

Interacciones hidrogeológicas entre Laguna Tiscapa con el acuífero Las Sierras: un estudio de isótopos estables

Hydrogeological interactions between Tiscapa Lagoon and Las Sierras aquifer: a stable isotope study

Jonathan Javier Zeas Vivas

Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN-Managua)
jonathan.zeas@cira.unan.edu.ni
<https://orcid.org/0009-0008-3808-7371>

Javier Barberena Moncada

Departamento de Extensión y Vinculación Social
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN-Managua)
javier.barberena@unan.edu.ni
<https://orcid.org/0000-0001-9119-4485>

Iris Hurtado García

Dirección de Gestión de Calidad Institucional
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN-Managua)
iris.hurtado@unan.edu.ni
<https://orcid.org/0000-0002-3758-8800>

Recibido: 20/9/2024

Aceptado: 12/12/2024

Resumen

El estudio sobre el comportamiento y mecanismo de recarga-descarga en acuíferos es crucial para la gestión sostenible de recursos hídricos, especialmente en áreas urbanas como Managua. El objetivo de la investigación fue trazar el movimiento de las aguas de la Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras mediante la utilización de isótopos estables de Oxígeno 18 ($\delta^{18}\text{O}$) y Deuterio ($\delta^2\text{H}$). En el estudio se analizó un total de 109 muestras de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, en las matrices de agua de precipitación, aguas subterráneas, Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán, esto para lograr determinar quien ejerce influencia en el acuífero Las Sierras, específicamente en la zona entre los Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán. Los principales hallazgos fueron la clasificación de dos tipos de agua subterránea; una situada al sur de Laguna Tiscapa con promedio de -7.10‰ de $\delta^{18}\text{O}$ asociados a recarga directa de las precipitaciones y otro ubicado entre Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán con media de -5.93‰ de $\delta^{18}\text{O}$, y muestra una influencia directa de las aguas de la Laguna de Tiscapa con -4.53‰ de $\delta^{18}\text{O}$. Es decir, la Influencia de la Laguna al acuífero Las Sierras se produce en las áreas norte y noreste, lo que indica un proceso de recarga significativo. Mientras que las aguas del Lago Xolotlán no ejercen influencia sobre las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras. Estos hallazgos son fundamentales para la planificación y gestión de recursos hídricos, asegurando una utilización sostenible y eficiente del acuífero.



© Copyright 2024.
Universidad Nacional
Autónoma de Nicaragua,
Managua (UNAN-Managua)

DOI: <https://doi.org/10.5377/recoso.v7i12.19654>

Palabras claves

Agua subterránea, lagunas cratéricas, isótopos estables, enriquecimiento isotópico, evaporación.

Abstract

The study of the behavior and mechanism of recharge-discharge in aquifers is crucial for the sustainable management of water resources, especially in urban areas such as Managua. The objective of the research was to trace the movement of water from the Tiscapa Lagoon to the Las Sierras aquifer using stable isotopes of Oxygen 18 ($\delta^{18}\text{O}$) and Deuterium ($\delta^2\text{H}$) as tracers. A total of 322 $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ results were analyzed in the study, in the matrices of precipitated water, groundwater, Laguna de Tiscapa and Lake Xolotlán, to investigate who exerts influence on the Las Sierras aquifer, specifically in the area between Lakes Tiscapa and Lake Xolotlán. The main findings were the classification of two types of groundwater; one located south of Laguna Tiscapa with an average of -7.10‰ of $\delta^{18}\text{O}$ associated with direct recharge from precipitation and another located between Laguna de Tiscapa and Lake Xolotlán with an average of -5.93‰ of $\delta^{18}\text{O}$, and shows a direct influence of the waters of Laguna de Tiscapa with -4.53‰ of $\delta^{18}\text{O}$. That is, the Influence of the Laguna to the Las Sierras aquifer occurs in the northern and northeastern areas, indicating a significant recharge process. While the waters of Lake Xolotlán do not influence the groundwater of the Las Sierras aquifer. These findings are fundamental for the planning and management of water resources, ensuring a sustainable and efficient use of the aquifer.

Keywords

Groundwater; lagoons, stable isotopes, isotope enrichment; evaporation.

Introducción

El ciclo hidrológico es determinante para transportar el agua en cada etapa y los escenarios en los que está involucrada, desde que se precipita, escurre e infiltra, inicia el movimiento de las aguas en los espacios subterráneos y luego emerge a la superficie mediante manantiales. Otra parte del agua precipitada escurre en la superficie hasta desembocar en un cuerpo de agua superficial. Comprender el movimiento del flujo subterráneo y su interacción con las aguas superficiales es de suma importancia para el aprovechamiento sostenible y la conservación de este recurso determinante para la vida (Brauman, 2015).

La importancia de comprender las interacciones entre agua superficiales y subterráneas radica fundamentalmente en la salud de los ecosistemas acuáticos, debido a que las transformaciones químicas producidas por las interacciones agua-roca, plumas de contaminación por actividad endógena o natural causan el enriquecimiento de nutrientes y contaminantes que son transportados a través de las líneas de flujos hidrogeológicos, lo que pueden causar impactos significativos en los cuerpos de aguas receptores (Lewandowski et al., 2020). Para comprender estas interconexiones se requiere caracterizar y comprender los factores que influyen en estas, concernientes al clima, topografía, geología, las propiedades hidráulicas del acuífero, extracción de agua subterránea y uso de suelo (Safeeq y Fares, 2016).

Una herramienta útil para comprender los procesos que se dan en el ciclo hidrológico, fundamentalmente entre las conexiones agua superficial y subterránea, son las técnicas isotópicas, especialmente los isotopos estables de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, su carácter conservativo que los constituye en excelentes trazadores para determinar como el agua se mueve (Mook, 2001). Mediante las

técnicas isotópicas se puede demostrar las diferencias espaciales y temporales entre los cuerpos de agua, además, permiten indagar si las precipitaciones son fuentes principales de recarga hacia el cuerpo de agua superficial como subterránea (Wu et al., 2020).

En Centroamérica se han realizados diversos estudios donde se aplican técnicas isotópicas para determinar variaciones isotópicas espaciotemporales, estimaciones de recargas, e interacciones de agua superficial con la subterránea (Sánchez-Murillo et al., 2020). En Nicaragua se han implementados estudios isotópicos para comprender el funcionamiento de cuerpos importantes de agua, lo que ha permitido comprender el comportamiento del Lago Xolotlán y el agua subterránea, interacción Laguna de Asososca y Acuífero Las Sierras, sistema hidrológico en Laguna de Tiscapa (Araguás Araguás et al., 1992; Barberena-Moncada et al., 2021; Plata Bedmar et al., 2001).

En la presente investigación se planteó el objetivo de trazar el movimiento de las aguas de la Laguna de Tiscapa hacia el acuífero Las Sierras mediante la utilización de isótopos estables de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, debido a que adquieren un rasgo particular en cada componente del ciclo hidrológico, para efectos de esta investigación se consideraron las matrices precipitaciones, Laguna de Tiscapa, Lago Xolotlán y aguas subterráneas. La importancia de este estudio radica en generar información relevante para una futura gestión ambiental de este valioso recurso hídrico, en especial, porque la Laguna de Tiscapa representa una reserva natural única y privilegiada por su posición central en la ciudad de Managua, y el acuífero Las Sierras es de vital importancia para la distribución y abastecimiento del agua potable de la población capitalina (Kokusai kogyo Co. Ltd., 1993).

Materiales y métodos

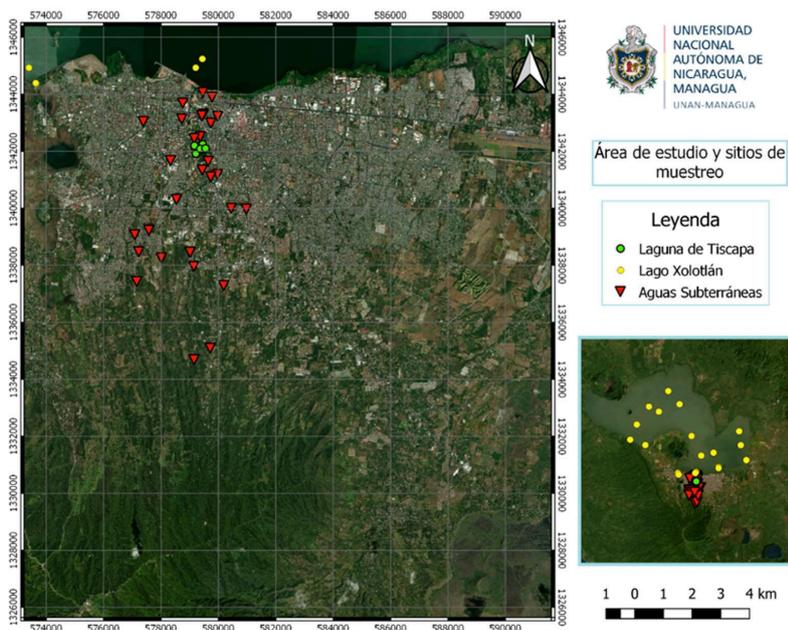
Área de estudio

La zona de estudio es el acuífero La Sierra, en la zona que comprende entre la Laguna Tiscapa y Lago Xolotlán (zona entre Lagos) en la ciudad de Managua, e incluye ambos cuerpos hídricos (Figura 1). Hidrogeológicamente el área entre los Lagos está ubicada en la sub-área central del acuífero Las Sierras. Con extensión aproximada de 1 040 Km², se caracteriza por una estratificación compleja proveniente de distintas épocas geológicas, de origen volcánica y con diferente grado de consolidación, capas porosas permeables de flujos piroclásticos, tobas brechosas, cenizas, pómez y lapilla de granulometría media a gruesa (Araguás Araguás et al., 1992; Kokusai kogyo Co. Ltd., 1993).

Laguna de Tiscapa es parte de la subcuenca II de la cuenca sur de Managua, se ubica en la microcuenca IID, en el centro de la ciudad de Managua. Tiene una profundidad de 45,6 m que varía según la época del año, y con una superficie del espejo de agua de 0,14 km², su forma es semejante a un círculo (Freundt et al., 2010).

El Lago Xolotlán posee un área de 1 040 Km², se ubica en la depresión nicaragüense y forma parte integral de la Cuenca del Río San Juan, que alberga una serie de ríos tributarios con un área de 19 533,46 km² y tiene un drenaje superficial de 5 148,4 Km². El Lago Xolotlán somero con profundidad máxima de 25 m y profundidad media de 7,8 m. En el sector de la cuenca sur, donde está localizada la ciudad de Managua, el Lago es bastante plano y superficial, no excede los 5,0 m (Rozanki et al., 2001).

Figura 1
Ubicación de área de estudio



Nota: La figura ilustra el área de estudio y localización de los sitios de muestreo. Los símbolos corresponden a sitios de muestreos; agua subterránea (color rojo), Laguna de Tiscapa (verde), Lago Xolotlán (amarillo). Fuente: Elaboración propia.

Materiales y métodos

En el presente estudio se utilizó las bases de datos pertenecientes a los Fondos para proyectos de investigación (FPI) 13201804 de Universidad Nacional autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN/Managua), así como a la sección de Hidrología Isotópica de Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés) y al proyecto Mapa Isotópico del CIRA/UNAN-Managua. El análisis se centró en las matrices correspondientes a las aguas de Laguna de Tiscapa (76 muestras), agua subterránea (35 muestras), Lago Xolotlán (57 muestras) y precipitaciones (141 muestras).

En las matrices Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán, la captación de las muestras se efectuó empleando una botella Van Dorn, y se filtraron in situ con filtros whatman de 47 mm y bomba de vacío Mityvac. Todas las muestras de agua tanto superficial como las de distintos niveles de profundidad, fueron depositadas en frascos de polietileno de alta densidad de 50 mL.

Las muestras correspondientes a aguas subterráneas se captaron de pozos ubicados en la zona de estudio, entre Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán. Previo a la toma de la muestra se realizó una purga de agua de alrededor de 10 min, para asegurar la representatividad de la muestra, luego se colectaron en frascos de polietileno de alta densidad de 50 mL.

Para la matriz precipitaciones, las aguas se captaron en los sitios ubicados en: Puerto Salvador Allende (PSA) a orillas del Lago Xolotlán, Managua y en Las Nubes (LN) municipio El Crucero. Corresponden a acumulados mensuales de agua precipitada contenidas en totalizadores tipo Palmex modelo Rain Sampler RS1, las muestras se almacenaron en frascos de 50 mL de alta densidad para su posterior análisis. Las muestras de precipitación de eventos diarios se tomaron en CIRA/UNAN-Managua por medio de colector tipo Palmex modelo Rain Sampler RS, y se colectaron en frascos de 50 mL de polietileno de alta densidad

Las determinaciones analíticas de las muestras que corresponde a las bases de datos de FPI y Mapa Isotópico se procesaron en CIRA/UNAN-Managua, utilizando un espectroscopio láser LWIA-45-EP fabricado por “Los Gatos Research”. Todos los resultados se expresan con el símbolo δ y se determinan mediante **Ecuación 1**:

$$\delta = \frac{R_S - R_P}{R_P} * 1000$$

E1

Donde: δ desviación isotópica dado en ‰. P Estándar interno. R relación isotópica de S muestra.

La incertidumbre instrumental es de $\pm 0,2$ ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y de ± 2 ‰ para $\delta^2\text{H}$.

Para determinar las líneas meteóricas locales (LML) y líneas de evaporación, se utilizó el método de regresión de mínimos cuadrados del área de estudio, si se basa en la **Ecuación 2** que fue propuesto por Craig (1961):

$$\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$$

E2

Exceso de deuterio (D-exceso) mediante la formula Dansgaard (1964):

$$\text{D-exceso} = 8 * \delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$$

E3

Exceso condicionado por la línea (lc-exceso), que también indica los procesos de evaporación que experimenta las fuentes de agua superficiales y cuanto se desvía de la línea meteórica local se calculó mediante **Ecuación 4**, de Landwehr y Coplen (2006):

$$\text{lc-excess} = \delta^2\text{H} - a * \delta^{18}\text{O} - b$$

E4

Donde: “a” corresponder a la pendiente de línea meteórica local (LML), b es el intercepto de línea meteórica local (LML).

La representación gráfica de las abundancias isotópicas del agua subterránea se efectuó a través de Isoscape utilizando la metodología descrita por Terzer et al., (2013) en la **Ecuación 5**:

$$\delta^{18}\text{O} = \text{var} (Z (x) - Z (y)) \quad \text{E5}$$

Se aplicó test de pruebas no paramétricas Kruskal Wallis para determinar si hay diferencias significativas entre las matrices ($p < 0.05$), estos fueron procesados en InfoStat versión 2020 y en la elaboración de los mapas se efectuó en QGIS 3.16.8.

Resultados y discusión

Los valores isotópicos de las precipitaciones presentan una media de $\delta^{18}\text{O} = -4.84\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -30.82\text{‰}$, máximos de $\delta^{18}\text{O} = 2.21\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = 23.30\text{‰}$, y mínimos de $\delta^{18}\text{O} = -16.79\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -115.30\text{‰}$, responden a una línea de agua meteórica local (LMWL) para el período evaluado (2018-2019) de $\delta^2\text{H} = 7.468 * \delta^{18}\text{O} + 5.327$. Cabe destacar que las precipitaciones muestran mucha variabilidad, asociado a los eventos de desplazamiento de la zona de convergencia intertropical en el pacífico de Nicaragua, zona donde se ubica el área de estudio. Para la ciudad de Managua la humedad procede del mar Caribe en un 70% (Barberena Moncada, 2019; Barberena Moncada y Hurtado García, 2019). A lo que se suma, las afectaciones que produce el fenómeno conocido como Canícula que se presenta en invierno generando un efecto que fue llamado W, debido a que hay un agotamiento isotópico en los meses de mayor precipitación (mayo, septiembre y octubre) mientras que cuando está el fenómeno de canícula se presenta un enriquecimiento en las precipitaciones (Sánchez-Murillo et al., 2016, 2020).

Las aguas de Laguna de Tiscapa presentan composición media de $\delta^{18}\text{O} = -4.53\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -33.96\text{‰}$, con valores máximos de $\delta^{18}\text{O} = -3.19\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -25.60\text{‰}$, así como mínimos de $\delta^{18}\text{O} = -5.44\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -39.40\text{‰}$. A diferencia de Lago Xolotlán con una media isotópica de los datos es $\delta^{18}\text{O} = -0.416\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -5.588\text{‰}$, con máximos de $\delta^{18}\text{O} = 1.98\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = 8.60\text{‰}$; así como mínimos de $\delta^{18}\text{O} = -14.55\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -63.7\text{‰}$. Las líneas de evaporación obtenidas para Xolotlán de $\delta^2\text{H} = 4.053 * \delta^{18}\text{O} - 3.903\text{‰}$ ($r^2 = 0.96$) y Tiscapa de $\delta^2\text{H} = 5.482 * \delta^{18}\text{O} - 9.106$ ($r^2 = 0.89$), este efecto es debido a que presentan pendientes menor a 8, lo que indica procesos de evaporación, lo que es corroborado por los intercepto son negativos, asociados a procesos de evaporación post-precipitación en las aguas superficiales, mientras que las pendientes superiores a 8 indican una fuente de recarga dominante con la ausencia de fraccionamiento isotópico (Timsic y Patterson, 2014).

Las diferencias se pueden relacionar a los cambios que se dan en la composición de las aguas en Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán por la estacionalidad (período lluvioso y estiaje), es decir, en período lluvioso se encuentran influenciados por aportes de precipitaciones, muchas veces en equilibrio



Laguna de Tiscapa que presenta aportes de escorrentía superficial en periodo lluvioso por cause artificial que vierte agua fluvial de la ciudad de Managua, así también del acuífero Las Sierras mediante el fallamiento local...

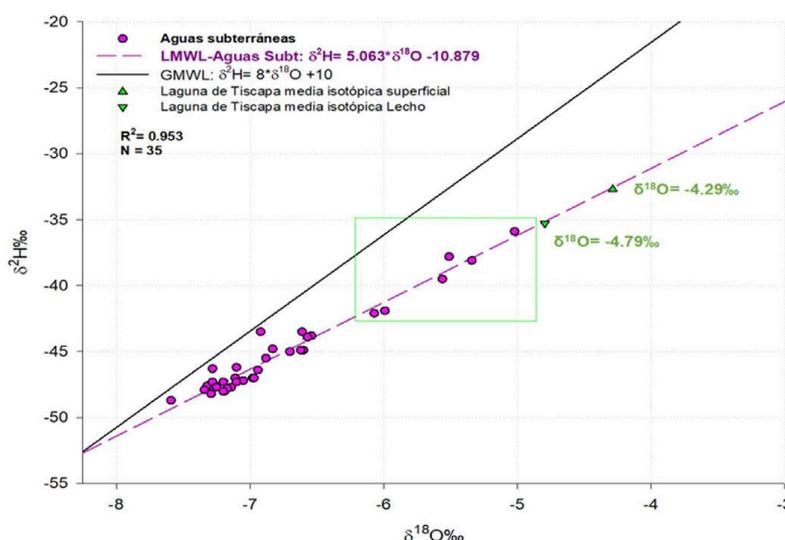
con los procesos de evaporación de agua locales (Esquivel-Hernández et al., 2018). El Lago Xolotlán fue clasificado como lago terminal y su principal o única fuente de agua es la escorrentía superficial de la cuenca a la pertenece (Rozanki et al., 2001). A diferencia de Laguna de Tiscapa que presenta aportes de escorrentía superficial en periodo lluvioso por cause artificial que vierte agua fluvial de la ciudad de Managua, así también del acuífero Las Sierras mediante el fallamiento local (Barberena-Moncada et al., 2021). Otro factor que puede estar influyendo son los tiempos de residencia del agua en Lago Xolotlán y Laguna de Tiscapa, a mayor tiempo de residencia y mayor área, las moléculas de agua que contienen menor masa cambian a la fase de vapor por la exposición a la luz solar, incrementando su valor isotópico (Clark y Fritz, 2003).

Agua subterránea presenta media isotópica $\delta^{18}\text{O} = -6.84\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -45.55\text{‰}$, con valores máximos de $\delta^{18}\text{O} = -5.34\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -37.80\text{‰}$, así como mínimos de $\delta^{18}\text{O} = -7.59\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -48.70\text{‰}$. Con línea de aguas subterráneas del acuífero Las Sierras: $\delta^2\text{H} = 5.063 \cdot \delta^{18}\text{O} - 10.879$, con una pendiente inferior a 8 de GMWL.

En la Figura 2 se aprecia 6 datos enriquecidos (cuadro verde) con media isotópica en $\delta^{18}\text{O} = -5.58\text{‰}$, que corresponde a pozos ubicados al norte y noreste de Laguna de Tiscapa (ver Figura 3. A), hasta llegar a las cercanías de las costas del Lago Xolotlán, lo que llega comprender una zona entre la Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán. Mientras que las aguas del acuífero ubicadas al sur de Laguna de Tiscapa (para un total de 22 pozos), contienen una composición isotópica más empobrecidos, promedian un valor de $\delta^{18}\text{O} = -7.11\text{‰}$.

Figura 2

Composición isotópica del acuífero Las Sierras entre Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán



Nota. Gráfico de correlación lineal en $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ del agua subterránea. Línea continua representa Línea de Agua Meteorica Mundial. Línea discontinua lila representa a Línea de agua de acuífero Las Sierras. Recuadro color verde muestra los sitios de agua subterránea con valores isotópicos enriquecidos, posiblemente por mezcla con agua de Laguna de Tiscapa. Fuente: Elaboración propia

Tanto D-exceso como Ic-exceso Figura 3. B y C, indican variabilidad en

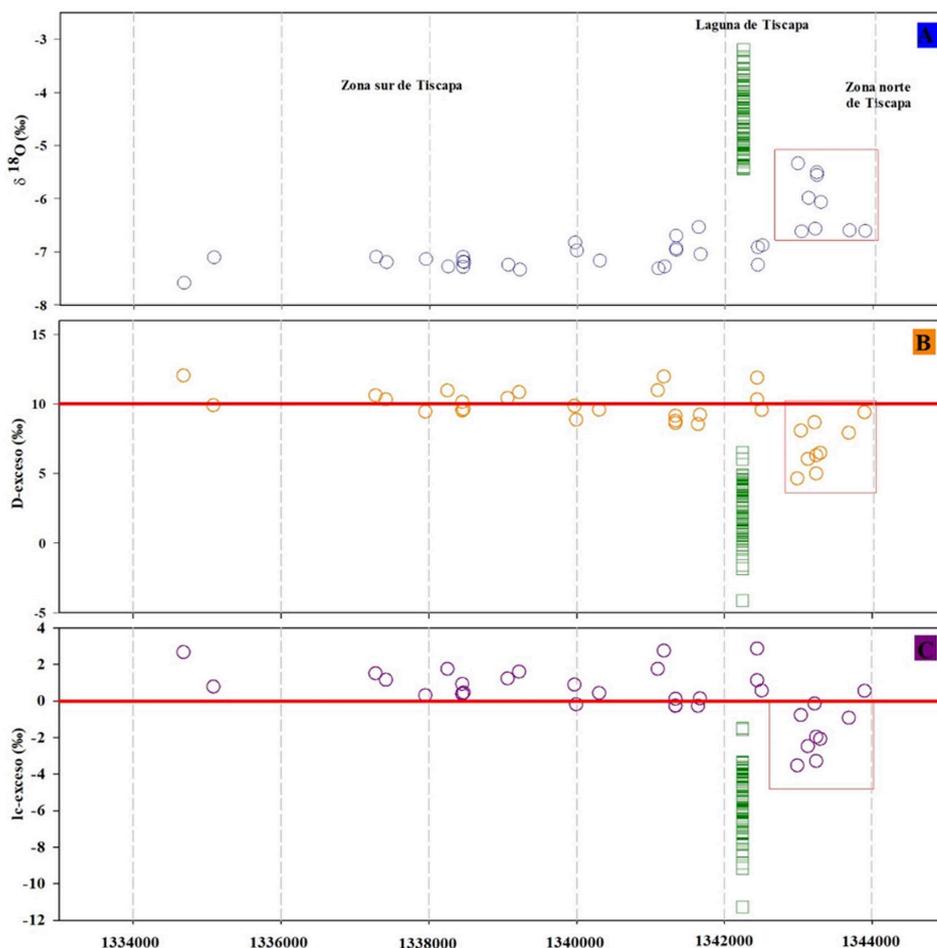
la composición del agua subterránea. Los valores negativos en el agua subterránea es indicio de que han experimentado procesos de evaporación, esto debido a una lenta infiltración como a la evaporación en la zona no saturada (Landwehr y Coplen, 2006).

Figura 3

Ubicación de sitios de monitoreo según ubicación por latitud



Laguna de Tiscapa, pueden indicar un reciclado de humedad por evapotranspiración, también exhibir el agotamiento por efecto orográfico, lo que coincide con las características del área, catalogada como zona de recarga del acuífero...



Nota: Composición isotópica de agua subterránea vs Laguna de Tiscapa por su ubicación en latitud N. A) $\delta^{18}\text{O}$, B) D-exceso, C) Ic-exceso. Fuente: Elaboración propia

En el agua subterránea un 28.56 % de los pozos presentan valores superiores a 10‰ en D-exceso, estos están ubicados al sur de Laguna de Tiscapa (Figura 3, B). El resto de los valores esta entre 0-10‰ y representan el 71.42% de los datos en D-exceso. Estos valores en D-exceso que promediaron 9.93‰, ubicados al sur de Laguna de Tiscapa, pueden indicar un reciclado de humedad por evapotranspiración, también exhibir el agotamiento por efecto orográfico, lo que coincide con las características del área, catalogada como zona de recarga del acuífero (Araguás Araguás et al., 1992), además, coincide con los meses de mayor precipitación donde se presentan valores más agotados, estos son indicios de que hay una relación directa entre las precipitaciones en los periodos más intensos y a recarga directa de los sistemas acuíferos (Moran et al., 2019). Mientras que los ubicados en zonas sur más cercanas a la laguna

indican que han experimentado procesos de evaporación, muy común durante los procesos de infiltración (Batista et al., 2018).

Además, hay que destacar los valores negativos predominantes en las aguas de Lago Xolotlán con media de -6.69% , mientras en Laguna de Tiscapa son positivos pero muy próximo a cero, con una media de 2.3% . Estos valores son típicos de lagos en zonas tropicales, los cuales se rigen por procesos de evaporación que también se pueden explicar por las pendientes en sus líneas de evaporación que se encuentran entre 4-6 (Kebede et al., 2009), para la laguna de Tiscapa y Xolotlán son de 5.4 y 4.0 respectivamente. Otro aspecto, son los valores en el intercepto en el que Tiscapa es -9.1 , mucho menor que Lago Xolotlán, esto es un indicio de conexión de Laguna de Tiscapa con las aguas del acuífero, mientras que los valores más positivos como las de Lago Xolotlán indican aguas de origen poco profundas y bien conectados a sistemas fluviales (Vystavna et al., 2021).

Los valores Ic-exceso en agua subterránea, indican que el 61% de los sitios monitoreados están en el rango superior a cero, estos están distribuidos en zona sur de la Laguna de Tiscapa y en la zona entre lagos. Mientras, el 39% de sitios situados en su mayoría en la zona entre lagos presenta valores inferiores a cero, este comportamiento se asocia a los procesos de evaporación.

La Laguna de Tiscapa en todo el periodo de monitoreo presentó valores negativos, con una fuerte variabilidad tanto estacional como en su columna de agua, en los meses de mayor precipitación (octubre, noviembre) alcanza valores medios de -1.4% , y en los meses de estiaje (marzo) es cuando presenta los valores más negativos rondando los -11% , por lo que promedian los -5.4% . Importante destacar, que existe una diferencia de -2% en Ic-exceso entre las aguas de la superficie y el lecho de la laguna.

El Lago Xolotlán presentó un comportamiento homogéneo en los valores del Ic-exceso, que promedian los -11% , es decir muy negativos, comportamiento que se asocia a procesos de evaporación. Esta característica más la homogeneidad de los valores son propias de lagos con área de captación es muy grande y aguas bien mezcladas (Wu et al., 2020).

De forma general, el comportamiento de los valores Ic-exceso muestra una similitud entre la composición de los pozos ubicados en las zonas cercana a Laguna de Tiscapa y la composición del lecho de la laguna, en cambio, los valores Ic-exceso de las aguas superficiales son más negativos, lo que se asocia a procesos de evaporación, esto por incidencia directa de la luz solar sobre la superficie del agua de la laguna.

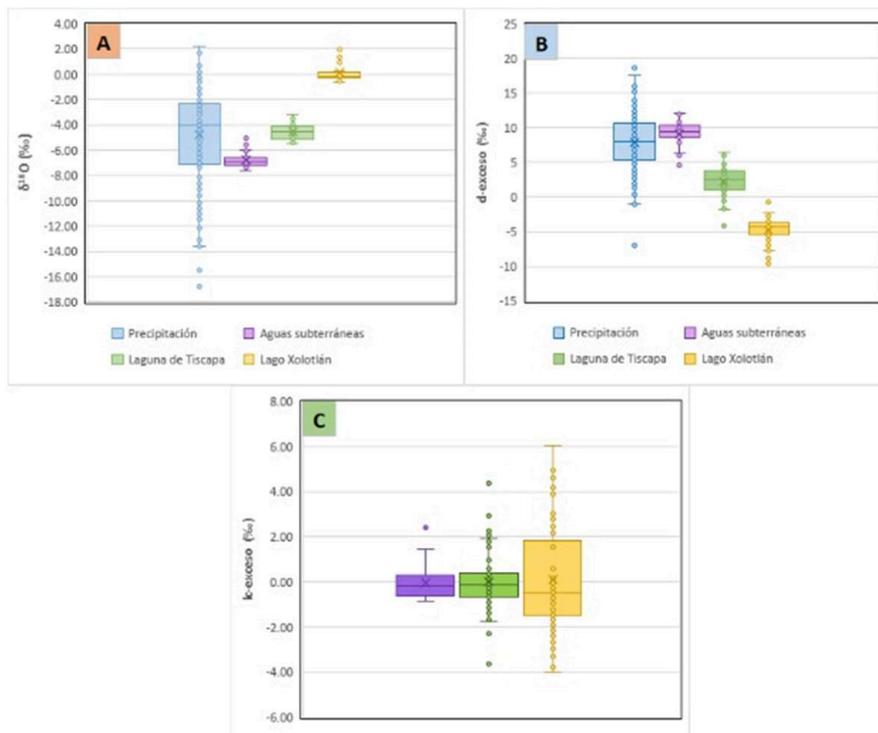
En cuanto a la variación isotópica, en la Figura 4 se observa homogeneidad entre las matrices precipitaciones - acuífero Las Sierras, al presentar valores muy similares, -7.11% $\delta^{18}\text{O}$ (precipitaciones) y -7.20% $\delta^{18}\text{O}$ (aguas subterráneas del acuífero), que corresponden a valores agotados de precipitaciones en invierno, que inciden en la composición de las aguas subterráneas del acuífero Las Sierras, específicamente al sur de Tiscapa. De forma similar, las matrices Laguna de Tiscapa y precipitaciones guardan

”

El comportamiento de los valores Ic-exceso muestra una similitud entre la composición de los pozos ubicados en las zonas cercana a Laguna de Tiscapa...

semejanzas en sus valores promedios de -4.53‰ $\delta^{18}\text{O}$ (Laguna de Tiscapa) y -4.84‰ $\delta^{18}\text{O}$ (precipitaciones), debido a que las precipitaciones presentan valores enriquecidos en verano -0.89‰ $\delta^{18}\text{O}$ y durante la canícula -3.03‰ $\delta^{18}\text{O}$. Mientras tanto, el Lago Xolotlán no tiene relación con las otras matrices de agua, esto debido a que su composición isotópica se presenta más enriquecida, estos se aprecian en Figura 4 A y B.

Figura 4
Diagrama de cajas, variación isotópica



Nota: variación isotópica en las distintas matrices de agua, precipitación, Laguna de Tiscapa, Lago Xolotlán y Agua subterránea. A) $\delta^{18}\text{O}$ ‰, b) d-exceso ‰, y C lc-exceso‰. Las matrices evaluadas son Precipitaciones (A-B), Agua Subterránea, Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán. Fuente: Elaboración propia.

En general, las distintas matrices de agua analizadas presentan diferencias y similitudes en su composición isotópica ($p < 0.05$). Las aguas subterráneas ubicadas en zona sur de Laguna de Tiscapa muestran una diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) en relación con Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán. En cambio, guarda similitud con los valores de las precipitaciones, concretamente en mayo, septiembre y octubre, porque presentan composición isotópica más empobrecida.

Por otra parte, las aguas subterráneas con composición isotópica media de -5.93‰ $\delta^{18}\text{O}$ y Laguna de Tiscapa con -4.53‰ $\delta^{18}\text{O}$ son estadísticamente iguales, lo que sugiere un proceso de mezcla entre las aguas de laguna y las del acuífero en la zona denominado entre lagos. En este sentido, los autores (Barberena-Moncada et al., 2021) plantean que debido a la falla Tiscapa ocurren filtraciones de la laguna hacia el acuífero, mientras que (Araguás Araguás et al., 1992) cree que se debe a que el acuífero es multicapa y que las

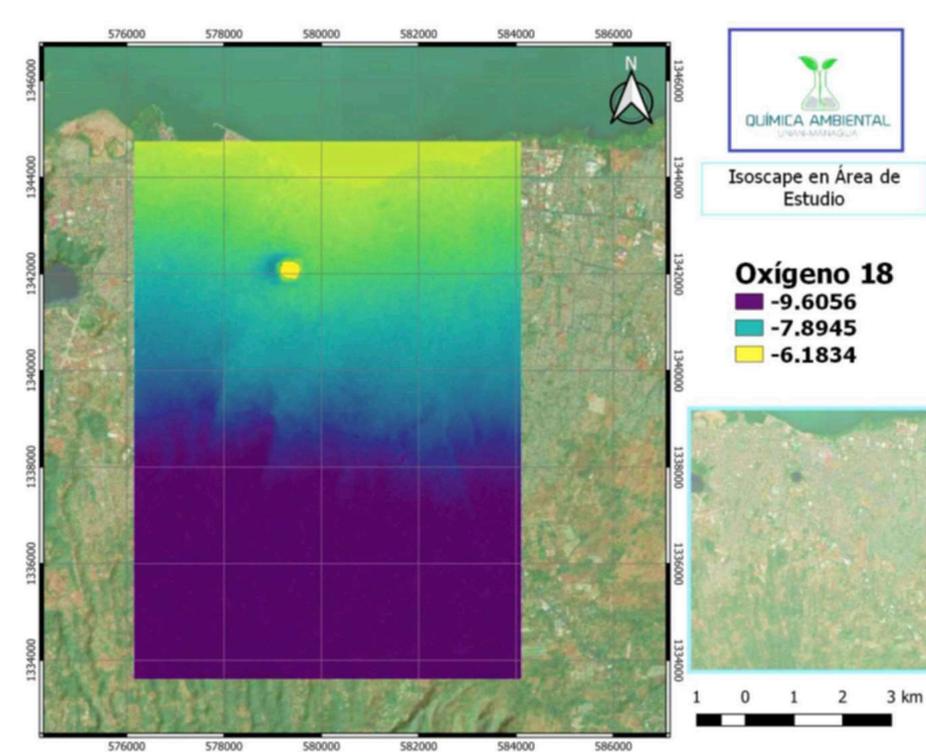
capas superficiales se recargan a bajas alturas.

La composición isotópica del agua subterránea en el área estudiada se representa en la Figura 5, para ello, se utilizaron como frontera los pozos más extremos para delimitar el área y no representar a todo el acuífero Las Sierras. De acuerdo con Isoscape de las aguas subterráneas, al sur de la Laguna de Tiscapa los valores son empobrecidos $-7.11\text{‰ } \delta^{18}\text{O}$, lo que puede estar influenciado por las precipitaciones propias del periodo lluvioso, que presentan valores promedios de $-8.90\text{‰ } \delta^{18}\text{O}$, y que corresponde a la fuente de recarga.

Por otro lado, al norte de Laguna de Tiscapa, en la zona denominada para efectos de esta investigación entre Lagos, existe un enriquecimiento isotópico en las aguas subterráneas con valores promedios de $-5.58\text{‰ } \delta^{18}\text{O}$, lo que puede estar causado por la mezcla con las aguas enriquecidas de la Laguna de Tiscapa, que presentan valores medios de $-4.79\text{‰ } \delta^{18}\text{O}$, este comportamiento se observa en cinco pozos ubicados al norte y noreste, por lo que se deduce que ésta es un área de influencia, en la que se produce una interacción entre las agua de la Laguna de Tiscapa y las aguas del acuífero Las Sierras.

Figura 5

Variación espacial de las aguas subterráneas en el área de estudio



Nota: Elaboración propia



En conclusión, el estudio de los recursos hídricos en la zona ayuda a proporcionar información clave para que los tomadores de decisión puedan hacer una mejor gestión de los recursos y lograr alcanzar su sostenibilidad...

Conclusiones

Utilizar la hidrología isotópica para caracterizar y comprender las interacciones hidrológicas de las matrices de estudio resulta de mucha utilidad. Con ella se destaca la conectividad entre la Laguna de Tiscapa y el acuífero Las Sierras se debe a la influencia de factores meteorológicos y geológicos, fundamental para lograr una mejor comprensión del dinamismo del Acuífero Las Sierras. Además, no se encontró conexión entre las aguas subterráneas y el Lago Xolotlán, lo que podría tener implicaciones importantes para la gestión de recursos hídricos en la zona. En conclusión, el estudio de los recursos hídricos en la zona ayuda a proporcionar información clave para que los tomadores de decisión puedan hacer una mejor gestión de los recursos y lograr alcanzar su sostenibilidad. Con una adecuada promoción del uso racional de la extracción del agua de los pozos ubicados en la zona entre lagos, así como su monitoreo constante de la calidad en los mismos, esto tiene como acción directa la protección de los habitantes que consumen agua de los pozos ubicados en el área de influencia de la laguna, también se fomenta una vinculación directa entre las autoridades y la población, esto es clave para crear conciencia de la importancia de los recursos hídricos.

Agradecimientos

Los autores de la presente investigación agradecen a los Fondos para proyectos de investigación (FPI) 13201804 titulado Origen del agua que recarga la Laguna de Tiscapa mediante la utilización de isótopos ambientales financiado por Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN/Managua), proyecto ejecutado por el maestro Javier Antonio Barberena Moncada. También, especial agradecimiento a la sección de Hidrología Isotópica de Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) por proporcionar base histórica de datos y fuente principal de los resultados, y por último al CIRA/UNAN-MANAGUA que gracias al proyecto Mapa Isotópico de Nicaragua se logró obtener resultados isotópicos de las precipitaciones.

Ética y conflicto de interés

La presente investigación surge de trabajo monográfico para obtener el título de Licenciatura en Química Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN/Managua) elaborado por el autor Jonathan Javier Zeas Vivas. Recurso disponible en: <https://repositorio.unan.edu.ni/19119/1/19119.pdf>

Referencias bibliografía

- Araguás Araguás, L., Louvat, D., López Guzmán, A., y Castillo Hernández, E. (1992). *Estudio de hidrológica isotópica de los acuíferos de Managua*.
- Barberena Moncada, J. A. (2019). Modelamiento del origen de las precipitaciones en la ciudad de Managua mediante simulaciones con HYSPLIT. *Revista Científica Agua y Conocimiento*, 5(15–25), 14.
- Barberena Moncada, J. A., y Hurtado García, I. L. (2019). Proceso de acidificación de las precipitaciones de Managua. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 31, 72–80. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i31.8472>
- Barberena-Moncada, J., Hurtado-García, I., y Sirias-Silva, M. (2021). Aplicación de Isótopos estables e hidroquímica para la comprensión del sistema hidrológico en Laguna de Tiscapa. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 37, 35–53. <https://doi.org/https://doi.org/10.5377/farem.v0i37.11211> 35
- Batista, L. V., Gastmans, D., Sánchez-Murillo, R., Farinha, B. S., dos Santos, S. M. R., y Kiang, C. H. (2018). Groundwater and surface water connectivity within the recharge area of Guarani aquifer system during El Niño 2014–2016. *Hydrological Processes*, 32(16), 2483–2495. <https://doi.org/10.1002/hyp.13211>
- Brauman, K. A. (2015). Hydrologic ecosystem services: linking ecohydrologic processes to human well-being in water research and watershed management. *WIREs Water*, 2, 345–358. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1081>
- Clark, I., y Fritz, P. (2003). Chapter 2: Tracing the hydrological cycle. In *Environmental isotopes in hydrology* (Vol. 43, Issue 5, pp. 35–74). <https://doi.org/10.1029/99eo00169>
- Craig, H. (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133(3465), 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16(4), 436–468. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>
- Esquivel-Hernández, G., Sánchez-Murillo, R., Quesada-Román, A., Mosquera, G. M., Birkel, C., y Boll, J. (2018). Insight into the stable isotopic composition of glacial lakes in a tropical alpine ecosystem: Chirripó, Costa Rica. *Hydrological Processes*, 32(24), 3588–3603. <https://doi.org/10.1002/hyp.13286>
- Freundt, A., Hartmann, A., Kutterolf, S., y Strauch, W. (2010). Volcaniclastic stratigraphy of the Tiscapa maar crater walls (Managua, Nicaragua): Implications for volcanic and seismic hazards and Holocene climate changes. *International Journal of Earth Sciences*, 99(6), 1453–1470. <https://doi.org/10.1007/s00531-009-0469-6>

- Kebede, S., Travi, Y., y Rozanski, K. (2009). The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ enrichment of Ethiopian lakes. *Journal of Hydrology*, 365(3–4), 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.027>
- Kokusai kogyo Co. Ltd. (1993). *Estudio sobre el proyecto de Abastecimiento de Agua en Managua*. Informe principal. In JICA.
- Landwehr, J. M., y Coplen, T. B. (2006). *Line-conditioned excess: a new method for characterizing stable hydrogen and oxygen isotope ratios in hydrologic systems*. International Conference on Isotopes in Environmental Studies, 132–135.
- Lewandowski, J., Meinikmann, K., y Krause, S. (2020). Groundwater-Surface Water Interactions: Recent Advances and Interdisciplinary Challenges. *Water*, 12(296), 1–7. <https://doi.org/10.3390/w12010296>
- Mook, W. G. (2001). *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications* (IAEA, Vol. 1). UNESCO-IAEA.
- Morán, B. J., Boutt, D. F., y Munk, L. A. (2019). Stable and Radioisotope Systematics Reveal Fossil Water as Fundamental Characteristic of Arid Orogenic-Scale Groundwater Systems. *Water Resources Research*, 55(12), 11295–11315. <https://doi.org/10.1029/2019WR026386>
- Plata Bedmar, A., Araguás Araguás, L., Juan Avilés García, J., y Peña Martínez, R. (2001). Relación entre el Lago de Managua (Nicaragua) y las aguas subterráneas de su entorno. *Ingeniería Civil*, 121, 127–138.
- Rozanki, K., Castillo, E., Flores, Y., Urbina, A., Castro, M., y Dávila, R. (2001). *Balance isotópico e hidrogeológico del Lago Xolotlan*. Informe Principal.
- Safeeq, M., y Fares, A. (2016). *Emerging Issues in Groundwater Resources*. In *Emerging Issues in Groundwater Resources* (A. Fares, pp. 289–326). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32008-3>
- Sánchez-Murillo, R., Birkel, C., Welsh, K., Esquivel-Hernández, G., Corrales-Salazar, J., Boll, J., Brooks, E., Rouspard, O., Sáenz-Rosales, O., Katchan, I., Arce-Mesén, R., Soulsby, C., y Araguás-Araguás, L. J. (2016). Key drivers controlling stable isotope variations in daily precipitation of Costa Rica: Caribbean Sea versus Eastern Pacific Ocean moisture sources. *Quaternary Science Reviews*, 131(September 2015), 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.08.028>
- Sánchez-Murillo, R., Esquivel-Hernández, G., Corrales-Salazar, J. L., Castro-Chacón, L., Durán-Quesada, A. M., Guerrero-Hernández, M., Delgado, V., Barberena, J., Montenegro-Rayó, K., Calderón, H., Chevez, C., Peña-Paz, T., García-Santos, S., Ortiz-Roque, P., Alvarado-Callejas, Y., Benegas, L., Hernández-Antonio, A., Matamoros-Ortega, M., Ortega, L., y Terzer-Wassmuth, S. (2020). Tracer hydrology of the data-scarce and heterogeneous Central American Isthmus. *Hydrological Processes*, 34(11), 2660–2675. <https://doi.org/10.1002/hyp.13758>

- Terzer, S., Wassenaar, L. I., Araguás-Araguás, L. J., y Aggarwal, P. K. (2013). Global isoscapes for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in precipitation: Improved prediction using regionalized climatic regression models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11), 4713–4728. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4713-2013>
- Timsic, S., y Patterson, W. P. (2014). Spatial variability in stable isotope values of surface waters of Eastern Canada and New England. *Journal of Hydrology*, 511, 594–604. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.017>
- Vystavna, Y., Harjung, A., Monteiro, L. R., Matiatos, I., y Wassenaar, L. I. (2021). Stable isotopes in global lakes integrate catchment and climatic controls on evaporation. *Nature Communications*, 12(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27569-x>
- Wu, H., Huang, Q., Fu, C., Song, F., Liu, J., y Li, J. (2020). Stable isotope signatures of river and lake water from Poyang Lake, China: Implications for river–lake interactions. *Journal of Hydrology*, 125619, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125619>