



Trayectorias de flujo subterráneo asociado a los lagos de Pátzcuaro y Cuitzeo

Groundwater flow paths associated with Lakes Pátzcuaro and Cuitzeo

Selene Olea Olea ¹  , Lorena Ramírez González ², Ricardo Sánchez Murillo ³, Olivia Zamora Martínez ^{4,5}, Javier Tadeo León ^{4,5}

¹ UNAM. Instituto de Geología. Departamento de Dinámica Terrestre Superficial.

² UNAM. Instituto de Geología. Posgrado en Ciencias de la Tierra.

³ The University of Texas at Arlington, United States. Department of Earth and Environmental Sciences.

⁴ UNAM. Instituto de Geología. Departamento de Ciencias ambientales y del suelo.

⁵ UNAM. Instituto de Geología. Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía.

Resumen

Este estudio determina las componentes de un sistema de flujo de agua subterránea asociadas a los lagos de Pátzcuaro y Cuitzeo. Los objetivos son: a) delinear las trayectorias de flujo y b) identificar las trayectorias que contribuyen a la recarga de los lagos. La metodología incluyó muestreo de agua, análisis hidrogeoquímico, isotópico y estadístico en agua subterránea y superficial. Los resultados muestran trayectorias con características hidrogeoquímicas e isotópicas únicas: Local, Intermedia y Regional. La evolución hidrogeoquímica es menor en las trayectorias locales y mayor en las regionales. Los lagos reciben descargas de aguas subterráneas con diferentes trayectorias de flujo, siendo la local la más extendida en el sistema. Los impactos ambientales muestran nitratos en trayectorias locales e intermedias.

Palabras clave: sistema de flujo, Pátzcuaro, Cuitzeo, hidrogeoquímica, isótopos

Abstract

This study determines the components of a groundwater flow system associated with Lakes Pátzcuaro and Cuitzeo. The objectives are: a) to delineate flow trajectories and b) to identify the pathways that contribute to lake recharge. The methodology included water sampling, hydrogeochemical, isotopic, and statistical analysis of groundwater and surface water. The results show pathways with unique hydrogeochemical and isotopic characteristics: local, intermediate, and regional. Hydrogeochemical evolution is lower in local pathways and higher in regional ones. The lakes receive groundwater discharges with different flow pathways, with the local pathway being the most widespread in the system. The environmental impacts shows nitrate in local and intermediate trajectories.

Keywords: flow system, Pátzcuaro, Cuitzeo, hydrogeochemistry, isotopes

Introducción

Un sistema de flujo se refiere a un sistema único de aguas subterráneas constituido por múltiples trayectorias o componentes de flujo, regidos por la gravedad, que se ven influenciados por las condiciones físicas, químicas y climáticas, así como por las condiciones geológicas circundantes (Makarenko, 1948; Mifflin, 1968; Escolero, 2018).

El análisis de la hidrogeoquímica e isotopía en la delimitación de las trayectorias de flujo de aguas subterráneas de los Sistemas de Flujo de Aguas Subterráneas (SIRAS) que interactúan con lagos son de vital importancia, ya que la sostenibilidad de los ecosistemas que dependen de ellas desempeña un papel clave en la preservación de la biota lacustre y la salud general del ecosistema.

Los lagos y las aguas subterráneas son recursos estrechamente interconectados, y las aguas subterráneas

Historial

Manuscrito recibido: 31 de octubre de 2025

Manuscrito aceptado: 19 de abril de 2026

Manuscrito publicado: agosto 2026

Autor para correspondencia

Selene Olea Olea

selene@geologia.unam.mx

Como citar

Olea-Olea S, Ramírez-González L, Sánchez-Murillo R, Zamora-Martínez O, Tadeo-León J (2026). Trayectorias de flujo subterráneo asociado a los lagos de Pátzcuaro y Cuitzeo. *Ciencia Nicolaita* 97:78-88. doi:10.35830/cn.vi97.930

desempeñan un papel crucial en la influencia del balance hídrico, la dinámica de nutrientes y los ecosistemas de los lagos asociados (Hayashi y Rosenberry, 2002).

La delimitación de las trayectorias de flujo requiere una comprensión geológica y estructural sólida que per-

mita desarrollar una base de datos hidrogeoquímica que confirme la presencia de trayectorias de flujo distintivas (Möller *et al.*, 2016).

El objetivo de este trabajo es realizar la delimitación de las trayectorias de flujo del SIRAS Cuitzeo, aplicando métodos geoquímicos, geológicos y estadísticos. Este estudio busca: a) delinear las trayectorias de flujo de agua subterránea y b) identificar las trayectorias de flujo específicas que contribuyen a la recarga de los lagos. Esta información es crucial para la gestión sostenible de los recursos

hídricos subterráneos y la preservación a largo plazo de los ecosistemas.

Zona de estudio

El SIRAS Cuitzeo (**Figura 1**) se ubica en el centro de México y abarca una superficie de 5208 km². El sistema incluye el segundo y tercer lagos más grandes de México, el lago de Cuitzeo y el lago de Pátzcuaro (CONAGUA, 2018).

El lago de Pátzcuaro ubicado a 2035 metros sobre el

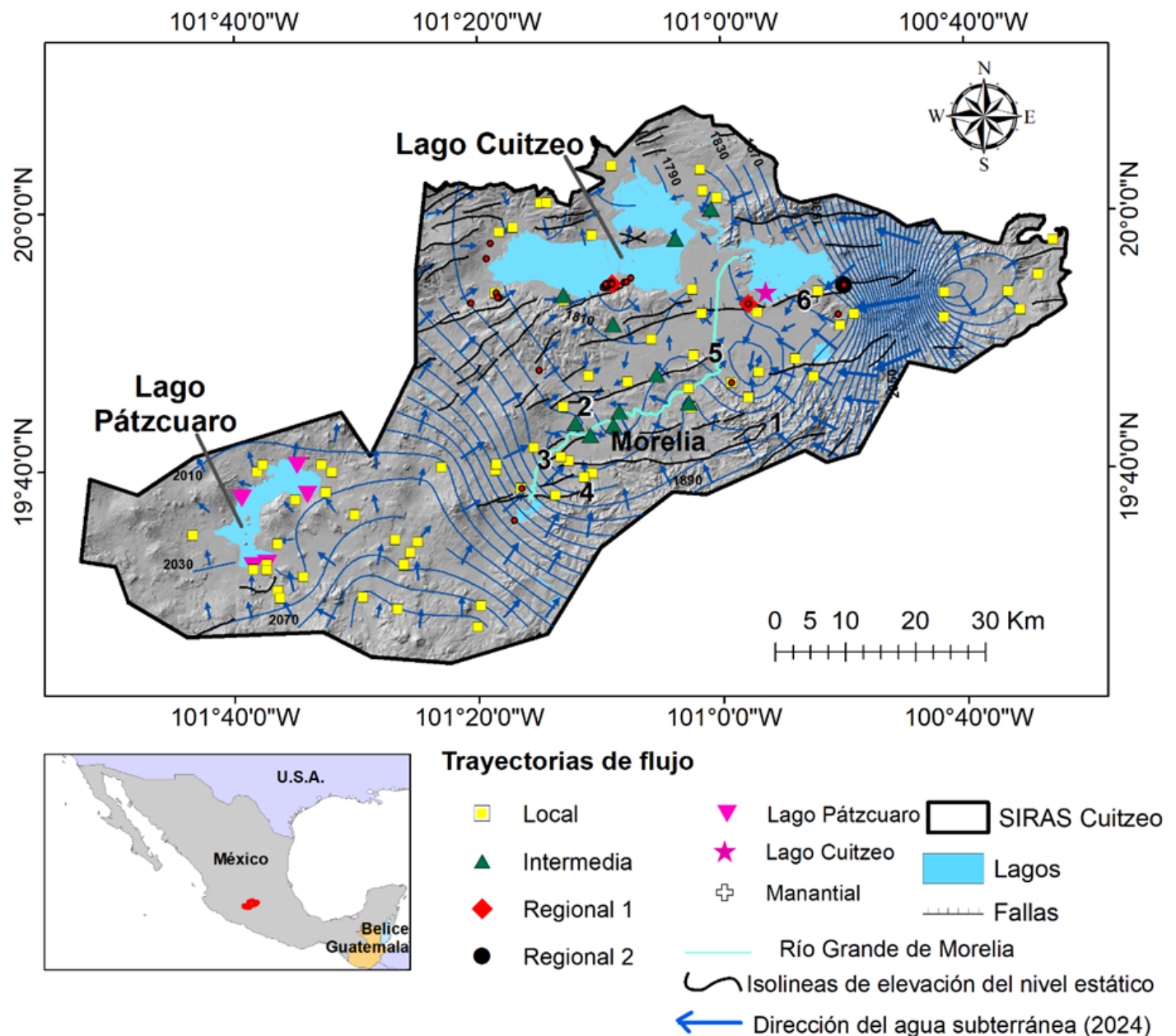


Figura 1. SIRAS Cuitzeo con la geología, características estructurales (los nombres de las fallas son: 1) La Paloma, 2) La Colina, 3) Central Camionera, 4) Coitzio, 5) Tarímbaro, 6) Zinapécuaro), lagos, pozos y puntos de muestreo de manantiales (símbolos codificados por colores). La geología y las fallas se adaptaron de (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2021) y (SGM 1998, 2002). El recuadro muestra el área de estudio en el centro de México.

nivel del mar (msnm) tiene una extensión aproximada de 20 km de largo, una profundidad máxima de 12 m y una profundidad promedio de 5 m (Platt Bradbury, 2000). La zona presenta un clima templado, de transición entre zonas secas y templadas húmedas, con una temperatura promedio anual de 17.3 °C y una precipitación anual de 841 mm (García, 1973).

El lago Cuitzeo, situado a 1840 msnm, es un lago salobre con una superficie de 300 km² y una profundidad inferior a un m (Mendoza *et al.*, 2006). Se formó dentro de un semigraben de orientación NE-SO y E-O, moldeado predominantemente por fenómenos tectónicos, con un basamento mioceno de más de 8 millones de años (Rosas-Elgukra *et al.*, 1997). La zona presenta un clima templado subhúmedo con temperaturas que oscilan entre 14 y 17 °C y una precipitación media anual de 1000 mm (García, 1973).

La zona es característica de depósitos volcánicos de composiciones variadas entre ácidas y básicas más información puede ser consultada en (Pasquarè *et al.*, 1991; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015; Avellán *et al.*, 2020).

Rasgos estructurales

El Sistema de Fallas Morelia-Acambay, tiene una extensión aproximada de 30 km, incluye fallas de rumbo siniestras de dirección E-O a ENE-OSO que conforman las depresiones de Cuitzeo y Morelia, delimitadas por semigrabens (Pasquarè *et al.*, 1991). Se identifican varias fallas normales clave dentro de este sistema. La Falla La Paloma se extiende 15 km de longitud y varía de 1 a 4 km de ancho. La Zona de Falla Central de Morelia se extiende 16 km de longitud y de 2 a 6 km de ancho, con la Falla La Colina como estructura asociada. La Zona de Falla Cointzio mide 15 km de longitud y de 6 a 8 km de ancho. La zona de falla Tarímbaro-Álvaro Obregón, la más extensa, se extiende 40 km de largo y de 5 a 6 km de ancho. Finalmente, la zona de falla Zinapécuaro abarca 20 km de largo y de 3 a 6 km de ancho (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2021).

Materiales y métodos

Campaña de campo y análisis de laboratorio

Se realizó una campaña de muestreo (abril 2024) que incluye: 2 norias, 19 manantiales, 61 pozos y 6 sitios de muestreo en lagos. El nivel freático se midió con una sonda piezométrica y una cinta métrica. La elevación topográfica se calculó mediante un dispositivo GPS satelital (CORS) (Emlid Reach RS2). La interpolación espacial de

las elevaciones del nivel freático se calculó mediante el método Kriging (Cressie, 1993).

Los parámetros fisicoquímicos y las muestras de agua del lago de Pátzcuaro se recolectaron a una profundidad aproximada de 30 centímetros (cm), mientras que en el lago de Cuitzeo las muestras se recolectaron a 15 cm de profundidad, cerca de la orilla.

Se tomaron muestras de agua subterránea tras la extracción de varios volúmenes de pozos para evitar el estancamiento de agua en el entubado. Se midieron los parámetros fisicoquímicos con una sonda multiparamétrica HANNA (temperatura, pH, Conductividad Eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD)). Las muestras y un blanco de campo se tomaron en botellas de polietileno prelavadas. Los iones mayoritarios y los elementos traza se filtraron a través de filtros de nitrato de celulosa Millipore de 0,45 µm. Las muestras de elementos traza se acidificaron con HNO₃ a pH~2 (Appelo y Postma, 2005). Todas las muestras se almacenaron a 4 °C hasta su análisis.

Los iones mayoritarios (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, PO₄³⁻) se analizaron mediante cromatografía líquida en el Laboratorio de Cromatografía del Instituto de Geología de la UNAM. La precisión de los análisis de laboratorio para iones se verificó mediante el cálculo del error de balance de carga con valores aceptables dentro de un límite de ±10% (Appelo y Postma, 2005).

Los elementos traza (Al³⁺, Mn²⁺, B³⁺, Sr²⁺, Li⁺, Si⁴⁺) se midieron mediante plasma de acoplamiento inductivo con un espectrofotómetro de emisión óptica (ICP-OES) en el Laboratorio de Espectroscopía Atómica del Instituto de Geología de la UNAM. Para la cuantificación de elementos traza, se recolectó una muestra de 60 mL utilizando botellas de polipropileno, se filtró a través de una membrana de nitrocelulosa de 0,45 µm y se acidificó con HNO₃ a un pH ~2.

El análisis isotópico fue realizado por el Grupo de Hidrología de Trazadores del Departamento de Ciencias de la Tierra y Ambientales de la Universidad de Texas-Arlington, utilizando un analizador de isótopos de agua triple GLA431-TLWIA. Se utilizaron tres estándares secundarios calibrados: 5D (δ²H = -10.5‰, δ¹⁸O = -3.00‰), 4D (δ²H = -48.7‰, δ¹⁸O = -7.63‰), y 1D (δ²H = -161.3‰, δ¹⁸O = -20.72‰) para normalizar los resultados mediante un procedimiento de estandarización por bloques (es decir, el software de análisis posterior LGR LWIA, versión 4.5.0.6). Se utilizó un estándar adicional como control interno, IC (δ²H = -78.0‰, δ¹⁸O = -10.76‰). Este control interno se inyectó tres veces por lote analítico. El número total de inyecciones por muestra o estándar comprendió dos inyecciones de preparación y ocho de medición. Las composiciones de isótopos estables se presentan en nota-

ción delta δ (‰, por mil), relacionando las proporciones de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y $^2\text{H}/^1\text{H}$ (Agua de Océano Media Estándar de Viena; V-SMOW2) de la siguiente manera:

$$\delta = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] * 1000,$$

donde R representa la proporción de abundancia de $^2\text{H}/^1\text{H}$ or $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, y R_{muestra} y $R_{\text{estándar}}$ son las proporciones en la muestra y el estándar, respectivamente. El gráfico dual isotópico ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) se calculó para comprender los orígenes meteóricos e hidrotermales, la evaporación secundaria y los procesos de mezcla dentro del sistema.

Análisis estadístico

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es un análisis multivariante útil para predecir y describir patrones estructurales mediante un amplio conjunto de datos. Se utiliza para condensar, simplificar y presentar sintéticamente grandes conjuntos de datos (Jolliffe, 1986). Se utilizó un ACP para fundamentar las diferencias en los sistemas de flujo de aguas subterráneas utilizando seis parámetros: 1) T, 2) STD 3) Cl^- , 4) Li^+ , 5) HCO_3^- y 6) SO_4^{2-} para definir los valores extremos que representan el conjunto de muestras. Se seleccionaron T y STD porque el aumento de sus valores está relacionado con la evolución de la trayectoria del flujo; el Cl^- se seleccionó porque es uno de los trazadores naturales más utilizados para estudiar procesos hidrológicos, debido a su comportamiento conservativo en el medio ambiente (USGS 2010); el Li^+ acorde a la fuente que representan las rocas volcánicas como feldespatos, biotitas y vidrios volcánicos (Cortes-Calderon *et al.*, 2024); el bicarbonato y el sulfato se seleccionaron porque son los iones principales en la línea de evolución del agua subterránea de (Chebotarev, 1955). Se utilizó el ACP para definir los valores extremos que representan el conjunto de muestras.

Posteriormente se usó el Análisis de Mezcla de Miembros Extremos (AMME), un método aplicado en datos multivariados o univariados, que asume que el agua subterránea es una mezcla de dos o más fuentes o miembros finales, estimando las razones de mezcla de las muestras de agua subterránea utilizando los datos conservativos e hidroquímicos (Christophersen y Hooper, 1992; Carrera *et al.*, 2004). El método AMME generalmente requiere el uso de especies conservativas (Christophersen y Hooper, 1992; Pelizardi *et al.*, 2017). Utilizamos el código MIX (Carrera *et al.* 2004) para calcular las razones de mezcla con miembros finales inciertos. Para la declaración de especies, utilizamos el diagrama de Piper para comprender el comportamiento de los iones principales y eliminamos los iones que participan en reacciones como el intercambio

iónico. La temperatura se consideró un indicador de las trayectorias de flujo. Se utilizaron nueve marcadores en el AMME: T, Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Li^+ , Sr^{2+} , $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. El uso del AMME para explorar y comprender los procesos hidroquímicos en muestras con mezclas es una herramienta poderosa (Burns *et al.*, 2001; Katsuyama *et al.*, 2009; Morales-Casique, 2012; Tubau *et al.*, 2014; Shin *et al.*, 2017; Olea-Olea *et al.*, 2020). Al examinar los procesos hidrogeoquímicos dentro de estos grupos identificados, es posible interpretar la relación entre la química del agua subterránea y las trayectorias de flujo en diferentes sistemas de flujo (Pan *et al.*, 2019). La aplicación del AMME permitió determinar las concentraciones reales de los componentes finales, que representan las trayectorias o componentes del flujo de agua subterránea, así como las proporciones precisas de estas trayectorias en cada sitio de agua subterránea.

A diferencia de los métodos tradicionales, que evalúan la incertidumbre en los componentes finales solo a posteriori, el enfoque del código MIX (Carrera *et al.*, 2004) incorpora la incertidumbre desde el principio. Los valores de varianza se introducen en el código MIX para cuantificar la dispersión de los datos. Estos valores de varianza se utilizan posteriormente para calcular la incertidumbre de los resultados mediante un proceso de ajuste por mínimos cuadrados (Carrera *et al.*, 2004). Con base en la predominancia de cada componente en las proporciones de mezcla del agua de pozo, se clasificaron cuatro grupos distintos de sitios, etiquetados del 1 al 4. La clasificación se basó en la contribución de los componentes finales en cada muestra o pozo.

Delimitación de trayectorias de flujo

La delineación de trayectorias de flujo del SIRAS requiere el uso de una amplia gama de herramientas. A partir del AMME los sitios se clasificaron en cuatro grupos según la proporción de mezcla predominante: grupo 1 (Local), grupo 2 (Intermedio), grupo 3 (Regional 1) y grupo 4 (Regional 2). Posteriormente se confirmaron estas agrupaciones con diagramas hidrogeoquímicos y datos espaciales que incluían la geología y la distribución de fallas.

Diagramas hidrogeoquímicos e isotópicos

Los diagramas de Piper (1944) y Mifflin (1968), junto con la secuencia de evolución hidrogeoquímica de Chebotarev (1955), se utilizaron para analizar las relaciones entre el agua subterránea y su composición química, así como para delinear las trayectorias de flujo del agua subterránea. Además, se incluyó la composición química de los lagos en los diagramas para comparar las trayectorias de flujo delineadas con las características de estos. La gráfica de

$\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ y la Línea Global de Agua Meteórica (Craig, 1961) se construyó para comprender los cambios en los componentes y su origen con la precipitación.

Características geológicas y AMME

Recopilamos la geología y las fallas del SIRAS de Cuitzeo para identificar posibles líneas de flujo preferenciales en las áreas. La información física se comparó con los grupos AMME y las altas temperaturas del agua relacionadas con las áreas de falla. Finalmente, vinculamos las zonas de recarga con grupos que muestran menor concentración mineral y elevaciones relativamente altas. Los flujos regionales se vincularon con grupos con alta composición mineral, altas temperaturas del agua y presencia de fallas.

Mapa de nivel freático

Para conocer la dirección del flujo en pozos se creó un mapa de nivel freático. El agua se mueve en dirección perpendicular a las isolíneas de iguales carga hidráulica. El mapa se construyó utilizando datos de 63 puntos.

Resultados

La zona de estudio se muestra en la **Figura 1**, junto con la distribución de las componentes de flujo.

Propusimos cuatro miembros finales según el análisis ACP previo y la evaluación de elementos conservadores mediante gráficos 3D utilizando datos de aguas subterráneas como T, TDS, Cl⁻, Li⁺, HCO₃⁻ y SO₄²⁻. Se seleccionaron cuatro fuentes, que en conjunto representan el 95,32% de los componentes (**Figura 2**).

Caracterización del flujo y la química del agua subterránea

La red de flujo de agua subterránea (**Figura 1**) muestra que la zona de recarga se ubica en las zonas topográficamente altas que fluyen hacia los lagos. El comportamiento del agua subterránea en el lago de Pátzcuaro varía según la configuración de los pozos (**Figura 1**), lo que indica que el agua subterránea se recarga en todos los límites y fluye hacia el lago.

La componente local es la más distribuida en el tipo de aguas bicarbonatadas (**Figura 3A**), mientras el gráfico de isótopos duales (**Figura 3B**) muestra un claro origen meteórico en todos los grupos de flujo de agua subterránea. Sin embargo, existe una clara evolución hacia valores isotópicos enriquecidos en ambos lagos. Las trayectorias de flujo se mezclan entre locales e intermedias, siendo las regionales las que tienen mejor separación (**Figura 3C**).

Patrones de mezcla y trayectorias de flujo

Los cálculos de AMME estimaron las contribuciones relativas de las trayectorias de flujo predominantes en el SIRAS Cuitzeo. El flujo local fue el principal componente final (84%), seguida del flujo intermedio (12%) y las trayectorias de flujo regionales (1 y 2%).

El modelo conceptual 3D (**Figura 4**) representa las trayectorias de flujo dentro de los sistemas de agua subterránea y superficial. Las trayectorias de flujo locales se ubican principalmente en las zonas de alta altitud del lago de Pátzcuaro y el lago de Cuitzeo. Las trayectorias de flujo intermedias se ubican en las zonas de media altitud, dentro de Morelia y el lago de Cuitzeo, mientras que las trayectorias de flujo regionales se distribuyen principalmente a

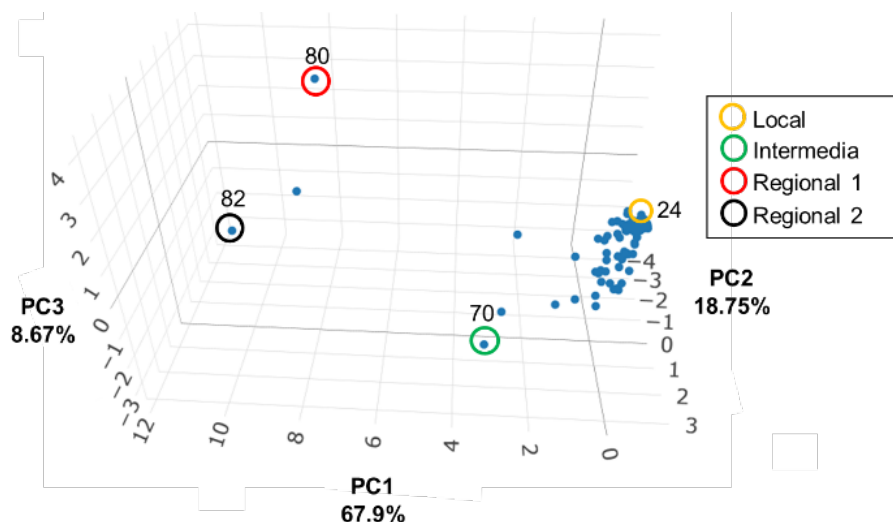


Figura 2. Gráfico 3D del Análisis de Componentes Principales (ACP) que muestra los cuatro sitios seleccionados que representan los miembros terminales. Cada miembro terminal se clasifica dentro de una trayectoria de flujo específica.

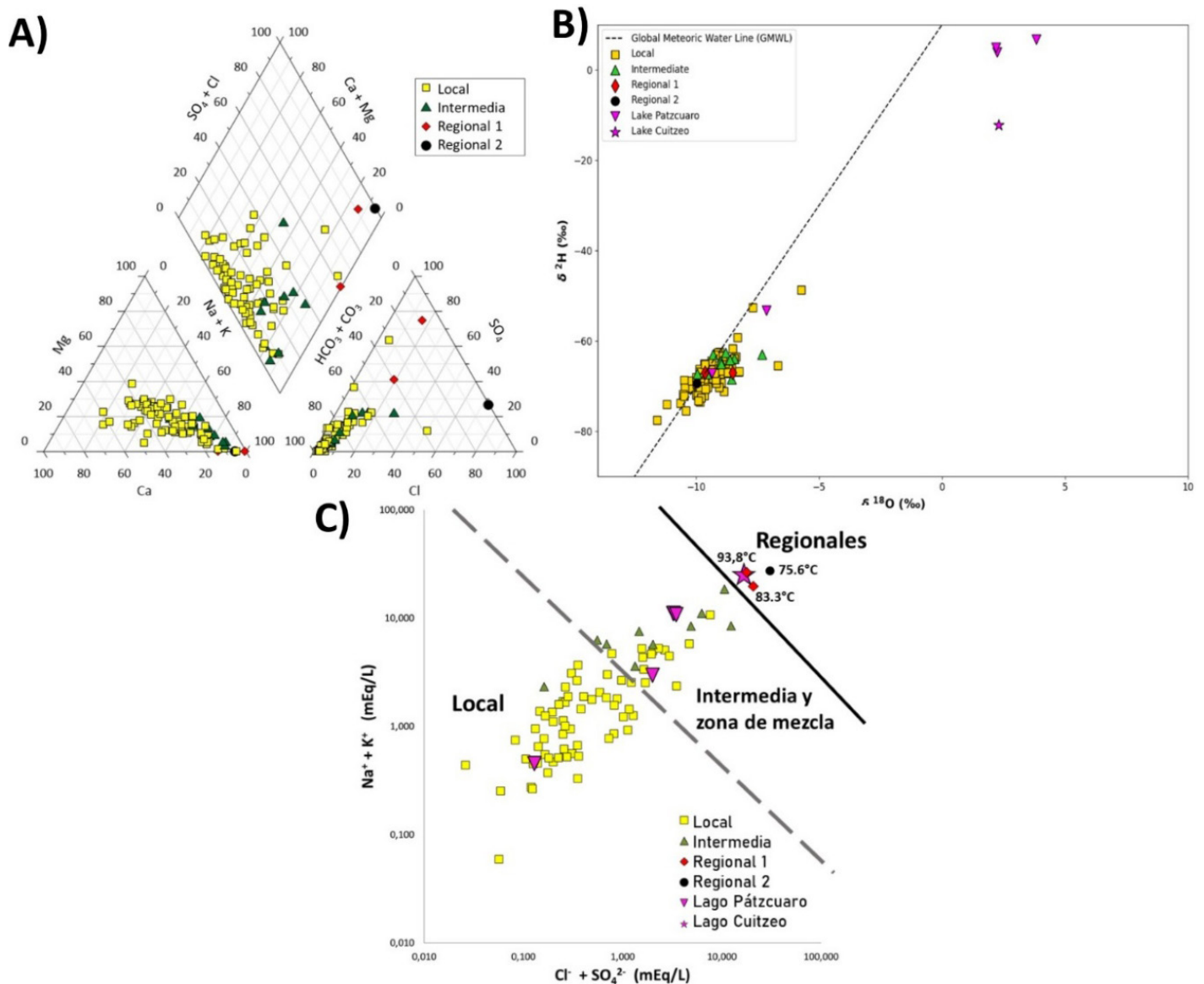


Figura 3. A) diagrama de Piper, B) Gráfica de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$) con la Línea Global de Agua Meteorica (LGAM) de Craig (1961) y C) Diagrama de Mifflin ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$ vs. $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$) que ilustra las trayectorias de flujo de las aguas subterráneas.

lo largo de las zonas de fallas en las partes bajas del semi-graben.

Discusión

Delimitación de las trayectorias de flujo

La trayectoria de flujo local, caracterizada por bajas concentraciones de iones y elementos conservativos, asociada con agua carbonatada con magnesio (Figura 3A), típica de las zonas de recarga. La trayectoria intermedia, mostrando una transición evolutiva desde la trayectoria de flujo Local, mientras las trayectorias regionales presentando una composición de tipo clorurada.

La evolución hidrogeoquímica de las trayectorias de flujo Local a Intermedia y finalmente a Regional, con cierta superposición en la zona de mezcla (Figura 3C), la misma tendencia de evolución se observa en con aguas menos evolucionadas localizadas en el extremo inferior de la gráfica y con aguas más evolucionadas en el extremo superior del diagrama (Figura 3C).

En el centro de México, la extracción de agua subterránea se ha vinculado a la actividad de fallas (Lermo-Samaniego *et al.*, 1996). El lago de Pátzcuaro, al carecer de fallas mayores, difiere del lago de Cuitzeo, el cual se encuentra dentro de una estructura de semigrabens (Bourgeois *et al.*, 1988). Las fallas en la línea de costa del lago de Cuitzeo representan una característica estructural

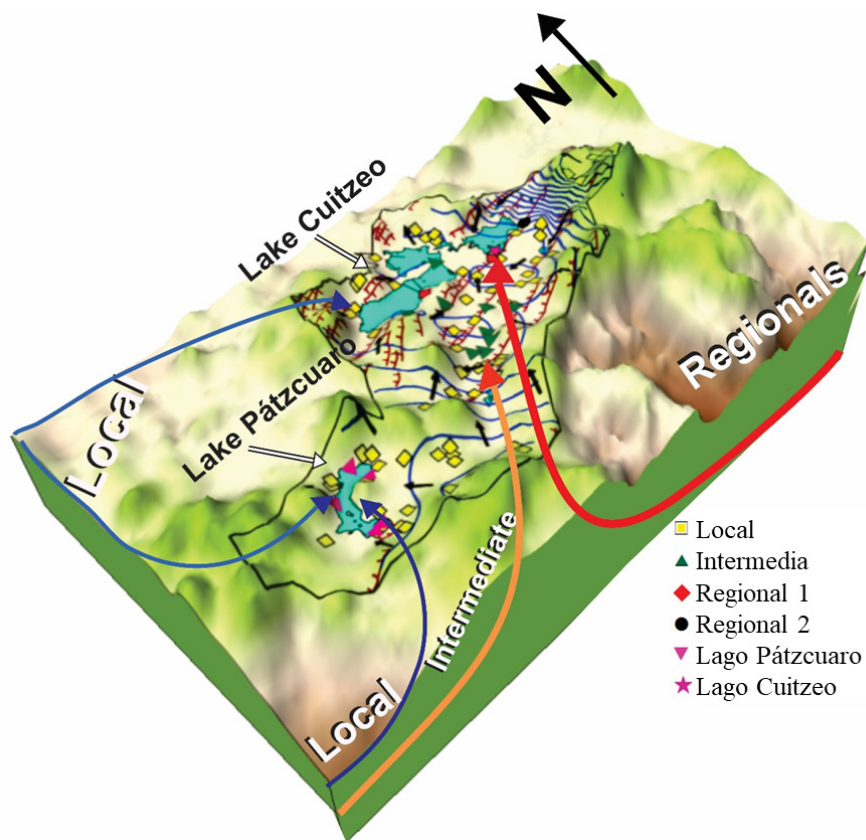


Figura 4. Modelo conceptual en 3D de las trayectorias de flujo y la relación de los lagos.

importante para la delineación de los componentes del flujo. Las trayectorias de flujo regionales se concentran en zonas de fallas a lo largo de la costa del lago de Cuitzeo, con temperaturas elevadas que reflejan circulación profunda. Por otro lado, los flujos locales se vinculan a áreas de recarga a mayor altitud. La trayectoria del flujo intermedio se ubica dentro del área de la falla al sur del lago de Cuitzeo, lo que sugiere una circulación intermedia relacionada con las fallas, que no circula en profundidad debido a que no presentan altas temperaturas.

Se han identificado seis fallas principales (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2021) que influyen en el flujo de agua subterránea (**Figura 1**): los flujos locales predominan en Coitzio (falla 4), los flujos intermedios se encuentran en La Paloma, La Colina, Central Camionera y Tarimbaro (fallas 1, 2, 3 y 5), mientras que Zinapécuaro (falla 6) alberga los flujos regionales más evolucionados. La longitud y el ancho de estas fallas (descritos en los ramos estructurales) proporcionan superficies significativas que facilitan el movimiento del agua subterránea, en consonancia con las observaciones realizadas en otras fallas (Garduño-Monroy *et al.*, 1999, 2001).

La distribución limitada de componentes regionales se debe al escaso muestreo en sitios termales. No obstante, los sitios analizados, que funcionan como balnearios,

reflejan adecuadamente el comportamiento térmico regional, lo que permite extrapolar los resultados a zonas cercanas con condiciones similares.

Impactos ambientales en las trayectorias de flujo

La presencia de actividades agrícolas en la zona se puede asociar al contenido de compuestos de nitrógeno encontrados. Las componentes locales y regionales presentan valores de amonio que se encuentran fuera de los límites permisibles de la Norma Mexicana (NOM-127) (DOF, 2022) en donde la componente local es la que presenta las mayores concentraciones. Para los nitratos se observa su presencia en las componentes locales e intermedias fuera de los límites NOM-127 (DOF, 2022) siendo las componentes intermedias la que tienen mayores concentraciones.

Las concentraciones que sobrepasan los valores de fondo para nitrógeno se pueden asociar a fuentes agrícolas (Bundy *et al.*, 1994). Valores similares de nitratos a los de este estudio han sido atribuidos al uso de aguas residuales y fertilizantes (Cram *et al.*, 2007; García-Villa, 2013; Pérez Villarreal *et al.*, 2018). Datos históricos en la zona de estudio, entre 1997-1999, muestran valores que oscila entre 0 y 22.9 mg/L de NO_3^- con un punto más alto en 87.7 mg/L (INEGI, 2020). Las muestras que exceden valores de 3 mg/L presentan una clara influencia antropogénica

(Ogrinc *et al.*, 2019). Los valores tanto de nitratos como amonio en el SIRAS Cuitzeo son mucho más altos que los valores históricos, lo cual nos habla del impacto ambiental que están teniendo las actividades agrícolas en la zona. En donde es necesario evaluar con otros métodos como isótopos estables el comportamiento del agua usada para riego que puede estar incorporando más compuestos de nitrógeno al medio subterráneo.

Relación hidrogeoquímica, isotópica y el flujo subterráneo

La dirección de flujo de los pozos indica que el agua subterránea cruza los lagos, indicando una alteración del régimen natural por extracción subterránea. En Pátzcuaro, la descarga es de SE a NO; en Cuitzeo, de N a S, aunque los manantiales descargan en todas las orillas. La extracción intensiva de agua subterránea y la disminución del nivel de los lagos (Medina-Orozco *et al.*, 2019) afectan la recarga entre lagos y acuíferos.

En México se han reportado fallas y fracturas contribuyen a la mezcla de aguas recientes y con mayor tiempo de residencia (Ventura-Houle *et al.*, 2021; Ibarra-Olivares *et al.*, 2023).

Respecto a la composición isotópica, se puede observar que las componentes locales e intermedias se alinean en su mayoría a la LGAM, con ciertos puntos que muestran evaporación, en donde debido a la naturaleza agrícola de la zona, se puede inferir que puede existir riego de retorno al suelo, por lo que el agua esta evaporada. Las componentes regionales se muestran alineadas a la LGAM, mostrando su origen en el agua de lluvia, con un sitio que muestra evaporación y que podría estar influenciado con flujos geotérmicos presentes en la zona de estudio.

Diversas investigaciones sobre sistemas de flujo de aguas subterráneas volcánicas han reportado que los procesos típicos que controlan la hidrogeoquímica son: la meteorización de minerales de silicato y la consecuente liberación de componentes minerales a la solución, procesos de intercambio iónico y la mezcla de componentes del flujo (Gastmans *et al.*, 2016; Hernández-Antonio *et al.*, 2015; Olea-Olea *et al.*, 2020).

Los resultados de esta investigación confirmaron que el SIRAS es un componente integral de la dinámica de los lagos. En donde los impactos ambientales pueden estar presentes en solo algunas componentes de flujo.

Conclusiones

Los hallazgos clave de esta investigación son: La trayectoria de flujo local se caracteriza por aguas con predominio

de HCO_3^- , mientras que la trayectoria de flujo intermedio presenta aguas bicarbonatadas y sódicas dentro de la zona de mezcla. La trayectoria de flujo regional 1 presenta los valores más altos de temperatura, sulfato y Sr^{2+} , mientras que la trayectoria de flujo regional 2 se distingue por altas temperaturas y los valores más altos de Cl^- y Li^+ . Estos hallazgos indican que la trayectoria de flujo regional 1 desciende a mayor profundidad, influenciada por fallas y estructuras de semigranbens, lo que resulta en calentamiento y enriquecimiento de sulfatos y Sr^{2+} . Asimismo, la trayectoria de flujo regional 2 también desciende a mayor profundidad debido a fallas y estructuras de semigranbens, lo que provoca calentamiento, pero con enriquecimiento de cloruro y mayores concentraciones de Li^+ . Estos procesos distintivos que ocurren en las dos trayectorias de flujo resaltan la necesidad de un estudio más detallado.

Esta investigación delinea con éxito las vías de flujo influenciadas por los procesos de mezcla mediante una combinación de métodos, ACP, AMME, mapeo del nivel freático y la identificación de características estructurales en los sistemas de flujo de agua subterránea que descargan en lagos perennes. Ofrece una mejor comprensión de la dinámica entre agua subterránea y lago, en particular en relación con pozos y manantiales. El uso de datos hidrogeoquímicos e isotópicos potencian el uso de estas metodologías.

La extracción intensiva de las componentes regionales más profundas o estables puede modificar su contribución al sistema hídrico subterráneo en general, lo que podría provocar cambios a largo plazo en la disponibilidad y calidad del agua subterránea.

Los impactos ambientales en las componentes del sistema Cuitzeo brindan información sobre la importancia de la presencia de rasgos estructurales, debido a que estos parecen condicionar la distribución y concentración de los nitratos en las componentes intermedias.

Al enfatizar los impactos antropogénicos y la necesidad de un uso sostenible del agua, especialmente en regiones donde la agricultura desempeña un papel clave en la economía, este estudio contribuye al debate global sobre cómo equilibrar la sostenibilidad ambiental con el desarrollo económico. El trabajo es especialmente pertinente dado que muchas regiones enfrentan la disminución de los recursos hídricos, agravada por el cambio climático, el crecimiento demográfico y la intensificación agrícola. Esta metodología es adaptable a entornos similares en todo el mundo, especialmente en terrenos volcánicos o fracturados, donde las interacciones entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales desempeñan un papel crucial en la preservación de los ecosistemas.

Agradecimientos

Esta investigación se desarrolló con apoyo de DGA-PA-UNAM a través del proyecto PAPIIT (No. IA101924 a SOO), “Aplicación de un enfoque multifactorial para comprender los procesos hidrogeológicos ambientales en el agua subterránea y los cuerpos con los que tiene conectividad hidrológica: caso de estudio sistema de flujo Cuitzeo”. Los autores agradecen los análisis químicos realizados por el Laboratorio de Cromatografía y Laboratorio de Espectroscopia Atómica de LANGEM en el Instituto de Geología de la UNAM. Agradecemos a Zaida Martínez Casas del Instituto de Geología, UNAM por el apoyo en la visualización de datos. RSM agradece la asistencia brindada por el Programa STARs del Sistema de la Universidad de Texas (No. AR911486) y los fondos de la Oficina del Rector de la Universidad de Texas-Arlington (No. 314075 a RSM).

Referencias

- Appelo CAJ, Postma D (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2nd edn.
- Avellán D-R, Cisneros-Máximo G, Macías JL, *et al* (2020). Eruptive chronology of monogenetic volcanoes northwestern of Morelia – Insights into volcano-tectonic interactions in the central-eastern Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, México. *J South Am Earth Sci* 100:102554. doi:10.1016/j.jsames.2020.102554
- Bourgeois J, Rnard V, Auboin J., *et al* (1988). Fragmentation en cours du bord Oest du Continent Nord-Americain: Les frontieres sous-marines du Block Jalisco (Mexique): Comptes Rendus Academie des Sciences
- Bundy LG, Knobeloch L, Webendorfer B, *et al* (1994) Nitrate in Wisconsin Groundwater: Sources and Concerns. Report G3054. Madison, WI, USA.
- Burns DA, McDonnell JJ, Hooper RP, *et al* (2001). Quantifying contributions to storm runoff through end-member mixing analysis and hydrologic measurements at the Panola Mountain research watershed (Georgia, USA). *Hydrol Process* 15:1903–1924. doi:10.1002/hyp.246
- Carrera J, Vázquez-Suñé E, Castillo O, Sánchez-Vila X (2004). A methodology to compute mixing ratios with uncertain end-members. *Water Resour Res* 40:1–11. doi:10.1029/2003WR002263
- Chebotarev III (1955). Metamorphism of natural waters in the crust of weathering-3. *Geochim Cosmochim Acta* 8:198–212. doi:10.1016/0016-7037(55)90053-3
- Christophersen N, Hooper RP (1992). Multivariate analysis of stream water chemical data: The use of principal components analysis for the end-member mixing problem. *Water Resour Res* 28:99–107. doi:10.1029/91WR02518
- CONAGUA (2018). Atlas del Agua en México 2018. https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2019/04/AAM_2018.pdf
- Cortes-Calderon EA, Ellis BS, Magna T, *et al* (2024). Lithium systematics in the Krafla volcanic system: comparison between surface rhyolites and felsic cuttings from the Iceland deep drilling project -1 (IDDP-1). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 179:37. doi:10.1007/s00410-024-02119-y
- Craig H (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science* (1979) 133:1702–1703. doi:10.1126/science.133.3465.1702
- Cram S, Galicia L, Israde-Alcántara I (2007). Análisis de su Geografía y Entorno Socioambiental. In: Ávila-Flores C (ed) Atlas de la Cuenca del Lago Cuitzeo. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Cressie N (1993). *Statistics for spatial data*: John Wiley & Sons, New York
- Escolero O (2018). Sistemas regionales de flujo de agua subterránea en México. <http://www.geologia-fefflow.unam.mx/>
- García E (1973). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koeppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México
- García-Villa S (2013). Determinación de la eficiencia depurativa del humedal natural del Lago de Cuitzeo
- Garduño-Monroy VH, Arreygue-Rocha E, Torres, *et al* (2001). Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 18:37–54
- Garduño-Monroy VH, Rodríguez- Torres GM, Israde-Alcántara I, *et al* (1999). Efectos del clima (El Niño) en los fenómenos de fluencia de las fallas geológicas de la Ciudad de Morelia. *Geos, Union Geofísica Mexicana* 9:84–93
- Gastmans D, Hutcheon I, Menegário AA, Chang HK (2016). Geochemical evolution of groundwater in a basaltic aquifer based on chemical and stable isotopic data: Case study from the Northeastern portion of Serra Geral Aquifer, São Paulo state (Brazil). *Journal of Hydrology* 535:598–611. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.02.016
- Gómez-Vasconcelos MG, Avellán DR, Soria-Caballero D, *et al* (2021). Geomorphic characterization of faults as earthquake sources in the Cuitzeo Lake basin, central México. *J South Am Earth Sci* 109:103196. doi:10.1016/j.jsames.2021.103196
- Gómez-Vasconcelos MG, Garduño-Monroy VH, Macías JL, *et al* (2015). The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 301:128–147. doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.05.005
- Hayashi M, Rosenberry DO (2002). Effects of ground water exchange on the hydrology and ecology of surface water. *Groundwater* 40:309–316. doi:10.1111/j.1745-6584.2002.tb02659.x

- Hernández-Antonio A, Mählknecht J, Tamez-Meléndez C, Ramos-Leal J, Ramírez-Orozco A, Parra R, Ornelas-Soto N, Eastoe CJ (2015). Groundwater flow processes and mixing in active volcanic systems: the case of Guadalajara (Mexico). *Hydrology and Earth System Sciences* 19(9):3937–3950. doi:[10.5194/hess-19-3937-2015](https://doi.org/10.5194/hess-19-3937-2015)
- Ibarra-Olivares G, Miranda-Avilés R, Ramos-Leal JA, Morán-Ramírez J, Puy-Alquiza MJ, Li Y, Ángeles-Moreno E, Kshirsagar P (2023). Hydrogeochemical characterization of groundwater at the boundaries of three aquifers in Central México. *Water* 15 (22):3948. doi:[10.3390/w15223948](https://doi.org/10.3390/w15223948)
- INEGI (2020). Cuenca hidrológica Lago de Cuitzeo. Humedales.
- Jolliffe IT (1986) Principal Component Analysis. Springer Series in Statistics, New York
- Katsuyama M, Kabeya N, Ohte N (2009). Elucidation of the relationship between geographic and time sources of stream water using a tracer approach in a headwater catchment. *Water Resour Res* 45:1–13. doi:[10.1029/2008WR007458](https://doi.org/10.1029/2008WR007458)
- Lermo-Samaniego J, Nieto-Obregon J, Zermefio M (1996) Fault and fractures in the valley of Aguascalientes. Preliminary microzonification. In: World Conference on Earthquake Engineering, II th. Amsterdam, Elsevier, Paper, num. 1651
- Makarenko FA (1948). On base flow. Troudy Laboratorii gidrogeologicheskikh problem USSR. Acad Of Sciences 1:51–71
- Medina-Orozco LE, García-Calderón NE, García Oliva F, Elena Ikkonen E (2019). Análisis histórico de la pérdida de humedales del Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Biotechnia* 21:83–90. doi:[10.18633/biotechnia.v21i2.933](https://doi.org/10.18633/biotechnia.v21i2.933)
- Mendoza ME, Bocco G, Bravo M, *et al* (2006). Predicting Water-Surface Fluctuation of Continental Lakes: A RS and GIS Based Approach in Central Mexico. *Water Resources Management* 20:291–311. doi:[10.1007/s11269-006-8199-z](https://doi.org/10.1007/s11269-006-8199-z)
- Mifflin MD (1968). Delineation of Ground-Water flow Systems in Nevada. University of Nevada, Reno. <https://www.nrc.gov/docs/ML0330/ML033030350.pdf>
- Möller P, Rosenthal E, Inbar N, Magri F (2016). Hydrochemical considerations for identifying water from basaltic aquifers: The Israeli experience. *J Hydrol Reg Stud* 5:33–47. doi:[10.1016/j.ejrh.2015.11.016](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.016)
- Morales-Casique E (2012). Mixing of groundwaters with uncertain end-members: Case study in the Tepalcingo-Axochiapan aquifer, Mexico. *Hydrogeol J* 20:605–613. doi:[10.1007/s10040-011-0826-y](https://doi.org/10.1007/s10040-011-0826-y)
- Ogrinc N, Tamše S, Zavadlav S, *et al* (2019). Evaluation of geochemical processes and nitrate pollution sources at the Ljubljansko polje aquifer (Slovenia): A stable isotope perspective. *Science of The Total Environment* 646:1588–1600. doi:[10.1016/j.scitotenv.2018.07.245](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.245)
- Olea-Olea S, Escolero O, Mählknecht J, Ortega L, Silva-Aguilera R, Florez-Peñaloza JR, Perez-Quezadas J, Zamora-Martinez O (2020). Identification of the components of a complex groundwater flow system subjected to intensive exploitation. *Journal of South American Earth Sciences* 98:102434. doi:[10.1016/j.jsames.2019.102434](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102434)
- Olea-Olea S, Escolero O, Mählknecht J, Ortega L, Taran Y, Moran-Zenteno DJ, Zamora-Martinez O, Tadeo-Leon J (2020). Water-rock interaction and mixing processes of complex urban groundwater flow system subject to intensive exploitation: The case of Mexico City. *Journal of South American Earth Sciences* 103:102719. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102719>
- Pan G, Li X, Zhang J, *et al* (2019). Groundwater-flow-system characterization with hydrogeochemistry: a case in the lakes discharge area of the Ordos Plateau, China. *Hydrogeol J* 27:669–683. doi:[10.1007/s10040-018-1888-x](https://doi.org/10.1007/s10040-018-1888-x)
- Pasquaré G, Ferrari L, Garduño-Monroy VH, *et al* (1991). Geology map of the central sector of the Mexican Volcanic belt, States of Guanajuato and Michoacán. *Geological Society of America Map and Chart Series* MCH072
- Pelizardi F, Bea SA, Carrera J, Vives L (2017). Identifying geochemical processes using End Member Mixing Analysis to decouple chemical components for mixing ratio calculations. *J Hydrol (Amst)* 550:144–156. doi:[10.1016/j.jhydrol.2017.04.010](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.010)
- Pérez Villarreal J, Ávila Olivera JA, Israde Alcántara I (2018). Análisis de los sistemas de flujo en un acuífero perturbado por la extracción de aguas subterráneas. Caso de la zona Morelia-Capula, Michoacán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 70:675–688. doi:[10.18268/BSGM2018v70n3a5](https://doi.org/10.18268/BSGM2018v70n3a5)
- Piper AM (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Trans Am Geophys Union* 25:914–924
- Platt Bradbury J (2000). Limnologic history of Lago de Pátzcuaro, Michoacán, Mexico for the past 48,000 years: impacts of climate and man. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 163:69–95. doi:[10.1016/S0031-0182\(00\)00146-2](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00146-2)
- Rosas-Elgukra J, Ferrari L, Martinez ML, Urrutia-Fucugauchi J (1997). Stratigraphy and Tectonics of the Guadalajara Region and Triple-Junction Area, Western Mexico. *Int Geol Rev* 39:125–140. doi:[10.1080/00206819709465263](https://doi.org/10.1080/00206819709465263)
- SGM (1998). Carta Geológico-Minera Morelia E14-1. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/1471_E14-A24_GM.pdf
- SGM (2002). Carta Geológico-Minera Acámbaro, Guanajuato, Michoacán F14-C84
- Shin WJ, Park Y, Koh DC, *et al* (2017). Hydrogeochemical and isotopic features of the groundwater flow systems in the central-northern part of Jeju Island (Republic of Korea). *J Geochem Explor* 175:99–109. doi:[10.1016/j.gexplo.2017.01.004](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.01.004)
- Tubau I, Vázquez-Suñé E, Jurado A, Carrera J (2014). Using EMMA and MIX analysis to assess mixing ratios and to identify hydrochemical reactions in groundwater. *Science of the Total Environment* 470–471:1120–1131. doi:[10.1016/j.scitotenv.2013.10.121](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.121)
- USGS (2010). Chemical tracer methods. In: Estimating Groundwater

Recharge. Cambridge University Press, pp 136–165

Ventura-Houle R, Guevara-Mansilla O, Requena-Lara G, *et al* (2021).

Hydrochemistry, δD and $\delta^{18}O$ to explain the distribution of water quality in a karst setting in the semi-arid region of Northeast Mexico. *Environ Earth Sci* 80:6. doi:[10.1007/s12665-020-09310-x](https://doi.org/10.1007/s12665-020-09310-x)