

## Aplicación de Isótopos estables e hidroquímica para la comprensión del sistema hidrológico en Laguna de Tiscapa, Managua, Nicaragua

### Application of stable isotopes and hydrochemistry for the understanding of the hydrological system in Laguna de Tiscapa, Managua, Nicaragua

Barberena-Moncada, Javier; Hurtado-García, Iris; Sirias-Silva, Marlon

 Javier Barberena-Moncada

Javier.barberena@cira.unan.edu.ni

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua –  
Managua, Nicaragua

 Iris Hurtado-García

iris.hurtado@unan.edu.ni

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua –  
Managua, Nicaragua

Marlon Sirias-Silva

Msirias23@gmail.com

Autoridad Nacional del Agua, Nicaragua

#### Revista Científica de FAREM-Esteli

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua,  
Nicaragua

ISSN-e: 2305-5790

Periodicidad: Trimestral

núm. 37, 2021

[revista.faremesteli@gmail.com](mailto:revista.faremesteli@gmail.com)

Recepción: 03 Diciembre 2020

Aprobación: 03 Marzo 2021

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/337/3372050003/>

Autor de correspondencia: [Javier.barberena@cira.unan.edu.ni](mailto:Javier.barberena@cira.unan.edu.ni)



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

**Resumen:** Isótopos estables (Deuterio y Oxígeno 18) e hidroquímica fueron utilizados como trazadores para determinar el origen del agua en el cráter de la Laguna de Tiscapa y sus interacciones con el agua subterránea y Lago Xolotlán, para esto se utilizaron 253 resultados de isótopos estables y 56 resultados hidroquímicos de las fuentes: precipitación, agua subterránea, Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán. Los isótopos estables indican que Laguna de Tiscapa es recargada en zona oeste por agua subterránea donde hay una composición media de -7‰ en  $\delta^{18}\text{O}$ , los procesos de evaporación en laguna hacen que tenga una composición media de -5.4‰ en  $\delta^{18}\text{O}$ , reflejando este aporte de Laguna de Tiscapa zona noreste del agua subterránea con enriquecimiento de -6‰ en  $\delta^{18}\text{O}$ . La composición hidroquímica en Laguna de Tiscapa tiene común relación con el agua subterránea donde rigen los procesos de disolución de material geológico y no el meteórico, esta disolución hace predominen los iones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ . Los procesos de disolución se dan principalmente por la presencia de silicatos seguidos de calcitas, que es característico de la composición del acuífero Las Sierras. Se puede descartar aporte de agua del Lago Xolotlán a Laguna de Tiscapa, puesto que este presenta una composición isotópica altamente enriquecido, a lo que se suma los procesos de salinización que experimenta este cuerpo de agua.

**Palabras clave:** Fallas, hidroquímica, enriquecimiento isotópico, empobrecimiento isotópico, disolución.

**Abstract:** Stable isotopes (Deuterium and Oxygen 18) and hydrochemistry were used as tracers to determine the origin of the water in the crater of Laguna de Tiscapa and its interactions with groundwater and Lake Xolotlán. For this purpose, 253 stable isotope results and 56 hydrochemical results from the sources: precipitation, groundwater, Laguna de Tiscapa, and Lake Xolotlán were used. The stable isotopes indicate that Laguna de Tiscapa is recharged in a western zone by groundwater where there is an average composition of -7‰ in  $\delta^{18}\text{O}$ , the evaporation processes in the lagoon make it have an average

composition of  $-5.4\%$  in  $\delta^{18}\text{O}$ , reflecting this contribution from Laguna de Tiscapa northeast zone of groundwater with enrichment of  $-6\%$  in  $\delta^{18}\text{O}$ . The hydrochemical composition in Laguna de Tiscapa has common relation with groundwater where the dissolution processes of geological material and not the meteoric one rule, this dissolution makes  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  ions predominate. The dissolution processes are mainly due to the presence of silicates followed by calcites, which is characteristic of the composition of the Las Sierras aquifer. The contribution of water from Lake Xolotán to Laguna de Tiscapa can be excluded, since it has a highly enriched isotopic composition, in addition to the salinization processes experienced by this body of water.

**Keywords:** Faults, hydrochemistry, isotopic, isotopic enrichment, isotopic impoverishment, dissolution.

## INTRODUCCIÓN

Los lagos forman parte de las aguas superficiales continentales e integran ciclo global del agua, por lo tanto, están influenciados por la precipitación, la evaporación y los flujos de agua subterráneas o superficiales (Burkert, Ginzler, Babenzien, & Koschel, 2004). Estos cuerpos de agua se comportan como complejos sistemas dinámicos que interactúan con el ambiente local (Rozanski, et al., 2001), características que despertaron el interés por el estudio de las posibles interacciones de los lagos con su entorno.

La ciudad de Managua tiene un alto potencial de recursos hídricos, tanto superficial como subterráneo, particularidades que la dotan de cinco cuerpos lentos; Lago Xolotlán, Lagunas de Asososca, Nejapa, Tiscapa y Acahualinca. Las lagunas ocupan el fondo de antiguos cráteres volcánicos formados por explosión y hundimiento hace aproximadamente 5 mil años, también posee el acuífero de Managua, el cual se distingue por su productividad, y conjuntamente con la Laguna de Asososca conforman la fuente de abastecimiento de agua potable a la población de Managua (IANAS, 2015). Por otra parte, es notorio que la red de drenaje superficial ubicada en la parte oeste del Lago Xolotlán es de característica estacional, presentando caudales pequeños solo en período lluvioso (JICA, 1993).

La Laguna de Tiscapa, una de las más importantes de la ciudad, por su tamaño, características naturales y valor paisajístico, fue considerada como una opción para abastecer de agua a la población de Managua en los años treinta del siglo pasado; sin embargo, después de hacer algunas proyecciones sobre el suministro de agua a largo plazo se concluyó que la laguna no tenía la capacidad.

Posteriormente, en la década de los 80 del mismo siglo, las autoridades municipales ordenaron verter las aguas que bajaban de la cuenca sur de Managua a la laguna de Tiscapa, para resolver el problema de las inundaciones que afectaba al barrio Jonathan González, esta decisión no resolvió de forma integral el problema, por el contrario, ocasionó mayores consecuencias, alterando las condiciones de la laguna y afectando el entorno ambiental, social, económico, cultural, turístico, escénico de la laguna (Mejía Lacayo, 2018).

Este hecho, ha demandado desviar el cauce para proteger la laguna, sin embargo, han surgido detractores de esta demanda, quienes plantean que se afectaría la lámina de agua de la laguna. Con el objeto de determinar

---

## NOTAS DE AUTOR

Javier.barberena@cira.unan.edu.ni

cuál es la verdadera fuente de recarga de Laguna de Tiscapa se analizó las propiedades geoquímicas del agua subterránea, que dependen de la química del agua en el área de recarga, así como de los diferentes procesos geoquímicos que se producen en el subsuelo y en las rocas, los cuales son responsables de las variaciones estacionales y espaciales en la química del agua subterránea (Kumar, Ramanathan, Rao, & Kumar, 2006). También se recurrió al comportamiento de isótopos ambientales, como trazadores en el comportamiento del flujo subterráneo, considerando que el uso de isótopos estables toma gran importancia en su capacidad inequívoca de distinguir agua de entrada y salida en dependencia del gradiente (Turner & Townley, 2006), técnica que es habitualmente utilizada en hidrogeología para identificar zonas de recarga y en la determinación de origen de agua (Araguás Araguás, Louvat, López Guzmán, & Castillo Hernández, 1992).

El presente estudio proporciona una comprensión integral del sistema de flujo superficial y subterráneo de agua en el área de estudio, abordando el posible intercambio de agua subterránea en la Laguna de Tiscapa. De modo que, los resultados de esta investigación ayudarán a proporcionar información de referencia sobre el sistema hidrológico de Laguna de Tiscapa, como herramienta de evaluación que permita una gestión eficaz, y una mejor comprensión de las interacciones de Laguna de Tiscapa con las fuentes de agua circundantes que permitan la supervivencia de la Laguna.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La Laguna de Tiscapa está ubicada en centro de Managua, específicamente las coordenadas 12°08'23''N y 86°16'15''W (Figura 1.A), su diámetro oscila entre 550–650 m. El fondo del cráter está lleno por un lago de hasta 45,6 m de profundidad, respecto a una elevación de 51,6 m.s.n.m., y hasta 28 m debajo de la superficie previa a la toba (Freundt, Hartmann, Kutterolf, & Strauch, 2009). Formado por erupción hace 3 mil años, la cual excavó un cráter en las profundidades del sótano, exponiendo una sucesión volcánicla del Pleistoceno al Holoceno, divididas en cuatro formaciones.

La primera formación corresponde a basáltica-andesítica de mayor profundidad, que comprende ignimbritas máficas y tefras freatomagmáticas derivadas del complejo volcánico Las Sierras al sur de Managua. La segunda formación contiene tefra Fontana basáltica-andesítica que brotó de la Caldera Las Nubes del complejo Las Sierras, la tefra Superior Apoyo, desde la Caldera Apoyo y la Baja y tefras Apoyeque superior desde el complejo volcánico Chiltepe.

Una tercera formación está asociada a depósitos fluviales, contienen de abajo hacia arriba, escorias de la basálticas de tefra de San Antonio, piedra pómez lapilli de las tefras de Apoyo y Apoyeque y la tefra de Xiloa, y escorias derivadas de la tefra de Fontana. La cuarta formación corresponde a toba volcánica de Tiscapa compuesta de depósitos piroclásticos de aumento y caída (Freundt, Hartmann, Kutterolf, & Strauch, 2009).

Por otra parte, el cráter es atravesado por falla de tendencia NNE – SSW y tres fallas adyacentes paralelas, todas exhibieron desplazamiento normal lateral izquierdo y menor durante el terremoto M 6.2 del 23 de diciembre de 1972. Con Los movimientos horizontales agregados que oscilaron en el rango de 2 a 38 cm, hasta el ESE (Brown, Ward, & Plafker, 1973; Cowan, Prentice, Pantosti, de Martini, & Strauch, 2002; Ward, Gibbs, Harlow, & Aburto, 1974). El cráter presenta una topografía donde la falla en el lado noreste del cráter está marcado por un escarpe al sureste de más de 15 m de altura en el borde del cráter y por desviaciones a la orilla del lago de unos 50 m en sentido siniestro en el noreste y 30 m en sentido dextral en el suroeste. Tanto el escarpe del borde como las orillas del lago parecen ser el resultado de una caída descendente relativa de la parte del cráter del sur, que es esencialmente un cono inversor cuyas paredes se inclinan hacia adentro de 50

° a 60° (Brown, Ward, & Plafker, 1973). Esta falla presenta extensión de aproximadamente de 15 km y una profundidad de 8-10 km (Ward, Gibbs, Harlow, & Aburto, 1974).

En el contexto hidrogeológico, Laguna de Tiscapa pertenece a la unidad denominada Grupo Las Sierras, compuesto por flujos de piroclastos como cenizas finas, pómez y lapilli, aglomerados basáltico-andesítico compacto, toba brechosa, toba, con granulometría media a gruesa (Araguás Araguás, Louvat, López Guzmán, & Castillo Hernández, 1992; Rozanski, Froehlich, & Mook, 2002; JICA, 1993).

El nivel del agua subterránea (Figura 1.B) varía desde los 112 (m.s.n.m) ubicado en la zona oeste de Laguna hasta los -22 (metros bajo nivel del mar) en zona norte de Laguna, con gradiente hidráulico de 5.5 y dirección de flujo es O-NE desde Las Nubes hacia el Lago Xolotlán. Es importante subrayar, que en el sector de Managua se producen diversos conos de abatimiento producto de la cantidad de pozos que abastecen de agua a la ciudad de Managua, los cuales se encuentran ubicados en las zonas oeste y norte de la Laguna, los niveles de agua subterránea de los pozos del sector oeste oscilan en cota 42-47 m.s.n.m, en cuanto a los pozos ubicados en zona norte, presentan niveles que oscilan en cota 33-37 m.s.n.m.

Por otra parte, el nivel de agua en laguna durante el estudio fue de 50 m.s.n.m. y el Lago Xolotlán de 40 m.s.n.m., esto indica que el nivel de agua de laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán se encuentra por encima del nivel de agua subterránea.

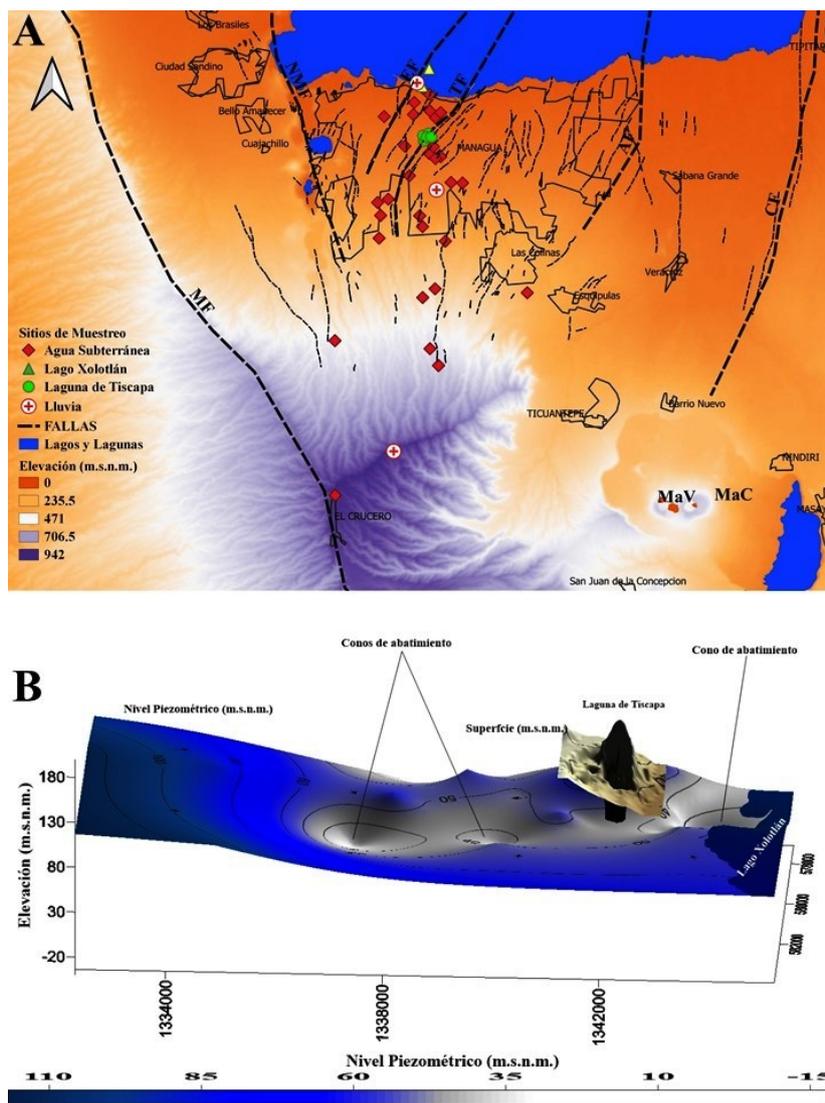


FIGURA 1.

A) Ubicación del área de estudio y sitios de monitoreo de isótopos e hidroquímicos. B) Nivel piezométrico y representación del cráter de Tiscapa.

Propia

## Isótopos estables

Se realizaron análisis de los isótopos estables  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  de las matrices; precipitaciones (N=129), agua subterránea (N=40), Lagos (N=84), todas colectadas en período 2018-2019.

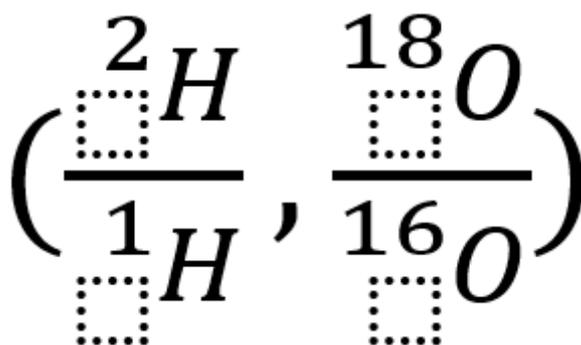
El monitoreo de precipitaciones se realizó mediante 3 tres estaciones equipadas con muestreadores Palmex Rain Sampler RS1, descritas a continuación; estación ubicada en CIRA/UNAN-Managua (155 m.s.n.m.), en la que se monitoreaban eventos diarios de 2018 – 2019; las otras dos estaciones se ubicaron en los sitios El Crucero (EC) a 941 m.s.n.m. y Puerto Salvador Allende (PSA) a 48 m.s.n.m., a través de las cuales se captaron muestras compuestas mensuales, en el periodo agosto 2018 - diciembre 2019. El monitoreo de agua superficial, se efectuó en Laguna de Tiscapa (N=71), a dos profundidades en la columna (superficie y lecho de laguna). También, se analizó agua del Lagos Xolotlán (N=13).

El muestreo de agua en la superficie se realizó de forma directa, y para las muestras tomadas en zona más profundas se empleó botella Van Dorn. Las muestras captadas, fueron identificadas y filtradas con bomba manual de vacío Mityvac y filtros Whatman de 47 mm para su almacenamiento. Las Agua subterránea (N=40) se monitorearon en todos los pozos los sitios próximos a Laguna de Tiscapa, para ello, antes de la recolección colecta de la muestra, se efectuó una purga en todos los pozos durante 10 minutos, para limpiar el sistema de tuberías de evitar posibles estancamientos de agua. Todas las muestras fueron almacenadas en envases de polietileno de alta densidad.

Los análisis se realizaron en Espectroscopio Láser LWIA-45-EP (Los Gatos Research). Los resultados son expresados en  $\delta$ , definido como:

$$\delta = \frac{R_s - R_p}{R_p} \times 1000 \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde:  $\delta$ : desviación isotópica en ‰, s: muestra, p: referencia internacional, R: relación isotópica.



[Ecuación 2]

La referencia utilizada fue Vienna Standar Mean Ocean Water (V-SMOW) (Gonfiantini, 1978).

## Hidroquímica

El componente hidroquímico se realizado mediante la interpretación de 56 muestras, resultados proporcionadas por la Unidad de Gestión Ambiental de Alcaldía de Managua (ALMA) y Sección de Calidad de Agua de Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL). Las matrices utilizadas fueron; agua subterránea (N=32), Laguna de Tiscapa (N=20) y precipitaciones (N=4) en los sitios El Crucero (EC) a 941 m.s.n.m. y Puerto Salvador Allende (PSA) a 48 m.s.n.m., Las Colinas (LC) a 261 m.s.n.m. y Aeropuerto Internacional Augusto C. Sandino (AIACS) a 64 m.s.n.m.. Los análisis de cationes y aniones proporcionados por ALMA fueron realizados en laboratorios de CIRA/UNAN-Managua, a través de las metodologías descritas en American Public Health Association y apegado al sistema de gestión de calidad de la Norma ISO/IEC 17025:2015.

Con el propósito de identificar los parámetros comunes que influyen en la composición química de las aguas, se aplicó análisis de coeficiente de correlación y análisis de componentes principales (PCA), a través del diagrama de Piper se indagó las características hidrogeoquímicas de las aguas. Asimismo, se efectuó un análisis de comparación de salinidad (TDS) y las relaciones de iones principales ( $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) que debido a su carácter conservativos se comportan como trazadores de circulación, lo que permite analizar la

influencia de las precipitaciones, interacción agua-roca y evolución geoquímica, según análisis propuesto por Gibbs (Gibbs, 1970).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Composición de Isótopos estables

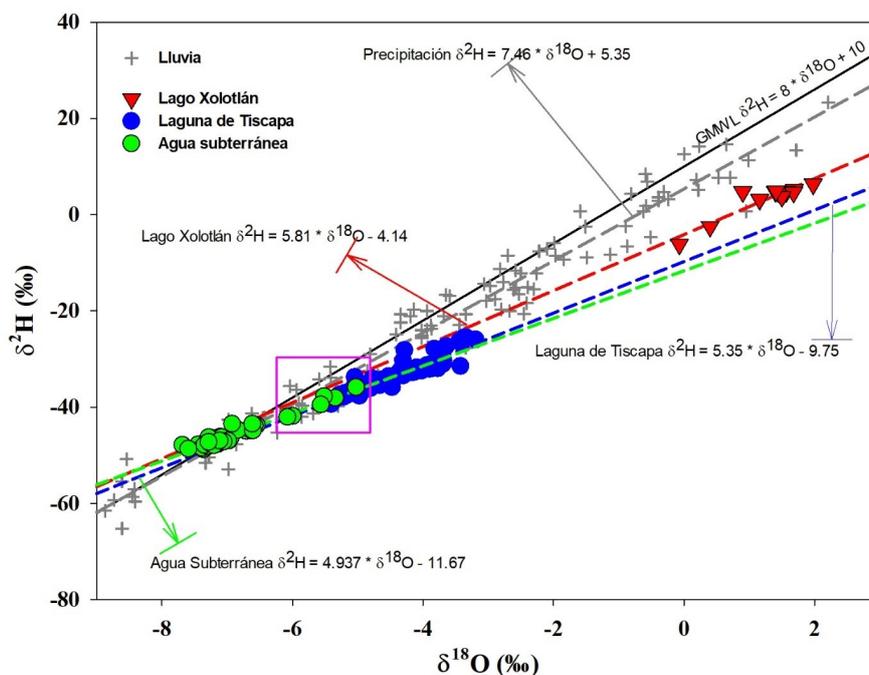


FIGURA 2

Diagrama  $\delta^2H$  vs  $\delta^{18}O$  de distintas fuentes de agua. Líneas meteóricas gris, roja, azul y verde corresponden a las diferentes fuentes de agua, línea meteórica global en color negro. Cuadro color morado presenta enriquecimiento de agua subterránea por aportes de agua de Laguna de Tiscapa.

Propia

Los resultados de la composición isotópica se ilustran en Figura 2. La grafica de isotopos estables  $\delta^2H$  vs  $\delta^{18}O$  muestra correlaciones lineales correspondientes a Laguna de Tiscapa, agua subterránea, Lago Xolotlán y precipitación, junto a línea meteórica de agua mundial (GMWL por sus siglas en ingles). En el gráfico se observa alta variabilidad isotópica, donde se pueden distinguir tres agrupamientos o distinta composición isotópica en las fuentes de agua.

Un primer grupo que presenta los valores isotópicos más empobrecidos corresponde al agua subterránea, con máximos  $\delta^2H = -35.90$  (‰),  $\delta^{18}O = -5.02$  (‰) y mínimos  $\delta^2H = -48.80$  (‰),  $\delta^{18}O = -7.68$  (‰) y medios  $\delta^2H = -46.14$  (‰),  $\delta^{18}O = -6.96$  (‰), la línea calculada corresponde a la ecuación  $\delta^2H = 4.93 * \delta^{18}O - 11.67$ ,  $R=0.974$ ,  $N=40$ ,  $p < 0.001$ , el segundo grupo con valores isotópicos más enriquecidos en comparación que el agua subterránea, son las aguas de Laguna de Tiscapa, estas presentan valores medios  $\delta^2H = -34.05$  (‰),  $\delta^{18}O = -4.575$  (‰), con máximos  $\delta^2H = -25.60$  (‰),  $\delta^{18}O = -3.19$  (‰) y mínimos  $\delta^2H = -34.05$  (‰),  $\delta^{18}O = -5.44$  (‰), con líneas de agua que corresponde a la ecuación  $\delta^2H = 5.35 * \delta^{18}O - 9.75$ ,  $R=0.939$ ,  $N=76$ ,  $p < 0.001$ , y los valores más enriquecidos corresponden a las aguas de Lago Xolotlán con valores medio de  $\delta^2H = 3.29$  (‰),  $\delta^{18}O = 1.21$  (‰), máximo de  $\delta^2H = 6.30$  (‰),  $\delta^{18}O = 1.98$  (‰) y mínimos de  $\delta^2H = -6.20$

(‰),  $\delta^{18}\text{O} = -0.07$  (‰), con línea de evaporación que corresponde a la ecuación  $\delta^2\text{H} = 5.87 * \delta^{18}\text{O} - 4.14$ ,  $R=0.927$ ,  $N=13$ ,  $p < 0.001$ . Las precipitaciones variaron según la estacionalidad entre periodo lluvioso y seco, así como entre estaciones de monitoreo. La línea de agua meteórica calculada fue  $\delta^2\text{H} = 7.46 * \delta^{18}\text{O} + 5.33$ ,  $R=0.992$ ,  $N=129$ ,  $p < 0.001$ .

La composición isotópica de todas las fuentes de agua se ubica por debajo de la línea meteórica global GMWL (Craig, 1961), lo cual se asocia a procesos de evaporación. El comportamiento isotópico en Laguna de Tiscapa varía entre período, los valores más agotados se obtuvieron en el mes de octubre, producto del aporte de escorrentía que recibe la laguna a través del cauce pluvial artificial, debido a que este mes presenta mayor intensidad de las precipitaciones.

En la columna de agua se produce diferencia de  $-1\%$   $\delta^{18}\text{O}$  entre las muestras superficiales y en el lecho de Laguna de Tiscapa. Existe diferencia isotópica entre las aguas de Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán de  $-3.32\%$  en  $\delta^{18}\text{O}$ , aunque se encuentran adyacente a la cota de elevación. El Lago Xolotlán se presenta isotópicamente más enriquecido, lo cual es fundamentado por Araguás (Araguás Araguás, Louvat, López Guzmán, & Castillo Hernández, 1992) que cataloga al Lago Xolotlán como lago terminal, donde su recarga lo atribuye a precipitación, mientras que Rozanski (Rozanski, Froehlich, & Mook, 2002) cree que el aporte de agua subterránea es mínimo y atribuye a las capas de arcilla en el lecho del lago como una barrera impermeable, que evita la conexión con el agua subterránea, lo que permite descartar la influencia del Lago Xolotlán sobre Laguna de Tiscapa.

Por otra parte, la composición isotópica en Tiscapa se encuentra más cerca a la composición del agua subterránea (medio  $-6.88\%$  en  $\delta^{18}\text{O}$ ). En Figura 2, se indica la existencia de pozos con una composición isotópicamente más enriquecidos, estos se ubican en zona entre Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán, lo cual se puede atribuir a que la extracción de agua en los pozos han provocado conos de abatimiento, en la Figura 1.B, se puede observar que los puntos muestreados próximos a laguna en zona oeste presenta composición media de  $-6.7\%$  en  $\delta^{18}\text{O}$  y los ubicados en zona noreste composición media de  $-5.6\%$  en  $\delta^{18}\text{O}$ , lo que sugiere una probable interacción de Laguna de Tiscapa con el agua subterránea, ocasionando que el agua subterránea se esté enriqueciendo isotópicamente hasta  $-1.1\%$  en  $\delta^{18}\text{O}$ , de forma similar Sánchez (Sánchez-Murillo, et al., 2020) ha reportado que la alta conectividad entre lagos y agua subterránea en Nicaragua, producen enriquecimiento del agua subterránea aproximadamente en  $-1.74\%$  en  $\delta^{18}\text{O}$ .

La interacción entre Laguna de Tiscapa y agua subterránea se puede asociar a los factores geológicos propios de las zonas, de ellos, la falla local denominada Falla de Tiscapa que atraviesa la laguna y también el por el fracturamiento que se dan en las paredes del cono (Araguás Araguás, Louvat, López Guzmán, & Castillo Hernández, 1992; Brown, Ward, & Plafker, 1973; Cowan, et al., 2002; Rozanski, et al., 2001), haciendo posible tanto la recarga como la descarga de la laguna, esta hipótesis se ha comprobado en otros estudios donde la conexión agua subterránea y volcanes se produce por fallas y discontinuidades geológicas (Finizola, Sortino, Lénat, & Valenza, 2002; Mauri, Williams-Jones, Saracco, & Zurek, 2012), como interacciones agua subterránea y gases geotermales en el sector del Volcán Masaya, Nicaragua, siendo la falla de Cofradía la responsable de estas interacciones (Mauri, Williams-Jones, Saracco, & Zurek, 2012).

## Composición Hidroquímica

La composición hidroquímica de las agua subterránea, Laguna de Tiscapa y precipitación se determinó a partir de los iones principales que se ilustran en Tabla 1 y el diagrama triangular Piper (Piper, 1944), la composición obtenidas son representadas en la Figura 3. En el cual se observa que el agua subterránea y Laguna de Tiscapa presentan en su contenido un predominio del anión  $\text{HCO}_3^-$ , a diferencia de las precipitaciones, que mostró variación en contenido de aniones, de aquí que, el ion  $\text{Cl}^-$  predominó en AIACS y LC, en PSA dominó y en LN predominó.

En cuanto al contenido de cationes presentan una mayor variabilidad en agua subterránea, laguna y precipitaciones, predominando .

**TABLA 1**  
*Principales iones, parámetros fisicoquímicos y composición isotópica en las distintas matrices de agua. Máx: Máximo, Mín: Mínimo, Med: Medio y DS: Desviación Estándar*

Parámetro	Agua Subterránea				Laguna de Tiscapa				Lluvia			
	Máx	Mín	Med	DS	Máx	Mín	Med	DS	Máx	Mín	Med	DS
CE (uS/cm)	766.0	269.0	448.4	111.0	285.0	225.0	249.0	18.9	31.0	20.0	26.7	4.7
pH	9.6	7.0	8.0	0.4	9.5	7.0	8.3	0.8	3.9	3.6	3.7	0.1
TSD (mg/L)	544.9	177.2	264.8	84.0	228.0	135.4	159.6	27.4	7.7	4.6	5.9	1.3
(mg/L)	297.7	113.3	172.2	43.8	136.6	61.0	96.8	28.1	2.4	0.7	1.2	0.8
(mg/L)	50.9	11.0	27.4	10.3	10.7	1.0	5.8	2.6	1.5	1.0	1.3	0.2
(mg/L)	67.2	12.3	25.4	12.4	22.7	11.8	15.4	2.8	2.0	1.0	1.6	0.4
(mg/L)	63.8	0.0	15.2	15.1	0.2	0.2	0.2	0.0	0.2	0.2	0.2	0.0
(mg/L)	102.0	11.3	51.0	22.7	28.8	18.0	23.5	3.7	0.3	0.1	0.2	0.1
(mg/L)	17.3	7.8	11.9	2.5	10.0	8.1	9.0	0.7	0.3	0.1	0.2	0.0
(mg/L)	48.4	11.0	26.2	7.5	20.2	13.0	16.6	2.3	1.5	0.7	1.2	0.3
(mg/L)	23.5	2.6	9.3	3.6	5.7	0.09	4.0	1.1	1.4	0.1	0.6	0.5
(mg/L)	0.03	0.01	0.01	0.00	6.02	0.01	2.26	2.33	0.20	0.04	0.10	0.07
δ2H (‰)	-35.9	-48.8	-46.1	2.8	26.5	-39.4	-32.8	8.47	13.4	-115.3	-36.4	35.0
δ18O (‰)	-5.0	-7.6	-6.9	0.5	-4.5	-3.1	-5.4	0.8	1.7	-16.7	-5.6	4.7

De forma global, el carácter hidroquímico predominante en estas aguas, responde a la siguiente proporción HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Na<sup>+</sup>-Ca<sup>+2</sup> (42.9%), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> Na<sup>+</sup> (26.8%), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-C<sup>+2</sup>-Na<sup>+</sup> (19.6%), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Mg<sup>+2</sup> (3.6%), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>+2</sup> (3.6%) y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>+2</sup>-Mg<sup>+2</sup> (3.6%). El predominio del ión Bicarbonato se relaciona a evolución geoquímica determinada por los procesos de infiltración, iniciando el ciclo en las características en las precipitaciones de la zona, donde los iones SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>+2</sup>, y pH bajos (promediaron 3.77 Unidades de pH), son típicos de contaminación antropogénica que se da en la ciudad de Managua (Barberena Moncada & Hurtado García, 2019).

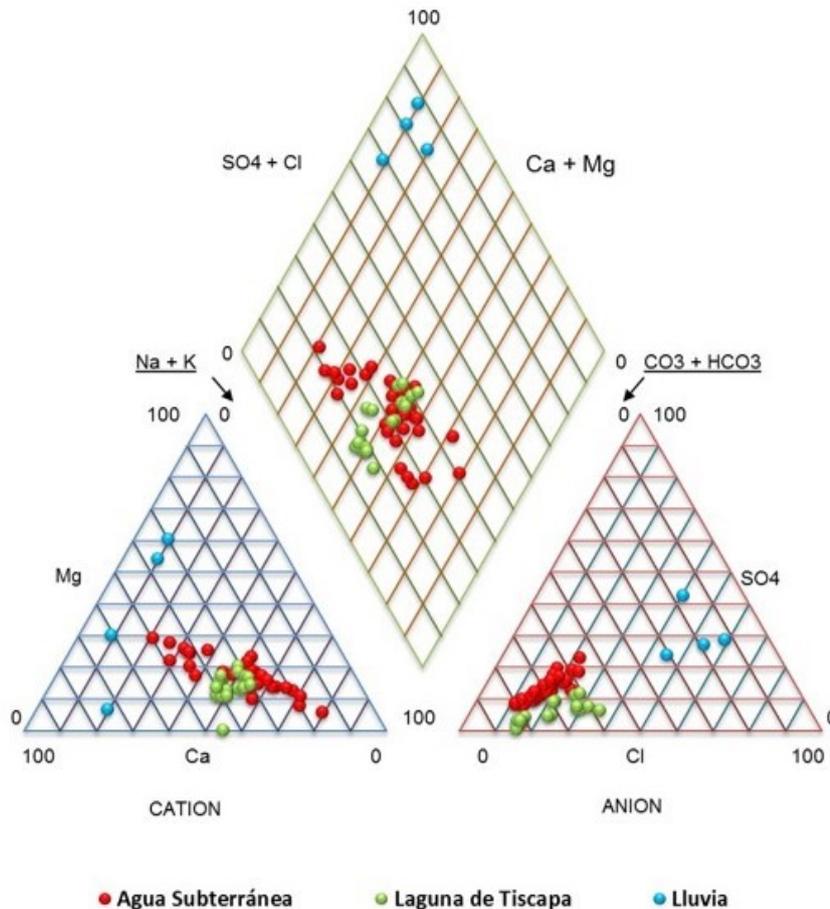


FIGURA 3  
**Diagrama triangular de Piper, color rojo agua subterránea, verde agua laguna de Tiscapa y azul agua de lluvia**  
 Propia

Los bajos contenidos de pH produce la disolución de calcita y dolomitas al momento del proceso de infiltración (Freeze & Cherry, 1979), gracias a la composición geológica de la zona descrita como Grupo medio Las Sierras (JICA, 1993), presenta buenas estructuras donde se da el proceso de desgasificación, causando aumento del pH del agua subterránea (entre 7-8 Unidades de pH) produciendo altas concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{+2}$ , características comunes de sistemas abiertos (Freeze & Cherry, 1979).

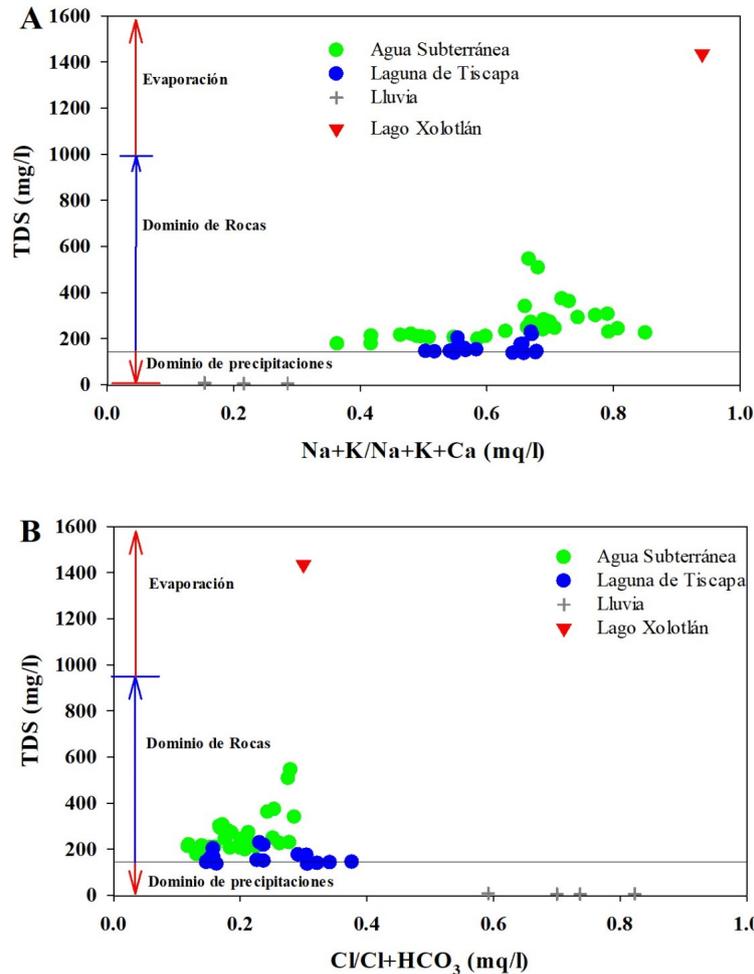
El agua subterránea presenta evolución desde la zona de mayores elevaciones, es así que, las aguas de los pozos situados en El Crucero presenta composición  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{+2} - \text{Mg}^{+2}$ , a diferencia de los pozos ubicado en zona oeste de Laguna de Tiscapa, siguiendo las líneas de flujo subterráneo, el carácter hidroquímica presenta intercambio de cationes predominantes  $\text{Ca}^{+2} - \text{Mg}^{+2}$  por  $\text{Na}^+$ , este intercambio puede estar ligado a la alteración de tobas y otros materiales volcánicos, producto de intercambio de cationes alcalino-térreos bivalentes (Araguás Araguás, Louvat, López Guzmán, & Castillo Hernández, 1992).

Para verificar esta interacción agua-roca como procesos hidroquímicos primarios se evaluaron las relaciones  $(\text{Na}^+ / \text{Na}^+ + \text{Ca}^{+2})$  y  $(\text{Cl}^- / \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  versus TDS, propuesta por Gibbs (Gibbs, 1970). En Figura 4. A-B, se representan las relaciones iónicas de aguas subterránea y Laguna de Tiscapa que indican dominio de procesos de meteorización por interacciones agua-roca, de forma similar las aguas de las precipitaciones se encuentran en el mismo dominio, lo cual se debe a las bajas concentraciones de sales en las precipitaciones

(media de 5.9 mg/L en TDS). Por otra parte, las aguas subterránea revelan mucha variabilidad en la concentración de los TDS, con valores medios de 264 mg/l, máximos de 544 mg/l y mínimo de 172 mg/l, es importante destacar, que se identificaron dos comportamientos; el primero, se asocia a bajas concentraciones de TDS en las aguas de los pozos ubicados en el lado oeste de Laguna de Tiscapa, con valores muy próximos a los 200 mg/l en TDS, de ellos se distingue pozo ubicado en El Crucero, el cual muestra la concentración más baja de TDS registrado en agua subterránea, característica que es descrita como zona de recarga (Araguás Araguás, Louvat, López Guzmán, & Castillo Hernández, 1992; JICA, 1993).

El segundo comportamiento, responde a aguas con concentraciones TDS un poco más altas, específicamente en pozos localizados en la zona noreste (entre Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlan), para una media de TDS de 390 mg/l, lo que indica que estas aguas contienen una mayor concentración de iones en sus composiciones, muy propio de la marca litológica, procesos de interacción agua-roca (Mariño & García, 2018). Para el Lago Xolotlán se efectuaron cálculos de TDS a partir de los resultados por Parello (Parello, et al., 2008), con el propósito de verificar si existía influencia del Lago Xolotlán en Laguna de Tiscapa, sin embargo, los TDS del Lago responden a las concentraciones próximas a 1404 mg/l, lo que indican que sus aguas predominan los procesos de evaporación (Figura 4. A-B).

Por otra parte, Laguna de Tiscapa presenta valores medios en las concentraciones de TDS de 159 mg/l, con máximos de 228 mg/l y mínimo de 135 mg/l, valores que están acordes con los del agua subterránea de pozos ubicados en zona oeste. Los resultados descritos sugieren que no existe aportes del Lago Xolotlán hacia Laguna de Tiscapa y el agua subterránea.



FÍGURA 4

*Gráficos agua subterránea, Laguna de Tiscapa y precipitaciones, siguiendo diagrama de Gips 1970. A) Cationes vs TDS. B) Aniones vs TDS.*

Propia

En la Figura 5, se ilustra distintas relaciones iónicas, que permite entender mejor los procesos que se desarrollan en la interacción agua-roca (Yidana & Yidana, 2010; Zhang, et al., 2018). En este sentido, las relaciones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  (Figura 5. A) son utilizadas como indicadores agua-roca de primer orden, de acuerdo a los resultados obtenidos, las agua subterránea y Laguna de Tiscapa se dispersan sobre la línea de relación 1:1, indicando contribuciones de fuentes ricas en  $\text{Na}^+$  disuelto, en esto no ocurre disolución de halita, los bicarbonatos presentan mayores concentraciones que el sodio, esto indica que en el agua subterránea domina el proceso relacionados con meteorización de silicatos por intercambio iónico (Lakshmanan, Kannan, & Senthil Kumar, 2003; Yidana & Yidana, 2010), aunque también puede ocurrir por adición de flujos de retorno por canales (Zhang, et al., 2018), es importante destacar, que los resultados obtenidos para el pozo El Crucero, se acerca a la línea de relación 1:1 indicando un déficit de sodio, que se relaciona al intercambio de base inversa (Bahir, Ouhamdouch, Ouazar, & Chehbouni, 2020) así también se asocia a disolución de halita (Lyu, et al., 2019).

En tanto, en la Figura 5. B, se ilustran los resultados de las aguas subterránea y Laguna de Tiscapa, ubicadas bajo línea 1:1, indicando desgaste de rocas ricas en silicatos regidas por los procesos primero por disolución y luego (los que se acercan a línea) por meteorización, en dichas reacciones, el ácido carbónico (del CO<sub>2</sub> atmosférico y el agua) y el carbonato de calcio en el suelo reaccionan para formar bicarbonato e iones de calcio (Lakshmanan, Kannan, & Senthil Kumar, 2003). También, hay autores que amplían a dominio de minerales como son calcita, dolomita y yeso (Pazand, Khosravi, Ghaderi, & Rezvanianzadeh, 2018; Sánchez-Gutiérrez, Mena-Rivera, Sánchez-Murillo, Fonseca-Sánchez, & Madrigal-Solís, 2020). Por otra parte, la Figura 5.C indica dominancia de silicatos es la que predomina en la composición hidrogeoquímica en el agua subterránea y Laguna de Tiscapa, seguidas de disolución de calcitas que están asociadas a los sedimentos en zonas de barrancos como en lechos de lagos (Romanelli, Quiroz Londoño, Martínez, Massone, & Escalante, 2014).

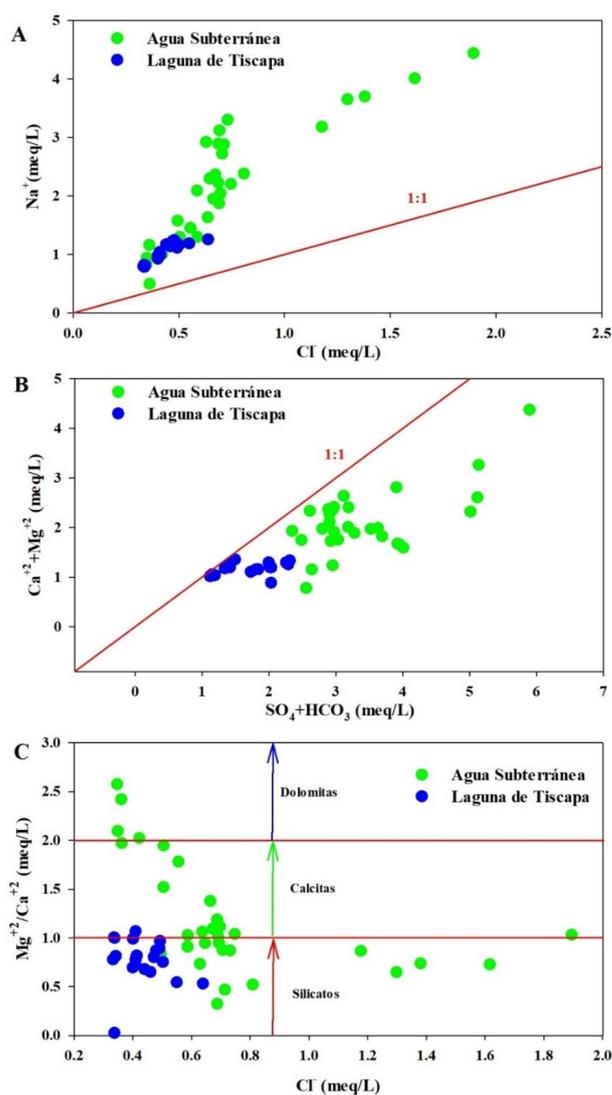


FIGURA 5  
 Relaciones hidroquímica, agua subterránea y Laguna de Tiscapa. A) Relación Cl<sup>-</sup> vs Na<sup>+</sup>. B) SO<sub>4</sub>+HCO<sub>3</sub> vs Ca<sup>+2</sup>+Mg<sup>+2</sup>. C) Cl<sup>-</sup> vs Mg<sup>+2</sup>/Ca<sup>+2</sup>  
 Propia

Los análisis de correlación resumidos en Tabla 2, se analizaron en base correlaciones con  $r > 0.750$ , que son consideradas como alto, de tal forma que los resultados de correlaciones inferiores a este valor no se consideraron, porque se interpretadas como mediana o débil correlación (Panda, Sundaray, Rath, Nayak,

& Bhatta, 2006). Las altas correlaciones que presenta Conductividad eléctrica con TDS, Cl<sup>-</sup>, Mg<sup>+2</sup>, Na<sup>+</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> son asociados a procesos de disolución de sales que aumentan los procesos eléctricos de meteorización (Wagh, et al., 2016). Como también las TDS presentó altas correlaciones con los iones principales, con r>0.75, comportamiento que es común en acuíferos carbonatados (Zhang, et al., 2018). En este estudio no se evalúa la calidad de las aguas pero en este hay que destacar altas cargas positivas de los iones Cl<sup>-</sup>, Mg<sup>+2</sup>, Na<sup>+</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> donde se asociadas a contaminación antropogénica (Wagh, et al., 2019).

TABLA 2

	CE	Temp	pH	TAC	DUR	TSD	HCO-3	SO42-	Cl-	NO3	NA+	K+	Ca+2	Mg+2	NH4
CE	1	.420**	.398**	.888**	.830**	.951**	.911**	.914**	.902**	.825**	.924**	.835**	.805**	.794**	-.274*
pH		1		.401**	.362**	.391**	.323*	.213	.325*	.037	.314*	.597**	.402**	.270*	-.104
TAC			1		.787**	.879**	.906**	.755**	.761**	.735**	.813**	.762**	.791**	.711**	-.146
DUR				1		.842**	.857**	.726**	.757**	.758**	.625**	.739**	.976**	.943**	-.231
TSD					1		.917**	.837**	.932**	.838**	.908**	.850**	.798**	.828**	-.251
HCO-3						1		.760**	.778**	.742**	.808**	.812**	.833**	.809**	-.093
SO42-							1		.846**	.816**	.884**	.690**	.690**	.723**	-.475**
Cl-								1		.894**	.907**	.746**	.708**	.760**	-.280*
NO3									1		.800**	.526**	.718**	.752**	-.298*
NA+										1		.742**	.577**	.642**	-.340*
K+											1		.716**	.703**	-.156
Ca+2												1		.856**	-.131
Mg+2													1		-.382**
NH4														1	

\*\* La correlación es significativa al nivel de 0,01 (2 colas).

\* La correlación es significativa al nivel de 0,05 (2 colas).

Propia

## CONCLUSIONES

El alto fracturamiento que presenta el cono de tova y la falla que atraviesa Laguna de Tiscapa sería el factor determinante en la recarga y descarga del agua. Se puede descartar aporte de agua de Lago Xolotlán a Laguna de Tiscapa, debido que presentan una composición isotópica altamente enriquecido, asimismo, experimentan procesos de salinización producto de procesos de evaporación.

Mediante las técnicas hidroquímica e isotópicas, se ha logrado tener una mejor comprensión en las interacciones en las distintas fases del ciclo hidrológico, lo que hace posible saber el funcionamiento del agua en Laguna de Tiscapa. Hay un origen común entre el agua subterránea y Laguna de Tiscapa. Los isotopos estables indican que el acuífero aporta agua en la zona oeste, con una composición media de -7‰ en δ<sup>18</sup>O, mientras hay enriquecimiento isotópico -6‰ en δ<sup>18</sup>O en el agua subterránea en zona noreste entre Laguna de Tiscapa y Lago Xolotlán, indicando el carácter afluente-influente de Laguna de Tiscapa.

La composición hidroquímica nos indica que el factor determinante es la disolución de material geológico y no el meteórico. Las interacciones agua-roca determinan las características hidrogeoquímicas y el predominio de los iones HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>+2</sup>. Los procesos de disolución se dan principalmente por la presencia de silicatos seguidos de calcitas, que es característico de la composición geológica de Las Sierras.

El alto fracturamiento que presenta el cono de tova y la falla que atraviesa Laguna de Tiscapa sería el factor determinante en la recarga y descarga del agua. Se puede descartar aporte de agua de Lago Xolotlán a Laguna de Tiscapa, debido que presentan una composición isotópica altamente enriquecido, asimismo, experimentan procesos de salinización producto de procesos de evaporación.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua), mediante los Fondos para Proyectos de Investigación (FPI) número 13201804, denominado “Origen del agua que recarga la Laguna de Tiscapa mediante la utilización de isótopos ambientales”. También al Centro para Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA-/UNAN-Managua), por base de datos proporcionada del proyecto Mapa Isotópico de Nicaragua, donde se obtuvieron los datos de isótopos estables en precipitación y agua subterránea. A Dirección Ambiental de Alcaldía de Managua (ALMA) por proporcionar base de datos isotópicos e hidroquímico, en matriz agua de superficial y subterránea para su interpretación y análisis. A la unidad de Calidad de Agua de Empresas de Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL) por proporcionar base de datos de análisis químicos de agua subterránea en área de estudio.

## REFERENCIAS

- Araguás Araguás, L., Louvat, D., López Guzmán, A., & Castillo Hernández, E. (1992). Estudio de Hidrología Isotópica de los Acuíferos de Managua. Informe Final, Proyecto NIC/8/004, IAEA, Viena.
- Bahir, M., Ouhamdouch, S., Ouazar, D., & Chehbouni, A. (2020). Assessment of groundwater quality from semi-arid area for drinking purpose using statistical, water quality index (WQI) and GIS technique. *Carbonates and Evaporites*, 35, 27. doi:10.1007/s13146-020-00564-x
- Barberena Moncada, J., & Hurtado García, I. (2019). Proceso de acidificación de las precipitaciones de Managua. *Revista Científica de FAREM-Estelí*(31), 72-80. doi:10.5377/farem.v0i31.8472
- Brown, R. D., Ward, P. L., & Plafker, G. (1973). Geologic and seismologic aspects of the Managua, Nicaragua, earthquakes of December 23, 1972. U. S. Geological Survey Professional Paper. 838. doi:10.3133/pp838
- Burkert, U., Ginzler, G., Babenzien, H. D., & Koschel, R. (2004). The Hydrogeology of a Catchment Area and an Artificially Divided Dystrophic Lake? Consequences for the Limnology of Lake Fuchskuhle. *Biogeochemistry*, 71(2), 225-246. doi:10.1007/s10533-005-8132-1
- Cowan, H., Prentice, C., Pantosti, D., de Martini, P., Strauch, W., & Participants, W. (2002). Late Holocene Earthquakes on the Aeropuerto Fault, Managua, Nicaragua. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(5), 1694-1707. doi:DOI: 10.1785/0120010100
- Craig, H. (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133(3465), 1702-1703. doi:10.1126/science.133.3465.1702
- Finizola, A., Sortino, F., Lénat, J.--., & Valenza, M. (2002). Fluid circulation at Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy) from self-potential and CO<sub>2</sub> surveys. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 116(1-2), 1-18. doi:10.1016/S0377-0273(01)00327-4
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc.
- Freundt, A., Hartmann, A., Kutterolf, S., & Strauch, W. (2009). 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, 1453-1470. doi:10.1007/s00531-009-0469-6.
- Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170(3962), 1088-1090. doi:10.1126/science.170.3962.1088.
- Gonfiantini, R. (1978). Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature*, 271, 534-536. doi:10.1038/271534a0
- IANAS. (2015). *Desafíos del Agua Urbana en las Américas*. Retrieved from [https://www.ianas.org/docs/books/Desafios\\_Agua.html](https://www.ianas.org/docs/books/Desafios_Agua.html)
- JICA. (1993). Estudio sobre el proyecto de abastecimiento de agua en Managua. Informe Principal, Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillado, Tokio.

- Kumar, M., Ramanathan, A., Rao, M. S., & Kumar, B. (2006). Identification and evaluation of hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Delhi, India. *Environ Geol*, 50, 1025-1039. doi:10.1007/s00254-006-0275-4
- Lakshmanan, E., Kannan, R., & Senthil Kumar, M. (2003). Major ion chemistry and identification of hydrogeochemical processes of groundwater in a part of Kancheepuran district, Tamil Nadu, India. *Environmental Geosciences*, 10(4), 157-166. doi:10.1306/eg.0820303011
- Lyu, M., Pang, Z., Yin, L., Zhang, J., Huang, T., Yang, S., . . . Gulbostan, T. (2019). The Control of Groundwater Flow Systems and Geochemical Processes on Groundwater Chemistry: A Case Study in Wushenzhao Basin, NW China. *Water*, 11(1), 790. doi:10.3390/w11040790
- Mariño, E., & García, R. (2018). Apuntes sobre Aplicaciones Ambientales de la Hidrogeoquímica. Universidad Nacional de Salta, 67.
- Mauri, G., Williams-Jones, G., Saracco, G., & Zurek, J. (2012). A geochemical and geophysical investigation of the hydrothermal complex of Masaya Volcano, Nicaragua. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 227-228, 15-31. doi:https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.02.003
- Mejía Lacayo, J. (2018, Mayo). Tiscapa, rescate de un desastre ecológico. *Temas Nicaragüenses*(121), p. 101. Retrieved from www.temasnicas.net
- Panda, U. C., Sundaray, S. K., Rath, P., Nayak, B. B., & Bhatta, D. (2006). Application of factor and cluster analysis for characterization of river and estuarine water systems-A case study: Mahanadi River (India). *Journal of Hydrology*, 331(3-4), 434-445. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.05.029
- Parello, F., Aiuppa, A., Calderon, H., Calvi, F., Cellura, D., Martinez, V., . . . Vinti, D. (2008). Geochemical characterization of surface waters and groundwater resources in the Managua area (Nicaragua, Central America). *Applied Geochemistry*, 23, 914-931. doi:10.1016/j.apgeochem.2007.08.006
- Pazand, K., Khosravi, D., Ghaderi, M. R., & Rezvanianzadeh, M. R. (2018). Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater in a semi-arid region using major ion chemistry: A case study of Ardestan basin in Central Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 6, 245-254. doi:10.1007/s11356-016-6371-4
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos Trans. AGU*, 25(6), 914-928. doi:10.1029/TR025i006p00914.
- Romanelli, A., Quiroz Londoño, O. M., Martínez, D. E., Massone, H. E., & Escalante, A. H. (2014). Hydrogeochemistry and isotope techniques to determine water interactions in groundwater-dependent shallow lakes, Wet Pampa Plain, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 71, 1953-1966. doi:10.1007/s12665-013-2601-y
- Rozanski, K., Castillo, E., Flores, Y., Urbina, A., Castro, M., & Dávila, R. (2001). Balance Isotópico e Hidrogeológico del Lago Xolotlán. Informe Final, INETER-OIEA, Dirección de Hidrogeología, Managua.
- Rozanski, K., Froehlich, K., & Mook, W. G. (2002). Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Principios y Aplicaciones. In W. G. Mook (Ed.), Sección III Agua Superficial. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.
- Sánchez-Gutiérrez, R., Mena-Rivera, L., Sánchez-Murillo, R., Fonseca-Sánchez, A., & Madrigal-Solís, H. (2020). Hydrogeochemical baseline in a human-altered landscape of the central Pacific coast of Costa Rica. *Environ Geochem Health*. doi:10.1007/s10653-019-00501-5
- Sánchez-Murillo, R., Esquivel-Hernández, G., Corrales-Salazar, J. L., Castro-Chacón, L., Durán-Quesada, A. M., Guerrero-Hernández, M., . . . Terzer-Wassmuth, S. (2020). Tracer hydrology of the data-scarce and heterogeneous Central American Isthmus. *Hydrological Processes*, 1-16. doi:10.1002/hyp.13758
- Turner, J. V., & Townley, L. R. (2006). Determination of groundwater flow-through regimes of shallow lakes and wetlands from numerical analysis of stable isotope and chloride tracer distribution patterns. *Journal of Hydrology*, 320(3-4), 451-483. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.07.050

- Wagh, V. M., Panaskar, D. B., Jacobs, J. A., Mukate, S. V., Muley, A. A., & Kadam, A. K. (2019). Influence of hydro-geochemical processes on groundwater quality through geostatistical techniques in Kadava River basin, Western India. *Arabian Journal Geosciences*, 12, 7. doi:10.1007/s12517-018-4136-8
- Wagh, V. M., Panaskar, D. B., Varade, A. M., Mukate, S. V., Gaikwad, S. K., Pawar, R. S., . . . Aamalawar, M. L. (2016). Major ion chemistry and quality assessment of the groundwater resources of Nanded tehsil, a part of southeast Deccan Volcanic Province, Maharashtra, India. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1418. doi:10.1007/s12665-016-6212-2
- Ward, P. L., Gibbs, J., Harlow, D., & Aburto, A. (1974). Aftershocks of the Managua, Nicaragua, earthquake and the tectonic significance of the Tiscapa fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(4), 1017-1029.
- Yidana, S. M., & Yidana, A. (2010). An Assessment of the origin and variation of groundwater salinity in southeastern Ghana. *Environment Earth Sci*, 61, 1259-1273. doi:10.1007/s12665-010-0449-y
- Zhang, Y., Xu, M., Li, X., Zhang, Q., Guo, J., Yu, L., & Zhao, R. (2018). Hydrochemical Characteristics and Multivariate Statistical Analysis of Natural Water System: A Case Study in Kangding Country, Southwestern China. *Water*, 10(1), 80. doi:10.3390/w10010080.