río Ayuquila-Armería. Fuente: elaboración propia con información de Inegi (2010), Conagua (2015) y NASA *et al.* (2009).

## Estratigrafía

La porción occidental de la cuenca fue emplazada por grandes cuerpos de rocas intrusivas (batolito) de composición granito-granodiorita, los cuales provocaron fuertes deformaciones o dislocaciones en las rocas preexistentes. Durante el Terciario se originaron los depósitos de rocas volcánicas extrusivas que cubren gran parte del área, formándose al mismo tiempo los depósitos de rocas sedimentarias continentales. En el Cuaternario se formaron los depósitos litorales y aluviales dentro de la cuenca, así como los aparatos volcánicos presentes en ésta (SIGE, 1981, p. 29).

## Hidrología subterránea

La cuenca abarca parte o la totalidad de la superficie de siete acuíferos administrativos delimitados por la Conagua: Autlán (1417), Unión de Tula (1418), Tecolotlán (1419), Jiquilpan (1420) y Tapalpa (1421) en Jalisco y Colima (0601), y Armería-Tecomán-Periquillos (ATP) (0603) en Colima. Estos acuíferos están ubicados en zonas montañosas y valles; el acuífero ATP es el único costero (Figura 2). Sin embargo, estas delimitaciones son demarcaciones territoriales, cuyos límites laterales y vertical están fuera de la naturaleza hidráulica y geológica, así como de la trayectoria y dimensión de los sistemas de flujo (Carrillo-Rivera *et al.*, 2016, p. 7), por lo cual se amplió el área de estudio

10 km alrededor del límite actual, con una superficie total de 24 023 km<sup>2</sup> (Figura 2).

## Identificación de las zonas de recarga y descarga

Este análisis consideró la identificación de indicadores asociados con flujos regionales, ya que manifiestan mayor contraste con respecto a los flujos locales e intermedios (Peñuela-Arévalo y Carrillo-Rivera, 2013, p. 24). Asimismo, se recalca que las propiedades de las zonas de descarga se identifican con mayor facilidad en comparación con las de recarga y tránsito. Las variables sobre las cuales se extrajeron los indicadores superficiales de las zonas de recarga y descarga del agua subterránea fueron: litología, topografía, suelos, vegetación, pendiente, precipitación e ITH. La identificación de las zonas de recarga y descarga se realizó por medio del análisis de indicadores superficiales del agua subterránea con la TSF y su evaluación mediante el AMC (Figura 3).

## Preparación de las capas temáticas

Para analizar el potencial de recarga-descarga en el área de estudio, el primer paso fue la obtención de información, la construcción de bases de datos georreferenciadas y la elaboración de capas temáticas de cada variable con los indicadores analizados. La elaboración de estas capas se realizó con dife-

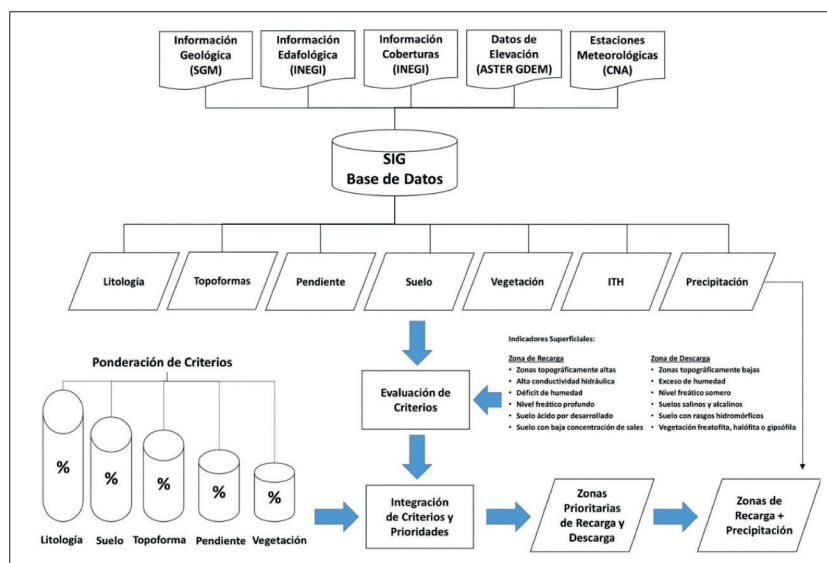


Figura 3. Diagrama de flujo para la evaluación del potencial de recarga y descarga. Fuente: elaboración propia.

rentes procesos en los *softwares* ArcGis 10.2 (Esri, 2013) y SAGA GIS 2.1.2 (Conrad *et al.*, 2015) a escala 1:250 000, proyección UTM, zona 13N, datum WGS84.

El mapa litológico se obtuvo del SGM (2017) (Figura 4a). El potencial de recarga de las unidades litológicas se evaluó a través de los indicadores de porosidad efectiva, permeabilidad y permeabilidad

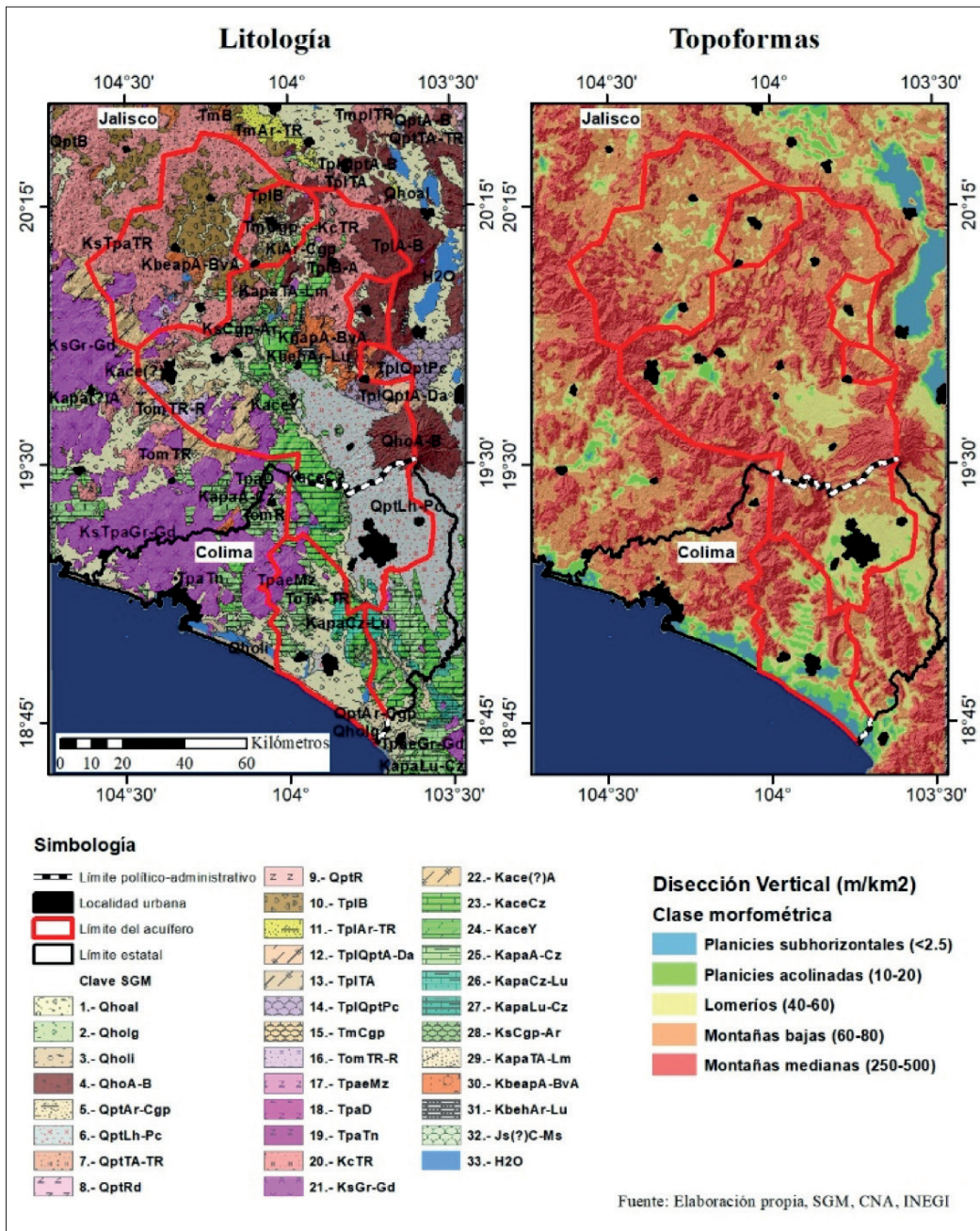


Figura 4. Ejemplo de mapas utilizados para la evaluación del potencial de recarga y descarga del agua subterránea: a) Litología y b) Topoformas. Fuente: elaboración propia con información de NASA et al. (2009), CNA (2017), SGM (2017) e Inegi, (2017).

secundaria (Tabla 1). Los valores generales de estos indicadores se obtuvieron de la literatura (Freeze y Cherry, 1979, p. 29; Sanders, 1980, p. 381). La permeabilidad secundaria se evaluó mediante la presencia de fallas y fracturas en cada unidad litológica. Los valores originales de cada indicador se evaluaron y reclasificaron en un valor de potencial de recarga utilizando una escala de prioridades (Tabla 2), para finalmente obtener un valor promedio del potencial de recarga de cada unidad, teniendo en cuenta que una mayor porosidad efectiva y permeabilidad favorecen un mayor potencial de recarga (Abdalla, 2012, p. 14). Este procedimiento de reclasificación se efectuó para cada variable e indicador.

Las principales topoformas regionales se identificaron con el método de disección vertical propuesto por Priego *et al.* (2010, p. 73), utilizando un modelo digital de elevación (MDE) ASTER-GDEM de 30 m (NASA *et al.*, 2009). Este método permite diferenciar las topoformas con base en la intensidad del relieve ( $m/km^2$ ). El potencial de recarga se evaluó considerando que las zonas de recarga se ubican en zonas topográficamente altas, y las de descarga, en zonas topográficamente más bajas (Freeze y Cherry, 1979, p. 197) (Tabla 1 y Figura 4b).

El porcentaje de pendiente se obtuvo mediante el MDE y el módulo SLOPE de ArcGis, el cual se reclasificó en cinco clases de acuerdo con Vargas (2009, p. 12) (Tabla 2). El potencial de recarga se evaluó considerando que pendientes suaves pro-

mueven una menor velocidad y mayor tiempo de infiltración, mientras que pendientes fuertes promueven una mayor velocidad y menor infiltración (Abdalla, 2012, p. 12).

El mapa de suelos se obtuvo del Continuo Nacional Edafológico del Inegi (2007). El potencial de recarga de los suelos se evaluó utilizando indicadores de textura, pH y propiedades y horizontes diagnósticos de los subgrupos de suelos, de acuerdo con la base referencial mundial del recurso suelo de la IUSS (2015, p. 122) (Tabla 1), ya que permiten identificar rasgos físico-químicos indicativos del comportamiento hidrológico del suelo (Peñuela-Arévalo y Carrillo-Rivera, 2013, p. 25). El potencial de recarga se evaluó considerando que una textura gruesa favorece la infiltración y el drenaje del suelo (Ortiz y Ortiz, 1990, p. 112), y asignando mayores valores a los rasgos y propiedades indicativos de zonas de recarga anteriormente descritos.

El mapa de coberturas y uso del suelo se obtuvo de la Serie V del Inegi (2013) debido a las diferencias contrastantes en las características fisionómicas y la composición de las coberturas vegetales y los usos del suelo. El potencial de recarga se evaluó considerando los indicadores de estratificación y densidad del dosel y la cubierta proporcionada al suelo, de acuerdo con Jardel *et al.* (2004, p. 76) y Rzedowski y Huerta (1994, pp. 151-361) (Tabla 1), ya que proporcionan una acción pantalla frente a la radiación solar y el agua de lluvia, reduciendo la evaporación y el impacto de la gotas de lluvia, además de que la cubierta orgánica proporcionada

Tabla 1. Indicadores superficiales y clases utilizados en la evaluación del potencial de recarga.

Variable	Indicador superficial
Litología	Porosidad eficaz, permeabilidad, permeabilidad secundaria
Topoformas	Montañas medianas y bajas, lomeríos, planicies acolinadas y subhorizontales ( $m/km^2$ )
Suelo	Textura: gruesa, media, fina; calificador secundario de los grupos de suelos, pH
Vegetación	Estratificación del dosel, cobertura proporcionada al suelo
Pendiente	Clase: a) 0-2; b) 2-5; c) 5-15; d) 15-30, e) >30%
ITH	Clase :1) Muy bajo (3-6); 2) Bajo (6-9); 3) Medio (9-12); 4) Alto (12-15); 5) Muy alto (15-18)
Precipitación	Clase: 1) Muy bajo (400-800); 2) Bajo (800-1000); 3) Medio (1000-1200); 4) Alto (1200-1400); 5) Muy alto (1400->1600 mm)

Fuente: elaboración propia con información de SGM (2017), NASA *et al.* (2009), INEGI (2007 y 2013), SMN (s.f).



al suelo (hojas y ramas) influye en la escorrentía, la erosión y el régimen de humedad del suelo, y mejora su estructura favoreciendo la infiltración (Porta *et al.*, 1994, p. 488; Chang, 2006, p. 137).

El contraste regional en la humedad superficial creado por los sistemas de flujo se analizó utilizando el MDE y el ITH (Böhner *et al.*, 2002, p. 214), el cual se reclasificó en cinco clases (Tabla 1), considerando que los valores altos del índice indican sitios de acumulación con mayor proximidad del nivel freático, por tanto, mayor potencial de descarga (Oh *et al.*, 2011, p. 165).

El mapa de precipitación se obtuvo mediante la interpolación de valores de la precipitación media anual de 106 estaciones climatológicas de un periodo histórico de 1951 a 2010, tres estaciones meteorológicas automáticas (2013-2015) del Servicio Meteorológico Nacional y la estación climatológica de la Estación Científica Las Joyas, utilizando el método de *kriging* universal, el cual se reclasificó en cinco clases, considerando que a mayor volumen de precipitación, mayor será la recarga (Sener, Davraz y Ozcelik, 2005, p. 829) (Tabla 1).

### Análisis multicriterio

El análisis multicriterio de los indicadores superficiales para evaluar el potencial de recarga-descarga se realizó utilizando el módulo AMC en IDRISI Selva (Eastman, 2012, p. 132) (Figura 3). La ponderación de las variables y sus indicadores se realizó

mediante el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), propuesto por Saaty (2008, p. 85), mediante la construcción de una matriz de comparación pareada para la realización de juicios sobre la prioridad de cada elemento en la matriz y el cálculo del índice de consistencia (IC) de los juicios. La prioridad de cada elemento se evaluó utilizando una escala del 1 al 9 (Tabla 2) (Saaty, 2008, p. 86).

La integración de los criterios y sus prioridades se realizó mediante el método de combinación lineal ponderada. El modelo para evaluar el potencial de recarga se muestra en la ecuación 1:

$$PR = Litología (P1) + Topoformas (P2) + Suleo (P3) + Pendiente (P4) + Vegetación (P5) \quad (1)$$

Donde:

PR = Potencial de recarga

Pi = Peso o prioridad de cada criterio

El mapa final del potencial de recarga-descarga se reclasificó en cinco clases iguales: 1) muy bajo, 2) bajo, 3) medio, 4) alto y 5) muy alto para facilitar su interpretación y su análisis con otras fuentes de información. Las zonas de descarga se identificaron mediante la selección espacial de los indicadores de descarga y su integración, como zonas topográficamente bajas y planas, con mayor ITH, suelos salinos y alcalinos o con presencia de rasgos hidromórficos y la presencia de vegetación

Tabla 2. Escala de priorización entre dos criterios

Escala	Intensidad de importancia	Definición
1	Igual	Ambos factores contribuyen igualmente al objetivo
3	Moderada	Experiencia y conocimiento favorecen a un factor ligera a moderadamente sobre otro
5	Fuertemente	Experiencia y conocimiento favorecen a un factor moderadamente a fuertemente sobre otro
7	Muy fuertemente	Un factor es fuertemente favorecido sobre otro y su dominancia se observa en la realidad
9	Extremadamente	La evidencia favorece a un factor sobre otro y es del mayor grado de afirmación posible
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Se usa para representar prioridades intermedias entre 1, 3, 5, 7 y 9

Fuente: elaboración propia con datos de Saaty (2008).

freatofita, halófito o gipsófila. Una vez obtenido el mapa final, se integró el mapa de precipitación utilizando el mismo procedimiento, asignando igual prioridad en ambos mapas. La validación del modelo se realizó por medio de la sobreposición con otras fuentes de información, como presencia de corrientes y cuerpos de agua perennes y visitas en campo.<sup>2</sup>

## RESULTADOS

### Priorización de las variables físicas

La lista de variables utilizadas en este trabajo no pretende ser única, ni exclusiva; se consideraron las asequibles y más relevantes para evaluar el potencial de recarga en el área de estudio. Con base en los autores se obtuvo la prioridad de cada variable y un mayor conocimiento sobre su función e interrelación con las otras variables para la recarga. El IC para los juicios fue 0.05, señalando una consistencia aceptable de la matriz (Tabla 3).

La litología se consideró la variable más importante, ya que la recarga es fuertemente dependiente de las principales condiciones hidrogeológicas del subsuelo, las cuales permitirán la infiltración o el escurrimiento del agua (Niazi, Bentley y Hayashi, 2017, p. 380). Además, la diversidad litológica

señala una importante heterogeneidad espacial en las condiciones hidrogeológicas presentes. El suelo se consideró la segunda variable más importante, pues se origina en la geología, y su estructura, composición y antecedente de humedad son de gran importancia para permitir la infiltración del agua. Esta variable también presenta una alta diversidad, teniendo presentes suelos de climas áridos, húmedos o templados. Las topoformas fueron la tercera variable más importante, pues puede existir una forma de relieve que facilite la recarga, pero sin la litología adecuada, el agua no se infiltrará. La pendiente se consideró la cuarta variable en importancia, ya que depende de las características del material litológico, la topografía y el clima, entre otros. La vegetación se consideró la variable con menor importancia debido a que depende de la topografía, el suelo y el clima, además de existir recarga en áreas sin vegetación; sin embargo, no se puede dejar de considerar su papel en el funcionamiento y equilibrio del sistema hidrológico, propiciando la condensación y precipitación de la humedad proveniente del océano, el mantenimiento de la humedad y las condiciones del suelo, así como la formación de macroporos en el suelo que mejoran la infiltración.

## ANÁLISIS DE INDICADORES

### Litología

En el área de estudio se observaron 34 unidades litológicas diferentes, representadas por secuencias volcanosedimentarias, rocas volcánicas extrusivas e intrusivas, metamórficas y sedimentarias, ubicadas en un rango cronoestratigráfico com-

<sup>2</sup> Se realizaron dos visitas de campo a las zonas de descarga de agua subterránea en el valle Atlán-El Grullo y la planicie de Unión de Tula, donde se pudo comprobar la presencia de indicadores de descarga, como suelos salinos o con rasgos hidromórficos, nivel freático cercano a la superficie (con una profundidad promedio de 1.5 m en tiempo de secas), agua con alta concentración de sales y sólidos totales disueltos, además de la presencia de especies freatofitas

Tabla 3. Matriz de comparaciones pareadas y prioridades de cada variable en el AMC

Criterio	Litología	Topoformas	Suelo	Vegetación	Pendiente	Peso
Litología	1	2	3	5	4	0.41
Topoformas	1/2	1	0.5	3	3	0.19
Suelo	3/8	2	1	3	3	0.23
Vegetación	1/5	1/3	1/3	1	0.3	0.06
Pendiente	1/4	1/3	3/8	3	1	0.11

Fuente: elaboración propia.

prendido entre el Mesozoico y el Cenozoico. Las unidades que abarcan una mayor superficie en el área de estudio son toba riolítica del Cretácico Superior (17%), depósitos aluviales del Holoceno (15%), cuerpos graníticos del Cretácico Superior (15%), lahar-piroclástico del Pleistoceno (9%), andesita-basalto del Plioceno (7%), unidades de calizas marinas (6%), andesita-caliza del Cretácico Inferior (6%) y basaltos del Plioceno-Pleistoceno (5%).

El material geológico del Cuaternario, como rellenos aluviales, lahar-piroclástico y basaltos, se consideraron de permeabilidad alta junto con las unidades de basalto, basalto-andesita, tobas riolítica, calizas y conglomerado poligénico-arenisca del Terciario Superior. Se consideran de permeabilidad media los depósitos detríticos del Terciario, como conglomerado-poligénico, arenisca-toba riolítica, basalto, andesita-basalto, andesita, brecha volcánica andesítica, toba andesítica-toba riolítica, toba riolítica, caliza y granito-granodiorita; todas estas unidades presentan un fracturamiento moderado o alto. Con reducida permeabilidad, los cuerpos graníticos, las riolitas, andesita-dacita, caliza-lutita, lutita-caliza y arenisca-lutita.

### Topoformas

De la superficie, 37% está cubierta por montañas medianas; 39%, por montañas bajas, y 16%, por lomeríos. Las planicies acolinadas y subhorizontales representan 3% y 4% de la superficie. Estas clases morfométricas aluden a las características del relieve en términos de su amplitud altitudinal o altura relativa entre el punto más bajo y el más alto de una unidad, y nos ofrecen información sobre la energía del relieve (Priego *et al.*, 2010, p. 73) debido a que la topografía provee la energía disponible para el movimiento del agua y estructura los límites del dominio del flujo (Tóth, 2009, p. 103). Las clases con mayor amplitud altitudinal, como las montañas medias y bajas, se asociaron con zonas de descarga, y las clases de menor amplitud, como las planicies, se asociaron con las zonas de descarga. Los lomeríos con una amplitud intermedia se asociaron con las zonas de tránsito, sin embargo, esta relación debe ser analizada con mayor detalle.

### Pendiente

De la superficie del relieve montañoso, 31% presenta pendientes escarpadas (>30%); 22% cuenta con pendientes inclinadas (15%-30%); 28%, con pendientes moderadamente inclinadas (15%-5%); 7%, con terrenos ligeramente inclinados (5%-2%), y 12% presenta pendientes (<2%). El mayor potencial de recarga se otorgó a las pendientes moderadamente inclinadas e inclinadas, al ser las superficies donde el flujo superficial tendrá la mayor distribución espacial, mientras que en las pendientes escarpadas el flujo se restringirá hacia los arroyos. Las pendientes ligeramente inclinadas y planas se asociaron con zonas de acumulación y descarga.

### Tipo de suelo

El relieve está cubierto por 16 grupos de suelo y 73 subgrupos. El Regosol es el suelo dominante, y cubre 25% de la superficie total, seguido de Pheozem (19%), Cambisol (17%), Leptosol (16%) y Vertisol (8%). Otros grupos de suelos presentes son Leptosol, Luvisol, Andosol, Arenosol, Calcisol, Chernozem, Kastañozem, Fluvisol, Gleysol, Planosol, Solonchak y Umbrisol.

El análisis de la relación suelo-zona de recarga-descarga se basó en la descripción de horizontes y propiedades diagnósticos de los subgrupos de suelos (IUSS, 2015, p. 122), además de textura, pH y profundidad. Nuevamente se resalta que existe una mayor apreciación de las características asociadas con zonas de descarga que con las de recarga. A continuación se hace una breve descripción relativa a algunos ejemplos. Un horizonte cálcico indica una acumulación de carbonato de calcio secundario; se refiere al material calcáreo precipitado en el lugar, a partir de su disolución y transporte, más que del heredado por material parental, lo que sugiere una zona de descarga. En cambio, un suelo calcárico señala un suelo con material calcárico derivado del material parental, lo que sugiere una zona de recarga. Un suelo esquelético cuenta con 40% y 90% (en peso) de gravas u otros fragmentos gruesos, que favorecen la infiltración, lo que sugiere una zona de recarga. Un suelo con propiedades gléyicas refleja condiciones permanentemente saturadas de agua, mientras que un horizonte sódico o sálico señala un horizonte con un enriquecimiento se-

cundario de sales solubles, lo que sugiere una zona de descarga.

Así, los suelos asociados a zonas de descarga son Arenosol éutrico, hiposódico y prótico; Calcisol; Fluvisol calcárico, epiesquelético, esquelético, éutrico e hiposódico; Gleysol hiposálico y vértico; Planosol vértico; Solonchak cálcico, gléyico, hiposódico, húmico, mólico y vértico, y Vertisol crómico, epiesquelético, esquelético, sódico e hiposódico, mázico y pélico. Los suelos asociados posiblemente con zonas de recarga son Andosol dístico y úmbrico; Cambisol crómico, dístico, epiesquelético, esquelético, éutrico y húmico; Fluvisol epiesquelético; Leptosol calcárico, dístico, éutrico, húmico y mólico; Luvisol crómico, cutánico, dístico, esquelético y vértico; Phaeozem calcárico, esquelético, hiposálico y lúvico; Regosol arénico calcárico, dístico, esquelético, éutrico e hiperéutrico, y Umbrisol esquelético. Los suelos Chernozem, Chernozem lúvico, Kastañozem y Kastañozem epiesquelético se consideraron como los suelos posiblemente asociados a las zonas de tránsito debido a que presentan una significativa acumulación de carbonatos secundarios en el horizonte subsuperficial y su localización corresponde a los espacios geográficos en los que acaece una transición edafogenética entre el proceso de lavado y acumulación subsuperficial de carbonatos (Ibáñez y Manríquez, 2014).

### Vegetación y uso del suelo

En el área de estudio se observa la presencia de 25 tipos de vegetación y 3 usos del suelo. La agricultura de temporal es el uso del suelo con la mayor superficie (21%), seguida de la vegetación secundaria de selva baja caducifolia (20%), bosque de encino (16%), bosque de pino-encino (11%), pastizal cultivado (11%) y agricultura de riego (10%). Otros tipos de vegetación, como bosque mesófilo de montaña, selva mediana subcaducifolia, bosque de pino y de oyamel, vegetación halófila e hidrófila, sabanoide, pradera de alta montaña, manglar, vegetación de dunas costeras, bosque de mezquite, tular y palmar inducido, ocupan menos de 1%.

El análisis de la relación de los tipos de vegetación y usos del suelo con las zonas de recarga o des-

carga se basó en los resultados de estudios previos, el análisis de las características fisiológicas y morfológicas, las características del sitio donde se desarrolla, las características de manejo de los usos del suelo y la presencia de especies indicadoras de zonas de descarga. Su descripción puede consultarse en la *Guía para la interpretación de cartografía de uso de suelo y vegetación, Serie V* (Inegi, 2015). Los bosques de pino, oyamel, encino y pino-encino se han relacionado previamente con zonas de recarga (Peñuela-Arévalo, 2007, p. 139). Los bosques mesófilos y la pradera de alta montaña se asocian también con zonas de recarga, al igual que la selva baja caducifolia, la selva mediana subcaducifolia, la vegetación sabanoide y el pastizal inducido. Las coberturas asociadas con zonas de descarga fueron vegetación halófila hidrófila, manglar, tular, vegetación de dunas costeras, palmar y bosque de mezquite.

### Descripción de las zonas potenciales de recarga

El mapa de potencial de recarga muestra que 22% de la superficie presenta muy alto potencial de recarga; 58%, potencial alto; 15%, potencial medio; 3%, potencial bajo, y 1%, muy bajo (Tabla 3).

Las zonas de mayor potencial (muy alto + alto) se ubicaron en la sierra de Cacoma-Manantlán, la sierra Verde, la sierra de Quila, la sierra de Tapalpa, el complejo volcánico, además de los lomeríos en la costa de Jalisco y Colima (Figura 5a).

Estas zonas se encuentran formadas por montañas medianas o bajas, así como lomeríos, constituidas por unidades de caliza, andesita-caliza, granito-granodiorita, toba riolítica, laharpíroclasto o andesita-basalto, principalmente, con suelos como Regosol, Leptosol, Cambisol, Luvisol, Andosol, Umbrisol y Phaeozem cubiertos por bosques de pino-encino, encino, selva mediana subcaducifolia, selva baja caducifolia, pastizal cultivado y agricultura de temporal en pendientes de 15%-30% y >30%.

Las zonas con potencial medio se ubican en montañas bajas y lomeríos con suelos de tipo Cambisol, Chernozem, Fluvisol, Leptosol, Luvisol, Phaeozem, Regosol, Umbrisol, Arenosol, en pendientes de 5%-15%, cubiertos por pastizal cultivado, agricultura de riego y temporal.

Las zonas de bajo y muy bajo potencial, posibles zonas de descarga, se encuentran en las planicies acolinadas y subhorizontales, zonas con pendientes de 0% a 15%, con suelos Vertisol, Phaeozem, Solonchak y Gleysol cubiertos por vegetación halófila e hidrófila; manglar; tular y dunas costeras; agricultura de riego, temporal y de humedad, y presencia de cuerpos de agua perennes (Figura 5a).

El clima es uno de los principales factores que controlan el régimen de agua subterránea, pues determina la distribución y cantidad del suministro de agua (Tóth, 2009, p. 102). Al incluir el mapa de precipitación con el mapa del potencial de recarga (Figura 5b), se puede observar un marcado efecto de la precipitación en el potencial de recarga, modificando la distribución y la superficie de las zonas con mayor potencial de recarga, la cual se reduce (Tabla 4). Éstas se ubican principalmente en la sierra de Cacoma-Manantlán y los lomeríos de la costa de Jalisco, fuera del límite de la cuenca del río Ayuquila-Armería. Otras zonas se presentan sobre el bloque de calizas de Cerro Grande y las cimas y laderas del complejo volcánico. Las zonas de menor potencial de recarga por la escasa precipitación se observan en el interior de la cuenca y los extremos NE y SE (Figura 5b).

El patrón de la precipitación en el área de estudio está influenciado principalmente por un “mecanismo orográfico”, en el cual las partes altas de las montañas atrapan la humedad proveniente del océano provocando su precipitación, lo cual hace que la recarga inicie a mayores alturas y se promuevan sistemas de flujo de agua subterránea que se infiltran en las cimas de las montañas, y recorre los caminos hacia las zonas más bajas de valles y planicies (Gómez, 2014, p. 33). Sin embargo, este mecanismo de precipitación también crea un efecto de sombra de lluvia, provocando una región mucho más húmeda y fría en la vertiente de barlovento, y una región mucho más seca y cálida en la vertiente de sotavento, donde se disipan las nubes y la precipitación (Whietman, 2000, p. 102), lo que propicia la aparición de regiones muy húmedas con alta precipitación (>1800 mm), como la sierra de Manantlán, aledañas a regiones semiáridas con escasa precipitación (<600 mm), como el valle Tonaya-Tuxcacuesco (Figura 5b). Estos contrastes

de humedad influyen en la presencia o ausencia de coberturas vegetales como las de los bosques mesófilos y la selva mediana subcaducifolia, presentes únicamente en la vertiente occidental.

### Descripción de las zonas de descarga

La zona de descarga es la evidencia más viable para identificar el funcionamiento del agua subterránea, ya que es el sitio donde aflora el agua y representa la fase final del recorrido del flujo. En estas zonas el agua ha adquirido propiedades particulares (salinidad, temperatura, pH, entre otros) y cuenta con una continuidad específica de caudal en el tiempo, que condiciona la presencia de determinado suelo y vegetación acordes a estas condiciones (Peñuela-Arévalo y Carrillo-Rivera, 2013, p. 24).

Las zonas con mayor presencia de indicadores regionales asociados con zonas de descarga del agua subterránea fueron la planicie costera de Jalisco y Colima, y la zona de lagunas al interior de cuencas endorreicas al noroeste (Figura 5). La primera se ubica desde la localidad de Barra de Navidad, en Jalisco, hasta la Bahía de San Telmo, en Colima, la cual se caracteriza por su baja altitud, con suelos tipo Gleysol vértico y Solonchak gléyico, y con presencia de vegetación hidrófila halófila, manglar, tular y de dunas costeras.

La segunda zona de descarga se ubica desde la laguna de Atotonilco, cerca de la localidad de Villa Corona, hasta la laguna de Zapotlán, cercana a Ciudad Guzmán, en Jalisco (Figura 5). Estas zonas se caracterizan por la presencia de suelos salinosódicos como Solonchak cálcico o vértico, Gleysol hiposódico y Vertisol hiposódico, con únicamente vegetación hidrófila halófila. En ambas zonas las descargas de agua subterránea han contribuido a la presencia de humedales como la laguna de Barra de Navidad, la laguna de Cuyutlán, el Santuario Playa Boca de Apiza y las lagunas de Atotonilco, Sayula y Zapotlán, que son considerados sitios Ramsar (SISR, 2019).

Otras zonas de descarga en el área de estudio son los valles y planicies intermontanas, tanto fuera como dentro de la cuenca, que determinan un cambio en la pendiente regional y dan lugar a superficies planas, de muy baja amplitud, con niveles freáticos someros y terrenos con mayor susceptibi-

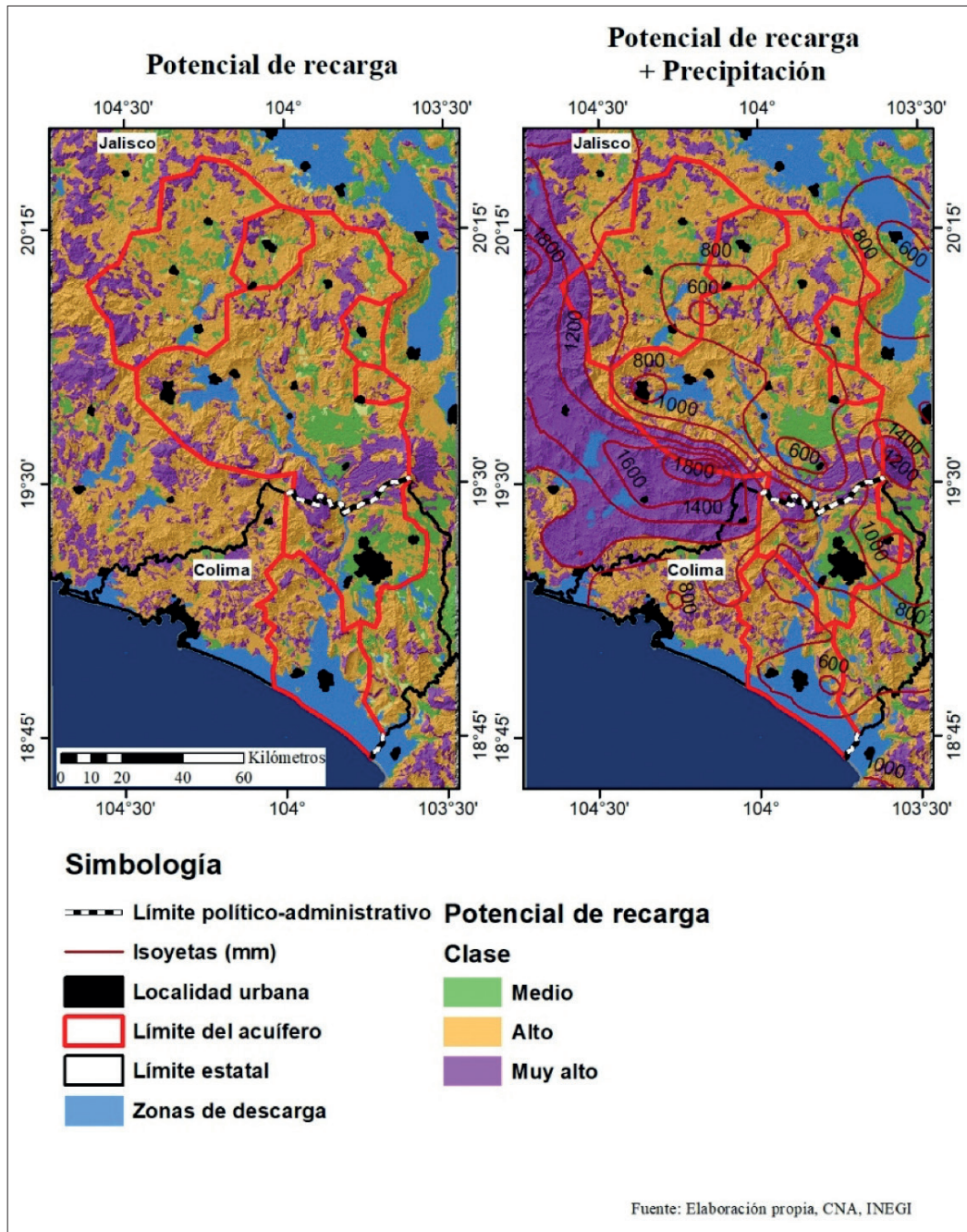


Figura 5. Zonas potenciales de recarga (a) con base en la precipitación (b). Fuente: elaboración propia con información de CNA (2017) e INEGI, (2010).

lidad a inundarse en cierta época del año, lo cual favorece la presencia de suelos con una marcada estacionalidad, como los Vertisoles, aunque si el periodo de saturación es lo suficientemente largo, se

posibilita la presencia de Gleysoles con vegetación hidrofita como *Typha domingensis* Pers., *Eleocharis acutangula* (Roxb.) Schult., *Paspalum denticulatum* Trin. Schltdl y *Canna glauca* L., *Thalia geniculata*

Tabla 4. Comparación de la superficie por clase del potencial de recarga (PR).

Potencial de recarga	Modelo sin precipitación		Modelo con precipitación	
	Superficie (km <sup>2</sup> )	%	Superficie (km <sup>2</sup> )	%
Muy bajo	287	1	609	3
Bajo	835	3	6,530	27
Medio	3,718	15	11,866	49
Alto	13,922	58	4,331	18
Muy alto	5,261	22	701	3
Total	24,023	100	24,023	100

Fuente: elaboración propia.

L., *Sagittaria macrophylla* Zucc. y *Nymphaea gracilis* Zucc. (Figura 4). Algunas de estas zonas son la Planicie de Unión de Tula y los valles de Autlán-El Grullo, Tonaya-Tuxcacuesco, La Huerta-Casimiro Castillo y Purificación-Cuitzmala (Figura 5).

Otras zonas de descarga son los fondos de los valles en V en diferentes secciones de la cuenca (Figura 5), como el cañón del río Ayuquila, Apulco, El Salto del Nogal o Zacualpan, con presencia de Fluvisoles y Vertisoles y vegetación freatófita como *Salix humboldtiana* y *Taxodium mucronatum* (Ortiz, 2015, p. 125). Estas secciones se caracterizan por un amplio relieve, con un valle central profundamente disectado por el cauce de los ríos, donde hidráulicamente éste es una depresión lineal alargada, que es el sitio de descarga de toda el agua en esta sección (Tóth, 2009, p. 48).

## DISCUSIÓN

La secuencia de eventos geológicos y tectónicos ha alterado la composición, la estructura y el relieve, que se manifiesta en una gran diversidad de unidades litológicas en diferentes secuencias crono-estratigráficas, lo cual se traduce en una alta heterogeneidad espacial en las principales propiedades hidráulicas de las unidades acuíferas. Esta geodiversidad, junto con el intenso relieve y el clima, han generado un mosaico de ambientes hidrogeológicos, paisajes naturales y condiciones climáticas contrastantes, lo que influye en la distribución del potencial de recarga, pues el mecanismo

de precipitación promueve un gradiente de recarga desde la zona costera hacia el interior del continente, con las zonas de mayor recarga en la sierra de Cacoma-Manantlán (Figura 5). Sin embargo, es necesario determinar la dirección de los flujos mediante estudios hidrogeoquímicos y conocer sus zonas beneficiarias, pues el mapa sólo muestra la distribución del volumen de precipitación y no la dependencia con el agua subterránea, como ocurre en las localidades del valle Tonaya-Tuxcacuesco en la sierra de Tapalpa.

La distribución de las zonas de descarga del agua subterránea está determinada por cambios abruptos en la pendiente regional. Los efectos de los cambios en relieve local sobre el funcionamiento de los sistemas de flujo en las diferentes regiones de la cuenca pueden analizarse con base en los modelos conceptuales de sistema de cordillera-lomeríos-planicies, valles intermontanos y cañones en forma de V propuestos por Tóth (2009, p. 48). En regiones con una intensa topografía, como el área de estudio, se pueden desarrollar patrones de flujo compuesto, los cuales se caracterizan por la alternancia lateral de regiones de recarga y descarga. Esto implica que el agua recargada en una determinada región puede ser destinada a diferentes áreas de descarga, o el agua descargada en una región puede provenir de diferentes regiones (Tóth, 2009, p. 35). La presencia de estos patrones tiene implicaciones importantes en la estimación de la disponibilidad que calcula la Conagua, pues el agua subterránea puede ser destinada a más de una zona de descarga dentro del mismo acuífero

“administrativo”. El balance hídrico no toma en cuenta la presencia de las zonas de descarga que actúan como límites hidráulicos naturales de los sistemas de flujo, limitando la cantidad de agua subterránea en cada zona. Provoca una sobreestimación del agua subterránea al asumir que la disponibilidad estimada se encuentra repartida de igual manera en toda la superficie del acuífero administrativo, lo que propicia el sobreconcesionamiento de los mismos. Sin embargo, es necesaria la caracterización química e isotópica de los sistemas de flujo para identificar la posible trayectoria de los flujos involucrados y vincular cada zona de descarga con su correspondiente zona de recarga (Peñuela-Arévalo y Carrillo-Rivera, 2013, p. 31).

## CONCLUSIONES

La evaluación de indicadores superficiales con la teoría de los sistemas de flujo demostró ser una herramienta útil para incorporar la respuesta de la dinámica del agua subterránea con el ambiente e identificar posibles zonas de recarga y descarga a escala regional. Así, las planicies costeras y de lagos interiores se identificaron como las principales zonas de descarga del agua subterránea. Otras zonas de descarga las constituyen los fondos de valles y planicies intermontanos, así como los valles en V, mientras que las principales zonas de recarga se encuentran en la parte alta de los sistemas montañosos que configuran la cuenca, además de los lomeríos hacia la planicie costera. Sin embargo, esta técnica sólo es parte de una metodología general, que debe complementarse con análisis de calidad química del agua, contenido isotópico, cargas hidráulicas y trabajo de campo detallado que permitan vincular cada zona de descarga con su correspondiente recarga.

La categorización del potencial de recarga permitió diferenciar las zonas de recarga y descarga. El análisis espacial de indicadores superficiales asociados a zonas de descarga permitió identificar que éstas corresponden a las zonas de bajo y muy bajo potencial. Sin embargo, es necesario realizar en un futuro un análisis más detallado para identificar las zonas de tránsito.

Este tipo de estudios son una primera aproximación que aporta evidencias innovadoras al estudio sistémico del agua subterránea, es decir, a las zonas de recarga-descarga. Su aplicación complementa de forma positiva los resultados del balance hídrico que se emplea en la evaluación oficial de la disponibilidad media anual del agua subterránea en México, además de proporcionar conocimiento de gran utilidad para el diseño de planes de conservación al incorporar al pago de servicios ambientales hidrológicos la dinámica y las características del agua subterránea.

## REFERENCIAS

- Abdalla, F. (2012). Mapping of Groundwater Prospective Zones Using Remote Sensing and GIS Techniques: A Case Study from the Central Eastern Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 70, 8-17. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2012.05.003
- Böhner, J., Koethe, R., Conrad, O., Gross, J., Ringeler, A. y Selige, T. (2002). Soil Regionalization by Means of Terrain Analysis and Process Parameterization. En E. Micheli, F. Nachtergaele y L. Montanarella (Eds.), *Soil Classification European Soil Bureau* (pp. 213-222). Research Report no. 7.
- Carrillo-Rivera, J. J. (2000). Application of the Groundwater-Balance Equation to Indicate Interbasin and Vertical Flow in Two Semi-Arid Drainage Basins, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 5(8), 503-520. DOI: 10.1007/s100400000093
- Carrillo-Rivera, J. J., Cardona, A., Huizar Alvarez, R. y Graniel, E. (2008). Response of the Interaction between Groundwater and Other Components of the Environment in Mexico. *Environmental Geology*, 2(55), 303-319. DOI: 10.1007/s00254-007-1005-2
- Carrillo-Rivera, J. J., Peñuela-Arévalo, L. A., Huizar Álvarez, R., Cardona Benavides, A., Ortega, M. A., Vallejo, J. y Hatch Kuir, G. (2016). Conflictos por el agua subterránea. En J. O. Moncada Maya y A. López López (Coords.), *Geografía de México: Una reflexión espacial contemporánea* (pp. 1-16). México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Chang, M. (2006). Forest and Precipitation. En *Forest Hydrology: An Introduction to Water and Forest* (pp. 137-163). Estados Unidos de América: CRC Press.
- Conagua (2002a). Actualización de la disponibilidad de agua en el acuífero Armería-Tecomán-Periquillos (0603). Estado de Colima. México: Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua.



- Conagua. (2002b). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Colima (0601), Estado de Colima. México: Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua.
- Conagua. (2002c). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Autlán (1417), Estado de Jalisco. México: Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua.
- Conagua. (2008). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Tapalpa (1421), Estado de Jalisco, Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua, México.
- Conagua. (2010). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Tecolotlán (1419), estado de Jalisco. México: Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua.
- Conagua. (2011a). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Jiquilpan (1420), Estado de Jalisco. México: Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua.
- Conagua. (2011b). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Unión de Tula (1418), estado de Jalisco. México: Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua.
- Conagua. (2017). Delimitación de acuíferos de CONAGUA. Criterio para la delimitación de los acuíferos. Mapa que ilustra la localización y límites de los acuíferos. Tablas con las coordenadas geográficas de las poligonales simplificadas que definen los límites. Recuperado de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/delimitacion-de-acuiferos-de-conagua/resource/1c0f47b1-3c2e-47ce-8dd4-8da60e3e0b00>.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V. y Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.2. *Geoscience Model Development*, 8, 1991-2007. DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015
- Eastman, J. R. (2012). Decision Support: Decision Strategy Analysis. En *IDRISI Kilimanjaro: Guide to GIS and Image Processing Updated Manual, Version 17.01* (pp. 126-146). Clark University.
- ESRI. (2012). ArcGis 10.2 [Software]. Environmental System Research, Institute Inc. Recuperado de [www.esri.com](http://www.esri.com).
- FAO. 2016. Base de Datos Principal AQUASTAT, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Recuperado de: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=es>.
- Famiglietti, J. S. (2014). The Global Groundwater Crisis. *Nature Climate Change*, 11(4), 945-948. DOI: 10.1038/nclimate2425
- Freeze, R. A. y Cherry, J. A. (1979). Hydraulic Conductivity and Permeability. En *Groundwater* (pp. 26-30). Englewood Cliffs: Prentice Hall, Inc.
- Gómez, I. S. (2014). Lineamientos para el estudio de acuíferos en rocas cristalinas fracturadas y meteorizadas. En *Aguas subterráneas en zonas de montaña y trazadores ambientales* (pp. 9-42). Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Graf-Montero, S., Martínez-Rivera, L. M., Santana-Castellón, E. e Iñiguez-Dávalos, L. I. (2002). Región hidrológica prioritaria río Purificación-Manantlán. En L. Arriaga-Cabrera, V. Aguilar Sierra y J. Alcocer Durad, *Aguas continentales y diversidad biológica de México*. (pp. 74-75). México: Conabio.
- Hatch, G. (2017). Agua subterránea en México: retos y pendientes para la transformación de su gestión. En F. T. Christian Denzin y R. Pacheco-Vega (Eds.), *El Estado del Agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica* (pp. 149-170). México: Fundación Friedrich Ebert Stiftung-Proyecto Regional Transformación Social-Ecológica.
- Hernández Juárez, R. A., Martínez Rivera, L. M., Peñuela-Arévalo, L. A. y Rivera Reyes, S. (2019). Gestión del agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería. *Región y Sociedad*, 31. DOI: 10.22198/rys2019/31/1093
- Ibáñez, J. J. y Manríquez, C. F. J. (2014, 10 de septiembre). Kastañozems (KS) Suelos pardos de estepa secas [Mensaje en un blog]. Un universo invisible bajo nuestros pies. Madrid Blogs. Recuperado de <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2014/09/10/145408>
- IGME. (2002). Hidrogeología y propiedades de los acuíferos. En W. G. Mook (Ed.), *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico principios y aplicaciones* (pp. 315-323). España. Instituto Geológico y Minero de España.
- INEGI. (1995). *Estudio Hidrológico del estado de Colima*. México: INEGI.
- INEGI. (2001). *Estudio Hidrológico del estado de Jalisco*. México: INEGI.
- INEGI. (2007). *Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Serie II* (Continuo Nacional), escala 1:250 000. México: INEGI.
- INEGI. (2010). *Red Hidrográfica*, escala 1:50 000. México: INEGI.
- INEGI. (2013). *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, Serie V* (Capa Unión), escala 1:250 000. México: INEGI.
- INEGI. (2015). *Guía para la interpretación de cartografía uso de suelo y vegetación, Serie V*, escala 1:250 000. México: INEGI.
- INEGI. (2017). Marco Geostadístico Nacional (Censo de Población y Vivienda 2010). México: INEGI.

- IUSS Working Group WRB. (2015). Base referencial mundial del recurso suelo, actualización 2015. En *Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos*. (pp. 90-148) Roma: International Union of Soil Sciences-World Reference Base for Soil Resources-FAO.
- Jardel Peláez, E. J., Ezcurra, E., Cuevas Guzmán, R., Santiago Pérez, A. L. y Cruz Cerda, P. (2004). Vegetación y patrones del paisaje. En R. Cuevas Guzmán y E. J. Jardel Peláez (Eds.), *Flora y Vegetación de la Estación Científica Las Joya*. (pp. 65-116). México: Universidad de Guadalajara.
- NASA, METI, AIST, Japan Space Systems y U.S. / Japan ASTER Science Team. (2009). *ASTER Global Digital Elevation Model*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. DOI: 10.5067/ASTER/ASTGTM.002
- Niazi, A., Bentley, L. R. y Hayashi, M. (2017). Estimation of Spatial Distribution of Groundwater Recharge from Stream Baseflow and Groundwater Chloride. *Journal of Hydrology*, 546, 380-392. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.01.032
- Oh, H. J., Kim, S., Choi, J. K., Park, E. y Lee, S. (2011). GIS Mapping of Regional Probabilistic Groundwater Potential in the Area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*, 399, 158-172. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.12.027
- Ortiz Arrona, C. I. (2015). *Caracterización y evaluación del estado ecológico de la vegetación ribereña en el río Ayuquila-Armería, en el occidente de México*. Tesis de doctorado en Ecología, Conservación y Restauración de Ecosistemas. Universidad de Alcalá.
- Ortiz Villanueva, B. y Ortiz, S. C. A. (1990). Infiltración, percolación y permeabilidad. En V. A. Gómez Cuevas (Ed.), *Edafología*. (p. 112). México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Peñuela-Arévalo, L. A. (2007). *Procesos de recarga-descarga de agua subterránea en zonas receptoras de pago por servicio ambiental hidrológico, sierras Nevada y Las Cruces-México*. Tesis de maestría en Ciencias de la Tierra. UNAM, México.
- Peñuela-Arévalo L. A. y Carrillo-Rivera, J. J. (2013). Discharge Areas as a Useful Tool for Understanding Recharge Areas, Study Case: Mexico Catchment. *Environmental Earth Sciences*, 68, 999-1013. DOI: 10.1007/s12665-012-1803-z.
- Porta, C. J., M. López-Acevedo y C. Roquero (1994). Factores bióticos y antrópicos de la edafogénesis. En *Edafología: Para la agricultura y el medio ambiente* (p. 488). México: Mundi-Prensa.
- Price, M. (2003). Mediciones y modelos. En *Agua Subterránea* (pp. 142-172). México: Editorial Limusa.
- Priego Santander, A. G., Bocco, G., Mendoza, M. y Garrido, A. (2010). Propuesta para la generación de unidades de paisaje de manera semi-automatizada. En *Fundamentos y método* (pp. 38-53). México: Semarnat. DOI: 10.22201/ciga.9789688179239p.2011
- Rzedowski, J. y Huerta, L. (1994). Tipos de vegetación. En *Vegetación de México* (pp. 151-363). México: Editorial Limusa.
- Saaty, T. L. (2008). Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590
- Sanders, L. (1998). *A Manual of Field Hydrogeology*. Londres: Prentice-Hall.
- SARH. (1978). Estudio Geohidrológico de Evaluación y Censo del Valle de Autlán, El Grullo, Jalisco. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- Sener, E., Davraz, A. y Ozcelik, M. (2005). An Integration of GIS and Remote Sensing in Groundwater Investigations: A Case Study in Burdur Turkey. *Hydrogeology Journal*, 5-6(13), 826-834. DOI: 10.1007/s10040-004-0378-5
- SGM (Servicio Geológico Mexicano). (2007). Estudio de actualización hidrogeológica de los acuíferos Armería-Tecomán-Periquillos y Valle de Ixtlahuacán, Estado de Colima (pp. 91-102), Servicio Geológico Mexicano, México.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano). (2017). *Continuo Nacional de Geología de la República Mexicana*, escala 1:250 000. Servicio Geológico Mexicano. Recuperado de [datos.gob.mx/busca/dataset/cartografia-geologica-de-la-republica-mexicana-escala-1-250000](https://datos.gob.mx/busca/dataset/cartografia-geologica-de-la-republica-mexicana-escala-1-250000).
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (s.f.). *Normales Climatológicas por Estado*. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=jal>
- Siebert, S., Bruke, J., Faures, J. M., Hoogeveen, J., Döll, P. y Portman, F. T. (2010). Groundwater Use for Irrigation a Global Inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 1863-1880. DOI: 10.5194/hess-14-1863-2010.
- SIGE. (1981). *Síntesis geográfica del estado de Jalisco*. México: Secretaría de Programación y Presupuesto.
- SISR. (Servicio de Información sobre Sitios Ramsar). (2019). Secretaría de Convención Ramsar. Recuperado de <https://rsis.ramsar.org/es?language=es>
- Tóth, J. (2009). Flow Patterns in Composite and Heterogeneous Basins. En *Gravitational Systems of Groundwater Flow: Theory, Evaluation, Utilization*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Vargas-Rojas, R. (2009). Factores de formación del suelo. En *Guía para la descripción de suelos*, (pp. 10-12). Roma: FAO.

UNESCO. (2012). Knowledge Base. En United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, *The United Nations World Water Development Report 4* (vol. 2) (pp. 77-85). París: UNESCO.

Whiteman, C. D. (2000). Precipitation. En C. D. Whiteman (Ed.), *Mountain Meteorology Fundamentals and Applications* (pp. 99-126). Nueva York: Oxford University Press.