

Interpretación del registro geofísico del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y su correlación litológica en la cuenca de México

José L. Lezama-Campos^{1,*}, Eric Morales-Casique¹,
Ricardo Castrejón-Pineda², José L. Arce¹ y Oscar A. Escolero¹

¹Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México, México.

²Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México, México.

* lezamac.jl@gmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo se describen los resultados obtenidos del análisis realizado al registro geofísico del pozo exploratorio San Lorenzo Tezonco (SLT), localizado al oriente de la Ciudad de México, el cual alcanzó 2,008 m de profundidad. El registro geofísico se realizó en tres etapas e incluyó la medición de temperatura, resistividad eléctrica, potencial natural, y radiación gamma, aunque estos dos últimos no funcionaron adecuadamente durante la última etapa. El análisis que se presenta se realizó principalmente con base en las curvas de resistividad eléctrica y rayos gamma y para su interpretación se utilizaron muestras de canal y las descripciones petrológicas y estratigráficas del pozo SLT reportadas en la literatura. Mediante el análisis del registro y la correlación cualitativa con la litología observada en pozos someros adyacentes fue posible completar la estratigrafía entre los 120 m y 500 m que estaba ausente en trabajos anteriores debido a la falta de muestras de canal. Los resultados muestran que los materiales geológicos encontrados en el pozo SLT son considerablemente más heterogéneos y con espesores diferentes de lo que se ha reportado previamente. Entre las zonas de interés hidrogeológico identificadas se encuentra la posible presencia de un acuitardo de origen volcánico entre 750 y 880 m, el cual mostró un bajo contenido de arcilla inferido del registro geofísico. Adicionalmente, el análisis permitió identificar las posibles zonas de aportación del agua extraída del pozo SLT con base en las zonas permeables identificadas. En futuras exploraciones a través de pozos profundos en la Cuenca de México se sugiere incluir registros geofísicos adicionales (densidad y sónico), así como la obtención de núcleos que permitan una interpretación cuantitativa de propiedades petrofísicas del subsuelo.

Palabras clave: Pozo San Lorenzo Tezonco; registro geofísico; estratigrafía volcánica; cuenca de México.

ABSTRACT

We describe the results obtained from the analysis of the geophysical well log conducted at the San Lorenzo Tezonco (SLT) well, which is located in the eastern part of Mexico City and has 2,008 m in depth. The geophysical well log was conducted in three stages and consisted of temperature, electrical resistivity, natural potential and gamma

radiation, although the gamma radiation and natural potential logs malfunctioned during the last stage. The analysis presented here is based mainly on the electrical resistivity and gamma logs; the interpretation is based on channel (cutting) samples and petrologic and stratigraphic descriptions of the SLT well previously published. By analyzing the well log data and correlating them with the lithology reported for nearby shallow wells it was possible to complete the stratigraphy between 120 m and 500 m, which was absent in previous reports due to the lack of channel cuttings. The results show that the geologic materials in the SLT well are considerably more heterogeneous and have differing thicknesses than those previously reported. Among the zones of hydrogeological interest, an aquitard of volcanic origin, with relatively low clay content, is inferred between 750 and 880 m depth from the well log. In addition, the analysis allowed identifying potential water-productive strata. For future exploratory deep wells in the Basin of Mexico, it is suggested to include additional geophysical logs (density and sonic) and to obtain cores, which would allow a quantitative interpretation of petrophysical properties of the subsurface.

Key words: San Lorenzo Tezonco deep well; geophysical well log; volcanic stratigraphy; basin of Mexico.

INTRODUCCIÓN

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) perforó durante los años 2011 y 2012 el pozo San Lorenzo Tezonco (SLT) en la parte oriental de la Ciudad de México, en las coordenadas 19°22'44.18" N; 99°05'05.10" W (Figura 1), con el objetivo de caracterizar formaciones hidrogeológicas profundas en la cuenca y conocer el potencial para extraer agua de ellas. El pozo SLT se une a un grupo de cinco pozos con profundidades mayores a 2,000 m en la Cuenca de México (Figura 1): el pozo Texcoco-1 perforado en la década de 1960 (SHCP, 1969) y cuatro pozos perforados por Petróleos Mexicanos (PEMEX) a finales de a década de 1980 (Pérez-Cruz, 1988) que tenían como objetivo obtener datos geológicos de la Cuenca de México y comprender mejor los mecanismos que propagan las ondas sísmicas debajo de la Ciudad de México, motivado por el sismo que afectó gravemente a la ciudad en el año de 1985.

Junto con la perforación se realizó la adquisición de un registro geofísico de pozo y se tomaron diversas muestras de recortes de la

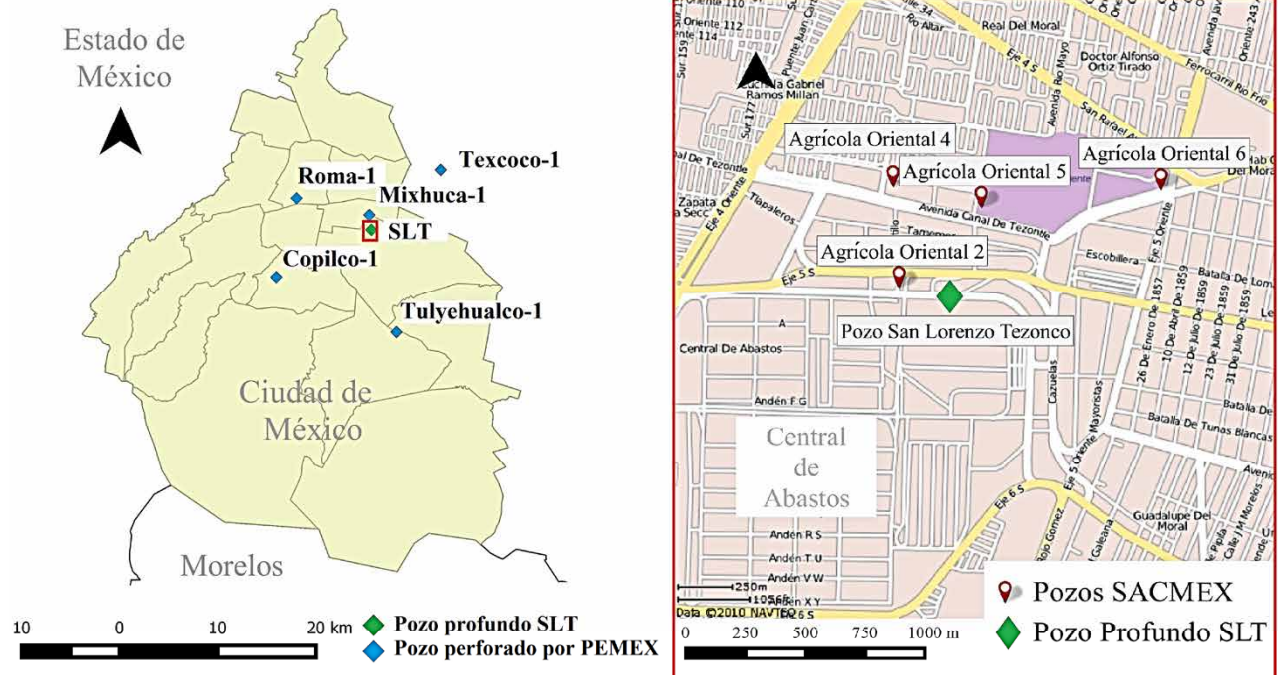


Figura 1. Mapa del área del Distrito Federal con la ubicación del pozo San Lorenzo Tezconco y los pozos profundos perforados por Petróleos Mexicanos (PEMEX) y Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX).

perforación (muestras de canal) para la caracterización geológica de las formaciones. Actualmente ya se han realizado estudios de petrología, geoquímica y fechamientos a las muestras obtenidas y se ha reportado una columna estratigráfica (Arce *et al.* 2013, 2015). Sin embargo, por tratarse de muestras de canal, existe incertidumbre acerca de la profundidad exacta de la muestra y error debido a posible mezcla con material más joven al ascender por la perforación. Adicionalmente, durante una perforación se pueden presentar pérdidas de circulación que impiden recuperar muestras de canal; en el caso del pozo SLT, las pérdidas de circulación impidieron recuperar muestra en los primeros 500 m y de 998 m a 1,140 m. El registro geofísico proporciona datos continuos de las propiedades geofísicas de las formaciones y, al correlacionarlo con el análisis petrológico y geoquímico de las muestras de canal, permite reducir los errores asociados a la posición vertical de las unidades. Adicionalmente, al correlacionar las propiedades geofísicas del registro con el corte litológico y/o registros geofísicos de pozos cercanos es posible completar el corte litológico donde no se haya recuperado muestra de canal.

Una dificultad al interpretar registros geofísicos es que la mayor parte de la experiencia reportada en la literatura se ha generado en la industria petrolera y por lo tanto se basa en registros en rocas sedimentarias. En contraste, la Cuenca de México está compuesta de secuencias potentes de materiales volcánicos (Pérez-Cruz, 1988; Arce *et al.* 2013, 2015), por lo que la interpretación de registros geofísicos requiere criterios adaptados a ambientes y materiales volcánicos. En el caso del pozo SLT no se contó con el registro sísmico de porosidad y el registro de densidad que han demostrado tener mejor respuesta a los cambios litológicos del Valle de México (Unda-López, 2016), y con los que ya se ha logrado correlacionar diversas unidades volcánicas observadas en los pozos profundos perforados por PEMEX (Reyes-Pimentel, 2013; Valdez-Reséndiz, 2015; Unda-López, 2016). Sin embargo, en este trabajo, gracias al registro eléctrico es posible interpretar algunas propiedades hidrogeológicas que amplían el conocimiento de la cuenca y el espesor de las unidades en el sitio.

Los objetivos del artículo son (a) interpretar el registro geofísico del pozo SLT integrando la información generada durante la perforación, los análisis geoquímicos y petrológicos y el fechamiento de las muestras de canal, (b) completar la columna estratigráfica del pozo SLT en los primeros 500 m mediante la correlación con pozos cercanos de poca profundidad (entre 150 y 300 metros), (c) ajustar la interpretación reportada en anteriores publicaciones (Arce *et al.* 2013, 2015 y Morales-Casique *et al.*, 2014) para una mejor visión del perfil estratigráfico, y (d) inferir propiedades hidrogeológicas de los diferentes estratos y complementar las interpretaciones anteriores (Morales-Casique *et al.*, 2014, 2015).

GEOLOGÍA REGIONAL

La cuenca de México se encuentra dentro de la provincia geológica denominada Faja Volcánica Transmexicana (Gómez-Tuena, 2005), la cual se extiende en dirección este-oeste, atravesando la República Mexicana. Álvarez (1961) denominó a esta provincia como Zona de Fosas Tectónicas y Vulcanismo Reciente, y establece que está caracterizada por predominar en ellas derrames basálticos, numerosos volcanes y lagos, cuya morfología, orientación y distribución sugieren estar situados en fosas tectónicas y de allí el nombre que le asigna. Rocas de composición riolítica, dacítica, andesítica y traquítica, generalmente cubiertas por basaltos forman la masa de las montañas. Los valles que originalmente habían sido cuencas lacustres profundas, han sido rellenados con materiales fluviales y lacustres derivados de las sierras volcánicas, así como con enormes masas de cenizas de volcanes más recientes. En particular, la cuenca de México es una extensa altiplanicie lacustre con altitud promedio de 2,240 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.) y se encuentra rodeada por sierras volcánicas y por abanicos y llanuras aluviales (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

Las rocas más antiguas detectadas por los pozos profundos son las calizas marinas del Cretácico Inferior, cubiertas por calizas, lutitas y

areniscas del Cretácico Superior pertenecientes a la Formación Mezcala (Enciso de la Vega, 1992). Las rocas del Eoceno-Oligoceno en esta zona, corresponden con el Grupo Balsas, que cubre discordantemente a las rocas cretácicas y está formado por rocas sedimentarias de origen continental (principalmente conglomerados de caliza), con un espesor aproximado de 600 m (De Cserna, 1987). Las rocas volcánicas predominantemente andesíticas y dacíticas sobreyacen discordantemente a los depósitos clásticos continentales y tienen un espesor promedio de 600–700 m habiéndose acumulado durante el Oligoceno tardío–Mioceno temprano (De Cserna, 1987) o desde el Mioceno temprano hace 21.2 Ma (Arce et al., 2015). Posteriormente durante el Plioceno y Cuaternario, se presentaron depósitos volcánicos y volcanoclásticos, que en la actualidad han originado una morfología de “abanicos”, debido a la actividad de las estructuras volcánicas y debido a la erosión de estas mismas, como la Sierra de las Cruces en la parte oeste de la cuenca, Sierra Chichinautzin al sur, y Sierra Nevada en la parte noreste, que han depositado espesores cercanos a los 650 m en algunos sitios de la cuenca (De Cserna, 1987; Macías et al., 2012; Arce et al., 2015)

Estructuralmente, destacan por su cercanía al pozo SLT la falla Mixhuca (Pérez-Cruz, 1988) y la falla Chapultepec (Santoyo et al., 2005) (Figura 2) que explican una anomalía gravimétrica en la zona (Urrutia-Fucugauchi, 1996, Rodríguez-Chávez, 2003) que se correlaciona con grandes espesores de depósitos volcánicos y un basamento profundo. Adicionalmente se ha propuesto el graben de Santa Catarina orientado NE-SW, limitado por dos fallas normales dentro de las cuales se encuentra el pozo San Lorenzo Tezonco (Arce et al., 2013, 2015).

CARACTERÍSTICAS DEL POZO SAN LORENZO TEZONCO

EL pozo SLT alcanzó una profundidad de 2,008 m y fue perforado en tres etapas. La primera alcanzó una profundidad de 500 m con un

diámetro de pozo de 17.5 pulgadas, se colocó tubería de ademe liso y se instalaron diversos casquillos con diferentes diámetros alrededor del pozo (Figura 3), además se colocó un filtro de grava de cuarzo a lo largo de toda la etapa con diámetros de 0.375 y 0.25 pulgadas (50% y 50%). La segunda etapa alcanzó los 1,140 m, continuando con un diámetro de pozo de 17.5 pulgadas, colocándose tubería de ademe y un filtro de grava con diámetros de 0.5 y 0.25 pulgadas (50% y 50%). El diseño inicial consideró la instalación de ademe ranurado entre los intervalos de 923–1,003 m y 1,103–1,115 m (Figura 3) la cual fue cementando para continuar la perforación. Finalmente, la tercera etapa alcanzó la profundidad total del pozo (2,008 m) y se utilizó tubería de ademe ranurado en gran parte de esta etapa (Figura 3) sin filtro de grava. Mayores detalles de la perforación del pozo SLT pueden ser consultados en Morales-Casique et al. (2014).

METODOLOGÍA

El registro geofísico del pozo SLT fue proporcionado por SACMEX. Al final de cada una de las tres etapas de perforación, se llevó a cabo la adquisición de registros geofísicos de pozo. Los registros que fueron tomados son: potencial natural (SP), rayos gamma naturales (GR), eléctrico normal largo (64”), normal corto (16”) y lateral (Lat), además de la resistividad puntual y la temperatura. En la Figura 4 se muestra un diagrama y un esquema general del registro geofísico. El registro de la tercera etapa alcanzó únicamente 1,640 m debido a limitaciones del equipo utilizado con respecto a la temperatura alcanzada a profundidad.

La interpretación del registro se llevó a cabo siguiendo los valores de resistividad del registro eléctrico y la separación de las curvas con diferente grado de profundidad de investigación (zona lavada, zona de transición y la zona no invadida) para identificar zonas permeables e impermeables según la penetración del lodo de perforación (Asquith,

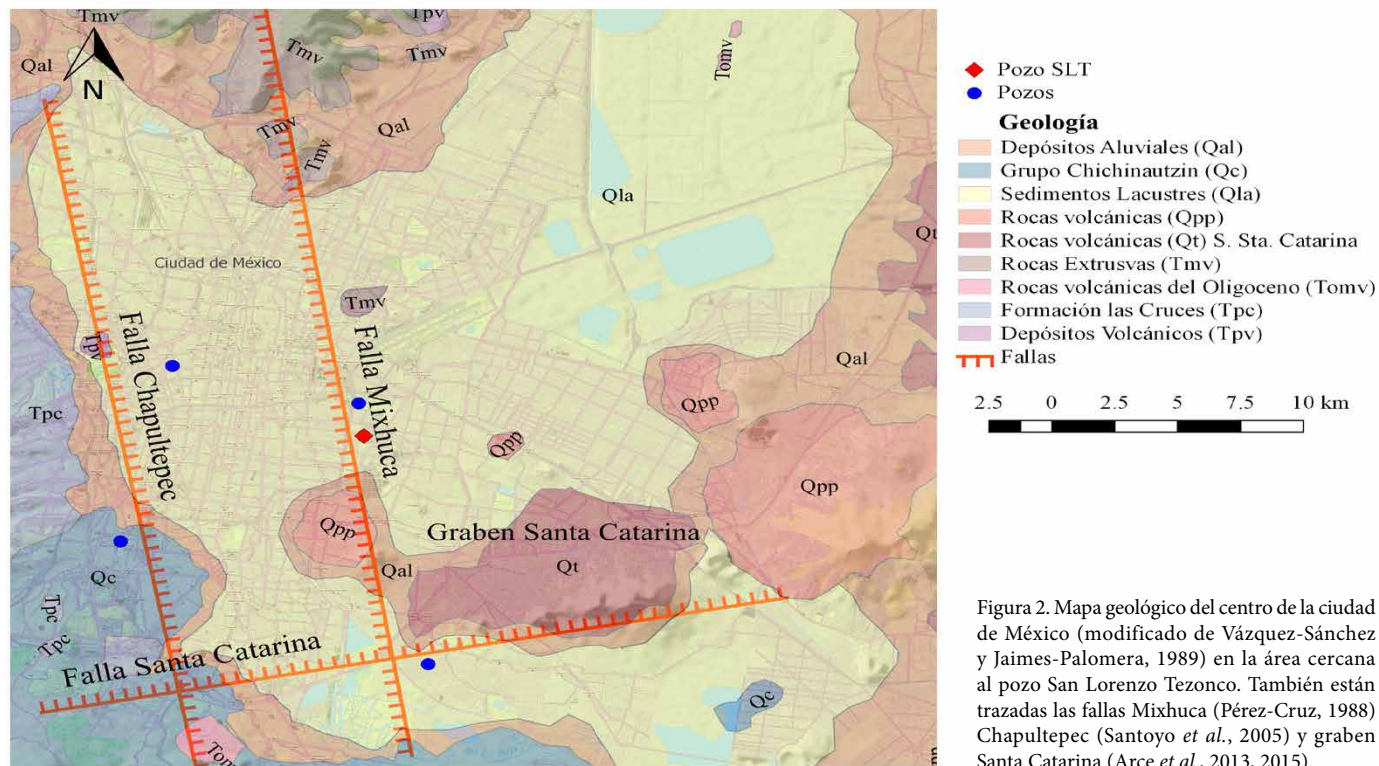


Figura 2. Mapa geológico del centro de la ciudad de México (modificado de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989) en la área cercana al pozo San Lorenzo Tezonco. También están trazadas las fallas Mixhuca (Pérez-Cruz, 1988) Chapultepec (Santoyo et al., 2005) y graben Santa Catarina (Arce et al., 2013, 2015).

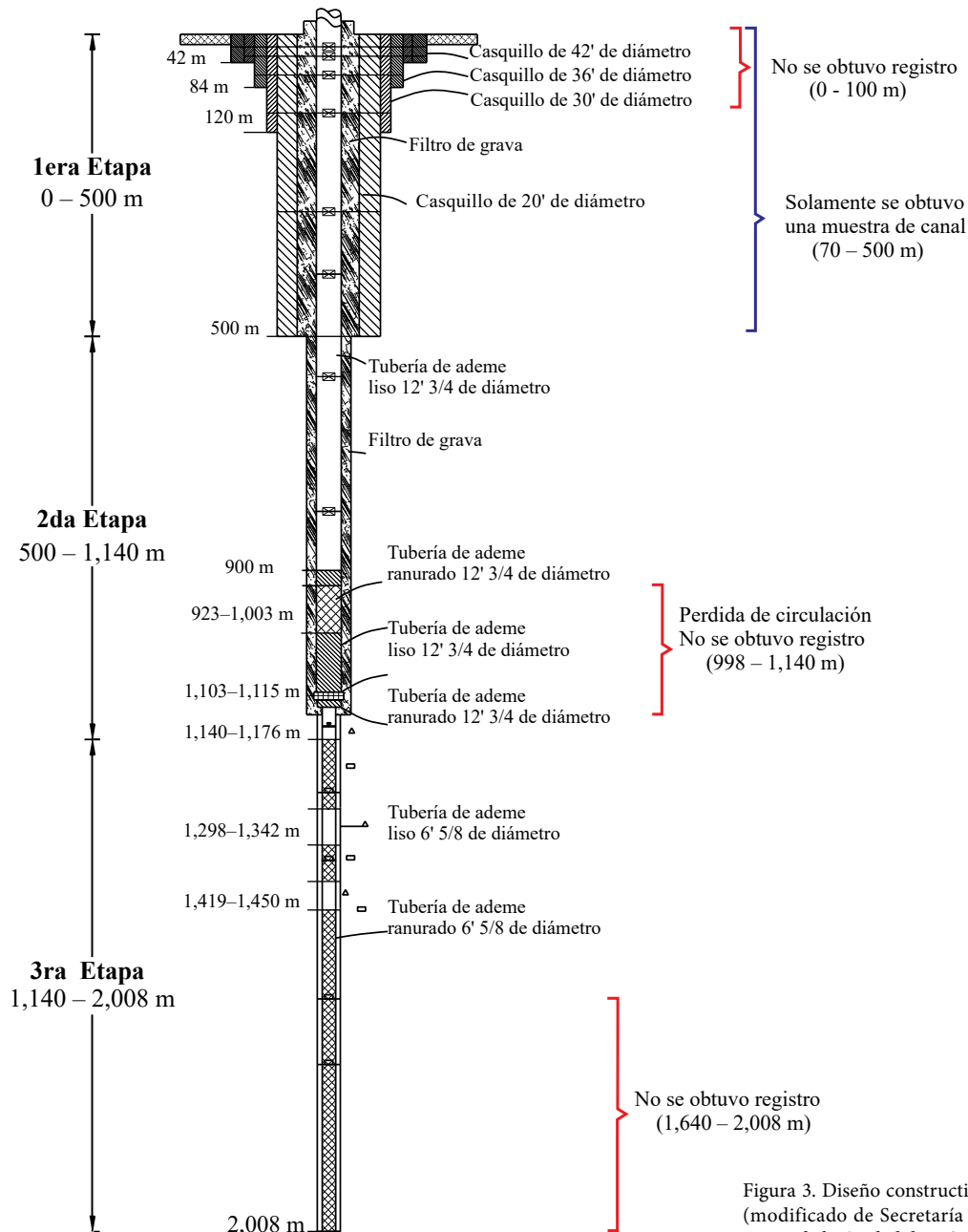


Figura 3. Diseño constructivo del pozo San Lorenzo Tezonco (modificado de Secretaría del Medio Ambiente, Sistema de Aguas de la Ciudad de México 2012, comunicación personal).

1982). Para distinguir los diferentes espesores de las formaciones se utilizaron los valores de resistividad, el comportamiento de la curva del registro eléctrico y los registros de rayos gamma y potencial natural que son indicativos de la presencia o ausencia de arcillas (Bassiouni, 1994).

Adicionalmente se utilizó la inspección visual de las muestras de canal y los resultados de Arce *et al.* (2013, 2015) quienes reportan datos de petrografía, composición química de roca y fechamientos radiométricos de varias muestras de canal del pozo SLT.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para facilitar la presentación del análisis y ya que la adquisición del registro se realizó en igual número de etapas que la perforación, la

interpretación del registro se dividió en tres secciones. Es importante mencionar que en cada una de las etapas de adquisición se presentaron condiciones particulares durante la toma del registro, que influyeron en los valores de cada una de las curvas del registro, siendo la más importante la pérdida de fidelidad en las medidas de los registros de potencial natural y rayos gamma para la tercera sección. Por otro lado el lodo de perforación que se utilizó también cambió para cada una de las secciones, siendo su resistividad de 15 ohm·m en la primera etapa, de 35 ohm·m en la segunda y de 15 ohm·m en la última etapa.

Primera sección (130–500 m)

En esta sección la adquisición del registro comenzó después de los primeros 130 m, probablemente debido al número de casquillos instalados alrededor del pozo (Figura 3). Adicionalmente, Arce *et*

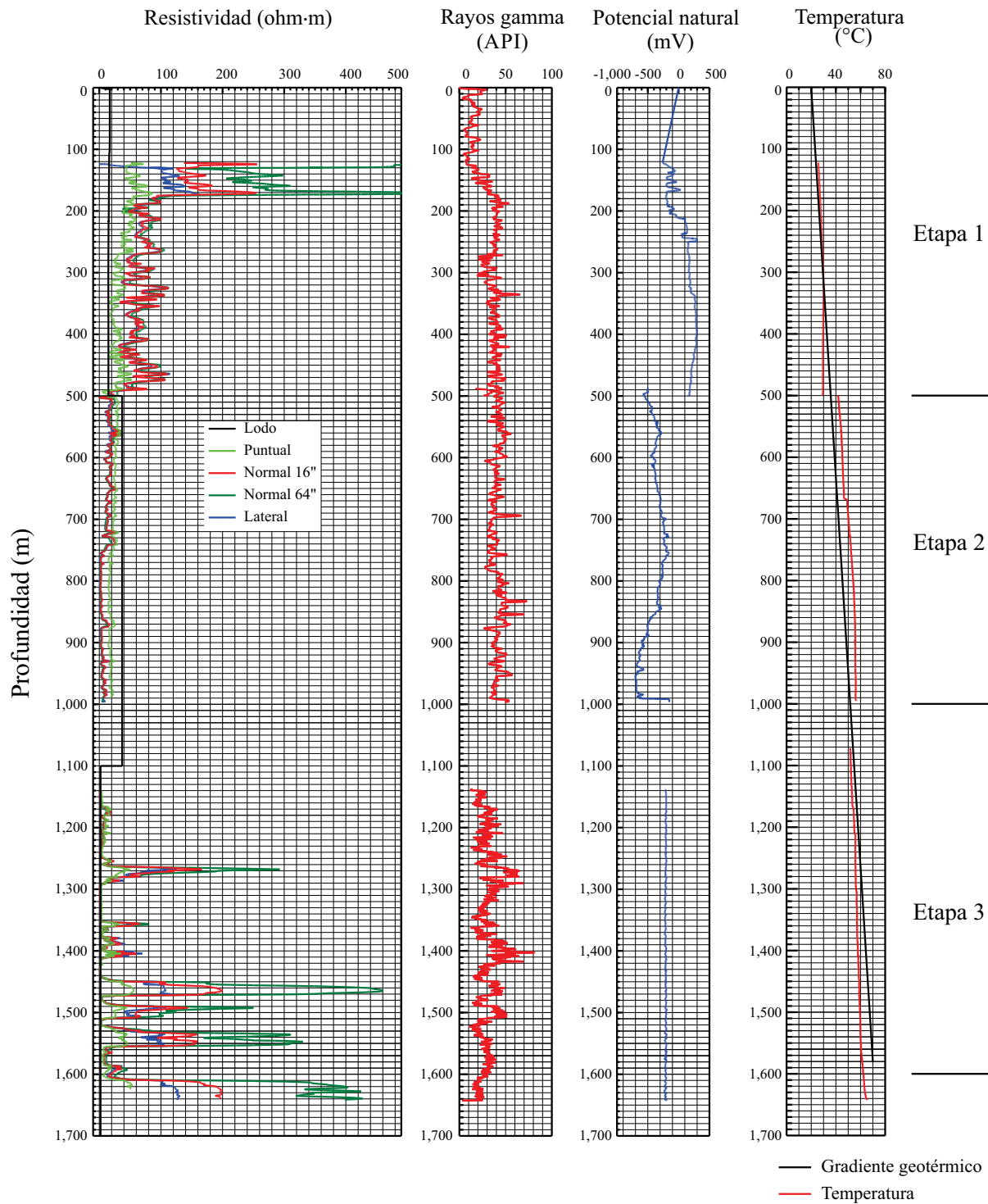


Figura 4. Registros geofísicos adquiridos en el pozo San Lorenzo Tezonco en las diferentes etapas. El gradiente geotérmico medio de 30 °C/km se muestra como línea negra en el registro de temperatura (adaptado de Morales-Casique et al. 2014).

al. (2013, 2015) y Morales-Casique et al. (2014) no reportan corte litológico para esta sección debido a que únicamente se recuperaron muestras de canal de 0 a 70 m y una muestra aislada a aproximadamente 120 m. Sin embargo, para este trabajo el corte litológico de la sección fue construido con base en la información litológica reportada para pozos cercanos al SLT, pertenecientes al SACMEX (Figura 1) con una profundidad de entre 150 y 500 m (Tabla 1).

Estos pozos contiguos al SLT indican que los primeros metros corresponden a una capa de arcillas lacustres, con aproximadamente 70 m de espesor, seguidos de materiales constituidos principalmente por arenas y gravas. Aproximadamente a los 80 metros se interpreta un cuerpo constituido por lavas de composición andesítico-basáltica, correspondiente a la muestra aislada reportada en Arce et al. (2013) y que se prolonga hasta una profundidad de 160 metros.

Tabla 1. Pozos profundos en el Valle de México y pozos someros cercanos al pozo San Lorenzo Tezonco.

Pozo	Profundidad (m)	Agencia
Copilco-1	2,258	PEMEX
Mixhuca-1	2,452	PEMEX
Roma-1	3,200	PEMEX
Texcoco-1	2,065	PEMEX
Tulyehualco-1	3,000	PEMEX
Agrícola Oriental -2	280	SACMEX
Agrícola Oriental -4	300	SACMEX
Agrícola Oriental -5	275	SACMEX
Agrícola Oriental -6	275	SACMEX

PEMEX: Petróleos Mexicanos; SACMEX: Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

Para los primeros metros de adquisición (130 – 175 m) los valores de resistividad de la curva profunda (Lat), sobrepasan valores de 200 ohm-m (Figura 5), que corresponden a la lava andesítico-basáltica ya mencionada y a una capa compuesta de material volcánico fragmentado (descrito como tezontle, gravas y basalto en los cortes de pozos cercanos), que podrían corresponder a depósitos piroclásticos de escoria y ceniza basáltica, muy característico de los conos de escoria. Además se distingue una separación en las curvas de resistividad que podría deberse a la invasión del lodo de perforación dentro de la formación, lo que sugiere zonas permeables, probablemente debidas a fracturamiento

de la lava, así como por la porosidad de los depósitos piroclásticos (los depósitos de escoria y ceniza de caída son muy permeables). La existencia de permeabilidad es sugerida también por el hecho de que se observó pérdida total del fluido de perforación de 72 a 120 m (Morales-Casique *et al.*, 2014).

Para el tramo entre 175 a 210 m se interpreta la presencia de una capa poco permeable con bajo contenido de arcillas. Esta interpretación se basa en la poca separación de las curvas de resistividad eléctrica y una respuesta casi constante del registro de potencial natural (Figura 5). Este intervalo se relaciona con una capa compuesta por arenas medias y finas con tezontle reportada en los cortes litológicos de los pozos cercanos (Agrícola Oriental 4 y Agrícola Oriental 2). Este tramo presenta una intercalación, entre los 195 y 200 m, de materiales con un ligero aumento en la cantidad de arcilla, que se observa en la curva de potencial natural y un ligero cambio en las curvas de resistividad (Figura 5). En los pozos cercanos, esta capa es reportada como una intercalación de arenas y arcilla.

A partir de los 210 metros y hasta los 500 metros se observa poca invasión del lodo de perforación, visible en la corta separación de las curvas de resistividad, teniendo un rango de resistividad entre los 80 y 100 ohm-m (Figura 5). La respuesta del registro de potencial natural indica un ligero corrimiento del lado derecho del registro; sin embargo, de acuerdo con lo observado durante la perforación y a los valores obtenidos con el registro de rayos gamma, el material predominante en esta zona no es arcilla sino arenas medias y finas. Con base en estas observaciones y en lo reportado para los pozos someros cercanos y el pozo Mixhuca-1 (Pérez-Cruz, 1988) esta porción se interpreta como intercalaciones de materiales heterogéneos que corresponderían a

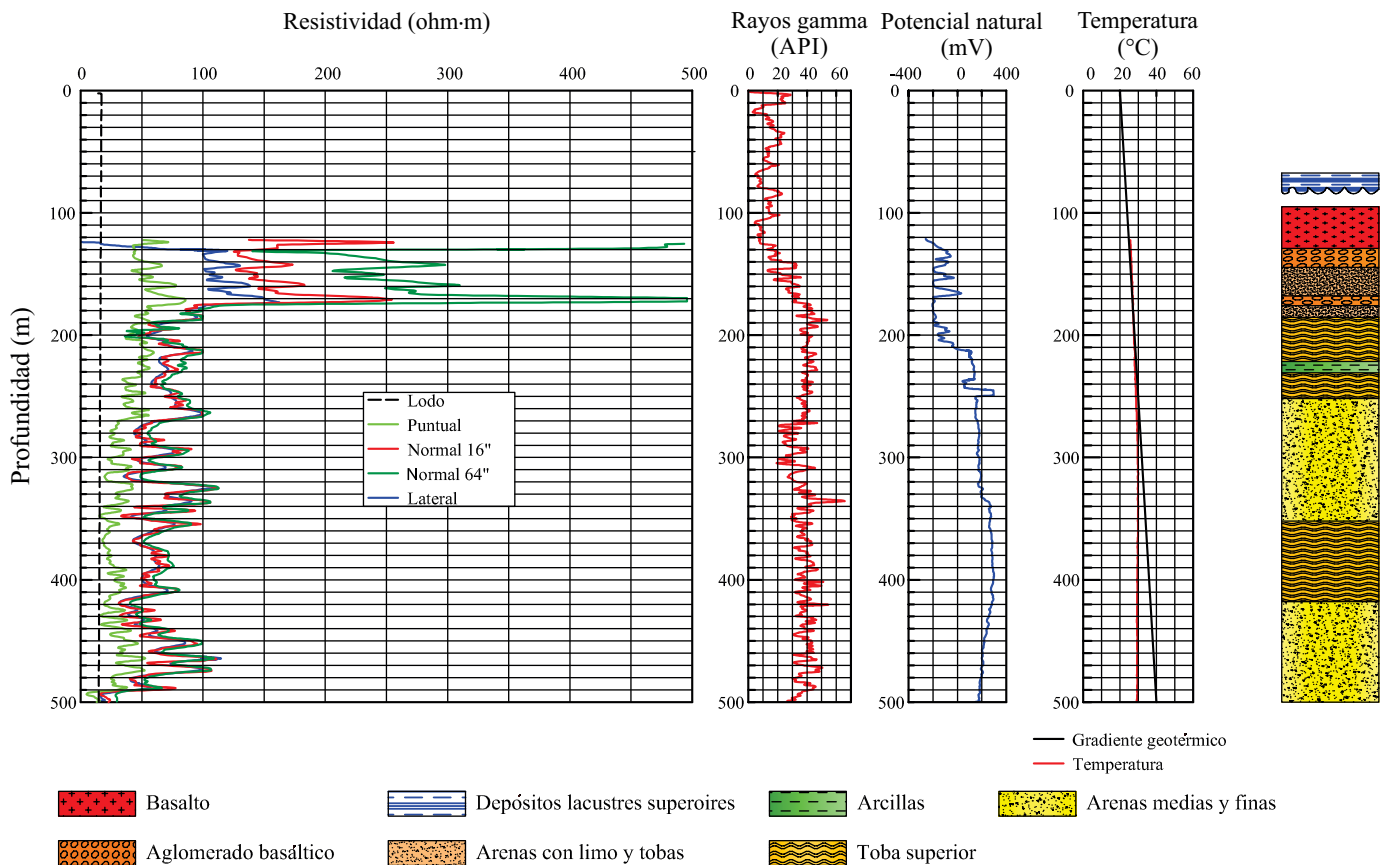


Figura 5. Primera sección del registro geofísico del pozo San Lorenzo Tezonco (130–500 m de profundidad) y la columna litológica asociada.

material volcánico, piroclastos, y lavas. Adicionalmente en el registro se observa un estrato de arcillas entre los 240 y 250 metros de profundidad, que se puede delinear por la respuesta del registro de potencial natural. Este estrato también se reporta en el pozo Agrícola Oriental No. 2, el más cercano al pozo SLT, en el que es descrito como una capa de arcillas lacustres.

Los eventos eruptivos que dieron origen a los materiales volcánicos en esta sección son contemporáneos a la formación Chichinautzin (Arce et al., 2013), aunque recientemente estos materiales han sido asociados a los eventos de la Sierra de Santa Catarina y el Cerro de la Estrella (Arce et al., 2015).

Segunda sección (500–994 m)

Al inicio de esta sección (Figura 6) se aprecia un primer horizonte poco permeable con un espesor aproximado de 20 m, sus resistividades varían entre los 20 y 25 ohm·m que corresponden a material volcánico sin consolidar (gravas y arenas). A partir de los 520 m y hasta los 720 m, se observan intercalaciones de materiales con resistividades que oscilan entre los 10 y los 35 ohm·m; la forma “aserrada” de la curva del registro de rayos gamma, la variabilidad en el registro eléctrico y la forma en que se separan las curvas de resistividad en diferentes intervalos, sugieren una heterogeneidad en estas capas. No se realiza

una distinción más detallada debido a lo complicado de asignar una profundidad exacta a las muestras de canal. De acuerdo con Arce et al. (2013), y las observaciones que se hicieron en las muestras de canal, estos depósitos corresponden a material volcánico, lavas dacíticas y depósitos de flujos piroclásticos. La edad de los depósitos volcánicos obtenida a través del método ⁴⁰Ar/³⁹Ar se encuentra entre 0.25 Ma y 1.8 Ma (Arce et al., 2013).

A partir del análisis de las muestras de canal se detectó un horizonte de material arcilloso a los 590 m de profundidad con un espesor de aproximadamente 12 m (Arce et al., 2013). Este horizonte es poco visible en el registro de rayos gamma y potencial natural, quizá debido a su reducido espesor y a que el mayor volumen de las formaciones adyacentes enmascara la señal. A este horizonte se le ha asignado una edad correspondiente al Pleistoceno temprano, gracias a las asociaciones obtenidas de estudios sobre paleoflora (Lozano-García y Sosa-Nájera, 2015) y a lo reportado por Arce et al. (2013).

Entre los 720 y 750 m se observa un aumento en el valor de resistividad y una ligera separación de las curvas, además de un gradual aumento en el valor del registro SP (Figura 6). Este intervalo se asocia con depósitos de flujo, bloques, gravas y arenas de material volcánico de baja permeabilidad, inferido por la tenue separación que se observa en las curvas de resistividad y lo reportado por Pérez-Cruz (1988) para

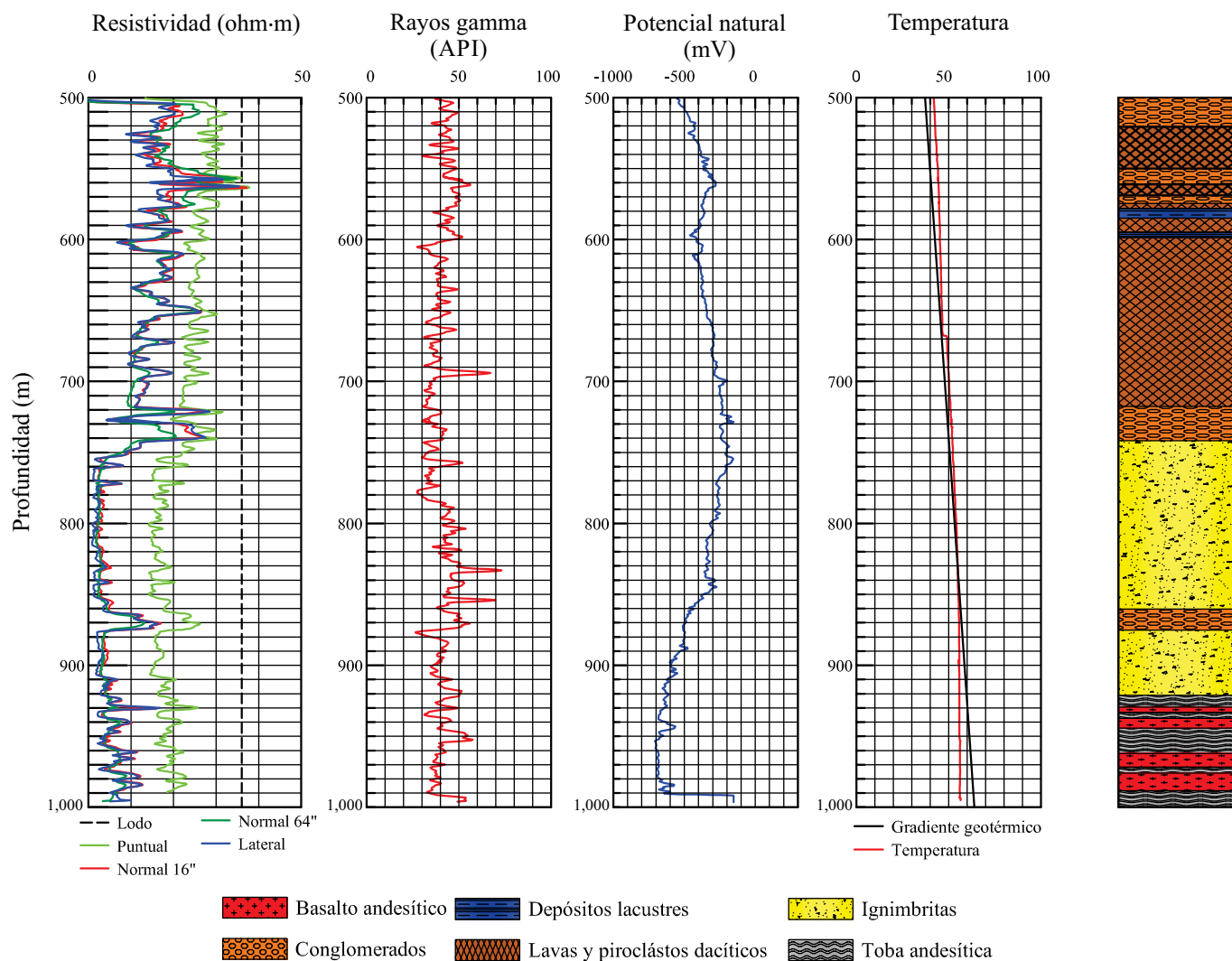


Figura 6. Segunda sección del registro geofísico del pozo San Lorenzo Tezonco (500–994 m de profundidad) y la columna litológica asociada.

el pozo Mixhuca-1. Este tipo de depósitos también se observó entre los 864 y 875 m de profundidad (Figura 6).

A partir de los 750 metros y hasta los 880 metros se observa una disminución gradual del registro SP, indicando una disminución en la cantidad de arcillas en la formación, acompañado de valores bajos de resistividad (entre los 2 y 4 ohm-m). A este intervalo se le ha correlacionado (F. Mooser, comunicación personal) con depósitos fluvio-lacustres que afloran al norte de la Ciudad de México, en la proximidad del valle Taxhimay al noroeste de la Sierra de las Cruces (Carrasco-Hernández, 1999). Sin embargo, con base en la disminución en el contenido de arcilla inferido del registro y en las muestras de canal y a lo obtenido en los estudios realizados por Arce *et al.* (2013), se trata de una secuencia de depósitos de ignimbrita de composición riolítica, probablemente alterada a arcilla, con una edad aproximada de 5 Ma. El registro sugiere que en este intervalo la litología es de grano fino, como arenas finas y limos consolidados, debido a la muy baja invasión del lodo dentro de él y los valores de resistividad que corresponden con las características de la ignimbrita descritas por Arce *et al.* (2013, 2015). Debido a las características mencionadas y al espesor de esta unidad es posible considerarla como un probable acuitardo que limitaría el intercambio de agua entre las formaciones volcánicas superiores y las inferiores y apoya la interpretación hidrogeológica de Morales-Casique *et al.* (2014).

Al final del registro (a partir de 910 m) se observa el corrimiento del registro SP y se observan diversas variaciones en el registro eléctrico (Figura 6) que corresponden a intercalaciones de arenas de material volcánico. Los últimos metros correspondientes a esta etapa de perforación, de 998 a 1,140 m, no cuentan con registro geofísico ya que existió una pérdida de circulación durante la perforación y fue necesario estabilizar el pozo; reanudando la adquisición del registro a partir de los 1,140 m de profundidad al final de la tercera etapa.

Sección 1,140–1,640 m

Aunque la última etapa de perforación corresponde a una profundidad que va de los 1,140 metros hasta el fondo del pozo (2,008 m), la adquisición del registro geofísico únicamente fue posible hasta los 1,640 m debido a que las herramientas de adquisición no permitieron tomar medidas a mayor profundidad. También es importante mencionar que, como se observa en la Figura 7, el registro de Potencial Natural (SP) no se pudo medir a partir de esta sección y el registro de rayos gamma perdió parte de su resolución, aunque algunos cambios en la litología son aún perceptibles.

Esta sección se caracteriza por los contrastes en los valores de resistividad que varían de 0.3 ohm-m al inicio del registro hasta 500 ohm-m en los 1,460 m de profundidad para la curva de investigación más profunda. Se distinguen altos en los valores de resistividad y una notable separación en las curvas en los intervalos 1,260–1,280; 1,450–1,475; 1,485–1,500; 1,525–1,550 metros de profundidad (Figura 7), que puede interpretarse como horizontes donde existió penetración del lodo de perforación a la formación indicando estratos permeables.

Con base en lo observado en las muestras de canal y en los resultados de Arce *et al.* (2013), esta secuencia se relaciona hasta los 1,510 m con el vulcanismo ocurrido durante el Mioceno y de 1,510 m a 1,800 m con la Formación Tepoztlán, una secuencia de andesita y flujos piroclásticos con intercalaciones de horizontes de riolita. Una reinterpretación, basada en nuevos fechamientos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y en la correlación de los materiales del pozo SLT con la geología de sus alrededores, asigna el intervalo de 875 m a 2,008 m a la Formación Tepoztlán (Arce *et al.*, 2015). En los análisis de muestras de canal también se observó evidencia de mineralización hidrotermal en algunas de las muestras (Arce *et al.*, 2013).

El registro geofísico termina a los 1,640 m en la Formación Tepoztlán (Arce *et al.*, 2013, 2015). Aunque se esperaba localizar

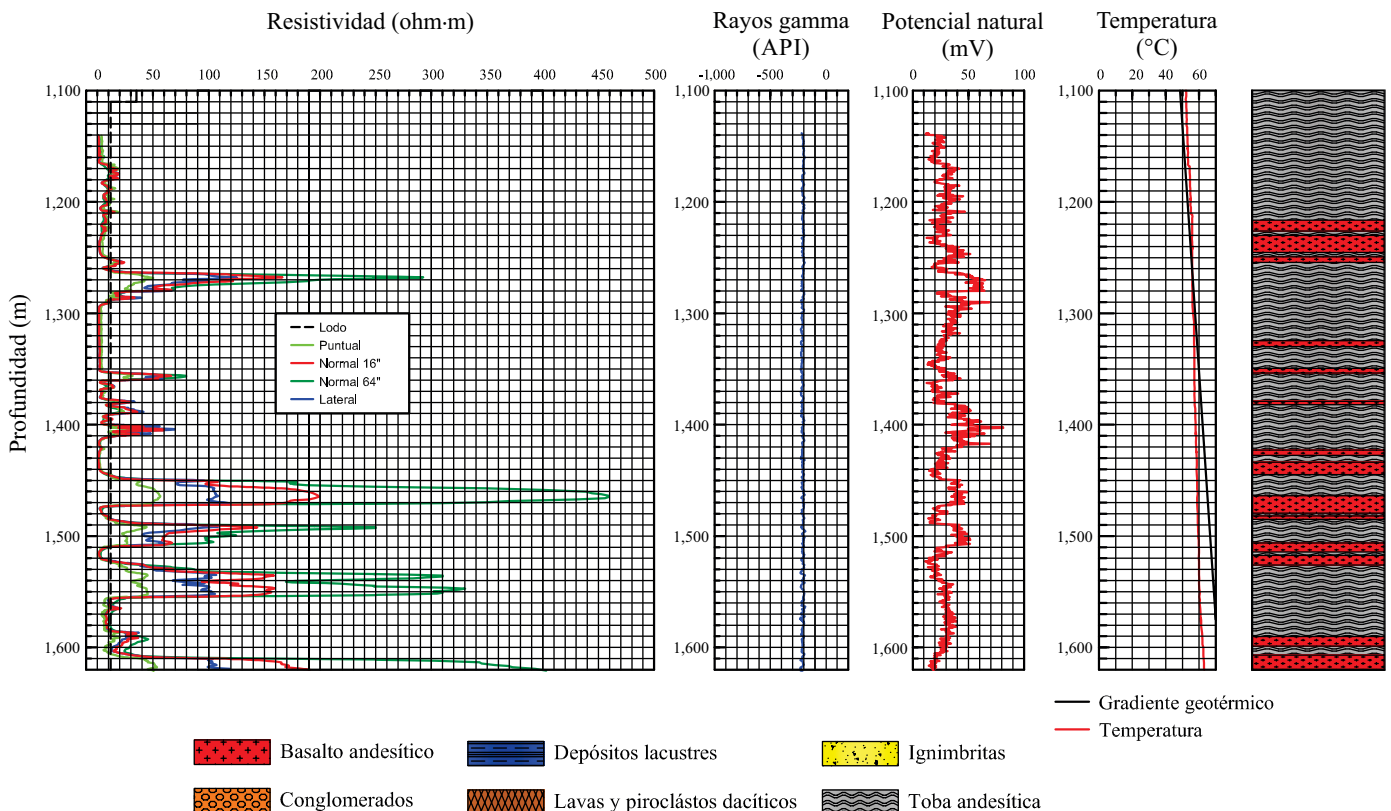


Figura 7. Tercera sección del registro geofísico del pozo San Lorenzo Tezonco (1,140–1,640 m de profundidad) y la columna litológica asociada.

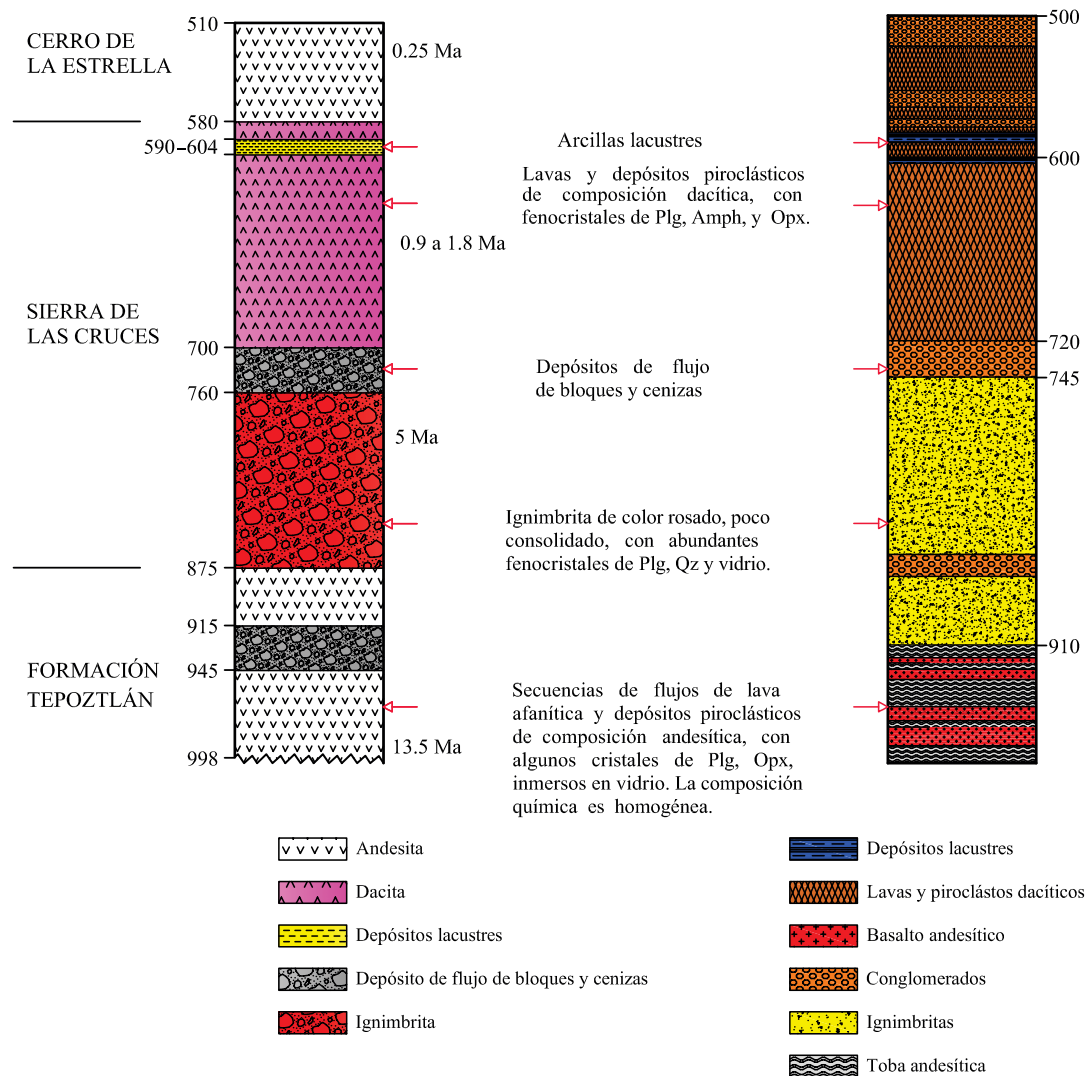


Figura 8. Columna litológica obtenida por Arce *et al.* (2013, 2014) para el pozo San Lorenzo Tezonco de 500 a 1,000 m de profundidad (izquierda) comparada con los resultados obtenidos del análisis del registro geofísico de pozo (derecha).

calizas pertenecientes a las Formaciones Mezcala, Cuautla y Morelos reportadas en el pozo Mixuca-1 y Tulyehualco -1 y estimadas a una profundidad aproximada de 1,500 m según interpretaciones de estudios sísmicos (Pérez-Cruz, 1988), no existió evidencia de ellas hacia el final de la perforación (2,008 m).

Comparación con el corte litológico de Arce *et al.* (2013, 2015)

En esta sección se compara el corte litológico obtenido del análisis del registro geofísico del pozo SLT con la columna litológica propuesta por Arce *et al.* (2013, 2015) que se obtuvo a partir de diversos estudios a las muestras de canal. La comparación se presenta para las secciones dos y tres, es decir, de 500 a 1,000 m (Figura 8) y de 1,140 a 1,640 m (Figura 9). Debido a que de 70 a 500 no se tomaron muestras durante la perforación, esa sección no está descrita en la columna litológica de Arce *et al.* (2013, 2015). Por otra parte, puesto que el registro geofísico de pozo fue interrumpido a los 1,640 m de profundidad, no se cuenta con resultados para comparar de 1,640 a 2,008 m.

En la sección que corresponde desde los 500 m hasta los 1,000 m se pueden observar grandes similitudes en los intervalos establecidos por Arce *et al.* (2013, 2015) y los obtenidos por el registro (Figura 8). Arce *et al.* (2013) clasifican los primeros 80 metros de esta sección

como una secuencia de andesita basáltica, que puede observarse en el registro como una secuencia de material heterogéneo con diferentes rangos de resistividad (Figura 6); ambos intervalos tienen espesores muy similares (Figura 8). Con respecto al horizonte lacustre observado en las muestras de canal, éste puede delimitarse por el cambio de resistividad y la poca separación de curvas a los 590 m, aunque es poco perceptible en el registro de rayos gamma y potencial natural debido a su espesor.

Con base en fechamientos, Arce *et al.* (2013, 2015) correlacionan los materiales entre 580 y 700 m con rocas de la Sierra de las Cruces (Figura 8); en el registro geofísico, este intervalo se observa más uniforme y menos aserrado que el intervalo precedente. Este intervalo corresponde a un depósito de lavas y depósitos piroclásticos de composición dacítica de acuerdo con lo observado en las muestras de canal y a lo reportado por Arce *et al.* (2013, 2015).

A los 720 m el registro eléctrico distingue una formación ligeramente más permeable que las capas adyacentes, lo que correspondería a los horizontes de flujos de bloques y cenizas reportados por Arce *et al.* (2013) a los 700 metros (Figura 8). A partir de los 745 metros se observa un importante cambio en el valor de la resistividad de la formación lo que indica un cambio litológico que, gracias a los estudios

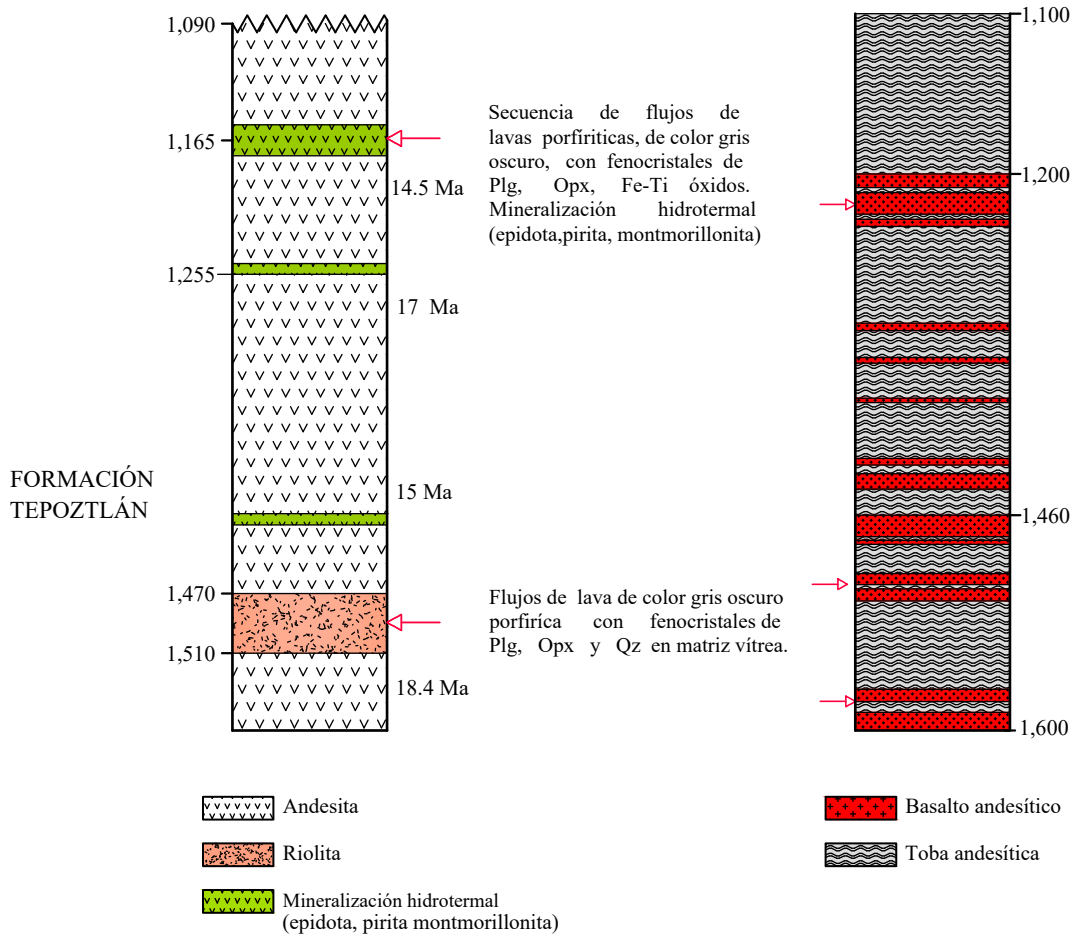


Figura 9. Columna litológica obtenida por Arce *et al.* (2013, 2014) para el pozo San Lorenzo Tezonco de 1,100 a 1,500 m de profundidad (izquierda) comparada con los resultados obtenidos por el análisis del registro geofísico de pozo (derecha).

de las muestras y a lo observado por Arce *et al.* (2013), se puede considerar como una ignimbrita (Figura 8) probablemente alterada que podría contener arcillas. Las características del registro sugieren que puede presentar baja permeabilidad. De acuerdo con el registro, que presenta valores relativamente uniformes de la resistividad, esta capa se extiende hasta los 910 m, un espesor mayor al reportado originalmente por Arce *et al.* (2013). En el registro se distingue el intervalo entre los 865 y 875 m donde se observa un aumento en la resistividad y una separación de curvas que puede relacionarse con otra capa de depósitos de lavas y cenizas reportada por Arce *et al.* (2013, 2015) a los 915 m. La diferencia de profundidades puede deberse a la incertidumbre asociada a las muestras de canal. Se debe resaltar que este intervalo corresponde también a un intervalo de transición debido a que el registro de potencial natural tiene un corrimiento suave de izquierda a derecha durante todo el intervalo (Figura 6).

A partir de los 910 puede considerarse un nuevo cambio de litología debido a un pequeño aumento en los valores de resistividad, formas más "aserradas" en la forma de las curvas de resistividad y un comportamiento más constante en el registro SP. Este cambio correspondería con la alta actividad volcánica presente durante el Mioceno, que Arce *et al.* (2013) clasifican como una secuencia de rocas andesíticas a partir de los 945 metros y que el análisis del registro sugiere como una capa altamente heterogénea (Figura 8).

Para la sección definida entre los 1,140 metros y 1,600 metros (recordando que no se obtuvo registro entre los 1,000 y 1,140 m),

Arce *et al.* (2013, 2015) continúan con la clasificación de lavas andesíticas y porfídicas (Figura 9). El espesor de esta secuencia también se observa en el registro geofísico, pero como una secuencia heterogénea en la que resaltan intervalos con cierto grado de permeabilidad que probablemente contengan agua rica en minerales disueltos, lo que permitiría la migración y la mineralización de las rocas observada en las muestras de canal analizadas por Arce *et al.* (2013).

CONCLUSIONES

El registro geofísico de pozo permitió delimitar zonas con propiedades geoeléctricas similares y correlacionarlas con la litología de la zona y las muestras de canal reportadas en otros trabajos (Arce *et al.* 2013, 2015). Adicionalmente, el análisis del registro geofísico permitió inferir cualitativamente las propiedades hidrogeológicas de los estratos y ampliar la interpretación anterior (Morales-Casique *et al.*, 2014, 2015). Destaca la localización de grandes espesores de depósitos volcánicos pertenecientes al Mioceno que son indicativos de la gran actividad volcánica durante este periodo. Además, no se encontró evidencia contundente de la existencia de estratos con alto contenido de arcilla que corresponderían con depósitos lacustres de edad Plioceno correlacionados con la secuencia característica de la formación Taxhimay, aunque puede tratarse de facies diferentes.

Por otra parte, a pesar de la profundidad del pozo, no se perfora-

ron las calizas, las cuales sí fueron observadas en los pozos profundos cercanos (Mixhuca-1 y Tulyehualco-1). Esta anomalía sugiere que puede existir una estructura de horst y graben en la zona debido al levantamiento de la Sierra de las Cruces (Arce *et al.*, 2013, 2015).

En referencia a las condiciones hidrogeológicas, el registro geofísico muestra la existencia de diversos estratos permeables después de los 1,000 metros, lo que sugiere una aportación de múltiples estratos al gasto del agua extraída por el pozo SLT. El aporte de múltiples estratos ha sido señalado como la probable causa de las variaciones en conductividad eléctrica y temperatura medidas a la descarga durante los aforos del pozo SLT (Morales-Casique *et al.*, 2014, 2015). Los resultados de este trabajo apoyan esa hipótesis.

La información obtenida en este trabajo es muy importante, considerando que la perforación fue complicada, con varios tramos sin información de muestras, con lo que se mostró que el registro geofísico es una herramienta capaz de complementar estos huecos de información, siempre y cuando se realicen las interpretaciones adecuadas y se correlacione y apoye con la información geológica y las muestras obtenidas. Además, el presente trabajo ayudará a mejorar la interpretación de estudios geofísicos que se han hecho en la zona, al brindar información sobre la continuidad de las formaciones volcánicas más profundas. Se recomienda la obtención de núcleos durante la perforación de futuros pozos profundos para eliminar incertidumbres en la interpretación de datos y lograr una mejor correlación con la respuesta de las herramientas geofísicas. Adicionalmente, en futuras exploraciones se recomienda utilizar equipo con capacidad para funcionar a profundidades de hasta 3,000 m, con una mejor resolución y sensibilidad y que además se incluyan registros de densidad, sísmico, y herramientas de registro eléctrico enfocadas para eliminar incertidumbres y que permitan estimar parámetros como son el nivel de compactación de las rocas, la permeabilidad, los límites litológicos, entre otros, y permitir una interpretación cuantitativa del registro.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado mediante el convenio 0627-10-ED-DT-1-11 con el Sistema de Aguas de la Ciudad de México. En particular se agradece a los ingenieros Ramón Aguirre Díaz, Fernando A. Ávila Luna y Alejandro Escobedo por las facilidades otorgadas.

REFERENCIAS

- Álvarez, M., Jr., 1961, Provincias fisiográficas de la República Mexicana, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 24(2), 4-20.
- Arce, J.L., Layer P.W., Morales-Casique, E., Benowitz, J.A., Rangel, E., Escolero, O., 2013, New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology and whole-rock chemistry: Journal of Volcanology and Geothermal Research: 266, 34-49.
- Arce, J.L., Layer, P., Martínez, I., Salinas, J.I., Macías-Romo, M.C., Morales-Casique, E., Benowitz, J., Escolero, O., Lenhardt, N., 2015, Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67(2), 123-143.
- Asquith, G.B., Gibson, C.R., 1982, Basic Well Log Analysis for Geologists: Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists, Methods in Exploration Series, 1st edition 216 pp.
- Bassiouni, Z., 1994, Theory, measurement and interpretation of well logs: Richardson, Texas, Society of Petroleum Geologists, Textbook Series, v. 4, 384 pp.
- Carrasco-Hernández, J., 1999, Ignimbritas, lahares y colapso de la región Taxhimay, del sector septentrional de la Sierra de las Cruces: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura.
- De Cserna, Z., De la Fuente, D.M., Palacios, N.M., Triay, L., Mitre, S.L.M., Mota, P.R., 1987, Estructura geológica, gravimetría, sísmicidad y relaciones neotectónicas regionales de la cuenca de México: UNAM, Instituto de Geología, Boletín 104, 71.
- Demant, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: UNAM, Instituto de Geología, Revista, 2, 172-187.
- Enciso de la Vega S., 1992, Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 10(1), 26-36.
- Gómez-Tuena A., Orozco-Esquivel M.T., Ferrari, L., 2005, Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, LVII (3), 2005, 227-283.
- Lozano-García, S., Sosa Nájera, S., 2015, Análisis palinológico del Cenozoico de la cuenca de México: el registro polínico de los pozos Texcoco-I y San Lorenzo Tezonco: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67(2), 245-253.
- Macías, J.L., Arce, J.L., García-Tenorio, F., Layer, P.W., Rueda, H., Reyes-Agustín, G., López-Pizaña, F., Avellán, D., 2012, Geology and geochronology of Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl, and Popocatepetl volcanoes, Sierra Nevada, central Mexico, *en* Aranda-Gómez, J.J., Tolson, G., Molina-Garza, R.S. (eds.), The Southern Cordillera and Beyond: Geological Society of America Field Guide, 25, 163-193.
- Morales-Casique, E., Escolero, O.A., Arce, J.L. 2014, Resultados del pozo San Lorenzo Tezonco y sus implicaciones en el entendimiento de la hidrogeología regional de la cuenca de México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 31(1), 64-75.
- Morales-Casique, E., Escolero, O.A., Arce, J.L., 2015, Estimación de parámetros mediante inversión y análisis de las pérdidas hidráulicas lineales y no-lineales durante el desarrollo y aforo del pozo San Lorenzo Tezonco: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67(2), 203-214.
- Pérez-Cruz, G.A., 1988, Estudio sísmológico de reflexión del subsuelo de la ciudad de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de maestría, 83 pp.
- Reyes-Pimentel, A., 2013, Análisis de sismogramas sintéticos en pozos profundos de la cuenca del Valle de México para la calibración de la relación tiempo-profundidad con líneas de reflexión sísmica. Resumen, Unión Geofísica Mexicana, A.C., Reunión Anual, México, 33, p. 257.
- Rodríguez-Chávez, F.M. 2003, Modelado gravimétrico de la estructura de la cuenca de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura, 98 pp. Santoyo, E., Ovando-Shelley, E., Mooser F., León P., 2005, Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México: México, D.F., TGC.
- SHCP (Secretaría de Hacienda y Crédito Público), 1969, Proyecto Texcoco - Memoria de los trabajos realizados y conclusiones: México, D.F., Fiduciaria Nacional Financiera, S.A., Reporte Técnico, 215 pp.
- Unda-López, J.A., 2016, Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del Valle de México: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura, 88 pp.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Flores Ruiz J.H., 1996, Bouguer gravity anomalies and regional crustal structure in central México: International Geology Review, 38, 176-194.
- Valdez-Reséndiz, N., 2015, Cálculo de sismogramas sintéticos en cuatro pozos de la cuenca del Valle de México y su calibración con las líneas sísmicas de reflexión: México D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura, 84 pp. Vázquez-Sánchez, E., Jaimes-Palomera, R., 1989, Geología de la Cuenca de México: Geofísica Internacional, 28(2), 133-190.

Manuscrito recibido: Julio 27, 2015

Manuscrito corregido recibido: Mayo 5, 2016

Manuscrito aceptado: Mayo 7, 2016