

DOI: 10.24850/j-tyca-2024-03-02

Artículos

**Procesos hidrogeoquímicos e isotópicos que controlan la variabilidad química en un sector del acuífero Región Carbonífera, Coahuila**

**Hydrogeochemical and isotopic processes that control the chemical variability of the waters in a sector of the Región Carbonífera Acuífero, Coahuila**

Ramón Y. Batista-Cruz<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0020-9405>

Yalina Montecelos-Zamora<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1130-6884>

José A. Batista-Rodríguez<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2222-2582>

Luis F. Cervantes-Alonzo<sup>4</sup>

Roberto Díaz-Martínez<sup>5</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0063-7338>

Yuri Almaguer-Carmenates<sup>6</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4011-2069>

Jesús A. Blanco-Moreno<sup>7</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0558-9785>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela Superior de Ingeniería Lic. Adolfo López Mateos, Nueva Rosita, Coahuila, México, yosbatista13@gmail.com

<sup>2</sup>Instituto Superior Tecnológico de Múzquiz, Melchor Múzquiz, Coahuila, México, ymzamora84@gmail.com

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela Superior de Ingeniería Lic. Adolfo López Mateos, Nueva Rosita, Coahuila, México, josebatista@uadec.edu.mx

<sup>4</sup>Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela Superior de Ingeniería Lic. Adolfo López Mateos, Nueva Rosita, Coahuila, México, luis.cervantesalonzo@hotmail.com

<sup>5</sup>Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela Superior de Ingeniería Lic. Adolfo López Mateos, Nueva Rosita, Coahuila, México, roberto\_diaz@uadec.edu.mx

<sup>6</sup>Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela Superior de Ingeniería Lic. Adolfo López Mateos, Nueva Rosita, Coahuila, México, y\_almaguer@uadec.edu.mx

<sup>7</sup>Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela Superior de Ingeniería Lic. Adolfo López Mateos, Nueva Rosita, Coahuila, México, j-blanco@uadec.edu.mx

Autor para correspondencia: Ramón Y. Batista-Cruz, yosbatista13@gmail.com

## Resumen

El Acuífero Región Carbonífera es uno de los 28 sistemas hidrogeológicos existentes en el estado de Coahuila, y también de los que más presiones sufre debido a la actividad minera y la sobreexplotación. Este estudio se enmarca en la porción oeste de dicho acuífero, abarcando el Ejido Morelos y la Colonia El Nacimiento, ambos en el municipio Melchor Múzquiz. En dicha área se tomaron muestras en 14 sitios (4 pozos, 6 norias, 2 manantiales y 2 secciones del río Sabinas), con el objetivo de caracterizar desde el punto de vista hidrogeoquímico e isotópico estos cuerpos hídricos y así obtener un modelo conceptual de dicho sector. Los resultados obtenidos muestran la variabilidad química de las aguas muestreadas, clasificándose como aguas de tipo bicarbonatada-cálcica, bicarbonatada-sódica, sulfatada-cálcica y clorurada-sódica, lo cual sugiere la ocurrencia de variados procesos que afectan la calidad del recurso, entre ellos la salinidad. Desde el punto de vista isotópico se propone un origen meteórico para la mayoría de los cuerpos hídricos en estudio, cuya zona de recarga proviene de la sierra de Santa Rosa. Sin embargo, procesos como la evaporación superficial, la disolución de sales, y el intercambio iónico generan variabilidad química y fraccionamiento isotópico, lo que condiciona firmas isotópicas más pesadas, y aguas más enriquecidas y salinas. Estos elementos se representan en un modelo geohidrológico e isotópico conceptual, que integra ambas interpretaciones y muestra la complejidad hidrogeológica de la región en términos de calidad del recurso.

**Palabras clave:** hidroquímica, isótopos estables, acuífero Región Carbonífera.

## Abstract

The Region Carbonifera Aquifer is one of the 28 existing hydrogeological systems in the State of Coahuila and one of those that suffer the most pressure due to mining activity and overexploitation. This study is framed in the western portion of the aquifer, encompassing the Ejido Morelos and the Colonia El Nacimiento, both in the Melchor Muzquiz municipality. In this area, 14 sites were sampled (4 wells, 6 norias, 2 springs, and 2 sections of the Sabinas River) with the aim to characterize these water bodies from the hydrogeochemical and isotopic point of view, thus obtaining a conceptual model of this sector. The results obtained show the chemical variability of the sampled waters, classifying waters as bicarbonate-calcium, bicarbonate-sodium, sulfated-calcium, and chloride-sodium, which supports the occurrence of various processes that affect the quality of the resource, among them the salinity. From the isotopic point of view, a meteoric origin is proposed for most water bodies under study, whose recharge zone comes from Santa Rosa mountains. However, surface evaporation, the dissolution of salts, and ionic exchange processes generate chemical variability and isotopic fractionation, which conditions heavier isotopic signatures and more enriched and saline waters. These elements are represented in a conceptual hydrochemical and isotopic model, which integrates both interpretations and shows the hydrogeological complexity of the region in terms of the quality of the resource.

**Keywords:** Hydrochemistry, stable isotopes, Región Carbonífera Aquifer.

Recibido: 17/02/2022

Aceptado: 31/08/2022

Publicado Online: 05/10/2022

## Introducción

La salinidad en acuíferos mexicanos es un tema preocupante en las últimas décadas. De acuerdo con Raynal-Gutiérrez (2020), en la república mexicana se han identificado 32 acuíferos con problemas de salinidad, principalmente en climas áridos y semiáridos, donde prevalecen las bajas precipitaciones y altas tasas de evaporación. Además, en al menos 18 acuíferos costeros se reportan problemas de intrusión marina, la mayoría en la península de Baja California y en Sonora (Torres-Martínez, Mahlkecht, Hernández-Antonio, & Mora, 2017; Raynal-Gutiérrez, 2020).

En otras partes del país la salinidad se ha incrementado por niveles de aguas subterráneas poco profundas, disolución de minerales evaporíticos, la presencia de aguas connatas o fósiles, y la sobreexplotación de los recursos hídricos (Wurl, Gamez, Ivanova, Lamadrid, & Hernandez-Morales, 2018; Gilabert-Alarcón *et al.*, 2018). Sumado a esto, los efectos del cambio climático indican problemas futuros en la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, como así lo refieren Hassani, Azapagic y Shokri (2021) en su modelo predictivo global.

En el estado de Coahuila, los recursos hidrogeológicos están distribuidos en 28 acuíferos que abarcan diferentes climas, condiciones geológico-estructurales y diferentes presiones de explotación. De hecho,

a nivel de estado, datos compilados en 2018 muestran que un no despreciable 32 % de los acuíferos sufre fenómenos de salinidad mientras que siete acuíferos presentan sobreexplotación (Conagua, 2020). El Acuífero Región Carbonífera (ARC) no está exento a los efectos de salinización debido a una compleja geología y a la predominancia de un clima árido/semiárido extremo. En todo el acuífero son limitadas las investigaciones relacionadas con la composición química y la calidad del agua de los cuerpos hídricos que lo componen. La Comisión Nacional del Agua (Conagua) es la que con algún grado de detalle ha estudiado el acuífero a partir de su informe “Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Región Carbonífera, estado de Coahuila” (Conagua, 2020), donde detalla los aspectos más relevantes de este sistema en cuanto a la geología, geomorfología, características hidrogeológicas, y los cálculos de la disponibilidad y balance hídrico. Un estudio más detallado lo presentan Batista-Cruz *et al.* (2022), quienes estudiaron 155 muestras de aguas tomadas en pozos, norias, manantiales y fuentes superficiales. El estudio pormenoriza aspectos importantes de la calidad del agua con base en la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) para fines de consumo y, a su vez, muestra la compleja situación del acuífero, cuya calidad es cuestionable para actividades agrícolas. Sin embargo, debido a la variabilidad química observada por dichos autores, los estudios hidrogeoquímicos e isotópicos de áreas pequeñas dentro del acuífero pueden ayudar a comprender mejor qué procesos deterioran la calidad del recurso hídrico y, en tal sentido, cómo enfrentar en municipios y ejidos la problemática del abasto de agua para diversos fines.

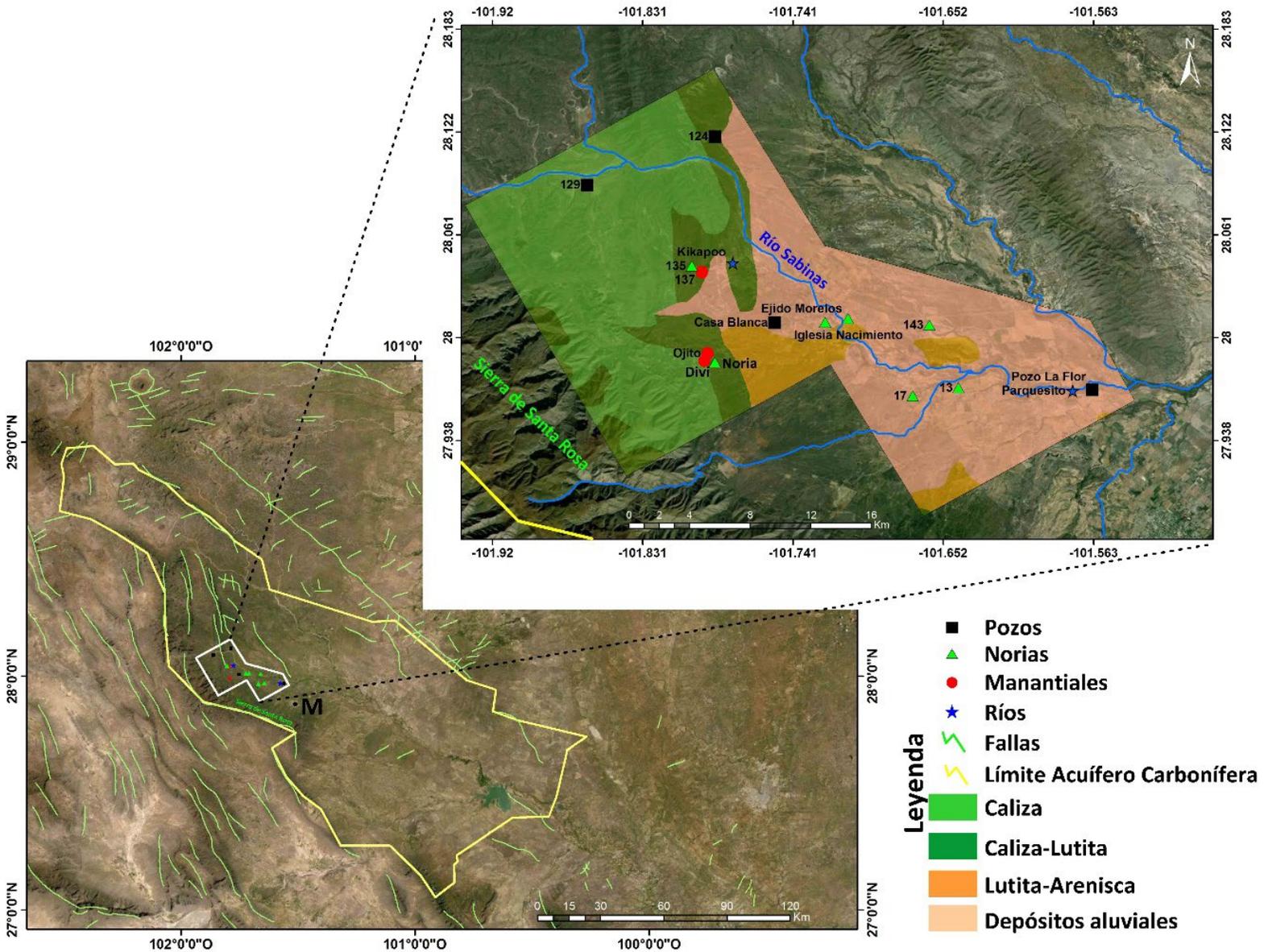
Por su parte, los estudios isotópicos (p. ej., isótopos estables de oxígeno y deuterio) son prácticamente nulos, con solo información en los acuíferos cercanos de Cuatrociénegas y el Hundido (Johannesson, Alejandra, & Kilroy, 2004; Felstead, Leng, Metcalfe, & Gonzalez, 2015). La sinergia entre química e isotopía permite identificar disímiles, y complejos procesos hidrogeológicos y ambientales, y entender aquellas causales que pueden modificar la composición química prístina de un determinado cuerpo hídrico, así como su origen.

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar, desde el punto de vista hidrogeoquímico e isotópico, las aguas superficiales y subterráneas del Ejido Morelos y la Colonia El Nacimiento en el municipio de Melchor Múzquiz, Coahuila, para identificar los procesos geo-hidrogeológicos e isotópicos que sufren las aguas subterráneas en su movimiento por el medio natural y, a su vez, elaborar con ellos un modelo conceptual del origen de las aguas en este sector del Acuífero Región Carbonífera.

## Área de estudio

El área de estudio se centra en el Ejido Morelos y la Colonia El Nacimiento, dos zonas contiguas que cubren un área total de 521 km<sup>2</sup>, localizadas en el municipio Melchor Múzquiz y en la porción oeste del ARC (Figura 1). El acuífero, clasificado como de tipo libre, está constituido en su parte superior por sedimentos aluviales y conglomerados polimícticos de la Formación Sabinas. En su parte intermedia se presenta la Formación Olmos y a mayor profundidad las rocas calcáreas —fundamentalmente de

las Formaciones Aurora y Cupido del Cretácico Inferior— constituyen la unidad acuífera que puede presentar condiciones de confinamiento debido a que está sobreyacida por rocas arcillosas como lutitas y limolitas (SGM, 2003; Conagua, 2020).



**Figura 1.** Mapa de ubicación geográfica del área de estudio dentro de los límites del Acuífero Región Carbonífera en el estado de Coahuila. La base geológica fue tomada de SGM (2003). En el mapa: M-municipio Melchor Múzquiz.

Dentro de los límites del acuífero, la profundidad del nivel estático varía de 5 a 30 metros. Sin embargo, dicha profundidad puede alcanzar hasta 50 metros en algunos pozos perforados en calizas que se localizan en la sierra de Santa Rosa.

La hidrología superficial se caracteriza por cauces intermitentes y efímeros, teniendo muy pocos cauces permanentes, como el caso del río Sabinas, que transita por el área de estudio y cuyos datos isotópicos se presentan en este estudio.

## Materiales y métodos

### Muestreo y técnicas analíticas

Los trabajos de muestreo se llevaron a cabo en 14 sitios (4 pozos, 6 norias, 2 manantiales y 2 secciones del río Sabinas) (Tabla 1). En cada sitio se tomaron las coordenadas y la altitud, y se midieron los parámetros físico-químicos (pH, conductividad y sólidos disueltos totales) (Tabla 1) con la ayuda de un equipo multiparamétrico marca HANNA HI98194. Al terminar cada medición, el equipo se lavó con agua desionizada para evitar errores de medición, así como para su propio cuidado y buen uso. Para el caso de los muestreos químicos de elementos mayoritarios ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) se colectaron 500 mililitros de muestra de agua en botellas de polietileno de alta densidad (HDPE), previamente lavadas en una solución de ácido nítrico. Además, las muestras de agua

para cationes se acidificaron en campo con  $\text{HNO}_3$  a  $\text{pH} = 2$ . Para el caso de los análisis isotópicos ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$ ), las muestras de agua fueron extraídas con una jeringa de 50 ml acoplada a un filtro VWR cónico estéril de 25 mm de diámetro y 0.45 micrómetros de tamaño de poro. Todas las muestras se tomaron por duplicado y al finalizar cada muestreo fueron refrigeradas en hieleras herméticas a una temperatura entre 1 y 5 grados Celsius para evitar cualquier tipo de contaminación. Todos los procedimientos de muestreo se basaron en los trabajos de Nollet (2000).

**Tabla 1.** Datos físico-químicos de las muestras de agua en estudio.

Muestras	Tipo	pH	SDT (ppm)	C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\text{HCO}_3^-$ (mg/l)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)	$\text{Cl}^-$ (mg/l)	$\text{Na}^+$ (mg/l)	$\text{K}^+$ (mg/l)	$\text{Ca}^{2+}$ (mg/l)	$\text{Mg}^{2+}$ (mg/l)	Error (%)
Casa Blanca	Pozo	8.08	1 579	3 160	538	24.2	285.4	307	1.31	22.3	2.4	8.34
129	Pozo	8.3	385	460	237.9	21.5	12.3	3.7	0.4	81	12.2	-5.28
124	Pozo	7.8	1 319	4 770	2 446.1	20.6	397.6	1 244	5.1	37	18.5	-5.38
Pozo La Flor	Pozo	7.87	855	1 711	476	71.2	26	188	1.23	12.3	2.5	5.19
143	Noria	7.7	451	540	305	11	10.01	3.7	0.4	101	8.8	-3.72
135	Noria	7.6	565	650	353.8	31.2	14.2	6.2	1.6	140	3.6	-5.16
13	Noria	7.9	176	320	109.8	11	10.7	4.4	1.6	32	6.4	-0.54
17	Noria	7.6	472	730	79.3	194.3	60.4	46	3.9	74	14.4	0.51
Ejido Morelos	Noria	6.69	895	1 790	345	38.2	81.9	57.9	1.58	127	10.1	-5.23
Iglesia Nacimiento	Noria	7.52	2 146	4 305	499	9.6	474.4	383	1.8	20.6	3.4	9.42
Parquecito	Río	6.79	551	1 103	351	42.2	7.8	4.7	0.73	117	7.9	1.03
Kikapoo	Río	8.03	383	766	185	53.7	9.7	10.1	0.99	69	10.8	-4.04
Ojito	Manantial	7.33	589	1 177	409	24.9	11.6	9.71	2.63	118	0.96	7.79
137	Manantial	7.8	357	450	231.8	20.6	14.2	2.3	0.4	81	7	-1.07

Los análisis físico-químicos a escala de laboratorio se desarrollaron en el Laboratorio de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Coahuila (UADEC), mediante diversos métodos volumétricos y analíticos respaldados por las normas mexicanas correspondientes. Para el caso de los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , sus concentraciones se calcularon multiplicando la dureza temporal, calculada previamente por titulación con EDTA 0.2N (SCFI, 2001c) por el factor 0.4 y 0.24, respectivamente. Por su parte, las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  se obtuvieron mediante espectrofotometría de absorción atómica con llama (AA240FS Varian) utilizando curvas de calibración con cinco estándares de 0.4 a 1.2 mg/l y de 0.3 a 1.5 mg/l, respectivamente, a partir de estándares certificados de 1 000 mg/l (SCFI, 2001b). Las concentraciones de los aniones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  se adquirieron por titulación con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 0.02N (SCFI, 2001a),  $\text{BaCl}_2$  a 0.1N (SCFI, 2014), y  $\text{AgNO}_3$  a 0.01N (SCFI, 2001d), respectivamente.

Los análisis isotópicos se hicieron con el analizador isotópico de agua Picarro L2130-I, propiedad del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California. El equipo, basado en la tecnología "Cavity Ring-Down Spectroscopy" (CRDS) mide la razón isotópica de  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  con alta precisión (errores bajos inferiores a 0.1 ‰) (Picarro Inc., 2008). Las muestras filtradas y sin ácidos adicionados son contenidas en pequeños viales (hasta 200  $\mu\text{l}$ ) y colocadas en un automuestreador del equipo, conjuntamente con agua desionizada y los respectivos estándares internos Pi-Z ( $\delta^{18}\text{O} = 0.3$  ‰;  $\delta\text{D} = 1.8$  ‰); Pi-M ( $\delta^{18}\text{O} = -20.6$  ‰;  $\delta\text{D} = -159.0$  ‰) y Pi-D ( $\delta^{18}\text{O} = -29.6$  ‰;  $\delta\text{D} = -235.0$  ‰); y los estándares internacionales certificados VSMOW2 ( $\delta^{18}\text{O}$

= 0 ‰;  $\delta D = 0$  ‰), GISP ( $\delta^{18}O = -24.7$  ‰;  $\delta D = -189.9$  ‰) y SLAP ( $\delta^{18}O = -55.5$  ‰;  $\delta D = -428.0$  ‰). En cada análisis se obtienen 10 mediciones, donde las primeras cinco son ignoradas (para eliminar el efecto memoria), y las últimas cinco se consideran para la corrección de los datos sin procesar. La corrección de los datos se realiza con base en los estándares internacionales e internos por el método de regresión lineal.

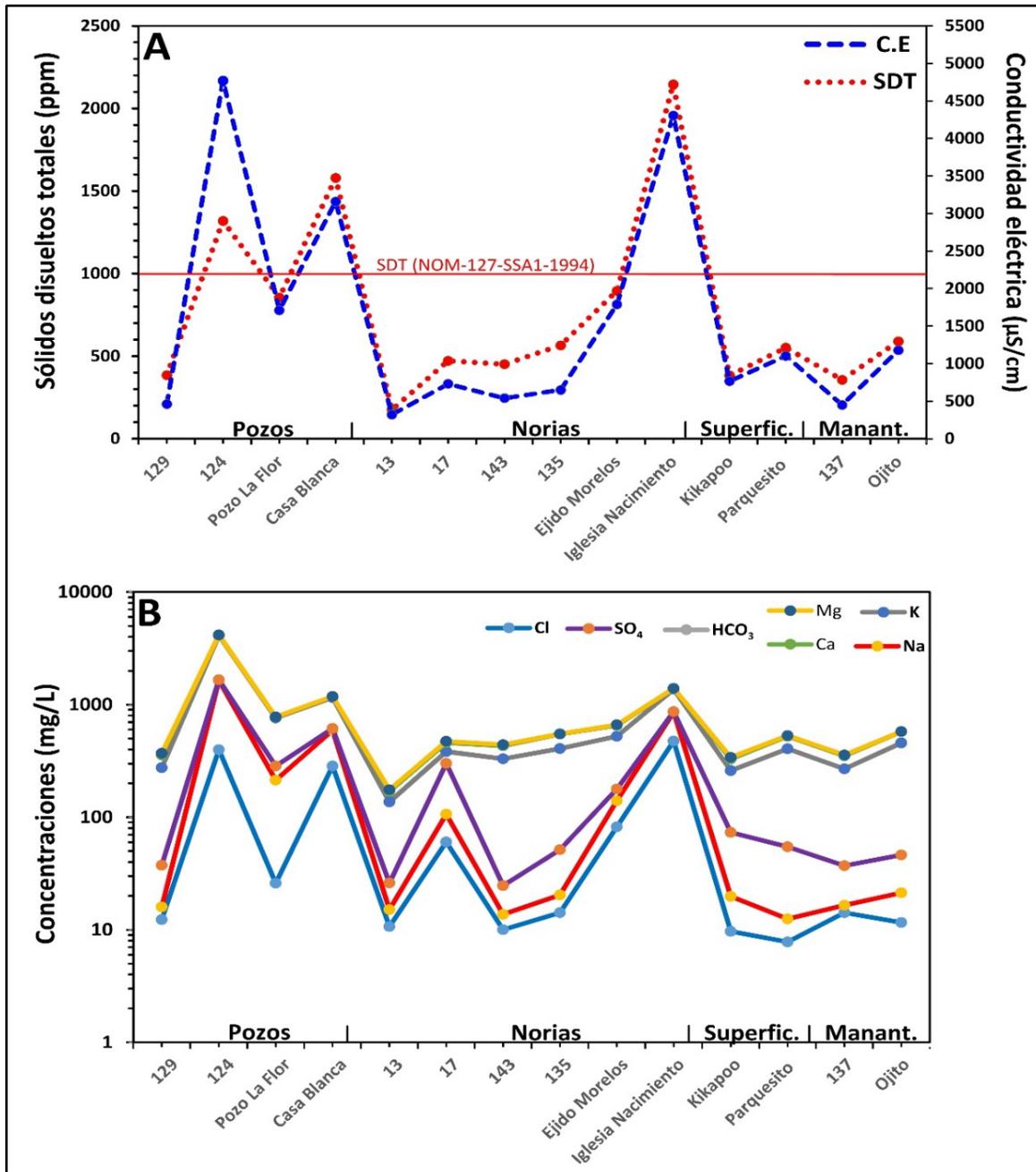
La reproducibilidad de los análisis para  $\delta^{18}O$  y  $\delta D$  fue de alrededor de  $\pm 0.1$  ‰ y  $\pm 0.4$  ‰, respectivamente. Esos datos son reportados en comparación con el estándar Vienna Standard Mean Ocean Water 2 (V-SMOW2), mientras que los resultados se informaron en notación  $\delta$ , como desviaciones de las relaciones isotópicas en partes por mil (‰) de acuerdo con los criterios de Craig (1961).

## Resultados

Las 14 muestras en estudio presentan diferencias físico-químicas entre sí (Tabla 1), lo que presupone la ocurrencia de variados procesos hidroquímicos en dichos sitios. El error de balance calculado a partir de la sumatoria de aniones y cationes en meq/l arrojó valores inferiores al 10 %, lo que indica una calidad óptima de los datos (Appelo & Postma, 1994).

En detalle, con la excepción del pozo 129, todas las muestras provenientes de los pozos presentan una mayor concentración en sólidos disueltos totales (SDT) y en la conductividad eléctrica (C.E.) (Figura 2A). En detalle, los pozos Casa Blanca (1 579 ppm) y 124 (1 319 ppm), y la

noria Iglesia Nacimiento (2 146 ppm) tienen concentraciones de SDT por encima del valor máximo permisible estipulado por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Figura 2A; SDT-1000 ppm), por tanto presentan una deficiente calidad de agua para fines de consumo humano. El resto de las norias, fuentes superficiales y manantiales muestran valores de SDT inferiores a 895 ppm y C.E. por debajo de 1 177  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



**Figura 2.** Análisis químico comparativo de las muestras de agua: A) contenido de sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica; B) concentraciones de los elementos mayoritarios en las aguas. C.E.: conductividad eléctrica; SDT: sólidos disueltos totales.

En relación con la composición química de las aguas (Figura 2B), se observa que las muestras más enriquecidas en los constituyentes mayoritarios son nuevamente los pozos 124 y Casa Blanca, así como la noria Iglesia Nacimiento. Los mayores contenidos en  $\text{Cl}^-$  se reportan de la siguiente manera: Iglesia Nacimiento (2 146 mg/l); Pozo Casa Blanca (1 579 mg/l), y Pozo 124 (1 319 mg/l), mostrando un enriquecimiento de 8.5, 6.3 y 5.2 veces, respectivamente, en comparación con el límite máximo permisible que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 ( $\text{Cl}^- = 250 \text{ mg/l}$ ). Para el elemento  $\text{Na}^+$  se reportan enriquecimientos de hasta seis veces en la muestra del pozo 124 con respecto a la norma de calidad de agua antes mencionada. De forma general, los cuerpos superficiales y los manantiales presentan concentraciones bajas en la mayoría de los constituyentes químicos lo cual demuestra que no están siendo afectados por procesos profundos.

Desde el punto de vista isotópico, las aguas en análisis varían entre  $-3.29 \text{ ‰}$  y  $-7.36 \text{ ‰}$  para el isótopo  $\delta^{18}\text{O}$ ; mientras que valores entre  $-23.02 \text{ ‰}$  y  $-48.24 \text{ ‰}$  se reportan para el deuterio (Tabla 2). De forma general se observa que las aguas superficiales (p. ej., Kikapoo y Parquecito) presentan los valores más empobrecidos (más ligeros) en ambos isótopos en relación con el resto de los cuerpos de agua, mientras que la muestra más enriquecidas en ambos isótopos (más pesadas) es la Noria ( $\delta^{18}\text{O} = -3.29 \text{ ‰}$ ). El pozo Aparicio no se encuentra en el área de estudio, pero debido a su localización en la sierra de Santa Rosa puede ayudar a comprender la relación de esta cadena montañosa con la hidrología y los procesos de recarga ocurridos en la región.

**Tabla 2.** Composición isotópica de oxígeno y deuterio de las aguas en estudio (msnm: metros sobre el nivel medio del mar).

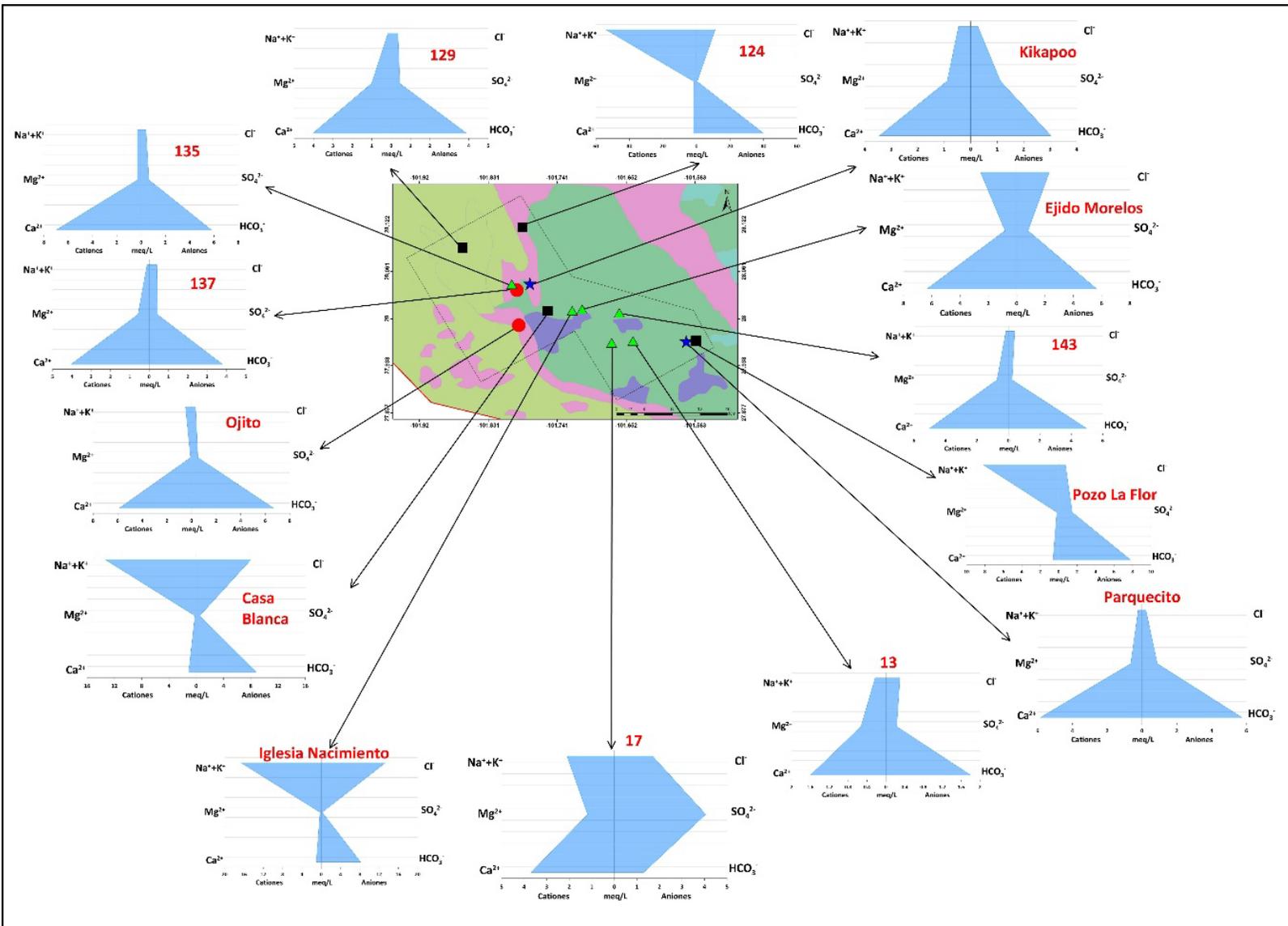
Muestras	Descripción	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta\text{D}$ (‰)	Altitud (msnm)
Kikapoo	Río	-7.36	-48.24	513
Parquecito	Río	-6.66	-43.49	455
Ejido Morelos	Noria	-6.09	-38.83	492
Iglesia Nacimiento	Noria	-4.79	-31.73	489
Noria	Noria	-3.29	-23.09	448
Pozo La Flor	Pozo	-6.24	-39.83	513
Pozo Casa Blanca	Pozo	-5.33	-34.87	605
Pozo Aparicio	Pozo	-7.04	-44.62	605
Ojito	Manantial	-5.02	-32.85	564
Divi	Manantial	-5.38	-34.21	570
Agua meteórica Múzquiz	Agua meteórica	-7.23	-47.8	500

Fuente: La composición del océano fue tomada de Craig (1961).

## Discusión

### **Procesos hidrogeoquímicos e isotópicos que controlan la variabilidad química en los cuerpos hídricos**

En la Figura 3 se presenta el mapa hidroquímico regional basado en los diferentes diagramas de Stiff (1951), lo que ofrece una visión general de los diferentes tipos de agua y su localización espacial.

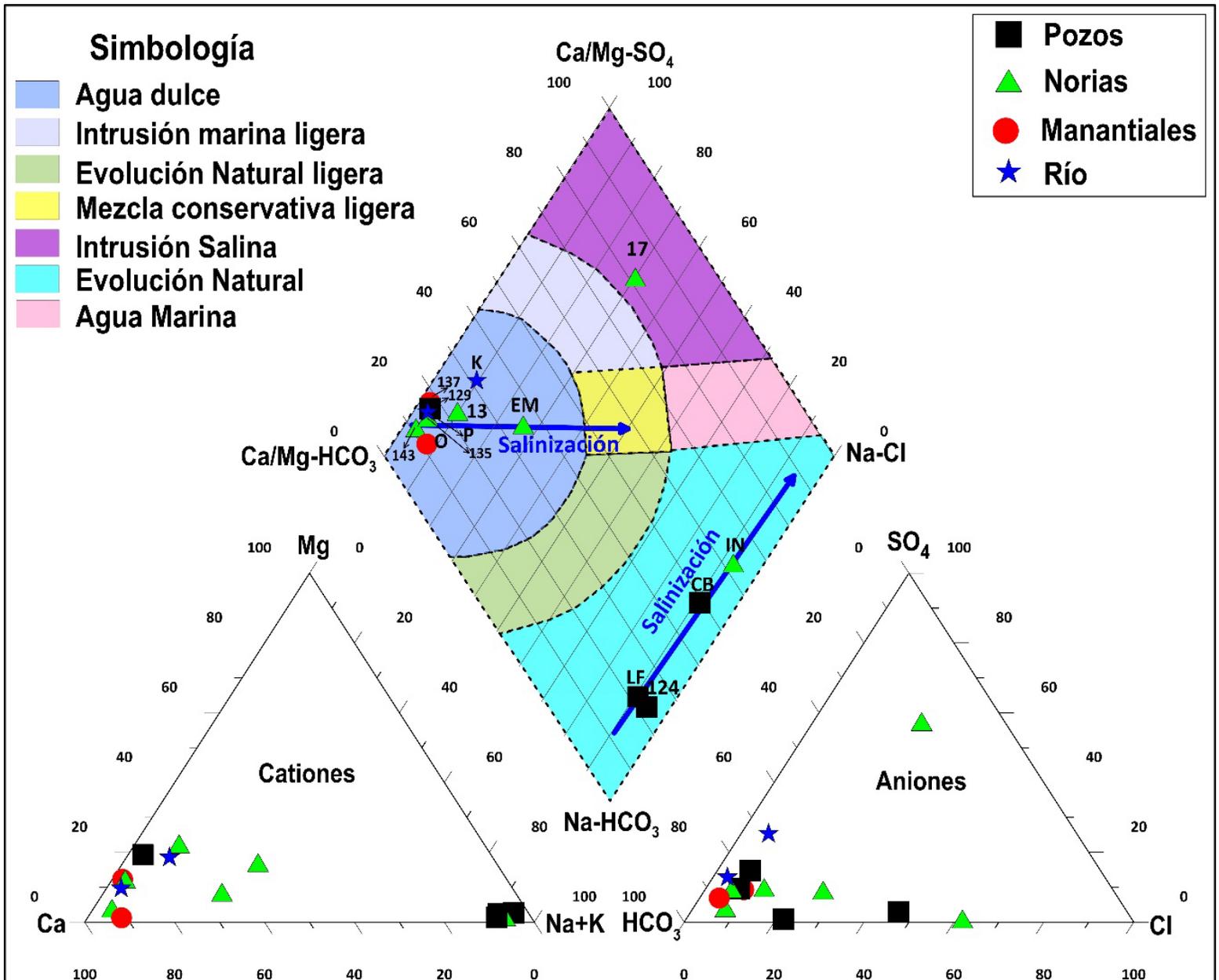


**Figura 3.** Mapa del quimismo de las aguas del área de estudio a partir de los diferentes gráficos de Stiff. En el mapa: cubos negros-pozos, triángulos verdes-norias, círculos rojos-manantiales y estrellas azules-ríos y arroyos.

Como se indica en la Figura 3, se identifican nueve muestras de agua de tipo bicarbonatada-cálcica y/o magnésica; tres muestras de tipo bicarbonatadas-sódicas; una muestra de tipo clorurada-sódica y/o potásica, y una muestra clasificada como sulfatada cálcica y/o magnésica. En el caso de la noria Ejido Morelos, el patrón del diagrama de Stiff, aunque mayoritariamente de tipo bicarbonatado cálcico, tiene incrementos de cloruros y sodio, lo que sugiere procesos de aumento en la salinidad. De forma general, a pesar de ser un área no tan extensa, con una superficie total de 521 km<sup>2</sup>, se observa gran variabilidad química en los diferentes cuerpos de agua, lo cual es el resultado de variados procesos geohidrológicos y ambientales. En tal sentido, el diagrama de Piper (1944), modificado por Kelly (2006), ofrece una interpretación más completa.

Kelly (2006) definió los principales procesos hidroquímicos responsables de la variabilidad química en los cuerpos de agua, aportando un enfoque diferente al rombo de Piper (1944), en el que establece siete nuevos campos (Figura 4). En dicha figura se observa que las aguas clasificadas como bicarbonatadas-cálcicas (p. ej., muestras 129, 135, 137, Ojito, 13, Parquecito, 143 y Kikapoo) se localizan en el campo de aguas dulces, por lo que desde el punto de vista de calidad de agua son óptimas para diversas actividades. La composición de tales aguas proviene de la disolución de minerales presentes en rocas carbonatadas ricas en Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Choi *et al.*, 2014), que conforman la sierra de Santa Rosa en las formaciones La Peña y Aurora. Sin embargo, se observa que la muestra de la noria Ejido Morelos se aleja del vértice, con

una tendencia hacia el campo definido por Kelly (2006) como “mezcla conservativa ligera” por intrusión salina, como se observa en la Figura 4.



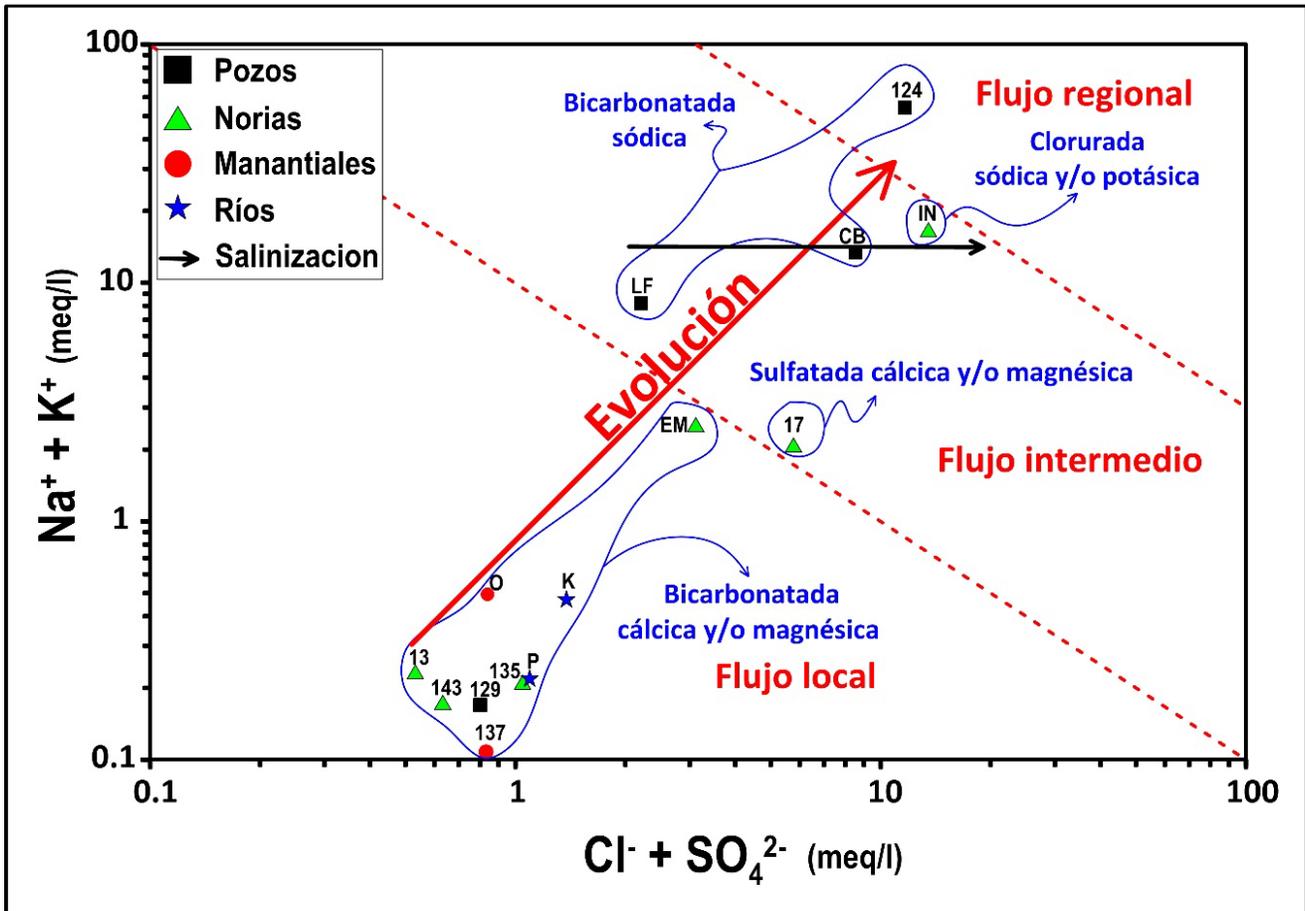
**Figura 4.** Diagrama Kelly (2006) que muestra los principales procesos hidroquímicos que controlan el quimismo de las aguas.

Las aguas del tipo bicarbonatadas-sódicas son reportadas para los pozos La Flor, 124 y Casa Blanca (Figura 4). El aumento en la concentración de sodio en estas aguas parece estar relacionado con procesos de interacción agua-roca donde existe elevado intercambio iónico, probablemente entre arcillas, fuente importante de suministro de sodio. Dichas secuencias podrían estar en profundidad interactuando con los flujos del acuífero. Para el caso del pozo Casa Blanca y la noria Iglesia Nacimiento se observa una tendencia hacia el vértice de las aguas cloruradas sódicas, lo cual es un indicio de salinización de dichas aguas. En este caso y, por tratarse de pozos y norias, la disolución de sales existentes en el medio geológico, probablemente de naturaleza evaporítica muy comunes en el norte de Coahuila (Padilla-y-Sánchez, 2007; González-Sánchez, Puente-Solís, González-Partida, & Camprubí, 2007; Eguiluz-de-Antuñano, 2001), podría justificar dicho proceso y, por ende, el aumento en las concentraciones de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , SDT y la conductividad eléctrica discutidos previamente. No obstante, los procesos superficiales, como la evaporación o la infiltración de aguas o soluciones muy evaporadas, también podrían inducir sales al medio, ya que se trata de zonas semiáridas donde la evaporación es dominante sobre las precipitaciones (Batista-Cruz *et al.*, 2022).

Una sola muestra (p. ej., noria 17) es clasificada como sulfatada-cálcica y/o magnésica, y se localiza en el campo de intrusión salina (Kelly, 2006). Aguas de este tipo pueden deber su composición a diferentes procesos, entre los que se destacan los siguientes: a) lavado de terrenos formados en ambiente marino; b) oxidación de sulfuros que se

encuentran ampliamente distribuidos en rocas ígneas y sedimentarias, y c) descomposición de sustancias orgánicas. En el área de estudio, los procesos a) y b) son factibles debido a que, como ya se expresó, la geología del estado presenta secuencias evaporíticas de las antiguas condiciones marinas restringidas que imperaron en la cuenca Sabinas desde el Triásico hasta el Cretácico Superior (Eguiluz-de-Antuñano, 2001), a la cual pertenece el área de estudio. La existencia de secuencias geológicas con rocas y minerales solubles como el yeso, anhidrita, halita, y sales magnésicas y potásicas es ampliamente documentado en toda la región, lo cual representa un problema para la calidad del agua en varios municipios por salinización (Batista-Cruz *et al.*, 2022). Sin embargo, la oxidación de sulfuros también es una vía no descartable de aporte de sulfato a las aguas. En este sentido, la sierra de Santa Rosa y gran parte de la geología coahuilense posee amplia distribución de depósitos minerales metálicos y submetálicos con importantes minas galena y hierro en explotación, por lo que ambos procesos parecen ser factibles como aportadores de sulfato a las aguas.

A partir del diagrama de Miffilin (1988) (Figura 5) se identificaron los diferentes tipos de flujos subterráneos con base en la concentración de los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Como se observa en el gráfico, las muestras en estudio se localizan en los tres flujos identificados por el autor (local, intermedio y regional).



**Figura 5.** Diagrama binario de Mifflin (1988), indicando la procedencia de los flujos local, intermedio y regional. En la figura se detallan además los diferentes tipos de aguas identificadas en los diagramas de Stiff y Piper para una mejor comprensión.

Las aguas pertenecientes al flujo local (manantiales 137 y Ojito; pozo 129; norias 13, 143, 135; y las muestras de aguas superficiales Kikapoo y Parquecito) corresponden a aguas poco evolucionadas y de reciente infiltración, que coinciden con una naturaleza química bicarbonatada-cálcica/magnésica y con los valores más bajos de las

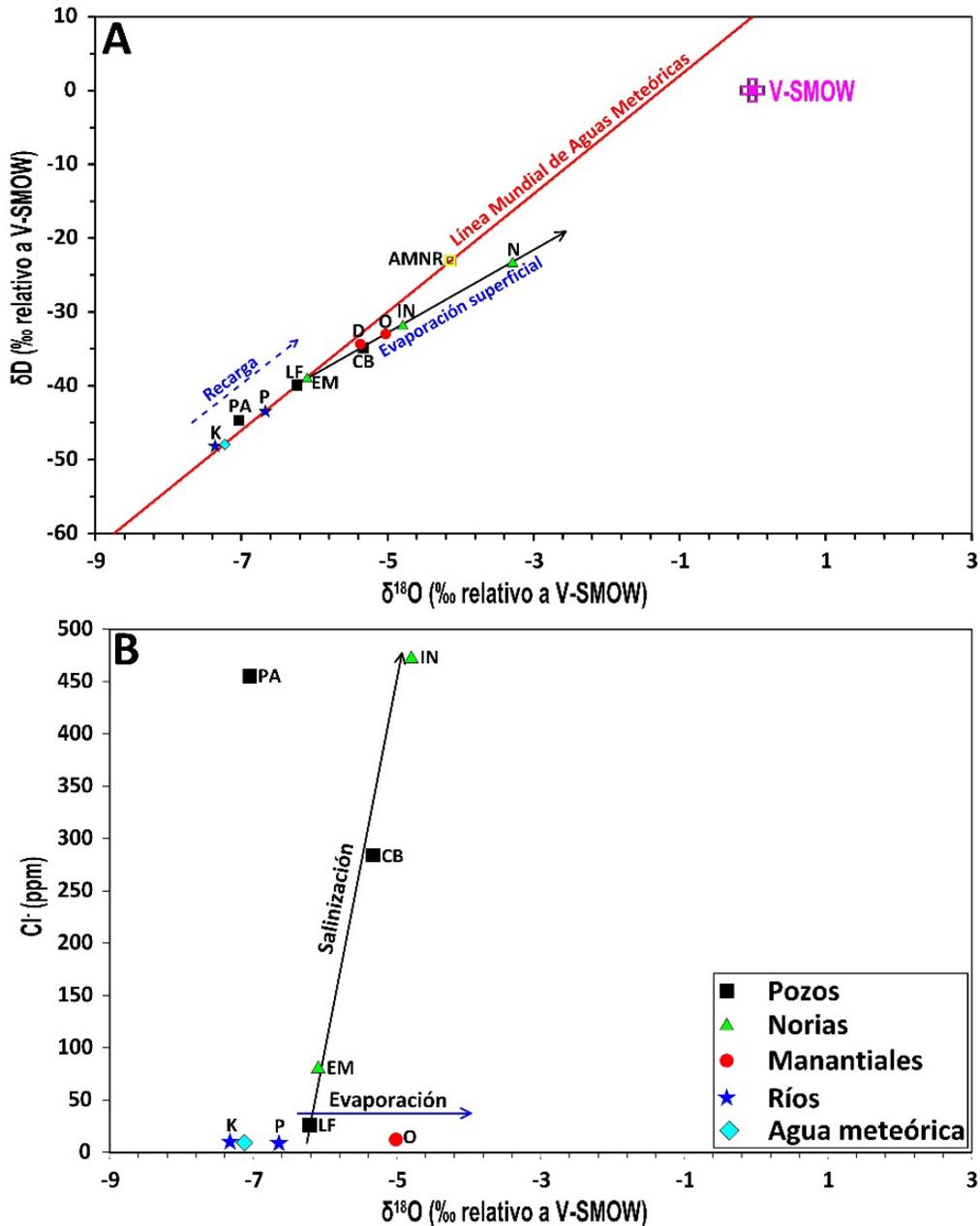
relaciones  $\text{Na}^++\text{K}^+$  y  $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$ . La muestra de Ejido Morelos, que anteriormente se habían identificado en el diagrama de Stiff y Piper con algo de salinidad debido a la intrusión salina, corrobora su tendencia hacia aguas más mineralizadas que se localizan en el flujo intermedio (Figura 5). En este campo se localizan además las muestras de agua provenientes de los pozos La Flor y Casa Blanca, así como las norias 17 e Iglesia Nacimiento. Estas aguas presentan una mayor evolución hidrogeoquímica, dada por un mayor tiempo de residencia en el medio geológico y la profundidad a la cual se infiltraron. De hecho, las aguas de Iglesia Nacimiento van evolucionando hacia la presencia de flujos regionales. De forma general, todos estos cuerpos hídricos tienen mayores concentraciones químicas, como lo demuestran los elevados valores en  $\text{Na}^++\text{K}^+$  y  $\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-}$ , en comparación con el resto de las muestras (Figura 5). De acuerdo con Chapelle (2000), los sistemas de flujo intermedio corresponden por lo general a acuíferos confinados de profundidad moderada (< 300 metros) y que se diferencian de los sistemas de flujo locales sobre todo en la extensión de la conexión con la superficie y con la zona no saturada. Al tratarse de pozos y norias, la presencia de estos flujos debajo de estos sitios parece estar justificada.

Por último, las aguas del pozo 124, que son las más enriquecidas en  $\text{Na}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$  (ver también Tabla 1 y Figura 4), se localizan químicamente dentro del flujo regional, por lo que corresponden a una zona de depositación de solutos, donde el agua se va saturando de iones, producto a la mineralización a lo largo de la trayectoria recorrida por el subsuelo. Así, se consideran las aguas más viejas, maduras y evolucionadas (Mifflin, 1988).

## Composición isotópica de las aguas

En estudios hidroquímicos, el uso de los isótopos estables (átomos de un mismo elemento con igual número atómico y diferente número másico) han influido de forma positiva en la interpretación de los procesos que forman parte del ciclo hidrológico y, por ende, permiten clarificar el origen del agua y los procesos de fraccionamiento que afectan su composición (Clark & Fritz, 1997; Mook, 2001). Con el objetivo de integrar la información isotópica con la composición hidrogeoquímica, en esta sección se presenta el origen de las aguas y el modelo conceptual del área de estudio. Lamentablemente no se cuenta con datos isotópicos de todas las muestras, por lo que el enfoque debe tomarse como general.

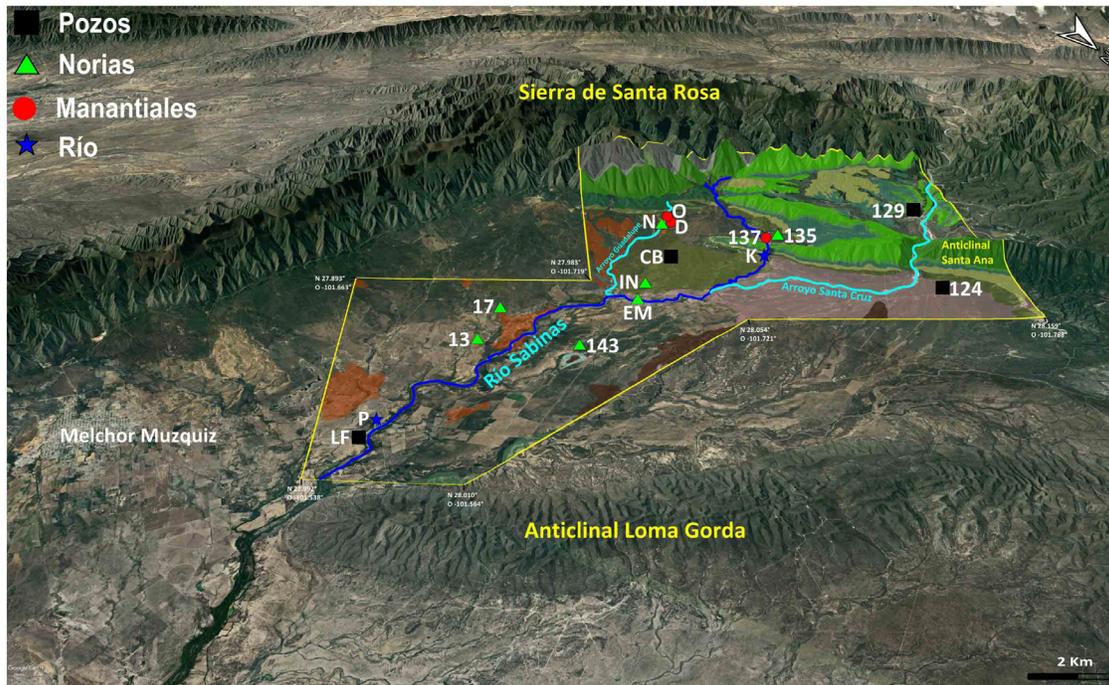
El gráfico isotópico oxígeno *versus* deuterio de la Figura 6 muestra los diferentes procesos de fraccionamiento presentes en los cuerpos hídricos en estudio. Las muestras superficiales de Kikapoo ( $\delta^{18}\text{O}$   $-7.36$  ‰;  $\delta\text{D}$   $-48.24$  ‰) y Parquecito ( $\delta^{18}\text{O}$   $-6.66$  ‰;  $\delta\text{D}$   $-43.49$  ‰); los pozos Aparicio ( $\delta^{18}\text{O}$   $-7.04$  ‰;  $\delta\text{D}$   $-44.62$  ‰) y La Flor ( $\delta^{18}\text{O}$   $-6.24$  ‰;  $\delta\text{D}$   $-39.83$  ‰), así como la noria Ejido Morelos ( $\delta^{18}\text{O}$   $-6.09$  ‰;  $\delta\text{D}$   $-38.83$  ‰) tienen un origen meteórico, procedente de las precipitaciones locales descargadas en la sierra de Santa Rosa ( $\delta^{18}\text{O}$   $-7.23$  ‰;  $\delta\text{D}$   $-47.8$  ‰), como lo muestra su localización sobre la línea mundial de aguas meteóricas de Craig (1961). Los ligeros cambios isotópicos hacia valores más pesados observados en el Pozo La Flor y la noria Ejido Morelos en relación con el agua meteórica se deben probablemente a diferencias del altitud y a procesos de interacción agua-roca o intercambio iónico (Giggenbach, 1991).



**Figura 6.** A) Gráfico isotópico oxígeno *versus* deuterio donde se han representado la línea mundial de aguas meteóricas y la composición isotópica del océano (VSMOW), ambas tomadas de Craig (1961); B) gráfico  $\delta^{18}O$  *versus* cloruros.

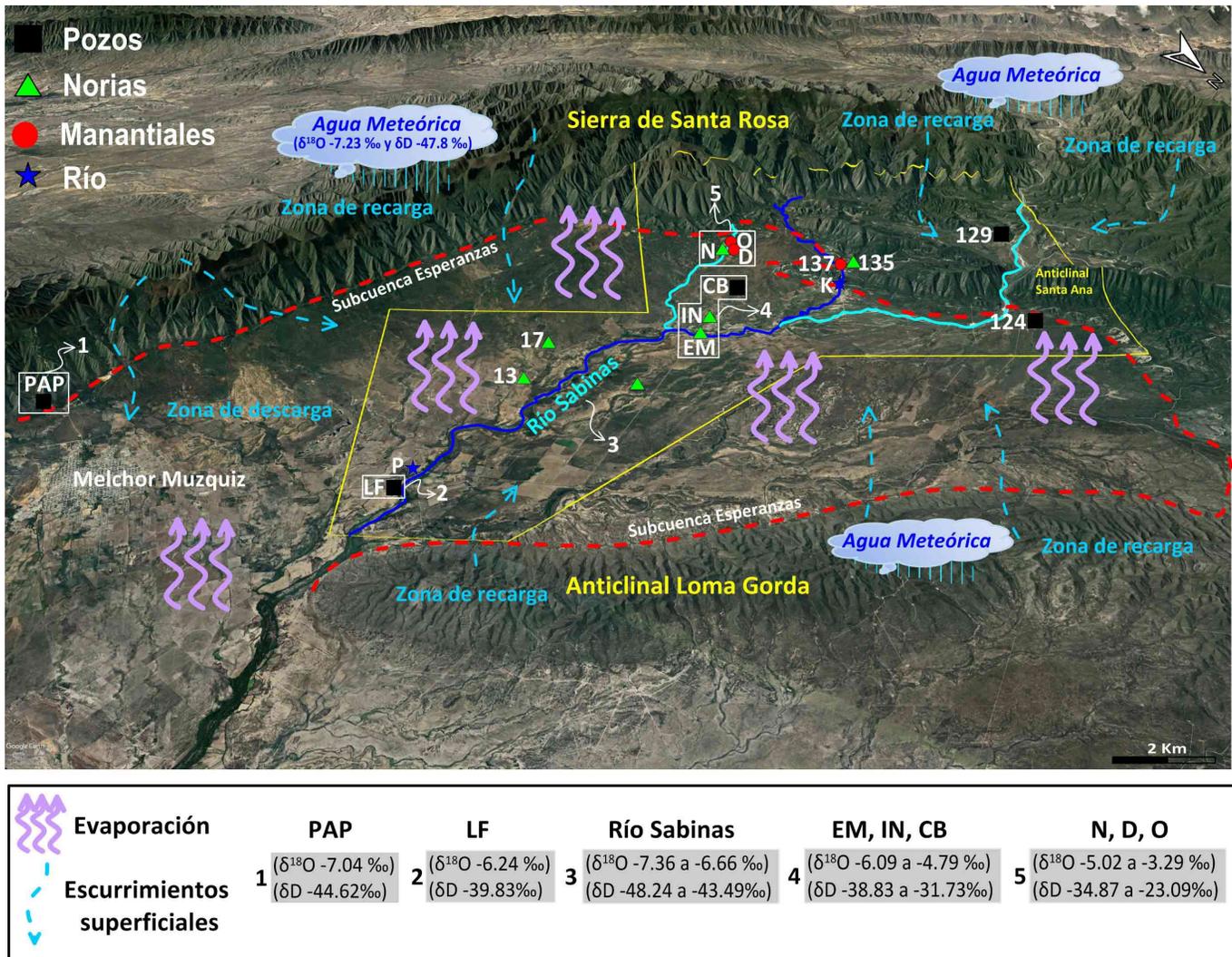
Los cuerpos hídricos con las firmas isotópicas más pesadas que las aguas meteóricas locales son Divi ( $\delta^{18}\text{O} -5.38 \text{ ‰}$ ;  $\delta\text{D} -34.21 \text{ ‰}$ ); Casa Blanca ( $\delta^{18}\text{O} -5.33 \text{ ‰}$ ;  $\delta\text{D} -34.87 \text{ ‰}$ ); Ojito ( $\delta^{18}\text{O} -5.02 \text{ ‰}$ ;  $\delta\text{D} -32.85 \text{ ‰}$ ); Iglesia Nacimiento ( $\delta^{18}\text{O} -4.79 \text{ ‰}$ ;  $\delta\text{D} -31.73 \text{ ‰}$ ), y Noria ( $\delta^{18}\text{O} -3.29 \text{ ‰}$ ;  $\delta\text{D} -23.09 \text{ ‰}$ ). En un principio, estas aguas deben provenir de las precipitaciones locales, pero han sido fraccionadas por procesos de evaporación superficial y/o disolución de minerales existentes en el subsuelo. Debido a la intensa evaporación superficial y las escasas precipitaciones de la región, al igual que la limitada profundidad de las estas obras (no superan los 50 metros), estos procesos parecen ser factibles. La Figura 7 y Figura 8 muestran las particularidades geológicas, hidrológicas y ambientales que parecen controlar el quimismo de las aguas en el área de estudio. Desde el punto de vista geológico afloran 12 formaciones con edades que van del desde el Cretácico Inferior hasta el Neógeno y dos litologías cuaternarias innominadas del Holoceno compuestas por depósitos sedimentarios aluviales (SGM, 2003). El origen de la salinidad y el enriquecimiento en algunos iones como el sulfato podría estar relacionado con las condiciones de depósito y los ambientes sedimentarios que dieron lugar a dichas formaciones geológicas. Como se muestra en la Figura 7, en la sierra de Santa Rosa, el anticlinal Santa Ana y anticlinal Loma Gorda, las formaciones son de origen sedimentario, con predominancia de calizas y lutitas depositadas en ambientes marinos desde profundos (formación La Peña) hasta someros (formaciones Cupido, Aurora) y costeros de tipo estuarino tipo sabkha (formación La Mula) (Figura 7). En la base de las sierras y las mesetas afloran las

formaciones Buda, Eagle Ford, Austin, Upson, San Miguel y Olmos, cuya composición petrológica es mayormente de tipo lutítico, limolítico y arcilloso, con presencia también de calizas. Los ambientes de sedimentación varían desde neríticos hasta transicionales de tipo deltaico o prodelta.



Geología		Ambientes sedimentarios	
Holoceno	Qhoal Depósitos aluviales	Depósitos aluviales (continental aluvial)	
Holoceno	QpthoCgp Conglomerado poligenético	Conglomerado poligenético (continental aluvial)	
Neógeno	TplCgo Fm Sabinas	Fm Sabinas (continental fluvial)	
Cretácico superior	KmLu-Ar Fm Olmos	Fm Olmos (marino somero y deltaico)	
	KcAr-Lu Fm San Miguel	Fm San Miguel (deltaico)	
	KcLu-Lm Fm Upson	Fm Upson (plataforma de aguas someras y prodelta)	
	KcossCz-Lu Fm Austin	Fm Austin (nerítico con aporte terrigeno)	
	KcetLu-Cz Fm Eagle Ford	Fm Eagle Ford (marino somero)	
Cretácico inferior	KceCz Fm Buda	Fm Buda (nerítico)	
	KceLu-Cz Fm Del Río	Fm Del Río (nerítico)	
	KaCz-Do Fm Aurora	Fm Aurora (plataforma somera)	
	KapCz-Lu Fm La Peña	Fm La Peña (aguas profundas en zonas batiales)	
	KapCz Fm Cupido	Fm Cupido (plataforma somera)	
	KhbLu-Cz Fm La Mula	Fm La Mula (marinas a estuarinas tipo sabkha)	
	KaceCz-Lu Grupo Washita		

**Figura 7.** Mapa geológico del área de estudio realizado con la base geológica 1:250 000 del SGM (2003). En la leyenda del mapa se presentan las formaciones existentes en el área y se sintetizan los ambientes de sedimentación de acuerdo con el léxico estratigráfico mexicano tomado de SGM (2003). La litología depósitos aluviales (Qhoal) está representada sin color de fondo en el mapa.



**Figura 8.** Modelo geohidrológico e isotópico conceptual del área de estudio representando los principales procesos hidrológicos y ambientales que controlan el quimismo de las aguas. Las letras en la leyenda inferior están referidas en el texto.

Numerosos trabajos se han referido a la presencia de sales y minerales, como el yeso, en algunas de estas formaciones en varias partes de Coahuila. De acuerdo con Santamaría *et al.* (1991), en la

formación La Mula, por ejemplo, existen horizontes de minerales solubles como anhidrita y yeso. Esta formación aflora en nuestra área de estudio, lo cual sugiere que los flujos superficiales y subterráneos de la sierra de Santa Rosa podrían lixiviar dichos minerales, y aportar  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  a las aguas, como sucede en la muestra noria 17. Este proceso ha sido reportado previamente en algunas sierras que rodean el área de Cuatrociénegas (Mamer & Newton, 2017) y en la Sierra Menchaca (Czaja, Estrada-Rodríguez, & Flores-Olvera, 2014).

Para el caso de las evaporitas, la existencia de formaciones formadas en ambientes deltaicos, estuarinos y marinos someros semirrestringidos (Figura 7) podrían contener minerales como la halita ( $\text{NaCl}$ ) en sus estratos o secuencias. Sin embargo, aunque en teoría parece ser factible, al menos en la sierras que rodean el área de estudio no hay reportes previos u observaciones de campo sobre la presencia de este mineral u otros minerales aportadores de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  a las aguas, por lo que parece tratarse de procesos superficiales. De hecho, tampoco se reportan sales en los valles aluviales formados por la formación Sabinas, los conglomerados poligenéticos y los depósitos aluviales.

Los procesos superficiales de carácter ambiental se presentan en el modelo de la Figura 8.

El modelo comienza con la caída de aguas meteóricas sobre las sierras que rodean la subcuenca Esperanzas, donde se localiza el área de estudio (Figura 8). Los procesos de recarga-descarga permiten que los valles y planicies obtengan volúmenes importantes de agua y con ello las firmas isotópicas iniciales de tipo meteórica ( $\delta^{18}\text{O} -7.23\text{‰}$ ;  $\delta\text{D} -47.8\text{‰}$ ) se van modificando hacia valores ligeramente más pesados en ambos

isótopos, como se evidencia en las muestras de los pozos PAP ( $\delta^{18}\text{O} - 7.04\text{‰}$ ;  $\delta\text{D} - 44.62\text{‰}$ ) y LF ( $\delta^{18}\text{O} - 6.24\text{‰}$ ;  $\delta\text{D} - 39.83\text{‰}$ ). Estas firmas son consistentes con procesos de infiltración en las secuencias carbonatadas e intercambio iónico. Por su parte, la composición isotópica del río Sabinas ( $\delta^{18}\text{O} - 7.36$  a  $-6.66\text{‰}$ ;  $\delta\text{D} - 48.24$  a  $-43.49\text{‰}$ ), tomada de las muestras Parquecito y Kikapoo, está en el rango de la composición del agua meteórica, lo cual confirma su estrecha relación como parte del ciclo hidrológico del área. El resto de cuerpos hídricos con datos isotópicos disponibles sufre procesos evaporación, lo cual fracciona ambos isótopos hacia valores más pesados (Horita, 2005). Esto se observa en las muestras Ejido Morelos, Iglesia Nacimiento y Casa Blanca (Punto 2 en la Figura 8), así como en las muestras Noria, Ojito y Divi (punto 3 en la Figura 8). A modo de resumen se puede evidenciar que los procesos de lixiviación y disolución de rocas minerales, la evaporación superficial y el transporte de solutos incrementan los contenidos en  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y otros cationes, al igual que en los SDT y la conductividad eléctrica en todas las muestras en estudio.

Los datos aquí presentados muestran la complejidad hidroquímica de los recursos hídricos en subcuencas semiáridas, lo cual denota que los estudios geohidrológicos requieren de un análisis profundo, tanto químico como isotópico, para esclarecer el origen de las aguas y su quimismo. El estudio también resalta la sinergia que existe entre la hidroquímica y la isotopía en la identificación de fenómenos que afectan los cuerpos hídricos y, por ende, sirve como caso de estudio para futuros trabajos de este tipo en el estado de Coahuila o fuera de éste.

## Conclusiones

A partir de los datos y argumentos presentados en este trabajo se concluye lo siguiente:

1. En la zona de estudio se identificaron diferentes tipos de aguas que responden a variados procesos geohidrológicos y ambientales, por ejemplo:
  - a) Se identifican aguas de tipo bicarbonatada-cálcica para los sitios 129, 143, 13, 137, 135, Ojito, Parquecito y Kikapoo, cuya composición refleja la disolución de carbonatos de las formaciones geológicas presentes en la sierra de Santa Rosa y sierras circundantes.
  - b) Las aguas de tipo sulfatada-cálcica y/o magnésica se reportan para la noria 17, cuyo enriquecimiento en sulfato sugiere la ocurrencia de procesos de intrusión salina o disolución de rocas evaporíticas, como el yeso. Dicho mineral podría estar presente en la formación La Mula, que aflora en la sierra de Santa Rosa.
  - c) Se identifican procesos de salinización en los pozos LF, 124 y CB, y las norias IN y EM. El incremento de las sales parece estar relacionado con la evaporación superficial y posterior infiltración de sales al acuífero. Sin embargo, no se descarta que las formaciones de origen delataico, estuarino o tipo sabkha presentes en el área pudieran contener minerales solubles como la halita con incidencia en el acuífero.

2. El diagrama de Miffilin mostró la existencia de diferentes flujos, desde local hasta regional. Los flujos locales corresponden con las aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas; los flujos intermedios son aquellas aguas clasificadas como sulfatadas cálcicas, cloruradas sódicas y bicarbonatadas sódicas; mientras que las aguas del pozo 124 se consideran dentro del flujo regional, pues es la muestra más enriquecida en sodio y corresponde a una zona de depositación de solutos, donde la composición química tiende a ir aumentando su mineralización hasta irse saturando en los diferentes iones a lo largo de la trayectoria recorrida por el subsuelo.
3. Desde el punto de vista isotópico se propone un origen meteórico para la mayoría de los cuerpos hídricos en estudio, cuya zona de recarga proviene de la sierra de Santa Rosa y las sierras que bordean la subcuenta. El resto de las aguas sufren evaporación superficial y/o disolución de sales, generando fraccionamiento isotópico y firmas isotópicas más pesadas.
4. Las características geológicas, los ambientes de sedimentación y procesos ambientales que ocurren en subcuencas de climas semiáridos son determinantes en el variable quimismo observado en las aguas y en el deterioro de la calidad del recurso.

### Agradecimientos

Se agradece de forma especial a la Lic. Karina Espinosa del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por la realización de los análisis isotópicos.

## Referencias

- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (1994). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Rotterdam, The Netherlands: A. A. Balkema.
- Batista-Cruz, R. Y., Liotta, M., Batista-Rodríguez, J. A., Montecelos-Zamora, Y., Kretzschmar, T., De-la-Garza Rodríguez, I. M., Canales- Gutiérrez, L. E., Díaz-Martínez, R., Blanco-Moreno, J. A., Almaguer- Carmenates, Y., Rodríguez-Vega, A., & López-Saucedo, F. J. (2022). Hydrochemical and isotopic characterization of the Region Carbonífera aquifer: An example of hydrogeological systems in the semi-arid climates of northeastern Mexico. *Applied Geochemistry*, 1(141), 105307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105307>
- Chapelle, F. H. (2000). *Ground-water microbiology and geochemistry* (2<sup>nd</sup> ed.). New York, USA: John Wiley and Sons.
- Choi, B. Y., Yun, S. T., Kim, K. H., Kim, J. W., Kim, H. M., & Koh, Y. K. (2014). Hydrogeochemical interpretation of South Korean groundwater monitoring data using self-organizing maps. *Journal of Geochemical Exploration*, 137, 73-84. DOI: [10.1016/j.gexplo.2013.12.001](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.12.001)
- Clark, I. D., & Fritz, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. Boca Raton, USA: CRC Press & Lewis Publishers. DOI: [10.1201/9781482242911](https://doi.org/10.1201/9781482242911)

- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Región Carbonífera (0512), Estado de Coahuila*. Recuperado de <https://sigagis.conagua.gob.mx>
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Czaja, A., Estrada-Rodríguez, J. L., & Flores-Olvera, H. (2014). The gypsum dunes of Cuatrociénegas Valley, Mexico. A secondary Sabkha ecosystem with gypsophytes. In: Khan, M. A., Böer, B., Öztürk, M., Al Abdessalaam, T. Z., Clüsener-Godt, M., & Gul, B. (eds.). *Tasks for vegetations science (Vol. 47). Sabkha ecosystems (Vol. IV). Cash crop halophyte and biodiversity conservation* (pp. 81-92). Netherlands: Springer.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (2000). *Modificación a la Norma Oficial Mexicana 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: Diario Oficial de la Federación.
- Eguiluz-de-Antuñano, S. (2001). Geologic evolution and gas resources of the Sabinas Basin in Northeastern México. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin (AAPG Bulletin) Memoir*, 75, 241-270.
- Felstead, N. J., Leng, M. J., Metcalfe, S. E., & Gonzalez, S. (2015). Understanding the hydrogeology and surface flow in the Cuatrociénegas Basin (NE Mexico) using stable isotopes. *Journal of Arid Environments*, 121, 15-23.

- González-Sánchez, F., Puente-Solís, R., González-Partida, E., & Camprubí, A. (2007). Estratigrafía del noreste de México y su relación con los yacimientos estratoligados de fluorita, barita, celestina y Zn-Pb. *Bol. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59, 43-62.
- Giggenbach, W. F. (1991). Chemical techniques in geothermal exploration. In: D'Amore, F. (ed.). *Application of geochemistry in geothermal reservoir development* (pp. 119-142). Rome, Italy: UNITAR/UNDP Publication.
- Gilabert-Alarcón, C., Daesslé, L. W., Salgado-Méndez, S. O., Pérez-Flores, M. A., Knöller, K., Kretzschmar, T. G., & Stumpp, C. (2018). Effects of reclaimed water discharge in the Maneadero coastal aquifer, Baja California, Mexico. *Applied Geochemistry*, 92, 121-139.
- Hassani, A., Azapagic, A., & Shokri, N. (2021). Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century. *Nature Communications*, 12, 6663.
- Horita, J. (2005). Saline waters. In: Aggarwal, P. K., Gat, J. R., Froehlich, K. F. (eds.). *Isotopes in the water cycle: Past, present and future of a developing science* (pp. 271-287). New York, USA: Springer.
- Johannesson, K. H., Alejandra, C., & Kilroy, K. C. (2004). Reconnaissance isotopic and hydrochemical study of Cuatro Ciénegas groundwater, Coahuila, México. *Journal of South American Earth Sciences*, 17, 171-180. DOI: 10.1016/j.jsames.2004.01.002

- Kelly, D. J. (2006). *Development of seawater intrusion protection regulations*. Session 6 (pp. 135-146). 1st SWIM-SWICA Joint Saltwater Intrusion Conference, Cagliari-Chia Laguna, Italy, September 24-29.
- Mamer, E., & Newton, T. B. (2017). *The relationship between the Cuatrociénegas gypsum dune field and the regional hydrogeology, Coahuila, Mexico*. Recuperado de [https://geoinfo.nmt.edu/publications/openfile/downloads/500-599/589/OFR-589\\_Cuatrociénegas.pdf](https://geoinfo.nmt.edu/publications/openfile/downloads/500-599/589/OFR-589_Cuatrociénegas.pdf)
- Mifflin, M. D. (1988). Region 5, great basin. In: Back, W., Rosenshein, J. S., & Seaber, P. R. (eds.). *Hydrogeology* (pp. 69-78). Washington, DC, USA: Geological Society of America.
- Mook, W. G. (2001). *Environmental isotopes in the hydrological cycle (Principles and applications)*. Paris, France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Nollet, L. M. L. (2000). *Handbook of water analysis food science and technology*. London, UK: Springer.
- Padilla-y-Sánchez, R. K. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(1), 19-42.
- Picarro Inc. (2008). *Picarro L1102- i Isotopic Water Liquid Analyzer*. Santa Clara, USA: Picarro Inc.
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union Transactions*, 25, 914-923.

- Raynal-Gutiérrez, M. E. (2020). Water use and consumption: industrial and domestic. In: Raynal-Villasenor, J. A (ed.). *Water resources of Mexico* (pp. 103-116). Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-40686-8\_6
- Santamaría, D., Ortuño, A. F., Adatte, T., Ortíz, U. A., Riba, R. A., & Franco, N. S. (1991). *Evolución geodinámica de la cuenca de Sabinas y sus implicaciones petroleras, estado de Coahuila*. México, DF, México: Gerencia de Investigación Aplicada a la Exploración, Subdirección de Tecnología de Exploración, Instituto Mexicano del Petróleo.
- SCFI, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2001a). *NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba*. Recuperado de <http://dof.gob.mx>
- SCFI, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2001b). *NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua-determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Recuperado de <http://dof.gob.mx>
- SCFI, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2001c). *NMX-AA-072-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Recuperado de <http://dof.gob.mx>

- SCFI, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2001d). *NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Recuperado de <http://dof.gob.mx>
- SCFI, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2014). *NMX-AA-074-SCFI-2014. Análisis de agua - medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Recuperado de <http://dof.gob.mx>
- SCFI, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (2015). *NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba*. Recuperado de <http://dof.gob.mx>
- SGM, Servicio Geológico Mexicano. (2003). *Carta geológico-minera Nueva Rosita G14-A13. Coahuila. Escala 1:50,000*. Pachuca, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Stiff, H. A., Jr. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of Petroleum Technology*, 3, 15-17. DOI: 10.2118/951376-G
- Torres-Martínez, J. A., Mahlkecht, J., Hernández-Antonio, A., & Mora, A., (2017). Origin of the salinity in the coastal aquifer of La Paz, Mexico. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17, 520-523. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.131>

Wurl, J., Gamez, A. E., Ivanova, A., Lamadrid, M. A. I., & Hernandez-Morales, P. (2018). Socio-hydrological resilience of an arid aquifer system, subject to changing climate and inadequate agricultural management: A case study from the Valley of Santo Domingo, Mexico. *Journal of Hydrology*, 559 486-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.050>