

DOI: 10.24850/j-tyca-2024-03-05

Artículos

Uso de isótopos ambientales del agua y geoquímica para determinar fuentes de nitrato en el sur del acuífero Cuernavaca

Use of environmental isotopes of water and geochemistry to determine nitrate sources in south of Cuernavaca aquifer

Luis González-Hita¹

Miguel A. Mejía-González², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8921-1100>

Vicente Ortega-Lara³

Blanca Carteño-Martínez⁴

Juan C. Aparicio-González⁵

Dustin S. Mañón-Flores⁶

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Hidrología, Subcoordinación de Hidrología Subterránea, Jiutepec, Morelos, México, lghita@tlaloc.imta.mx

²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Hidrología, Subcoordinación de Hidrología Subterránea, Jiutepec, Morelos, México, mamejia@tlaloc.imta.mx



³Investigador independiente, México, vortegalara@gmail.com

⁴Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Hidrología, Subcoordinación de Hidrología Subterránea, Jiutepec, Morelos, México, blancartmart@hotmail.com

⁵Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Hidrología, Subcoordinación de Hidrología Subterránea, Jiutepec, Morelos, México, jcapariciog@gmail.com

⁶Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Hidrología, Subcoordinación de Hidrología Subterránea, Jiutepec, Morelos, México, pistolpiolo@gmail.com

Autor para correspondencia: Miguel A. Mejía-González, mamejia@tlaloc.imta.mx

Resumen

El acuífero Cuernavaca es la principal fuente de agua dulce permanente que sustenta el desarrollo económico y el suministro a la población de la capital del estado de Morelos. En los últimos 30 años, los nitratos en el sur del acuífero Cuernavaca se han incrementado, degradando la calidad del agua subterránea. La identificación del origen del nitrato es fundamental para implementar políticas públicas que controlen y reviertan dicha contaminación. Con base en las características propias de la región, como son tipo de suelo y geología, incremento acelerado de la población, y actividades industriales, agrícolas y recreativas, entre ellas la práctica del golf, se plantean cuatro posibles fuentes de nitrato en la

zona de estudio: 1) nitrato del suelo, 2) infiltración de aguas residuales, 3) fertilizantes provenientes de zonas agrícolas, y 4) fertilizantes provenientes de campos de golf. En la porción sur del acuífero Cuernavaca, los datos geoquímicos y los isótopos ambientales del agua ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^3\text{H}$) indican que la contaminación por nitrato proviene principalmente de aguas residuales. Asimismo, indican que el flujo profundo aporta arsénico a algunos aprovechamientos subterráneos. Los resultados también muestran correlación entre las concentraciones del nitrato y del uranio en el acuífero. El registro periódico de los datos isotópicos permitió también determinar la línea de agua meteórica de la zona del acuífero Cuernavaca.

Palabras clave: acuífero Cuernavaca, nitrato, aguas residuales, geoquímica, isótopos ambientales del agua, arsénico, uranio, línea de agua meteórica del acuífero Cuernavaca.

Abstract

The Cuernavaca aquifer is the main source of permanent fresh water that supports economic development and supply to the population of the capital of the state of Morelos. During the last thirty years in the south of the Cuernavaca aquifer nitrates have increased degrading groundwater quality. The identification of the origin of the nitrate is essential to implement public policies that minimize the contamination. Taking into account the characteristics of the region such as soil type and geology, population growth, economic activities such as agriculture, and recreational activities including golf, four possible sources of nitrate are proposed in the study area: 1) Natural sources (soil organic nitrogen), 2)

infiltration of wastewater, 3) infiltration of agricultural water, and 4) infiltration of water used in the irrigation of golf courses. In the southern portion of the Cuernavaca aquifer, the geochemistry and environmental isotopes of water ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^3\text{H}$) indicate that the main nitrate contaminant source is sewage disposal. The data also indicate that the arsenic detected in the wells comes from the deepest strata of the aquifer. The results also show correlation between nitrate and uranium concentration. The data obtained allowed to determine the meteoric water line of the Cuernavaca Aquifer.

Keywords: Cuernavaca aquifer, nitrate, sewage water, geochemistry, environmental isotopes of water, arsenic, uranium, meteoric water line of Cuernavaca aquifer.

Recibido: 30/12/2021

Aceptado: 29/11/2022

Publicado Online: 13/12/2022

Introducción

El nitrato (NO_3^-) es una de las principales causas de contaminación del agua subterránea (Zhao, 2015; Canter, 1997). Diversas fuentes de nitrato contribuyen a esta contaminación, entre ellas las actividades agrícolas, pecuarias y las aguas residuales (Haller, McCarthy, O'Brien,

Riehle, & Stuhldreher, 2013; Viers, Liptzin, Rosenstock, Jensen, & Hollander, 2012).

El consumo de agua potable con altas concentraciones de nitrato es un factor de riesgo de varios tipos de cáncer, incluyendo tumores gástricos, colorrectales y cerebrales (CDPH, 2013). Para prevenir daños a la salud de la población, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció un límite máximo permisible de 50 mg/l para los nitratos (WHO, 2007). En México, el límite permisible (Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994) (SSA, 1994) para agua potable es de 10 mg/l de nitrógeno (como N-NO_3^-), que equivale a 44.3 mg/l de nitrato.

En México se han reportado acuíferos contaminados con nitratos tanto por actividades agrícolas como por aguas residuales (Pacheco & Cabrera, 1997; Cardona, 2004; Torres-Martínez *et al.*, 2021). En 1988, en el estudio realizado por Suarez-Barragán y Ureno-Luna (1988) sobre la calidad físico-química del agua subterránea del valle de Cuernavaca se detectó la presencia de nitratos en aprovechamientos subterráneos de algunos municipios, entre ellos el pozo Tetecalita en Emiliano Zapata, con 6.2 mg/l; un manantial en Temixco, con 4.43 mg/l; un manantial en Cuernavaca, con 6.64 mg/l; el pozo Melchor Ocampo, con 5.75 mg/l, y el pozo Hotel Casino de la Selva, con 5.85 mg/l, ambos en el centro de Cuernavaca. Para 1995 (Conagua, 2002), las concentraciones de nitrato en la porción poniente del acuífero Cuernavaca (municipios de Temixco y Acatlipa), ya alcanzaban valores de 20 mg/l (Figura 1).

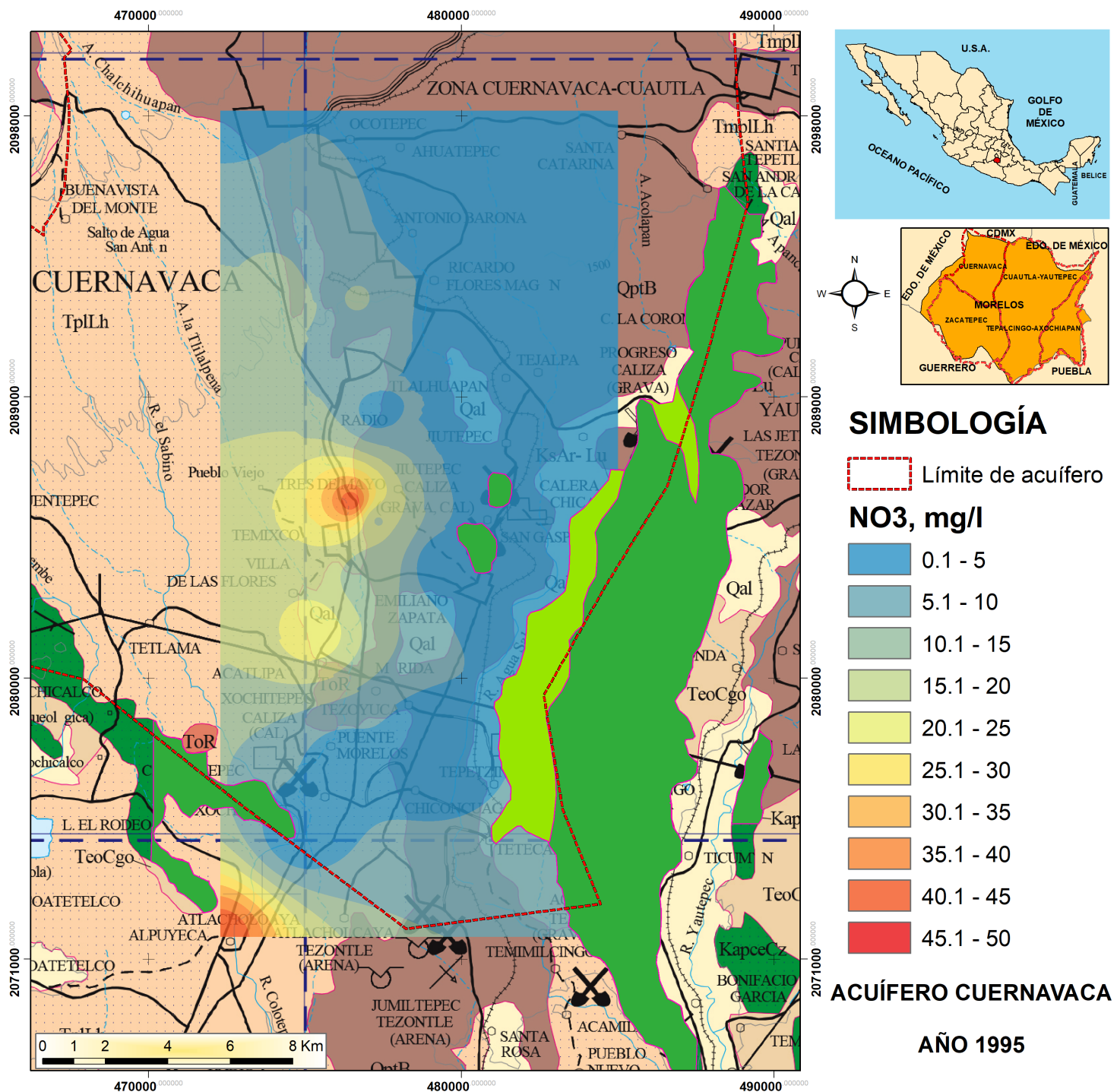


Figura 1. Concentraciones de nitrato en 1995 en el acuífero Cuernavaca.

En Morelos se generan anualmente alrededor de 89 Mm³ de aguas residuales, de las cuales el 66 % se descarga sin tratamiento a fosas sépticas, pozos de absorción, o directamente a arroyos, barrancas y ríos (Conagua, 2010). Las descargas son principalmente público-urbano con el 46 % y servicios con el 21 %. El caudal de aguas residuales municipales es del orden de 4585 l/s, de los cuales se recolectan 2 820 l/s y son tratados 959 l/s (Conagua, 2010).

El 58 % de la superficie del estado de Morelos está destinada a la producción agrícola y de pastizales. En total, la entidad tiene 204 441 hectáreas destinadas al sector agropecuario (INEGI, 1991). En la zona de estudio, las áreas productivas de cultivo se localizan en Jiutepec, en los ejidos de Acapantzingo, Chapultepec y Atlacomulco; al nororiente, en los límites de los municipios de Cuernavaca y Tepoztlán; al sur, en los ejidos de Temixco, Acatlipa, Zapata y Tezoyuca (POZCI, 2009). En esta región se cultiva principalmente jitomate, tomate verde, maíz, arroz y horticultura de ornato (Sagarpa, 2003). Los plaguicidas, herbicidas y fertilizantes utilizados en las zonas agrícolas cuando se infiltran al subsuelo pueden contaminar el agua subterránea (Conagua, 2010).

En la zona de estudio se emplazan cuatro campos de golf. Algunos de los nutrientes que se aplican al césped son los siguientes (Del-Campo-Delgado, 2016): a) nitrógeno, elemento esencial para el crecimiento del pasto y dar color verde; b) fósforo, relacionado con el desarrollo radicular, y c) potasio, el cual actúa en muchos niveles del metabolismo vegetal. Cuando se aplican agua y nutrientes en exceso, los fertilizantes se infiltran en forma de lixiviados.

En los últimos 30 años, los nitratos en el sur del acuífero Cuernavaca se han incrementado, degradando la calidad del agua subterránea. La identificación del origen del nitrato es fundamental para implementar políticas públicas que controlen y reviertan dicha contaminación.

El objetivo de este estudio fue determinar las concentraciones de nitrato en la porción sur del acuífero Cuernavaca e identificar las fuentes que lo producen. Para ello se utilizaron herramientas hidrogeológicas, la química del agua subterránea y los isótopos ambientales del agua ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^3\text{H}$).

Área de estudio

El acuífero Cuernavaca se localiza en la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Mexicano, subprovincia Cuenca del Balsas-Mexcala (Raisz, 1964), entre los paralelos $18^\circ 40'$ y $19^\circ 10'$ de latitud norte, y los $99^\circ 00'$ y $99^\circ 20'$ de longitud oeste (Figura 2).

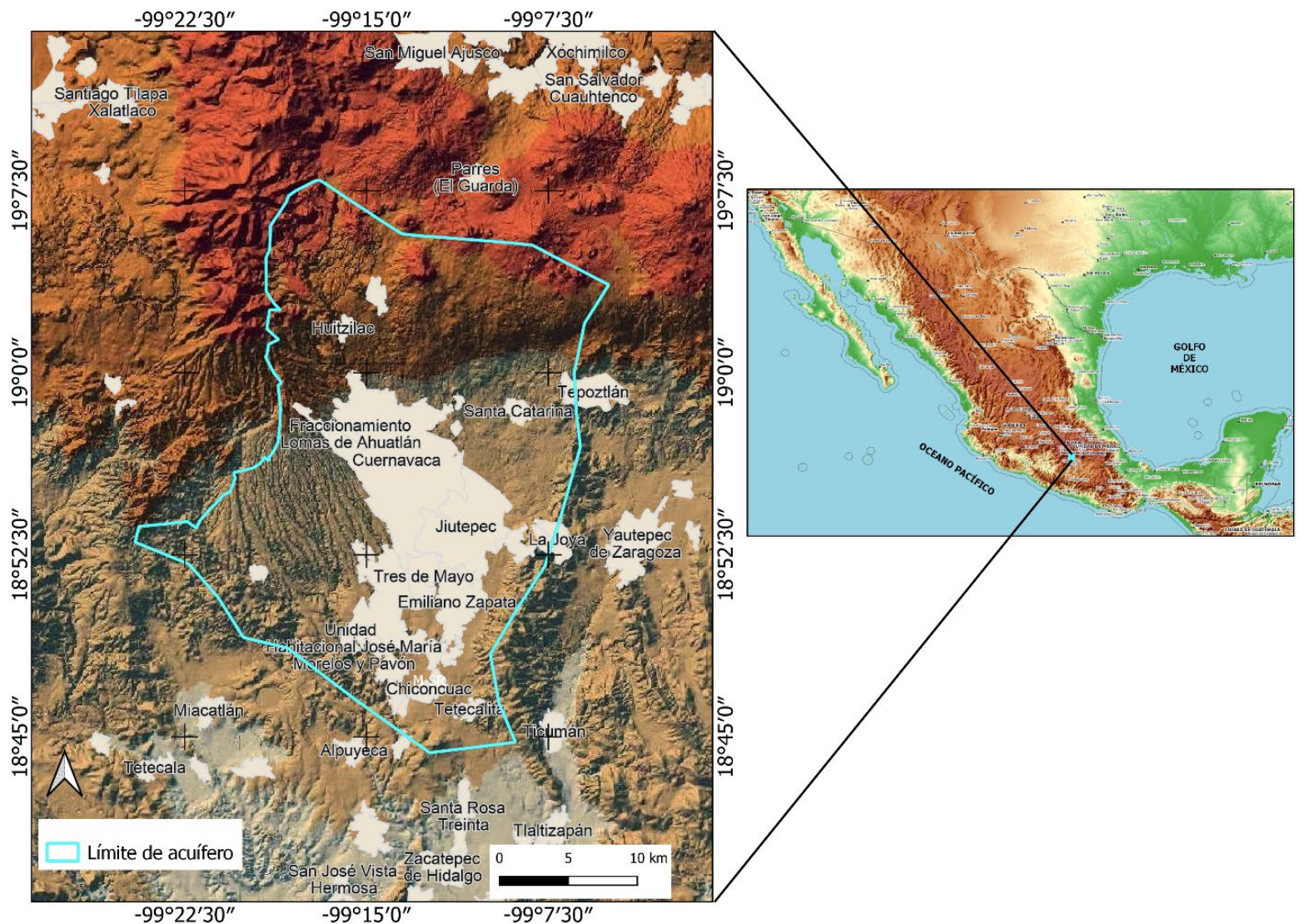


Figura 2. Localización del acuífero Cuernavaca.

Los límites geomorfológicos del acuífero Cuernavaca son los siguientes: al norte, las sierras de Zempoala, Ajusco y Chichinautzin; al sur, la sierra de Xochicalco; al poniente, la prolongación de la sierra de Zempoala; y al oriente, la sierra de Tepoztlán-Tlaltizapán o anticlinal de Ticumán (Conagua, 2020). Las sierras Zempoala (3 650 msnm) y

Chichinautzin (3 690 msnm) son las mayores elevaciones (Conagua, 2020).

De acuerdo con las temperaturas medias anuales, en la zona del acuífero Cuernavaca se presentan cuatro tipos de climas (Conagua, 2002): semifrío (5-12 °C), templado (12-18 °C), semicálido (18-22 °C) y cálido (> 22 °C). Los climas semifrío y templado se localizan en la porción norte, mientras que los climas semicálido y cálido en las porciones centro y sur, respectivamente.

Al igual que los climas, la precipitación pluvial que incide en el acuífero Cuernavaca se ve influenciada por la topografía y el relieve del terreno (Conagua, 2002). En la porción alta de la región se produce precipitación del orden de 1 500 a 1 100 mm anuales, mientras que en la porción sur es del orden de 950 a 850 mm anuales. En general, la precipitación es más abundante de junio a octubre, es decir, típicamente de verano.

En la porción norte predominan varios tipos de bosques de climas templado y frío, entre los que se encuentran bosque de pino, bosque de oyamel, bosque de cedro-tascate, bosque de encinos, bosque de pino-encino y bosque mesófilo de montaña (Secretaría de Desarrollo Sustentable de Morelos, 2009). En la porción central y sur predomina la selva baja caducifolia, matorral subtropical bajo y pastizal (Secretaría de Desarrollo Sustentable de Morelos, 2009). Los cultivos agrícolas constituyen también un tipo de vegetación no natural presente en la zona de planicie.

La columna estratigráfica del acuífero Cuernavaca se compone de 13 tipos de unidades de roca, las cuales abarcan del Cretácico Inferior al

reciente (Conagua, 2020). Dichas unidades son las siguientes: formación Xochicalco, formación Morelos, formación Cuautla, formación Mexcala, grupo Balsas, riolita Tilzapotla, granito Colotepec, formación Tepoztlán, andesita Zempoala, formación Cuernavaca, formación Chichinautzin, depósitos clásticos continentales y depósitos aluviales cuaternarios.

Hidrogeología

Con base en aspectos geomorfológicos y geohidrológicos es posible identificar tres unidades hidrogeológicas en el acuífero Cuernavaca (Figura 3) (Conagua, 2002; Morales-Casique, Guinzberg-Belmont, & Ortega-Guerrero, 2016; Ortega, Garcia, & Pelayo, 2003).

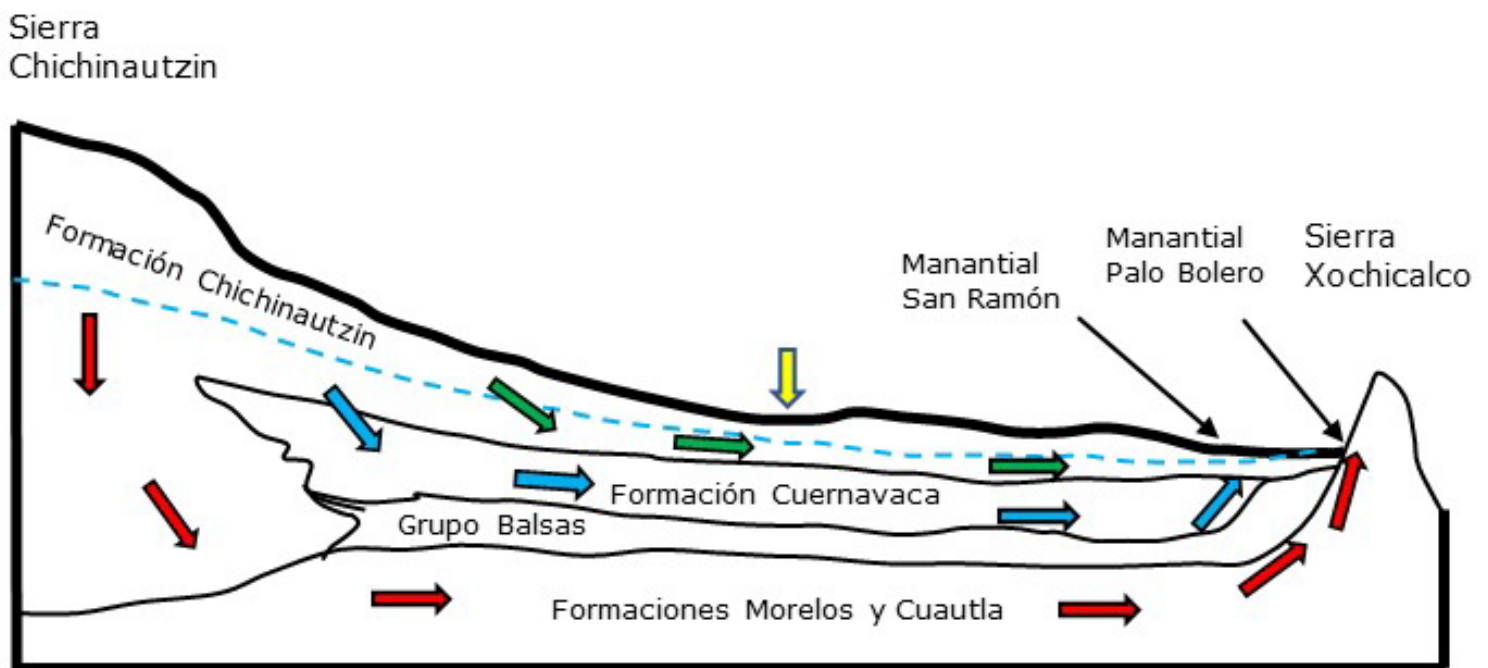


Figura 3. Unidades hidrogeológicas del acuífero Cuernavaca.

La primera unidad corresponde a un acuífero libre alojado en rocas ígneas basálticas fracturadas de la formación Chichinautzin y depósitos clásticos continentales de la formación Cuernavaca. La segunda unidad, definida como un acuitardo, se asocia con materiales de baja permeabilidad del grupo Balsas y la formación Mexcala. Funciona como basamento del acuífero libre, y se localiza a profundidades promedio de 100 a 200 m en la porción media y sur del acuífero. La tercera unidad es un acuífero regional semiconfinado, alojado en las calizas de las formaciones Morelos y Cuautla, y es la base de la secuencia geohidrológica del acuífero Cuernavaca.

Las zonas de recarga preferencial se localizan en las partes altas de la zona de estudio. Al noroeste, la sierra Zempoala, constituida por rocas volcánicas fracturadas del Terciario; y al norte, la sierra Chichinautzin, constituida por basaltos fracturados y cavernosos del Cuaternario (Jaimes-Palomera *et al.*, 1989).

Fuentes antrópicas contaminantes

Los principales arroyos y barrancas que drenan aguas residuales de la ciudad de Cuernavaca con dirección norte-sur son las siguientes: la barranca El Pollo en la porción poniente, y la barranca Analco en las porciones central y oriente del municipio de Cuernavaca, las cuales confluyen al norte de la cabecera municipal de Temixco en el río Apatlaco. La zona nororiente de Cuernavaca descarga en la barranca Puente Blanco, la cual colecta las aguas residuales de Jiutepec y Emiliano Zapata, donde

se le denomina Arroyo Dulce, para finalmente confluir al río Apatlaco al sur de la localidad de Xochitepec. En la porción más oriental del valle drena la barranca Las Fuentes, en la cual descargan los manantiales Huauchiles y Las Fuentes, así como las aguas residuales de Tejalpa, Progreso, Las Fuentes y El Pochotal, llegando finalmente a las zonas agrícolas del sur de Jiutepec y Emiliano Zapata (Figura 4) (IMTA, 2012).

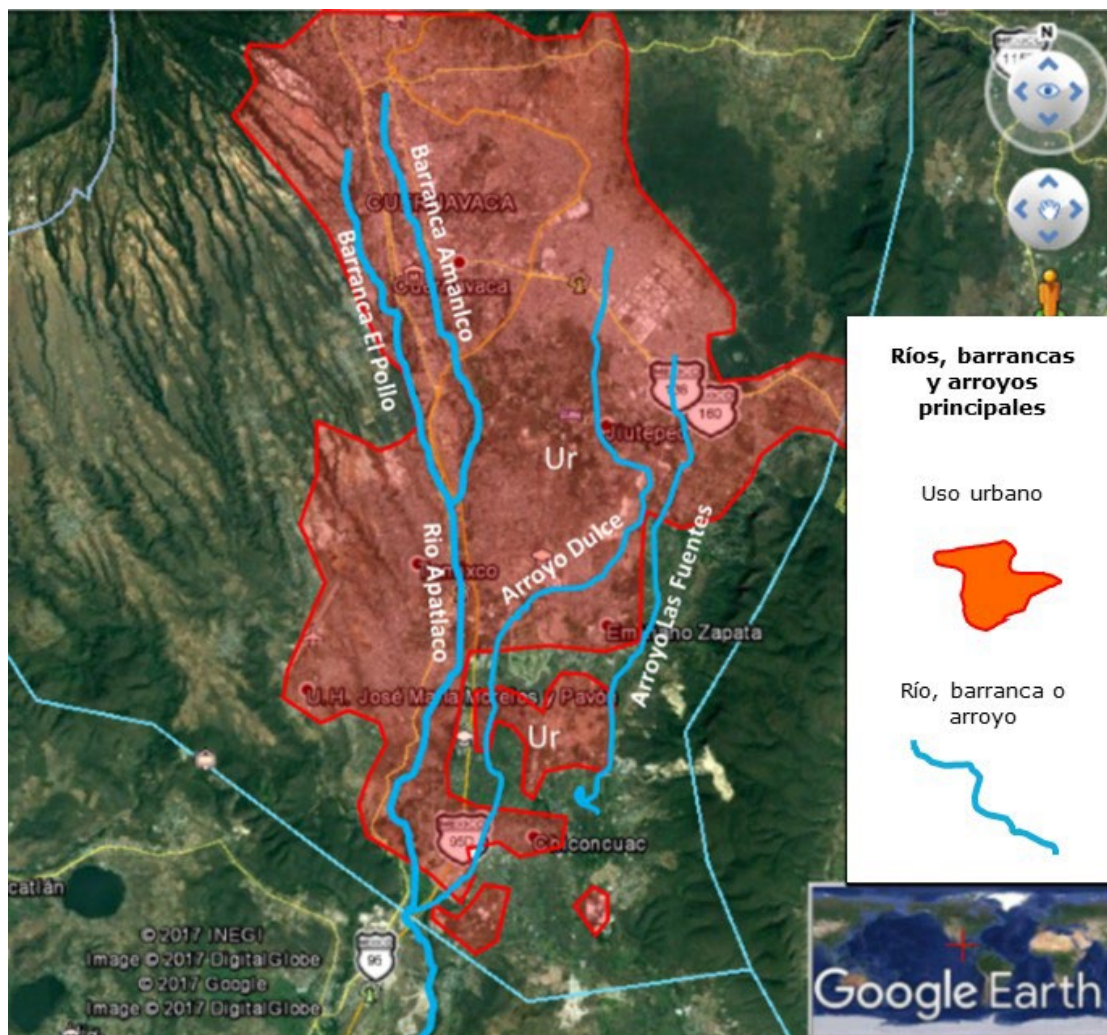


Figura 4. Principales ríos, arroyos y barrancas en el acuífero Cuernavaca.

Metodología

Lluvia

Se recolectaron muestras de lluvia de 2016 a 2022, utilizando colectores de agua de lluvia RS2 PALMEX, los cuales permiten tomar muestras acumuladas sin evaporación ni fraccionamiento isotópico (IAEA, 2002). Las muestras se filtraron usando membranas de celulosa de 0.45 μm , se envasaron en botellas de polietileno de alta densidad con tapas de inserciones cónicas y polyseal, y se preservaron a 4 °C.

Los colectores se localizan en las siguientes poblaciones: Tezoyuca, Temixco, Cuernavaca, Huitzilac, Tres Marías y Tres Cumbres. Estos colectores forman parte de la Red Nacional de Monitoreo de la Composición Isotópica de la Precipitación Pluvial (RENIP), la cual cubre las 15 provincias fisiográficas que integran el territorio nacional. La RENIP es operada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en forma ininterrumpida, con la colaboración del Servicio Meteorológico Nacional, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México y el Organismo Internacional de Energía Atómica.

Los análisis de isótopos estables se realizaron en el laboratorio de hidrología isotópica del IMTA, utilizando analizadores láser de isótopos de agua Picarro L2110-i y Los Gatos Research LWIA-45EP. La precisión analítica de las mediciones es de $\pm 0.5 \%$ (Vs. VSMOW) para la $\delta^2\text{H}$ y $\pm 0.13\%$ (Vs. VSMOW) para la $\delta^{18}\text{O}$.

Agua subterránea

Se recolectaron muestras de agua en 16 aprovechamientos subterráneos durante los meses de enero y febrero de 2014 (Figura 5).

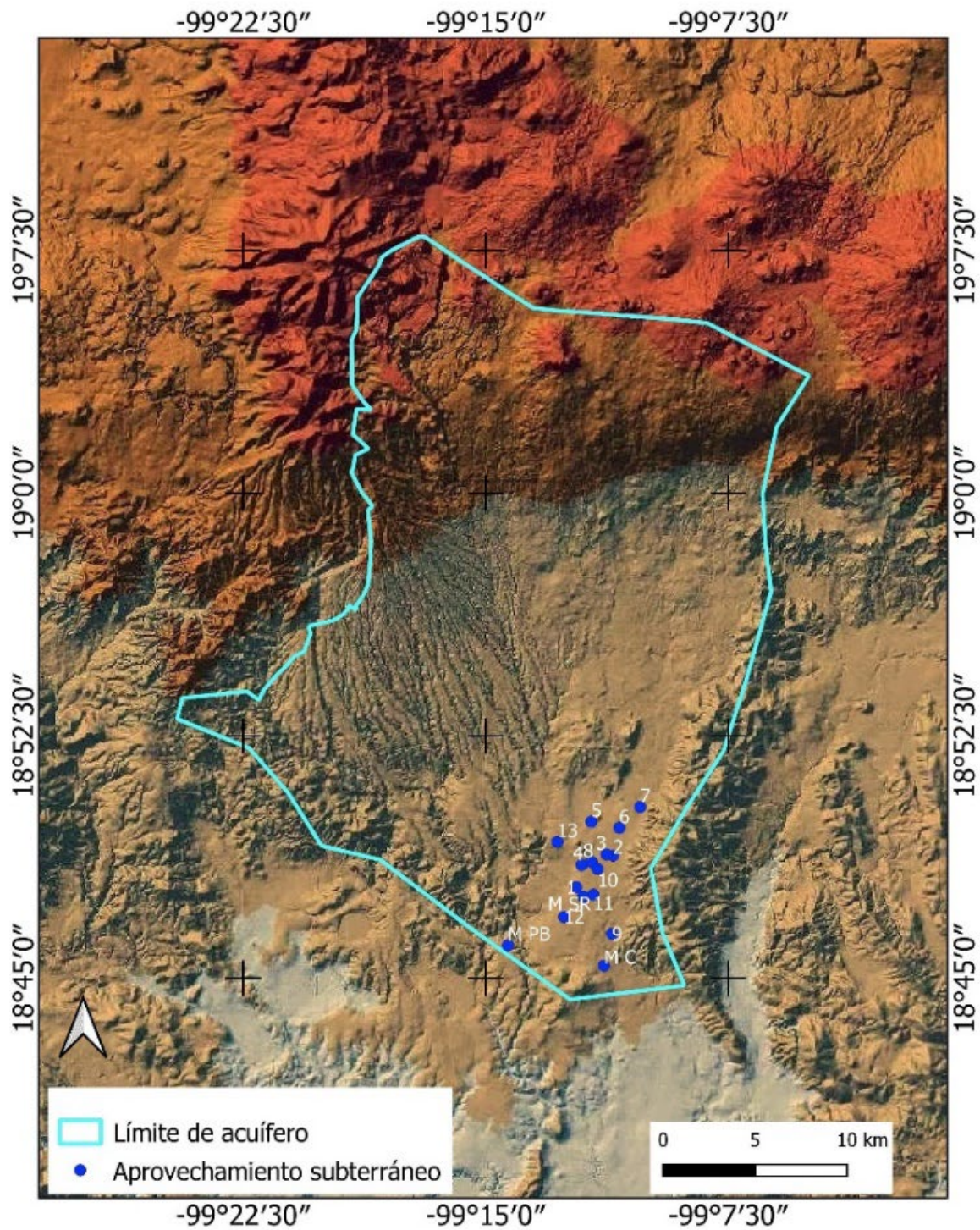


Figura 5. Localización de los aprovechamientos subterráneos.

Las muestras se tomaron en el tren de descarga de los pozos. Antes de medir los parámetros de campo y recolectar las muestras, se renovó en su totalidad el volumen de agua del espacio anular del pozo mediante extracción por bombeo, a fin de muestrear y medir el agua representativa del acuífero.

Las muestras se filtraron usando membranas de celulosa de 0.45 μm , y se envasaron en botellas de polietileno de alta densidad con tapas de inserciones cónicas y poliseal.

Las muestras para aniones e isótopos estables se preservaron a 4 °C. Las muestras para metales y cationes se acidificaron a $\text{pH} < 2$ con ácido nítrico de ultra alta pureza.

Con la finalidad de reducir al máximo la modificación de las propiedades fisicoquímicas prevalecientes del agua en el medio subterráneo, para la medición de los parámetros de campo se utilizaron celdas de aislamiento. Estos dispositivos se conectan por medio de mangueras a válvulas ubicadas en el tren de descarga del pozo. Con ello se elimina el contacto del agua con la atmósfera, evitando modificaciones a causa de la liberación de gases ocluidos en el agua, tales como dióxido de carbono y/o ácido sulfhídrico.

Parámetros de campo

Los parámetros medidos en campo fueron potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), potencial redox (Eh), temperatura del agua y temperatura ambiente (T). Las metodologías utilizadas se describen a continuación:

1. La medición de la actividad de los iones hidrógeno en el agua subterránea se efectuó por medio de un potenciómetro. La calibración del equipo se realizó utilizando la técnica de calibración en tres puntos a partir de soluciones *buffer* de pH conocido. En esta técnica, el pH a registrar debe ubicarse entre tales valores extremos. En la calibración del equipo se utilizaron soluciones de 4.0, 7.0 y 10.0 unidades de pH.
2. La conductividad eléctrica se midió por medio de un conductivímetro portátil con compensación por temperatura. La calibración del equipo se realizó utilizando una solución estándar de cloruro de potasio (KCl) de 1 412 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C.
3. La medición de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua subterránea se llevó a cabo utilizando un electrodo con sensor de membrana galvánica recubierta, con compensación de temperatura. El electrodo de oxígeno disuelto se calibró de acuerdo con las condiciones atmosféricas del lugar, es decir, en equilibrio con el aire a la elevación sobre el nivel medio del mar del sitio.
4. El potencial redox del agua subterránea se midió con un electrodo de tipo combinado, que consiste de un filamento de platino y un electrodo de referencia de plata-cloruro de plata con electrolito de

referencia de cloruro de potasio 3 mol/l. El elemento sensible donde se realiza la transferencia de electrones es el filamento de platino, por lo que se mantuvo limpio y pulido para evitar mediciones erróneas. En la verificación de operación del electrodo y ajuste de la medición de campo se utilizó una solución Zobell's estándar, Eh de 428 mV (mezcla de ferrocianuro y ferricianuro de potasio).

5. La temperatura ambiente y del agua se midieron con electrodos previamente calibrados en laboratorio y verificados en campo.

Parámetros medidos en laboratorio

La medición de constituyentes químicos disueltos en las muestras de agua subterránea se realizó en el caso de los aniones por medio de cromatografía de iones, y los cationes mediante dos técnicas instrumentales dependiendo de sus concentraciones: espectroscopía de emisión óptica acoplada a inducción de plasma (ICP/OES, por sus siglas en inglés) y por espectrometría de masas acoplada a inducción de plasma (ICP/MS, por sus siglas en inglés). La técnica ICP/MS es aproximadamente mil veces más sensible que la técnica ICP/OES. Los análisis los llevó a cabo el laboratorio Activation Laboratories Ltd de Canadá (ACTLABS). Para el control de calidad analítico del NO_3 (como N), el laboratorio utilizó un estándar de referencia certificado de 2.87 mg/l. En las pruebas de control aplicadas a las mediciones, el error analítico fue menor de 5 %.

Resultados

Lluvia

A las muestras de lluvia que se recolectaron se les determinó su contenido de isótopos estables. Los valores del promedio aritmético y del promedio pesado por la precipitación de las $\delta^{18}\text{O}$ (%) y $\delta^2\text{H}$ (%) se muestran en la Tabla 1. Los valores promediados por la precipitación (δ_P) se calcularon como $\delta_P = \sum P_i * \delta_i / P_T$, donde P_i es la cantidad de lluvia; δ_i , la composición isotópica de la muestra ($\delta^2\text{H}$ o $\delta^{18}\text{O}$), y P_T es la cantidad de precipitación total.

Tabla 1. Valores del promedio aritmético y del promedio pesado por la precipitación de las $\delta^{18}\text{O}$ (%) y $\delta^2\text{H}$ (%).

Sitio	Latitud N	Longitud O	Altitud (msnm)	$\delta^{18}\text{O}$ (%)	$\delta^2\text{H}$ (%)	$\delta^{18}\text{O}_P$ (%)	$\delta^2\text{H}_P$ (%)
Tres Cumbres	19.061267	-99.218317	3290	-10.84	-70.46	-12.18	-81.22
Huitzilac	19.032850	-99.268800	2600	-9.43	-60.99	-10.71	-71.38
Tres Marías	19.051483	-99.246283	2813	-9.31	-59.69	-10.4	-68.91
Cuernavaca	18.942833	-99.215139	1638	-8.6	-57.83	-9.99	-68.12
Temixco	18.857528	-99.223917	1264	-7.45	-49.85	-8.95	-61.11
Tezoyuca	18.800383	-99.196733	1194	-7.43	-50.41	-8.74	-60.05

En la Figura 6 se presenta el promedio pesado por la precipitación de las $\delta^{18}\text{O}$. Los valores más enriquecidos en isótopos pesados corresponden al sitio con menor altitud y temperatura cálida, mientras

que los valores más empobrecidos corresponden a la zona con mayor altitud y temperatura fría.

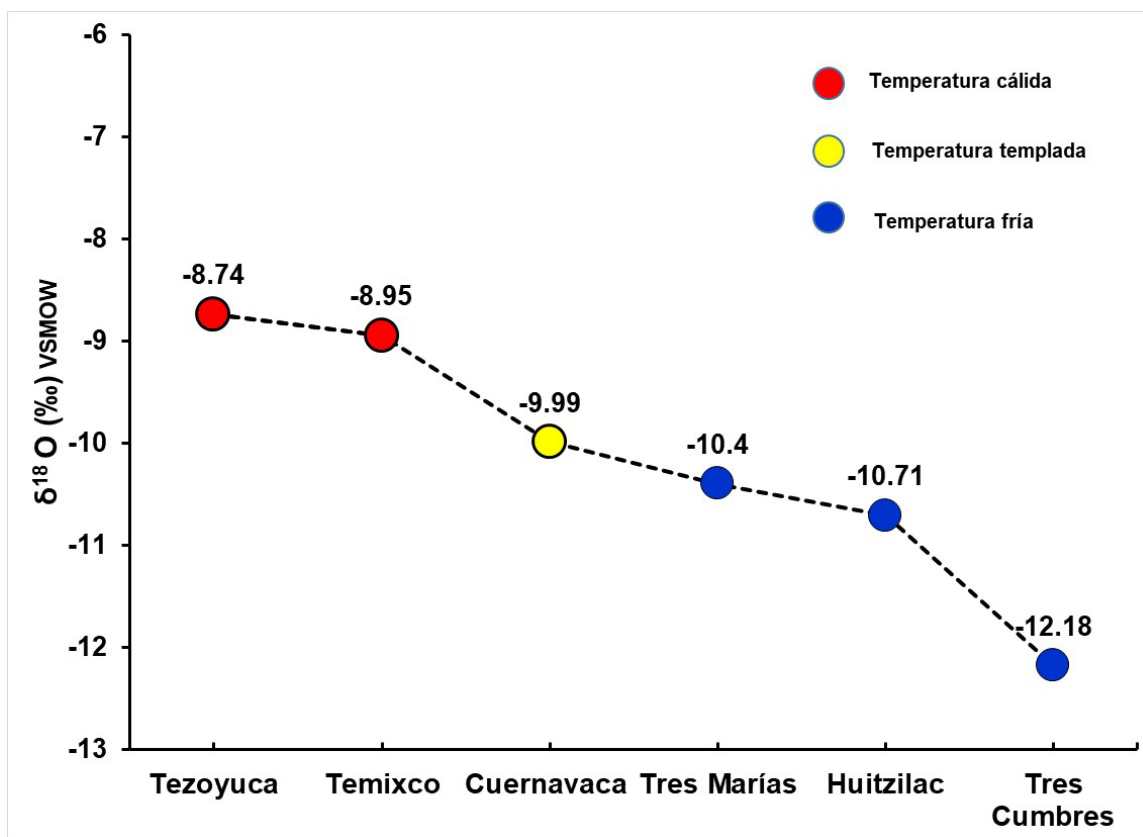


Figura 6. Valores promedio de las $\delta^{18}\text{O}$ en los colectores.

Con los datos del contenido isotópico de las muestras se elaboraron gráficas de la relación $\delta^{18}\text{O}$ ‰ (Vs. VSMOW) contra $\delta^2\text{H}$ ‰ (Vs. VSMOW). En la Figura 7 se muestran los datos de los colectores localizados en la sierra Chichinautzin, y en la Figura 8 los del valle. Por medio de una regresión lineal de mínimos cuadrados de los datos isotópicos se determinaron las líneas de agua meteórica, cuyas ecuaciones son $\delta^2\text{H} =$

$8.15 \delta^{18}\text{O} + 17.86$ (Tres Cumbres); $\delta^2\text{H} = 8.15 \delta^{18}\text{O} + 16.24$ (Tres Marías); $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 14.58$ (Huitzilac); $\delta^2\text{H} = 7.7 \delta^{18}\text{O} + 8.14$ (Cuernavaca); $\delta^2\text{H} = 7.53 \delta^{18}\text{O} + 6.28$ (Temixco); $\delta^2\text{H} = 7.42 \delta^{18}\text{O} + 4.7$ (Tezoyuca).

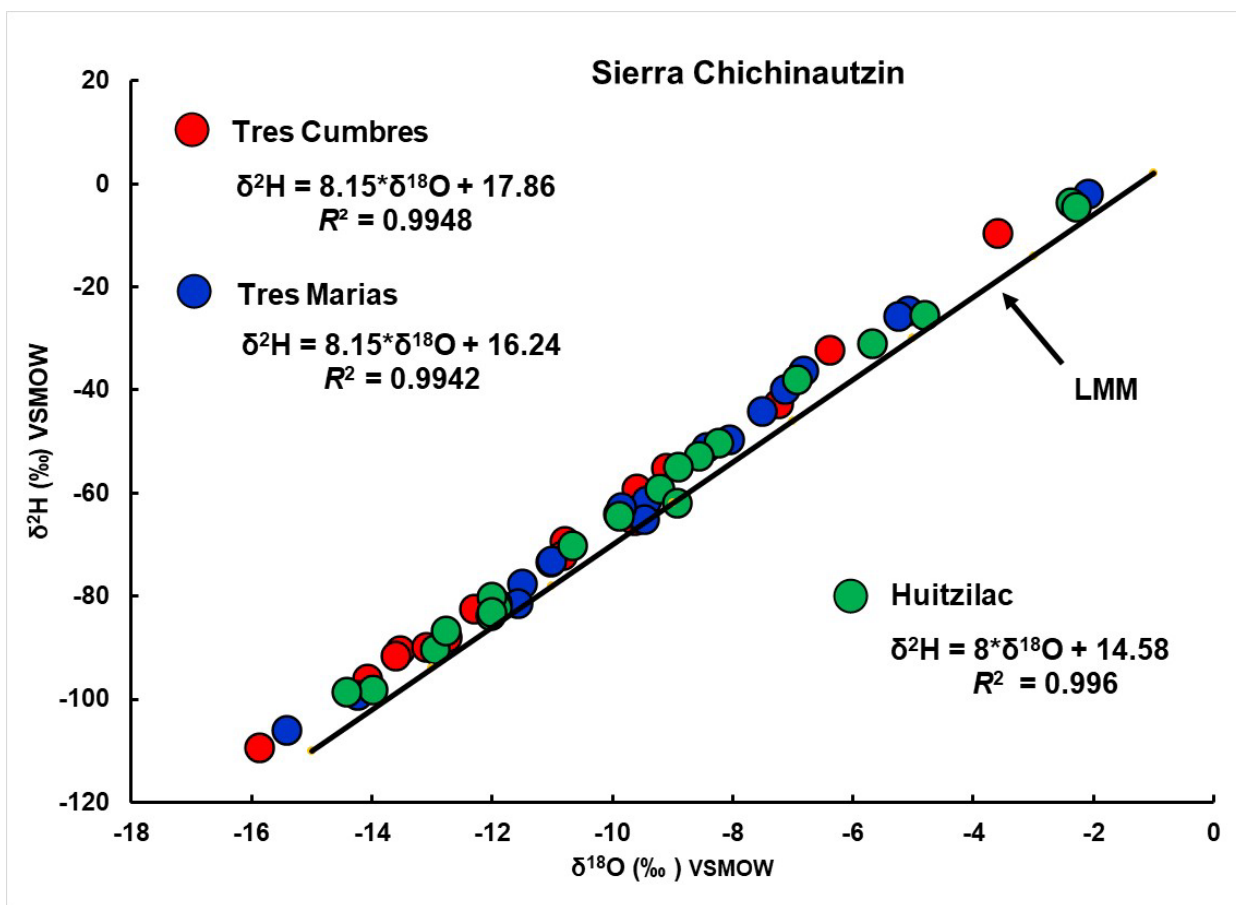


Figura 7. Líneas de agua meteórica de los colectores en la sierra Chichinautzin (Tres Cumbres, Tres Marías y Huitzilac).

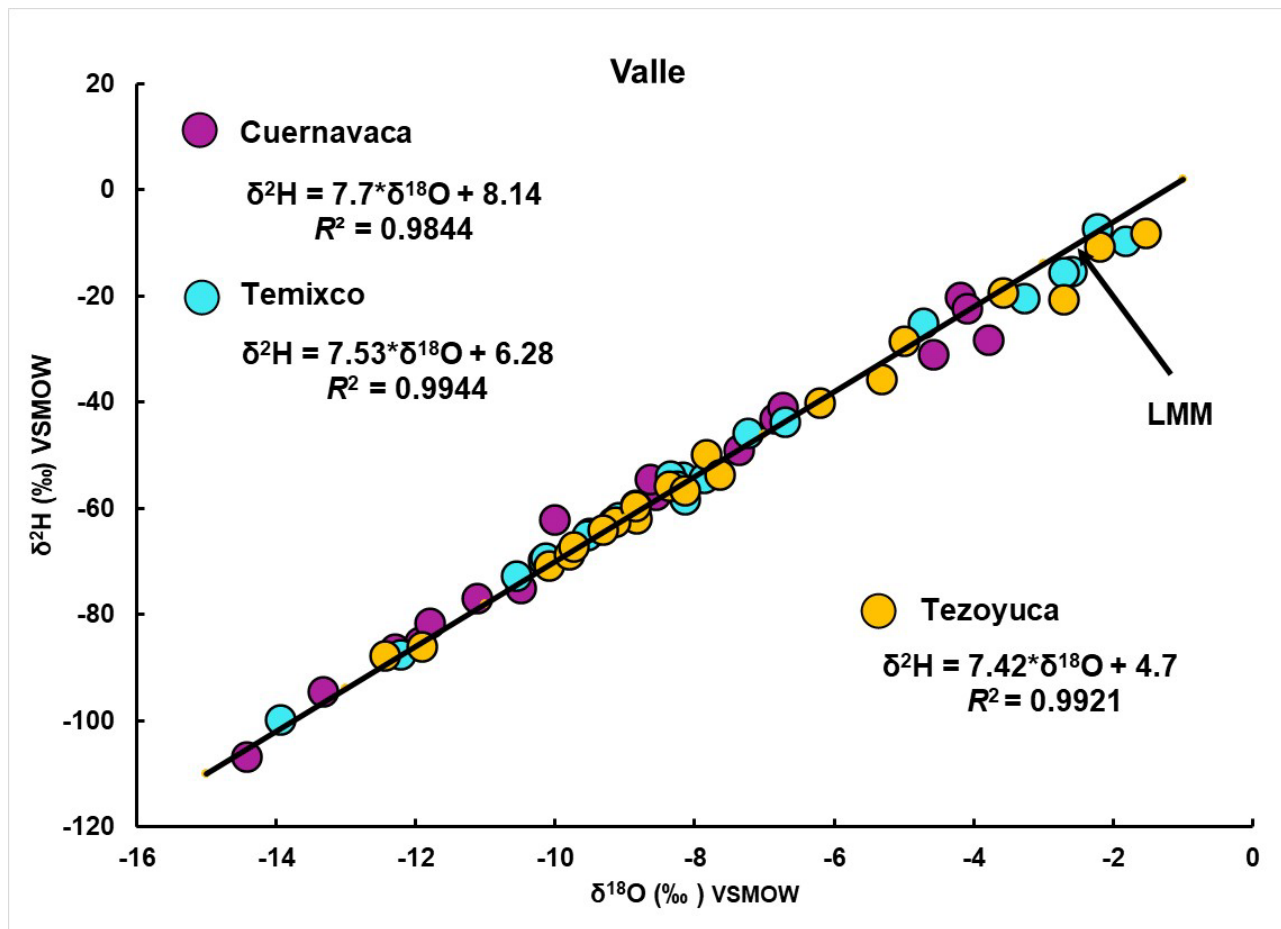


Figura 8. Líneas de agua meteórica de los colectores en el valle (Cuernavaca, Temixco y Tezoyuca).

Tomando en cuenta los datos de todos los colectores (Figura 9), la ecuación de la línea de agua meteórica de la zona del acuífero Cuernavaca es $\delta^2\text{H} = 7.8 \delta^{18}\text{O} + 8.82$, $R^2 = 0.9841$, $n = 118$.

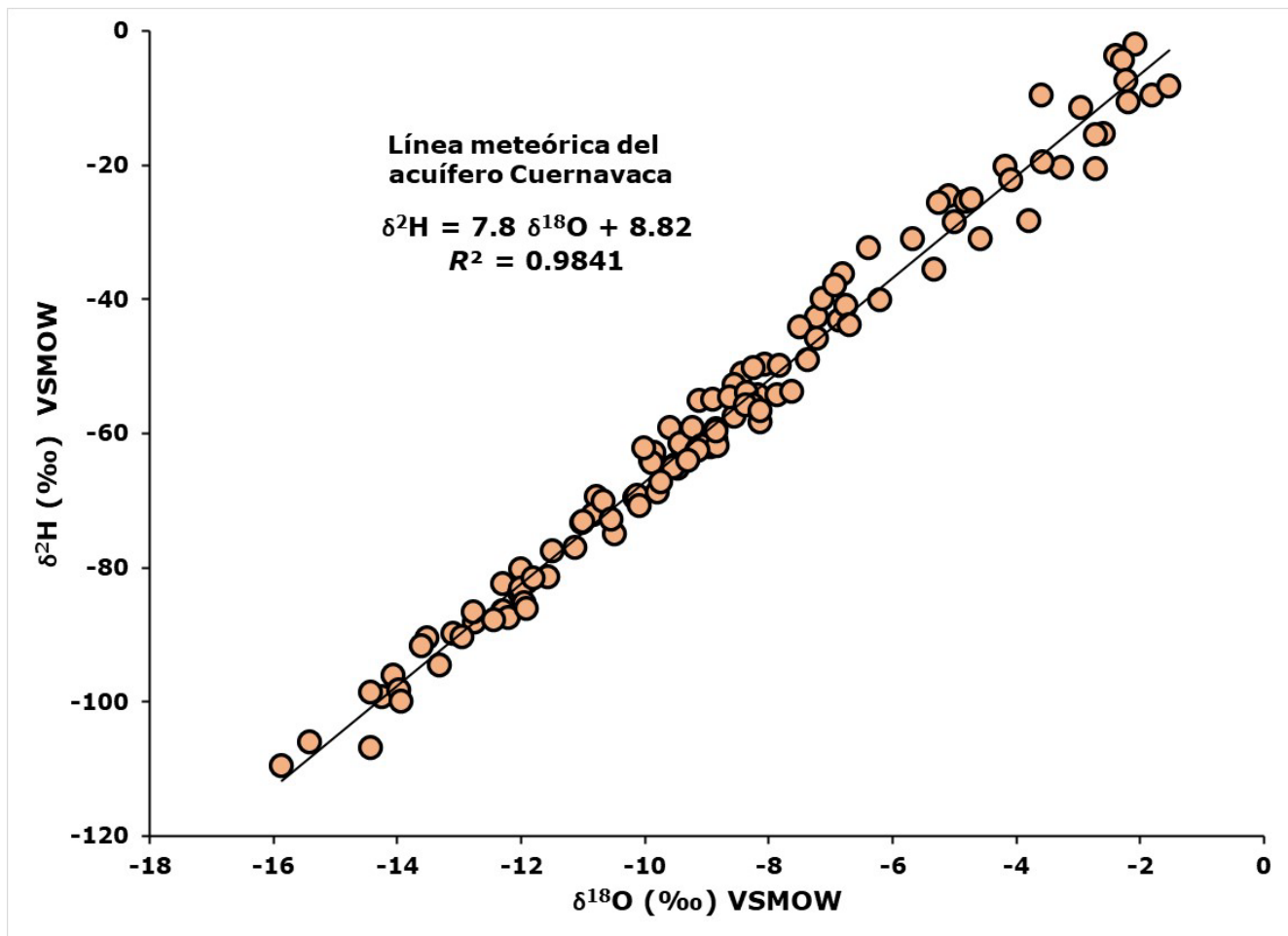


Figura 9. Línea de agua meteórica del acuífero Cuernavaca.

Cuando la evaporación se efectúa en ambientes menores al 100 % de humedad relativa, el fraccionamiento del ^{18}O excede al del ^2H , produciendo vapor con alto contenido de deuterio (exceso de deuterio) relativo al ^{18}O (Martinelli, Victoria, Sternberg, Ribeiro, & Moreira, 1996; Gat, 2000). Este efecto, definido como $d = \delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$, produce un exceso de deuterio (d) de 10 % en la línea de agua meteórica mundial, a

una humedad relativa del 85 % (Merlivat & Jouzel, 1979; Clark & Fritz, 1997).

Las líneas de agua meteórica de los colectores de la sierra (> 2 600 msnm) tienen valores de intercepto (+17.86 %, +16.24 %, +14.58 %) mayores que el valor de la línea meteórica mundial (LMM) (+10 %). Los valores de exceso de deuterio (d) de estos colectores también son mayores que los de la LMM (Figura 10).

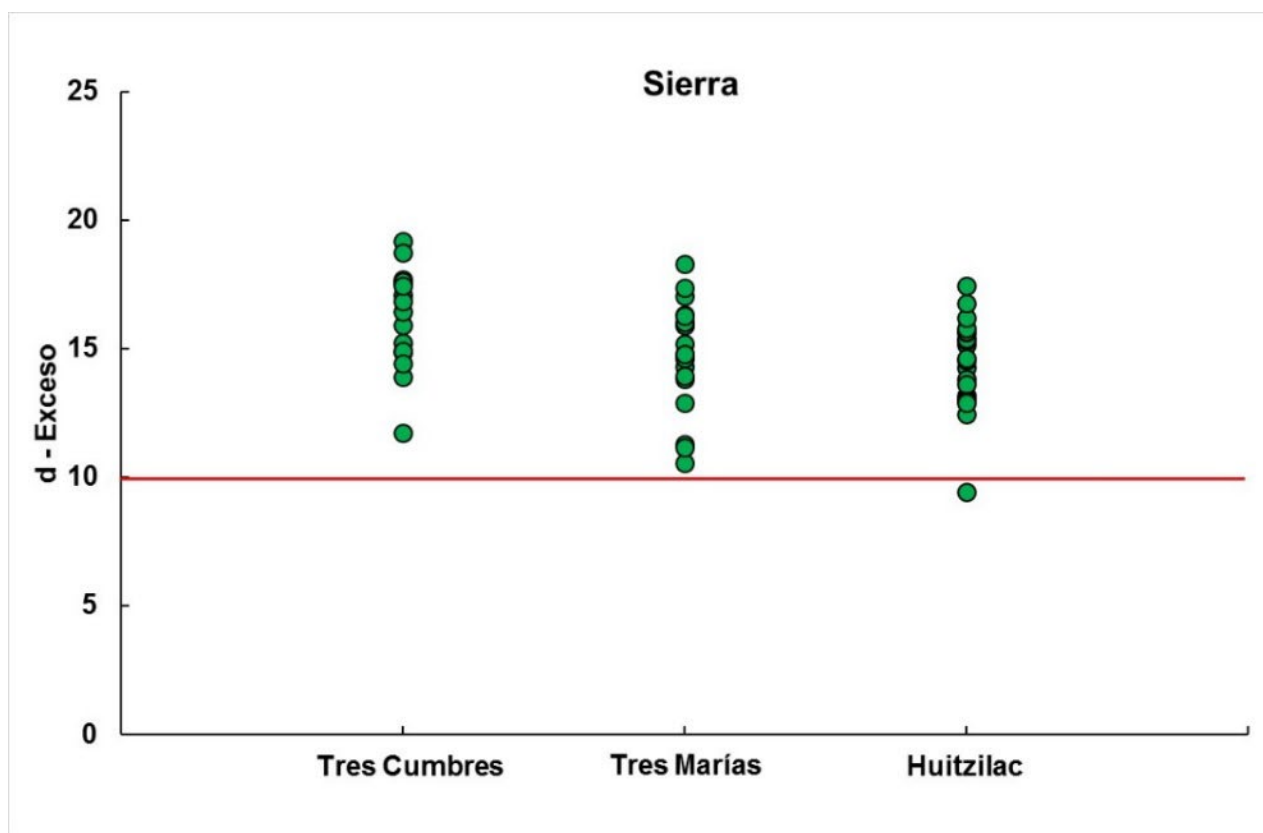


Figura 10. Valores del exceso de deuterio (d) de la lluvia de los colectores localizados en la sierra Chichinautzin.

El vapor generado por la evapotranspiración de las zonas boscosas presenta valores de exceso de deuterio mayores a 10 (Galewsky *et al.*, 2016). Cuando este vapor se condensa produce lluvia con valores de exceso de deuterio mayores a 10. Por lo tanto, los altos valores de exceso de deuterio y de intercepto de la lluvia de Tres Cumbres, Tres Marías y Huitzilac indican que la evapotranspiración es una fuente importante de humedad en la sierra Chichinautzin. Gastmans *et al.* (2017) encontraron un efecto similar en Brasil. Las líneas de agua meteórica de las estaciones de Belo Horizonte, Río de Janeiro, Campo Grande, Carolina, Betania y Río Claro presentaban valores de intercepto mayores a +10 %. Atribuyeron este efecto a la recirculación del vapor que se genera en la selva tropical de la amazonia. Esquivel-Hernández *et al.* (2019) también reportan este efecto en un ecosistema tropical en Ecuador.

Cuando la lluvia es ligera o recién comienza una tormenta en atmósferas áridas, las gotas de lluvia en su descenso desde las nubes hasta el suelo sufren evaporación (Peng, Mayer, Harris, & Roy, 2007); se le conoce como evaporación secundaria o evaporación bajo la nube. El fraccionamiento produce enriquecimiento de las $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, y decrece el exceso de deuterio de la fase líquida (Froehlich, Kralik, Rank, & Scheifinger, 2008; Stewart, 1975; Dansgaard, 1964). Cuando la precipitación es muy intensa o de larga duración, el medio ambiente se satura y la evaporación secundaria se detiene.

En el caso del valle de Cuernavaca, con dos colectores localizados en clima muy cálido (Temixco y Tezoyuca), los valores de exceso de deuterio más bajos corresponden con las precipitaciones más pequeñas, lo cual indica evaporación secundaria de la lluvia ligera (Figura 11). Con

respecto a las precipitaciones más abundantes, sus valores de exceso de deuterio son similares al valor de la LMM (+10 %), lo cual indica que estas muestras no se evaporaron (Figura 11). Por lo tanto, las líneas meteóricas de los colectores del valle de Cuernavaca tienen valores de intercepto (+8.14 %, +6.28 %, +4.7 %) menores que el valor de la LMM (+10 %), debido al efecto de evaporación secundaria.

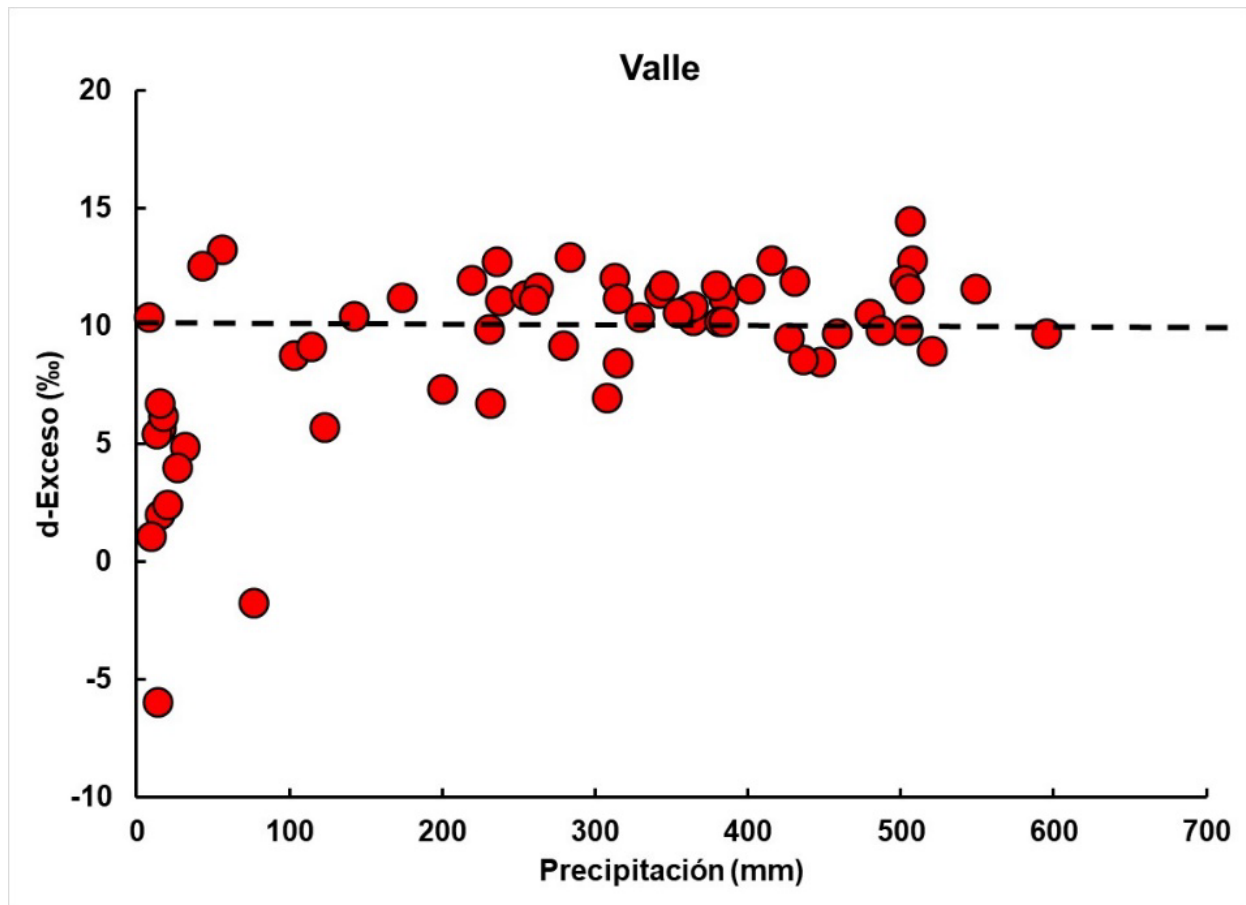


Figura 11. Valores del exceso de deuterio (d) *versus* precipitación de los colectores localizados en el valle del acuífero Cuernavaca.

El gradiente isotópico altitudinal es representado por la ecuación (Figura 12) $\delta^{18}\text{O} = -0.0014 (Z) - 7.1933$ con $R^2 = 0.8792$ (Z en metros). Por lo cual, el gradiente vertical es de $-0.14 \text{ ‰}/100 \text{ m}$. En la Figura 12, los valores de $\delta^{18}\text{O}$ corresponden a los promedios pesados por la precipitación. Este gradiente vertical es similar al que encontraron Scholl, Gingerich y Tribble (2002) ($-0.12 \text{ ‰} \times 100 \text{ m}^{-1}$) para la lluvia de Maui, Hawaii; y Otte *et al.* (2017) ($-0.11 \text{ ‰} \times 100 \text{ m}^{-1}$) para la lluvia del monte Kilimanjaro, Tanzania. El efecto de altitud explica el 87 % de la variación de la composición isotópica ($R^2 = 0.87$).

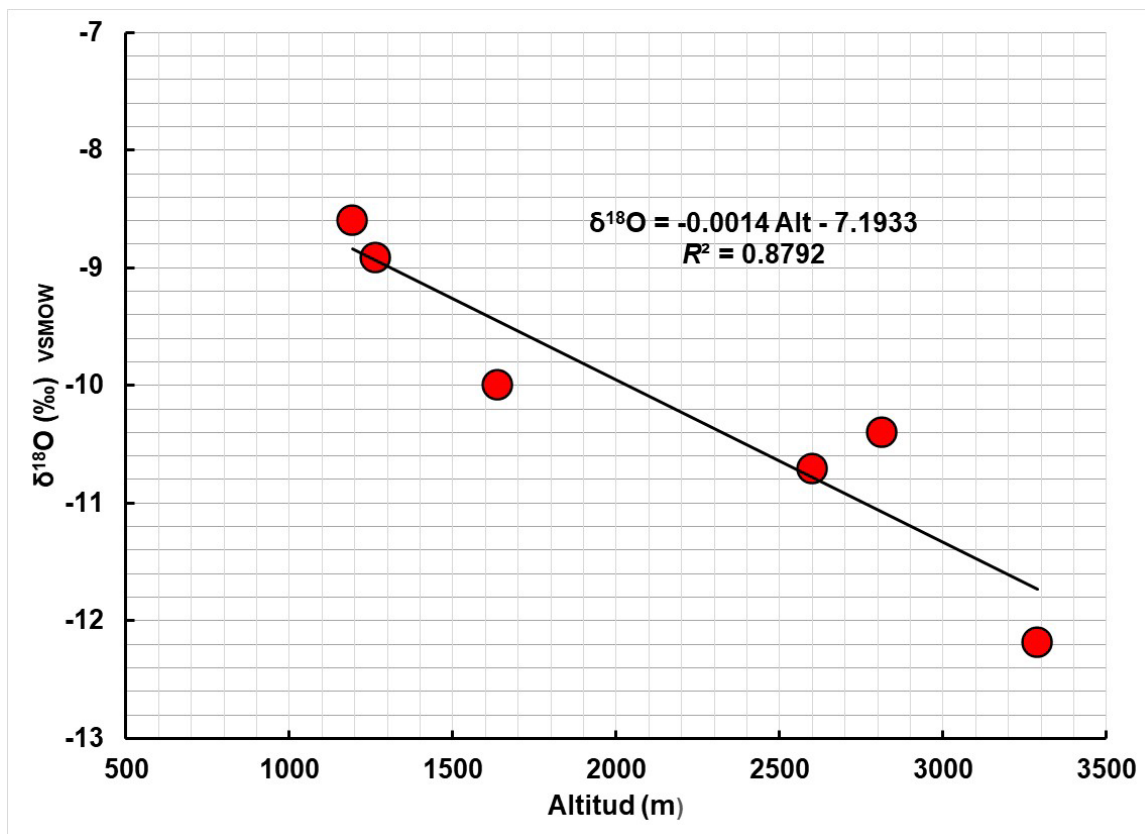


Figura 12. Gradiente isotópico altitudinal de la $\delta^{18}\text{O}$.

Agua subterránea

En las Tablas 2a, 2b, 2c y 2d se presentan los valores de los parámetros físico-químicos medidos en campo y laboratorio del agua de los aprovechamientos del sur del acuífero Cuernavaca.

Tabla 2a. Parámetros físico-químicos del agua de los aprovechamientos del sur del acuífero Cuernavaca.

Identificación	Fecha	Coordenadas			Temperatura ambiente (°C)	Temperatura de la muestra (°C)	pH	CE (μS/cm)	OD (mg/l)
		X	Y	Altitud					
Pozo 1	30/01/2014	18°47.813	99°12.198	1186	21.2	19.4	6.85	641	0.30
Pozo 2	30/01/2014	18°48.792	99°11.058	1217	28.5	20.0	6.86	268	5.60
Pozo 3	31/01/2014	18°48.829	99°11.266	1220	23.3	22.7	7.07	620	7.30
Pozo 4	31/01/2014	18°48.500	99°12.030	1202	23.8	19.4	7.45	506	0.60
Pozo 5	04/02/2014	18°49.838	99°11.727	1219	23.7	24.0	6.75	902	6.50
Pozo 6	04/02/2014	18°49.650	99°10.865	1241	24.1	22.8	6.88	674	4.30
Pozo 7	05/02/2014	18°50.296	99°10.222	1241	25.5	22.7	6.81	831	3.90
Pozo 8	05/02/2014	18°48.588	99°11.713	1203	31.1	19.8	7.40	281	0.80
Pozo 9	06/02/2014	18°46.368	99°11.089	1138	23.9	20.6	6.80	279	5.20
Pozo 10	06/02/2014	18°48.376	99°11.538	1280	22.9	21.1	7.13	697	1.50
Pozo 11	06/02/2014	18°47.580	99°11.667	1182	26.7	19.5	7.29	777	0.90
Manantial San Ramón	08/02/2014	18°47.519	99°11.983	1189	27.0	20.5	6.80	1207	0.60
Pozo 12	08/02/2014	18°46.893	99°12.576	1151	29.7	22.6	6.94	1270	4.30
Manantial Chihuahuita	18/02/2014	18°45.385	99°11.338	1096	30.7	20.4	6.69	392	4.80
Pozo 13	19/02/2014	18°49.216	99°12.782	1232	27.6	22.4	6.97	542	3.50
Manantial Palo Bolero	18/09/2014	18°46.015	099°14.312	1482	31.2	21.7	6.60	2240	1.08

Tabla 2b. Parámetros físico-químicos del agua de los aprovechamientos del sur del acuífero Cuernavaca (continuación).

Identificación	Fecha	NO ₃ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	Na (mg/l)	Li (mg/l)	Mg (mg/l)	Al (mg/l)	Si (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Ti (μg/l)	V (μg/l)	Mn (mg/l)
Pozo 1	30/01/2014	5.79	0.1530	145	13	0.028	27	0.020	25	2.2	100	< 2	< 2	0.0048
Pozo 2	30/01/2014	16.71	0.0306	26	17	0.005	14	0.010	26	3.0	30	< 1	14.8	0.0022
Pozo 3	31/01/2014	17.11	0.1530	82	23	0.032	22	0.010	29	4.4	86	< 1	11.7	0.0020
Pozo 4	31/01/2014	9.95	0.1530	77	14	0.010	19	0.020	25	2.3	64	< 2	4.2	0.0034
Pozo 5	04/02/2014	42.08	0.1530	97	54	0.010	25	0.020	31	6.8	109	< 2	4.6	0.0050
Pozo 6	04/02/2014	28.02	0.1530	69	24	0.012	33	0.010	35	5.3	72	2.9	13.3	0.0005
Pozo 7	05/02/2014	26.87	0.1530	102	29	0.013	38	0.010	34	5.3	96	2.8	12.6	0.0005
Pozo 8	05/02/2014	11.54	0.1530	67	15	0.016	19	0.449	28	2.7	57	24.1	12.6	0.0275
Pozo 9	06/02/2014	16.84	0.5508	30	16	0.010	14	0.043	27	2.8	33	< 2	10.8	0.0034
Pozo 10	06/02/2014	14.19	3.0600	52	18	0.010	24	0.020	28	3.5	79	< 2	3.6	0.0030
Pozo 11	06/02/2014	6.19	0.1530	240	13	0.023	32	0.001	25	2.4	127	1.8	5.5	0.0055
Manantial San Ramón	08/02/2014	0.11	0.1530	429	16	0.054	49	0.020	24	2.8	230	< 2	< 2	0.0054
Pozo 12	08/02/2014	9.50	0.1530	451	20	0.059	56	0.010	29	3.7	225	2.4	1.6	0.0005
Manantial Chihuahuita	18/02/2014	19.14	0.0306	33	14	0.005	13	0.112	23	2.5	32	2.6	15.7	0.0005
Pozo 13	19/02/2014	27.32	0.1530	45	22	0.031	36	0.010	37	2.6	34	2.7	14.1	0.0005
Manantial Palo Bolero	18/09/2014	0.0001	0.0001	1100	20	0.060	86	0.020	24	3.2	437	2.8	< 2	0.0010

Tabla 2c. Parámetros físico-químicos del agua de los aprovechamientos del sur del acuífero Cuernavaca (continuación).

Identificación	Fecha	Fe (mg/l)	Co (µg/l)	Cu (mg/l)	As (mg/l)	Rb (µg/l)	Sr (µg/l)	Mo (µg/l)	Cs (µg/l)	Ba (µg/l)	Tl (µg/l)	Pb (mg/l)	U (µg/l)	Tritio ambiental (UT)	Error % balance iónico
Pozo 1	30/01/2014	0.1	< 0.1	0.002	0.05	5.7	584	10.0	1.34	35.6	0.800	0.00010	0.86	0.83	2.14
Pozo 2	30/01/2014	0.05	0.070	0.002	0.0002	7.6	188	1.0	0.24	33.4	0.020	0.00200	0.76	0.79	2.87
Pozo 3	31/01/2014	0.05	< 0.05	0.001	0.01	4.0	979	1.0	8.28	102.0	0.020	0.00005	1.91	2.17	10.67
Pozo 4	31/01/2014	0.1	< 0.1	0.002	0.04	5.5	502	6.0	0.60	85.0	0.280	0.00010	1.25	0.76	6.86
Pozo 5	04/02/2014	0.1	0.540	0.006	0.01	12.1	321	2.0	0.48	90.2	0.140	0.00200	2.31	2.16	2.32
Pozo 6	04/02/2014	0.05	0.070	0.001	0.00	8.8	515	1.0	0.08	161.0	0.040	0.00005	2.76	1.35	2.23
Pozo 7	05/02/2014	0.05	0.140	0.001	0.00	8.3	736	1.0	0.04	264.0	0.040	0.00005	4.76	2.11	0.03
Pozo 8	05/02/2014	0.05	< 0.05	0.002	0.05	6.9	614	5.0	0.47	83.6	0.050	0.00200	1.43	0.12	0.08
Pozo 9	06/02/2014	0.1	< 0.1	0.002	0.0003	7.1	224	< 2	0.20	53.4	0.060	0.01000	0.95	0.75	4.67
Pozo 10	06/02/2014	0.1	< 0.1	0.002	0.03	7.6	950	2.0	0.58	136.0	0.100	0.00010	2.16	1.53	1.03
Pozo 11	06/02/2014	0.005	0.023	0.001	0.07	6.9	1430	10.0	1.25	29.2	0.440	0.00240	0.56	0.86	3.62
Manantial San Ramón	08/02/2014	0.1	< 0.1	0.002	0.03	8.1	1550	2.0	2.46	21.2	0.160	0.00010	0.24	0.12	0.97
Pozo 12	08/02/2014	0.05	0.050	0.001	0.03	11.8	1960	2.0	2.02	30.9	0.080	0.00005	0.25	0.86	1.11
Manantial Chihuahuita	18/02/2014	0.05	0.070	0.001	0.00	6.8	239	1.0	0.21	46.7	< 0.01	0.00005	0.91	0.12	8.16
Pozo 13	19/02/2014	0.05	0.060	0.003	0.00	5.5	333	< 1	0.14	39.0	< 0.01	0.00200	3.05	1.47	0.77
Manantial Palo Bolero	18/09/2014	0.46	< 0.1	0.002	0.00	10.3	3180	< 2	3.04	14.4	< 0.02	0.00040	0.02		0.55

Tabla 2d. Parámetros físico-químicos del agua de los aprovechamientos del sur del acuífero Cuernavaca (final).

Identificación	Fecha	Redox Muestra (mV)	Alcalinidad Total (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	SDT (mg/l)	Dureza Total (mg/l)	δ ¹⁸ O (‰)	δ ² H (‰)	Exceso de deuterio (d)	F (mg/l)	Cl (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	Br (mg/l)
Pozo 1	30/01/2014	152	212	259	462	361	-11.0	-77.4	10.9	0.59	8	0.082	0.05
Pozo 2	30/01/2014	477	121	148	193	131	-10.7	-74.4	11.2	0.23	9	0.016	0.13
Pozo 3	31/01/2014	349	168	205	446	305	-10.3	-73.1	9.6	0.41	27	0.082	1.12
Pozo 4	31/01/2014	453	211	257	364	240	-10.8	-76.7	10.1	0.56	16	0.082	0.45
Pozo 5	04/02/2014	354	256	312	649	375	-10.0	-71.7	7.9	0.60	86	0.082	3.71
Pozo 6	04/02/2014	370	232	283	485	315	-9.8	-70.6	8.2	0.23	39	0.082	1.34
Pozo 7	05/02/2014	429	277	338	598	396	-10.1	-71.9	8.8	0.21	58	0.082	2.28
Pozo 8	05/02/2014	434	160	195	202	222	-10.8	-75.7	10.7	0.88	20	0.082	0.79
Pozo 9	06/02/2014	278	144	176	201	138	-10.6	-74.4	10.4	0.26	12	0.016	0.17
Pozo 10	06/02/2014	402	240	293	502	294	-10.3	-73.8	8.3	0.05	36	0.033	1.21
Pozo 11	06/02/2014	255	184	224	559	447	-11.0	-77.8	10.6	0.74	8	0.082	0.05
Manantial San Ramón	08/02/2014	36	328	400	869	775	-11.0	-77.0	11.3	0.95	16	0.082	0.05
Pozo 12	08/02/2014	320	323	394	914	791	-10.9	-76.6	10.4	0.62	21	0.082	0.05
Manantial Chihuahuita	18/02/2014	425	144	176	282	133	-10.6	-74.2	10.7	0.31	13	0.016	0.19
Pozo 13	19/02/2014	389	208	254	390	233	-10.4	-73.4	9.4	0.28	17	0.082	0.05
Manantial Palo Bolero	18/09/2014	120	307	375	1613	1448	-11.0	-76.7	11.5	0.76	19	0.0001	150

El rango de la temperatura del agua va de 19.4 a 24 °C; el oxígeno disuelto de 0.3 a 7.3 mg/l; el pH de 6.6 a 7.45, y los SDT de 193 a 1 613 mg/l. Las concentraciones de nitrato abarcan de 0 a 42 mg/l, por lo que ninguna muestra excede el límite permisible de 44.3 mg/l. El principal anión es el HCO₃⁻, con el siguiente orden de abundancia HCO₃⁻» SO₄²⁻» Cl⁻»NO₃⁻ (Figura 13).

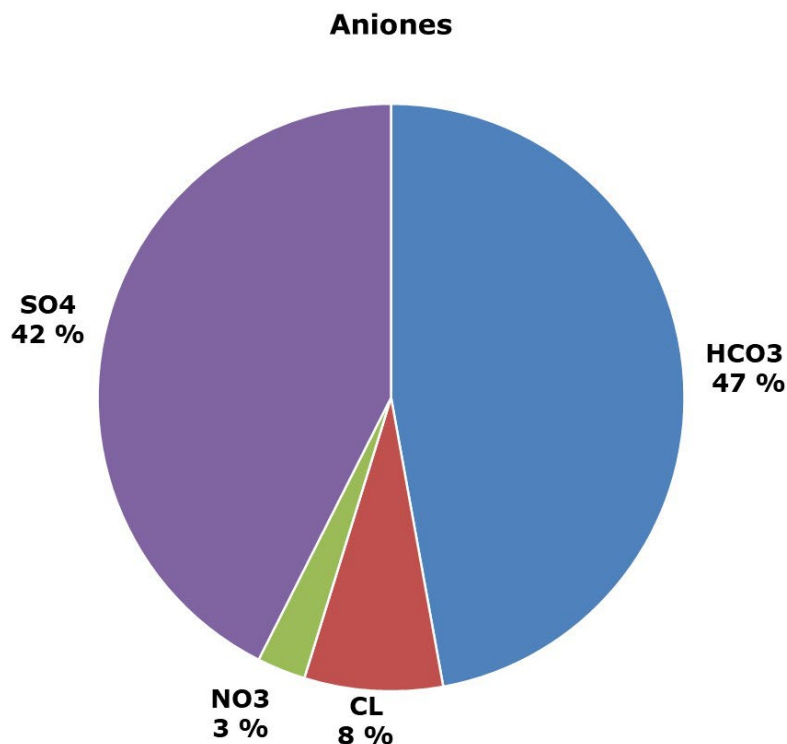


Figura 13. Composición de aniones del agua subterránea (% en meq/l).

El principal catión es el Ca^{2+} , con el siguiente orden de abundancia $\text{Ca}^{2+} \gg \text{Mg}^{2+} \gg \text{Na}^+ \gg \text{K}^+$ (Figura 14).

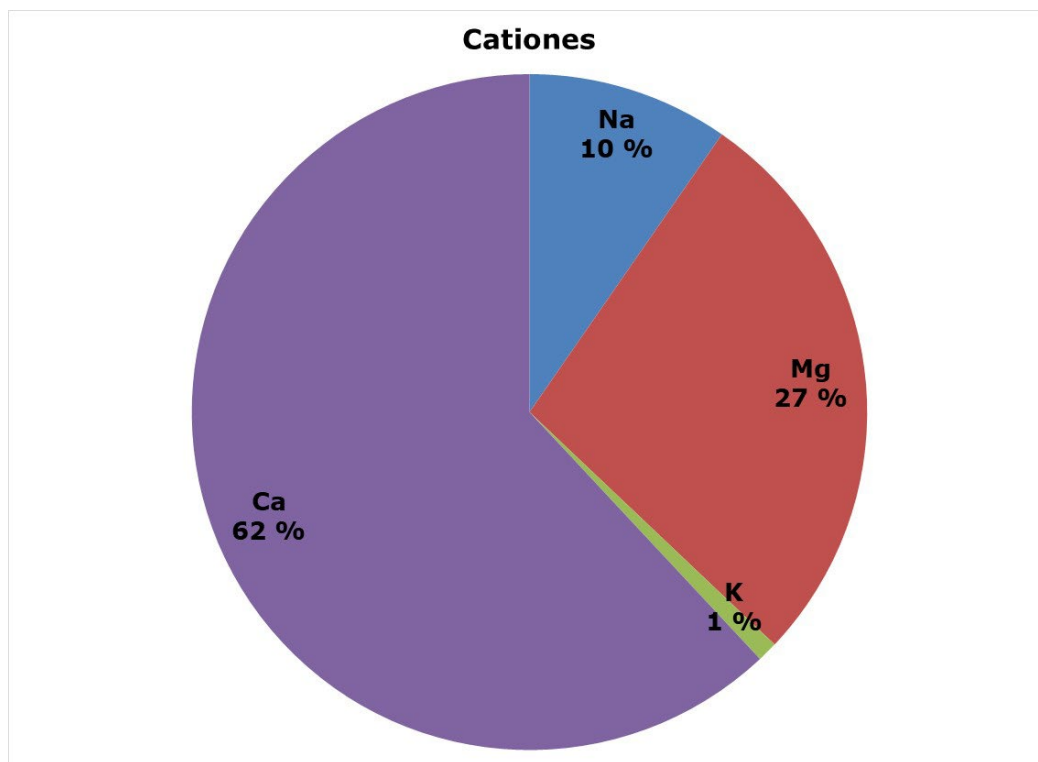


Figura 14. Composición de cationes del agua subterránea (% en meq/l).

El flujo a través de la formación Chichinautzin produce aguas del tipo Ca-Mg-HCO₃ (Figura 15) (manantial Chihuahuita, pozo 9 y pozo 2). El flujo en las formaciones Cuernavaca y Balsas produce aguas del tipo Ca-Mg-HCO₃-SO₄ (pozo 1, pozo 4 y pozo 8). El flujo a través de las formaciones Morelos y Cuautla produce aguas del tipo Ca-Mg-SO₄-HCO₃ (manantial Palo Bolero, manantial San Ramón, pozo 11 y pozo 12). Un grupo de pozos (3, 5, 6, 7, 10 y 13) presenta mayores concentraciones de cloruro que el resto de los aprovechamientos.

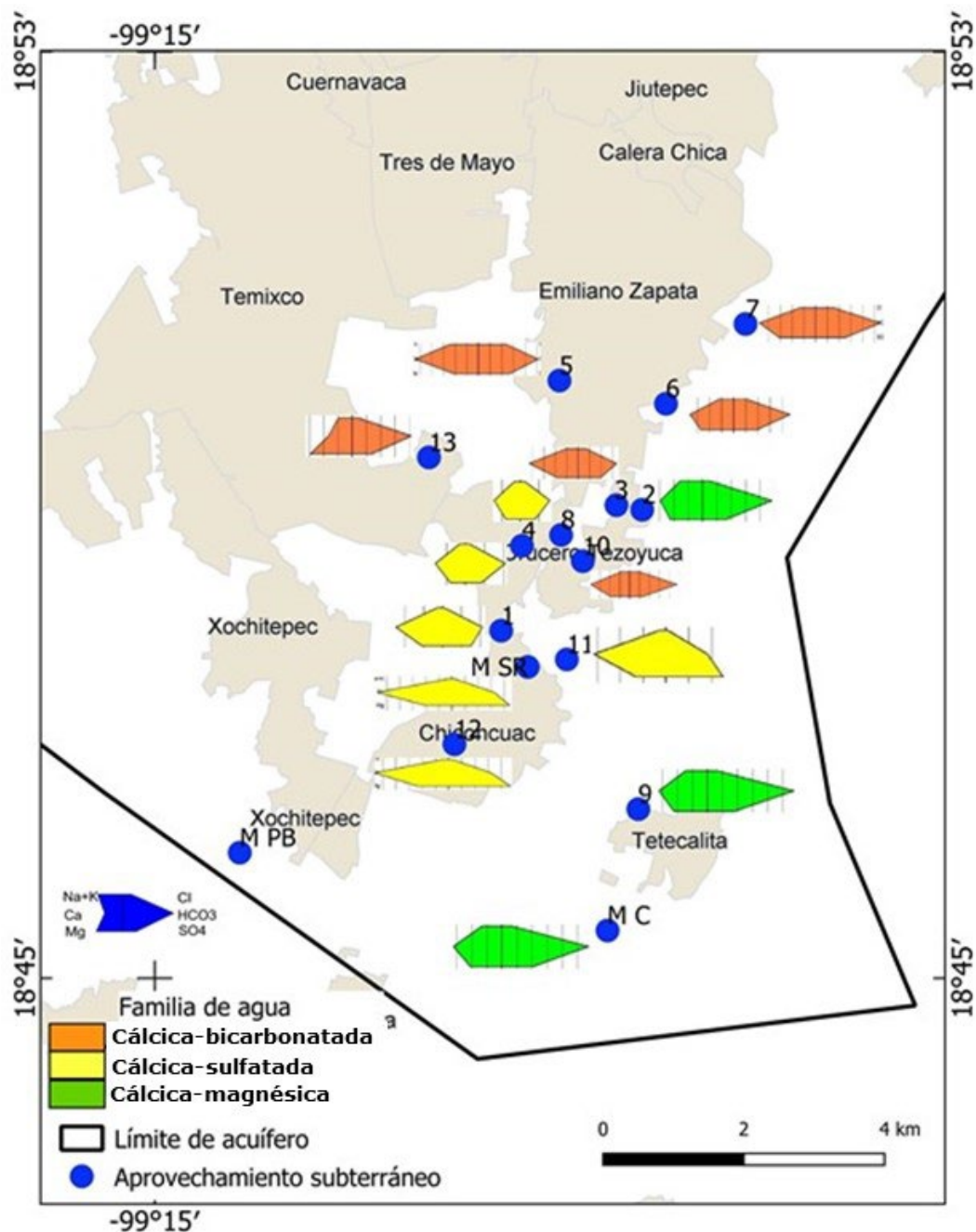


Figura 15. Diagramas de Stiff de las muestras de aprovechamientos de agua subterránea.

La concentración de nitratos (NO_3^-) correspondiente al año 2014 presentó niveles menores de 5 mg/l hacia la porción oriente del acuífero, donde predominan rocas de la formación Chichinautzin, compuestas sobre todo por basaltos fracturados (Figura 16). Contrariamente, la porción poniente mostró los niveles más altos de nitratos, con concentraciones mayores a 30 mg/l, en la cual se ubica la zona urbana de Temixco-Acatlipa (Figura 16). La mayor parte de la zona urbana de Cuernavaca, Jiutepec, y Emiliano Zapata presenta concentraciones que van de 10 a 20 mg/l (Figura 16).

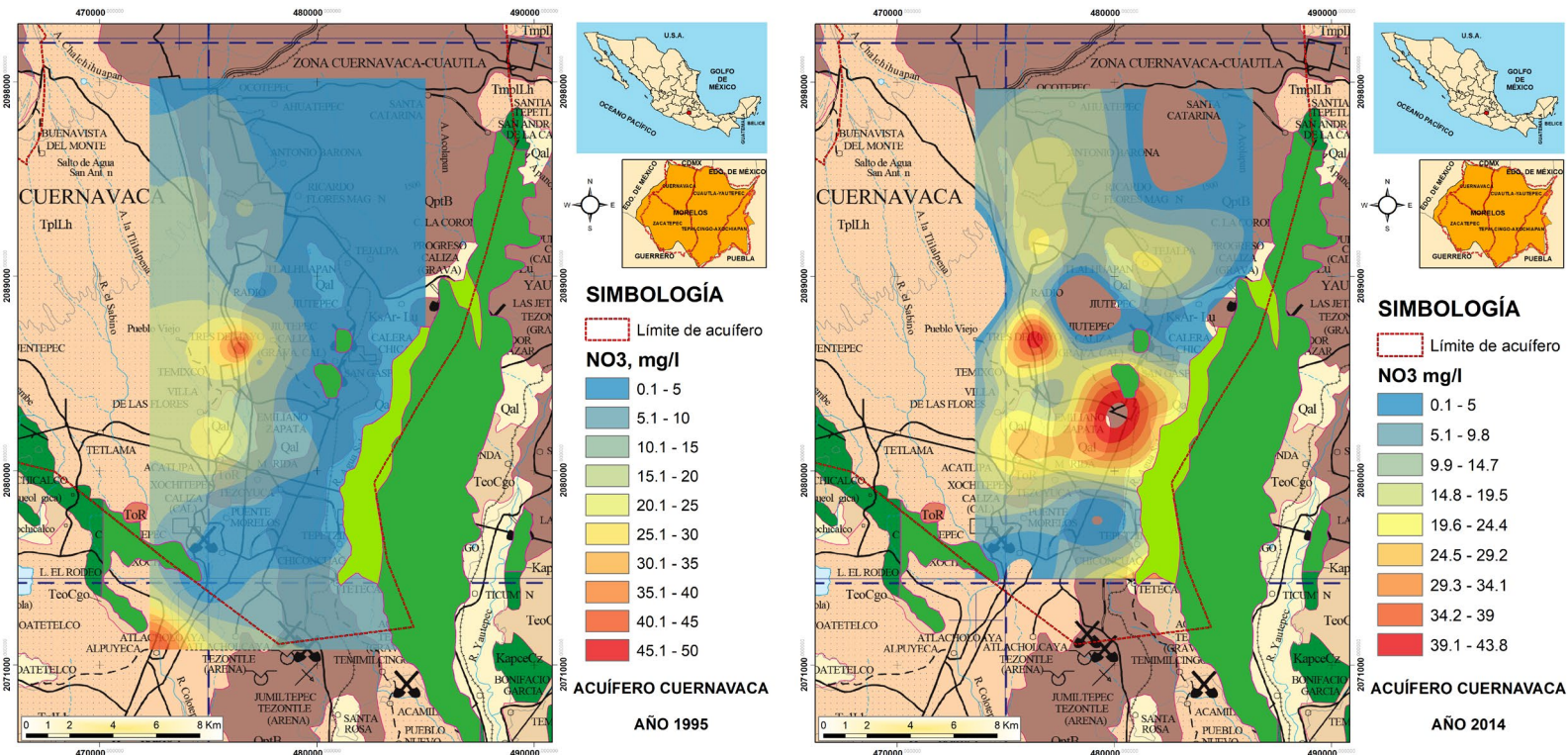


Figura 16. Concentraciones de nitratos en 1995 y 2014.

Es importante notar en los pozos que presentan concentraciones elevadas de nitrato las mayores concentraciones de uranio (Figura 17). La ingesta de agua potable con concentraciones altas de uranio puede provocar daños al hígado (Brugge & Buchner, 2011) y los huesos debido a la radiación alfa (Kurtio *et al.*, 2005). La OMS estableció un límite máximo permisible de 15 $\mu\text{g/l}$ para el uranio (WHO, 2008).

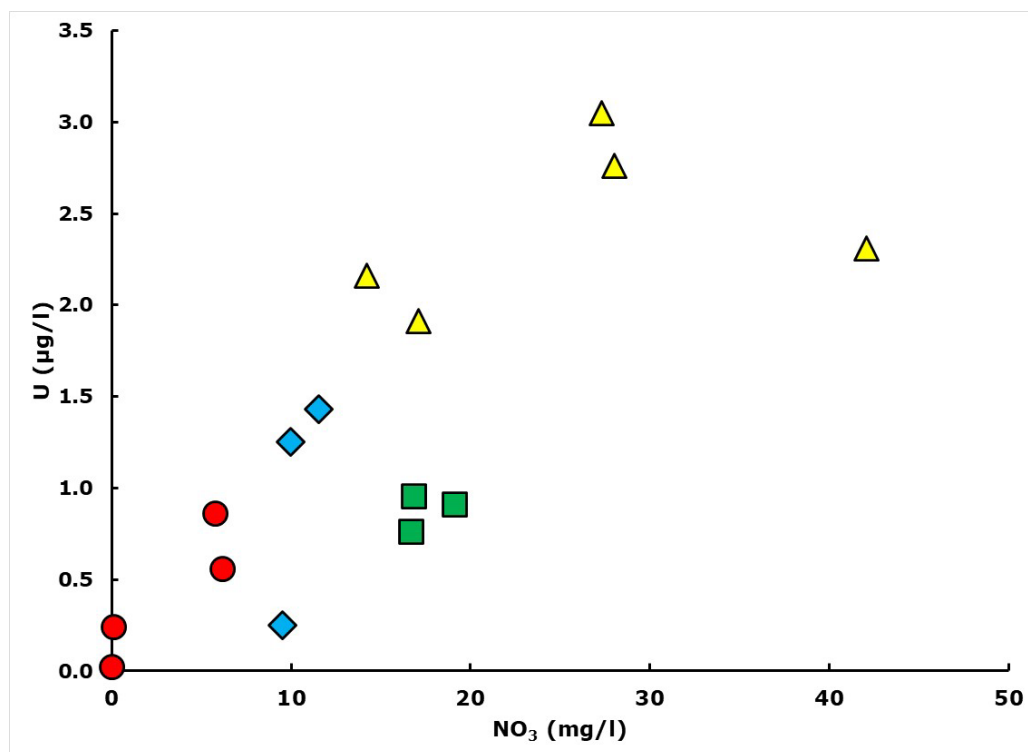


Figura 17. Uranio *versus* nitrato.

Los estados oxidados del uranio U(VI) son solubles en el agua subterránea, mientras que las especies reducidas U(IV) son inmóviles (Singh *et al.*, 2014; Nolan & Weber, 2015; Paradis *et al.*, 2016). Las especies reducidas del uranio U(IV) son muy susceptibles a ser oxidadas

cuando el agua subterránea contiene especies oxidantes como el nitrato (NO_3^- , y NO_2^-). Nolan y Weber (2015) encontraron en dos de los principales acuíferos de EUA, High Plains y Central Valley, una correlación significativa entre nitrato y uranio. Concluyen que el nitrato, el contaminante primario de estos acuíferos, debe considerarse como un factor que induce contaminación secundaria de uranio.

Isótopos estables

Los contenidos de isótopos estables de oxígeno e hidrógeno en un gráfico de dispersión $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ permiten identificar y diferenciar los tipos de agua captados por cada aprovechamiento analizado (Figura 18). En el gráfico se identifican cuatro grupos de aguas caracterizados por la altitud a la cual se efectúa la recarga efectiva de los flujos subterráneos. El primero de ellos corresponde a aprovechamientos que captan agua de composición isotópica empobrecida, con valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -11.05 y -11.02 ‰, y $\delta^2\text{H}$ entre -77.75 y -76.71 ‰ (pozos 1 y 11, así como los manantiales San Ramón y Palo Bolero) debido a que su zona de recarga se localiza en cotas más elevadas que las correspondientes al resto de los aprovechamientos muestreados.

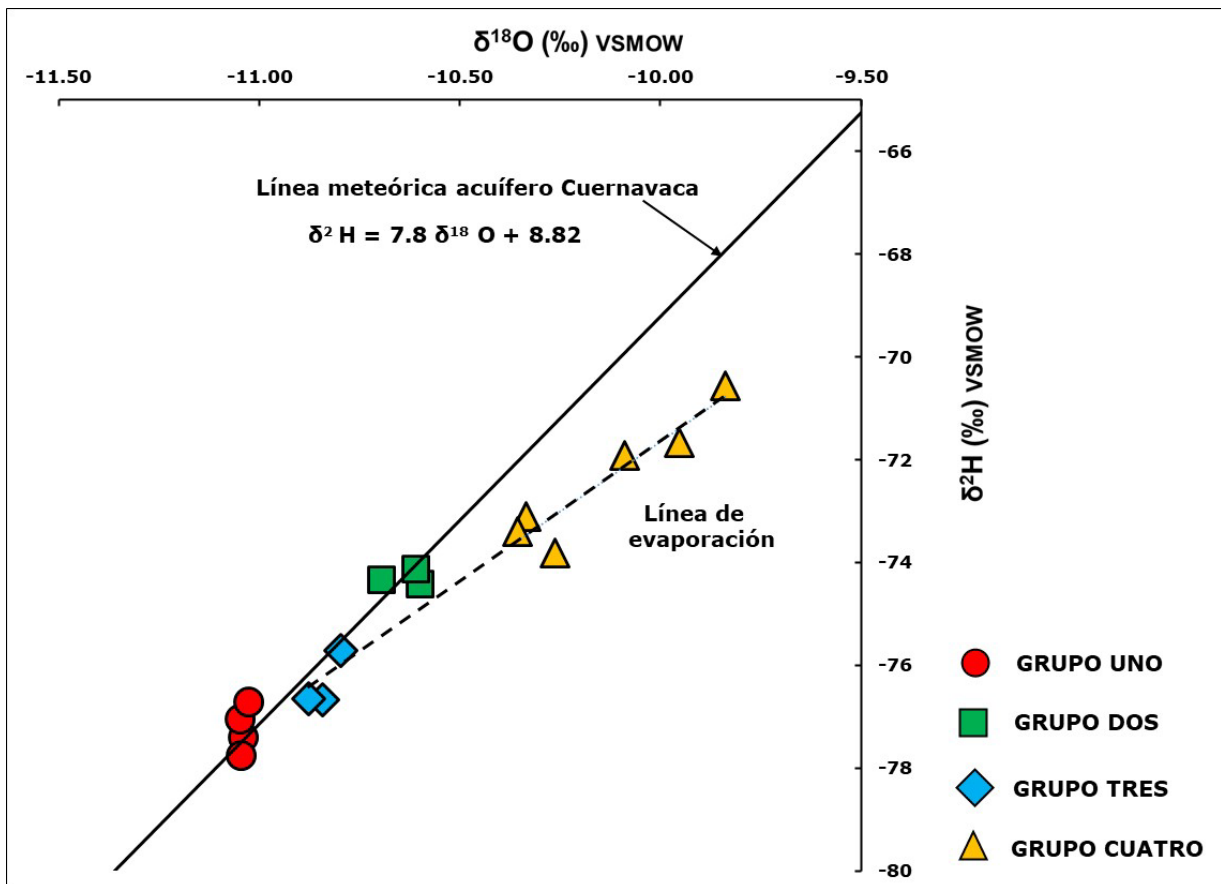


Figura 18. Composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) del agua de los aprovechamientos subterráneos.

El segundo grupo está caracterizado por presentar valores $\delta^{18}\text{O}$ entre -10.69 y -10.60 ‰, y $\delta^2\text{H}$ entre -75.6 y -74.1 ‰, el cual corresponde a las zonas de recarga con menor elevación (pozos 2, 9 y manantial Chihuahuita).

Un tercer grupo se conforma por los pozos 4, 8 y 12, que captan agua con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ intermedios entre el grupo uno y dos.

El cuarto grupo corresponde a aguas que han evolucionado isotópicamente a partir de los grupos anteriores debido a que contienen componentes de agua enriquecida en isótopos pesados por haber experimentado evaporación intensa. Los valores delta se alinean sobre una recta de evaporación de coeficiente angular menor al de la línea meteórica del acuífero Cuernavaca (LMAC). Dicho grupo está conformado por los pozos 3, 5, 6, 7, 10 y 13. En la zona donde se localizan tales aprovechamientos existen extensas áreas de cultivo irrigadas mediante agua rodada, un campo de golf y diversos canales de aguas residuales. Las composiciones isotópicas varían para la $\delta^{18}\text{O}$ entre -10.35 y -9.84 ‰, y para la $\delta^2\text{H}$ entre -73.4 y -70.6 ‰. Este cuarto grupo se denominó aprovechamientos con recarga de agua evaporada.

En la Figura 19 se observa para el cuarto grupo un incremento proporcional de la $\delta^{18}\text{O}$ y el Cl^- , evidenciando recarga con agua sometida a evaporación intensa antes de infiltrarse en el suelo.

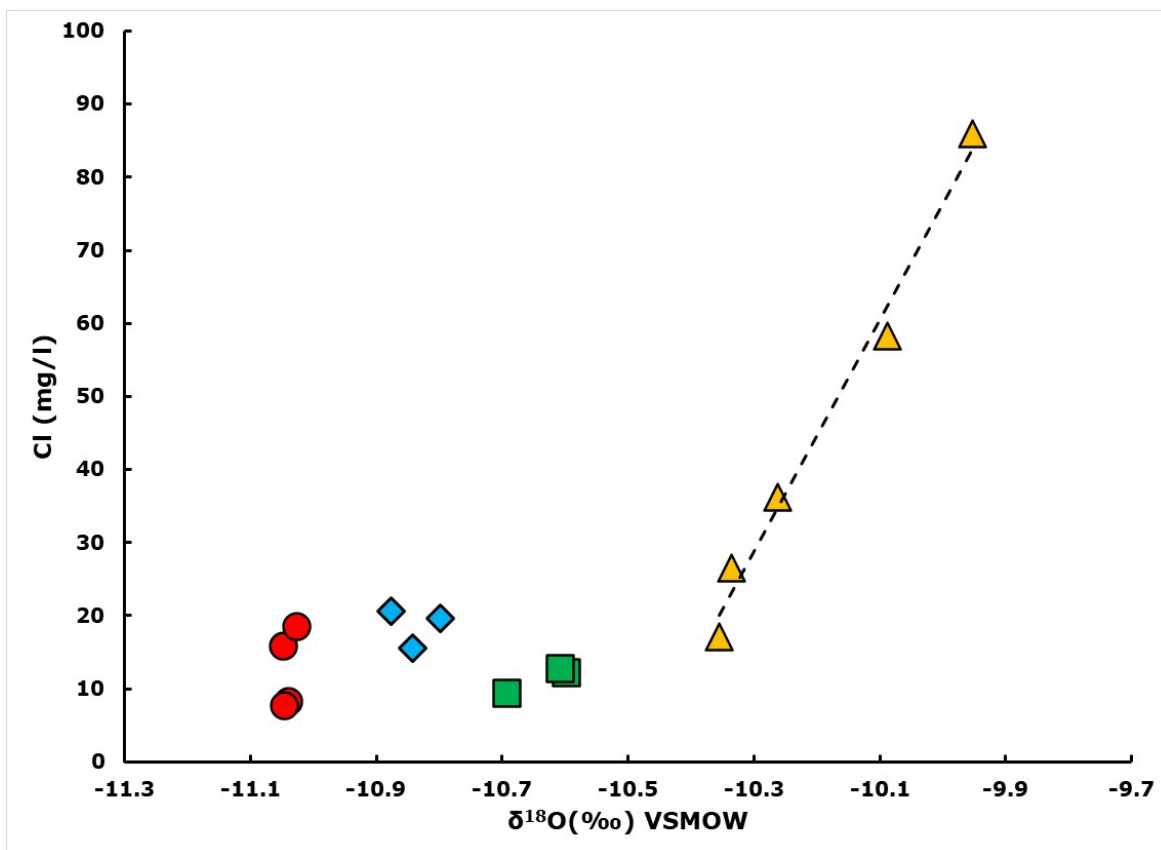


Figura 19. Contenido de $\delta^{18}\text{O}$ versus Cl.

La evaporación decrece el exceso de deuterio mientras que la humedad reciclada lo incrementa (Froehlich *et al.*, 2008). La evaporación de un cuerpo de agua superficial produce valores de exceso de deuterio menores de 10 (Victoria, Martinelli, Mortatti, & Richey, 1991). Por lo tanto, la Figura 20 indica que las muestras de agua con mayor contenido de NO_3 contienen agua evaporada.

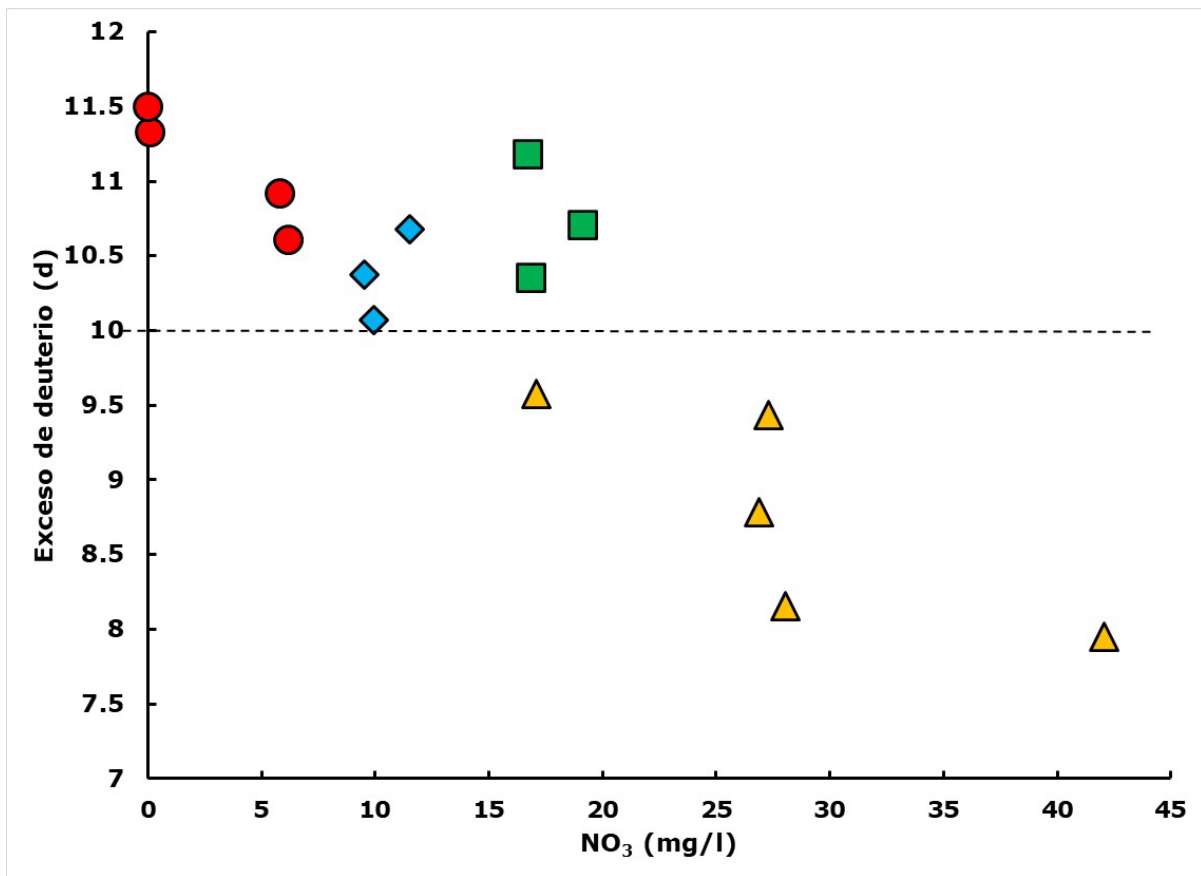


Figura 20. Contenido de NO₃ *versus* exceso de deuterio (d).

Tritio

El grupo de pozos con componentes de recarga evaporada contienen entre 1.5 y 2.5 unidades de tritio, lo que indica tiempos de residencia muy cortos, es decir, reciben recarga de aguas modernas (Figura 21). Por otro lado, los pozos con agua no evaporada presentan contenidos de tritio menores de 1 TU, lo cual señala tiempos de residencia mayores del orden de 1 o 2 decenas de años. En el caso del manantial San Ramón, la

ausencia de tritio apunta a que los flujos que lo alimentan tienen tiempos de residencia de más de 30 años de haberse infiltrado al sistema acuífero.

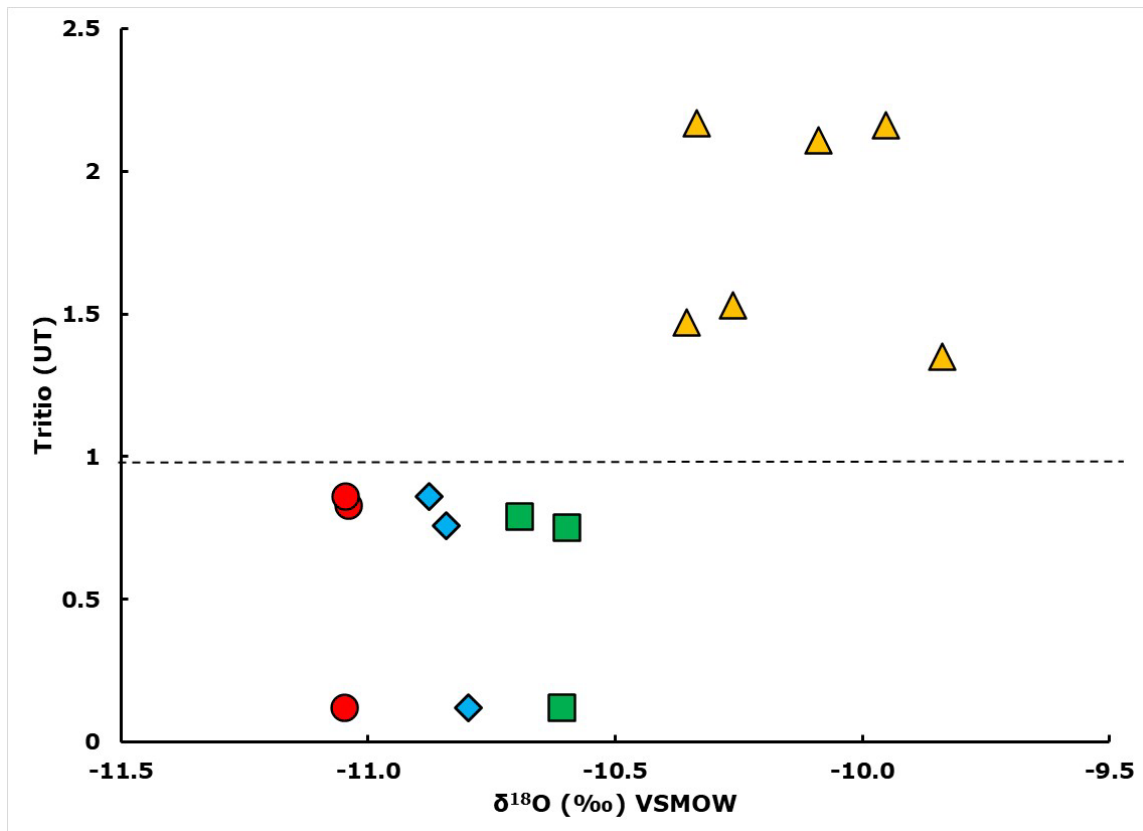


Figura 21. Contenido de $\delta^{18}\text{O}$ *versus* tritio.

Las muestras de agua con mayor contenido de NO_3 contienen entre 1.5 y 2.5 unidades de tritio. Esto indica tiempos de residencia en el subsuelo muy cortos de las muestras más contaminadas con nitrato (Figura 22).

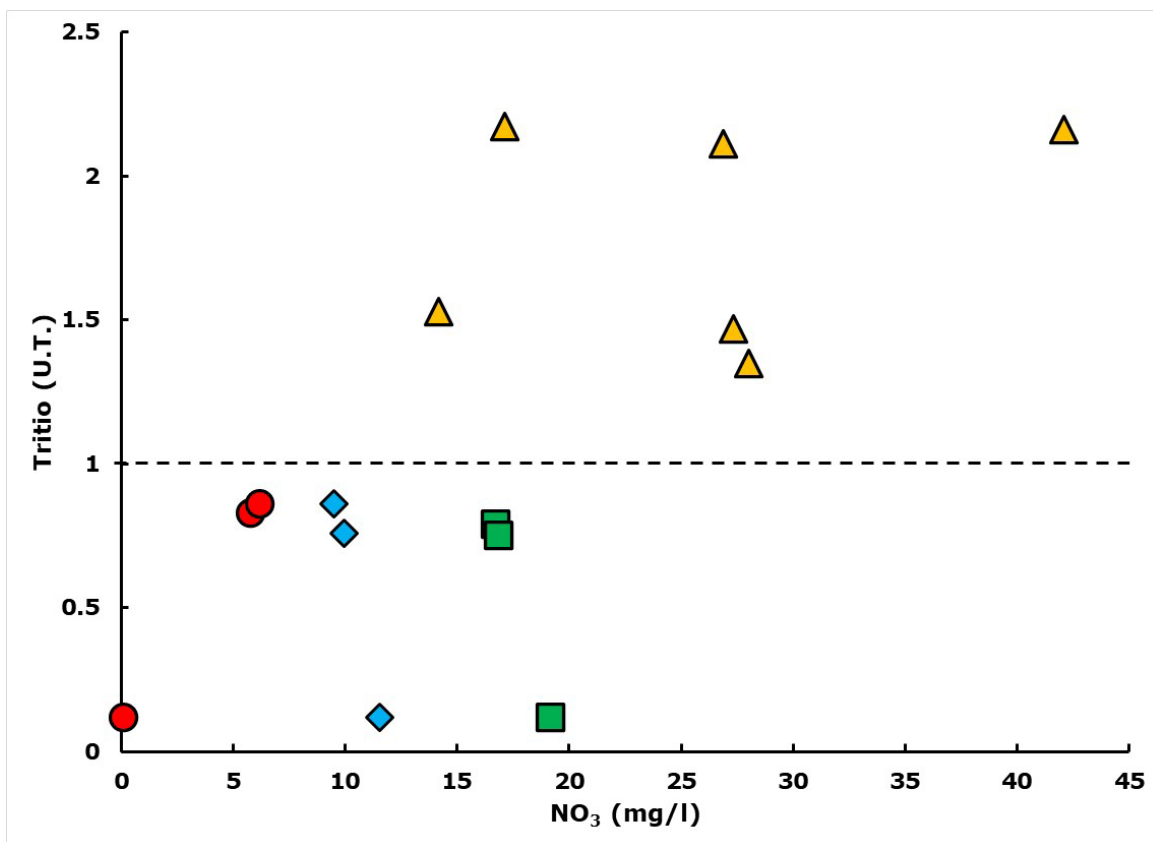
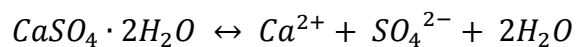


Figura 22. Contenido de NO₃ *versus* tritio.

Relaciones iónicas

La disolución de yeso produce una relación Ca²⁺/ SO₄²⁻ igual a 1:



Las muestras del manantial Palo Bolero, manantial San Ramón, y los pozos 11 y 12 se sitúan en la equilínea 1:1, indicando que la disolución

de yeso es un proceso importante en la composición química de estas muestras (Figura 23).

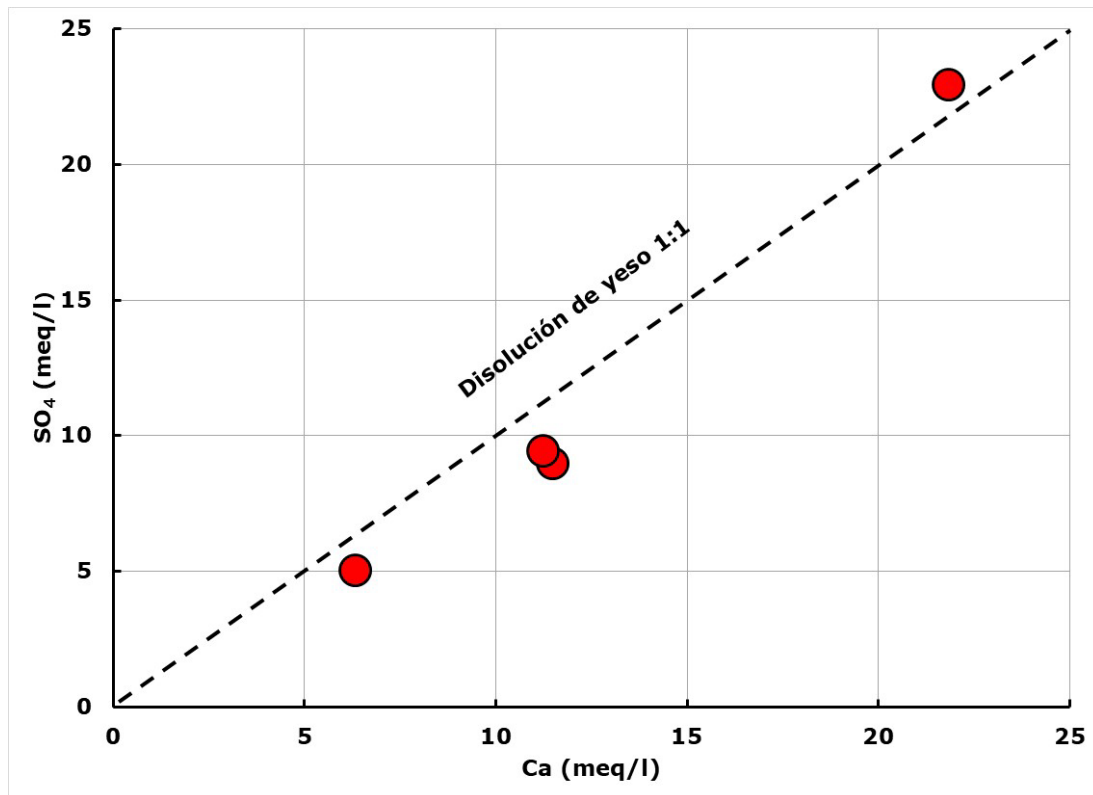


Figura 23. Contenido de Ca *versus* SO₄.

Los procesos geoquímicos que controlan la composición química del agua se pueden dilucidar utilizando el diagrama de Gibbs (Gibbs, 1970) (Figura 24). En este diagrama se grafican los sólidos disueltos totales (SDT) en función de la relación catiónica ($\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$). En la Figura 24 se distinguen cuatro grupos. En el flujo a través de las formaciones Morelos y Cuautla (círculos rojos) el proceso dominante es la meteorización del material geológico. En el flujo de la formación

Chichinautzin (cuadrados verdes) el proceso dominante es la lluvia. En el flujo de la formación Cuernavaca (rombos azules) su composición iónica es determinada por la meteorización del material geológico, pero también por el efecto de la precipitación pluvial. En el cuarto grupo (triángulos amarillos) el proceso preponderante es la evaporación.

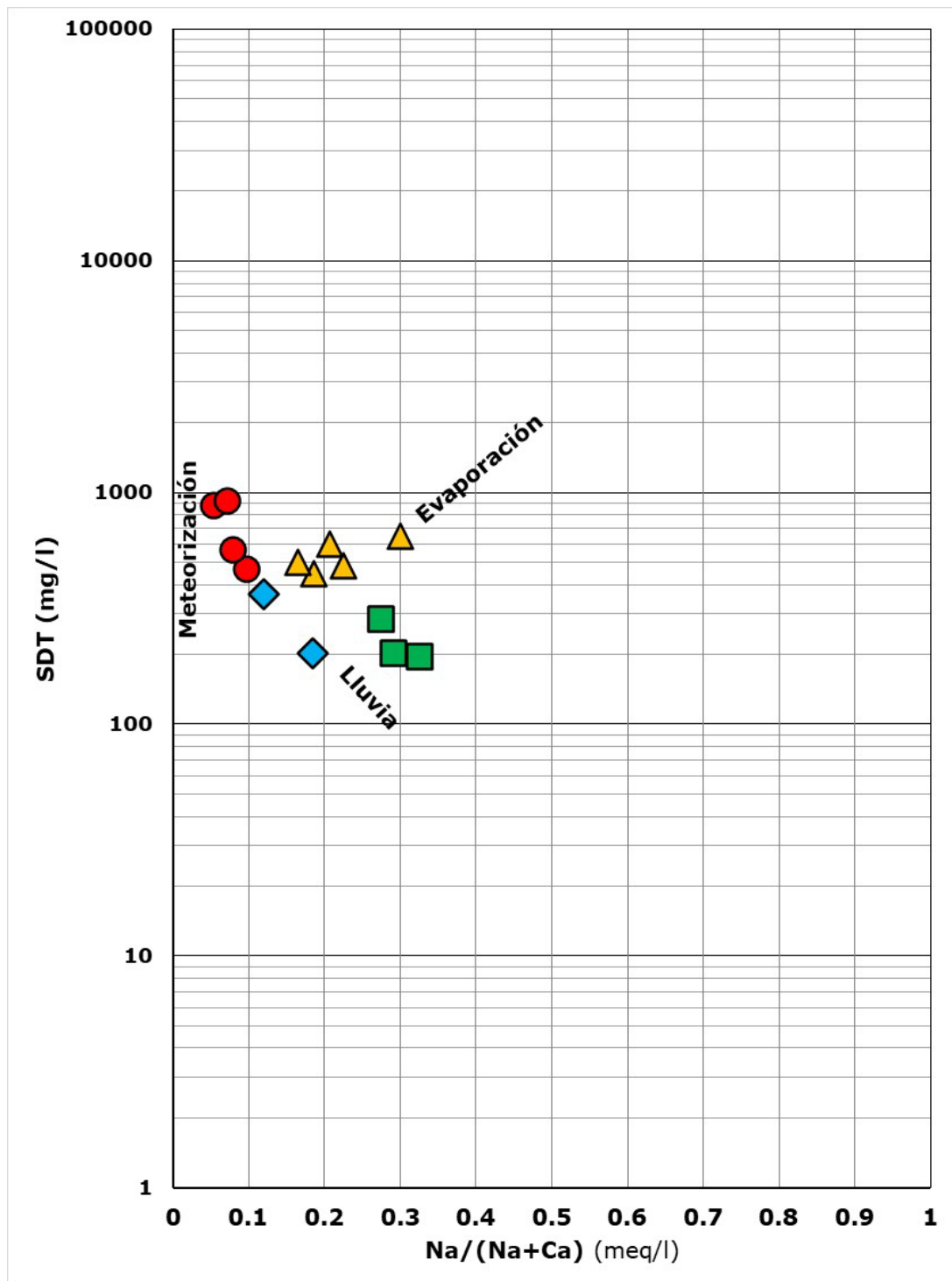


Figura 24. Diagrama de Gibbs: relación catiónica.

La regresión lineal entre el contenido de nitrato y cloruro produjo un valor de $R^2 = 0.531$ para las muestras evaporadas (Figura 25). Valores de correlación mayores a $R^2 = 0.35$ indican que el agua subterránea contiene agua residual doméstica o municipal (Ritter & Chirnside, 1984; Pacheco, Marín, Cabrera, Steinich, & Escolero, 2001).

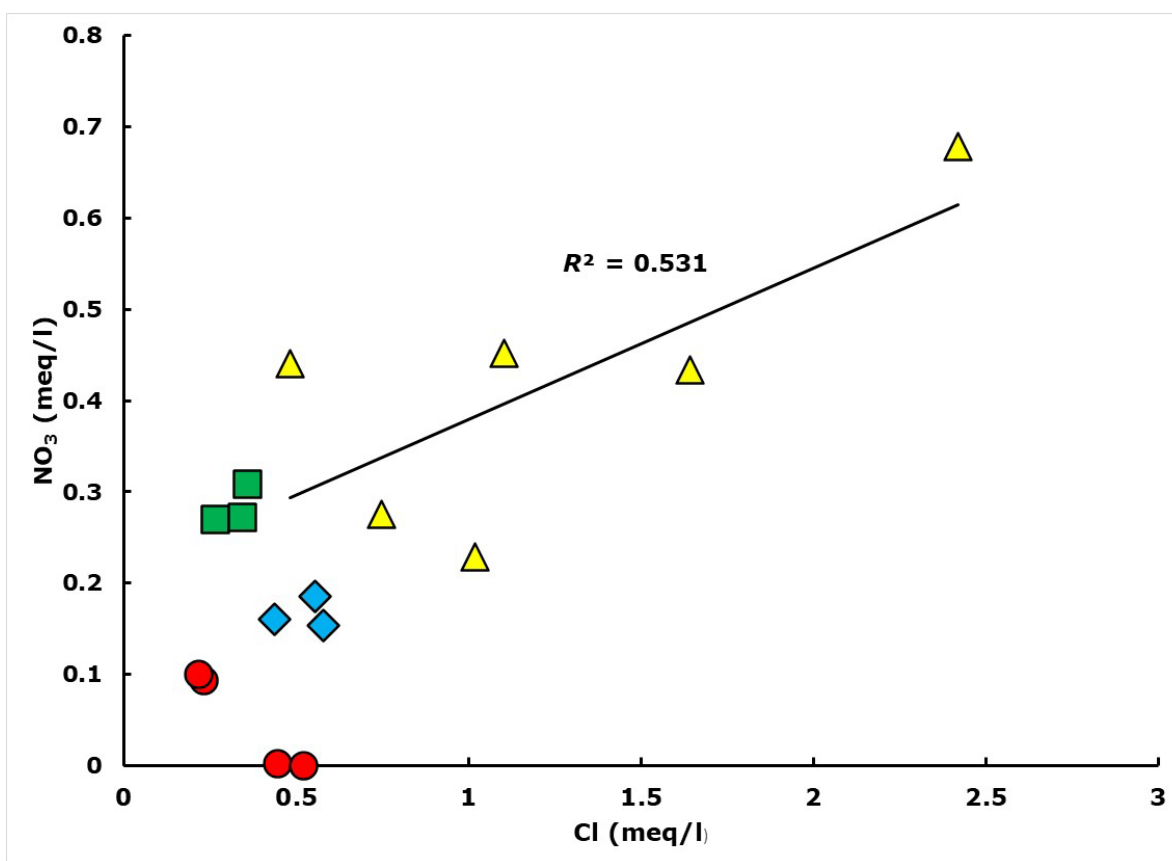


Figura 25. Contenido de Cl *versus* NO₃.

La gráfica de la relación molar del cloruro *versus* nitrato normalizado por el cloruro (NO_3/Cl) permite dilucidar el origen del nitrato (Figura 26). Las muestras se sitúan en el recuadro azul si el origen es agrícola; en el

recuadro morado si el nitrato procede de estiércol, etcétera. La gráfica indica que el nitrato de las muestras evaporadas procede de agua residual (recuadro verde) (Liu, Li, Lang, & Xiao, 2006; Guo, Yan, Wang, Xu, & Yang, 2020; Torres-Martínez *et al.*, 2021).

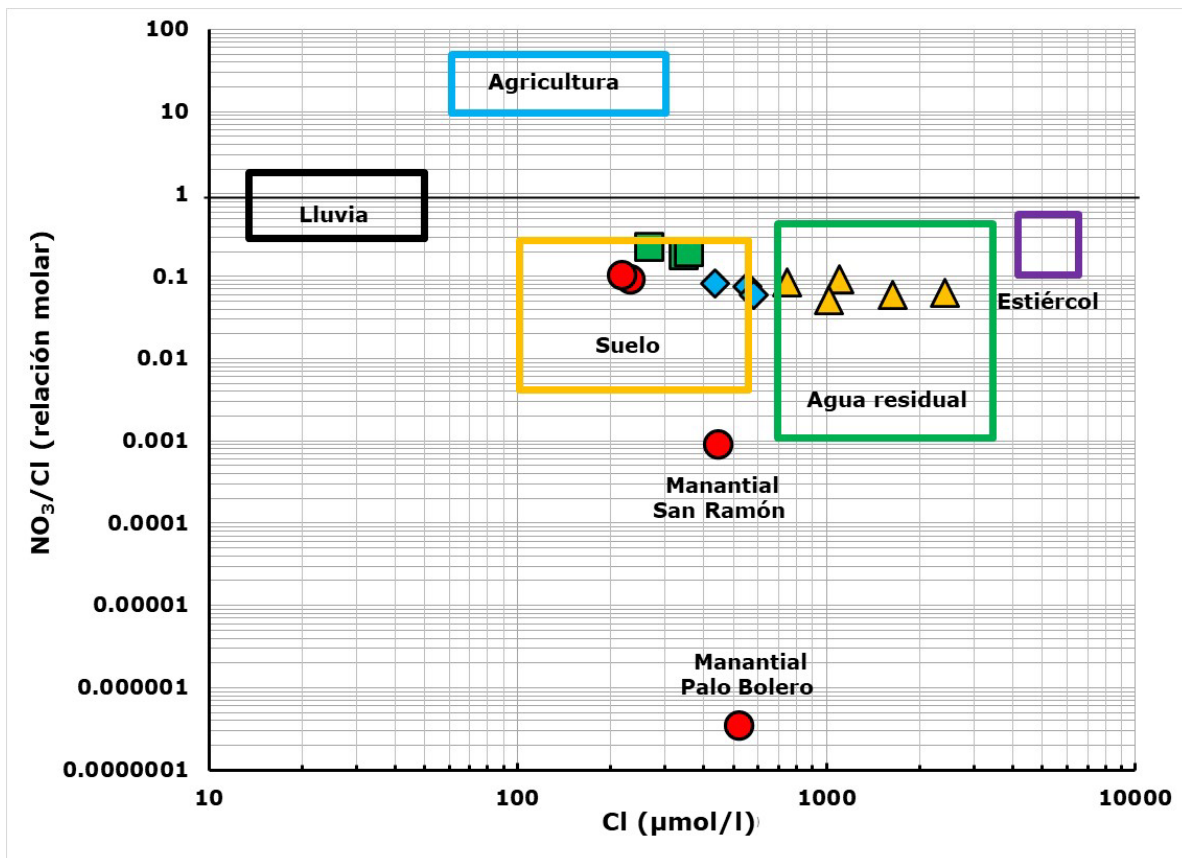


Figura 26. Cloruro (concentración molar) *versus* $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ (relación molar).

Los valores de cloruro y sodio de las muestras de agua evaporada (Figura 27) son similares a los valores de los efluentes de las fosas sépticas en EUA (Panno *et al.*, 2002).

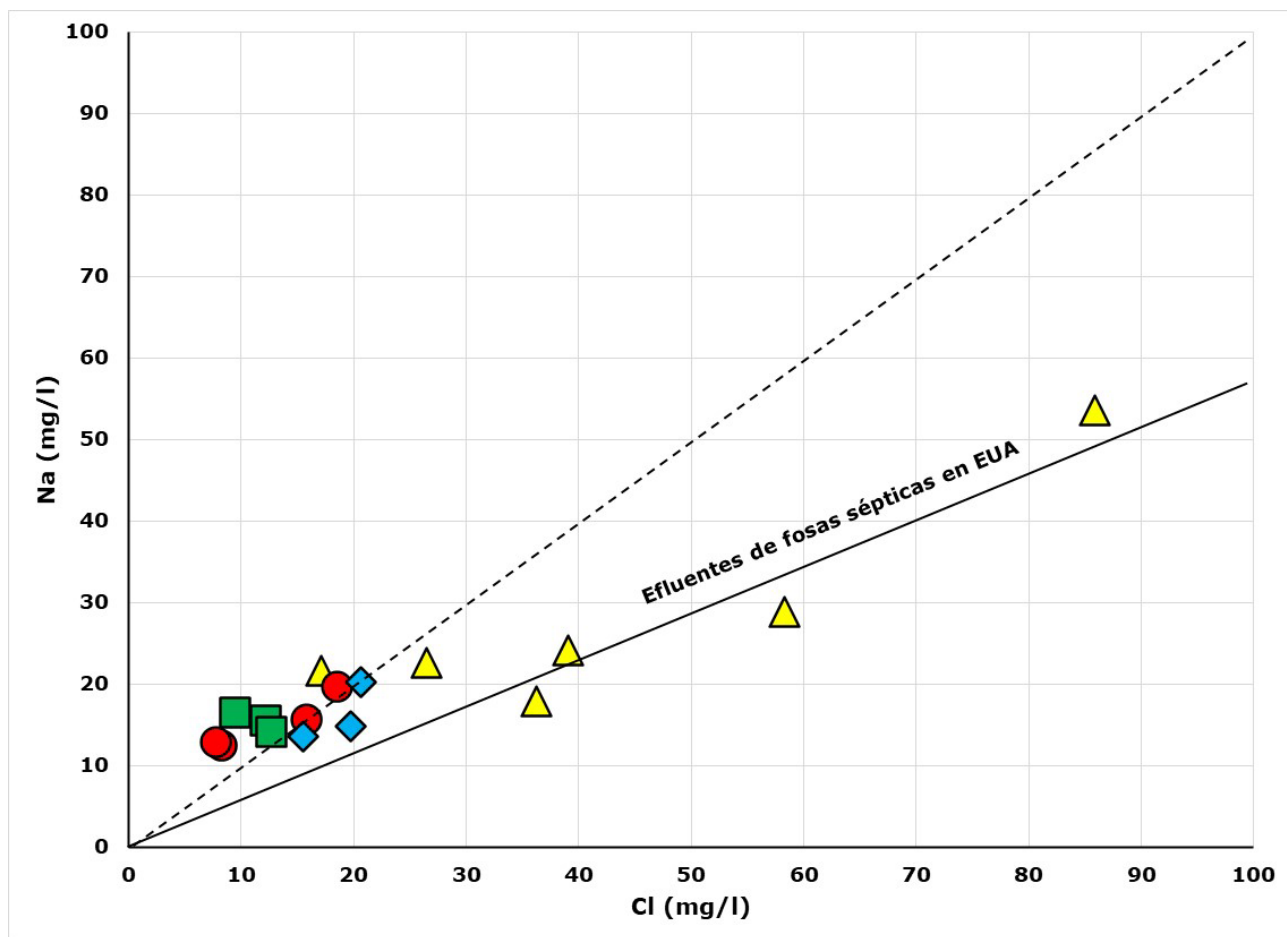


Figura 27. Cloruro *versus* sodio.

Las muestras que rebasan el límite permisible de arsénico (NOM 127-SSA1-127 modificada en 2000) (SSA, 1994) son aquellas que tienen bajas concentraciones de oxígeno disuelto (Figura 28) y valores de tritio menores de 1 TU (Figura 29), lo cual indica que los pozos con altos contenidos de arsénico son recargados por flujos profundos.

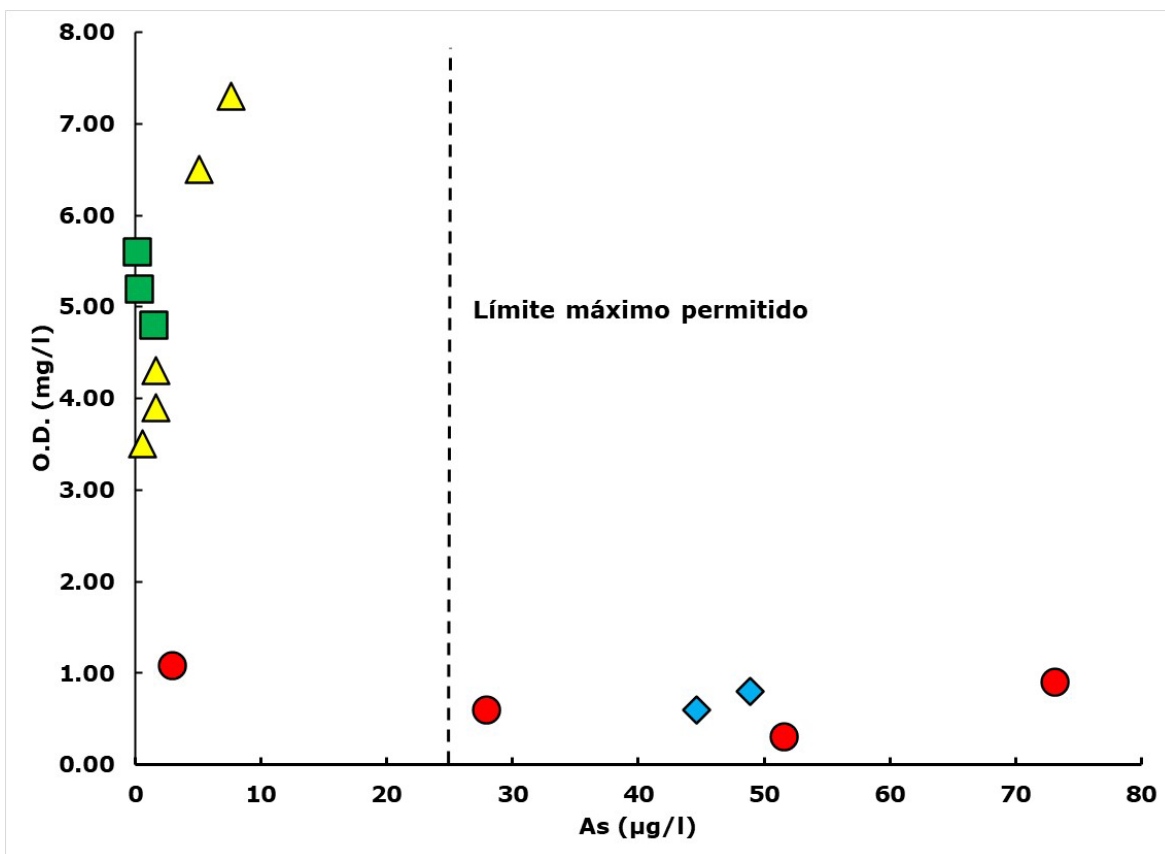


Figura 28. Contenido de As *versus* oxígeno disuelto.

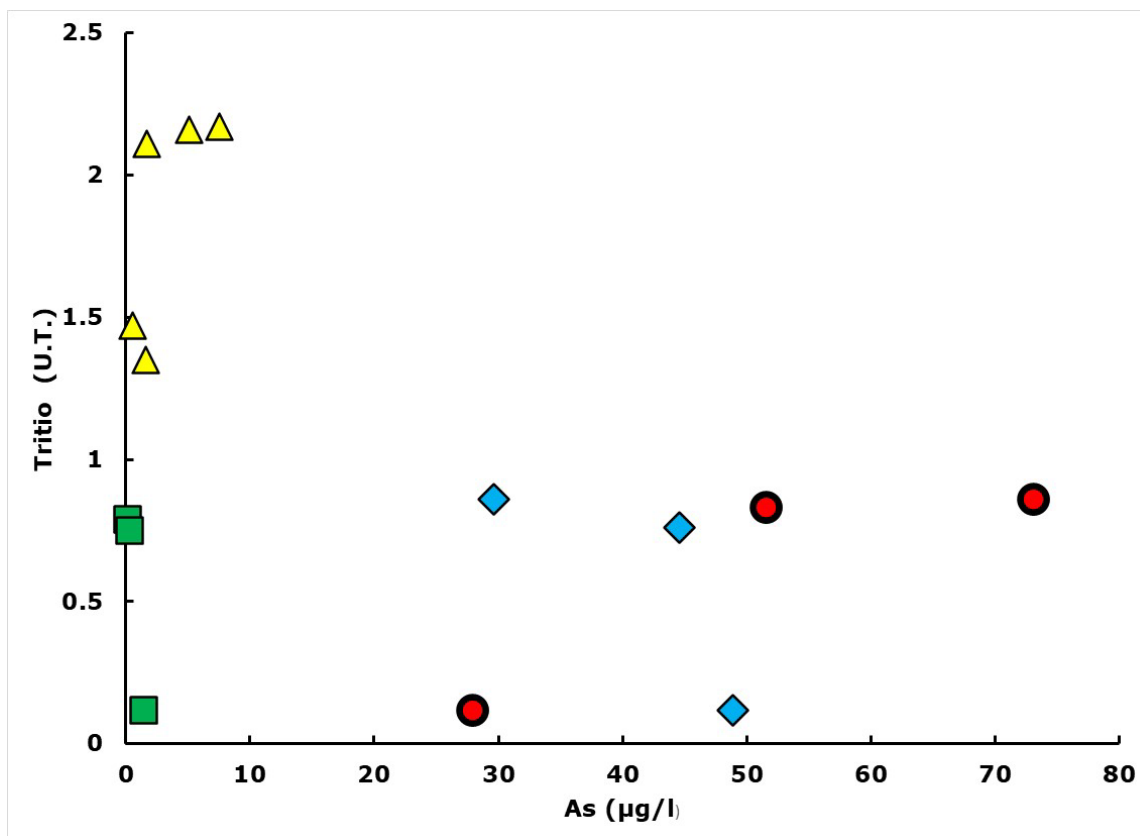


Figura 29. Arsénico *versus* tritio.

En la Comarca Lagunera, una región agrícola del norte de México, Torres-Martínez *et al.* (2021) determinaron los porcentajes de contribución de nitrato al agua subterránea: estiércol (47 %), aguas negras (43 %), fertilizantes (5 %), nitrógeno orgánico del suelo (3 %) y depositación atmosférica (2 %). Sus resultados indican que aun cuando la Comarca Lagunera es una zona agrícola muy importante, los fertilizantes sintéticos no son la fuente principal de nitrato. Ren, Zhang, Wang y Wang (2021) llevaron a cabo un estudio para determinar las fuentes de nitrato del agua superficial y subterránea en la cuenca del río Ye del norte de China, una zona preponderantemente agrícola, cuyas

poblaciones no cuentan con alcantarillado sanitario. Para su estudio utilizaron isótopos estables del nitrógeno y del agua, así como un modelo de mezcla bayesiano. Sus resultados indican que la principal contribución procede de agua residual y estiércol. Sugieren que se construya infraestructura para el tratamiento de las aguas residuales. Pastén-Zapata, Ledesma-Ruiz, Harter, Ramírez y Mahlkecht (2014) realizaron un estudio en una zona citrícola del noreste de México, a fin de determinar las fuentes de nitrato del agua subterránea somera. Con base en evidencia geoquímica determinaron que las fuentes de nitrato en las zonas rurales son el uso de estiércol como fertilizante y las aguas residuales, mientras que en las zonas urbanas son las aguas residuales.

Nuestros resultados indican que el nitrato presente en el sur del acuífero Cuernavaca procede principalmente de agua residual, lo cual concuerda con sitios con una problemática similar, como los citados arriba.

El nitrato presente en el agua superficial y subterránea tiene como origen múltiples fuentes, y es difícil distinguir con precisión dichas fuentes utilizando solamente métodos hidrogeoquímicos. Los isótopos del nitrato han mostrado ser una herramienta muy útil para identificar las fuentes del nitrato (Torres-Martínez *et al.*, 2021; Ren *et al.*, 2021). En un nuevo estudio que se está realizando en el acuífero Cuernavaca se utilizarán métodos hidrogeoquímicos, así como isótopos estables del agua y del nitrato.

Conclusiones

Este estudio presenta el uso de isótopos ambientales del agua y geoquímica para determinar las concentraciones y el origen del nitrato que degrada la calidad del agua en el sur del acuífero Cuernavaca.

Los resultados muestran que las zonas del acuífero con recarga de agua que ha experimentado evaporación intensa, previa a su infiltración en el subsuelo, es la que presenta las mayores concentraciones de nitrato. Los resultados también indican que el nitrato procede de agua residual doméstica o municipal, probablemente generada por las descargas de aguas residuales sin tratamiento. Ninguna de las muestras excede el límite permisible, pues todas tienen concentraciones menores de 44.3 mg/l de nitrato. Sin embargo, la evolución de los últimos 30 años muestra un incremento significativo en la zona, por lo cual es importante implementar políticas públicas que promuevan la construcción y rehabilitación de infraestructura que recolecte las aguas residuales, y sean enviadas a las plantas de tratamiento ya existentes (PTAR La Gachupina y Emiliano Zapata).

Los datos obtenidos también revelaron correlación entre el nitrato y el uranio. Aun cuando todas las muestras tienen concentraciones de uranio menores al límite permisible, se recomienda continuar monitoreando este parámetro, pues un alza en las concentraciones de nitrato podría venir acompañado de un aumento en las concentraciones de uranio. Debido a que el decaimiento del uranio incrementa la radiactividad del agua subterránea, se recomienda medir la radiactividad

para establecer los valores actuales y monitorear su evolución en el tiempo.

Con respecto al arsénico, las muestras de agua subterránea que exceden el límite permisible para el arsénico presentan concentraciones de oxígeno disuelto y tritio bajos, lo cual apunta a que proceden de los estratos profundos del acuífero. Si a futuro se incrementa la extracción subterránea en la zona, podría inducir la extracción de flujos cada vez más profundos, con el consiguiente aumento del arsénico.

Los datos obtenidos permitieron también determinar la línea de agua meteórica del acuífero Cuernavaca. Esta línea será muy útil para futuros estudios geohidrológicos y ambientales.

Reconocimientos

La Red Nacional de Monitoreo de la Composición Isotópica de la Precipitación Pluvial en México es una colaboración del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, el Servicio Meteorológico Nacional, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México y el Organismo Internacional de Energía Atómica, a través del proyecto RLA7024 “Integración de la hidrología isotópica en las evaluaciones nacionales de los recursos hídricos”.

Referencias

Brugge, D., & Buchner, V. (2011). Health effects of uranium: New research findings. *Reviews on Environmental Health*, 26(4), 231-24.

- Canter, L. W. (1997). Nitrate in groundwater. Boca Raton, USA: Lewis Publishers.
- Cardona, A. (2004). Salinization in coastal aquifers of arid zones: An example from Santo Domingo, Baja California Sur, Mexico. *Environmental Geology*, 45, 350-366.
- Clark, I. D., & Fritz, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. New York, USA: CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482242911>
- CDPH, California Department of Public Health. (2013). *Drinking water contaminants: Nitrate*. Sacramento, USA: California Department of Public Health.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2002). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuernavaca (1701), estado de Morelos*. México, DF, México: Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2010). *Programa Hídrico Visión 2030 del estado de Morelos*. México, DF, México: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuernavaca (1701), estado de Morelos*. México, DF, México: Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-368.

- Del-Campo-Delgado, M. (2016). *Lixiviación de agroquímicos en campos de golf bajo diferentes dotaciones de riego y sustratos* (tesis doctoral). Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Esquivel-Hernández, G., Mosquera, G. M., Sánchez-Murillo, R., Quesada-Román, A., Birkel, C., Crespo, P., Célleri, R., Windhorst, D., Breuer, L., & Boll, J. (2019). Moisture transport and seasonal variations in the stable isotopic composition of rainfall in Central American and Andean Páramo during El Niño conditions (2015–2016). *Hydrological Processes*, 33(13), 1802-1817.
- Froehlich, K., Kralik, M., Rank, D., & Scheifinger, H. (2008). Deuterium excess in precipitation of Alpine regions. Moisture recycling. *Isotopes in Environmental Health Studies*, 44(1), 61-70.
- Galewsky, J., Steen-Larsen, H. C., Field R. D., Worden J., Risi C., & Schneider M. (2016), Stable isotopes in atmospheric water vapor and applications to the hydrologic cycle. *Reviews of Geophysics*, 54, 809-865. DOI: 10.1002/2015RG000512
- Gastmans, D., Santos, V., Aparecida-Galhardi, J., Felipe-Gromboni, J., Vianna-Batista L., Miotlinski, K., Kiang-Chang H., & Silvio-Govone, J. (2017). Controls over spatial and seasonal variations on isotopic composition of the precipitation along the central and eastern portion of Brazil. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 53(5), 518-538, DOI: 10.1080/10256016.2017.1305376
- Gat, J. R. (2000). Atmospheric water balance. The isotopic perspective, *Hydrological Processes*, 14, 1357-1369.

- Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170(3962), 1088-1090.
- Guo, Z., Yan, C., Wang, Z., Xu, F., & Yang, F. (2020). Quantitative identification of nitrate sources in a coastal peri-urban watershed using hydrogeochemical indicators and dual isotopes together with the statistical approaches. *Chemosphere*, 243, 125364.
- Haller, L., McCarthy, P., O'Brien, T., Riehle, J., & Stuhldreher, T. (2013). *Nitrate pollution of groundwater*. Oceanside, USA: Alpha Water Systems Inc.
- IAEA, International Atomic Energy Agency. (2002). A new device for monthly rainfall sampling for GNIP. *Water and Environment Newsletter*, (16) special issue on the global network of isotopes in precipitation, 5.
- IMTA, Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua. (2012). *Plan integral para el manejo sustentable de las barrancas del norponiente del estado de Morelos*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua, Fundación Gonzalo Río Arronte.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1991). *Censo Agrícola, ganadero y ejidal del INEGI*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jaimes-Palomera, L. R., Cortes-Silva, A., Vazquez-Sanchez, E., Aravena, R., Fritz, P., & Drimmie, R. (1989). Geoquímica isotópica del sistema hidrogeológico del valle de Cuernavaca, estado de Morelos, México. *Geofísica Internacional*, 28(2), 219-244.

- Kurttio, P., Komulainen, H., Leino, A., Salonen, L., Auvinen, A., & Saha, H. (2005). Bone as a possible target of chemical toxicity of natural uranium in drinking water. *Environmental Health Perspectives*, 113 (1), 68-72.
- Liu, C. Q., Li, S. L., Lang, Y. C., & Xiao, H. Y. (2006). Using $\delta^{15}\text{N}$ - and $\delta^{18}\text{O}$ values to identify nitrate sources in karst ground water, Guiyang, southwest China. *Environmental Science & Technology*, 40(22), 6928-6933.
- Martinelli, L. A., Victoria, R. L., Sternberg, L. S., Ribeiro, A., & Moreira, M. Z. (1996). Using stable isotopes to determine sources of evaporated water to the atmosphere in the Amazon basin. *Journal of Hydrology*, 183, 191-204.
- Morales-Casique, E., Guinzberg-Belmont, J., & Ortega-Guerrero, A. (2016). Regional groundwater flow and geochemical evolution in the Amacuzac River Basin, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 24, 1873-1890.
- Merlivat, L., & Jouzel, J. (1979), Global climate interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. *Journal de Geophysical Research*, 84(C8), 5029-5033.
- Nolan, J., & Weber, K. A. (2015). Natural uranium contamination in major U.S. aquifers linked to nitrate. *Environmental Science and Technology Letters*, 2(8), 215-220.

- Ortega, L. V., Garcia, S. A., & Pelayo, B. R. (2003). Aspectos geohidrológicos de los acuíferos del estado de Morelos. En: Oswald-Spring, U. *El recurso agua en el Alto Balsas* (pp. 93-107). México, DF, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias.
- Otte, I., Detsch, F., Gütlein, A., Scholl, M., Kiese, R., Appelhans, T., & Nauss, T. (2017). Seasonality of stable isotope composition of atmospheric water input at the southern slopes of Mt. Kilimanjaro, Tanzania. *Hydrological Processes*, 31(22), 3932-3947. DOI: 10.1002/hyp.11311
- Pacheco, J., & Cabrera, A. (1997). Groundwater contamination by nitrates in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 5, 47-53.
- Pacheco, J., Marín, L., Cabrera, A., Steinich, B., & Escolero, O. (2001). Nitrate temporal and spatial patterns in 12 water-supply Wells, Yucatán México. *Environmental Geology*, 40(6), 708-715.
- Paradis, C. J., Jagadamma, S., Watson, D. B., McKay, L. D., Hazen, T. C., Park, M., & Istok, J. D. (2016). In situ mobility of uranium in the presence of nitrate following sulfate-reducing conditions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 187, 55-64.
- Pastén-Zapata, E., Ledesma-Ruiz, R., Harter, T., Ramírez, A. I., & Mahlknecht, J. (2014). Assessment of sources and fate of nitrate in shallow groundwater of an agricultural area by using a multi-tracer approach. *Science of the Total Environment*, 470-471, 855-864. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.10.043

- Panno, S. V., Hackley, K. C., Hwang, H. H., Greenberg, S., Krapac, I. G., Landsberger, S., & O'Kelly, D. J. (2002). *Source identification of sodium and chloride contamination in natural waters*. The 12th Annual Conference of the Illinois Groundwater Consortium, USA.
- Peng, H., Mayer, B., Harris, S., & Roy, K. R. (2007). The influence of below-cloud secondary effects on the stable isotope composition of hydrogen and oxygen in precipitation at Calgary, Alberta, Canada. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 59(4), 698-704.
- POZCI, Programa de Ordenación de Zona Conurbada Intermunicipal. (2009). *Programa de Ordenación de Zona Conurbada Intermunicipal en su modalidad de Centro de Población. Cuernavaca, Emiliano Zapata, Jiutepec, Temixco y Xochitepec*. Cuernavaca, México: Programa de Ordenación de Zona Conurbada Intermunicipal.
- Raisz, E. (1964). *Landforms of Mexico. Mapa con texto, escala 1:3 000 000* (2nd ed.). Cambridge, USA: Office of Naval Research.
- Ren, C., Zhang, Q., Wang, H., & Wang, Y. (2021). Identification of sources and transformations of nitrate in the intense human activity region of North China using a multi-isotope and Bayesian model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 8642. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18168642>
- Ritter, W. F., & Chirnside, A. E. (1984). Impact of land use on ground-water quality in Southern Delaware. *Ground Water*, 22(1), 38-47.

Sagarpa, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2003). *Evaluación de la alianza para el Campo 2002. Informe de evaluación estatal*. México, DF, México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

Secretaría de Desarrollo Sustentable de Morelos. (2009). *Programa de Ordenación de Zona Conurbada Intermunicipal en su Modalidad de Centro de Población de Cuernavaca, Emiliano Zapata, Jiutepec, Temixco y Xochitepec*. Cuernavaca, México: Secretaría de Desarrollo Sustentable de Morelos.

SSA, Secretaría de Salubridad y Asistencia. (1994). *NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. México, DF, México: Secretaría de Salubridad y Asistencia.

Singh, G., Sengor, S., Bhalla, A., Kumar, S. S., Stewart, B., Spycher, N., Ginn, T. M., Peyton, B. M., & Sani, R. K. (2014). Reoxidation of biogenic reduced uranium: A challenge toward bioremediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(4), 391-415.

Suarez-Barragán, M. D., & Ureno-Luna, J. (1988). *Calidad físico-química y bacteriológica del agua subterránea del Valle de Cuernavaca, Morelos* (tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Scholl, M. A., Gingerich, S. B., & Tribble, G. W. (2002). The influence of microclimates and fog on stable isotope signatures used in the interpretation of regional hydrology: East Maui, Hawaii. *Journal of Hydrology*, 264, 170-184. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00073-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00073-2)
- Stewart, M. K. (1975). Stable isotope fractionation due to evaporation and isotope exchange of falling water drops: Application to atmospheric processes and evaporation of lakes. *Journal of Geophysical Research*, 80, 1133-1146.
- Torres-Martínez, J. A., Abraham, M., Jürgen, M., Daesslé, L. W., Cervantes-Avilés, P. A., & Ledesma-Ruiz, R. (2021). Estimation of nitrate pollution sources and transformations in groundwater of an intensive livestock-agricultural area (Comarca Lagunera), combining major ions, stable isotopes and MixSIAR model. *Environmental Pollution*, 269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115445>
- Victoria, R., Martinelli, L., Mortatti, J., & Richey, J. (1991). Mechanisms of water recycling in the Amazon Basin: Isotopic insights. *Ambio: A Journal of Environment and Society*, 20(8), 384-387.
- Viers, J. H., Liptzin, D., Rosenstock, T. S., Jensen, V. B., & Hollander, A. D. (2012). *Nitrogen sources and loading to groundwater*. Sacramento, USA: California State Water Resources Control Board.
- WHO, World Health Organization. (2007). *Nitrate and nitrite in drinking-water. Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

- WHO, World Health Organization. (2008). *Guidelines for drinking-water quality* (3rd ed.). Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- Zhao, Z. (2015). *A global assessment of nitrate contamination in groundwater (Internship report)*. Delft, The Netherlands: International Groundwater Resources Assessment Centre.