

Presencia de altas concentraciones de Litio en manantiales termales ubicados en Potentes Sucesiones Sedimentarias del Jurásico-Paleógeno en el Noreste de México

Por: Jerjes R., Pantoja-Irlys^{1*}, Hugo Mujica-Sánchez¹, Luis E., Arista-Cázares¹, Carlos Trejo-De León¹, Luis Lara-Saba², Antonio Cardona Benavides³

Resumen

Los resultados de las investigaciones geológicas, geoquímicas e isotópicas que se están desarrollando actualmente en el Noreste de México, sugieren una asociación de alineamientos de fallas y cabalgamientos que involucran la sucesión de rocas sedimentarias carbonatadas-evaporíticas en profundidad, reteniendo en ellas reservorios geotérmicos “superficiales”, los cuales enriquecen las soluciones térmicas con elementos que suben a la superficie. Se han cuantificado concentraciones comparativamente altas de Li, B, Cl, Cs, Mo, Rb, Sr y Zn en las aguas subterráneas de diferentes manantiales termales que surgen a lo largo del frente oriental de la Sierra Madre Oriental. Los isótopos de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ y $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ indican que los fluidos hidrotermales se originan en zonas de recarga de alta montaña donde comienzan a filtrarse a una profundidad donde el gradiente térmico favorece la formación de reservorios geotérmicos. Las sales de las rocas evaporíticas invierten el gradiente térmico profundo y lo trasladan a la porción superior o coronas de las sucesiones carbonatadas evaporíticas. La presencia enriquecida de Li y otros elementos valiosos en estas soluciones hidrotermales, es evidencia indirecta de su contenido en las rocas evaporíticas que subyacen a poderosas sucesiones sedimentarias carbonatadas y siliciclásticas de la Sierra Madre Oriental y la Planicie Costera del Golfo de México. Métodos metalúrgicos eficientes y efectivos en beneficio de los elementos valiosos de estas soluciones y salmueras

hidrotermales, detonarían una industria en la que México podría ser líder mundial. El mayor desafío científico, que conlleva un mayor beneficio social, corresponderá al tratamiento físico, químico y biológico del abundante recurso hídrico del que se extraen estos elementos, para que el agua extraída de los reservorios geotérmicos sea potabilizada y canalizada a las poblaciones e industrias del noreste de México, donde existe un estrés hídrico extremo.

Abstract

The results of the geological, geochemical, and isotopic research which is currently being carried out in Northeast Mexico suggest an association of fault and thrust alignments that involve the succession of carbonate-evaporitic sedimentary rocks at depth, retaining in them “shallow” geothermal reservoirs which enrich the thermal solutions with elements that rise to the surface. Comparatively high concentrations of Li, B, Cl, Cs, Mo, Rb, Sr, and Zn have been quantified in the groundwater of different hot springs that emerge along the eastern front of the Sierra Madre Oriental. Isotopes of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ indicate that hydrothermal fluids originate in high mountain recharge zones where they begin to percolate to a depth where the thermal gradient encourages the formation of geothermal reservoirs. The salts of the evaporitic rocks invert the deep thermal gradient and transfer it to the upper portion or crowns of the evapo-

¹Corporación Ambiental de México. Texcoco 100, Colonia Satélite Acueducto, 64960 Monterrey, Nuevo León, México.

²Corporación Ambiental de México. Patricio Sanz 1609, Torre 2, Piso 6, Colonia Del Valle, 03100 Benito Juárez, Ciudad de México, México.

³Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Avenida Doctor Manuel Nava 8, Zona Universitaria Poniente, CP. 78290 San Luis Potosí, México.

*Jerjes.pantojai@anahuac.mx; <https://www.researchgate.net/profile/Jerjes-Pantoja-Irlys>

ritic carbonate successions. The enriched presence of Li and other valuable elements in these hydrothermal solutions, is indirect evidence of their content in the evaporitic rocks that underlie powerful carbonate and siliciclastic sedimentary successions of the Sierra Madre Oriental and the Gulf of Mexico Coastal Plain. Efficient and effective metallurgical methods for the benefit of the valuable elements in these hydrothermal solutions and brines would trigger an industry in which Mexico could be a world leader. The greatest scientific challenge, which entails a better social benefit, will be the physical, chemical, and biological treatment of the abundant water resource from which these elements are extracted, so that the water extracted from the geothermal reservoirs will be made drinkable and channeled to the populations and industries of northeastern Mexico, where there is extreme water stress.

Introducción

La planeación e implementación de una investigación geológica, geoquímica, isotópica y microbiológica de las fuentes termales en el noreste de México (en curso y sin fines de lucro) se pudo lograr con la sinergia creada entre profesionales, estudiantes y académicos de la empresa Corporación Ambiental de México, S.A. de C.V. (CAM), del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM-GI), a través de la Dra. Rosa María ProL-Ledesma, de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), con la colaboración del Doctor Antonio Cardona Benavides y la Universidad de Texas (UTRGV) Rio Grande Valley, con la intervención del Dr. Daniele Provenzano.

Hasta el momento, la investigación ha resultado en la cartografía de los MT-NEM en un área de 84,577 km² y su contexto geológico (Figura 1); además de la obtención de datos fisicoquímicos en campo, análisis de laboratorio geoquímico, isotópico, microbiológico y la definición de modelos geotérmicos para explicar su génesis como parte de las sucesiones carbonatadas, siliciclásticas y evaporíticas que los incluyen en el noreste mexicano.

Durante la ejecución de esta investigación y el desarrollo de los modelos genéticos preliminares, se ha hecho muy evidente el enriquecimiento en

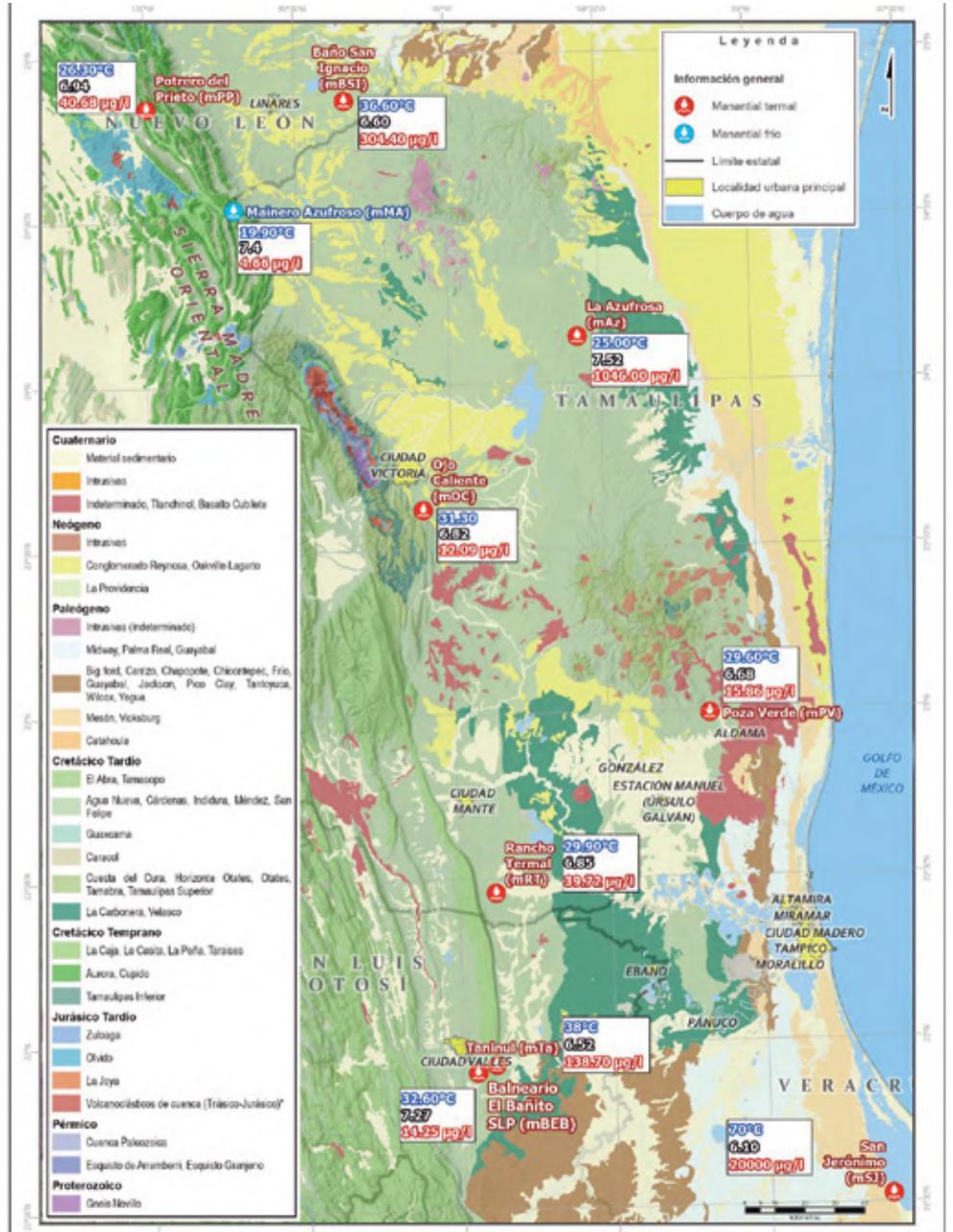


Figura 1. Geología y ubicación de manantiales termales de baja, media y alta entalpía en el noreste de México. En azul temperatura del agua, en negro pH y en rojo concentración de litio.

solutos del agua subterránea en cada uno de estos sistemas geotérmicos de baja, media y alta entalpía (Lee, 1996). El enriquecimiento del agua subterránea, de origen meteórico, ocurre en función de su tránsito por las diferentes formaciones geológicas por las que circula. Las especies mineralógicas y los índices de saturación de la solución hidrotermal de cada uno de los manantiales indican una predominante aportación sedimentaria de sucesiones carbonatadas, siliciclásticas y a profundidad evaporíticas. Los elementos más destacados por su enriquecimiento comparativo en estas soluciones son: Li, U, Tl, Ta, Ba, Mg, Rb, As, Ge, Sr, Zn, V y B.

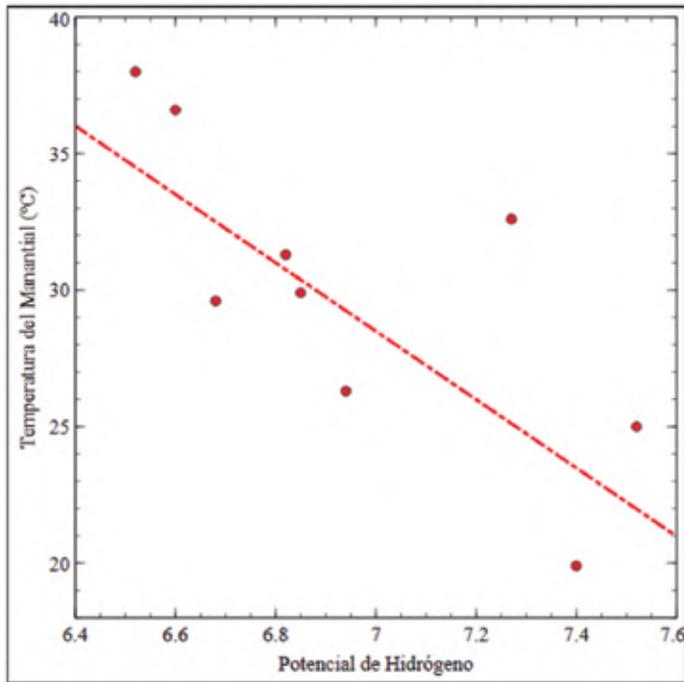


Figura 2. Correlación inversa del pH y temperatura de surgencia de los MTNEM.

Uno de los hallazgos importantes de esta investigación, con fines meramente científicos, ha sido el reporte de concentraciones de Li (entre otros muchos elementos) en soluciones hidrotermales, muy por encima de los promedios de manantiales fríos ubicados en la SMO (Pantoja-Irrys, 2022). Resulta relevante el que esta evidencia de elementos valiosos en soluciones hidrotermales indica la existencia, a profundidad, de rocas sedimentarias evaporíticas del Jurásico que los contienen. Se desconoce si la distribución de dichos elementos en estas rocas sedimentarias evaporíticas es homogénea o asociada a algún tipo de ambiente sedimentario más restringido en espacio y tiempo. La disponibilidad de estas soluciones hidrotermales en pozos petroleros que cruzan dichas sucesiones sedimentarias evaporíticas podría permitir en una forma “rápida y económica” su investigación detallada.

Elemento Alcalino del Grupo 1 de la Tabla Periódica

El litio es un elemento metálico, blanco-plateado y químicamente reactivo; es el más ligero en peso de todos los metales y de bajo punto de fusión. Se encuentra presente en una amplia gama de minerales (aproximadamente 145 especies mineralógicas); sin embargo, sólo algunos poseen valor económico, siendo los principales: espodumena, ambigonita, lepidolita y petalita. Este elemento se encuentra presente tanto en pegmatitas, como en salmueras, pozos petrolíferos, campos geotérmicos, arcillas e, incluso, en los océanos. Se extrae a partir de tres tipos de depósitos: salmueras, pegmatitas y rocas sedimentarias. El principal uso actual del litio en México y en el mundo es en la manufactura de baterías,

con el 39%; cerámica y vidrio, el 30%; grasas lubricantes, 8%; polvos fundentes de fundición en continuo y producción de polímeros, 5%; tratamiento del aire, 3%; y otros usos, el 10% (https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419275/Perfil_Litio_2018__T_.pdf).

Metodología

A continuación se presenta la información obtenida de las investigaciones de campo y actividades de gabinete que se han estado llevando a cabo durante el 2023.

El mapa geológico se elaboró utilizando un modelo digital de elevación (MDE) trabajado mediante el programa ArcGIS Pro-2.6.0. Las secciones litológicas medidas en campo fueron ejecutadas con equipo GPS marca Garmin modelo GPSMAP 64sx, montado en estadal con antena GLO-NASS marca Garmin, cinta y brújula. También se utilizó un dron Mavic 3 marca DJI para acercamientos a los afloramientos en lugares de difícil acceso en los diferentes manantiales. La petrografía fue descrita con el uso de un microscopio polarizado marca Olympus modelo BX53M.

En el caso del agua de los manantiales el pH, la dureza y la temperatura se obtuvieron en campo con una sonda digital marca YSI Professional Plus modelo W14S. Este equipo digital fue calibrado siguiendo las recomendaciones del fabricante.



Figura 3. Terrazas de travertino e hidrocarburo en el manantial de alta entalpía Laguna de Tamiahua.

Las muestras de agua subterránea de cada manantial termal fueron recolectadas en frascos sugeridos por los laboratorios que realizaron el análisis. Los resultados geoquímicos del litio presentados en este manuscrito fueron obtenidos en el laboratorio de geoquímica de la Universidad

Autónoma de San Luis Potosí, a través de un convenio de colaboración de investigación dirigido por el Doctor Antonio Cardona Benavides.

Geología Regional

Las rocas Precámbricas y Paleozoicas que afloran en México ocuparon parte del occidente ecuatorial del supercontinente Pangea. Durante el Triásico Tardío, la ruptura del supercontinente generó una reorganización de placas tectónicas que trajo como consecuencia el inicio de la apertura del Océano Atlántico y la deriva continental. Evolutivamente, el bloque de Yucatán se rotó en sentido antihorario, se desplazó hacia el sur e inició el nacimiento del Golfo de México (Martini y Ortega-Gutiérrez, 2018).

Potentes espesores de capas rojas continentales rellenaron las cuencas intracratónicas que se formaron como consecuencia de la tectónica extensional (Busby and Centeno-García, 2022) y compresiva (Wengler et al., 2019). En el Bajociano, un clima cálido aunado a condiciones marinas someras creadas por el incipiente ingreso de agua marina en las cuencas,

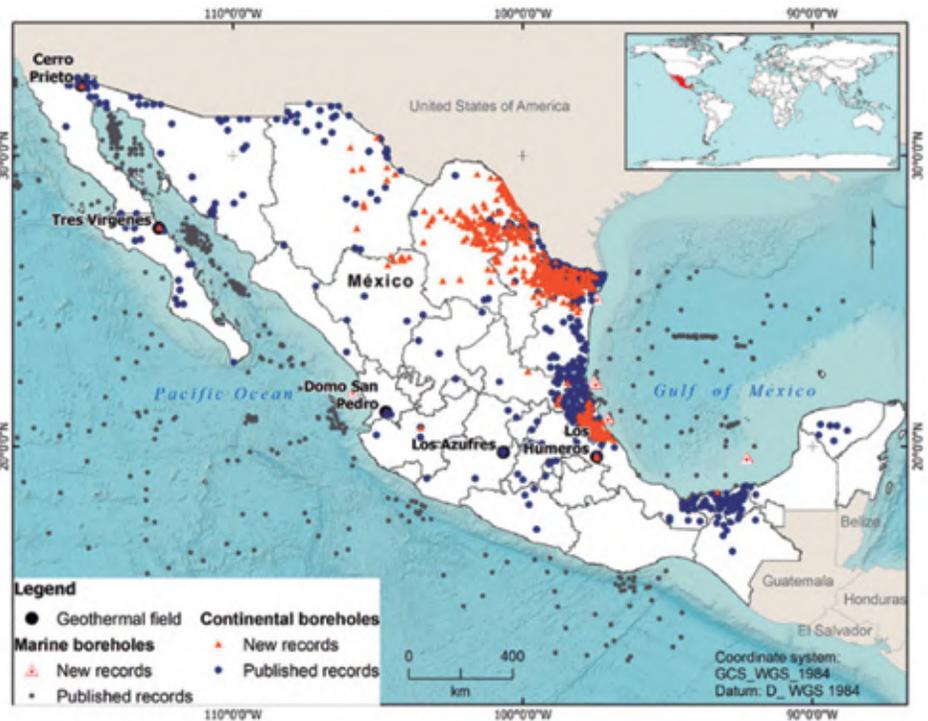


Figura 5. Pozos petroleros y campos geotérmicos en México (Espinosa-Ojeda et al., 2023).

establecieron las condiciones necesarias para la sedimentación extensa, principalmente hacia el oriente del Golfo de México, de potentes espesores de rocas evaporíticas (Molina Garza et al., 2019; Pindell, 1985). En la presente investigación se asocian las altas concentraciones de solutos de los MTNEM (Manantiales Termales del Noreste de México) con las rocas sedimentarias jurásicas evaporíticas que se han descrito aquí.

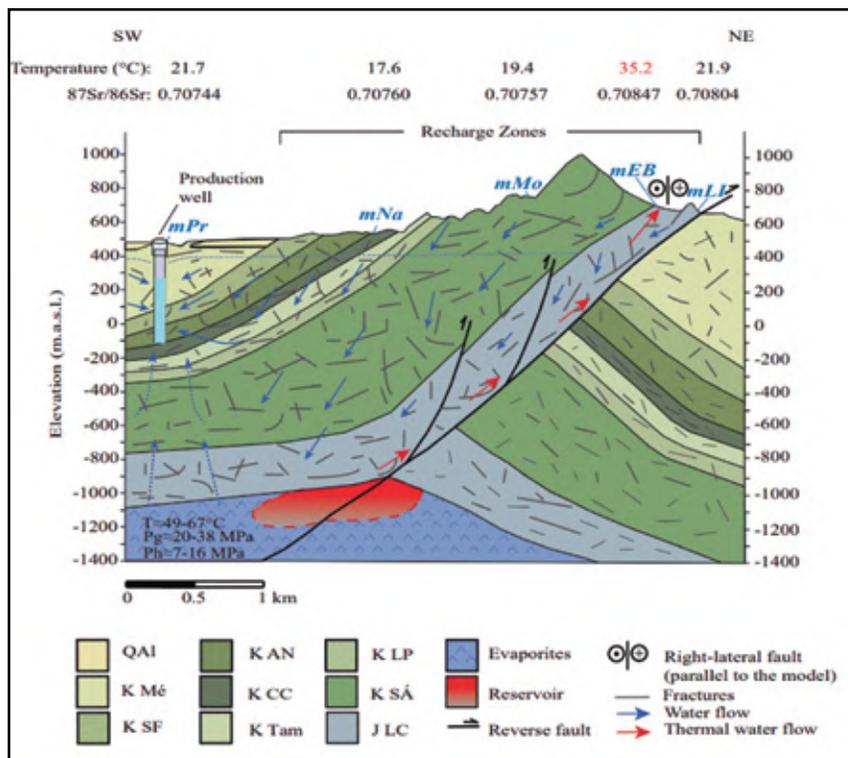


Figura 4. Modelo conceptual de manantiales termales de baja entalpía en la sierra del Cerro de La Silla, del Flanco Oriental de la SMO (Pantoja-Irys et al., 2022).

Los altos del bloque Coahuila, el archipiélago de Tamaulipas y el de la isla de Miquihuana generaron, durante el Kimeridgiano-Oxfordiano, la conformación de grandes abanicos deltaicos que transportaron sedimentos del basamento expuesto y del vulcanismo ocasionado por la subducción en la margen del Océano Pacífico (Ocampo-Díaz et al., 2022). La evolución tectónica, a partir de entonces, fomentó la sedimentación de rocas calcáreas ante continuos cambios eustáticos. La Orogenia Mexicana (Fitz-Díaz et al., 2018; Nemkin et al., 2019) modificó las condiciones de sedimentación en las cuencas del noreste mexicano combinando los aportes silicioclásticos del occidente con los ambientes carbonatados del oriente. En el Oligoceno cesó la tectónica compresiva e inició una tectónica extensiva que exhumó el oriente de México (Gray et al., 2020), y generó un vulcanismo alcalino en las porciones más delgadas de la corteza terrestre (Elizondo-Pacheco et al., 2022); sin embargo, el sedimento continental siguió fluyendo hacia el Golfo de México a través de la red hidrológica del Cuaternario.

■ A PROFUNDIDAD

Manantiales Terales del Noreste de México

La temperatura del agua subterránea, el caudal, la altitud y la dureza de los nueve MTNEM de baja y mediana entalpía se enlistan en la Tabla 1; solamente una fuerte correlación inversa de -76% ocurre entre el pH y la temperatura (Figura 2). En general los manantiales tienen un pH neutro, son de dureza moderada a alta, caudales de moderados a bajos y una temperatura entre los 38°C y los 19.9°C.

Porras-Toribio et al. (2022), publicaron una magistral investigación del manantial termal de alta entalpía de la Laguna de Tamiahua. Ellos lo consideran el resultado de la perturbación causada por la explosión e incendio de un pozo en el Campo Petrolero El Mamey. La temperatura de la surgencia de este manantial es de $\approx 70^\circ\text{C}$, un pH de 6.1 y es tan alta su concentración de solutos que en un relativamente corto tiempo edifica extensas terrazas de travertino e hidrocarburo (Figura 3). La temperatura del reservorio geotérmico se estima cerca de los 200°C , por lo que sería el más profundo de los sistemas geotérmicos investigados.

Resultados

Un gran diferenciador de las 10 surgencias hidrotermales cartografiadas en esta investigación, se refiere a su alto enriquecimiento en Li (Tabla 2). Las soluciones emergentes están muy por arriba de los reportes de Li en manantiales fríos en la sucesión sedimentaria carbonatada que conforma la SMO (Pantoja-Irlys et al., 2022) o del agua de mar actual (He et al., 2020).

De forma preliminar, se asume que las altas concentraciones de Li detectadas en las surgencias de los MTNEM se encuentran alojadas en las sucesiones evaporíticas de edad Jurásica que se presentan a profundidad en la SMO y en la Planicie Costera del Golfo (Figura 4). La amplia extensión de depósito de estas sucesiones evaporíticas implicaría una fuente importante de Li y otros elementos valiosos en el noreste mexicano; más aún si consideramos que un muy alto número de pozos petroleros ya existentes (Figura 5) cortan a estas sucesiones a profundidad (Espinoza-Ojeda et al., 2023).

ID	Caudal	Altitud	T ^o agua	pH	Dureza
Taninul (mTA)	12.88	64	38.00	6.52	+500
Baño San Ignacio (mBSI)	~5	248	36.60	6.60	+500
Balneario El Bañito (mBEB)	2.58	55	32.60	7.27	+500
Ojo Caliente (mOC)	Estático	364	31.30	6.82	+500
Rancho Termal (mRT)	Estático	76	29.90	6.85	305
Poza Verde (mPV)	~0.5	199	29.60	6.68	+500
Potrero del Prieto (mPP)	15.94	1229	26.30	6.94	+500
La Azufrosa (mAz)	Estático	112	25.00	7.52	236
Mainero Azufroso (mMA)	~2	715	19.90	7.4	431
Maximo		1229.0	38.0	7.5	
Minimo		55.0	19.9	6.5	
Promedio		340.2	29.9	7.0	
Unidades	L/s	m s.n.m.m.	°C	0-14	mg/L

Tabla 1. Parámetros de campo medidos en las surgencias de los MTNEM.

ID	Li (µg/L)	USO
mLaguna Tamiahua	20,000.00	Recreativo
mAz	1,046.00	Ganadería y agricultura
mBSI	304.40	Reserva Ecológica
mTA	138.70	Recreativo
mPP	40.68	Natural
mRT	39.72	Ganadería y agricultura
mPV	15.86	Recreativo
mBEB	14.25	Recreativo
mOC	12.09	Ganadería y agricultura
mMA	4.66	Natural

Tabla 2. Uso de los MTNEM y sus concentraciones de Li.

Conclusiones

La alta disponibilidad de litio y otros elementos valiosos en formaciones evaporíticas del noreste mexicano representa un reto en el mediano y largo plazo para los científicos mexicanos. Métodos de extracción, económicamente viables, de beneficio para estos elementos concentrados en soluciones hidrotermales podrían detonar una industria en la que México podría estar a la vanguardia. Sin embargo, el mayor reto y oportunidad para ciudades industriales como Monterrey, Ciudad Victoria, Reynosa y Matamoros será el tratamiento físico, químico y biológico del abundante recurso hídrico del que se extraigan los metales, de tal forma que el agua remanente sea utilizada por las poblaciones del noreste mexicano, en donde existe un estrés hídrico extremo en la actualidad.

Agradecimientos

A la empresa Corporación Ambiental de México, S.A. de C.V. y sus especialistas en SIG y Ciencias de la Tierra. Al Doctor Antonio Cardona Benavides, académicos y estudiantes de la UASLP por su apoyo en el muestreo y análisis del agua subterránea. A la Doctora Rosa María Prol-Ledesma y estudiantes del IG-UNAM por su entusiasmo en la conformación de la investigación geotérmica del noreste mexicano. Finalmente extendemos nuestro agradecimiento a la reserva natural Baños San Ignacio A.C., por las facilidades otorgadas durante el muestreo del agua subterránea.

Referencias

- Busby, C.J., Centeno-García, E., 2022. El "Arco de Nazas" es una provincia de falla continental: Implicaciones para las reconstrucciones tectónicas mesozoicas de la Cordillera suroeste, EE. UU. y México. *Geosfera* 18, 647–669. <https://doi.org/10.1130/GES02443.1>
- Elizondo-Pacheco, L.A., Ramírez-Fernández, J.A., De Ignacio, C., González-Guzmán, R., Rodríguez-Saavedra, P., Leal-Cuellar, V.A., Velasco-Tapia, F., Montalvo-Arrieta, J.C., 2022. Generación de magmas tipo arco y tipo OIB desencadenados por desprendimiento de losa en la provincia alcalina del este de México: evidencia petrológica

- del complejo Cenozoico Sierra de San Carlos-Cruillas, Tamaulipas. *Revista de Petrología* 63. <https://doi.org/10.1093/petrology/egac027>
- Ernesto Ocampo-Díaz, Y.Z., Augustsson, C., Guerrero-Suastegui, M., Aceves de Alba, J., Barboza-Gudiño, J.R., Martínez-Paco, M., Torres-Sánchez, S.A., 2022. Una ola para línea costera deltaica influenciada por mareas en un ambiente carbonatado: Formación La Casita del Jurásico Superior al Cretácico Inferior, noreste de México. *J South Am Earth Sci* 115. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103759>
 - Espinoza-Ojeda, O.M., Prol-Ledesma, R.M., Muñoz-Jauregui, J.A., 2023. Actualización y revisión de mediciones de flujo de calor superficial conductivo continental en México: un análisis de pozos profundos. *Investigación de Recursos Naturales*. <https://doi.org/10.1007/s11053-023-10173-9>
 - Fitz-Díaz, E., Lawton, T.F., Juárez-Arriaga, E., Chávez-Cabello, G., 2018. El orógeno mexicano del Cretácico-Paleógeno: estructura, desarrollo de cuencas, magmatismo y tectónica. *Ciencia de la Tierra Rev*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.002>
 - Gray, G.G., Villagomez, D., Pindell, J., Molina-Garza, R., O'sullivan, P., Stockli, D., Farrell, W., Blank, D., Schuba, J., 2020. Historia termotectónica del Mesozoico tardío y Cenozoico del este, centro y sur de México determinada a través de la termocronología integrada, con implicaciones para la distribución de sedimentos al Golfo de México. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.4991948>
 - He, X., Kaur, S., Kostecki, R., 2020. Minería de litio del agua de mar. *Joule*. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.06.015>
 - Martini, M., Ortega-Gutiérrez, F., 2018. Evolución tectonoestratigráfica del oriente de México durante la ruptura del Pangea: una revisión. *Ciencia de la Tierra Rev*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.06.013>
 - Molina Garza, R.S., Lawton, T.F., Guadarrama, A.F., Pindell, J., 2019. Registro mexicano de circun- clima y sistemas deposicionales del Jurásico del Golfo de México, en: Documento especial de la Sociedad Geológica de América. Sociedad Geológica de América. [https://doi.org/10.1130/2020.2546\(12\)](https://doi.org/10.1130/2020.2546(12))
 - Nemkin, S.R., Chávez-Cabello, G., Fitz-Díaz, E., van der Pluijm, B., Van der Voo, R., 2019. Concurrencia de eventos de plegamiento y remagnetización en el Saliente de Monterrey (NE de México). *Tectonofísica* 760, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.12.002>
 - Pantoja-Irys, J.R., Mujica-Sánchez, H., Arista-Cázares, L.E., Hernández-García, C.M., Wagner, M., 2022. Geología ambiental y evaluación isotópica de manantiales en la parte central de la Sierra Cerro de La Silla, noreste de México. *J South Am Earth Sci* 119. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104017>
 - Pindell, J.L., 1985. Reconstrucción allegheniana y evolución subsecuente del Golfo de México, Bahamas y Protocaribe. *Tectónica* 4, 1–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/TC004i001p00001>
 - Porras-Toribio, I., Pi-Puig, T., Villanueva-Estrada, R.E., Rubio-Ramos, M.A., Solé, J., 2022. Mineralogía, geoquímica e isótopos estables (C, O, S) de aguas termales y travertinos asociados cerca de la Laguna de Tamiahua, Veracruz, Golfo de México (México). *Minerales* 12. <https://doi.org/10.3390/min12070822>
 - Wengler, M., Barboza-Gudiño, J.R., Thomsen, T.B., Meinhold, G., 2019. Procedencia de sedimentos de areniscas triásicas y jurásicas en el centro de México durante la actividad del arco volcánico de Nazas. *J South Am Earth Sci* 92, 329–349. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.03.009>