

Metodología polínica ambiental (MEPAM) para estudios hidrogeológicos en zonas cársticas. Caso Joya de Luna-Guaxcamá, S.L.P.

Sonia Torres-Rivera¹, José Alfredo Ramos-Leal^{1,*}, Ulises Rodríguez-Robles²,
Simón Eduardo Carranco-Lozada¹ y José Ramón Torres-Hernández³

¹ División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. (IPICYT), Camino a La Presa de San José 2055, Lomas 4 sección, C.P. 78216, San Luis Potosí, S.L.P., México.

² Cátedra CONACyT, El Colegio de la Frontera Sur, Carretera Villahermosa-Reforma km 15.5 Ranchería Guineo, sección II, C.P. 86280, Villahermosa, Tabasco, México.

³ Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), Av. Dr. Manuel Nava 330A, C.P. 78210, San Luis Potosí, S.L.P., México.

*jalfredo@ipicyt.edu.mx

RESUMEN

En la región central de México existen zonas con extensos afloramientos de rocas calcáreas plegadas formando sistemas montañosos con intenso desarrollo cárstico. El abastecimiento de agua en esta región se logra en una parte importante de acuíferos controlados por el sistema cárstico. Aquí se analiza el flujo subterráneo entre la localidad Joya de Luna (en una parte elevada de montaña) y Guaxcamá topográficamente más baja, para determinar si existe conexión entre ambas zonas y comprobar si el agua infiltrada en la parte alta se capta en la parte baja en aprovechamientos como manantiales. Se propone un método novedoso para identificar la conectividad hidráulica entre la zona de recarga y de descarga en un sistema cárstico y fracturado utilizando granos de polen como trazadores, denominada Metodología Polínica Ambiental (MEPAM). Para contrastar y examinar la viabilidad de este método se emplearon datos isotópicos de deuterio y oxígeno-18; se empleó además el exceso de deuterio como un factor para el análisis hidrogeológico. Se documentó el tipo de familias o especies existentes en la zona de recarga Joya de Luna y en la zona de descarga en Guaxcamá, mediante la colecta de polen directamente de la flor en un radio de 5 km con respecto a cada punto de muestreo de agua de las zonas de recarga-descarga y se generó una base de datos con 41 especies polínicas para la caracterización morfológica. Posteriormente se hizo una recolecta de 135 muestras de agua subterránea con granos de polen suspendidos en cinco norias en la zona de recarga y diez manantiales en la zona de descarga. El análisis de especies mostró que granos de polen de las especies de *Zea mays*, *Avena sativa*, *Cicer arietinum* y *Quercus* sp., característicos solo de la zona de recarga, se presentaban en las muestras de agua de la zona de descarga. Los resultados polínicos fueron congruentes con los obtenidos a partir de datos isotópicos y permitieron identificar dos rutas con conexión hidráulica, denominadas G1 y G2. Para cada una de estas rutas se estableció la conexión hidráulica entre muestras de la zona de recarga y muestras de la zona de descarga. En ambas zonas se presentaron granos de *Zea*

mays, *Avena sativa*, y *Cicer arietinum*. El polen de la familia *Quercus* sp., propio de la zona montañosa, se detectó en las muestras de tres puntos de la zona de recarga y siete puntos de la zona de descarga.

Palabras clave: carsticidad; conectividad hidráulica; polen; trazador ambiental; isótopos estables; México.

ABSTRACT

*Extensive outcrops of folded limestone rocks forming mountainous systems with intense karst development are found in areas of central Mexico. An important part of the water supply in these areas is derived from aquifers controlled by the karst system. We analyzed the underground flow between the towns of Joya de Luna (in an elevated part of the mountain) and Guaxcamá, topographically lower, to establish if there is a connection between these zones, and corroborate if the water infiltrated in the upper part is captured in lowland springs. A new method is proposed to qualitatively assess the hydraulic connectivity between the recharge and discharge zones in a karst and fractured system using pollen grains as tracers. Deuterium and oxygen-18 isotopic data were used to compare and evaluate the suitability of this method; in addition, excess deuterium was used as a factor in the hydrogeological analysis. Through a survey of the vegetation present within a 5 km radius in both zones, the pollen families existing in the recharge zone Joya de Luna and the discharge zone in Guaxcamá were documented, and a database with 41 pollen species was generated for morphological characterization. Subsequently, 135 groundwater samples with suspended pollen grains were collected from 5 water wells in the recharge zone and 10 water springs in the discharge zone. The species analysis showed that pollen grains of *Zea mays*, *Avena sativa*, *Cicer arietinum* and *Quercus* sp., characteristic only of the recharge zone, were also present in water samples collected in the discharge area. The pollen-based results were consistent with those obtained with isotopic data; they allowed identifying two routes with hydraulic connection, G1*

and G2. For each of these routes an hydraulic connection was established between samples from the recharge zone and the discharge zone. Grains of *Zea mays*, *Avena sativa*, and *Cicer arietinum* were found in samples from both zones. Pollen of *Quercus* sp., characteristic of the mountainous area was detected three samples of the recharge zone and seven points of the zone of discharge.

Key words: karst; hydraulic connectivity; environmental tracer; pollen; stable isotopes; Mexico.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea en acuíferos cársticos es un caso muy especial debido a que en muchas regiones del planeta los sistemas cársticos son buenas zonas de recarga y excelentes acuíferos por su capacidad para almacenar y transmitir agua, debido a que tienen una rápida infiltración (Antigüedad et al., 2008). En el acuífero cárstico, la permeabilidad primaria de las rocas carbonatadas reside en la propia matriz rocosa y es aumentada en gran medida cuando las rocas son deformadas en una orogenia. El fracturamiento de los acuíferos asociados a formaciones carbonatadas durante el proceso de deformación genera permeabilidad secundaria que facilita el proceso de disolución propio de la carstificación (Király y Müller, 1979; Andreo et al., 2004; Antigüedad et al., 2008). El sistema de conductos en acuíferos cársticos suele ser muy complejo debido a que suele estar formado por una intrincada red subterránea y su dinámica tiene cambios temporales (Benson y Yuhr, 2016).

Por lo general, las aguas que se captan en estos acuíferos son de un solo tipo (bicarbonatadas cálcicas), por lo que si se quiere conocer con mayor precisión si existe conexión entre dos puntos del acuífero, la hidrogeoquímica no es de gran ayuda y se deben utilizar otros métodos, como los trazadores hidrológicos (Arrate et al., 1992). Los trazadores hidrológicos son de utilidad en la comprensión de los procesos de transporte del sistema involucrado, así como de la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea, ya que proporcionan información sobre la dirección del movimiento del agua en el acuífero y pueden ser muy eficientes en la caracterización de los complejos sistemas cársticos (Attinger, 1988; Leibundgut et al., 2009).

Entre los métodos más habituales se encuentra el uso de isótopos como trazadores hidrogeológicos, los cuales pueden ser naturales o artificiales (Rodgers et al., 2005). Los isótopos naturales se dividen en estables (^2H , ^{18}O , ^{13}C , ^3He , ^{39}Ar) y radiactivos (^3H y ^{14}C). De los primeros se utilizan especialmente el deuterio (^2H) y el oxígeno-18 (^{18}O), debido a que la relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ es un reflejo de los fenómenos o procesos fisicoquímicos que han afectado a la molécula de agua durante su circulación (Rodgers et al., 2005). Estos son inherentes al sistema hidrológico de la superficie, el suelo y el agua subterránea sin alterar el medio, por lo cual pueden ser utilizados para la definición de la procedencia de las aguas contenidas en las rocas, áreas de recarga, zonas de circulación y zonas descarga (Singhal y Gupta, 1999).

Entre los trazadores artificiales se encuentran los fluorescentes, de los cuales la Piranina y la Uranina son los más utilizados, porque se pueden detectar a simple vista en concentraciones de 0.01 ppm en la zona de descarga, el análisis en campo es sencillo, los costos son relativamente bajos y su toxicidad es baja (Smart y Smith, 1976; Gospodaric y Zötl, 1976; Smart y Laidlaw, 1977). Sin embargo, existen algunos problemas específicos para este tipo de trazadores, como son los efectos de la temperatura, el pH, los carbonatos, la salinidad y la concentración de sólidos disueltos sobre la fluorescencia (Smart y Laidlaw, 1977). Pernía-Llera et al. (1991) utilizaron fluoresceína y piranina como trazadores de suelos con buenos resultados, aunque

esta última es relativamente inestable en suelos con altos contenidos en materia orgánica; además, la piranina no es tan fácilmente detectable como la fluoresceína, aunque es más resistente a la adsorción y a la decoloración (Drew y Smith, 1969).

También se han empleado los trazadores de origen físicoquímico tales como sales de Na^+ , K^+ , Li^+ , Cl^- , Br^- , y bórax; sin embargo, presentan la desventaja de requerir que, en la zona de inyección, el caudal de agua que entra al acuífero sea grande. Por otra parte, se necesita gran cantidad de estos trazadores (Lesser, 1978), los cuales alteran el sistema natural del medio.

Un método que ha sido poco utilizado en México son los trazadores denominados "particulados", como las bacterias (Leibundgut y Lüthi, 1977; Sabir et al., 1999; Auckenthaler et al., 2002; Flury y Wai, 2003; Zvikelsky y Weisbrod, 2006), esporas de *Lycopodium* (Back y Zotl, 1975; Benischke et al., 1980) y polen marcado (Käss y Reichert, 1986; Göppert y Goldscheider, 2008); sin embargo, la utilidad de usar trazadores particulados ha quedado resaltada en trabajos como el de Wanner y Pusch (2000), quienes reportan que en un río de tierras bajas en Spree, Alemania, aplicaron esporas marcadas con fluorescencia, con las cuales estimaron las distancias de transporte y las velocidades de depósito de partículas finas de materia orgánica. Estudios como el de Spandre et al. (2003) muestran el potencial de este método con esporas de *Lycopodium clavatum* como marcador de aguas subterráneas para un sistema cárstico, permitiéndolo determinar las conexiones hidráulicas subterráneas y los puntos de inyección en las canteras de explotación de mármoles de los Alpes Apuanos y los manantiales de abastecimiento de agua potable del acueducto de Carrara (Italia). Por lo anterior, es ampliamente aceptado que el uso de polen y esporas como trazadores permite obtener información de conexiones hidrológicas, trayectorias de partículas, direcciones de flujo y velocidades (Mangin, 1975; IAEA, 1989; Clark y Fritz, 1997; Kehew, 2001; Aggarwal et al., 2005). Además, empleando este método se puede determinar la dispersión hidrodinámica: escorrentía, tiempo de residencia, infiltración, procesos de difusión en las aguas superficiales, simulación de zonas de descarga y transporte de contaminantes en sistemas cársticos (Leibundgut et al., 2009; Luhmann et al., 2012).

Una alternativa para estudios hidrogeológicos con estas condiciones es el uso de los isótopos estables ^{18}O y ^2H (en abundancia natural); estos trazadores conservativos son ideales para estudios de las aguas subterráneas, ya que pueden ser utilizados para determinar el tiempo de residencia del agua, conocer la fuente del agua y para ayudar en la generación de un sistema conceptual de circulación de agua en un acuífero (zona de recarga-circulación-descarga) (Singhal y Gupta, 1999). Las variaciones espacio-temporales en el enriquecimiento en isótopos pesados, ^{18}O y ^2H , en las moléculas del agua de lluvia se relacionan con el efecto de fraccionamiento que acompaña a la evaporación desde el océano y la condensación durante el transporte atmosférico del vapor de agua (Dansgaard 1964; Valencia, 2013). Los factores principales que determinan la composición isotópica de una muestra son la temperatura (mientras más elevada sea la temperatura, más se enriquece el agua en isótopos pesados; Dansgaard, 1961, 2004), la humedad atmosférica (al bajar el valor del parámetro, se incrementa la concentración de ^{18}O y ^2H en la fase de vapor; Dody et al., 1995), la cantidad de precipitación (al incrementarse la precipitación, se tiene menor enriquecimiento en isótopos pesados; Yurtsever y Gat, 1981; Bowen y Wilkinson, 2002; Lisowska-Gaczorek et al., 2017), altitud (al aumentar la altitud, se tiene menor enriquecimiento en isótopos pesados), el efecto estacional (las precipitaciones de verano están más enriquecidas en isótopos pesados que las precipitaciones invernales; Dansgaard, 1964; Mook, 2001; Vogel et al., 1975). La existencia de una termodependencia entre el ^{18}O y ^2H implica una correlación que ha sido bien definida por Craig (1961). La línea de agua meteórica global

(Global Meteoric Water Line, GMWL) corresponde al promedio de muestras de líneas meteóricas locales, cada una de ellas influidas por los factores de fraccionamiento isotópico (Craig, 1961).

Las variaciones espacio-temporales que presentan los isótopos estables hacen necesario incorporar un tercer elemento de análisis que ayuda a la interpretación de los isótopos estables en los estudios hidrogeológicos, el factor *d-excess* (exceso de deuterio). El factor *d-excess* se obtiene por cálculo a partir de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, y es un indicador de la génesis de vapor de agua (Rindsberger *et al.*, 1983).

En el área de interés de la presente investigación realizamos un estudio previo con la finalidad de caracterizar la conectividad hidráulica entre la zona de recarga y descarga en la zona media del Estado de San Luis Potosí, para lo cual inicialmente se implementaron dos metodologías particulares: i) las esporas de *Lycopodium clavatum* y ii) las esferas de unícel teñidas. Ambas zonas fueron monitoreadas durante un año, sin embargo, no se obtuvieron resultados satisfactorios, ya que las esporas y esferas no fueron identificadas en las muestras de agua de la zona de descarga, y suponemos que quedaron retenidas en las rocas carbonatadas o posiblemente se perdieron en el medio cárstico. A raíz de nuestra investigación previa, identificamos las siguientes limitantes: i) la necesidad de invertir mucho tiempo de muestreo para poder detectar el trazador; ii) utilizar grandes cantidades de esporas de *Lycopodium clavatum* y unícel marcadas y; iii) alto costos.

Debido al poco éxito de los métodos utilizados con las esporas de *Lycopodium clavatum* y las esferas de unícel teñidas, se desarrolló una tercera variante nombrada en este estudio como Metodología Polínica Ambiental (MEPAM), la cual consiste en caracterizar polínicamente la zona de recarga y descarga siguiendo un gradiente altitudinal de la

vegetación para demostrar la conexión entre ambas zonas (Figura 1). Para validar la MEPAM se emplearon los trazadores isotópicos ^2H y ^{18}O y el índice de exceso de deuterio (*d-excess*), los cuales evidencian y confirman la conectividad hidráulica entre Joya de Luna (zona de recarga) y Guaxcamá (zona de descarga).

El enfoque que presentamos en este trabajo con la MEPAM, tiene el potencial de contribuir a la caracterización e identificación de la conectividad hidráulica entre zonas de recarga y descarga, rutas de migración (direcciones de flujo) y tiempos de residencia en sistemas cársticos complejos y así estudiar la relación entre una zona de recarga y la de descarga, utilizando granos de polen e isótopos estables. Al combinar ambos métodos se obtienen evidencias experimentales que coinciden y confirman la conectividad hidráulica entre ambas zonas. Es un método novedoso, de mediano costo y la ventaja sobre otras metodologías (trazadores de fluorescencia, isótopos radiactivos, bacterias y polen teñido) es que no altera el sistema natural.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Localización

El área de trabajo se encuentra ubicada en la parte central del Estado de San Luis Potosí, entre los paralelos 22° 05' y 22° 56' de latitud Norte y entre los meridianos 100° 07' y 100° 28' de longitud Oeste (Figura 1). Se encuentra en la región hidrológica 26, Panuco (RH-26), e incluye las subregiones hidrológicas (010) Buenavista y (014) Cerritos-Villa Juárez (REPD, 2005). Cuenta con dos tipos de clima: al oriente, seco-semicálido y al poniente, semiseco-semicálido,

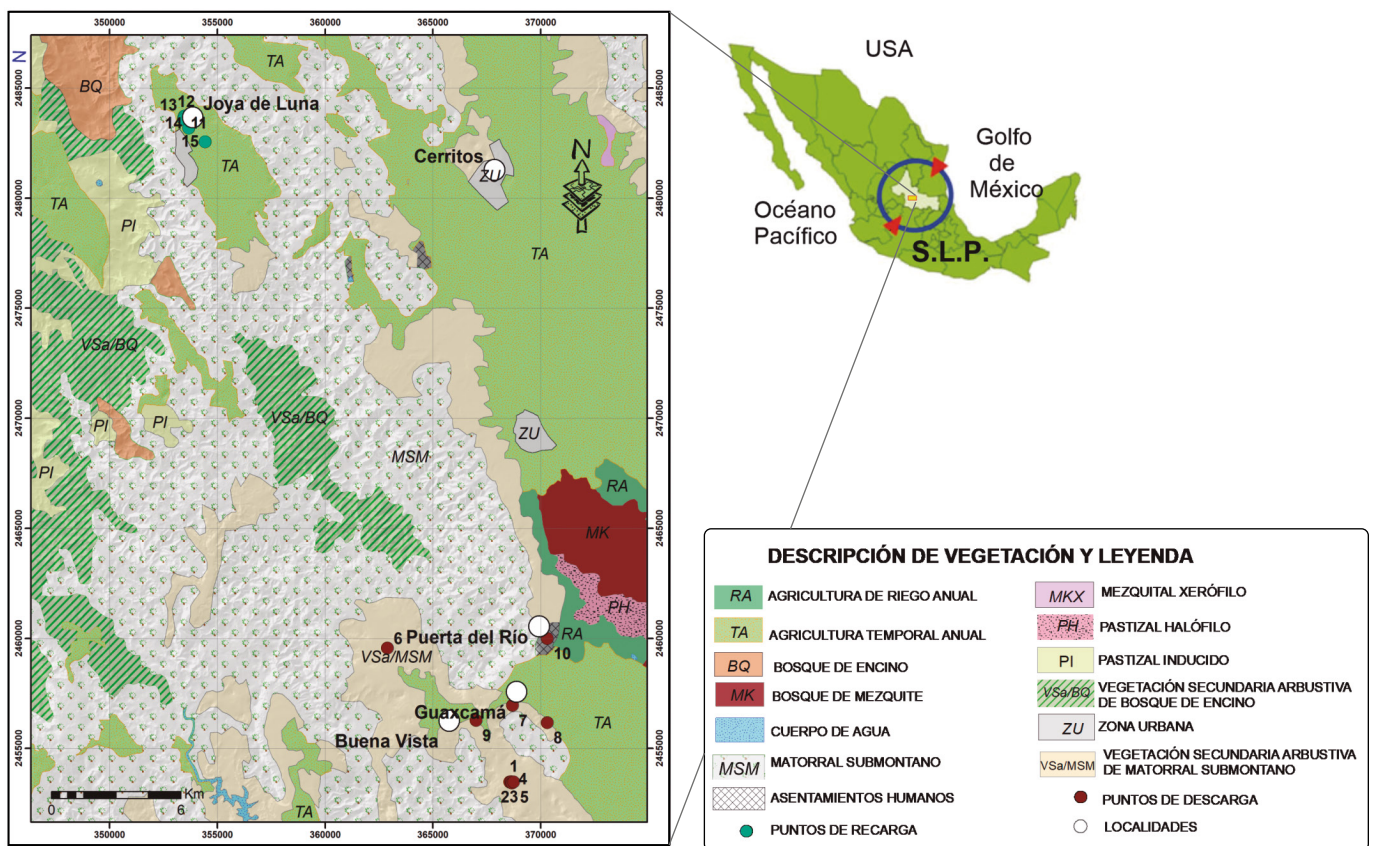


Figura 1. Localización del área de estudio en la porción central del Estado de San Luis Potosí (S.L.P.) y distribución de tipos de vegetación; se muestra la localización de los puntos de recarga y descarga de agua subterránea estudiados en la localidad Joya de la Luna y el área de Guaxcamá, respectivamente.

con una temperatura media anual de 20 °C (CONAGUA, 2010) y una precipitación anual de 492 mm (CONAGUA, 2010). El régimen de lluvia incluye los meses de mayo a octubre y la época de estiaje es de noviembre a abril. Los vientos dominantes van de este a oeste (CONAGUA, 2010). La vegetación en el área de estudio es diferenciada debido a los contrastes de relieve orográfico que hay en la región. En la zona de recarga, que corresponde a la región de mayor elevación, cuenta con vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino (VSa/QB), bosque de encino (BQ), agricultura temporal anual (TA), pastizal inducido (PI), matorral submontano (MSM) y agricultura de riego anual (RA); en la parte topográficamente más baja o zona de descarga existen fundamentalmente matorral submontano (MSM), agricultura temporal anual (TA), mezquital (MK), vegetación secundaria arbustiva de matorral submontano (VSa/MSM), agricultura de riego anual (RA), pastizal halófilo (PH) y mezquital xerófilo (MKX) (Figura 1).

Geología e hidrogeología

En el área de estudio se presentan rocas con edades que van del Cretácico al reciente (Figura 2). Las más antiguas corresponden a la Formación Guaxcamá, compuesta por sedimentos evaporíticos de anhidrita del Cretácico Inferior con edades del Neocomiano-Aptiano (Carrillo-Bravo, 1971), que se encuentran en forma diapírica, por lo que su espesor tectónico alcanza hasta 3009 m (Carrillo-Bravo, 1971).

La Formación Guaxcamá es cubierta por caliza arrecifal del Albiano-Cenomaniano perteneciente a la Formación El Abra, cuyo espesor alcanza hasta 1800 m (Zapata-Zapata y Pérez-Venzor, 1979). Esta formación se encuentra ampliamente distribuida en las sierras altas de la región, las cuales son parte la Sierra Madre Oriental. En general, esta secuencia es rica en micro y macrofauna de aguas someras, destacándose la presencia de foraminíferos bentónicos (miliolidos y orbitolinas). La macrofauna corresponde a rudistas, equinodermos, gasterópodos y aisladamente se llegan a observar corales y algas de edad Albiano-Cenomaniano (Carrillo-Bravo, 1971). Esta unidad calcárea arrecifal subyace a su vez esta forma discordante a los depósitos de turbiditas formados por arenisca y lutita de la Formación Cárdenas del Campaniano-Maestrichtiano. Rocas volcánicas de composición andesítica del Oligoceno, cubren a las unidades Cretácicas; estas rocas volcánicas tienen espesores de aproximadamente 140 m (Labarthe et al., 1982; Torres-Hernández et al., 2014).

El comportamiento hidrogeológico dentro de la zona de estudio es controlado por las condiciones estructurales (pliegues, fallas y fracturas) y por la distribución de materiales geológicos (unidades permeables e impermeables) en la región. Los sistemas de fallas y fracturas pueden actuar como conductos hidrológicos o como zonas permeables que facilitan la recarga subterránea del sistema acuífero. Así mismo, en la zona de recarga en Joya de Luna existen cavidades de

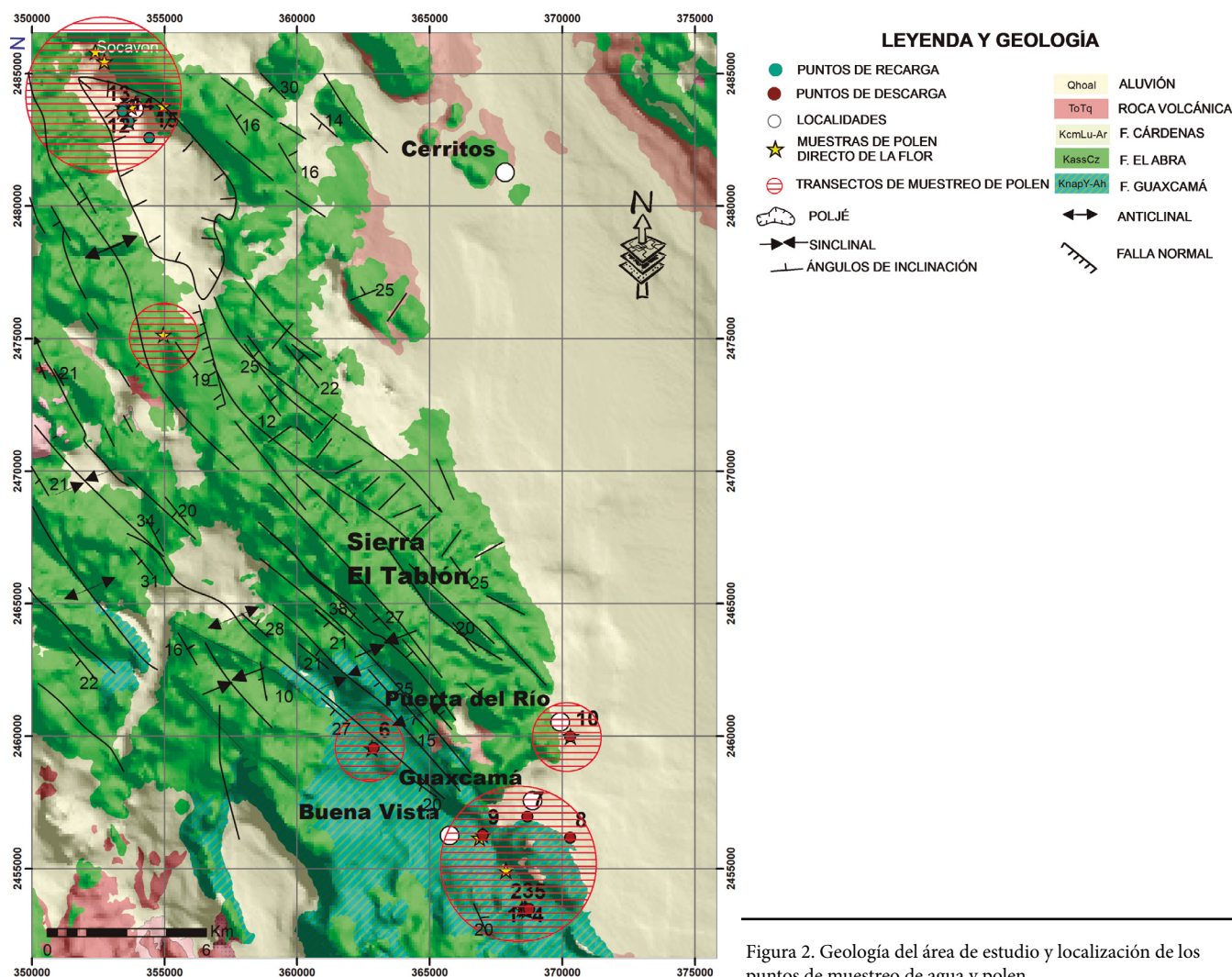


Figura 2. Geología del área de estudio y localización de los puntos de muestreo de agua y polen.

disolución típicas de un ambiente cárstico (dolinas), como es el caso del Socavón al NW de la cuenca (Figura 2). Es posible que existan un gran número de fracturas y cavidades en el subsuelo, como lo evidencian las estructuras de colapso y disolución (dolinas) alineadas en los bordes de la Sierra del Tablón (Figura 2) (Ramos-Leal *et al.*, 2012).

Las principales zonas de recarga de la región se ubican en las sierras, donde la Formación El Abra se encuentra aflorando (Figura 2). Otra posible zona de recarga es la cuenca cerrada de Joya de Luna. La zona de descarga se ubica en las partes bajas al sur de la zona de estudio, en el contacto entre la Formación El Abra y la Formación Guaxcamá (Figura 2). El fracturamiento y las estructuras cársticas (fallas y dolinas) están alineadas con orientación de NW-SE y NE-SW. Es probable que el Socavón de Joya de Luna (1230 m s.n.m.) y las dolinas alineadas estén conectados por cavidades bajo la Sierra El Tablón hasta la zona de descarga en Guaxcamá, la cual tiene una altura de 1112 m s.n.m.; la diferencia de elevación entre ambas localidades de 118 m genera una pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua, es decir, representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, una medida que indica el sentido del flujo de agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Metodología polínica ambiental

Caracterización polínica directa de la vegetación

El muestreo de polen se realizó directo de la flor en un radio de 5 km con respecto a cada punto de muestreo de agua de las zonas de recarga-descarga (ver Figura 2), y se generó una base de datos con información descriptiva referente al sitio de la cosecha (Tabla 1). A cada muestra se le dio un tratamiento, el cual consistió en colocar una tercera parte de la preparación y marcar con glicogelatina teñida con fucsina en una lámina delgada (Figura 3), para facilitar la identificación en el análisis al microscopio (Nikon Eclipse CiPOL, programas NIS elements de Nikon con cámara integrada Kinon DS-Fi2) y microscopio electrónico de barrido (MEB), con los que se realizó la caracterización de cada una de las especies de polen (Figura 3 y Suplemento electrónico A1). La base de datos de la Tabla 1 se complementó con la descripción morfológica (Suplemento electrónico A2) de los granos de polen de las zonas de recarga y descarga. La Tabla 1 sirvió como una guía de referencia para caracterizar con facilidad si las partículas que se encuentran suspendidas en el agua subterránea de cada aprovechamiento pertenecen o no a la vegetación del área de estudio.

Toma de muestras de agua subterránea y captura de polen

Se realizó la toma de muestras de agua subterránea en dos periodos, el primero abarcó de agosto 2013 a abril 2014 y el segundo se realizó en el mes de junio de 2016. Se tomaron muestras de agua subterránea en 15 sitios del área de estudio sumando en total 135 muestras (5 norias en la zona de recarga en Joya de Luna y 10 manantiales en la zona de descarga en las cercanías de Guaxcamá). Para la toma de muestra y captura de las partículas suspendidas en el agua de las norias y manantiales se sigue el procedimiento de la Figura 3. Después del filtrado de las muestras de agua, el polen presente en ellas quedó retenido en los filtros (0.45µm), los cuales se recuperaron en el laboratorio y fueron conservados en bolsas de papel celofán etiquetadas. Posteriormente se prepararon las muestras en láminas delgadas, se procedió a la identificación y caracterización morfológica del polen (Figura 3 y Suplemento electrónico A2) y finalmente se realizó la comparación de especies de polen con las colectadas directamente de la vegetación (Suplemento electrónico A1). Los resultados de la caracterización morfológica de

polen fueron interpretados con un análisis de presencia/ausencia y un análisis de frecuencia de las especies presentes en las zonas de recarga/descarga, a partir de los cuales se generó una base de datos (Tabla 2).

Isótopos estables

Para el análisis isotópico de ^{18}O y ^2H se eligieron las muestras de agua del mes de noviembre 2013 como un mes representativo del estudio. Las mediciones se realizaron mediante un Espectrómetro Láser Isotópico (*Cavity ring-down spectroscopy*, CRDS) (Figura 3). Los valores de los isótopos estables son expresados con la notación δ en unidades ‰, vis VSMOW2/SLAP2 (Vienna Standar Mean Ocean Water /Standard Light Antarctic Precipitation 2) (Ecuación 1).

$$\delta = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{estándar}}}{R_{\text{estándar}}} (1000) = \text{‰} \quad (1)$$

Donde R_{muestra} es la relación isotópica medida para la muestra y $R_{\text{estándar}}$ es la relación isotópica del estándar. En la notación δ los valores positivos indican un enriquecimiento de ^{18}O o ^2H en comparación con el estándar utilizado, mientras que los valores negativos significan un agotamiento de los isótopos más pesados en la muestra (Leibundgut *et al.*, 2009).

Luego se calculó el *d-excess*, d (‰) = $\delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$, a partir de los valores de ^{18}O y ^2H determinados para una misma muestra de agua y no con valores medios, para evitar introducir errores. El exceso de deuterio más negativo indica que hubo poca interacción agua-roca, lo cual se asocia a zonas de recarga, por el contrario, cuando existe mayor interacción agua-roca, el exceso de deuterio es más positivo y las muestras se asocian a zonas de descarga.

El agua de lluvia capta los granos de polen de la flor al interceptarse con las gotas, los cuales son infiltrados al subsuelo durante la recarga a través de estas fracturas, cavernas o por hundimiento parcial en forma de dolinas en sistemas restringidos, como lo es el sistema cárstico. El agua, como agente de movilidad para el polen, cuenta con una firma isotópica particular, misma que es fraccionada por el medio físico y químico, hasta su punto de surgencia. Conociendo la firma isotópica inicial se puede trazar la ruta de desplazamiento del agua desde la zona de recarga (norias) hasta su punto de surgencia (manantiales) sirviendo como un medio de transporte de los granos de polen en el flujo subterráneo. Mediante esta analogía, podemos identificar los distintos grupos de agua con sus respectivas zonas de recarga y de descarga, rastreando los granos de polen.

RESULTADOS

Registro polínico directamente de la vegetación

Debido a que las condiciones físicas, climáticas, geológicas y de altitud son diferentes, en la zona de recarga y descarga se desarrollan diferentes tipos de especies. En la zona de estudio se identificaron 41 especies en total; la zona de recarga Joya de Luna con vegetación de MSM, TA, BQ (vegetación de matorral submontano, cultivo de temporada y bosque de encino), se caracterizó por 21 especies, y la zona de descarga Guaxcamá con vegetación de MSM, TA y VSa/MSM (matorral submontano, cultivo de temporada, y vegetación secundaria arbustiva de matorral submontano), por 20 especies (Tabla 1 y Suplemento electrónico A1).

Registro polínico en agua subterránea

En las muestras de agua subterránea colectadas en el periodo agosto 2013 – abril 2014 y en junio de 2016 se identificaron 22 especies o familias polínicas (Tabla 2, Figura 4); entre estos dos periodos de colecta de polen algunas familias se repetían. Para la descripción

Tabla 1. Base de datos de las especies colectadas directamente de la vegetación en el área de estudio 2013-2016.

Lugar	X	Y	Altitud (m)	Clave
ZONA DE RECARGA	352397	2485844	1241	<i>Acabe (Acacia berlandieri)</i>
	352397	2485844	1241	<i>Helpe (Helietta pervifolia)</i>
	352397	2485844	1241	<i>Neoin (Neopringlea integrifolia)</i>
	352397	2485844	1241	<i>Karmo (Karwinskia mollis)</i>
	352397	2485844	1241	<i>Zanfa (Zanthoxylum fagara)</i>
	352397	2485844	1241	<i>Prola (Prosopis laevigata)</i>
	352397	2485844	1241	<i>Acafa (Acacia farnesiana)</i>
	352737	2485467	1245	<i>Zeama (Zea mays)</i>
	352737	2485467	1245	<i>Cicar (Cicer arietinum)</i>
	353760	2483742	1247	<i>Avesa (Avena sativa)</i>
	368569	2453468	1245	<i>Boure (Bouteloua repens)</i>
	368666	2453434	1245	<i>Delma (Delphinium madrense)</i>
	368627	2453500	1243	<i>Havpa (Havardia pallens)</i>
	368591	2453489	1244	<i>Lanhi (Lantana hispida)</i>
	368591	2453489	1244	<i>Eryhe (Eryngium heterophyllum)</i>
	324299	2482729	1157	<i>Havardia sp.</i>
	354962	2483788	1157	<i>Dondonea sp.</i>
	354962	2483788	1157	<i>Opuro (Opuntia robusta)</i>
	354962	2483788	1157	<i>Cylim (Cylindropuntia imbricata)</i>
354962	2483788	1157	<i>Polypodiopsida sp.</i>	
355004	2483859	1475	<i>Quercus sp.</i>	
ZONA DE DESCARGA	362827	24599557	1262	<i>Solni (Solanum nigrescens)</i>
	362827	24599557	1262	<i>Flepy (Fleischmannia pycnocephala)</i>
	362827	24599557	1262	<i>Compositae</i>
	362827	24599557	1262	<i>Calvi (Calypticarpus vialis less)</i>
	367881	2454952	1225	<i>Dodvi (Dodonaea viscosa)</i>
	367881	2454952	1225	<i>Leguminosae</i>
	367881	2454952	1225	<i>Thyse (Thymophylla sentifolia laa)</i>
	367881	2454952	1225	<i>Trica (Tridax candidissima)</i>
	367881	2454952	1225	<i>Casla (Castilleja lanata)</i>
	367881	2454952	1225	<i>Pluca (Pluchea carolinensis)</i>
	367881	2454952	1225	<i>Rhupa (Rhus pachyrrhachys)</i>
	367881	2454952	1225	<i>Lanhi (Lantana hispida)</i>
	368689	2450696	1211	<i>Nepbi (Nephrolepis biserrata)</i>
	366894	2456171	1197	<i>Malvaceae</i>
	367008	2456285	1192	<i>Asteraceae</i>
	370322	2460003	1005	<i>Boute (Bouvardia ternifolia)</i>
	368485	2453490	1239	<i>Canavalia sp.</i>
	353422	2483583	1224	<i>Bouteloua sp.</i>
	353663	2483188	1231	<i>Budma (Buddleja marrubifolia)</i>
353461	2483733	1230	<i>Pennisetum sp.</i>	

de los resultados se emplean nombres abreviados de las especies, los cuales se definen en la Tabla 2. Las especies de *Poaceae* (242 pólenes), *Nepbi* (74 pólenes) y *Zeama* (65 pólenes) son las que reportaron mayor número de granos en la zona de recarga-descarga. Algunas especies propias de TA en la zona de recarga fueron identificadas en la zona de descarga (Tabla 2, Figura 4). El *Cicar* que se identificó en los puntos 12, 13, 14, 15 de la zona de recarga y en los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 7, de la zona de descarga (Tabla 2). La *Avesa* se encontró en los puntos de la zona de recarga 11, 12, 13, 14, 15 y en los puntos de la zona de descarga 6, 7, 8, 9 y 10. La especie *Zeama* se identificó en la zona de recarga 11, 13, 14, 15 y descarga 1, 2, 4, 5, 6, 9, 10 (Tabla 2, Figura 4). Cabe mencionar que de *Quercus* sp., característico de la zona montañosa (BQ) e identificado en la zona de recarga en los puntos de muestreo 11, 13, 15, se detectaron granos de polen en los puntos 1, 6, 9 y 10 de la zona de descarga (Tabla 2, Figura 1 y 4). Considerando las cuatro especies

antes mencionadas, se realizó un análisis de presencia/ausencia de la especie en espacio y tiempo, tomando en cuenta el tiempo de cosecha y fenología para cada especie (Tabla 3).

Aplicando el análisis de frecuencias, pudimos identificar la presencia de los granos de polen de la especie para cada aprovechamiento. Hemos identificado que la zona de recarga cuenta con menor número de granos de polen que la zona de descarga (241 vs. 468, Figura 4), los cuales se distribuyen de la siguiente manera en la zona de recarga *Poaceae* (54), *Nepbi* (45), *Zeama* (38), *Zanfa* (17), *Avesa* (18), *Cicar* (8) y *Quercus* sp. (5) (Figura 4a). Para la zona de descarga *Poaceae* (188), *Dodvi* (50), *Nepbi* (29), *Zeama* (27), *Avesa* (24), *Cicar* (13) y *Quercus* sp. (7) y *Eryhe* (2) (Figura 4b).

Isótopos estables

Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en muestras de agua subterránea marcan

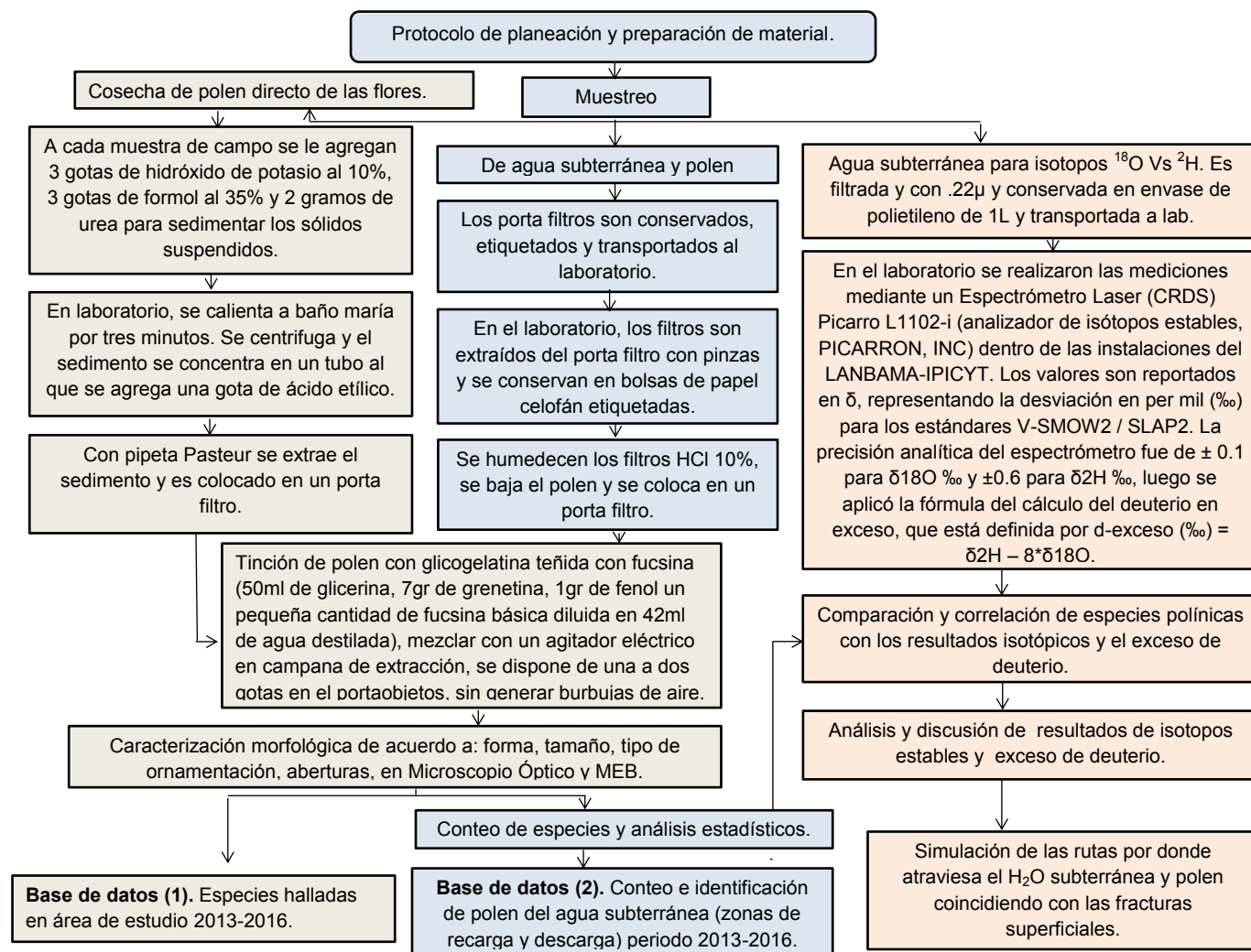


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología polínica ambiental (MEPAM).

una línea de evolución de los procesos de fraccionamiento químico, de interacción agua-roca y de evaporación definida por la relación $\delta^2\text{H} = 4\delta^{18}\text{O} - 53.1$, a lo largo de la cual las muestras de los distintos aprovechamientos, norias y manantiales, forman cuatro grupos de agua subterránea con firmas isotópicas particulares (Figura 1 y 5).

Al grupo 1 (G1) corresponden las muestras colectadas en el sitio 11 de la zona de recarga y en los sitios 1, 4, 6 de la zona de descarga, siendo el grupo de menor evaporación ($\delta^{18}\text{O} -10.20$ y $\delta^2\text{H} -97.15$). Para este grupo, la muestra de la zona de recarga en Joya de Luna y el agua que emerge en la zona de descarga de Guaxcamá tienen una firma isotópica similar, lo cual refleja un proceso similar de fraccionamiento y de evaporación.

Las muestras del grupo 2 (G2), colectadas en el sitio 15 de la zona de recarga y en los sitios 5, 7, 10 de la zona de descarga, tienen valores isotópicos ($\delta^{18}\text{O} -9.11$ y $\delta^2\text{H} -92.45$, Figura 5) que indican una mayor evaporación que las del G1. Su firma isotópica es diferente a los grupos G1 ($\delta^{18}\text{O} -10.20$ y $\delta^2\text{H} -97.15$), G3 ($\delta^{18}\text{O} -9.43$ y $\delta^2\text{H} -84.83$) y G4 ($\delta^{18}\text{O} -6.20$ y $\delta^2\text{H} -79.67$), y sugiere otra ruta de circulación subterránea que conecta hidráulicamente las zonas de recarga-descarga.

Para el grupo 3 (G3), los puntos de aprovechamiento 2, 3 y 9 muestran condiciones de evaporación muy similares al grupo G2 (G3: $\delta^{18}\text{O} -9.43$ y $\delta^2\text{H} -84.83$ vs. G2: $\delta^{18}\text{O} -9.11$ y $\delta^2\text{H} -92.45$), considerándose

como un flujo local, la diferencia de altitudes es pequeña (de 35 m) y su conexión hidráulica es corta (Figura 5).

Las muestras del grupo 4 (G4), colectadas en los puntos recarga 12, 13 y 14 y en el punto de descarga 8, presenta una mayor evaporación de agua ($\delta^{18}\text{O} -6.20$ y $\delta^2\text{H} -79.67$). La diferencia de elevaciones entre zona de recarga-descarga es de 118 m y están separadas por 26 km, evidenciando una conectividad hidráulica entre ambas zonas (Figuras 1 y 5).

DISCUSIÓN

De las 41 especies polínicas caracterizadas en la región, en el periodo de agosto 2013 – junio 2016, solo 22 se identificaron en las muestras de agua subterránea de la zona de recarga y descarga. Los granos de polen coinciden con el periodo fenológico de las especies y los meses de cultivo; por ejemplo, para la especie *Cicar* la preparación del terreno es en primavera y se cosecha en octubre, los granos de polen de esta especie se encontraron en las muestras de agua subterránea de la zona de descarga colectadas en el mes de agosto 2013, octubre 2013 y abril 2014 (3, 6 y 10 meses después). La siembra del *Zeama* es en octubre y la cosecha en abril, los granos de polen se encuentran en agosto 2013, noviembre 2013, enero 2014 y febrero 2014 (4, 7, 9 y 10

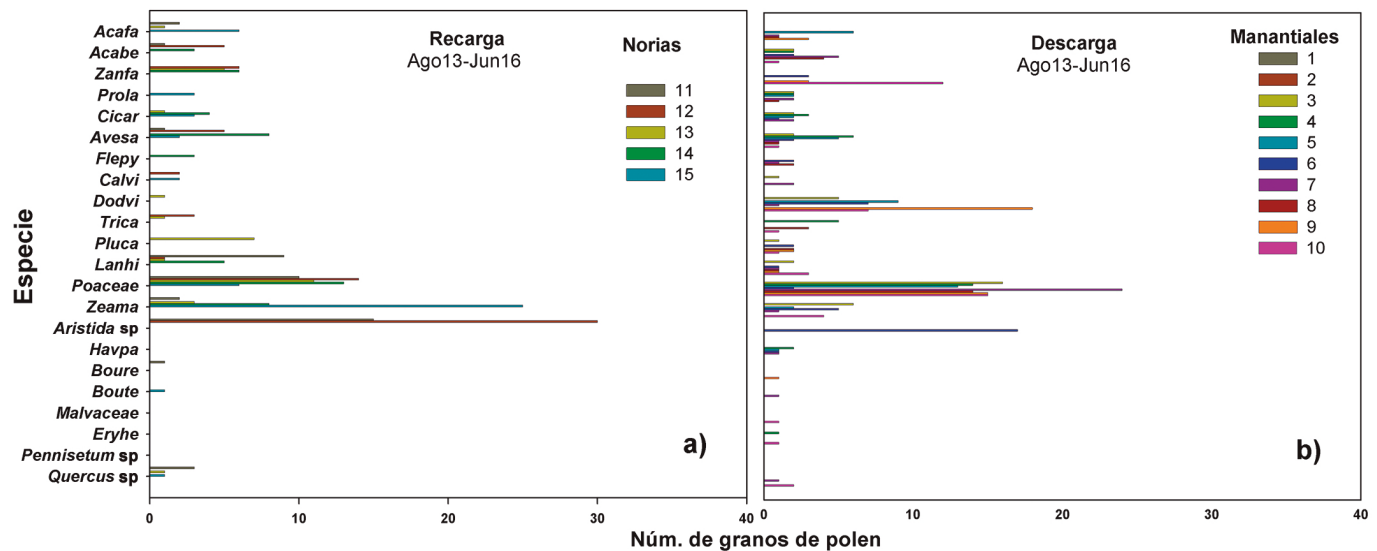


Figura 4. Especies identificadas vs. el número de granos de polen presentes en muestras de agua subterránea colectadas de (a) norias de la zona de recarga y (b) manantiales de la zona de descarga, en el periodo de agosto de 2013 a junio de 2016. Las abreviaturas de los nombres de las especies se definen en la Tabla 2 y la localización de los sitios de muestreo se presenta en las Figuras 1 y 2.

meses después). Después de la siembra del maíz se prepara el terreno para *Avesa* la cual se cosecha en primavera (marzo), los granos de esta especie se encuentran en agosto 2013, noviembre 2013 y febrero 2014 (5, 7 y 11 meses después). El *Quercus* sp. solo se encuentra en la zona montañosa y su tiempo de floración es en abril, los granos de esta misma especie se identificaron en las muestras de agua subterránea colectadas en la zona de descarga en el mes de octubre de 2013 y en enero de 2014 (6 y 9 meses después) (Tabla 3). Los granos de polen de cultivo y característicos de la zona de recarga se identificaron en la zona de descarga de seis a siete meses después, lo cual representa el tiempo aproximado de residencia del agua subterránea en el área de estudio (Tabla 3). Este tiempo de residencia de 6 a 7 meses sugiere que

la velocidad promedio es de 124 a 145 m/día. Cuatro especies características y propias de la zona de recarga que se presentaron en la zona de descarga (*Quercus* sp., *Avesa*, *Cicar*, *Zeama*) fueron tomadas como trazador clave para establecer conexión entre las zonas de recarga y descarga, siguiendo el gradiente de vegetación con BQ, TA, RA, MSM y VSa/BQ (ver Figura 1). El utilizar granos de polen naturales como marcadores en estudios hidrogeológicos ha proporcionado resultados muy satisfactorios.

La metodología MEPAM es un método novedoso, que permite obtener información de conexiones hidrológicas, trayectorias de partículas, direcciones de flujo, determinar de velocidades de flujo y, además, tiempos de residencia de 6 a 7 meses con distancias de hasta 26 km en

Tabla 3. Especies presentes en diferentes puntos de muestreo siguiendo la ruta G2 de conexión hidráulica de la zona de recarga a la de descarga. Las celdas con líneas diagonales indican las especies que fueron utilizadas como trazadores. Las abreviaturas de los nombres de las especies se definen en la Tabla 2.

Especies	Z. recarga		Z. descarga		Z. recarga		Z. descarga		Z. recarga		Z. descarga		Z. recarga		Z. descarga		Z. recarga		Z. descarga	
	15	5	7	10	15	5	7	10	15	5	7	10	15	5	7	10	15	5	7	10
P. muestreo	Ago 13		Sep 13		Oct 13		Nov 13		Dic 13		Ene 14		Feb 14		Mar 14		Abr 14			
<i>Acafa</i>	■																			
<i>Acabe</i>																				
<i>Zanfa</i>																				
<i>Prola</i>																				
<i>Cicar</i>	■				■															
<i>Avesa</i>	■																			
<i>Flepy</i>																				
<i>Calvi</i>																				
<i>Dodvi</i>																				
<i>Trica</i>																				
<i>Pluca</i>																				
<i>Lanhi</i>																				
<i>Poaceae</i>																				
<i>Zeama</i>																				
<i>Quercus</i> sp.																				

un sistema cárstico. La MEPAM se puede emplear para el monitoreo de polen en trayectos largos en sistemas cársticos, por ejemplo para un enfoque más regional que considere las recargas en las sierras de Álvarez y El Coro (al este y noreste de la ciudad de San Luis Potosí), con sistemas mayores de descarga en la zona media del Estado de San Luis Potosí (p.ej., el manantial de la Media Luna, en Río Verde). Análisis más regionales han sido reportados por algunos autores (Peñuela-Arévalo y Carrillo-Rivera, 2013), utilizando la teoría de sistemas de flujo, donde la parte orgánica incluida en el análisis es realmente marginal y solo muy complementaria en la visión de caracterizar la conexión de sistemas de recarga y descarga de agua subterránea.

Una contribución científica del presente trabajo fue exponer la metodología MEPAM, la cual demuestra que el registro polínico en conjunción con isótopos ambientales tienen un enorme potencial para resolver problemas de conectividad hidráulica entre zonas de recarga y zonas de descarga o bien para identificar la conexión hidráulica entre dos cuencas hidrogeológicas en medios fracturados.

Los valores de d -excess indican las aproximaciones de las diferencias isotópicas asociadas a las agrupaciones de los diferentes aprovechamientos (Figura 6). El grupo G1, empobrecido en isótopos, es el que presenta la más alta diferencia isotópica entre las zonas de recarga y descarga (7.94 ‰ de diferencia). Su tiempo de residencia e interacción agua-roca refleja un recorrido mucho mayor y/o tiempo de descarga lento. Para el grupo G2 enriquecido medianamente en isótopos, la diferencia entre recarga y descarga es de 6.27 ‰, diferencia isotópica menor a la de G1 lo que sugiere que el tiempo de residencia e interacción agua-roca es ligeramente menor y por lo tanto su desplazamiento en el subsuelo es medianamente rápido. Esto se debe a que el agua atraviesa por un medio que está más fracturado y/o poroso debido a la disolución de la roca, y la relación de la mezcla para un aprovechamiento como noria o manantial no es constante como lo indica Salameh (2004). Solo la recarga local puede explicar el enriquecimiento de isótopos (Salameh, 2004) y su fraccionamiento isotópico

bajo. El grupo G3 presenta una diferencia isotópica entre recarga y descarga de 3.99 ‰, lo cual sugiere que su tiempo de residencia e interacción agua-roca es menor y la descarga es rápida. En el grupo G4 la diferencia isotópica es mayor 6.36 ‰, por lo que se asume que el tiempo de residencia e interacción agua-roca es mayor y/o su descarga es menos rápida y de evaporación alta. Los grupos G1 y G2 son los grupos más representativos porque tienen una diferencia isotópica alta y mediana, un tiempo de residencia e interacción agua-roca mayor y el tiempo de descarga lento. Las firmas isotópicas con diferentes grados de fraccionamiento de los diferentes grupos G1 a G4 se muestran en la Figura 5, y son coherentes con lo que se muestra en gráfica de d -excess (Figura 6), que sugiere la conexión hidráulica entre las zonas de recarga y descarga de agua subterránea. Esto también concuerda con los resultados obtenidos con la MEPAM utilizando los granos de polen referidos en la Figura 4 y Tabla 2. Además, la estructura misma de la sierra donde se ubica Joya de Luna, y la ubicación de la zona de descarga presentan un sistema de fracturamiento asociado a la charnela de un pliegue mayor de dirección NW-SE, lo que sugiere que ambas zonas están conectadas hidráulicamente a través de dicho sistema de fracturamiento (Figura 7).

CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio mediante la metodología polínica ambiental (MEPAM) contrastada o complementada con el uso de isótopos estables, tiene el potencial de contribuir a la caracterización e identificación de la conectividad hidráulica en zonas de recarga y descarga, rutas de migración (direcciones de flujo) y tiempos de residencia en sistemas cársticos complejos y así, estudiar la relación entre una zona de recarga y la de descarga.

Con los análisis de frecuencia y presencia/ausencia, se determinó que el tiempo fenológico de las especies utilizadas como trazadores en

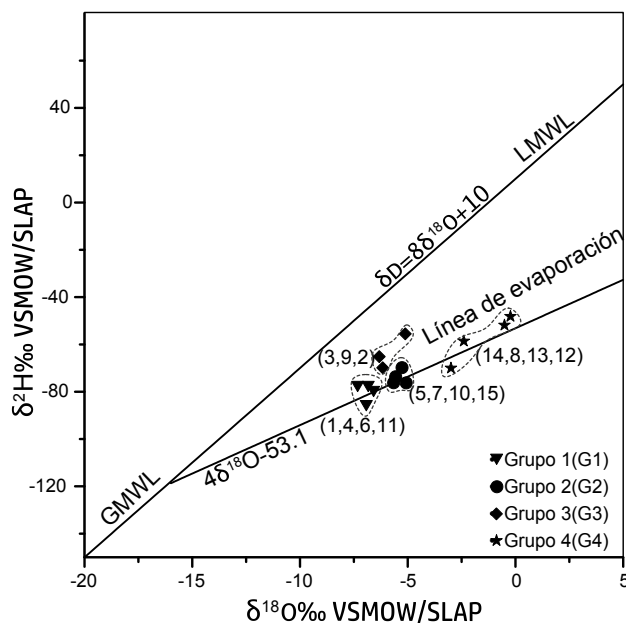


Figura 5. Relaciones isotópicas de las muestras de agua subterránea, normalizadas al patrón de Viena para la composición promedio del agua oceánica (VSMOW), y al patrón de precipitación ligera estándar del Antártico (SLAP). LMWL: Línea de agua meteórica local; GMWL: Línea de agua meteorológica global.

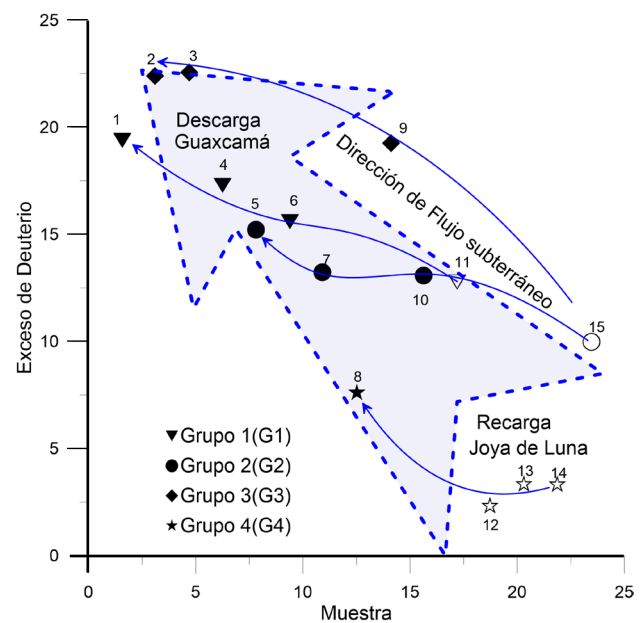
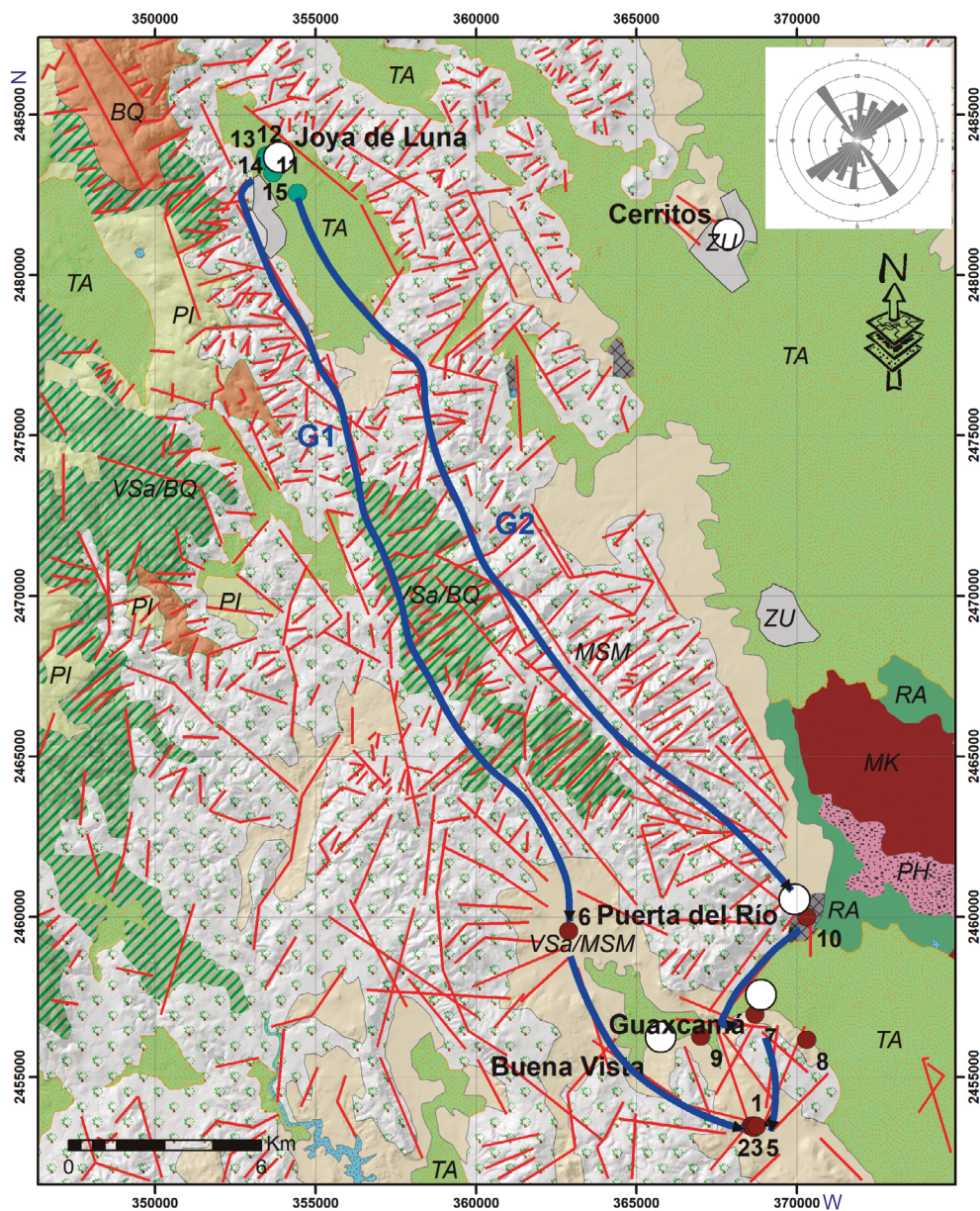


Figura 6. Exceso de deuterio (d -excess) para muestras de agua subterráneas de la zona de recarga Joya de Luna y de la zona de descarga Guaxcamá. Las flechas delgadas unen muestras de los grupos isotópicos G1 a G4 definidos en el texto y en la Figura 5. La flecha grande punteada indica la dirección del flujo subterráneo.



DESCRIPCIÓN DE VEGETACIÓN Y LEYENDA

 RA	AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL	 MKX	MEZQUITAL XERÓFILO
 TA	AGRICULTURA TEMPORAL ANUAL	 PH	PASTIZAL HALÓFILO
 BQ	BOSQUE DE ENCINO	 PI	PASTIZAL INDUCIDO
 MK	BOSQUE DE MEZQUITE	 VSa/BQ	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO
	CUERPO DE AGUA	 ZU	ZONA URBANA
	MATORRAL SUBMONTANO	 VSa/MSM	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SUBMONTANO
	ASENTAMIENTOS HUMANOS	●	PUNTOS DE DESCARGA
●	PUNTOS DE RECARGA	○	LOCALIDADES
—	LINEAMIENTOS ESTRUCTURALES (fracturas, dolinas, etc)	➔	RUTAS DE MIGRACIÓN DE POLLEN

Figura 7. Mapa de lineamientos estructurales del área de estudio sobrepuesto al mapa de distribución de la vegetación. Se muestran las dos rutas de migración del polen en el agua subterránea definidas por los grupos G1 y G2 (ver Figuras 5 y 6).

la zona de recarga es de 6 a 7 meses, lo cual equivale al tiempo de respuesta del sistema. Además, se dio evidencia de la conexión hidráulica existente entre la zona de recarga Joya de Luna y la zona de descarga en Guaxamá utilizando polen de las especies *Zea mays*, *Avena sativa*, *Cicer arietinum* y *Quercus* sp. como trazadores.

Los grupos conformados por firmas isotópicas similares (G1 y G2), pero con diferentes grados de evaporación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, permitieron relacionar sitios específicos de la zona de recarga y de descarga, sobre una línea de evolución del agua subterránea; estos grupos confirman la conectividad entre ambas zonas. Los resultados del exceso de deuterio evidenciaron la conectividad hidráulica entre las zonas de recarga y descarga, observándose en los valores de los grupos G1 y G2; esto nos permitió también analizar el tiempo de residencia y la interacción agua-roca. Los valores de ambos grupos nos indican que el tiempo de residencia del grupo G1 es mayor que el de G2, lo cual corrobora los resultados obtenidos con la metodología polínica, permitiendo además inferir las direcciones de flujo. El mapa geológico-estructural nos muestra que los sistemas de fracturas asociados al plegamiento que afecta a las rocas calcáreas donde se desarrolla el karst, delinear, de manera general, la dirección de flujo inferida con los trazadores utilizados (Figura 7).

Finalmente, las limitantes reflejadas en el presente estudio son las siguientes: i) la cantidad de fracturas y porosidad de la roca, ya que el polen puede quedarse atrapado o bien desplazarse en otra dirección que no se ha considerado para el muestreo, ii) el tiempo empleado (hasta dos años) para crear una guía polínica que sea útil para identificar los granos de polen, ya que lo ideal es contar con una especie clave que esté presente únicamente en la zona de recarga, para que tenga la función de trazador polínico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado dentro de los laboratorios de IPICYT: laboratorio de Petrografía agradeciendo a María Mercedes Zavala Arriaga por su valioso tiempo y flexibilidad de horario para el uso del Microscopio Óptico (Marca Nikon Eclipse CiPOL), laboratorio Nacional de Investigaciones de Nanociencias y Nanotecnología (LINAN) de manera especial a Juan Martínez Andrade por su asesoramiento durante el uso del Microscopio Electrónico de Barrido (QUANTUM), laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental (LANBAMA) donde se hizo análisis de los isótopos de agua en el Espectrómetro Láser Isotópico (Picarro L1102-i), finalmente al Herbario Isidro Palacios SLP, al Dr. Cristóbal Aldama Aguilera de la UASLP por su contribución a la caracterización morfológica de las especies. Por último, un agradecimiento a los árbitros de la RMCG (Revista Mexicana de Ciencias Geológicas), por su tiempo y dedicación en la revisión del presente manuscrito.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

El Suplemento Electrónico A1 "Taxonomía de las plantas" y Suplemento Electrónico A2 "Morfología de polen colectado en las zonas de recarga y descarga" están disponibles en el portal web <www.rmcmg.unam.mx>, en la tabla de contenido de este número.

REFERENCIAS

Aggarwal, P.P., Gat, J.R., Froehlich K.F.O., 2005, Isotopes in the water cycle: past, present and future of a developing science: Dordrecht, Springer, 381 pp.

- Andreo, B., Vadillo, I., Carrasco, F., Neukum, C., Jiménez, P., Goldscheider, N., Hötzl, H. Vias, J.M., Pérez, I., Göppert, N., 2004, Precisiones sobre el funcionamiento hidrodinámico y la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero kárstico de la Sierra de Líbar (provincias de Málaga y Cádiz, sur de España) a partir de un ensayo de trazadores: Revista de la Sociedad Geológica de España, 17(3-4), 187-197.
- Antigüedad, I., Morales, T., Uriarte, J.A., 2007, Los acuíferos kársticos. Caso del país Vasco: Enseñanza de las Ciencias de la Tierra 15, 325-332.
- Arrate, I., Antigüedad, I., Llanos, H., Laresgoiti, M. F., Alonso, R., Gallo, B., 1992, Aporte metodológico de trazados en sistemas kársticos del país Vasco, en Llanos, H. Antigüedad, I., Morell, I., Eraso, A. (eds), Taller Internacional sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas-Cuba, 1992: Universitat Jaume I. Castellón, España. 115-130.
- Attinger, R., 1988, Tracerhydrologische Untersuchungen im Alpstein. Methodik des kombinierten Tracerensatzes für die hydrologische Grundlagenerarbeitung in einem Karstgebiet. Geographica Bernensia, Bern, 29 pp.
- Auckenthaler, A., Raso, G., Huggenberger, P., 2002, Particle transport in a karst aquifer natural and artificial tracer experiments with bacteria, bacteriophages and microspheres: Water Science and Technology, 46(3), 131-138.
- Back, W., Zotl, J., 1975, Application of geochemical principles, Isotopic Methodology and artificial tracers to karst Hydrology, en Burger, A., Dubertret, L. (eds.), Hydrogeology of karstic terrains: Hydrogeology of karstic terranes, International Association of Hydrogeologists, Paris, 105-121.
- Benischke, R.B., Hötzl, H., Leditzky, H.P., Maurin, V., Ramsbacher, P., Zojer, H., Zötl, J. G., 1980, Der Einsatz von Triftstoffen in Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz): Steirische Beiträge zur Hydrogeologie, 32, 81-86.
- Benson, R., Yuhr, L., 2016, Site Characterization in Karst and Pseudokarst Terrains: Dordrecht, Springer, 417 pp.
- Bowen, J., Wilkinson, B. 2002, Spatial distribution of ^{18}O in meteoric precipitation: Geology, 30, 315-318.
- Carrillo-Bravo, J., 1971, La Plataforma Valles-San Luis Potosí: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 23, 1-102.
- Clark, I.D., Fritz, P., 1997, Environmental Isotopes in Hydrogeology: Boca Raton, New York, USA, Lewis Publishers, 328 pp.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2010, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de Cerritos-Villa Juárez (2414), Estado de San Luis Potosí: México, D.F., Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos, 32 pp.
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters: Science, 133, 1702-1703.
- Dansgaard, W., 1961, The isotopic composition of natural waters: with special reference to the Greenland ice cap: Copenhagen, Bianco Lunos Bogtrykkeri, 120 pp.
- Dansgaard, W., 1964, Stable isotopes in precipitation: Tellus, 16, 567-584.
- Dansgaard, W., 2004, Frozen Annals - Greenland Ice Sheet Research: The Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Denmark, 122 pp.
- Dody, A., Adar, E. M., Yakirevich, A., Geyh, M. A., Yair, A., 1995, Evaluation of depression storage in an arid rocky basin using stable isotopes of oxygen and hydrogen: IAHS Publication, 232, 417-427.
- Drew, D.I., Smith, D.I., 1969, Techniques for the tracing of subterranean drainage: British Geomorphological Research Group Technical Bulletin, 2, 1-36.
- Flury, M., Wai, N.N., 2003, Dyes as tracers for vadose zone hydrology: Review of Geophysics, 41(1), 1002. DOI: 10.1029/2001RG000109.
- Göppert, N., Goldscheider, N., 2008, Solute and Colloid Transport in Karst Conduits under Low- High-Flow Conditions: Groundwater, 46(1), 61-68.
- Gospodaric, R., Zötl, J., 1976, Markierung unterirdischer Wasser - Untersuchungen in Slowenien: Steirische Beiträge zur Hydrogeologie, 28, 7-257.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 1989, Isotope techniques in the study of the hydrology of fractured and fissured rocks: Vienna, Proceedings of Advisory Group Meeting, 306 pp.
- Kehew, A.E., 2001, Applied Chemical Hydrogeology: New Jersey, Prentice Hall, 368 pp.
- Käss, W., Reichert, B., 1986, Tracing of karst water with fluorescent spores, en

- Morfis, A., Paraskevopoulou, P. (eds.) Proceedings of the 5th International Symposium on Underground Water Tracing: Athens, Greece, Institute of Geology and Mineral Exploration, 157-165.
- Kiraly, L., Müller, I., 1979, Heterogenéité de la perméabilité et del alimentation dans le karst, effect sur la variation du chimisme des sources karstiques: Bulletin du Centre d'hydrogéologie, 3, Université Neuchâtel, 237-285.
- Labarthe, H.G., Tristán, G.M., Aranda, G.J.J., 1982, Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del estado de San Luis Potosí: Instituto de Geología y Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Folleto técnico No. 85, 208 pp.
- Leibundgut, C., Lüthi, B., 1977, Bestimmung des Seihvermögens von Grundwasserleitern mittels Tracer, en Gospodaric, R., Habic, P. (eds.), 3rd International Symposium of Underground Water Tracing: Ljubljana, Yugoslavia, Institute for Karst Research, Proceedings, 141-148.
- Leibundgut, C., Maloszewski, P., Külls, C., 2009, Tracers in Hydrology: Institute of Hydrology, University of Freiburg, Freiburg, Germany, First Edition, 399 pp.
- Lesser, I., 1978, Uso y aplicación de trazadores de agua subterránea: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 39(2), 71-76.
- Lisowska-Gaczorek, A., Cienkosz-Stepanczak, B., Szostek, K., 2017, Oxygen stable isotopes variation in water precipitation in Poland anthropological applications: Anthropological Review, 80, 58-70.
- Luhmann, A.J., Covington, M.D., Alexander, S.C., Chai, S.Y., Schwartz, B.F., Groten, J.T., Alexander Jr., E.C., 2012, Comparing Conservative and nonconservative tracers in karst and using them to estimate flow path geometry: Journal of Hydrology, 201-211.
- Mangin, A., 1975, Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques: Annales Spéléologie, 30(1), 21-124.
- Montoya-Pfeiffer, P.M., Leon-Bonilla, D., Nates-Parra, G., 2014, Catalogo de polen en mieles de Apis mellifera provenientes de zonas cafeteras en la Sierra Nevada de Santa Marta, Magdalena, Colombia: Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Física y Naturales, 38(140), 364-384.
- Mook, W.G., 2001, Environmental isotopes in the hydrological cycle, Principles and applications: Paris, IHP-V, Technical Documents in Hydrology, UNESCO, 2, 167-235.
- Moser, H., Wolf, M., Fritz, P., Fontes, J. Ch., Florwoski, T., Payne, B. R., 1989, Deuterium, oxygen-18, and tritium in Stripa groundwater, Report on the International Stripa Project: Geochimica et Cosmochimica Acta, 53(8), 1757-1763.
- 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: Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 81, 18-32.
- Pérez-Corona, F.Y., 2011, Caracterización geofísica de ambientes cársticos, caso: Polje de Joya de Luna, San Luis Potosí, México: Instituto Potosino de Investigación de Ciencia y Tecnología (IPICYT), Posgrado en Ciencias Aplicadas, Tesis de Maestría, 179 pp.
- Pernía-Llera, J.M., López-Geta, J.A., Grima-Olmedo, J., Sánchez-Guzmán, J., Pendás-Fernández, F., Martínez-Álvarez, A.R., 1991, Aplicación de Técnicas especiales al estudio hidrológico de zonas de baja permeabilidad, isótopos y trazadores: Instituto Tecnológico Geo Minero de España, 368 pp.
- Ramos-Leal, J.A., Pérez-Corona, Moran-Ramírez, J., Torres-Gaytán, D., 2012, Estudio hidrogeológico en las inmediaciones del municipio de Cerritos, S.L.P.: San Luis Potosí, México, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), Reporte interno, 47 pp.
- REPDA (Registro Público de Derechos de Agua), 2005, Uso del agua, Estadística del agua en México, 60-76, disponible en <www.siga.conagua.gob.mx>, consultado el 20 de abril de 2015.
- Rindsberger, M., Magaritz, M., Carmi, I., Gilad, D., 1983, The relation between air mass trajectories and the water isotope composition of rain in the Mediterranean sea área: Geophysical Research Letters., 10, 43-46.
- Rodgers, P., Soulsby, C., Waldron, S., Tetzlaff, D., 2005, Using stable isotope tracers to identify hydrological flow paths, residence times and landscape controls in a mesoscale catchment: Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union, 2(1): 1-35.
- Sabir, I.H., Torgersen, J., Haldorsen, S., Alestrom, P., 1999, DNA tracers with information capacity and high detection sensitivity tested in groundwater studies: Hydrogeology Journal, 7(3), 264-272.
- Salameh, E., 2004, Using environmental isotopes in the study of the recharge-discharge mechanisms of the Yarmouk catchment area in Jordan: Hydrogeology Journal, 1451-463.
- Singhal, B.B.S., Gupta, R.P., 1999, Applied Hydrogeology of Fractured Rocks: Springer Netherlands, Second Edition, 401 pp.
- Smart, P.L., Smith, D.I. 1976, Water tracing in tropical regions, the use of fluorometric techniques in Jamaica: Journal of Hydrology, 30, 179-195.
- Smart, P.L., Laidlaw, I.M.S., 1977, Evaluation of some fluorescent dyes for water tracing: Water Resources Research, 13, 15-33.
- Spandre, G.R., Batisti, E.F.R., Chemas, H.E., Giusti, D.A., 2003, Empleo de esporas de *Lycopodium Clavatum* como marcadores de aguas subterráneas en acuíferos cársticos: Revista Latino-Americana de Hidrogeología, 3, 43-47.
- Torres-Hernández, J.R., Siebe, G.C., Aguillón-Robles, A., Rodríguez-Ríos, R., 2014, Geocronología y características geoquímicas de un conjunto de domos riolíticos terciarios en el Campo Volcánico de San Luis Potosí, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 66(1), 183-197.
- Valencia, J., 2013, Significado del exceso de deuterio en la interpretación de isótopos estables $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en estudios hidrogeológicos: Departamento de Hidrología Isotópica, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Informe Científico Tecnológico, 13, 125-127.
- Vogel, J.C., Lerman J.C., Mook W.G., 1975, Natural isotopes in surface and groundwater from Argentina: Hydrological Sciences Bulletin, 20(2), 203-221.
- Wanner, S.C., Pusch, M., 2000, Use of fluorescently labeled *Lycopodium* spores as a tracer for suspended particles in a lowland river: Journal of the North American Benthological Society, 19(4), 648-658.
- Yurtsever, Y., Gat, J., 1981, Atmospheric waters, en Gat, J., Gonfiantini, R. (eds.), Stable Isotope Hydrology – Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle: Vienna, IAEA Technical Reports Series, 103-142.
- Zapata-Zapata, J.L., Pérez-Venzor, J.A., 1979, Cartografía Geológica Hoja Peotillos, S.L.P.: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folletos Técnicos, 63, 30 pp.
- Zvikelsky, O., Weisbrod, N., 2006, Impact of particle size on colloid transport in discrete fractures: Water Resources Research, 42(12), W12S08, DOI: 10.1029/2006WR004873.

Manuscrito recibido: noviembre 24, 2017

Manuscrito corregido recibido: enero 16, 2018

Manuscrito aceptado: enero 18, 2018