

Caracterización geofísica integrada de las aguas termales de la Hostería Balneario El Batán, municipio de Cuitiva, Boyacá, Colombia

Integrated geophysical characterization of the thermal waters of the Hosteria Balneario El Batán, Cuitiva, Boyacá, Colombia

Hernández P., Orlando, & Alexander E. Gretta Carolina,

*Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C. Colombia,
ohernandezp@unal.edu.co, gcalexandere@unal.edu.co*

Hernández P., Orlando, & Alexander E. Gretta Carolina (2011): Caracterización geofísica integrada de las aguas termales de la Hostería Balneario El Batán, municipio de Cuitiva, Boyacá, Colombia. GEOLOGÍA COLOMBIANA, Edición Especial, 36 No. 1, pp 57-72

Manuscrito recibido: 7 de julio 2011; aceptado: 13 de agosto 2011

Resumen

Los termales del Batán están asociados con el sistema termal del stock intrusivo de Paipa - Iza, Departamento de Boyacá. Estos termales están localizados en la vecindad del intrusivo de Iza, de edad Plioceno-Pleistoceno, el cual incluye flujos de lava, rocas piroclásticas riolíticas, areniscas, limolitas, calizas y conglomerados de edades cretácicas a terciarias. Las fumarolas de vapor de El Batán son las principales manifestaciones superficiales en las cuales la temperatura caliente de las emanaciones puede estar asociada con la presencia de cámaras magmáticas y el calor generado por el movimiento plástico de las fallas regionales. Para evaluar el potencial de las fuentes termales en profundidad se ha desarrollado un programa de exploración geofísica de alta resolución para determinar variaciones laterales y verticales de las propiedades físicas de susceptibilidad magnética, resistividad eléctrica, concentración de elementos radioactivos y la velocidad de propagación de ondas acústicas. A partir de los resultados se puede determinar que las fuentes de agua termal causan una disminución de la resistividad eléctrica debido a la presencia de minerales conductivos. También ocasionan un aumento en la velocidad primaria de ondas sísmicas debido a la mayor saturación de los acuíferos locales en la vecindad de la fuente termal. La interpretación de datos magnéticos ha sido limitada por la presencia de rasgos antropógenos metálicos como rejas, líneas de energía eléctrica, vagonetas y herramientas. La espectrografía de rayos gamma muestra anomalías locales negativas de concentración de K y Th. A partir de modelamiento integrado se concluye que las aguas termales están asociadas a un sistema de fractura simple, orientado N35°E y buzando 70°E, con una limitada extensión lateral hacia el norte y continuidad vertical en los primeros 20 m del subsuelo. El sistema es recargado por agua meteórica de los acuíferos locales de niveles de arenisca y los depósitos aluviales cuaternarios del río Tota.

Palabras claves: Aguas termales, Stock de Iza, Exploración Geofísica, El Batán

Abstract

The Thermal waters of El Batan are related to the intrusive stock body of the thermal systems of Paipa and Iza, in the Boyaca Department. These thermal waters are located in vicinity of the intrusive of Iza, of

Pliocene to Pleistocene age, which includes lava flows, pyroclastic riolitic rocks, sandstones, siltstones, limestones and conglomerates of Cretaceous to Tertiary age. The hot springs are the main superficial manifestations of the El Batán thermal field. The warmth of the springs may be associated with the presence of a cooling magma chamber and the heat generated by the plastic movement of regional faults. A high resolution geophysical exploration survey was carried out to determine lateral and vertical variations of physical properties of the subsurface such as magnetic susceptibility, electrical resistivity, concentration of radioactive elements and the propagation velocity of acoustic waves, which allowed the modeling of the hidden geology and structural system of the source of the Batán thermal water. It is concluded that the thermal waters cause a decrease in the electrical resistivity due to the presence of conductive minerals. They also increase the velocity of primary seismic waves due to the higher saturation of local aquifers in vicinity of the thermal springs. The magnetic anomaly data had a limited application due to the presence of anthropogenic metallic materials such as metallic fences, power lines, wagons and tools that generate false anomalies. Gamma rays spectrographic data showed local K and Th concentration anomaly lows and Uranium concentration anomaly highs in the vicinity of the thermal waters. The thermal waters are associated with a single fracture zone oriented N35°E dipping to the east at high angle of 70° with limited lateral extent to the north, a thickness of 4 m and vertical extent of a minimum of 20 m. The system is recharged by meteoric water of the local aquifers of sandstones and Quaternary alluvial deposits of the Tota River.

Keywords: *Thermal waters, Iza stock, Geophysical exploration, El Batán*

INTRODUCCIÓN

Los métodos geofísicos son fundamentales en la exploración de aguas termales ya que permiten obtener de manera indirecta las propiedades físicas de los sistemas geotérmicos. Estos sistemas están conformado por cuatro elementos principales: Una fuente de calor, un reservorio, un fluido que es el transportador del calor y un área de recarga (Manzella 2006). Los métodos geofísicos aplicados en este estudio proveen información acerca de la forma, tamaño y profundidad de las estructuras que constituyen la fuente termal. La presencia de fluidos en las estructuras geológicas puede ser determinado mediante estudios de resistividad eléctrica ya que estos métodos son sensibles a la presencia de fluidos, especialmente si son salinos o salobres, y a las variaciones de temperatura. La resistividad eléctrica también es altamente influenciada por la porosidad y la saturación disminuyendo con el aumento de porosidad y saturación. Las variaciones en temperatura influyen la respuesta magnética de los materiales del subsuelo. A mayor temperatura disminuyen las propiedades magnéticas por pérdida del carácter ferromagnético de los minerales magnéticos. El modelamiento de las estructuras asociadas

a las fuentes termales puede ser obtenido mediante el retardo en velocidad de propagación de ondas primarias (P) y sombras de ondas de cizallamiento (S). Las ondas primarias sufren un retardo en el tiempo mientras que las ondas de cizallamiento disminuyen en amplitud. La velocidad de propagación de ondas sísmicas es afectada por la porosidad y saturación. La velocidad de propagación disminuye con el aumento de porosidad y aumenta con la saturación... El presente artículo describe las labores de exploración geofísica de alta resolución mediante la aplicación de los métodos de magnetometría, resistividad eléctrica, espectrografía de rayos gamma y refracción sísmica recomendados para evaluar fuentes termales en general, con un ejemplo específico realizado en los predios de la Hostería Balneario El Batán, en el municipio de Cuitiva, Departamento de Boyacá. Los modelos obtenidos permiten inferir la geometría y estructuras de la geología del subsuelo asociadas a la presencia de aguas termales y establecen las dimensiones del recurso para proyectar y optimizar su potencial de desarrollo y aprovechamiento (Kearey & Brooks 1991; Lowrie 2007; Reeves 1991; Telford & Geldart, 1990;

Burkhard & Abbas 1997, Ingeominas 1998, 2005, 2006).

MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio está caracterizada por la presencia de una secuencia de rocas sedimentarias de edad Cretácica a Terciaria, con litologías de arenitas, limolitas y arcillolitas, las cuales han sido afectadas por plegamiento y fallamiento (Figura 1). Esta secuencia está parcialmente cubierta por depósitos cuaternarios de los aluviales del Río Tota. Acosta et al. (2003) sugieren que los sistemas termales de Paipa e Iza pertenecen al mismo ambiente geológico, con excepción del depósito salino que afecta los termales de Paipa (Romero & Rincón 1990). Los manantiales termales son las principales manifestaciones superficiales de los sistemas geotérmicos. El calor de las fuentes termales puede estar asociado a la presencia de una cámara magmática en enfriamiento o al calor generado por el movimiento plástico de fallas regionales.

EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

Se diseñaron 8 perfiles de magnetometría, 3 sondeos eléctricos verticales, 6 perfiles de tomografía eléctrica, 5 perfiles de espectrografía de rayos gamma y 3 líneas de refracción sísmica. Los perfiles se orientaron con dirección N68°W, perpendicular a las estructuras geológicas. La extensión de los perfiles varió entre 48 m a 52 m, con distancia de 2 m entre estaciones (Figura 2). Se realizó el registro de las coordenadas Este y Norte de puntos inicial y final de los perfiles de adquisición utilizando equipos portátiles de GPS GARMIN. En el estudio de magnetometría se instaló una estación base mediante un magnetómetro GEM GSM-19 estándar para controlar las variaciones diurnas de campo magnético. Los datos de campo magnético a lo largo de los perfiles de adquisición se registraron mediante un magnetómetro móvil GEM GSM-19. Los datos de espectrografía de rayos gamma se registraron mediante un espectrómetro portátil Exploranium GR-135G. Los datos de resistividad eléctrica fueron medidos con un equipo Syscal Junior Iris Instruments mediante la configuración Schlumberger. Los datos de refracción sísmica se registraron mediante un sismógrafo Stratavisor Geometrics de 24 canales. En el procesamiento de datos se han resaltado aquellas anomalías geofísicas relacionadas con la presencia de las fuentes termales y la distribución de los materiales del subsuelo en los primeros 50 m de profundidad.

La exploración magnética se basó en la medición de las variaciones del campo magnético tendientes a ubicar contrastes de susceptibilidad magnética en el subsuelo que puedan estar asociados a la presencia de zonas de fractura con mayor concentración de minerales ferruginosos y gradientes térmicos anómalos positivos. Se realizó una adquisición magnética mediante 7 perfiles con intervalo entre estaciones de 2 m y extensión de 50 m cada uno. Adicionalmente, se realizó un perfil magnético a lo largo del carretable entre el parqueadero principal y el lindero sobre la vía hacia Iza. Se midieron 210 estaciones magnéticas. Se elaboraron mapas de intensidad magnética total y anomalía de campo magnético total (sFiguras 3a y 3b). Estos mapas presentan una gran distorsión asociada a la presencia de elementos metálicos como ductos, rejillas metálicas y alambres, partes de vehículos, postes y líneas de energía, vagonetas y herramientas metálicas, entre otros, que generan anomalías de varios cientos de nanoTeslas. Aunque se han aplicado filtros para remover valores extremos, el efecto antropógeno de las anomalías sigue enmascarando las posibles anomalías asociadas a las fuentes termales.

En el método de resistividad eléctrica se utilizó la combinación de los arreglos Wenner-Schlumberger. Para el estudio se utilizó una distancia constante de electrodos de potencial de $MN/2 = 1$ m, mientras que las distancias de $AB/2$ de electrodos de corriente fueron de 3 m (n1), 5 m (n2), 7 m (n3), 9 m (n4), 11 m (n5) y 13 m (n6). Con este diseño se obtuvo la variación de resistividad eléctrica en pseudo secciones de los primeros 12 m de profundidad permitiendo cuantificar variaciones laterales de resistividad eléctrica. Para la adquisición de datos de resistividad eléctrica se realizaron seis perfiles de tomografía eléctrica con extensión de 50 m cada uno (Figuras 4a, 4b, 5a, 5b, 6a y 6b). El cálculo de resistividad aparente para cada sitio de medida se obtuvo mediante el programa *IPI2WIN*. Con los datos procesados se elaboraron tres secciones de resistividad aparente de los primeros 12 m de profundidad. La tomografía eléctrica 1 (Figura 4a) realizada en el sector de piscinas principales, muestra claramente un contraste lateral de resistividad, en donde se aprecia una zona de baja resistividad en su parte central, con valores entre 33,0 a 3,3 ohm-m en los primeros 12 m de profundidad, con inclinación hacia el Este, la cual coincide en su parte superior con la ubicación con el pozo de fuente termal 3. Por lo tanto esta anomalía es interpretada como el efecto de la zona de fractura y saturación de aguas termales de esta sección.

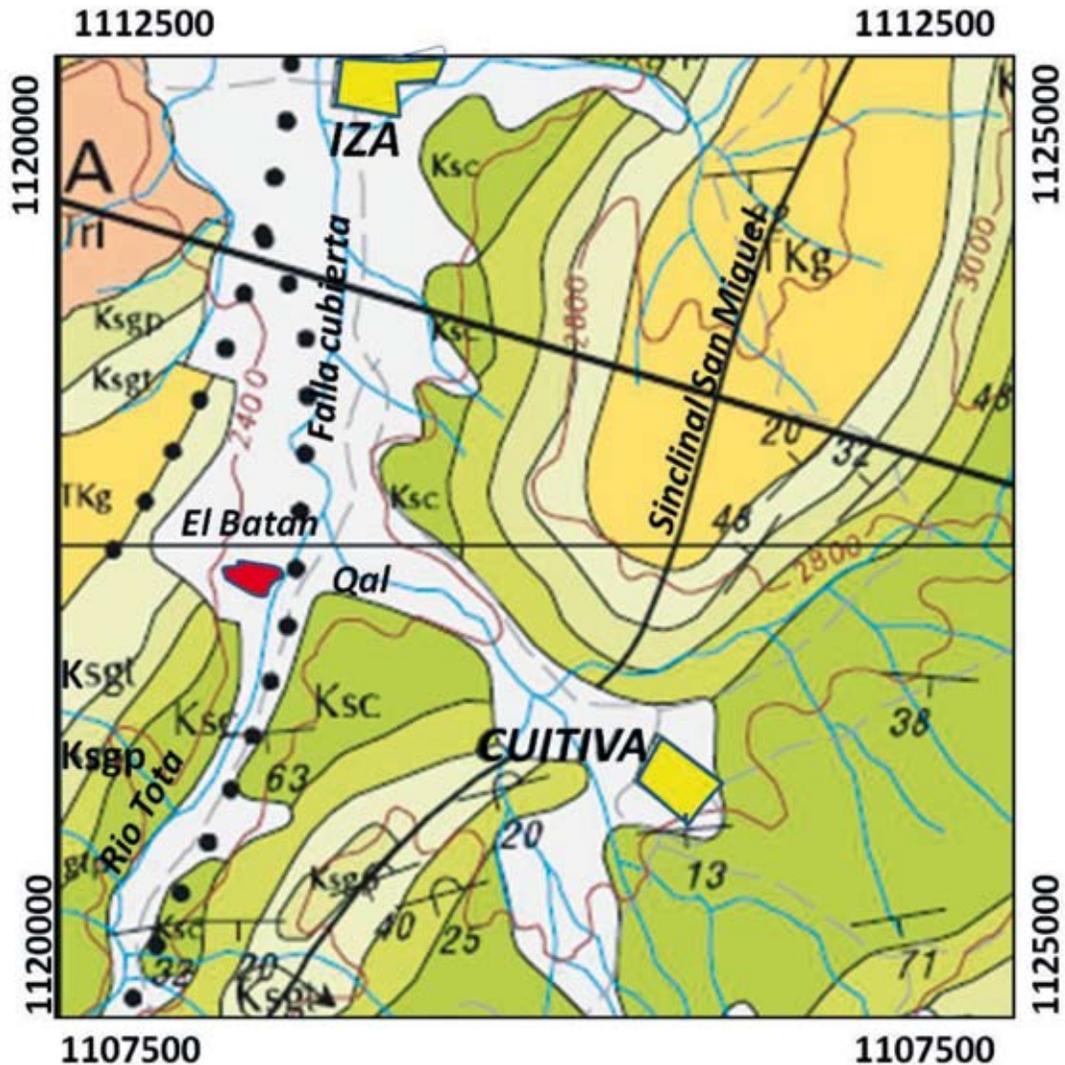


Figura 1. Mapa geológico de la región de Iza y Cúitiva, Boyacá, en donde aflora una secuencia de rocas sedimentarias cretácicas y neógenas, la cual ha sido afectada por plegamiento, fallamiento e intrusiones volcánicas neógenas (Modificado de Ingeominas, 1998). Ksc = Formación Conejo; Ksgtp = Formaciones Dura y Plaeners; Ksgp = Formación Los Pinos; Ksgt = Formación Arenisca Tierna; TKg = Formación Guaduas; Tri = Riolitas de Iza; Qal = Cuaternario aluvial del Río Tota.

En las partes derecha e izquierda predominan materiales de mayor resistividad, con valores entre 40 ohm-m y 60 ohm-m, asociados a material arenítico. También se destaca la zona de alta resistividad de la parte superior derecha asociada al material de relleno utilizado para nivelar esta zona en dirección hacia el Río Tota. La zona de influencia de las fuentes termales es menor a 4 m en sentido horizontal y continua por lo menos 12,5 m de profundidad. No se evidencia la presencia de fracturas satélites ni posibles fuentes termales adicionales. La tomografía eléctrica 2 (Figura 4b), realizada en el

parqueadero del balneario, muestra una secuencia de materiales arcillosos, limosos y arenoso, con valores de 20 ohm-m, 30 ohm-m y 40 ohm-m, respectivamente, en los primeros 12 m de profundidad, sin variaciones horizontales considerables. También se aprecia un material de relleno pequeño hacia el sector izquierdo. No se evidencian zonas de baja resistividad que puedan ser asociadas a fracturas o fuentes termales asociadas. Por lo tanto, este sector no es promisorio para la exploración de fuentes termales adicionales. Sin embargo, con base en los valores de resistividad, está área se constituye como

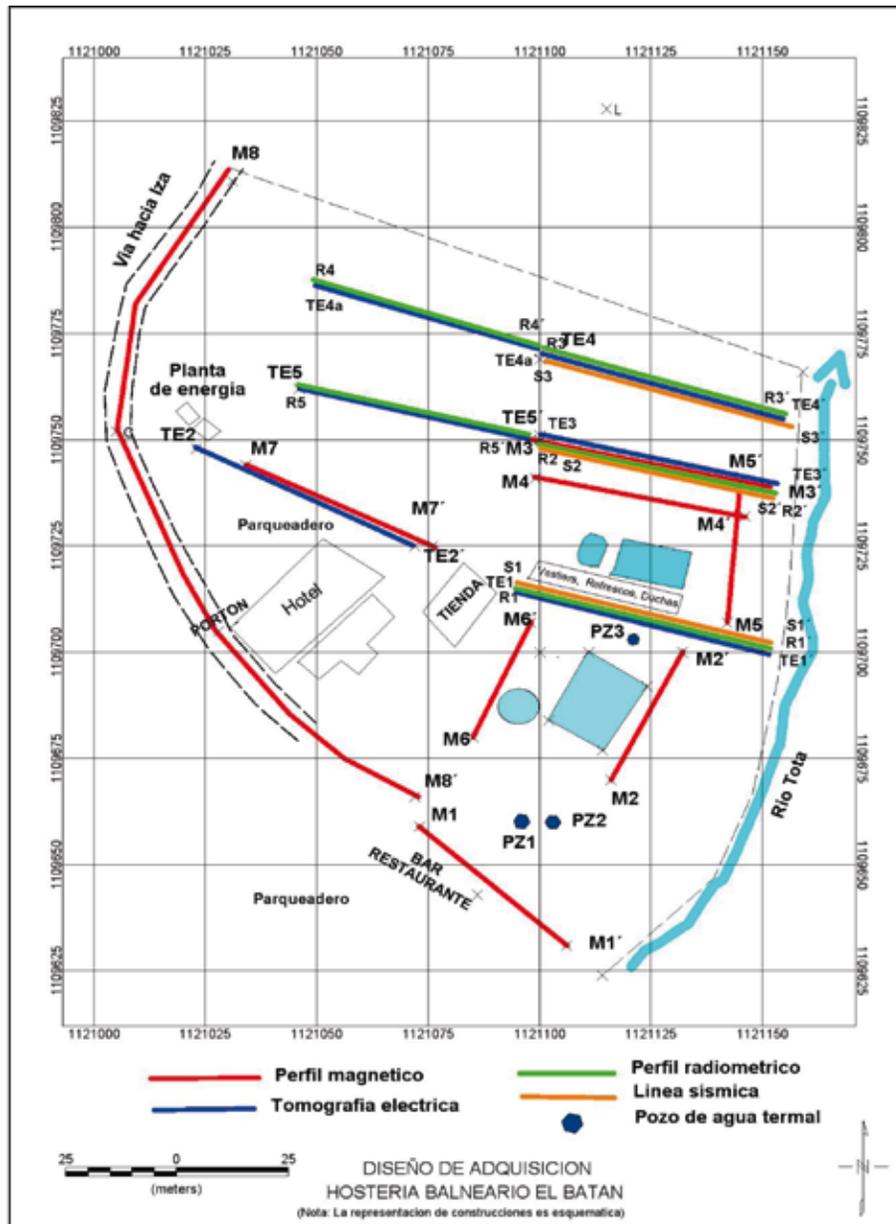


Figura 2. Mapa de localización del programa integrado de adquisición geofísica incluyendo los perfiles de magnetometría (rojo), radiometría (verde), tomografía eléctrica (azul) y refracción sísmica (naranja).

zona de recarga de los acuíferos superficiales asociados a los niveles areníticos. La tomografía eléctrica 3 (Figura 5a) realizada en el sector de piscinas secundarias, paralela al muro de adobe, muestra claramente un contraste lateral de resistividad, en donde se aprecia una zona de relativa baja resistividad en su parte inferior derecha, con valores entre 47,0 ohm a 56,0 ohm-m entre los 5 m a 12 m de profundidad, con inclinación vertical,

la cual es interpretada como la continuidad hacia el Noreste de la zona de fractura detectada en la tomografía 1. También se destaca la zona de alta resistividad de la parte superior derecha asociada al material de relleno utilizado para nivelar esta zona en dirección hacia el Río Tota. En la parte izquierda predominan los materiales limosos y areníticos de menor resistividad. Sin embargo, no hay una zona de resistividad eléctrica baja que

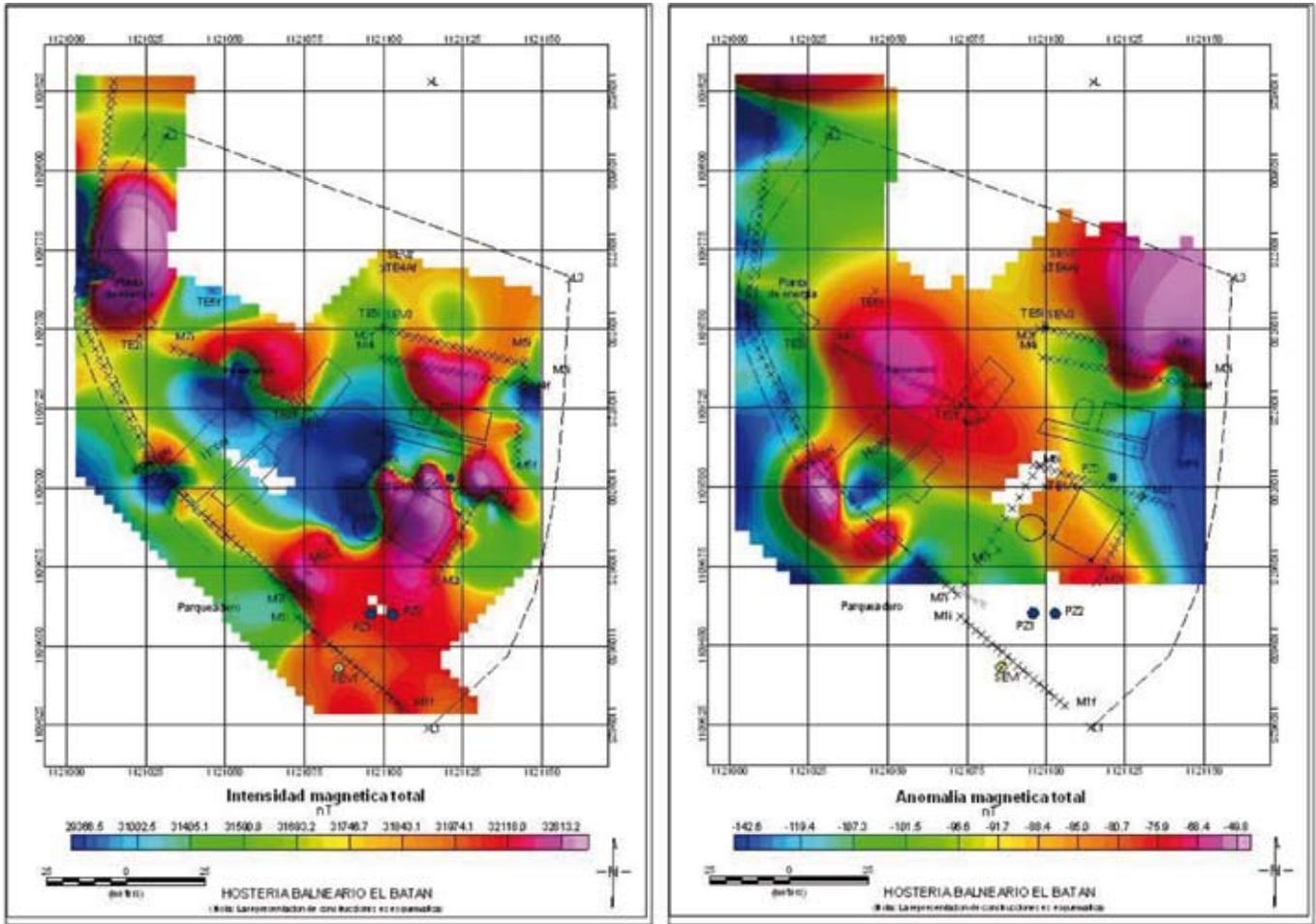


Figura 3. a) Mapa de intensidad magnética total, en nT. b) Mapa de anomalía de campo magnético total, en nT.

pueda inferir la presencia de aguas termales, lo que estaría limitando la potencialidad de este recurso hacia el norte y este. La tomografía eléctrica 4 (Figura 5 b) realizada en el potrero del sector norte-este, muestra una secuencia de materiales arcillosos, limosos y areníticos, con valores de 24 ohm-m, 40 ohm-m y 60-70 ohm-m, respectivamente, en los primeros 12 m de profundidad sin variaciones horizontales considerables. También se aprecia un material de relleno pequeño hacia el sector derecho. No se evidencian zonas de baja resistividad que puedan ser asociadas a fracturas o fuentes termales. Por lo tanto, este sector no es promisorio para la exploración de fuentes termales adicionales, confirmando la limitada extensión de la fuente termal en dirección norte. La tomografía eléctrica 4B (Figura 6a) realizada en el potrero del sector norte-oeste, muestra una secuencia de materiales arcillosos, limosos y areníticos, con valores

de 36 ohm-m, 48 ohm-m y 60 ohm-m, respectivamente, en los primeros 12 m de profundidad, sin variaciones horizontales considerables. No se evidencian zonas de baja resistividad que puedan ser asociadas a fracturas o fuentes termales. Por lo tanto, este sector no es promisorio para la exploración de fuentes termales adicionales, confirmando la limitada extensión de la fuente termal en dirección Noroeste. La tomografía eléctrica 5 (Figura 6b) realizada entre el parqueadero del balneario y los potreros del sector norte, muestra una secuencia de materiales arcillosos, limosos y areníticos, con valores de 28 ohm-m, 42 ohm-m y 50-60 ohm-m, respectivamente, en los primeros 12 m de profundidad, sin variaciones horizontales considerables. También se aprecia un material de relleno pequeño hacia el sector derecho. No se evidencian zonas de baja resistividad que puedan ser asociadas a fracturas o fuentes termales. Por

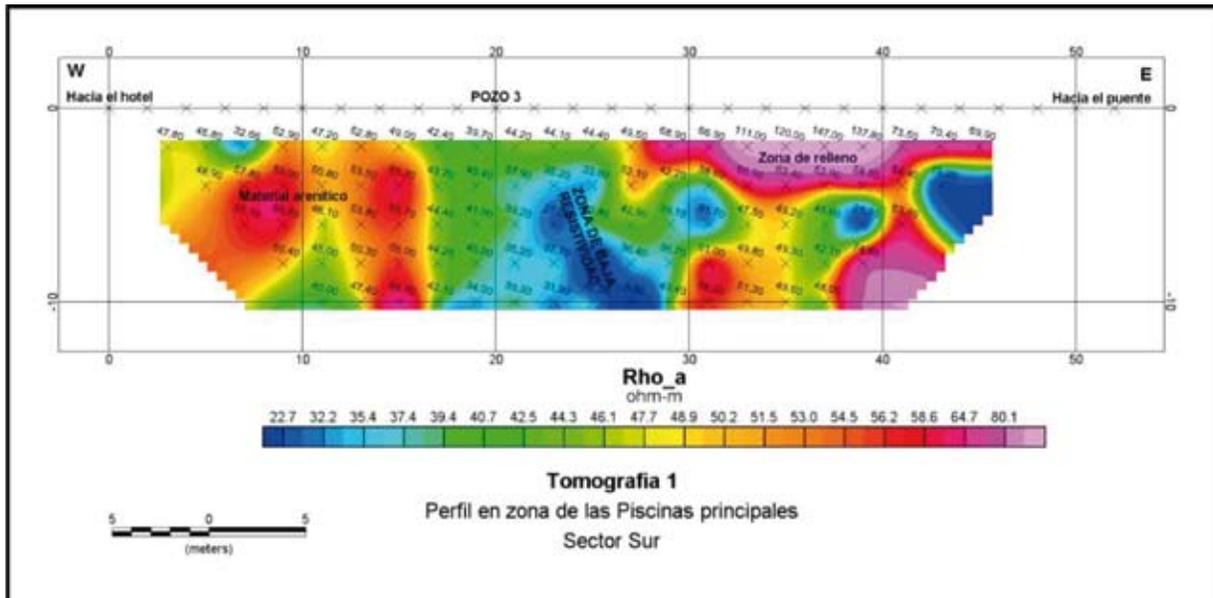


Figura 4. a). Pseudosección de resistividad de las tomografía 1 en donde se aprecia una zona de baja resistividad asociada a la presencia de una fractura, con inclinación al este, por la cual emana el agua termal del pozo 3.

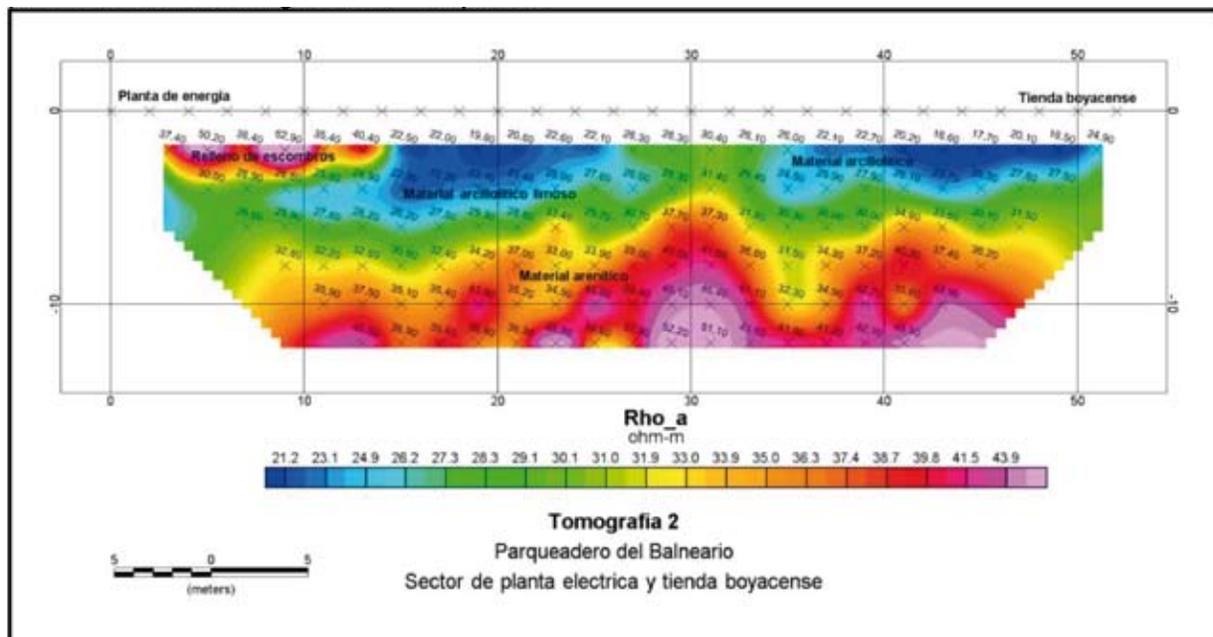


Figura 4. b). Pseudosección de resistividad de la tomografía 2 en donde predominan materiales arcillosos en los primeros 5 m de la parte superior y materiales areníticos en las partes media e inferior, hasta los 12 m.

lo tanto, este sector no es promisorio para la exploración de fuentes termales adicionales, confirmando la limitada extensión de la fuente termal hacia el oeste.

El programa de adquisición de datos radiométricos se llevó a cabo a través de cinco perfiles orientados N60°W perpendicularmente a las estructuras geológicas locales. Se realizaron mediciones en perfiles de 50 m de longitud, con espaciamiento entre estaciones de 2 m. Se realizó un total de 250 m de longitud de espectrometría de rayos gamma obteniendo medidas de radiación de Conteo Total (en cuentas por minuto, cpm), potasio (en porcentaje, %), uranio (en partes por millón, ppm), y torio (en ppm; IAEA-TECDOC 2003)). A cada una de las estaciones de medida le fueron asignadas coordenadas Este y Norte y los valores de Conteo total, K, U y Th. Se elaboró una base de datos para cada uno de los sectores y se utilizaron las aplicaciones de generación de mapas temáticos del programa *Geosoft Oasis Montaje*, elaborando mapas de concentración de radiactividad total (Figura 7a), potasio (Figura 7b), uranio (Figura 8a) y torio (Figura 8b). También se elaboró un mapa de perfiles de concentración de elementos (Figura 9a) y un mapa de la relación de la suma de concentración de potasio y torio sobre la concentración de uranio para resaltar las anomalías ($(K+Th)/U$; Figura 9b). El análisis ha sido enfocado hacia la respuesta obtenida en vecindades del pozo termal 3, en el perfil radiométrico 1, en donde también se identificaron las anomalías de resistividad eléctrica más importantes. En este sector se presenta un bajo en la concentración total de elementos de cerca de 7 ppm, limitada por dos altos con valores mayores a 10 ppm. El mapa de concentración de potasio muestra una zona anómala positiva, con valores cercanos a 1,3% y una zona baja con valores cercanos a 0,0% en vecindades de la fuente termal. El contenido de potasio reportado en los análisis químicos de las aguas termales (15 mg/L) no influye en las medidas obtenidas, debido a su baja concentración (0,015%). El mapa de concentración de uranio muestra una zona anómala positiva, con valores superiores a 5 ppm en vecindades de la fuente termal limitada por dos zonas bajas con valores de concentración cercanos a 0,0%. El mapa de concentración de torio muestra una zona anómala baja en vecindades de la fuente termal, con valores cercanos a 0,1 ppm limitada por zonas anómalas positivas, con valores superiores a 5 ppm. El mapa de perfiles de concentración total, K, U y Th muestra que el comportamiento presentado en vecindades de la fuente termal también se presenta en otros sectores del área de estudio, los cuales no han mostrado ninguna anomalía de interés en los otros métodos geofísicos

aplicados. Este hecho limita la aplicación de la radiometría en el análisis. El mapa de la relación en concentración de la suma de potasio y torio, dividida por la concentración de uranio resalta las anomalías bajas asociadas a la fuente termal y sugiere su continuidad en dirección noreste, entre las secciones 1 y 3 y limita este comportamiento en la sección 4, lo que confirma la limitada extensión lateral de la fuente termal hacia el Noreste.

El diseño de refracción sísmica se realizó para modelar los primeros 20 m del subsuelo mediante tres líneas sísmicas de 48 m de longitud, con un arreglo de 24 canales, con separación de 2 m, orientadas perpendicularmente a las estructuras geológicas locales. Se utilizó un sismógrafo Geometrics “Strata Visor NZ” configurada para 24 canales. El procesamiento de datos incluyó la selección de las primeras llegadas de los registros, la construcción de las curvas camino-tiempo y el cálculo de velocidades. *SeisImager* es el paquete de computación generado por Geometrics, casa que elaboró los equipos de adquisición empleado para este proyecto. Está conformado por cuatro módulos que sirven para analizar datos de refracción. Estos módulos se llaman Pickwin, Plotrefa, WaveEq y Geoplot y son los módulos que conforman el programa *SeisImager/2D*. Para el desarrollo de este trabajo se usó el módulo *Plotrefa*. Los datos almacenados en formato *.sgy se procesaron inicialmente para picado de primeros arribos con el software *SIPQC*, el cual genera archivos *.bpk. Una vez realizada la selección de primeras llegadas, el módulo *Plotrefa*, lleva a cabo la inversión sísmica de los datos y de esta manera generar el modelo de capas. A partir del procesamiento implementado se obtuvo un modelo de velocidad versus profundidad para cada una de las tres líneas de refracción sísmica realizadas (figuras 10a, 10b y 10c). Los modelos de velocidad de propagación de ondas acústicas han permitido modelar la interfase entre material inconsolidado, zona de alteración y consolidado y detectar la presencia de la zona de fractura con saturación de aguas termales. El modelo de velocidad de la línea 1 (Figura 10a) muestra la presencia de una discontinuidad lateral en la propagación de ondas con velocidades mayores a 1.800 m/s asociadas a rocas areníticas, en las cuales aumenta la saturación de fluidos en vecindades de la fuente termal aumenta la velocidad de propagación, con respecto a materiales de menor saturación, de tipo arenítico y arcillolítico, con velocidades de 1.200 m/s a 1.600 m/s. Hacia la parte superior predominan zonas de velocidad entre 300 m/s a 800 m/s asociadas a zonas de meteorización y material de relleno. Este modelo es consistente con la estructura

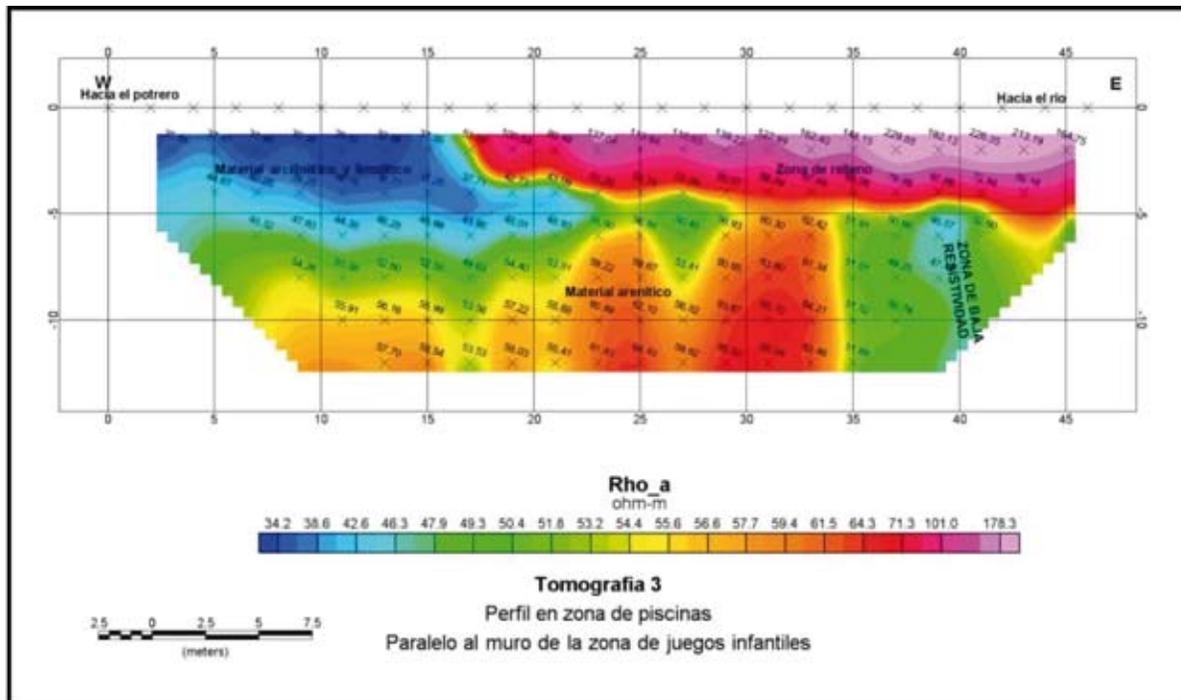


Figura 5. a). Pseudosección de resistividad de la tomografía 3 en donde se presenta una zona de baja resistividad en la parte inferior derecha asociada a una fuente termal. También se modela el material de relleno, a la derecha, y los materiales areníticos y arcillolíticos, a la izquierda.

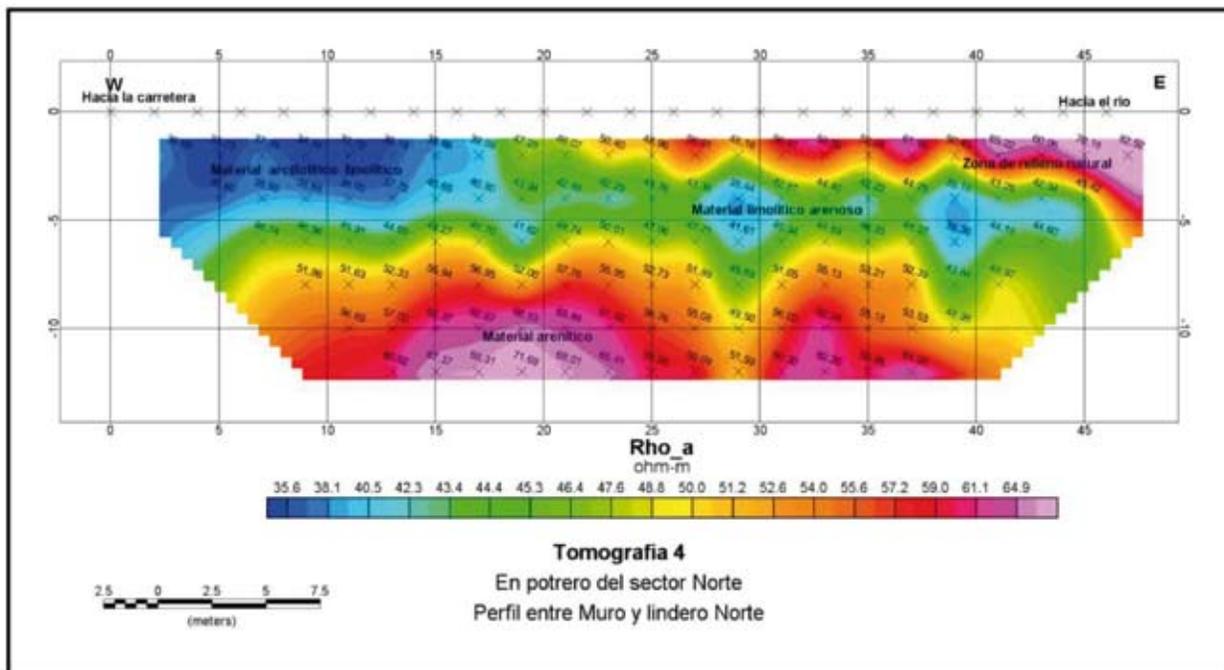


Figura 5. b) Pseudosección de resistividad de la tomografía 4 en donde se presentan materiales de relleno, arcilloso y limoso, limoso arenoso y arenítico.

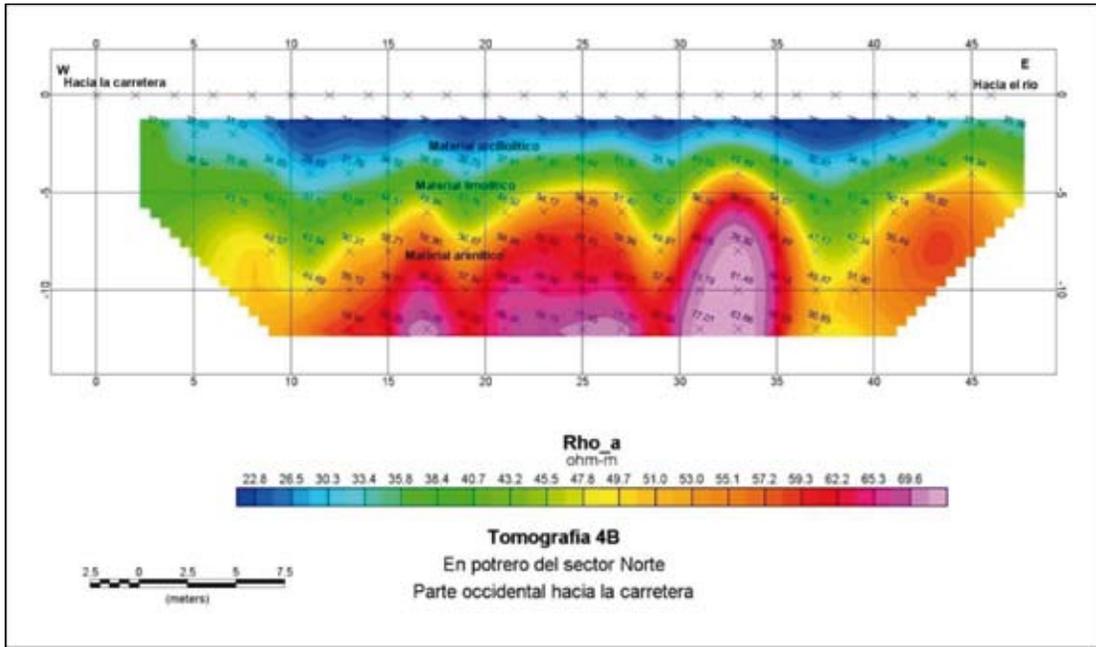


Figura 6. a) Pseudosección de resistividad de la tomografía 4B en donde se presentan materiales arcillosos, limosos y arenítico. No se detectan zonas de baja resistividad asociadas a fuentes termales lo que limita la continuidad lateral de las fuentes termales hacia el oeste.

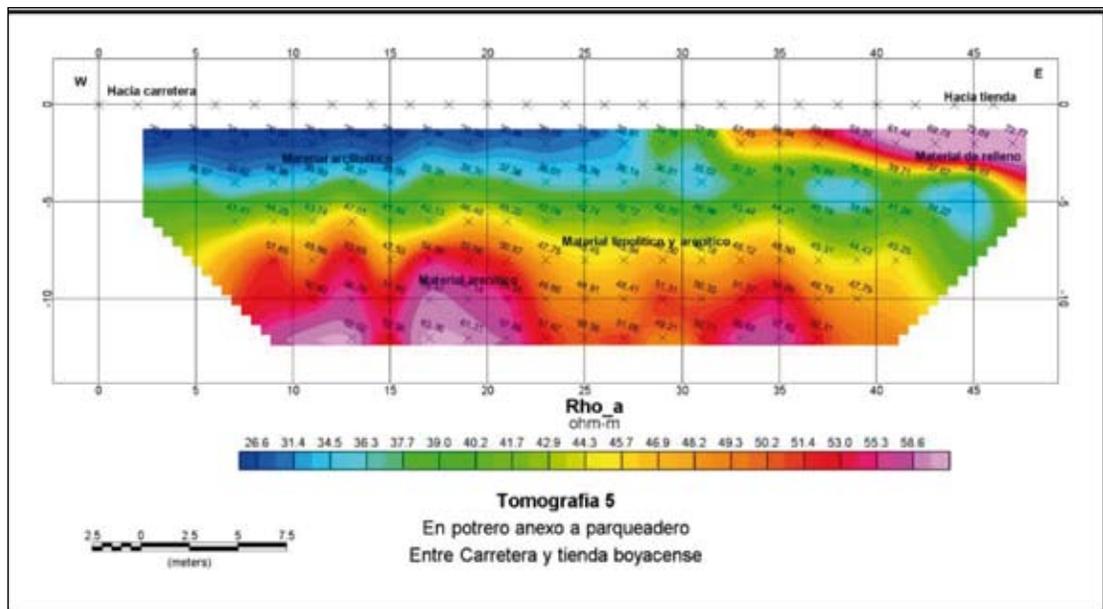


Figura 6. b) Pseudosección de resistividad de la tomografía 5 en donde se presentan materiales arcillosos, limosos, areníticos y de relleno.

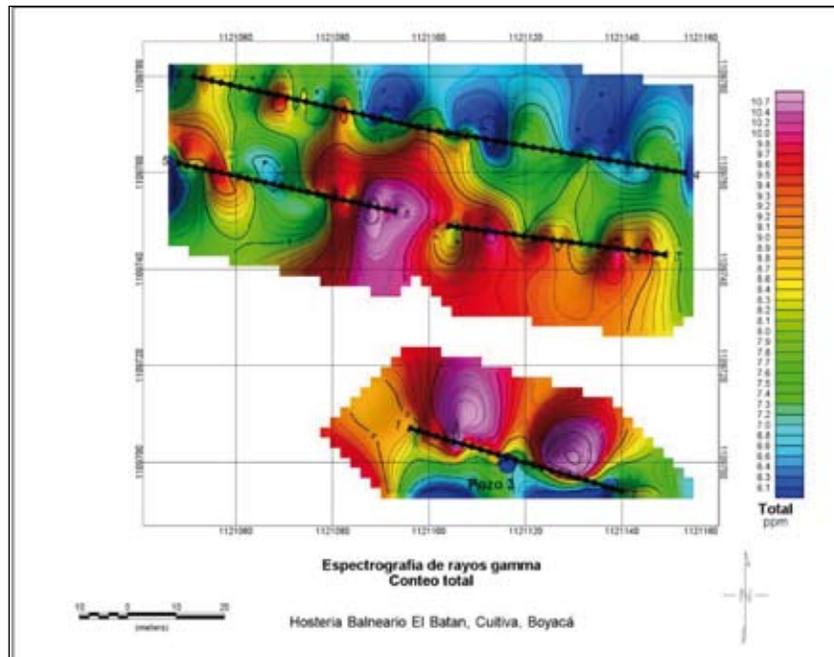


Figura 7. a) Concentración de conteo total en ppm

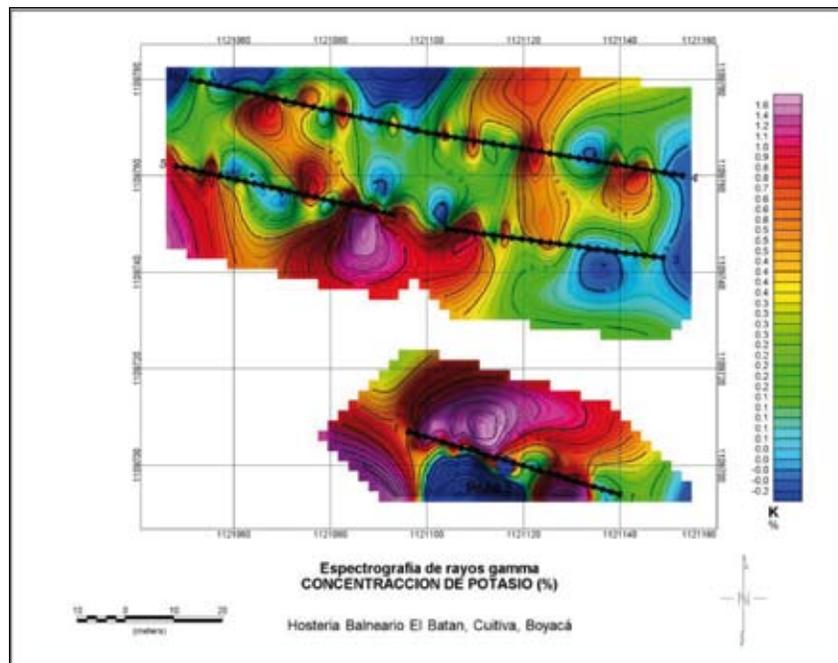


Figura 7. b) Concentración de potasio, en porcentaje (%).

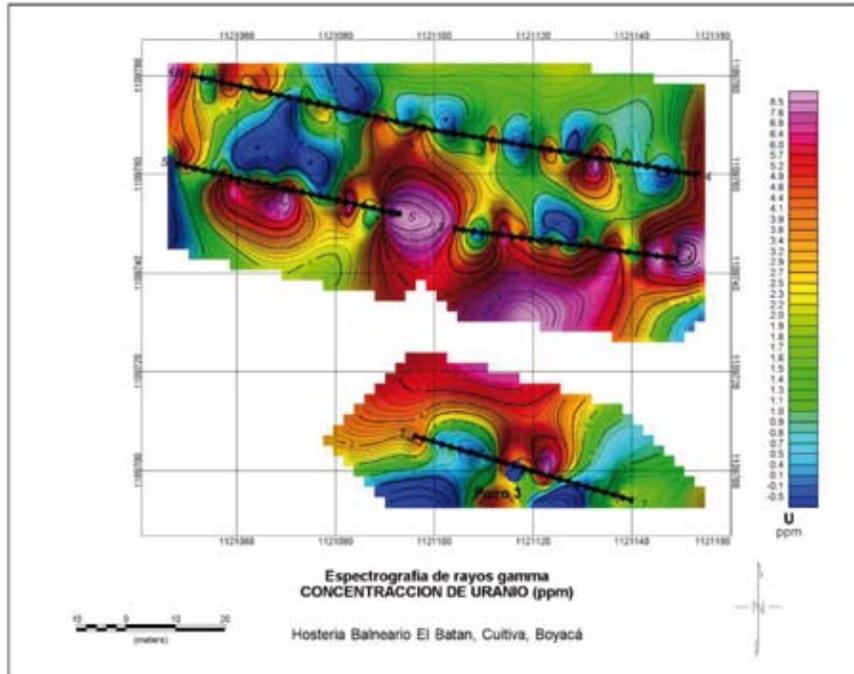


Figura 8. a) Concentración de uranio, en ppm

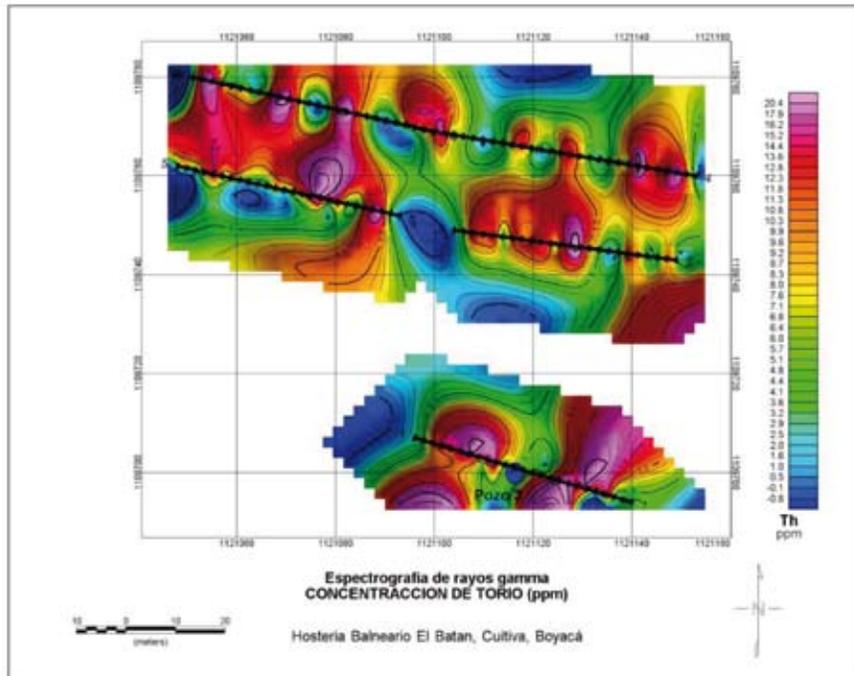


Figura 8. b) Concentración de torio, en ppm

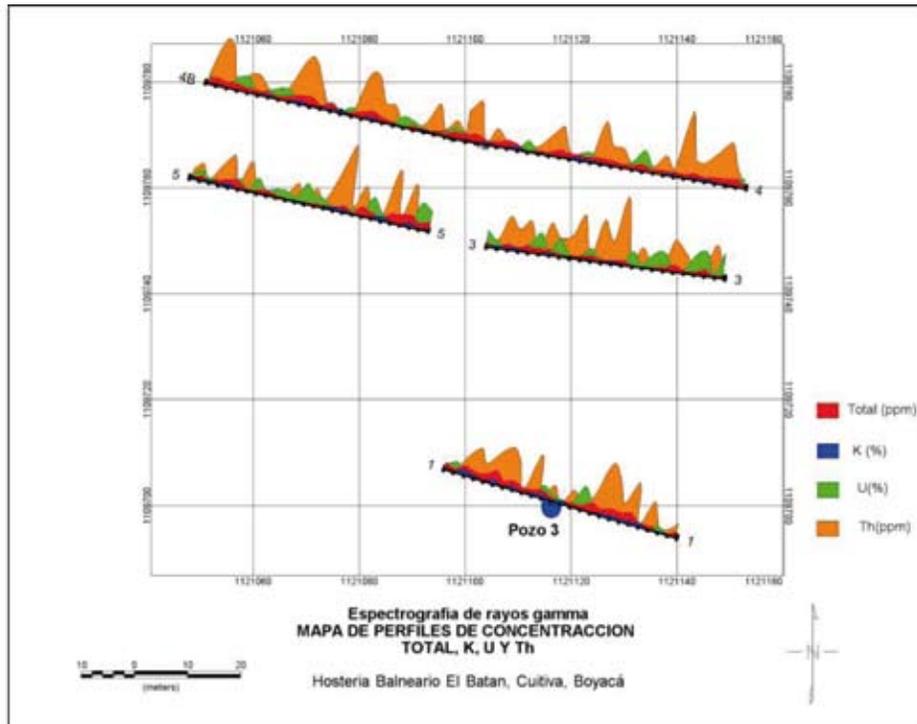


Figura 9. a) Mapa de perfiles con la concentración total, K, U y Th.

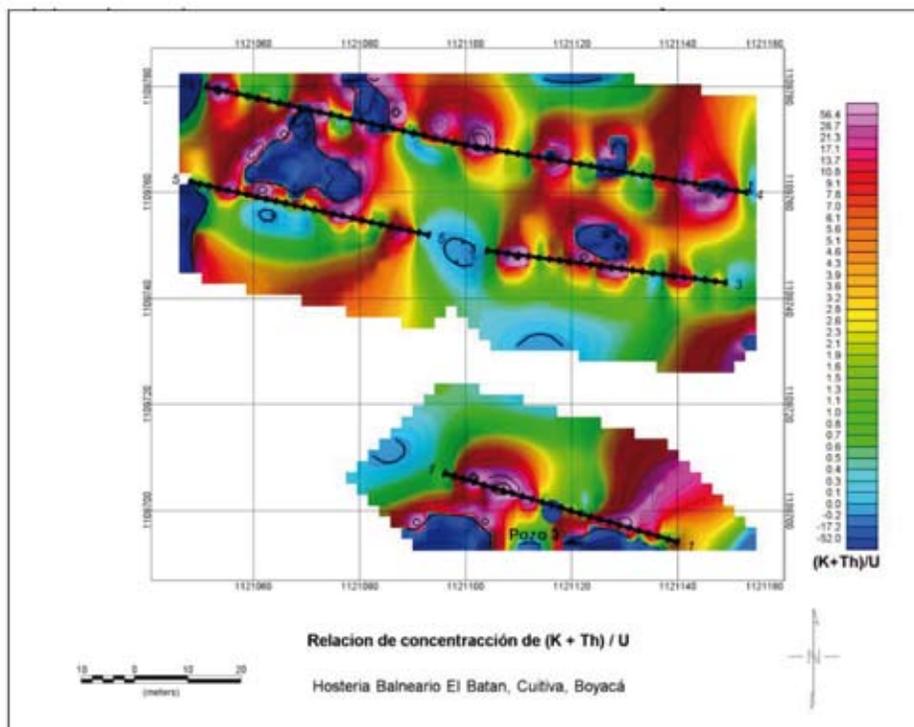


Figura 9. b) Mapa de la relación de concentración de (K + Th)/U

detectada en la tomografía eléctrica de este mismo perfil. El modelo también corrobora que no existen fracturas satélites a través de las cuales puedan emanar fuentes termales adicionales. El modelo de velocidad de la línea 2 (Figura 10b) muestra la interfase entre rocas consolidadas y material inconsolidado, en donde se aprecia una profundización de la zona de meteorización y relleno hacia el Este. Los materiales con velocidades superiores a 1.800 m/s se asocian a rocas areníticas. Materiales con velocidades entre 800 a 1.800 m/s se asocian a secuencias limo arcillolíticos y materiales con velocidades entre 300 m/s a 800 m/s se asocian a la zona de meteorización de rocas y material de relleno. En esta sección no se aprecian discontinuidades laterales asociadas a fracturas por lo que confirma la poca continuidad del sistema de fractura y presencia de aguas termales hacia el norte del pozo termal 3. El modelo de velocidad de la línea 3 (Figura 10c) muestra la interfase entre rocas consolidadas y material inconsolidado, en donde se aprecia la irregularidad de la interfase entre el material inconsolidado y consolidado. Los materiales con velocidades superiores a 1.800 m/s se asocian a rocas areníticas, las cuales están más cerca a la superficie. Materiales con velocidades entre 800 m/s a 1.800 m/s se asocian a secuencias limo arcillolíticos y materiales con velocidades entre 300 m/s a 800 m/s se asocian a la zona de meteorización de rocas y material de relleno. En esta sección no se aprecian discontinuidades laterales asociadas a fracturas por lo que confirma la poca continuidad del sistema de fractura y presencia de aguas termales hacia el norte del pozo termal 3.

CONCLUSIONES

El estudio integrado de exploración geofísica permitió modelar contrastes significativos de resistividad eléctrica y velocidad de propagación de ondas sísmicas asociadas a la presencia de una zona de fractura a partir de la cual emana la fuente de agua termal. Se presenta una disminución en la resistividad eléctrica en vecindades a las aguas termales las cuales contienen minerales conductivos. También se presenta un aumento en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas P debido a la mayor saturación de agua de los niveles areníticos en vecindades de las fuentes termales. Los datos de magnetometría tuvieron una limitada aplicación debido a la presencia de materiales metálicos culturales. Los datos de espectrografía de rayos gamma presentan

altos en la concentración de potasio y uranio y bajos de concentración de conteo total y torio asociados a la fuente termal. Mediante la integración de modelos de resistividad eléctrica y refracción sísmica se determinó que la continuidad de la fractura local asociada a la fuente termal es muy limitada. Esta zona de fractura se ubica bajo el pozo termal 3, en la zona de piscinas principales, con una inclinación de 70° hacia el Este, una zona de influencia de 4 m de espesor y una continuidad vertical mínima de 20 m a partir de la superficie. Esta fractura está alineada con los pozos termales 1 y 2 y con formas del relieve alineadas con dirección N35°E asociadas a dos niveles de terrazas de los depósitos aluviales del Río Tota, en los potreros ubicados inmediatamente al sur de la hostería balneario. La respuesta eléctrica y sísmica también permitió modelar la presencia de material de relleno, arcillas arenosas, limos, arenas, arenitas arcillosas y arenitas limolíticas, los cuales tienen un carácter predominante permeable y semipermeable, lo que permite la infiltración de agua meteórica y contribuye a la recarga de las fuentes de aguas termales. El espesor del material inconsolidado asociado a los depósitos aluviales del Río Tota y depósitos de coluvión de las montañas circundantes varía entre 3 m, al oeste y 6 m al este, en dirección hacia el cauce del río. La zona de meteorización puede alcanzar niveles más profundos, con espesores cercanos a 10 m. Por debajo de los depósitos cuaternarios se infiere la presencia de roca fresca de tipo arenítico. Por lo tanto, la totalidad del depósito aluvial contribuye a la recarga de agua meteórica en el sistema de aguas termales. Las dimensiones de las zonas verdes del predio limitan la realización de un modelamiento a una profundidad mayor de 20 m, en los cuales se ha modelado la geología local.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados de esta investigación han sido producidos con el soporte de la Hostería Balneario El Batán, la compañía Tecnología, Equipos y Procesos, TEP Ltda. y el Grupo de Geofísica del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia. Agradecemos a dos revisores anónimos y a los editores y correctores quienes han contribuido a mejorar el manuscrito sustancialmente.

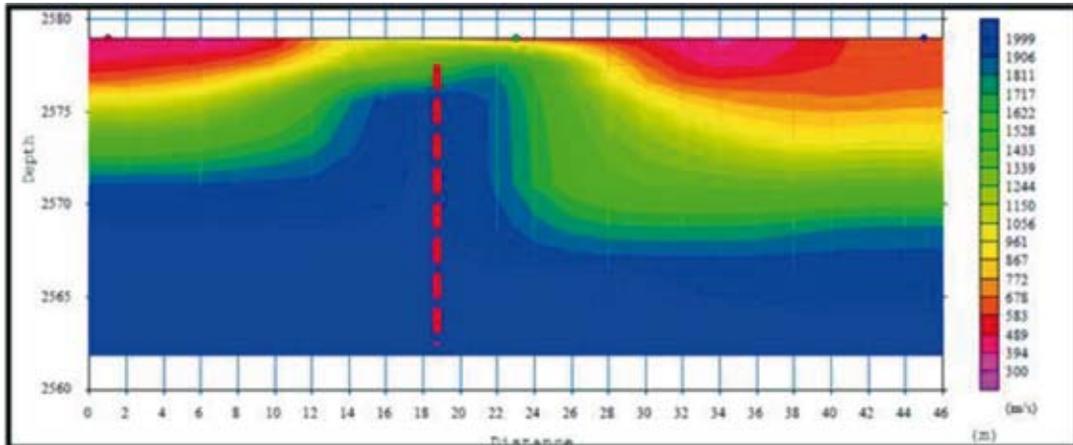


Figura 10. a) Modelos de velocidad de la línea de refracción sísmica 1 en donde se infiere la presencia de una falla que favorece la emanación de agua termal proyectando la zona de alta velocidad hacia superficie.

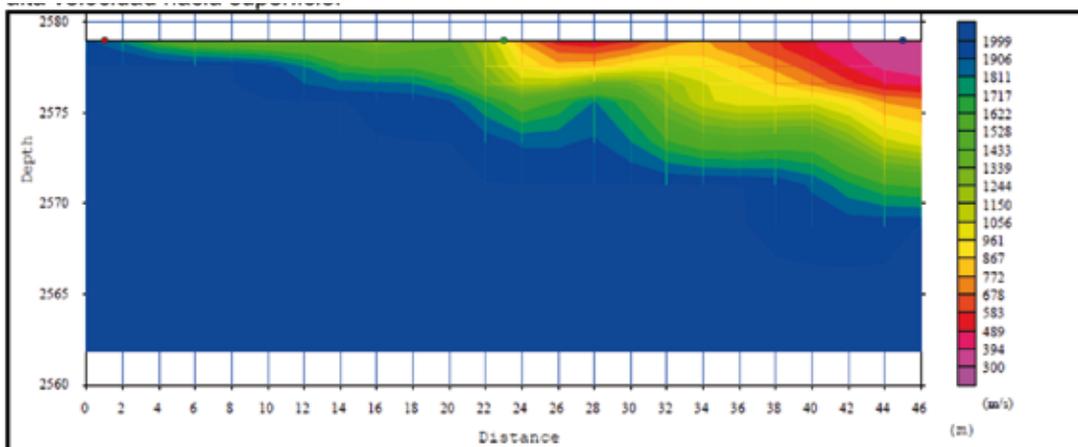


Figura 10. b) Línea de refracción sísmica 2 en donde se aprecia las zonas de relleno de baja velocidad en la parte oriental. No hay evidencias de fallamiento.

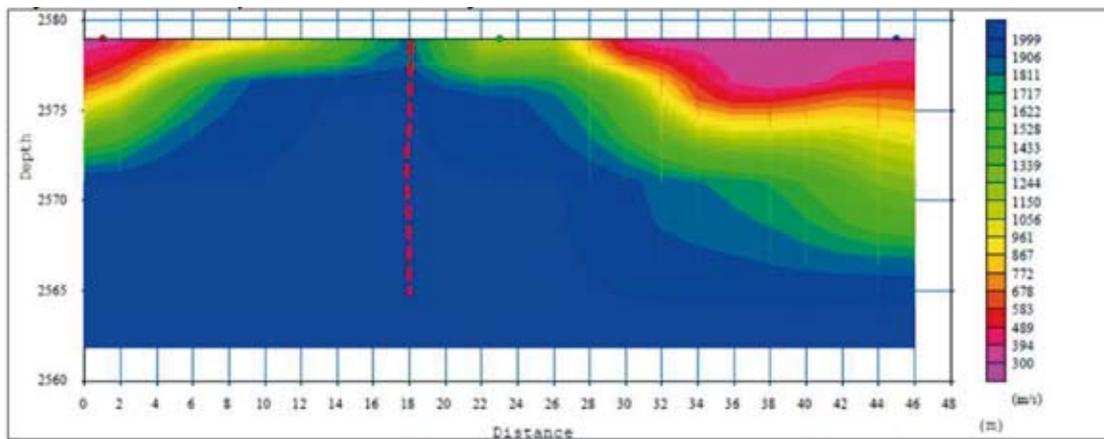


Figura 10. c) Línea de refracción sísmica 3. Se infiere una falla que favorece la emanación de agua termal proyectando la zona de alta velocidad hacia superficie.

REFERENCIAS

- Acosta, J., Alfaro, C., Bernal, N. F., Cepeda, H. & Velandia, F. J. (2003): Sistema geotérmico de Paipa, Boyacá: Modelo conceptual preliminar. Ingeominas, Bogotá.
- Burkhard S. & Abbas M. (1997): How can geophysical exploration help to determine Gshp ground properties? Justus – Liebig University www.intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/proceedings/SANNIE1.PDF
- Iaea-Tecdoc-1363 (2003): Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. 173 pp, Viena, Austria.
- Ingeominas, 1998. Geología de la Plancha 192 - Laguna de Tota, escala 1:100.000.
- Ingeominas, 2005. Geoquímica preliminar de gases del sistema geotérmico de Paipa, pp 1-28.
- Ingeominas, 2006. Compilación y diagnóstico de la información geoquímica histórica, en la parte central de la Cordillera Oriental, pp 1-49.
- Kearey, P & Brooks, M.1991. An Introduction to Geophysical Exploration, Second Edition. Editorial Oxford, London.
- Lowrie, W. 2007. Fundamentals of Geophysics, Second Edition, Cambridge University Press, New York, USA.
- Manzella, A. 2006 Geophysical Methods in Geothermal Exploration, Italian National Research Council, International Institute for Geothermal Research, Pisa, Italy, pp 1-40.
- Reeves, C, 1991. Potential field data processing and interpretation. Department of Earth Resources Surveys, ITC, The Netherlands.
- Romero, F. & Rincón, M. A. 1990. Características petrográficas y geoquímicas de las rocas volcánicas de Iza (Boyacá, Colombia).
- Telford, W.M. & Geldart, L.P. 1990. Sheriff. R.E. Applied Geophysics, Second Edition, Cambridge University Press, USA.