

Análisis petrofísico de los pozos SM perforados en el acuífero granular de la parte central de la Cuenca Alta del Río Laja, Guanajuato, México

Petrophysical analysis of the SM wells drilled in the granular aquifer of the central part of Cuenca Alta del Río Laja basin, Guanajuato, Mexico

Lucía Magali Ramírez-González^{1*}, Daniela Delgado-Ayala², María Jesús Puy-Y Alquiza¹, Yanmei Li¹

¹ Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato. Guanajuato, México. CP. 36000.
lramirezgonzalez@ugto.com; maga.ramglez@gmail.com

² Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. CP. 72570.

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Registros geofísicos;
agua subterránea;
Cuenca de la
Independencia.

Se analizaron los registros geofísicos de los pozos de agua subterránea SM-1 y SM-2 utilizando las curvas de potencial espontáneo, rayos gamma, resistividad y temperatura con el objetivo de identificar intervalos de interés. El análisis petrofísico permitió identificar intervalos porosos, permeables y poco consolidados nombrados como "Arenas I, II, III, III', IV, V". La correlación de registros entre los pozos SM-1 y SM-2 es congruente. La ocurrencia de feldespato potásico impide utilizar el registro de rayos gamma como un indicador de arcillosidad. Este estudio provee información relevante de los primeros 400 m del acuífero granular de la cuenca que puede ser utilizada en el diseño y mantenimiento de los pozos; además, proporciona valores de resistividad que pueden servir de correlación para estudios geofísicos de menor escala y resolución. Se recomienda ampliar la gama de registros geofísicos en pozos futuros a perforar, para mejorar la interpretación y cuantificar la porosidad y conductividad hidráulica.

Abstract

Keywords: Well
logging;
groundwater;
Independence basin.

Logs from the SM-1 and SM-2 groundwater wells were analyzed using spontaneous potential, natural gamma ray, resistivity, and temperature measurements to identify the best water-productive intervals. The petrophysical analysis allowed the identification of porous, permeable, and less consolidated beds named here as "Arenas I, II, III, III', IV, V". The well log correlation between SM-1 and SM-2 is congruent. The occurrence of potassium feldspar impedes the use of the natural gamma ray log as a shale indicator. This study provides relevant information about the first 400 m of the granular aquifer that is useful for the design and maintenance of wells. Furthermore, resistivity values presented here can be used for correlation in geophysical studies of smaller scale and resolution. It is recommended to add more logs in future wells in order to improve the interpretation and to quantify formation parameters such as porosity and hydraulic conductivity.

Recibido: 1 de mayo de 2024

Aceptado: 13 de enero de 2025

Publicado: 30 de julio de 2025

Cómo citar: Ramírez-González, L. M., Delgado-Ayala, D., Puy-Y Alquiza, M. J., & Li, Y. (2025). Análisis petrofísico de los pozos SM perforados en el acuífero granular de la parte central de la Cuenca Alta del Río Laja, Guanajuato, México. *Acta Universitaria* 35, e4206. doi: <https://doi.org/10.15174/au.2025.4206>

Introducción

Los registros geofísicos de pozo son mediciones continuas en función de la profundidad de una o más propiedades físicas de las formaciones geológicas que atraviesa un pozo. Los elementos involucrados en los registros geofísicos con cable en agujero descubierto son: la sonda o herramienta de medición en el pozo, el cable eléctrico (*wireline* en inglés) y un laboratorio móvil (Figura 1). Existe una amplia variedad de herramientas dependiendo de la necesidad de medición; algunas son dispositivos pasivos y otras ejercen alguna influencia en las formaciones atravesadas. Las mediciones se transmiten a través de un cable de conductores múltiples y llegan al laboratorio móvil que está en superficie. El laboratorio móvil o camión de registro provee energía y contiene el cable conectado a la herramienta; además, tiene equipo de procesamiento, interpretación y almacenamiento de datos.

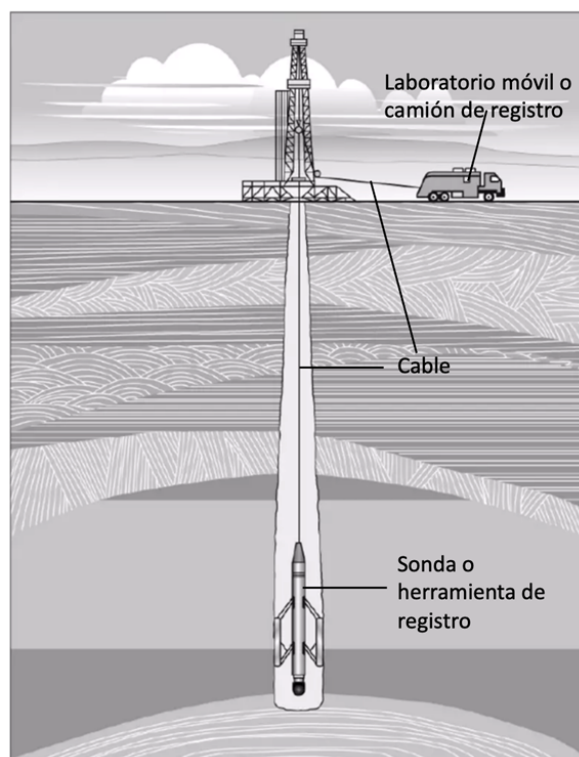


Figura 1. Elementos de los registros geofísicos de pozo.

Fuente: Ellis & Singer (2008) (modificado).

En geohidrología, la interpretación de registros geofísicos consiste en evaluar la calidad y cantidad de agua en los acuíferos, así como la porosidad, permeabilidad, espesor y litología de las formaciones. En este estudio, se tuvo acceso a la información de los registros geofísicos adquiridos en los pozos SM, perforados en la parte central de la Cuenca Alta del Río Laja. Los registros disponibles fueron potencial espontáneo, rayos gamma natural, resistividad y temperatura.

El potencial espontáneo (SP) es el campo de potencial eléctrico natural (voltaje) resultado de la interacción entre el agua de formación, el fluido de perforación (base agua) y ciertas rocas iones selectivas (como las lutitas). El registro de SP permite identificar zonas permeables; la deflexión de la curva de SP indica que la zona es porosa y permeable, con agua de diferente concentración iónica que la del lodo de perforación. Las deflexiones de la curva SP (Figura 2) pueden ser negativas (hacia la izquierda) o positivas (hacia la derecha) dependiendo de las salinidades relativas del agua de formación y del filtrado del lodo de perforación. Si la resistividad del agua de formación (R_w) es mayor a la resistividad del filtrado del lodo (R_{mf}), la deflexión será hacia la derecha. Para un contraste de resistividad inverso ($R_{mf} > R_w$), la deflexión será hacia la izquierda. Si R_{mf} y R_w son similares, las deflexiones de la curva SP serán pequeñas o poco marcadas (Ellis & Singer, 2008; Schlumberger, 1998).

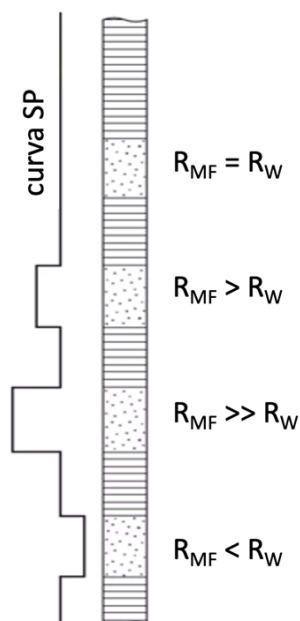


Figura 2. Resumen esquemático del comportamiento de la curva SP ante diferentes relaciones de R_{mf} y R_w .

Fuente: Ellis & Singer (2008) (modificado).

El registro de rayos gamma (GR) es una medida de la radioactividad natural de la formación debido a la concentración de los isótopos radioactivos de uranio (^{238}U), torio (^{232}Th) y potasio (^{39}K) (Ellis & Singer, 2008). En rocas sedimentarias, el registro de GR suele reflejar el contenido de arcilla en la formación debido a que los elementos radioactivos (potasio y torio, principalmente) tienden a concentrarse en dichos materiales. Las formaciones limpias (libres de arcilla) suelen tener bajos niveles de radiación; sin embargo, pueden registrarse valores elevados cuando hay presencia de cenizas volcánicas, feldespatos potásicos y micas debido a su concentración de potasio (Ellis & Singer, 2008; Schlumberger, 1998). Tanto el registro de SP como GR ayudan a definir límites de capas y son auxiliares en la identificación litológica.

Los registros de resistividad miden la capacidad de las rocas de oponerse al paso de corriente eléctrica inducida. Para la mayoría de los acuíferos y sistemas geotérmicos, la matriz rocosa tiene una conductividad despreciable (o resistividad infinita) a la temperatura del acuífero o del yacimiento, debido a que la roca seca es normalmente un aislante. Esto implica que la conducción está controlada por varios fenómenos, incluyendo la presencia de fluidos en los poros (con sales disueltas), el mecanismo de intercambio catiónico en las arcillas, la conducción por minerales metálicos presentes y la geometría de los poros (Ellis & Singer, 2008; Flóvenz *et al.*, 2012).

Algunas empresas perforadoras de pozos de agua (mas no todas) utilizan los registros geofísicos como una herramienta fundamental para identificar intervalos de interés y diseñar la terminación del pozo. Desafortunadamente, el acceso a la información de los registros es muy limitada y por lo regular se mantiene en privado entre la compañía perforadora y los dueños de los pozos.

El presente análisis petrofísico de los pozos SM provee información sobre el acuífero granular de la Cuenca Alta del Río Laja, útil en el diseño y mantenimiento de los pozos, además, proporciona valores de resistividad que pueden servir de correlación para estudios geofísicos eléctricos de menor escala y menor resolución vertical llevados a cabo en la cuenca, por ejemplo, estudios eléctricos verticales (SEVs).

Geología e hidrogeología del área de estudio

La Cuenca Alta del Río Laja (CARL), en ocasiones nombrada como Cuenca de la Independencia, se localiza entre el extremo sureste de la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental y el límite oeste del Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras Mexicano (Fitz-Díaz *et al.*, 2018; Martini *et al.*, 2016; Nieto-Samaniego *et al.*, 1999). Fisiográficamente, la CARL pertenece a la parte sur de la provincia de la Mesa Central (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2001). La cartografía de la geología superficial (Figura 3) se construyó con base en las cartas geológico-mineras del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1997, 1999) y los trabajos estructurales de Alaniz-Álvarez *et al.* (2002, 2005) y Del Pilar-Martínez *et al.* (2020). Estratigráficamente, las unidades que componen la CARL son las siguientes:

- Basamento Mesozoico. El basamento de la CARL está conformado por rocas sedimentarias, volcano-sedimentarias y volcánicas del Mesozoico que afloran en la Sierra de Guanajuato (Martini *et al.*, 2013, 2014; Ortiz-Hernández *et al.*, 1990), en la Sierra de los Cuarzos (Martini *et al.*, 2016), en el bloque de piso de la Falla San Miguel de Allende (Cid-Villegas *et al.*, 2022) y en Mineral de Pozos (Ortega-Flores *et al.*, 2014). En la Sierra de Guanajuato, el paquete de rocas mesozoicas se encuentra intrusado por el Granito Comanja con edad de cristalización de $52.64 \text{ Ma} \pm 0.52 \text{ Ma}$ (Olmos-Moya, 2018).
- Volcanismo silíceo del Oligoceno. Durante el Oligoceno se presentó un episodio volcánico silíceo característico de la provincia de la Mesa Central que formó domos riolíticos, derrames de lava, depósitos piroclásticos e ignimbritas (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999, 2005). Durante el Oligoceno se registró deformación extensional a través de un complejo sistema de fallas normales pertenecientes al Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) con orientación principal N-S. Así mismo, existió actividad contemporánea de fallas NE-SW y NW-SE dentro de la CARL (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001). La sincronía entre el volcanismo y la actividad de las fallas durante el Oligoceno se puede observar con el alineamiento de domos con dirección N, NW y NE de las riolitas Chichindaro (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Del Pilar-Martínez *et al.*, 2020). El intrusivo de cuarzomonzodiorita Duraznillo ($30.82 \text{ Ma} \pm 0.52 \text{ Ma}$) queda expuesto al sur del Graben Villa de Reyes (Del Pilar-Martínez *et al.*, 2020).

- Volcanismo basáltico-andesítico del Mioceno. Yaciendo discordantemente a la secuencia anterior, aflora una serie de basaltos, andesitas y traquiandesitas del Mioceno emitidas a través de volcanismo fisural en gran parte de la CARL y a través de los estratovolcanes Palo Huérano y La Joya (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Nieto-Samaniego *et al.*, 1999), formando el parteaguas sur de la cuenca. Este volcanismo se asocia al arco volcánico andesítico del Mioceno de la Faja Volcánica Transmexicana (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).
- Relleno sedimentario del Mioceno tardío al Pleistoceno. Del Mioceno tardío al Pleistoceno ocurre el relleno de las depresiones con sedimentos continentales: areniscas y conglomerados polimícticos poco consolidados que afloran y cubren gran parte del poniente de la cuenca con espesores de 200 m a 400 m (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2024; Nieto-Samaniego *et al.*, 1999, 2005). La unidad más reciente corresponde al aluvión depositado durante el Pleistoceno.

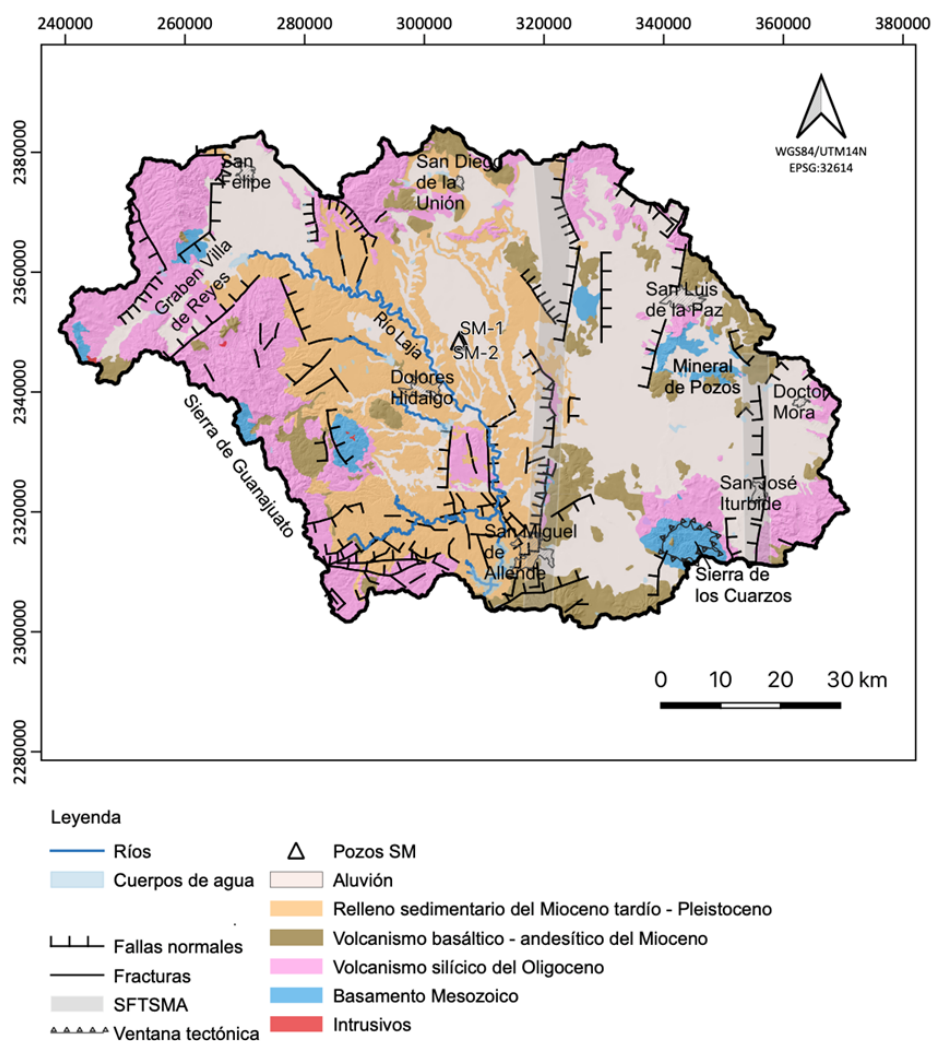


Figura 3. Mapa geológico simplificado de la Cuenca Alta del Río Laja.

Fuente: Elaborado a partir de las cartas geológico-mineras del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1997, 1999) y los trabajos estructurales de Alaniz-Álvarez *et al.* (2002, 2005) y Del Pilar-Martínez *et al.* (2020).

Los pozos SM se localizan dentro del acuífero Cuenca Alta del Río Laja, el cual es un acuífero granular contenido en sedimentos continentales correspondientes a la unidad del relleno sedimentario del Mioceno tardío al Pleistoceno. El acuífero se clasifica como libre (Conagua, 2024), pero al centro de la cuenca se vuelve semiconfinado (Mahlknecht *et al.*, 2004). El flujo subterráneo tiene una dirección preferencial hacia el centro de la cuenca y los niveles estáticos más bajos -cuyos valores de profundidad van de los 100 m a los 150 m- están relacionados a conos de abatimiento (INEGI, 2019). El 90% del acuífero es explotado por el sector agrícola, y su disponibilidad media anual (DMA) es de $-61.98 \text{ hm}^3/\text{año}$; el valor negativo lo convierte en un acuífero sobreexplotado (Conagua, 2024).

Materiales y métodos

Registros geofísicos

Se cuenta con la información de los registros geofísicos de dos pozos del rancho agrícola SM, perforados a 470 m de distancia entre sí. El pozo SM-1 fue registrado el 8 de marzo del 2017 y el pozo SM-2 el 9 de junio del 2023. Ambos fueron perforados por la compañía PABSA y registrados por Geoex S. A. de C. V. Los registros geofísicos de pozo fueron tomados en agujero descubierto con la herramienta multiparámetro de la marca Century Geophysical, modelo 8041. Las curvas disponibles para esta interpretación fueron: rayos gamma natural (GR), potencial espontáneo (SP), resistividad lateral (RES lateral), resistividad normal corta (RES 16 N), resistividad normal larga (RES 64 N) y temperatura (TEMP). Los registros fueron proporcionados por Geoex S. A. de C. V. con la autorización del rancho SM. Adicionalmente, se cuenta con la descripción de los recortes de perforación. La presentación gráfica de los registros, así como los gráficos de interrelación, se llevaron a cabo con la aplicación abierta Well Log Viewer 2.7.20 de StarSeis.

Las condiciones generales de los pozos SM se muestran en la Tabla 1 y sus diseños de terminación en la Figura 4.

Tabla 1. Datos generales de los pozos SM-1 y SM-2.

	SM-1	SM-2
Diámetro de barrena	22 in, 18 in	22 in
Profundidad perforada	400 m	400 m
Lectura inicial registrada	392 m	400 m
Longitud registrada	312 m	368 m
Desviación	0°	0°
Tipo de fluido de perforación	Lodo bentonítico	Lodo bentonítico - polímero
Resistividad del filtrado del lodo	4.86 ohm·m	6.55 ohm·m
Temperatura de fondo	28 °C	32 °C

Fuente: Geoex S. A. de C. V.

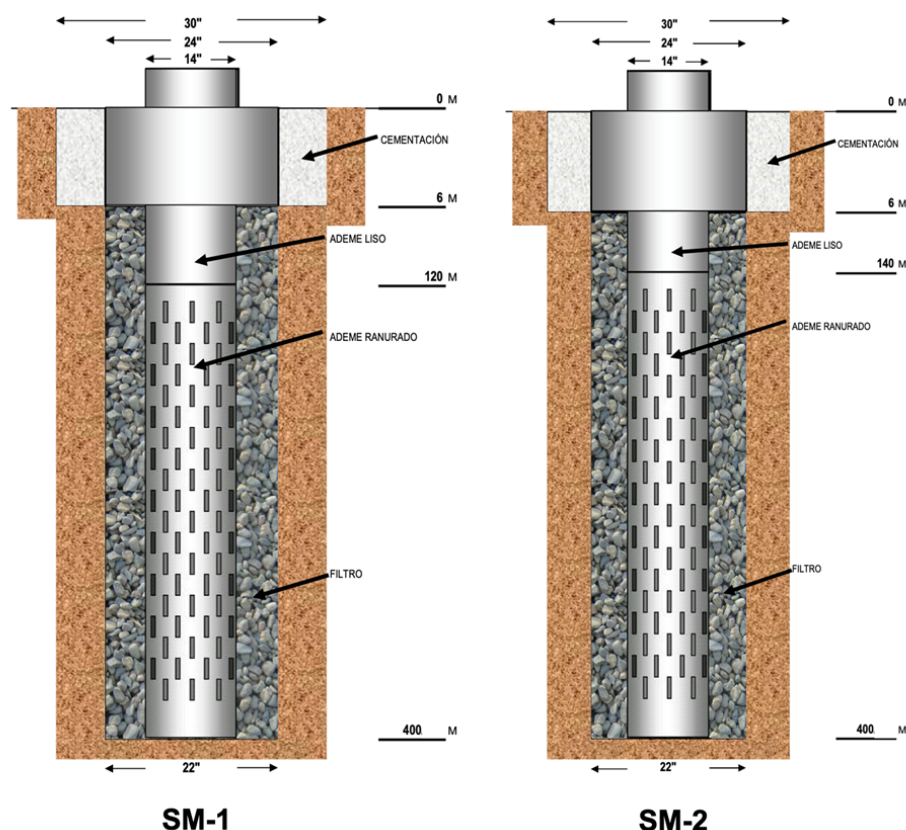


Figura 4. Diseño de terminación de los pozos SM-1 y SM-2.
Fuente: Geox S. A. de C. V.

Parámetros fisicoquímicos y análisis químico

Se midieron los parámetros fisicoquímicos *in situ* del agua de descarga del pozo SM-1 el 3 de noviembre del 2021. Se utilizó una sonda de temperatura pHep ® de Hanna para el pH y un medidor portátil (hold) de sólidos totales disueltos (STD) y conductividad eléctrica (CE), así como tiras reactivas de papel para medir alcalinidad total. Los parámetros fisicoquímicos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos del agua de descarga del pozo SM-1.

Parámetro	Valor
Temperatura del agua (°C)	40
pH	7.8
CE (µs/cm)	590
STD (ppm)	570
Alcalinidad total (mg/L)	265

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se analizó una muestra de los recortes de perforación del pozo SM-2, recuperada a la profundidad de 380 m. La muestra fue analizada mediante difracción de rayos X (DRX) en el Laboratorio de Investigación y Caracterización de Minerales y Materiales de la Universidad de Guanajuato. Los minerales reportados fueron cuarzo, sanidina, anortita, albita y calcita.

Resultados

Los registros geofísicos de los pozos SM-1 y SM-2 se muestran en la Figura 5 y Figura 6, respectivamente. El carril 1 contiene la curva de SP, el carril 2 la curva de GR, el carril 3 las curvas de resistividad (lateral, normal corta 16N y normal larga 64N) y el carril 4 la curva de temperatura. El sombreado en marrón en la curva de SP representa las arenas y el sombreado gris los intervalos menos permeables.

La Figura 7 muestra la correlación de los pozos SM-1 y SM-2 utilizando los registros de GR y resistividad.

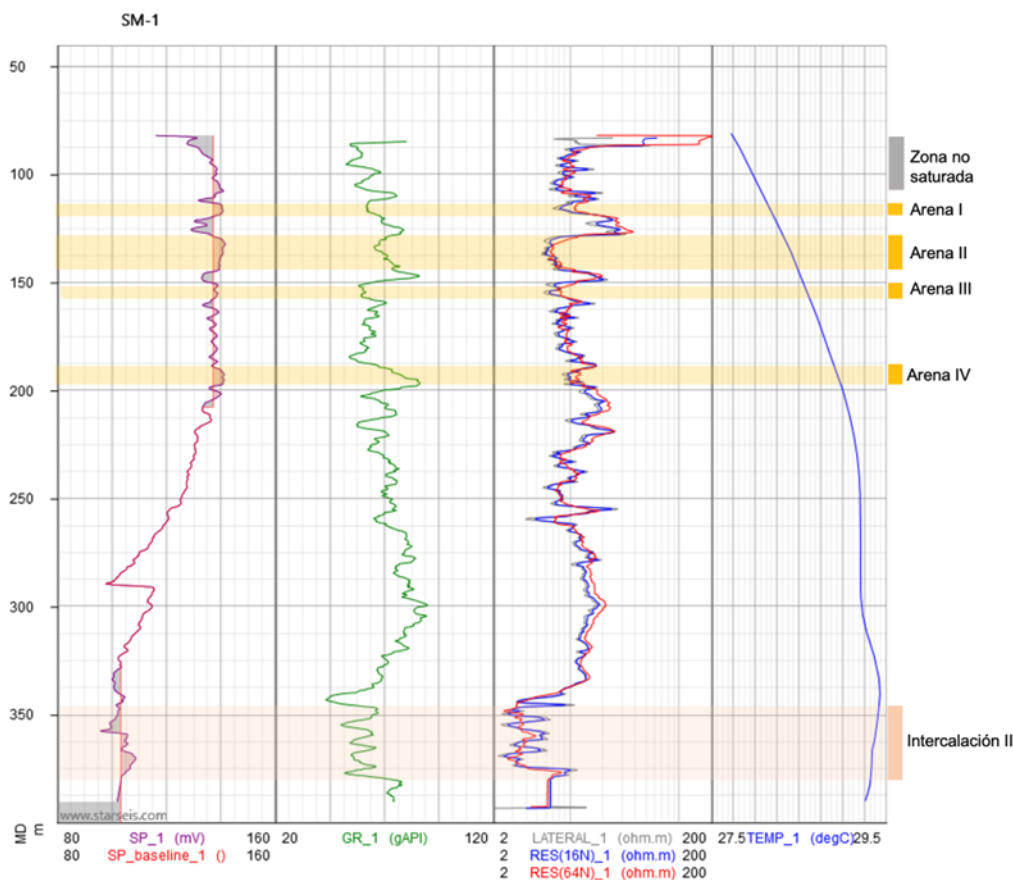


Figura 5. Registros geofísicos e interpretación petrofísica del pozo SM-1.

Fuente: Elaboración propia.

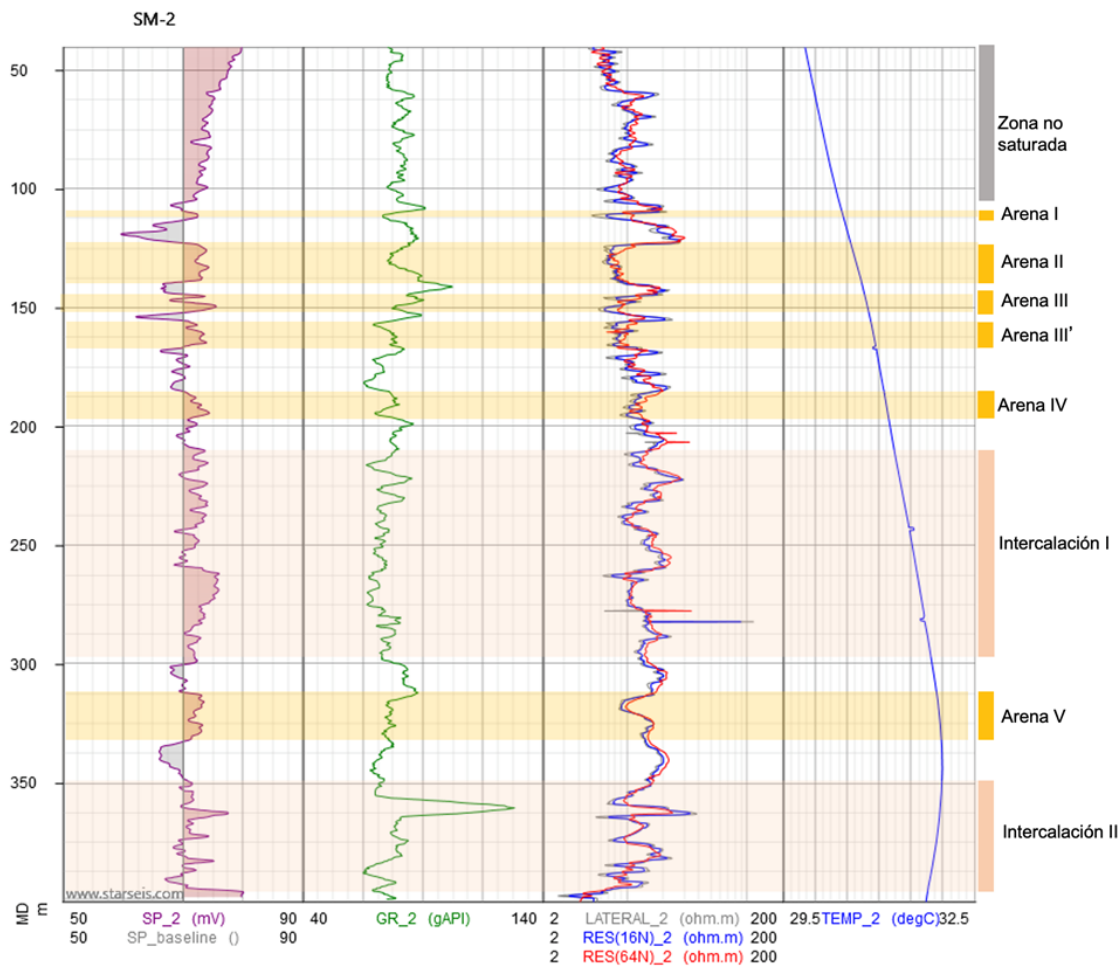


Figura 6. Registros geofísicos e interpretación petrofísica del pozo SM-2.

Fuente: Elaboración propia.

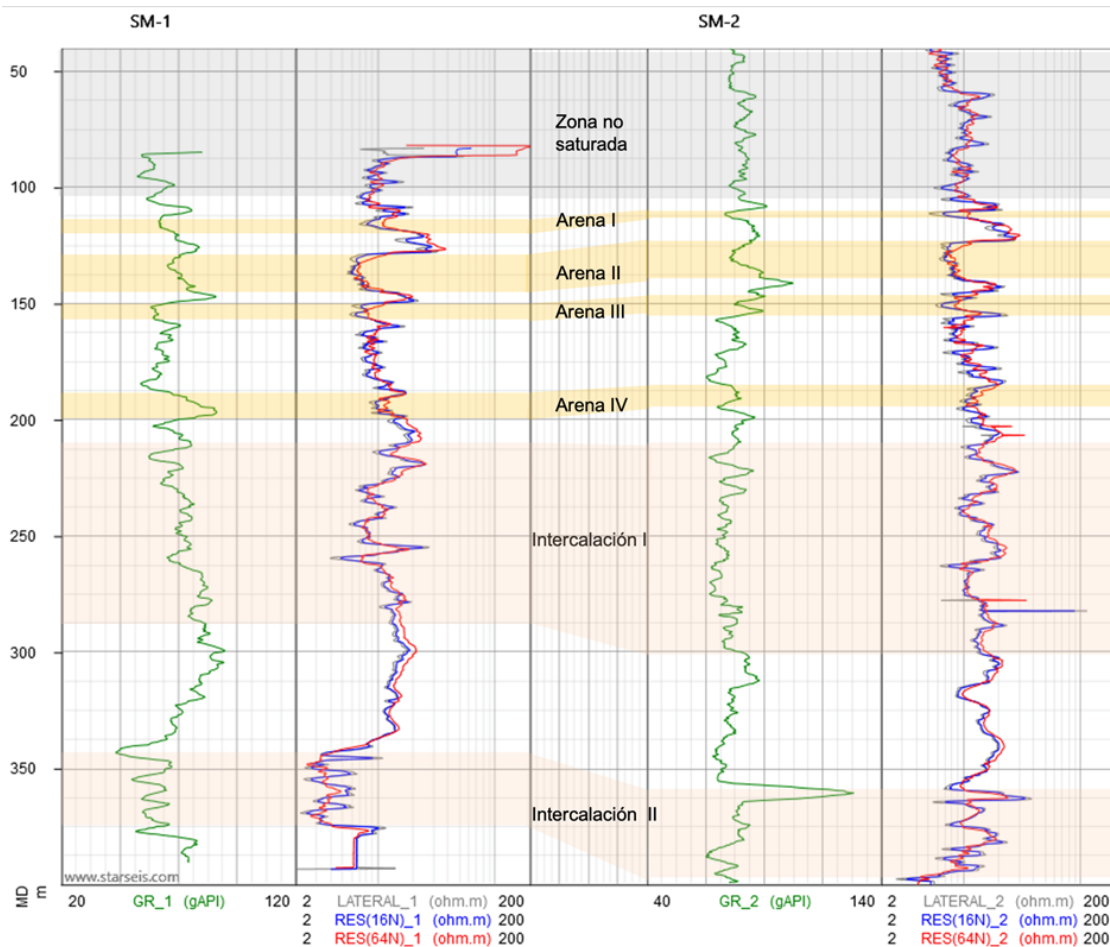


Figura 7. Correlación de registros GR y resistividad de los pozos SM-1 y SM-2.
Fuente: Elaboración propia.

Discusión

En el pozo SM-1 y SM-2, las deflexiones positivas (hacia la derecha) de la curva del SP ocurren debido a que $R_{mf} < R_w$. El valor de R_{mf} es 4.86 ohm·m a 29 °C para SM-1 y 6.55 ohm·m a 31 °C para SM-2, mientras que, de acuerdo con el análisis de conductividad eléctrica del agua en producción del pozo SM-1, $R_w = 17$ ohm·m a 40 °C. El principio físico que produce la deflexión de la curva del SP indica porosidad y permeabilidad; sin embargo, no existe una relación directa entre la amplitud o el valor de la curva SP y el valor de porosidad y permeabilidad (Ellis & Singer, 2008), por lo que su interpretación es cualitativa.

El análisis de las curvas de SP y resistividad en ambos pozos muestra correlación negativa, lo que significa que las deflexiones del SP hacia la izquierda (menor permeabilidad) coinciden con el aumento en la resistividad; por lo tanto, se pueden interpretar como intervalos más compactos (no necesariamente arcillosos) (Figura 8a y Figura 9a).

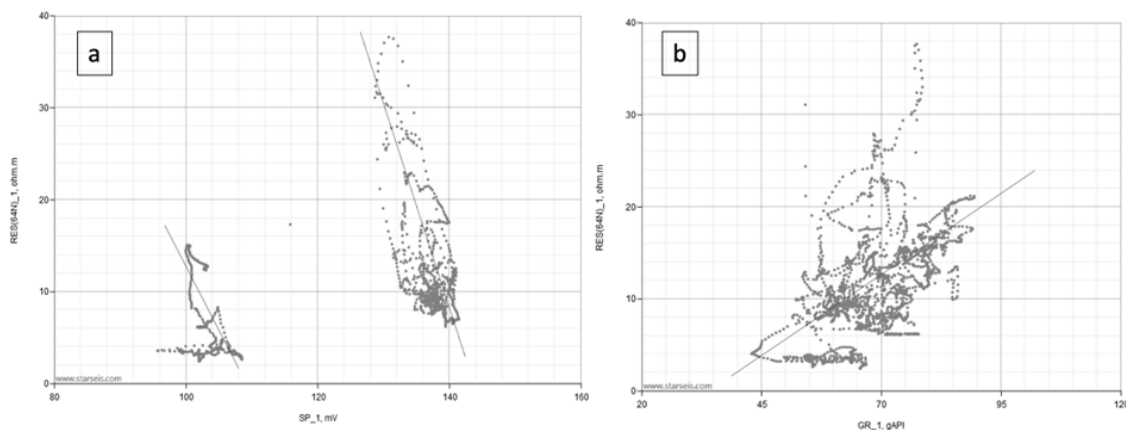


Figura 8. Gráficos de interrelación del pozo SM-1. a) SP vs. resistividad (64N); b) GR vs. resistividad (64N).
Fuente: Elaboración propia.

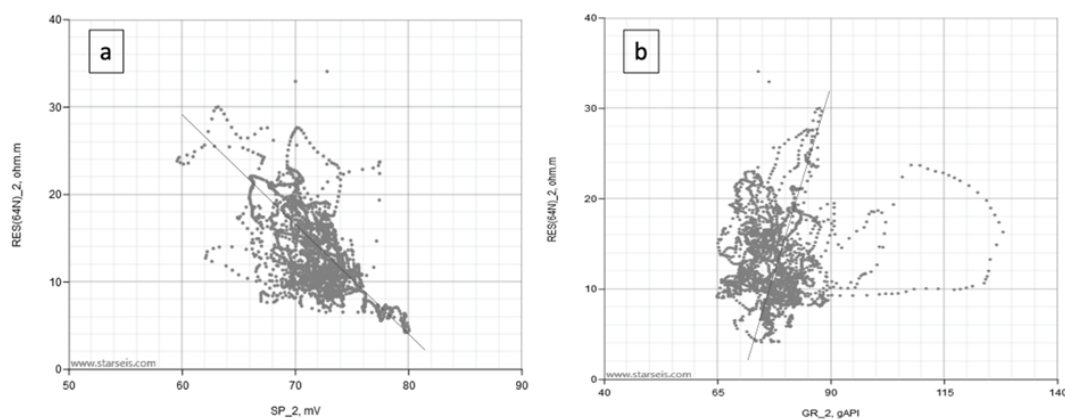


Figura 9. Gráficos de interrelación del pozo SM-2. a) SP vs. resistividad (64N); b) GR vs. resistividad (64N).
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, las curvas de GR y resistividad muestran correlación positiva (Figura 8b y Figura 9b). Esto indica que las zonas más radioactivas corresponden a las zonas más compactas.

El registro de GR no muestra contrastes que indiquen límites claros entre unidades, lo cual es común con la presencia de feldespatos potásicos (Schlumberger, 1998). Los resultados del análisis DRX del pozo SM-2 reportan la presencia de sanidina, la forma de alta temperatura del feldespato potásico, común en rocas volcánicas félsicas. Este mineral puede estar relacionado con la erosión de las rocas del grupo volcánico del Oligoceno. La descripción litológica de la perforación reporta arcillas en todo el intervalo para ambos pozos. Esto influye en que las deflexiones de la curva de GR sean menos marcadas, aunado a que la presencia de sanidina impide utilizar el registro de GR como un indicador de la arcillosidad.

Debido a que la permeabilidad se relaciona principalmente con la granulometría, se utilizó el registro de SP en conjunto con el registro de resistividad como indicadores cualitativos de la productividad de la formación. Se clasificaron como arenas (Arenas I, II, III, III', IV, V) a los intervalos permeables con deflexiones positivas de SP y baja resistividad (5 ohm.m - 10 ohm.m). Además, se identificaron intervalos

de intercalaciones (Intercalación I y II) entre capas compactas (menos permeables) y menos compactas (permeables).

La curva de SP del pozo SM-1 tiene un cambio muy marcado de los 200 m a los 325 m de profundidad. Estos cambios en la línea base del SP pueden ocurrir cuando existen variaciones en la salinidad del agua de formación o por la presencia de capas arcillosas que no son membranas catiónicas perfectas, es decir, intervalos semipermeables (Ellis & Singer, 2008). Esta zona no se tomó en cuenta para la clasificación litológica; sin embargo, se puede correlacionar con el intervalo nombrado como "Intercalación I" en el pozo SM-2. La arena V, solo es interpretada en el pozo SM-2.

El comportamiento de las tres curvas de resistividad está relacionado con la permeabilidad de la formación, los espesores de las capas y la resistividad de los fluidos desde la pared del pozo y hacia la formación (Ellis & Singer, 2008; Schlumberger, 1998). Durante la perforación, el lodo empleado forma un enjarre en la pared del pozo frente a formaciones permeables. En este proceso, el filtrado del lodo ingresa a la formación, desplazando al agua en el proceso conocido como invasión; este reemplazo involucra un cambio en la resistividad del agua en los poros. Debido al diseño en el arreglo de los electrodos (distancia entre electrodos) de las herramientas de resistividad, la profundidad de investigación de la curva lateral mide la resistividad en la pared del pozo, la curva normal corta (16N) mide la resistividad en la zona de invasión y la curva normal larga (64N) mide la resistividad más profunda dentro de la formación (en teoría la zona no invadida). En los pozos SM la curva lateral tiene los valores más bajos de resistividad y le siguen los valores de la curva normal corta. La curva normal larga tiene los valores más altos en capas permeables y de mayor espesor, pero en los intervalos de poco espesor la normal larga arroja los valores más bajos de resistividad debido a que el espesor de la capa debe ser al menos de 3.25 m (2*64 in) para que la herramienta responda a una capa resistiva ubicada entre dos capas conductivas.

El gradiente de temperatura en ambos pozos es de 0.6 °C por cada 100 m, lo que se encuentra dentro de los valores normales del gradiente geotérmico. La temperatura del agua en producción medida en el pozo SM-1 es de 40 °C, lo que corresponde a 11 °C más que la temperatura medida durante el registro. El lodo de perforación por lo regular baja la temperatura del pozo de 2 °C a 3 °C; por lo tanto, el agua termal puede estar ascendiendo de acuíferos más profundos durante el bombeo y producción de los pozos (Ortega-Guerrero, 2009).

En pozos futuros a perforar, se recomienda ampliar la gama de registros geofísicos. Los registros de densidad y neutrón pueden ayudar a evaluar la litología y porosidad, mientras que el registro calibrador (*caliper*) puede ayudar a identificar zonas con enjarre (zonas permeables) y zonas con derrumbes (por material poco consolidado), además de que puede ser auxiliar en distinguir condiciones geométricas del pozo que pudieran afectar a los demás registros.

Conclusiones

El análisis petrofísico de los pozos SM, mediante las curvas de SP y resistividad, permitió identificar intervalos porosos, permeables y poco consolidados, nombrados aquí como "Arenas I, II, III, III', IV, V", además de dos intervalos de intercalaciones de arenas y capas de mayor compactación (menos permeables), nombradas como "Intercalación I y II". Los valores de resistividad de las arenas van de 5 ohm-m a 10 ohm-m, estos valores se pueden utilizar para correlacionar con otros estudios geofísicos.

La descripción litológica de la perforación reporta arcillas a lo largo de todo el intervalo para ambos pozos; sin embargo, la presencia de sanidina impide utilizar el registro de GR como un indicador de la arcillosidad. La correlación de registros entre los pozos SM-1 y SM-2 es congruente, lo cual es previsible

debido a la corta distancia entre ellos; además, se confirma la presencia del acuífero granular a 400 m de profundidad en el centro de la cuenca. La información aquí presentada es de utilidad en el diseño y mantenimiento de los pozos.

Se recomienda ampliar la gama de registros geofísicos en pozos futuros a perforar para mejorar la interpretación y cuantificar la porosidad y conductividad hidráulica.

Agradecimientos

Agradecemos al Ing. Luis Nísino de Geoex S. A. de C. V. por compartir los registros geofísicos de los pozos SM y a Iker Iñarritu y Juan Pablo Iñarritu por permitirnos publicar la información. También agradecemos al Ing. Luis Tomás Mendoza de Schlumberger por su ayuda con el formato de las curvas de los registros y sus comentarios al manuscrito original. Los parámetros fisicoquímicos del pozo SM-1 se tomaron como parte de la investigación de la tesis doctoral de la primera autora, trabajo financiado por la Convocatoria Institucional de Investigación Científica 2022, No. 74/2022 de la Universidad de Guanajuato y el programa de becas nacionales del Conahcyt, actualmente SECIHTI.

Conflictos de interés

Los autores de este trabajo no presentan ningún conflicto de interés con ningún otro autor, centro de investigación o grupo de trabajo relacionado a la presente investigación.

Referencias

- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Orozco-Esquivel, M. T., Vassallo, L. F., & Xu, S. (2002). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende: Implicaciones de la deformación post-eocénica del centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 55(1), 12-29. <https://www.jstor.org/stable/24920368>
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Reyes-Zaragoza, M. A., Orozco-Esquivel, M. T., Ojeda-García, A. C., & Vassallo, L. F. (2001). Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18(2), 129-148. <https://www.rmccg.unam.mx/index.php/rmccg/article/view/990>
- Alaniz-Álvarez, S. A., & Nieto-Samaniego, A. F. (2005). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 65-82. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n1a4>
- Cid-Villegas, G., Alaniz-Álvarez, S. A., Xu, S., Vázquez-Serrano, A., & Juárez-Arriaga, E. (2022). Deformación del Cretácico tardío en el límite de la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental, centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 74(2), 1-31. <https://doi.org/10.18268/bsgm2022v74n2a230222>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja (1108) Estado de Guanajuato*. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/guanajuato/DR_1108.pdf
- Del Pilar-Martínez, A., Nieto-Samaniego, A. F., & Alaniz-Álvarez, S. A. (2020). Development of a brittle triaxial deformation zone in the upper crust: the case of the Southern Mesa Central of Mexico. *Tectonics*, 39(11), e2020TC006166. <https://doi.org/10.1029/2020TC006166>
- Ellis, D. V., & Singer, J. M. (2008). *Well Logging for Earth Scientists*. Springer.
- Fitz-Díaz, E., Lawton, T. F., Juárez-Arriaga, E., & Chávez-Cabello, G. (2018). The Cretaceous-Paleogene Mexican orogen: structure, basin development, magmatism and tectonics. *Earth-Science Reviews*, 183, 56-84. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.002>
- Flóvenz, Ó. G., Hersir, G. P., Sæmundsson, K., Ármannsson, H., & Friðriksson, Þ. (2012). Geothermal energy exploration techniques. *Comprehensive Renewable Energy*, 7, 51-95. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00705-8>

- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., & Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 227-283. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a2>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2001). *Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. Escala 1:1 000 000. Serie I*. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-vectoriales-fisiograficos-continuo-nacional-escala-1-1-000-000-serie-i/resource/c6dcd12c-0c2a-4db7-a769-bcbb338b1cbe>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). *Conjunto de datos aguas subterráneas. Zona Hidrogeológica Alto Río Laja Serie II, Escala 1:250 000*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463769200>
- Mahlknecht, J., Schneider, J. F., Merkel, B. J., Navarro-de-León, I., & Bernasconi, S. M. (2004). Groundwater recharge in a sedimentary basin in semi-arid Mexico. *Hydrogeology Journal*, 12, 511-530. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0332-6>
- Martini, M., Solari, L., & Camprubí, A. (2013). Kinematics of the Guerrero terrane accretion in the Sierra de Guanajuato, central Mexico: new insights for the structural evolution arc-continent collisional zones. *International Geology Review*, 55(5), 574-589. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2012.729361>
- Martini, M., Solari, L., & López-Martínez, M. (2014). Correlating the Arperos Basin from Guanajuato, central Mexico, to Santo Tomás, southern Mexico: Implications for the paleogeography and origin of the Guerrero terrane. *Geosphere*, 10(6), 1385-1401. <https://doi.org/10.1130/GES01055.1>
- Martini, M., Solé, J., Garduño-Martínez, D. E., Pi-Puig, T., & Omaña, L. (2016). Evidence for two Cretaceous superposed orogenic belts in central Mexico based on paleontologic and K-Ar geochronologic data from the Sierra de los Cuarzos. *Geosphere*, 12(4), 1-14. <https://doi.org/10.1130/GES01275.1>
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Camprubí, A. (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 285-318. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a3>
- Nieto-Samaniego, Á. F., Ferrari, L., Alaniz-Alvarez, S. A., Labarthe-Hernández, G., & Rosas-Elguera, J. (1999). Variations of Cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico. *GSA Bulletin*, 111(3), 347-363. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111<0347:VOCEAV>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111<0347:VOCEAV>2.3.CO;2)
- Olmos-Moya, M. J. P. (2018). *Exhumación de los intrusivos Comanja y Tesorera: Implicaciones en el levantamiento de la Mesa Central de México* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ortega-Flores, B., Solari, L., Lawton, T. F., & Ortega-Obregón, C. (2014). Detrital-zircon record of major Middle Triassic-Early Cretaceous provenance shift, central Mexico: demise of Gondwanan continental fluvial systems and onset of back-arc volcanism and sedimentation. *International Geology Review*, 56(2), 237-261. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.844313>
- Ortega-Guerrero, M. A. (2009). Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 143-161. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=s1026-87742009000100012&script=sci_arttext
- Ortiz-Hernández, L. E., Chiodi, M., Lapierre, H., Monod, O., & Calvet, P. (1990). El arco intraoceánico alóctono (Cretácico Inferior) de Guanajuato—Características petrográficas, geoquímicas, estructurales e isotópicas del complejo filoniano y de las lavas basálticas asociadas—implicaciones geodinámicas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 9(2), 125-145. <http://rmcg.geociencias.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/1221>
- Schlumberger (1998). *Log Interpretation Principles/Applications* (7ma. ed.). Schlumberger Wireline & Testing, Sugar Land, Texas.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (1997). *Carta geológica-minera Guanajuato F14-7, escala 1:250 000*. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/76_F14-7_GM.pdf
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (1999). *Carta geológica-minera Querétaro F14-10, escala 1:250 000*. https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/77_F14-10_GM.pdf