Integración de datos geofísicos para la elaboración de un modelo 3D de las zonas geotérmicas de San Agustín de Maíz y Araró, Mich.

J. Joaquín Gómez Cortés[2,3], Ricardo Vázquez-Rosas[1,3], Ángel Figueroa Soto[2,3], Víctor Hugo Garduño Monroy[2,3], Jorge Alejandro Guevara Alday[2] y Alberto Mazzoldi[3].

[1]Catedrático CONACYT, Instituto de Investigaciones de Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich. Correos: jgc_leonigma@hotmail.com, razquezrunam@gmail.com. [2]Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich.[3]Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica CeMIEGeo.

Resumen

El método magnético permite identificar cuerpos y estructuras geológicas debido al contraste de magnetización de las rocas con diferente composición mineralógica y diversos grados de alteración. Por otro lado, el uso de la propagación de ondas sísmicas superficiales se ha convertido en una herramienta de gran utilidad para determinar y/o identificar estructuras de velocidades con diferentes contrastes de impedancia de las rocas (bajo y alto grado de fracturamiento). Ambos métodos han resultado útiles en la exploración de campos geotérmicos y más económicos comparados con otras técnicas directas, como por ejemplo la perforación de pozos o el uso de explosivos para exploración sísmica activa. Éstas técnicas no invasivas permiten explorar incluso zonas urbanas y de reservas naturales sin provocar mayor alteración al ambiente. Mediante el uso de ondas sísmicas superficiales y estudios de magnetometría terrestre se sientan las bases para construir modelos conceptuales tridimensionales de los sistemas geotérmicos de San Agustín del Maíz y Araró, Mich., con la finalidad de caracterizar los volúmenes de los yacimientos que no se conocen del todo.

Palabras clave: Geofísica, propagación de ondas sísmicas superficiales, magnetometría terrestre, impedancia de rocas.

Integrating geophysical data to build a 3D model of the geothermal zones of San Agustín and Araró, Mich.

Abstract

Magnetic methods allow identifying geologic bodies and structures based on the differences in magnetic properties of rocks of different origin, mineral composition and alteration intensity. On the other hand, the use of surface seismic waves has turned into a very useful tool for determining and/or identifying velocity structures of rocks with different impedance contrasts, highlighting areas with low or high fracturing. Both methods are useful in exploring geothermal areas, and less expensive than direct methods like drilling exploration wells and use of explosives for active seismic surveys. These non-invasive techniques also allow explore within urban areas and natural reserves without affecting the environment. Utilizing shallow seismic waves and magnetic surveys, we set the bases for the construction of 3D conceptual models of the geothermal systems of the areas of San Agustín del Maíz and Araró, aiming to characterize their not already known reservoirs.

Keywords: Geophysics, propagation of superficial seismic waves, terrestrial magnetometry, rocks impedance.

Introducción

Los yacimientos geotérmicos están generalmente controlados por estructuras tectónicas, lo que da lugar a su distribución heterogénea (Wang & Sun, 2001, en Peifen Xu et al., 2011). Estos reservorios geotérmicos son difíciles de detectar o mapear debido a las diversas estructuras complejas, y relativamente profundas que los controlan. Las fracturas y fallas juegan un papel significativo como conductos de agua caliente y, posiblemente, como almacenamiento del sistema geotérmico.

El método de análisis de auto-correlación espacial de microtremores (SPAC) (Aki, 1957), se utiliza para mapear fallas sepultadas en profundidad que tienen controles primarios en los yacimientos geotérmicos. Se puede utilizar eficazmente para mapear fallas y estructuras para exploración de reservorios, y pueden ser una de las maneras más efectivas de aumentar la tasa de éxito en la perforación y, por lo tanto, reducir el riesgo en la exploración geotérmica (Peifen Xu et al., 2011).

Por otro lado, el método magnético permite mapear tanto en superficie como en profundidad cuerpos geológicos y/o estructuras que den indicio a la ubicación de un yacimiento, ya que el contraste de magnetización de las rocas en el medio es evidente cuando existen zonas de contactos geológicos de cuerpos ígneos con rocas de afinidad sedimentaria. También coadyuva la desmagnetización de las rocas debido al calor y a los fluidos propios del yacimiento geotérmico en las zonas de alteración hidrotermal. Estos contrastes pueden ser observados mediante levantamientos magnetométricos y asociarse a estructuras y/o a cuerpos geológicos que actúen como fuente de calor en un sistema geotérmico.

Hay varios trabajos de exploración geofísica en las zonas de estudio, entre los que figuran: exploración magnetotelúrica en Araró (Campos-Enríquez et al., 1988); estudio aeromagnético en la zona de Araró (García, 1991); levantamiento gravimétrico en la parte central del Lago de Cuitzeo (Arredono-Fragoso, 1983) y sondeos eléctricos verticales en San Agustín del Maíz (Bigurra-Pimentel y Romero de León, 1983).

Con la finalidad de caracterizar los yacimientos geotérmicos del Lago de Cuitzeo y contribuir a aumentar la tasa de éxito en la perforación de futuros pozos exploratorios, en este trabajo integran datos de campo magnético y de microtremores para la elaboración de un modelo 3D de las zonas geotérmicas de San Agustín del Maíz y Araró.

Marco geológico-estructural

Geológicamente las zonas de estudio de San Agustín del Maíz y Araró se encuentran ubicadas dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

El Lago de Cuitzeo está situado en la región volcánica de la Meseta Tarasca, al norte de Michoacán, y a su vez pertenece a la provincia geológica conocida como Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). El lago se formó dentro de una cuenca tectónica y es el segundo vaso lacustre más grande de México. Forma parte de una serie de depresiones tectónicas alineadas en dirección E-W en las que se han establecido sistemas lacustres, algunos de ellos ya desaparecidos por efecto del vulcanismos y la tectónica que han contribuido a su colmatación (Israde-Alcántara et al., 2010) (Fig. 1).

De manera general se puede separar el vulcanismo del sur del Lago de Cuitzeo en dos partes: un vulcanismo antiguo miocénico (18-7 Ma) de la Sierra Mil Cumbres, compuesto por una secuencia de rocas andesíticas, y un vulcanismo reciente (Pleistoceno a Holoceno) ligado al Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato, de tipo mayoritariamente monogénetico con conos cineríticos de composición basáltica a andesítica y coladas de lava asociadas, pero también con la existencia de domos de composición riolítica y de cráteres de explosión freatomagmática.

Para el caso de la porción oriental, en Araró las estructuras locales más importantes y aparentemente activas son las fallas Huingo y Araró-Zimirao, de tipo normal y orientación general E-W, con variaciones

hasta NE-SW. Ambas pertenecen al Sistema de Fallas Morelia-Acambay (SFMA) (Fig. 2). A través de ellas aflora la mayor parte de las manifestaciones termales que presentan temperaturas superficiales que van de los 30°C a los 93°C. Estas estructuras configuran un sistema de bloques escalonados hacia el N (y en menor grado hacia el NW), con ligeros basculamientos hacia el S (y en menor grado al SE) (Departamento de Exploración, 1989 en Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín, 2003).

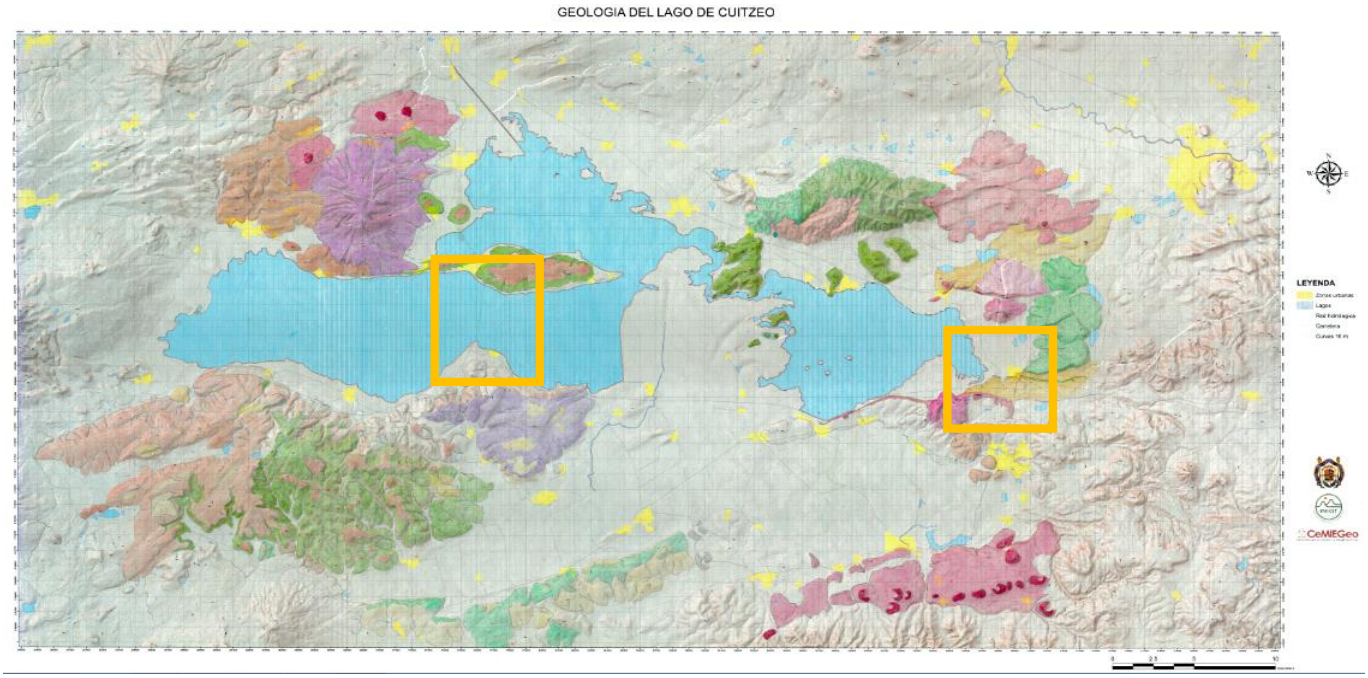

Fig. 1. Mapa geológico preliminar de la cuenca del Lago de Cuitzeo y ubicación de las zonas de estudio: San Agustín del Maíz, recuadro izquierdo, y Araró, recuadro derecho.

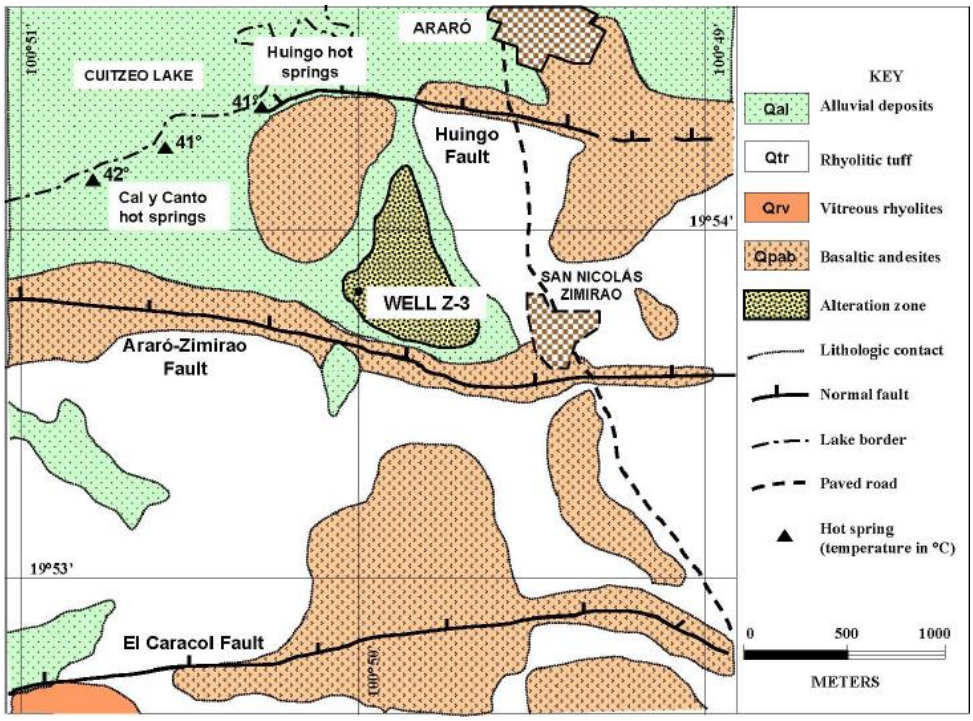

Fig. 2. Mapa que muestra la distribución de las diferentes unidades litológicas y el control estructural en Araró (Tomado de Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín, 2003).

En el área afloran tres unidades litológicas: andesitas basálticas (*Qpab*), riolitas vítreas (*Qrv*) y tobas riolíticas (*Qtr*). En la región hay evidencias de un vulcanismo cuaternario, predominantemente riolítico, con edades que fluctúan entre 1.54 y 0.9 millones de años. Las fases finales de este vulcanismo fueron de composición basáltica, con edades aún más recientes de 0.9 millones de años.

Desde el punto de vista estructural la zona de estudio se encuentra ubicada en la intersección de tres sistemas de fallas, por un lado el sistema de fallas NW-SE, heredado del *Basin and Range* de edad Oligoceno-Plioceno, y los sistemas NE-SW del Corredor Tarasco y E-W del SFMA (Menella, 2011).

Método de auto-correlación espacial (SPAC)

Los microtremores, también conocidos como microsismos o ruido ambiental, pueden definirse como vibraciones de la superficie debidas a la incidencia oblicua de ondas de cuerpo que se propagan en todas las direcciones con la misma energía (Flores-Estrella et al., 2004).

El método conocido como SPAC (*Spatial Autocorrelation method*) fue introducido por primera vez por Aki en 1957. Plantea que a partir de la medición simultánea de microtremores en varias estaciones es posible obtener la curva de dispersión por medio del cálculo del coeficiente de autocorrelación espacial (Aguirre-González et al., 2004).

El método SPAC tiene el propósito de obtener el modelo estructural a partir de registros de microtremores, para lo cual se requiere registrar microtremores simultáneamente en varias estaciones que conforman un arreglo instrumental. Con esa información y mediante un procesado se obtiene la curva de dispersión de ondas Rayleigh, que posteriormente se usa para determinar la estructura de velocidades buscada.

Siguiendo la metodología descrita por Aki (1957), consideremos estaciones dispuestas en un arreglo circular para la observación de microtremores. Representamos ondas armónicas de frecuencia circular ω de microtremores por $u(0,0,\omega,t)$ y $u(r,\theta,\omega,t)$, que se observan en el centro $C(0,0)$ del arreglo y en el punto X (r,θ) sobre el círculo de radio r. Entonces la función de auto-correlación espacial se define como:

$$\text{(a)} \quad \varphi(r,\theta,\omega) = u(0,0,\omega,t) \cdot u(r,\theta,\omega,t)$$

Donde $u(t)$ significa el valor promedio en el dominio del tiempo. El coeficiente de auto-correlación espacial se define como el promedio de la función de auto-correlación espacial (SPAC) en todos los sitios de observación que se encuentran en el arreglo circular, esto es:

$$\text{(b)} \quad \rho(r,\omega) = \frac{1}{2\pi \cdot \phi(0,\omega)} \int_0^{2\pi} \phi(r,\theta,\omega) \cdot d\theta$$

Donde $\varphi(0,\omega)$ es la función SPAC en el centro $C(0,0)$. La integral de la ecuación (b) se reduce a:

$$\text{(c)} \quad \rho(\omega;r) = J_0\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right)$$

Donde $J0$ es la función de Bessel de primer especie y de orden cero, y $c(\omega)$ es la velocidad de fase en la frecuencia ω.

El coeficiente SPAC de la ecuación (b) puede calcularse directamente en el dominio de la frecuencia usando la transformada de Fourier de los microtremores observados de la siguiente forma:

(d) $$\rho(r,\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \frac{\mathrm{Re}\left[S_{CX}(\omega;r,\theta)\right]}{\sqrt{S_C(\omega)\cdot S_X(\omega;r,\theta)}}\,d\theta$$

Donde Re[·] significa la parte real de un valor complejo, $S_C(\omega)$ y $Sx(\omega;r,\theta)$ son los espectros de potencia de los microtremores en los dos sitios C y X respectivamente, y S_{CX} $(\omega;r,\theta)$ es el espectro cruzado (*cross spectrum*) entre los dos sitios. Esta ecuación significa que los coeficientes SPAC se obtienen por el promedio de una función de coherencia normalizada definida como co-espectro (*co-spectrum*) entre dos sitios con respecto a la dirección θ. La ecuación (d) se puede obtener directamente a partir de los microtremores observados usando técnicas como el método FFT. La velocidad de fase puede ser calculada para frecuencia ω a partir del argumento de la función Bessel de la ecuación (c).

Método magnético

El método magnético mide las variaciones del campo magnético terrestre debido al contraste del grado de magnetización o susceptibilidad magnética de las rocas que conforman la corteza terrestre.

Se puede definir un campo magnético "B" como la fuerza que ejerce un polo de intensidad "P" sobre un polo unitario a una distancia "r" (Dobrin, 1961), calculándose este campo según la ecuación:

$$B_{(r)} = \frac{P}{\mu \cdot r^2}$$

Donde la unidad de campo magnético resultante de esta ecuación es el Tesla, que es igual a 10^{-5} Gauss. Sin embargo, la unidad utilizada para el estudio de anomalías del campo magnético terrestre es el gamma, γ, que equivale a un nanoTesla (10^{-9}). Esto se debe a que las variaciones generadas sobre el campo magnético por efecto de cambios en la corteza terrestre se mantienen en el orden de nanoTeslas (nT) (Lowrie, 2007).

El campo magnético terrestre puede describirse con mucha similitud como el campo de un dipolo situado en el centro de la Tierra (Fig. 3), con su momento magnético apuntando al sur geográfico, y con una densidad de flujo en la superficie de alrededor de 0.6 Webber/m^2 (Parasnis, 1970, en Alberty-Muttach, 2012).

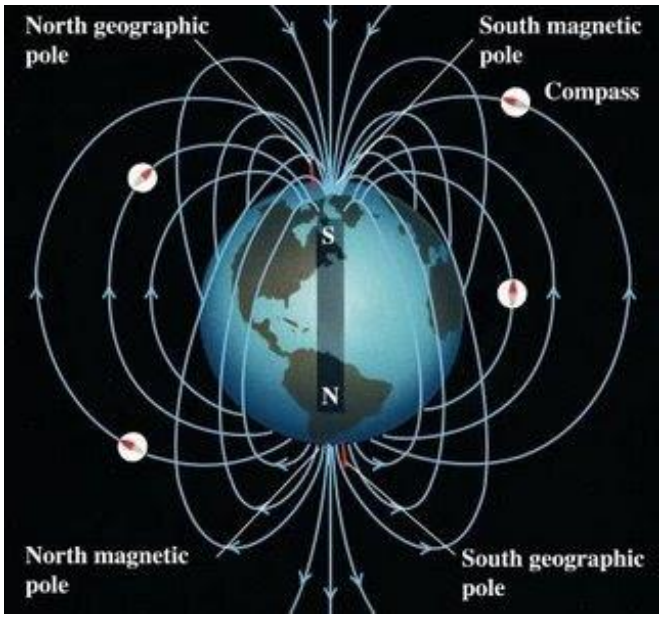

Fig. 3. Modelo del campo magnético terrestre (tomado de https://carmesi.wordpress.com/2009/11/01/el-campo-magnetico-de-la-tierra/).

A través de la interpretación de las lecturas de un magnetómetro se pueden hacer suposiciones acerca de qué es lo que existe bajo la superficie, ya sea un tubo, una urna antigua, una pieza de armamento, un mineral en particular o una estructura geológica.

La exploración magnética se puede realizar en tierra, en el mar y en el aire. Consecuentemente la técnica es ampliamente empleada, y la rapidez de operación de los servicios aéreos hace que el método sea muy atractivo en la búsqueda de depósitos minerales que contienen minerales magnéticos. La prospección magnética, se emplea también en la búsqueda de petróleo para determinar el espesor de la secuencia sedimentaria o para cartografiar rasgos estructurales de la superficie del basamento que podrían influenciar las estructuras sobreyacentes.

Metodología

Adquisición y procesamiento de datos de campo magnético

Se llevó a cabo una campaña de adquisición de datos de campo magnético en la parte central del Lago de Cuitzeo desde junio 2015 a la actualidad (febrero de 2016). Utilizando el programa MagLog (Geometrics Inc), se construyó una malla de 7 perfiles orientados NE-SW de alrededor de 15 km cada uno. Se eligió este arreglo con la finalidad de cortar una anomalía magnética positiva evidenciada tras el procesado de los datos aeromagnéticos adquiridos del Servicio Geológico Mexicano (SGM) (Fig. 4).

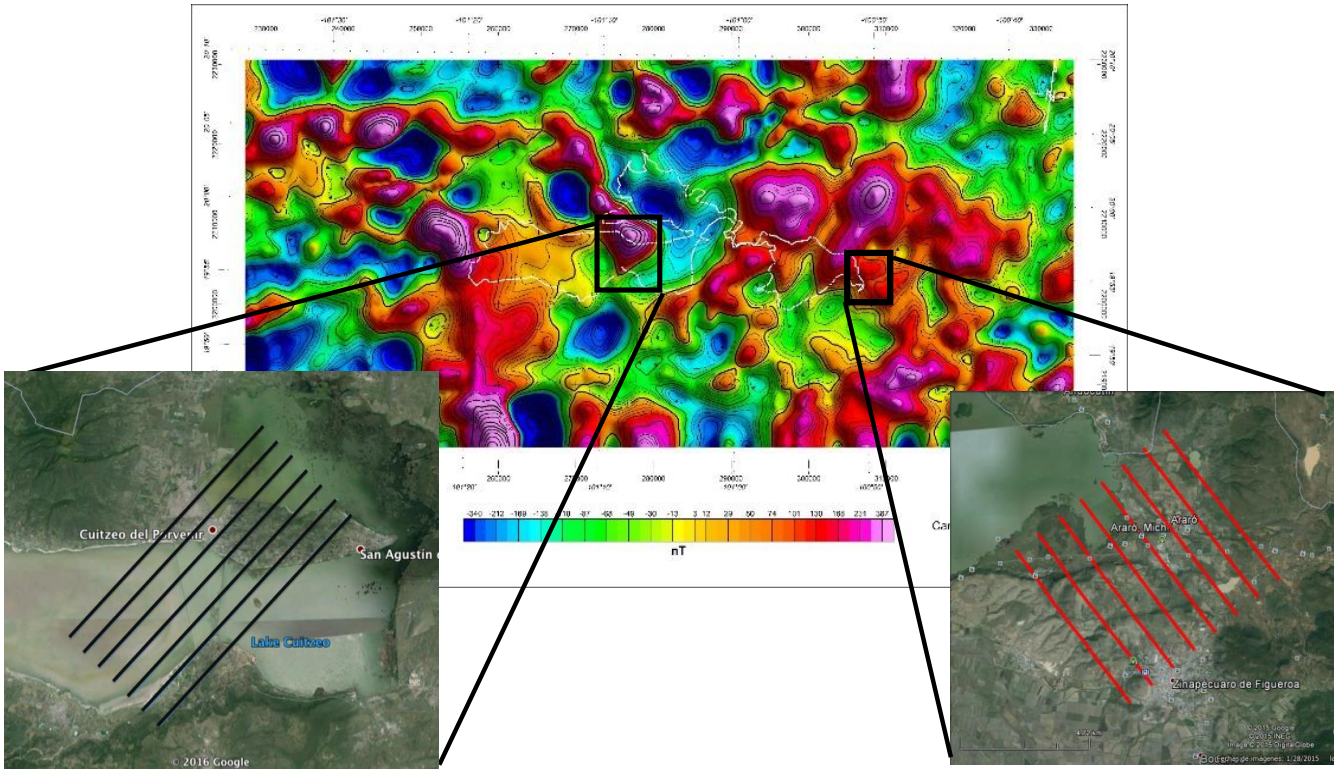

Figura 4. Mapa de campo magnético reducido al polo de la cuenca del Lago de Cuitzeo que muestra las zonas de estudio (San Agustín del Maíz a la izquierda y Araró a la derecha) y las mallas trazadas para la adquisición de datos de campo magnético.

Los perfiles se realizaron sobre tierra y agua con un magnetómetro Geometrics G-857, tomando puntos de medición cada 200 m georreferenciados mediante un GPS Garmin Oregon 450. Para la corrección por variación diurna se utilizaron los datos del observatorio geomagnético de Teoloyucan, Estado de México. No pudieron tomarse algunos puntos de las estaciones realizadas en tierra, debido a que se encontraban sobre viviendas, cerca de líneas de alta tensión o incluso sobre carreteras pavimentadas muy transitadas por vehículos que pudieran causar ruido magnético. Las mediciones dentro del lago se hicieron con ayuda de una lancha.

En la zona de Araró, la campaña de adquisición de datos magnéticos se llevó a cabo igualmente desde octubre 2015 hasta febrero de 2016. En esta zona se trazó una malla de 8 perfiles de orientación NW-SE, de aproximadamente 7 km de longitud cada uno (Fig. 4). El objetivo fue levantar un estudio magnético a detalle de la zona geotérmica y verificar la presencia de una estructura de orientación NNE-SSW, evidenciada por un lineamiento de anomalías y gradientes magnéticos positivos en el mapa de campo magnético reducido al polo de esta zona (Gómez-Cortés et al., 2015) (Fig. 5).

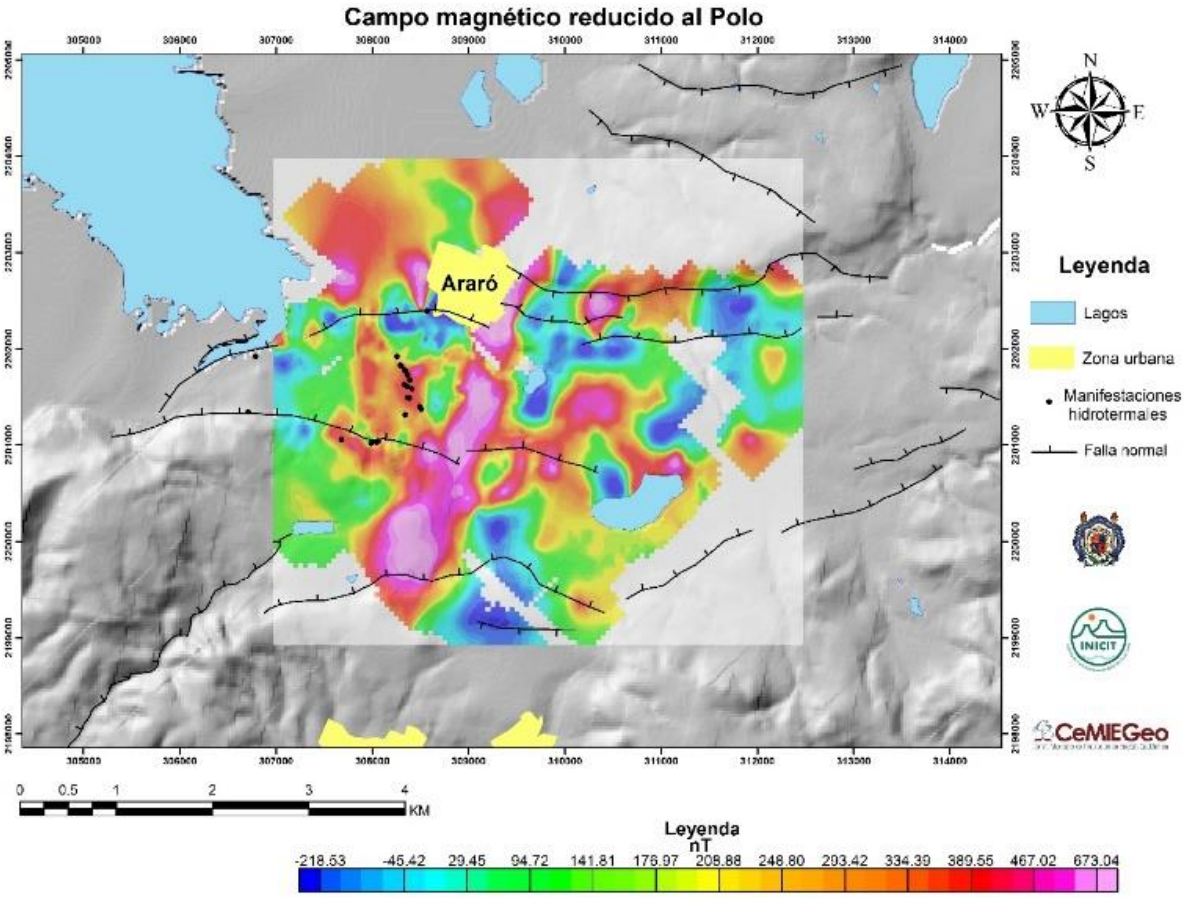

Fig. 5. Campo magnético reducido al polo de la zona geotérmica de Araró. Nótese un lineamiento magnético positivo de orientación NNE-SSW asociado a una estructura en profundidad (Gómez-Cortés et al., 2015).

En la zona de Araró todas las estaciones de medición estuvieron en tierra con puntos espaciados cada 150 m, y cada estación fue igualmente georreferenciada.

Los datos de ambas zonas se pre-procesaron mediante al software MagMap2000 de Geometrics, con la finalidad de corregir por variación diurna, visualizar las estaciones georreferenciadas en coordenadas UTM dentro de cada perfil y extraer el valor del Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF), que para la zona de estudio es de 40,700 nT y, posteriormente obtener un mapa de anomalía magnética.

Tras realizar este paso, los datos fueron procesados mediante el software Oasis Montaj de Geosoft para elaborar los principales mapas en planta y construir perfiles, y con ello obtener una primera visualización e interpretación cualitativa de las zonas de estudio.

Registro y procesado de microtremores con el método SPAC

Se realizó una campaña de registro de microtremores dentro de la localidad de Araró en la que se optó por un arreglo instrumental de siete estaciones, realizando diferentes combinaciones triangulares. Se registraron 7 mediciones con una duración de 4 horas. En la Figura 6 se muestra el arreglo utilizado en esta zona con la finalidad de obtener la profundidad del basamento.



Fig. 6. Imagen satelital que muestra la distribución espacial de las estaciones de la zona geotérmica de Araró.

Se instalaron 7 sensores de periodo largo marca Trillium Compact 120s con respuestas en frecuencia de 120s a 100Hz, con sus respectivos digitalizadores de tercera generación marca RefTek 130S de tres canales y resolución de 24 bits con sus respectivas antenas de GPS (Fig. 7).





Figura 7. Instalación de las estaciones sísmicas durante el trabajo en campo.

El procesado de los registros se llevó a cabo con los software Reftek y SAC (Seismic Analysis Code), para lo cual se cortaron los sismogramas dejando aquellos que tienen un tiempo común de registro.

Resultados preliminares y discusión

Para el caso de San Agustín del Maíz se obtuvo el mapa de campo magnético total reducido al polo (Fig. 8) para obtener las primeras interpretaciones cualitativas de esta zona geotérmica. En este mapa se puede apreciar un rasgo lineal al S de la población de San Agustín del Maíz, que se evidencia por gradientes ascendentes hacia el SW y que presenta orientación NW-SE, ligado posiblemente a la presencia de una falla sepultada por los sedimentos lacustres dentro del lago. Al N del poblado se aprecia un lineamiento magnético positivo que también presenta una orientación NW-SE y que no está asociado a ningún cuerpo geológico superficial. En la parte NE de la población de Cuitzeo de observa un depocentro magnético lineal de orientación NW-SE limitado al SW por gradientes ascendentes, anomalías típicas asociadas a la presencia de fallas.

Finalmente la anomalía más representativa del mapa es un alto magnético semicircular al SE de la población de Cuitzeo, que no está asociado con ninguna estructura en superficie y que puede ser la firma magnética en superficie de un cuerpo subvolcánico emplazado a profundidad y en proceso de enfriamiento. Sin duda, este cuerpo podría actuar como la fuente de calor de las manifestaciones termales cercanas a las poblaciones de San Agustín del Maíz, San Juan Tararameo, Benito Juárez y San Agustín del Pulque.

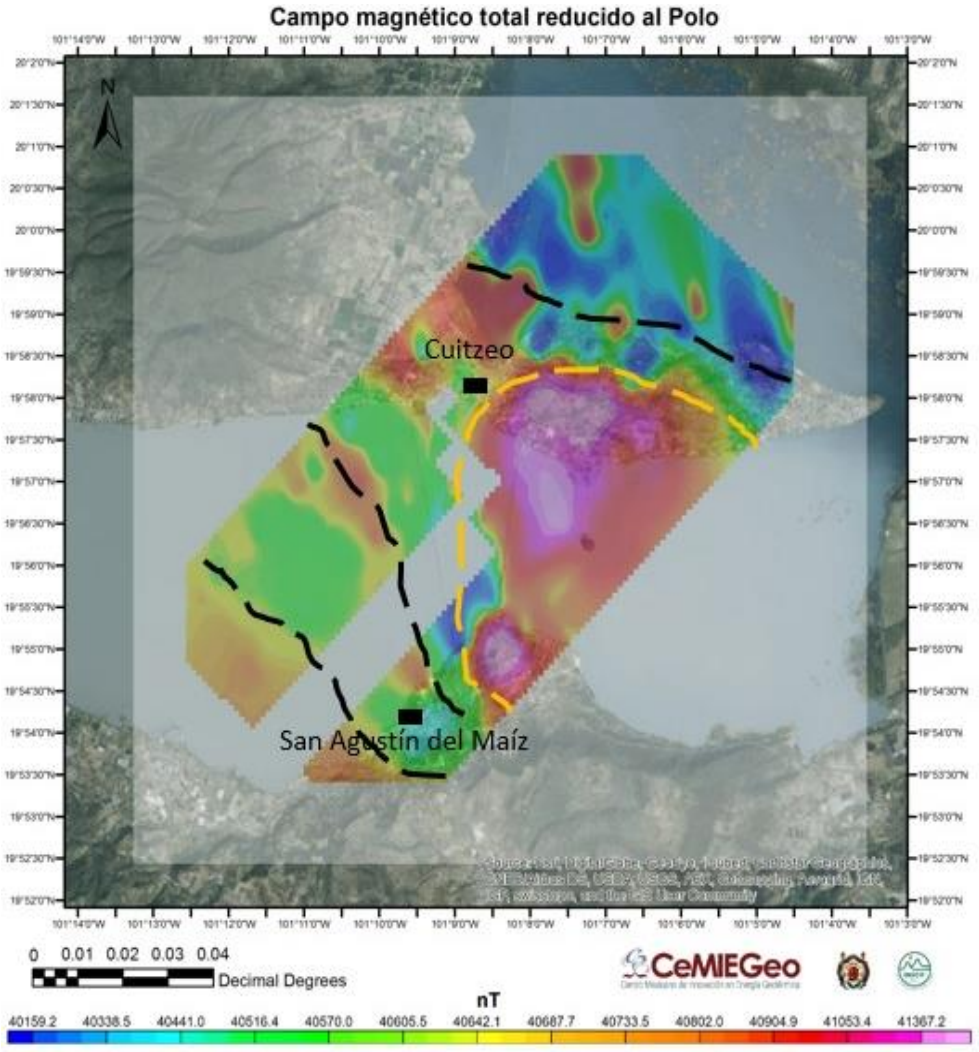

Fig. 8. Mapa de campo magnético total reducido al polo. Se aprecian los principales lineamientos asociados a la presencia de fallas sepultadas bajo el lago, y la posible presencia de un cuerpo subvolcánico emplazado a profundidad (líneas punteadas). Los huecos blancos dentro del mapa indican falta de datos.

Se procesaron los datos de tres de los perfiles para la zona de Araró. Para eliminar las tendencias de picos causados por ruido cultural, que no corresponde a fuentes geológicas, se aplicó un filtro no lineal (NLF, por sus siglas en inglés) (Fig. 9). En estos perfiles se aprecia un mínimo magnético entre los 309000 y 310000 m, limitado por anomalías positivas tanto al NW como el SE de cada perfil, lo que indica la posible presencia de un falla de orientación NNE-SSW por el desfasamiento del perfil 6 hacia el NW.

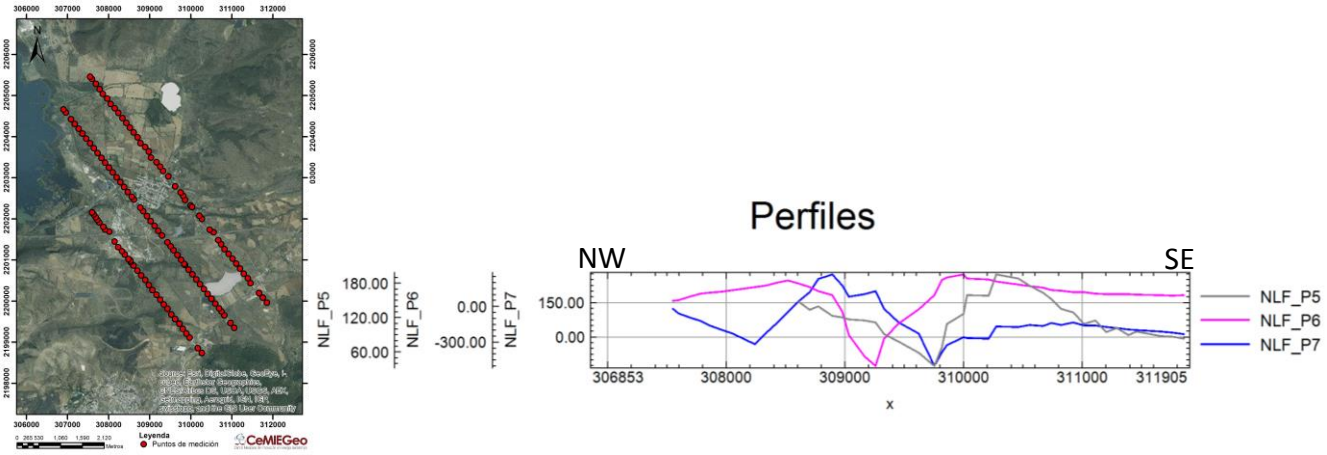

Fig. 9. Perfiles de medición en la zona de Araró, suavizados y despicados. Se aprecian tendencias ascendentes de valores de campo magnético, que tienden a hacerse negativas en ciertos puntos, denotando con ello la presencia de una estructura geológica.

Para obtener el mapa en planta se aplicó una continuación ascendente a 300 m y una reducción al polo (Fig.10). En este mapa se aprecia una anomalía positiva semicircular al SE de la población de Araró que tiene relación directa con el lineamiento magnético positivo evidenciado por Gómez-Cortés et al. (2015). Se puede observar también que las principales manifestación hidrotermales (puntos oscuros) de la zona, se encuentran ubicadas dentro de esta anomalía. Se aprecia un depocentro magnético de forma lineal y orientado NE-SW, que se encuentra limitado al NW y SE del poblado de Araró por anomalías positivas, coincidiendo con la presencia de una posible estructura evidenciada en los perfiles magnéticos anteriores.

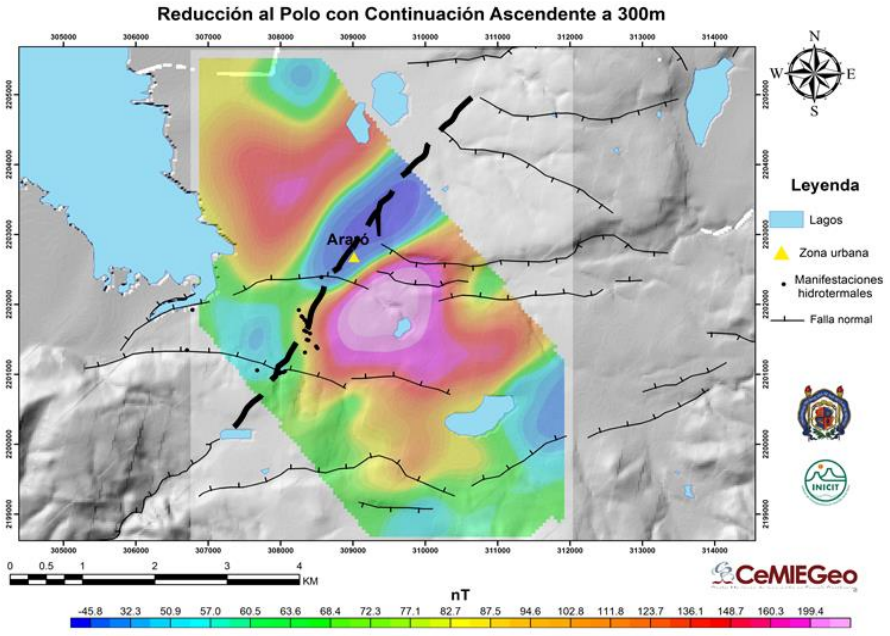

Fig. 10. Mapa de anomalía magnética reducida al polo y continuada ascendentemente a 300 m en la zona de Araró. Se aprecia un depocentro magnético de orientación NNE-SSW limitado al NW y SE por lóbulos positivos, rasgos característicos vinculados a la presencia de una falla (línea puntada).

Para el caso de los registros de microtremores se tomaron ventanas de 1800 s con un traslape del 50%, mediante la cual se estimó la curva de velocidad de fase de ondas de Rayleigh, tal como se muestra en la Figura 11.

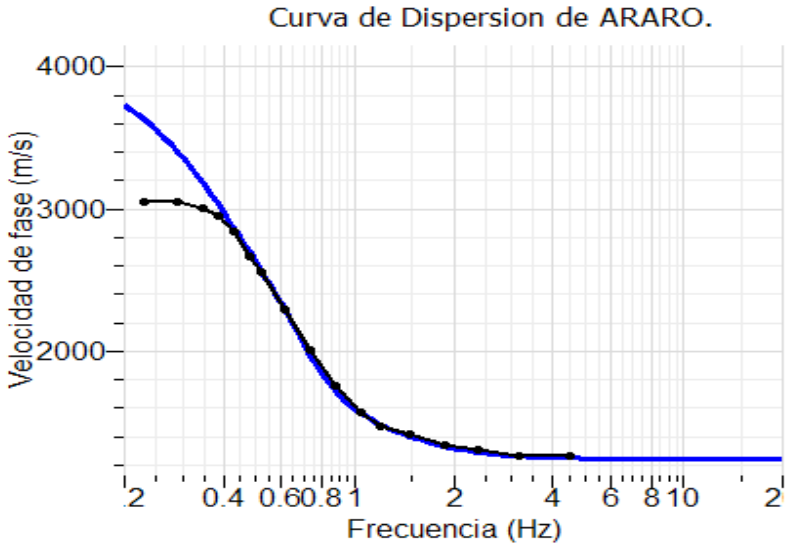

Figura 11. Curva de velocidad de fase para el arreglo de la zona geotérmica de Araró.

En esa Figura 11 con línea negra y puntos se muestra la curva observada, mientras que con línea continua azul se ilustra la curva de dispersión que se ajustó a la observada. Mediante este procedimiento se determinó una profundidad de exploración de alrededor de los 1300 m, lo que se considera la profundidad del basamento. A partir de la curva de la Figura 11, se construyó el perfil de velocidades representativo de toda la zona que se muestra en la Figura 12.

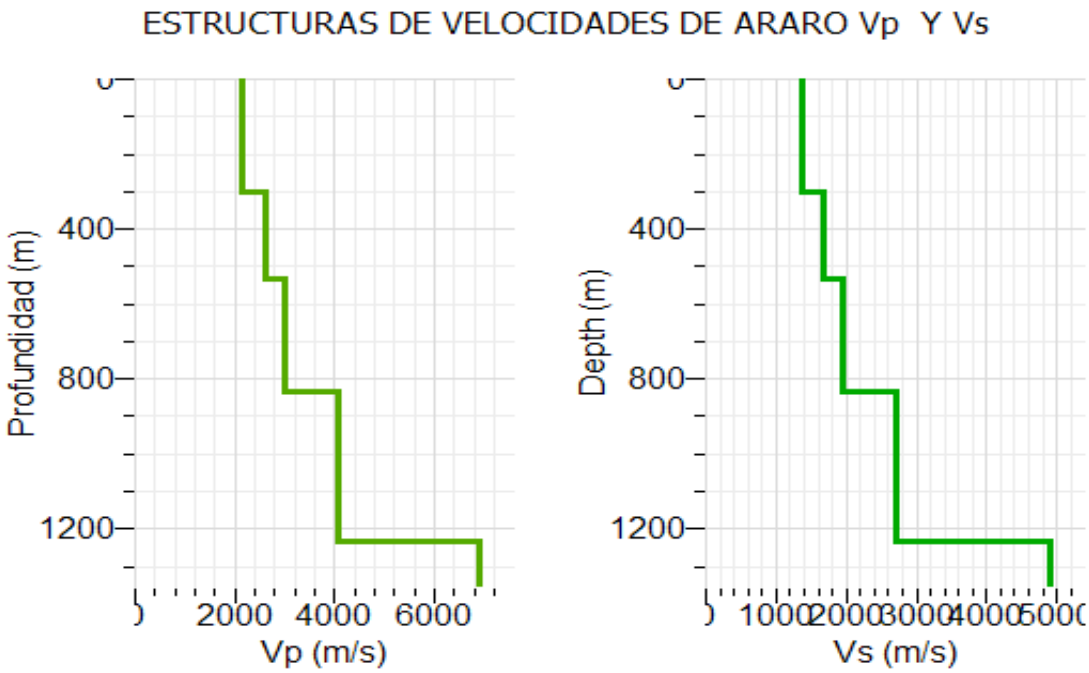

Fig. 12. Perfil de velocidades de Vp y Vs estimado para la zona de Araró.

Conclusiones

Para la zona geotérmica de Araró los resultados preliminares arrojaron la posible presencia de una estructura SSW-NNE y se estimó un modelo de velocidades del basamento con valores que van desde 1300 m/s hasta los 2700 m/s con una profundidad de exploración de alrededor de 1300 m. Para la elaboración del modelo 3D de esta zona sólo hace falta integrar los resultados en un software y anexarle la topografía del área, así como la correlación de las profundidades de los cuerpos fuente de las anomalías observadas con el método magnético.

Para el caso de San Agustín del Maíz, hasta el momento se tiene el mapa de campo total reducido al polo, identificando en este las principales estructuras que pueden estar ligadas directamente a la zona geotérmica. Los datos continúan procesándose e interpretándose.

Para validar los resultados obtenidos con estos métodos geofísicos, es necesario correlacionarlos con datos geológicos de las mismas zonas de estudio, para lo cual sería muy útil contar con datos de pozos y la estratigrafía de ambas zonas.

Agradecimientos

Joaquín Gómez agradece al proyecto estratégico No. 17 del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo), *Estudio de fracturamiento-fallamiento y campo de deformación actual apoyado con sísmica y tomografía de los campos geotérmicos de Cuitzeo, Mich, Rancho Nuevo, Gto, Las Derrumbadas, Puebla, y Volcán Tacaná, Chiapas*, el cual financia el presente trabajo. Los autores agradecen también al M.C. David Ernesto Torres Gaytán (IPICYT) y al M.C. Édgar Agustín Mastache Román (CICESE) por su ayuda durante el procesado de los datos de campo magnético.

Referencias

Alberti-Muttach., 2012. Generación de un mapa de basamento de la cuenca Barinas-Apure de Venezuela a partir de datos gravimétricos y magnéticos de origen satelital. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Inédito.

Arredondo-Fragoso, F., 1983. Levantamiento Gravimétrico en la zona central de la Laguna de Cuitzeo, Mich. Informe 29-83. CFE, Gerencia de proyectos Geotermoeléctricos. Inédito.

Bigurra-Pimentel, E., 1987. Resumen de estudios de Araró, Michoacán. Reporte GF 8/87. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Inédito.

Bigurra-Pimentel, E., 1992. Compilación de estudios en Araró-Zimirao. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Inédito.

Cram, S., et al., 2010. *Atlas de la cuenca del Lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y su entorno Socioambiental*. Primera edición. ISBN: 978-607-02-1830-9, pp. 28-33.

CFE, 1989. Propuesta para la perforación exploratoria en la zona geotérmica de Araró, Mich.” Informe 10/89. CFE, Gerencia de proyectos Geotermoeléctricos. Inédito.

Flores-Estrella et al., 2004. Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtremores con el método SPAC. *Geos*, Vol. 24, No. 3, pp. 438-445.

Garduño-Monroy, V.H., et al., 2007. Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay Fault System, central Mexico. UMSNH-IIM. Morelia, Mich., México.

Gómez-Cortés, 2015. Prospección magnetométrica del campo geotérmico de Araró, Zinapécuro Michoacán. Tesis Licenciatura. CeMIE-Geo/UMSNH/INICIT-ITST.

Gómez-Tuena et al., 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana,* V. LVII, 3, pp. 227-283.

Gómez-Vasconcelos, 2012. Geología y estratigrafía volcánica de la Sierra de Mil Cumbres. Tesis de maestría. UMSNH-INICIT. Morelia, Mich. México. 11 pp.

Geosoft, 2014. Guía para aplicar filtros matemáticos a datos de campo magnético. Montaj MAGMAP Filtering How-To Guide. Geosoft Inc.

Israde-Alcántara et al., 2010. Evolución Paleolimnológica del Lago Cuitzeo, Michoacán durante el Pleistoceno-Holoceno. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen 62, núm. 3, pp. 345-357.

Menella, 2011. Sismotectónica del sector occidental del Sistema Morelia-Acambay, México, a partir del análisis de poblaciones de fallas. Tesis de Maestría, UMSNH.

Pardo-López et al., 2012. Modelamiento geofísico 2d en un área de la vereda los arrayanes, municipio de Facatativá, Cundinamarca, Revista GEOMÁTICA, UD. GEO.

Peifen Xu et al., 2012. Mapping deeply-buried geothermal faults using microtremor array analysis. Geophysical Journal International,188, pp. 115-122.

Vázquez-Rosas et al., 2004. Estudio de vibración ambiental aplicando el método SPAC en diferentes sitios del estado de Colima. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.

Vázquez-Rosas et al., 2015. Monitoreo sísmico dentro del Lago de Cuitzeo, Michoacán, para la obtención de un modelo de velocidades. UMSNH-Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.

Viggiano-Guerra, J.C. y Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 2003. Régimen de flujo hidrotermal en la zona geotérmica de Araró, Michoacán, México. *Ingenieria Hidráulica en México*, Vol. XVIII, 1, pp. 39-53.

Viggiano-Guerra, J.C., and Gutiérrez-Negrín, 2005. The Geothermal System of Araró, Mexico, as an independent system of Los Azufres. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, April, 2005.