



Boletín de Geología

ISSN: 0120-0283

bolgeo@uis.edu.co

Universidad Industrial de Santander

Colombia

Ramírez-Hoyos, León; Posada, Gustavo; Noriega, Santiago; Monsalve, Gaspar
TOMOGRFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA APLICADA AL ANÁLISIS DE FALLAS
ACTIVAS. CASO DE ESTUDIO: FALLA ABRIAQUÍ, FRONTINO, ANTIOQUIA

Boletín de Geología, vol. 38, núm. 1, enero-abril, 2016, pp. 151-164

Universidad Industrial de Santander

Bucaramanga, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=349643441009>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA APLICADA AL ANÁLISIS DE FALLAS ACTIVAS. CASO DE ESTUDIO: FALLA ABRIAQUÍ, FRONTINO, ANTIOQUIA

León Ramírez-Hoyos^{1,2}; Gustavo Posada^{1,2}; Santiago Noriega³; Gaspar Monsalve^{1,2}

DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n1-2016008>



Forma de citar: Ramírez-Hoyos, L., Posada, G., Noriega, S., Monsalve, G. 2016. Tomografía de resistividad eléctrica aplicada al análisis de fallas activas. Caso de estudio: Falla Abriaquí, Frontino, Antioquia. Boletín de Geología, 38 (1): 151-164.

RESUMEN

En el noroccidente colombiano, dentro del contexto de la orogenia Andina, se han desarrollado importantes fallas activas, que afectan secuencias turbidíticas de la Formación Penderisco, en el eje de la Cordillera Occidental, las cuales presentan actividad y grado de amenaza sísmica alto/moderado para esta región. Este trabajo utiliza la tomografía de resistividad eléctrica con el fin de evaluar la capacidad del método en la delineación y configuración de estructuras menores asociadas a la Falla Abriaquí. A partir de la realización de líneas geoelectricas transversales a la Falla Abriaquí y la obtención de imágenes tomográficas de resistividad eléctrica en dos localidades, mediante el método Dipolo-Dipolo, se infiere una alta correspondencia entre la distribución espacial de la resistividad eléctrica obtenida y las ideas propuestas a partir de indicadores morfotectónicos, y en particular entre la configuración inferida de la Falla Abriaquí a partir de la resistividad y los modelos 2D elaborados para cada locación con base en criterios geomorfológicos.

Palabras clave: Tomografía de resistividad eléctrica (ERT), Dipolo-Dipolo, Falla Abriaquí, método de inversión de mínimos cuadrados, tectónica activa.

ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY APPLIED TO THE ANALYSIS OF ACTIVE FAULTS. CASE STUDY: ABRIAQUÍ FAULT, FRONTINO, ANTIOQUIA

ABSTRACT

Major active faults are affecting turbidite sequences of the Penderisco Formation in Northwestern Colombia, located along the axis of the Western Cordillera. Such faults are currently active and generate a high/moderate degree of seismic hazard in this region. In this work we use the electrical resistivity tomography method to evaluate its ability to delineate minor structures and to identify displaced blocks associated with the Abriaquí Fault. Electrical tests were carried out in a perpendicular direction to the Abriaquí Fault, obtaining tomographic images of electrical resistivity at two different locations using the Dipole-Dipole method. From the results we infer a high correspondence between the obtained spatial distribution of resistivity and the previous ideas of the underground configuration based on geomorphic and tectonic criteria. In particular, the inferred configuration of the Abriaquí Fault from electrical resistivity is highly consistent with the 2D models previously proposed.

Keywords: Electrical resistivity tomography (ERT), Dipole-Dipole, Abriaquí Fault, least squares inversion method, active tectonics.

¹ Departamento de Geociencias y Medioambiente, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, Colombia. lframirez@unal.edu.co

² Grupo de Estudios en Geología y Geofísica - EGEO, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, Colombia.

³ Grupo de Investigación en Geología Ambiental - GEA, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, Colombia.

INTRODUCCIÓN

Tectónicamente, el noroccidente Andino ha sido fuente de investigación de múltiples autores (Page, 1986; Duque-Caro, 1990; Taboada *et al.*, 2000; Paris *et al.*, 2000; Corredor, 2003; González y Londoño, 2003; Cortés and Angelier, 2005). Éstos han planteado un marco regional para la interacción de las placas Nazca, Caribe, Suramérica y el bloque Panamá – Chocó, del cual se deriva la deformación impresa sobre el Bloque Norandino, determinando el estado actual de la tectónica y la sismicidad colombiana (Taboada *et al.*, 2000; Cortés and Angelier, 2005). Este marco implica la presencia de fallas activas a escala regional, así como una alta deformación sobre el Bloque Norandino. Sin embargo, existe un déficit en la caracterización de las fallas activas a escala local.

Esta situación abre un punto de partida para la aplicación de técnicas modernas que aporten nuevos datos sobre la configuración y la dinámica de fallas

activas y la sismicidad en el occidente antioqueño, donde se registran altos grados de amenaza sísmica. En particular, este trabajo se concentra el área de influencia de la Falla Abriaquí, ubicada al suroeste del municipio de Frontino (FIGURA 1).

La Falla Abriaquí corresponde a una estructura sinistral/inversa con un trazo rectilíneo en sentido N50°W y una expresión geomorfológica bien definida (González y Londoño, 2003). Page (1986) reporta depósitos cuaternarios deformados asociados a la falla, a partir de los cuales estima una tasa de desplazamiento de entre 0,2 y 1,0 mm/año, asignándole un grado de actividad moderado y una edad menor a 1,6 Ma para el último movimiento. Estudios morfotectónicos y de sismicidad histórica recientes (Noriega y Caballero, 2015) sugieren que esta estructura podría presentar desplazamientos en el Holoceno, y reportan al menos dos lugares puntuales con deformación en superficie, óptimos para realizar campañas de exploración geofísica y caracterizar con mejor detalle la configuración y el comportamiento de esta falla.

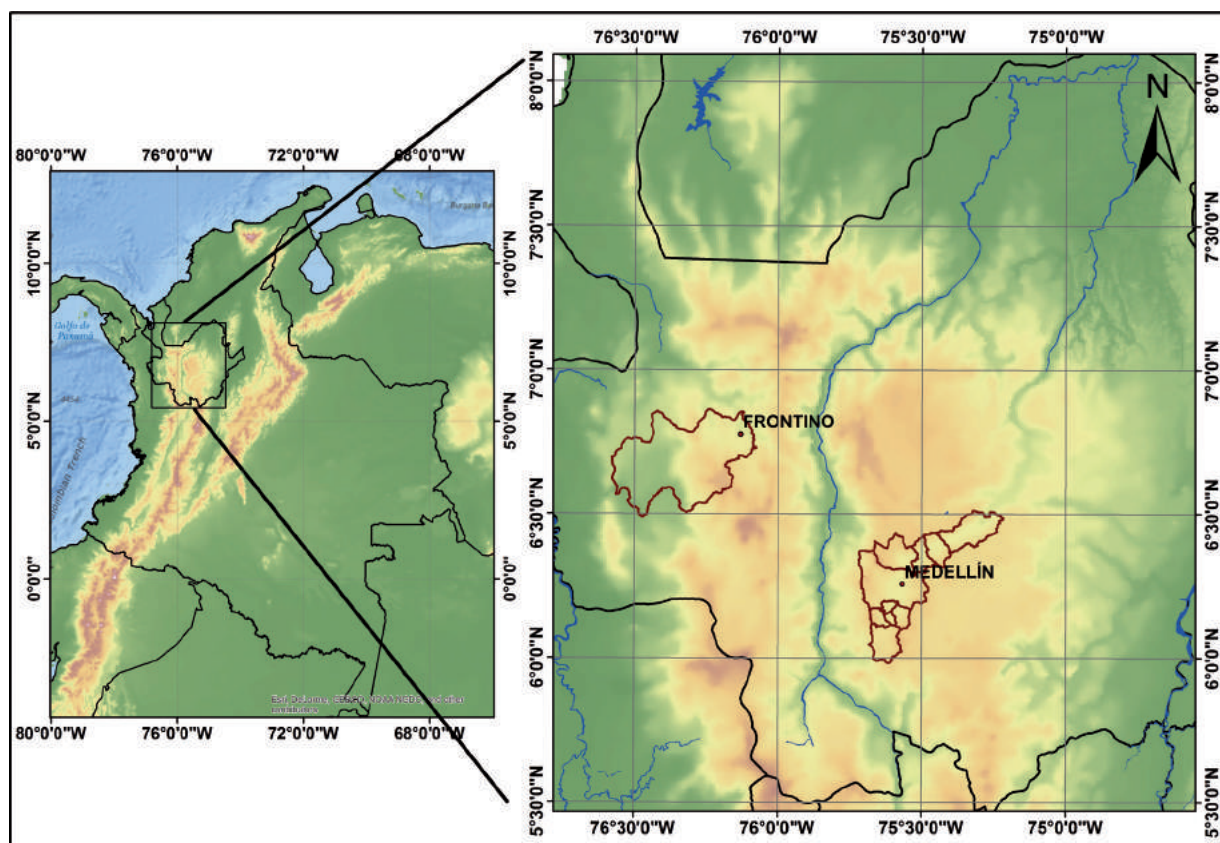


FIGURA 1. Localización geográfica de la zona de estudio, en el municipio de Frontino, departamento de Antioquia, Colombia. Se incluye como referencia la ubicación de la ciudad de Medellín y su área metropolitana.

Las técnicas implementadas incluyen la realización de perfiles de resistividad eléctrica a partir de datos de resistividad aparente tomados en campo con el método Dipolo-Dipolo en dos sectores cuyos estudios morfotectónicos preliminares muestran una expresión en superficie de la Falla Abriaquí. La ubicación de las líneas eléctricas corresponde a los sitios denominados Sincerín y El Chaquiro en las cuencas de los ríos Musinga y El Cerro, respectivamente.

Los estudios geofísicos de resistividad eléctrica se basan en la generación de flujo de corriente eléctrica a través del subsuelo, y las diferencias de potencial resultantes se miden en la superficie (Kearey *et al.*, 2002; Lowrie, 2007); así la resistividad de un material es la medida de qué tan buen retardante es un material al flujo de corriente eléctrica (Herman, 2001). Previamente se han utilizado tomografías de resistividad eléctrica con el fin de delinear e identificar fallas activas; entre los estudios disponibles destacamos los siguientes: en Bélgica, Demanet *et al.* (2001) modeló zonas de falla afectando depósitos aluviales cuaternarios utilizando adquisición de datos sísmicos, de resistividad y de radar de penetración (GPR por sus siglas en inglés); Vanneste *et al.* (2008) realizaron estudios de geofísica de poca profundidad para el modelamiento de fallas; en Argentina, Fazzito *et al.* (2009) y Terrizzano *et al.*, 2012 realizaron tomografías de resistividad eléctrica en la Precordillera Andina con el fin de caracterizar fallas activas del Cuaternario; en la isla de Creta, Grecia, se han llevado a cabo estudios tectónicos a partir de la identificación de fallas activas con tomografías de resistividad eléctrica, realizados por Moisić *et al.* (2010); mientras que en República Checa se realizaron análisis geoelectrónicos acompañados de gravimetría por Štěpančíková *et al.* (2011) con el fin de estudiar la tectónica activa de la región y realizar delimitaciones geológicas. Para el caso de los Andes Colombianos, el estudio de Serna *et al.* (2008) en la Cordillera Central se apoya en contrastes de resistividad eléctrica para deducir afectaciones al basamento y su cubierta sedimentaria por parte de fallas inversas.

MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO

La esquina noroccidental de Suramérica corresponde a una interacción en una zona de convergencia de placas y bloques tectónicos que incluyen las placas de Nazca, Caribe y Suramérica, con historias de acreciones a lo largo del Mesozoico y el Cenozoico, que ha estado acompañada por la colisión del Bloque Panamá-Chocó y el levantamiento de los Andes del Norte (Page, 1986; Duque-Caro, 1990; Taboada *et al.*, 2000; Corredor, 2003). Todo este conjunto de factores da al sector una dinámica compresiva en el noroccidente colombiano,

regida principalmente por deformación frágil, donde predomina el fallamiento de rumbo con componentes inversos asociados a las fallas Cañasgordas, San Ruperto, Murri-Mutatá, Murindó y Abriaquí (Taboada *et al.*, 2000; Corredor, 2003; Cortés and Angelier, 2005); a éstas se les asocia en gran parte la sismicidad histórica e instrumental de la región; esta última, aunque escasa, indica fuertes deformaciones de la corteza superior (profundidad < 10 km), que se traducen en expresiones que se extienden hasta superficie, y comúnmente son enmascarados por procesos exógenos y por las formas del relieve (Page, 1986; Corredor, 2003; Cortés and Angelier, 2005; Noriega y Caballero, 2015).

Geología de la zona de estudio

Geológicamente la zona se caracteriza por la presencia de un conjunto vulcano-sedimentario denominado Grupo Cañasgordas, dividido en una parte volcánica correspondiente a derrames basálticos de la Formación Barroso, y una parte sedimentaria de ambiente turbidítico compuesta por las formaciones Urrao y Penderisco, la primera detrítica, mientras que la segunda de origen químico (González y Londoño, 2003). Otros cuerpos basálticos se identifican en el sector y corresponden a las Diabasas de San José de Urama y los Basaltos del Botón (FIGURA 2), localmente existen plutones de edad Mioceno que intruyen las rocas mencionadas previamente (González y Londoño, 2003).

En la parte occidental se encuentra el Batolito de Mandé, un cuerpo plutónico elongado que hace parte de un magmatismo Paleoceno – Eoceno (Montes *et al.*, 2012), y que puede constituir parte del bloque oriental del Bloque Panamá-Chocó (Duque-Caro, 1990) junto con rocas vulcanosedimentarias de la Formación Santa Cecilia y los sedimentos de la Formación Guineales de edades Cretácico-Paleoceno y Oligoceno, respectivamente (González y Londoño, 2003). Espesos depósitos recientes se concentran en los fondos de los valles, formando complejos sistemas de terrazas que cubren parcialmente el basamento y estructuras geológicas en la zona de estudio (González y Londoño, 2003).

Localmente la unidad predominante corresponde a la Formación Penderisco de edad Cretácico, y hacia las cabeceras del río El Cerro se encuentra la Monzonita de Cerro Frontino, de edad Mioceno, que intruye los sedimentos. En los sitios de exploración geoelectrónica se identifican principalmente depósitos recientes, posiblemente del Cuaternario, formando sistemas de terrazas y abanicos; el origen de estos materiales se atribuye a flujos aluviales y aluviotorrenciales (Noriega y Caballero, 2015).

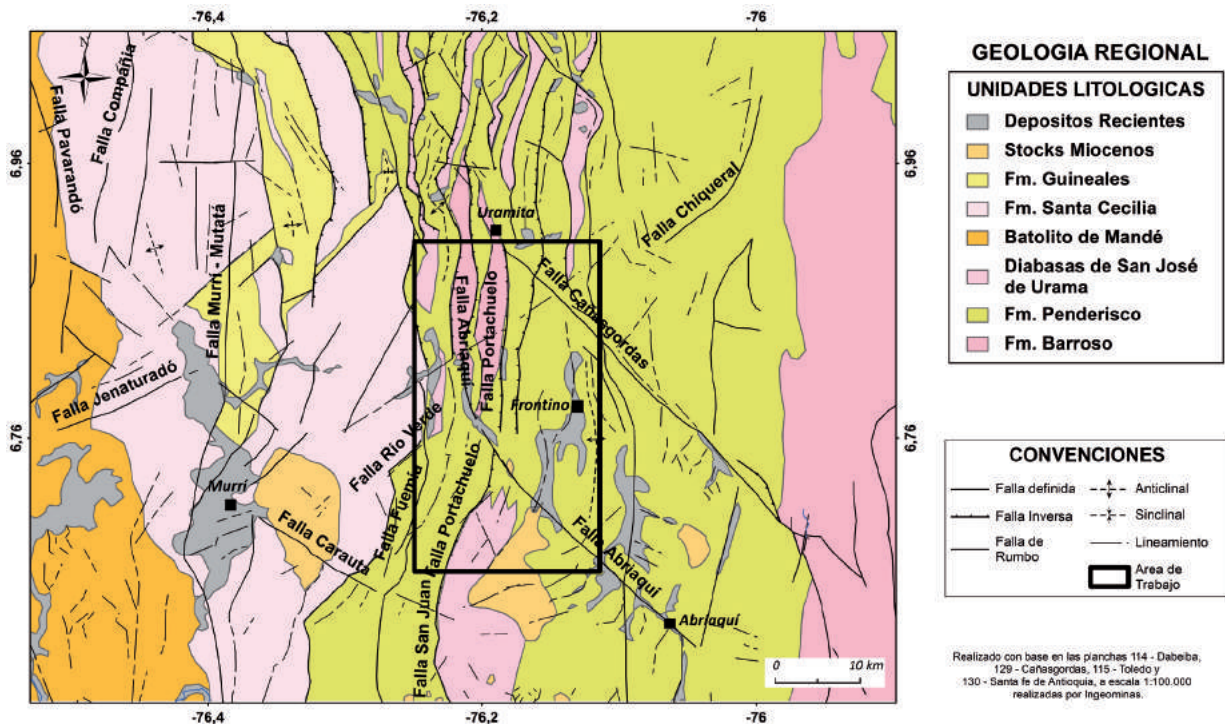


FIGURA 2. Geología regional del área de estudio. Modificado de Noriega y Caballero (2015).

Estructuras presentes y tectónica

La zona de estudio se encuentra en la parte noroccidental del denominado Bloque Andino, entre los 6° - 8° de latitud norte; allí se define un régimen compresivo, caracterizado por engrosamiento y deformación de la corteza, los que a su vez generan y reactivan estructuras donde la sismicidad cobra importancia (Page, 1986; Taboada *et al.*, 2000; Corredor, 2003; Cortés and Angelier, 2005). Derivado de la colisión Miocena del bloque Panamá-Chocó con el bloque Norandino, se induce una inversión tectónica del Sistema de Fallas de Romeral (Ego *et al.*, 1996; Ramírez *et al.*, 2012) y un régimen transpresivo representado por fallas de orientación NW, localizadas entre la Falla Dabeiba-Pueblo Rico y la depresión del río Cauca. Éstas corresponden a las fallas Abriaquí, Cañasgordas, Carauta, Arma y La Mansa, todas con un componente lateral izquierdo (París *et al.*, 2000; Ramírez *et al.*, 2012).

La estructura de interés en el presente estudio corresponde a la Falla Abriaquí, que atraviesa la cuenca del río El Cerro con orientación NW, desde el sector de El Chaquiro hasta el sur del alto de Musinga. A medida que se prolonga al NW, la falla tiende a curvarse en sentido N-S, cambiando su comportamiento lateral izquierdo a una dinámica predominantemente inversa con componente sinistral (González y Londoño, 2003; Noriega y Caballero, 2015) (FIGURA 3). La estructura

presenta una expresión morfológica bien definida por silletas alineadas, facetas triangulares, control de drenajes y deformación de depósitos recientes en el sector (Page, 1986; Noriega y Caballero, 2015).

Geomorfología

Una caracterización geomorfológica del sector propone la existencia de un ambiente deformacional donde se destaca la evolución del relieve con base en procesos tectónicos a lo largo de la Falla Abriaquí; es posible encontrar escarpes y bermas de falla, facetas triangulares, silletas de falla, lomos de presión locales, entre otros (González y Londoño, 2003). Se evidencian también ambientes denudacionales, donde predominan los procesos erosivos; tal ambiente es generalizado en toda la zona de estudio; en la región se presentan también ambientes fluviales, caracterizados por un extenso desarrollo de superficies de deposición y terrazas aluviales en diversos niveles (Noriega y Caballero, 2015).

En el sector Sincerín (FIGURA 4) se identificó una zona de deformación cuyas anomalías morfológicas corresponden a lomos de presión de la Falla Abriaquí sobre flujos de lodos y escombros, en la cual no se presenta una ruptura en superficie que defina un salto a través de la falla (FIGURA 5); para este lugar

se consideran al menos dos trazos subparalelos que configuran bloques tectónicos de escala métrica.

Para el sector El Chaquiro (FIGURA 6), la Falla Abriaquí se manifiesta con una expresión moderada, ya que los procesos principales son de carácter erosivo y deposicional, sin embargo, la presencia de silletas

permite trazar la falla en el sector, y la proyección de la falla sobre depósitos aluviotorrenciales del río El Cerro en su parte alta muestra un salto de aproximadamente 35 cm, el cual sigue una dirección paralela al trazo de la Falla Abriaquí (Noriega y Caballero, 2015) (FIGURAS 7 y 8).

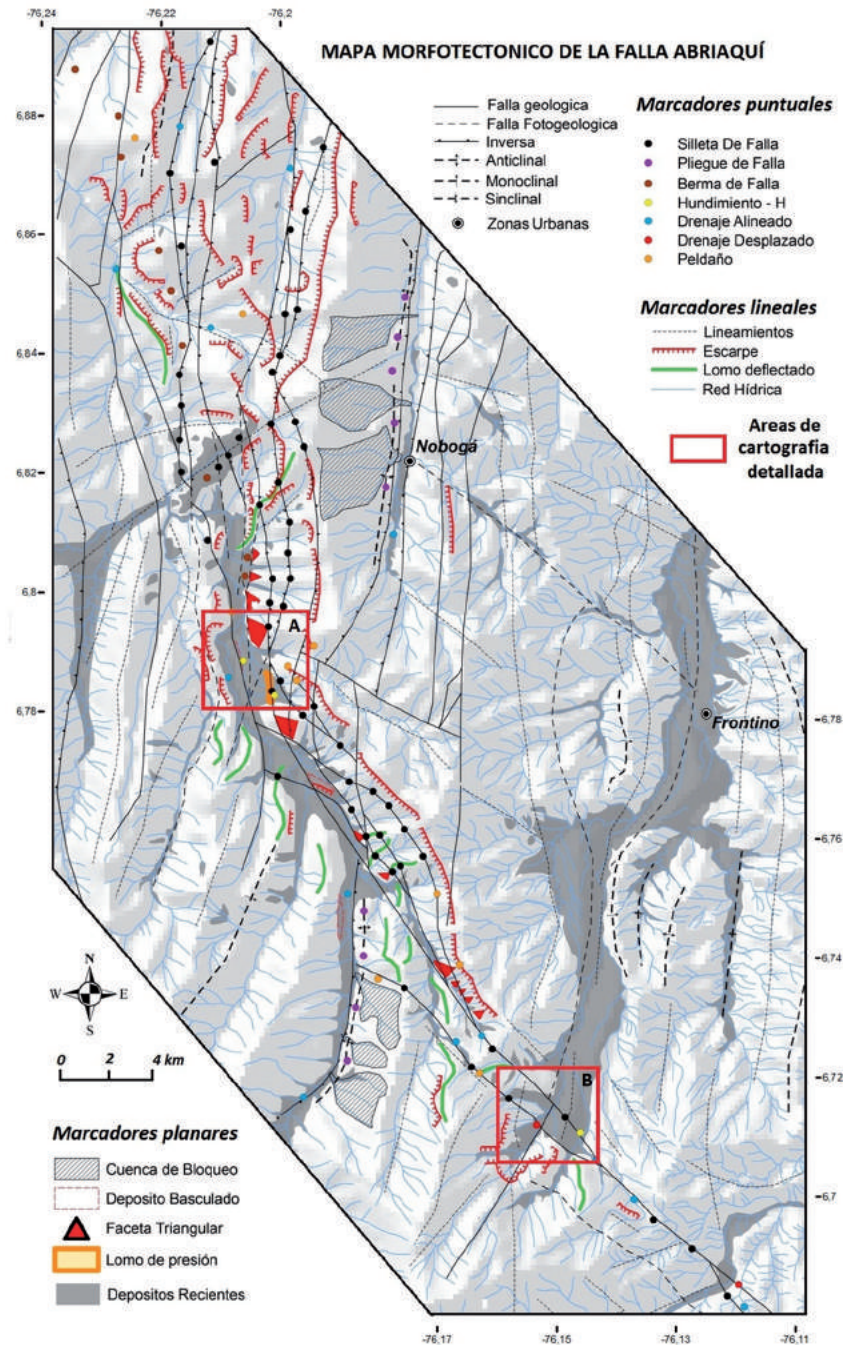


FIGURA 3. Mapa morfotectónico simplificado de la Falla Abriaquí y las áreas de cartografía detallada donde se realizó la exploración geofísica; las coordenadas se encuentran en grados decimales. a) Sincerín. b) El Chaquiro. Modificado de Noriega y Caballero (2015).

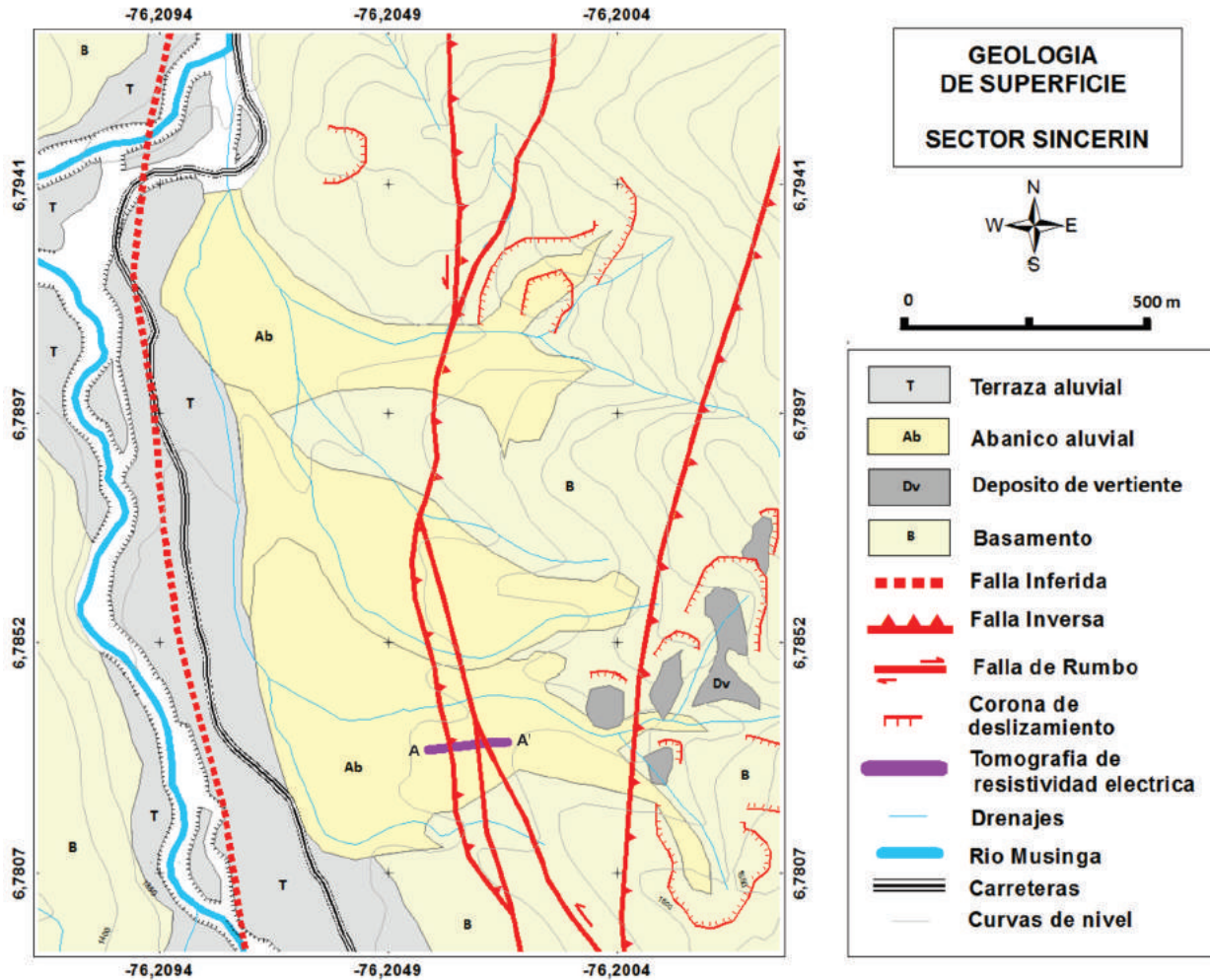


FIGURA 4. Geología de superficie en el sector de Sincerín y ubicación del perfil de resistividad eléctrica. La ubicación de la figura dentro del área de estudio se encuentra en la FIGURA 3, recuadro a). Las coordenadas del mapa se encuentran en grados decimales.

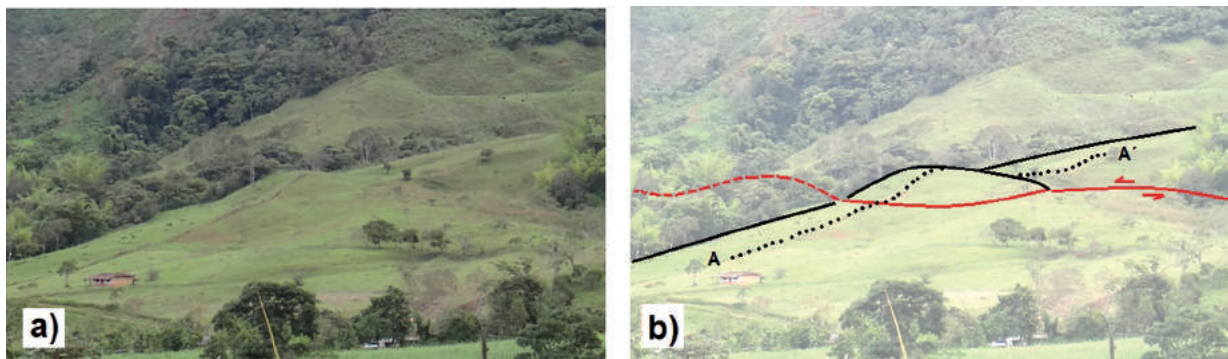


FIGURA 5. Lomo de presión sobre abanico aluvial en el sector de Sincerín. Tomada de Noriega y Caballero (2015). El perfil A-A' se señala en planta en la FIGURA 4.

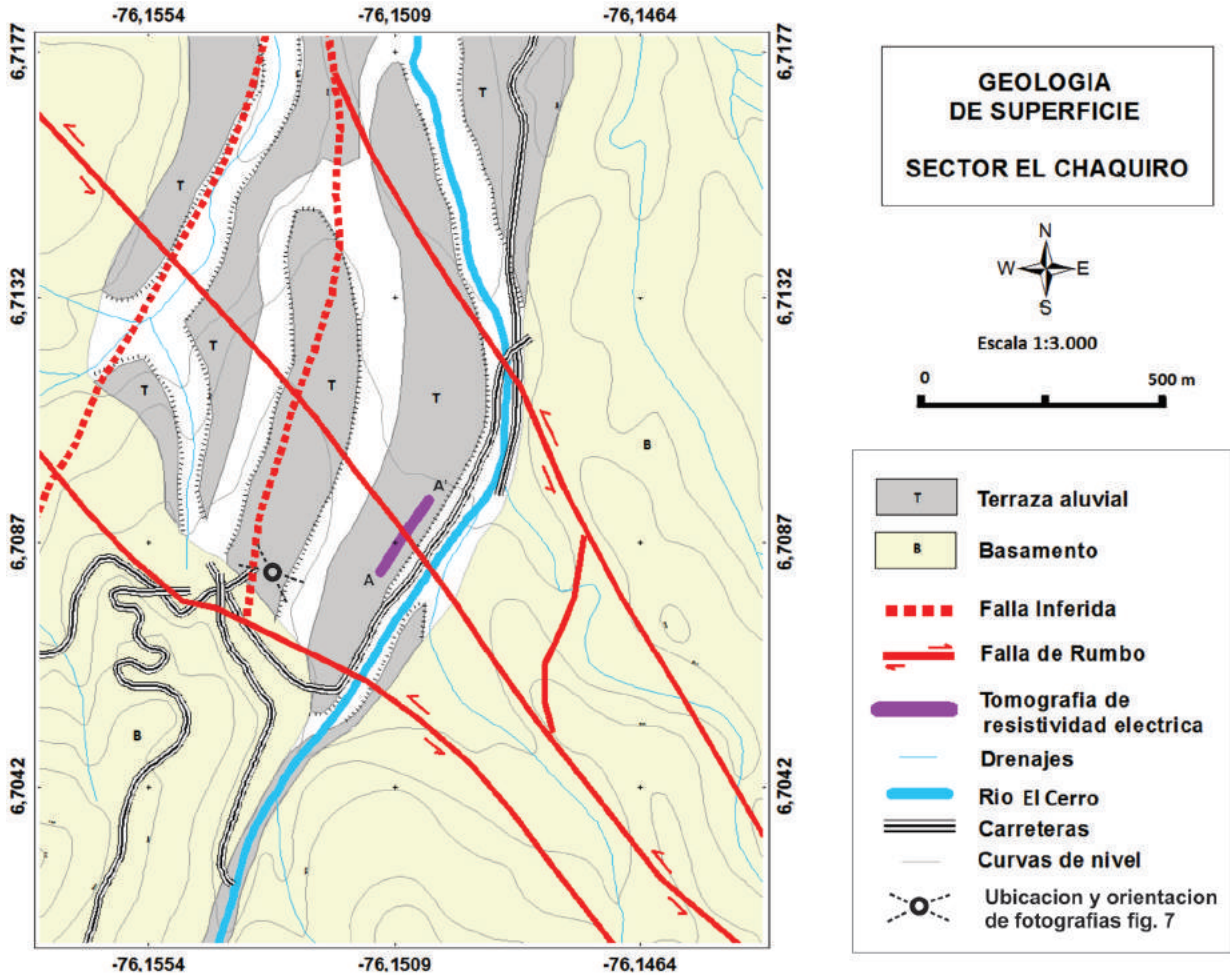


FIGURA 6. Geología de superficie en el sector del río El Cerro, localidad El Chaquiro, y ubicación del perfil de resistividad eléctrica. La ubicación de la figura dentro del área de estudio se encuentra en la FIGURA 3, recuadro b. Las coordenadas del mapa se encuentran en grados decimales.



FIGURA 7. Silletas de falla que demarcan el paso de la Falla Abriaquí sobre la cuenca del río El Cerro. La ubicación del perfil A-A' se especifica en la FIGURA 6.



FIGURA 8. Salto anómalo en terrazas aluviales del sector de El Chaquiro, parte alta de la cuenca del río El Cerro.

PERFILES DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Para el problema en estudio, los perfiles de resistividad eléctrica se realizaron en los sitios de Sincerín y El Chaquiro, descritos y caracterizados previamente. La disposición de las líneas de medida para los ensayos se estableció transversalmente al trazo principal de la Falla Abriaquí.

Adquisición de datos y procesamiento

Los perfiles de resistividad fueron obtenidos mediante el uso del método Dipolo-Dipolo, que consiste en utilizar cuatro electrodos, dos que delimitan el flujo de corriente eléctrica, I^+ e I^- (electrodos de corriente), y dos electrodos que miden la diferencia de potencial V^+ y V^- (electrodos de potencial). Los electrodos I^+ e I^- se ubican alejados uno del otro una distancia $X=a$, al igual

que los electrodos V^+ y V^- ($X=a$), y la separación entre los pares de corriente y potencial será un factor entero de $X=a$, es decir, $L=na$ (Herman, 2001; Kearey *et al.*, 2002; Lowrie, 2007). La representación de los datos de resistividad aparente por este método se hace mediante la construcción de la pseudosección (FIGURA 9).

La toma de datos en campo se realizó utilizando el conjunto Earth Resistivity/IP meter Mini Sting (Advanced Geoscience, Inc.) y un Sistema Automático de Conmutación de Electrodos (SACE) (FIGURA 10), variando la distancia horizontal entre electrodos, obteniendo para Sincerín 108 datos de resistividad aparente y para El Chaquiro 153 (TABLA 1). Cada una de estas medidas corresponde a un procedimiento iterativo en el que el sistema SACE intercambia y conmuta siete electrodos a lo largo de un cable conectado al sistema (TABLA 1 y FIGURA 9).

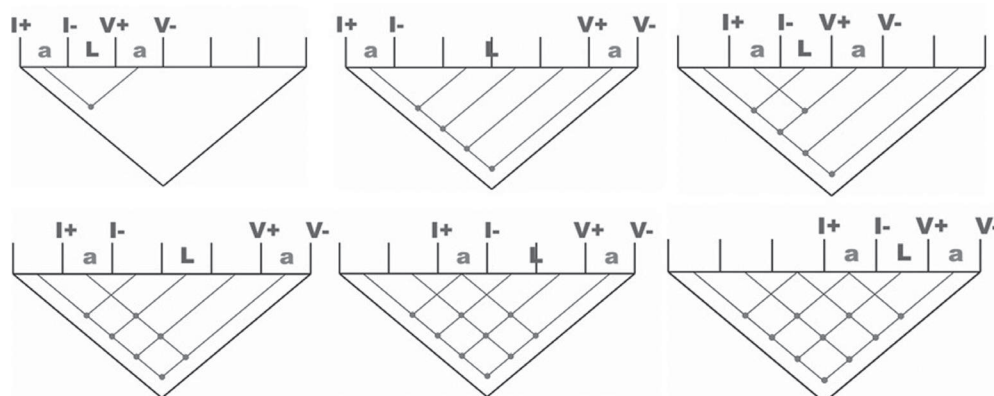


FIGURA 9. Representación de la elaboración de la pseudosección en el ensayo dipolo-dipolo. Los símbolos I^+ e I^- denotan la ubicación de los electrodos de corriente, y los símbolos V^+ y V^- hacen referencia a la ubicación de los electrodos de potencial. Esta representación corresponde al esquema de conmutación de electrodos implementado en este estudio, donde mediante arreglos de siete electrodos con diferentes separaciones se construyeron las pseudosecciones

TABLA 1. Síntesis de los resultados obtenidos en la adquisición y procesamiento de la información geoelectrónica.

	Latitud (°)	Longitud (°)	Posición primer electrodo (m)	Posición último electrodo (m)	Número de mediciones de pa	Número final de datos en la inversión	Error cuadrático medio - RMS (%)
Sincerín	6.7830	6.7087	0	160	108	67	14,6
El Chaquiro	-76.2045	76.1509	0	192	153	109	9,8



FIGURA 10. Fotografías del trabajo en campo a) Funcionamiento Mini Sting y SACE. b) Tendido de la línea eléctrica en el sector de El Chaquiro.

Los datos obtenidos por el sistema compuesto Mini Sting – SACE se procesaron y revisaron de forma manual con el fin de utilizar datos únicos para cada coordenada en el subsuelo. Así, para coordenadas en las que se tuviera más de dos mediciones se realizaron promedios entre los valores obtenidos; o se descartaban cuando se detectaba una toma de datos errónea. Estos datos depurados corresponden a 67 valores netos para

Sincerín y 109 para El Chaquiro; con estos datos se obtienen las pseudosecciones de resistividad aparente en dos dimensiones para cada uno de los sitios (FIGURA 11), y son luego procesados por medio del software RES2DINV - v3.53g (GEOTOMO SOFTWARE, 2010), que aplica una inversión por mínimos cuadrados amortiguada (Loke, 2000; Loke *et al.*, 2003) para generar un perfil tomográfico de resistividad eléctrica.

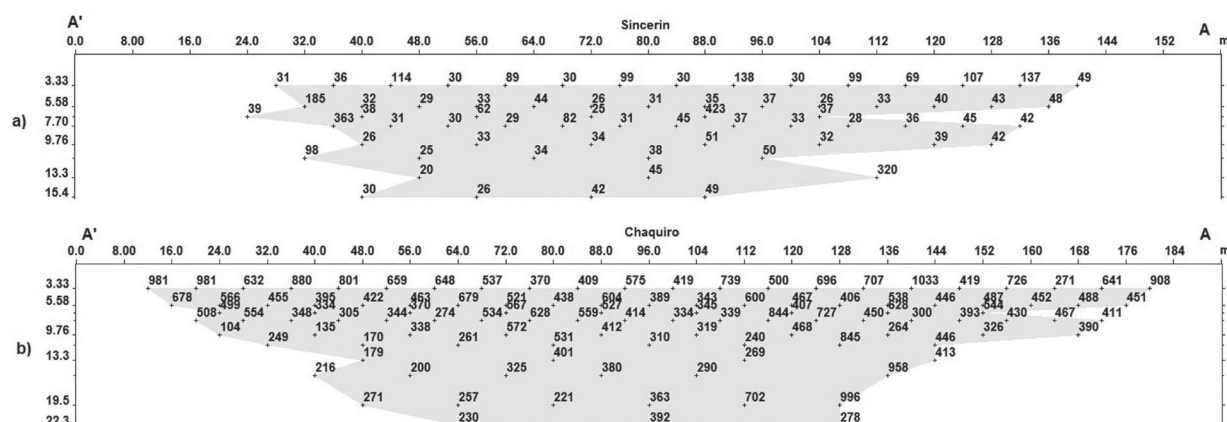


FIGURA 11. Pseudosecciones de resistividad aparente que muestran las coordenadas de los datos tomados bajo superficie con el ensayo dipolo-dipolo. a) Sincerín. b) El Chaquiro.

Junto con los perfiles de resistividad se incluyen los respectivos perfiles topográficos de cada línea (FIGURAS 12, 13, 14 y 15) con el objetivo de establecer relaciones entre la probable expresión superficial de las fallas y las anomalías geofísicas relacionadas con el fallamiento del subsuelo.

Ambos modelos de resistividad eléctrica muestran una alta confiabilidad en los resultados ya que poseen errores cuadráticos medios (RMS) inferiores a 15%, siendo de 14.6 % para la línea de Sincerín, y 9.8 % para la línea de El Chaquiro (TABLA 1), después de iterar cinco veces e ir reduciendo el RMS para cada caso (FIGURAS 12 y 14).

Configuración subsuperficial de la Falla Abriaquí

Las imágenes de resistividad obtenidas en el estudio permiten una aproximación a la estructura del subsuelo en el sector del ensayo. Si se integran los datos estructurales, estratigráficos y morfotectónicos característicos de la Falla Abriaquí, las interpretaciones de la tomografía adquieren una mayor calidad y un mejor acercamiento al problema.

La identificación de las estructuras en las imágenes tomográficas se basó en dos criterios principales: el primero basado en altos contrastes laterales de resistividad eléctrica, que pueden representar transiciones abruptas entre el basamento rocoso, los flujos de escombros y/o los flujos de lodo (Noriega y Caballero, 2015); y en segundo lugar, cuando se registran zonas de baja resistividad se relacionan con sectores de alto fracturamiento, cuya alta permeabilidad favorece la infiltración y posterior saturación de agua. Estos parámetros permitieron delinear, al menos parcialmente, la geometría subsuperficial de las fallas.

A continuación se presenta la descripción e interpretación de los resultados obtenidos por este método para cada una de las líneas de resistividad eléctrica realizadas. La asignación de materiales geológicos a valores de resistividad se basó en las correlaciones presentadas por Lowrie (2007).

Sincerín: los valores de resistividad aparente tomados en campo para este sector se encuentran principalmente entre los 20 y 125 $\Omega.m$, pese a que existen tres zonas dentro de las que se tomaron datos con valores de resistividad mayores a 180 $\Omega.m$. A partir de la pseudosección se obtiene un perfil de resistividad eléctrica para el sector de Sincerín con un rango de valores entre 20 y 650 $\Omega.m$ (FIGURA 12).

Interpretativamente, en esta imagen (FIGURA 12) se pueden identificar varias características: la primera corresponde a la parte superior de la imagen tomográfica que se encuentra entre la superficie hasta unos 6 m de profundidad, donde sobresalen valores altos de resistividad entre 80 y 650 $\Omega.m$, que suprayace, con un contraste marcadamente fuerte, un área de menores resistividades y que presenta una geometría que se asocia al flujo de lodos y escombros que compone la parte superior del abanico aluvial (FIGURA 12); en la parte intermedia, entre 6 y 18 m de profundidad, se observan resistividades entre 30 y 80 $\Omega.m$, que pueden ser relacionadas con materiales arcillosos de la parte basal del depósito de vertiente; finalmente en la parte inferior, bajo la anterior capa, encontramos un sector cuyos valores vuelven a ser marcadamente más altos y que muestra resistividades que varían entre 80 y 240 $\Omega.m$, que se pueden relacionar con el basamento rocoso, conformados por capas de areniscas, lodolitas y liditas de la Formación Penderisco (FIGURA 13).

Basados en esta interpretación, se estima una profundidad del depósito de vertiente de alrededor de 20 m; sin embargo, el rango de resistividades que se asigna al basamento rocoso no es continuo a lo largo de la base de la imagen de resistividades, indicando posibles levantamientos de bloques o afectaciones tectónicas. Las resistividades más bajas son del orden de 5 a 30 $\Omega.m$, y se interpretan como zonas de debilidad, fracturadas y saturadas, como consecuencia del fallamiento activo dentro del abanico aluvial, que afecta directamente el basamento del depósito y muestra relaciones directas con el desarrollo del lomo de presión en superficie (FIGURA 13). Finalmente, los marcados contrastes laterales de resistividades permiten el trazado de estructuras, que incluso alcanzan la superficie, relacionadas con la Falla Abriaquí para este sector del municipio de Frontino.

El Chaquiro: para el caso del sector El Chaquiro, los valores de resistividad aparente registrados en la medición y que se pueden apreciar en la pseudosección (FIGURA 11b) arrojaron valores de resistividad entre 150 y 1.000 $\Omega.m$; éstos muestran una tendencia a encontrarse mayoritariamente en el rango de 250 a 650 $\Omega.m$.

En la elaboración del perfil de resistividad, y después del procesamiento de los valores de resistividad obtenidos en campo, se obtiene una imagen tomográfica donde las resistividades se encuentran entre 60 y 1.700 $\Omega.m$ (FIGURA 14) y se evidencian profundos contrastes a lo largo del perfil.

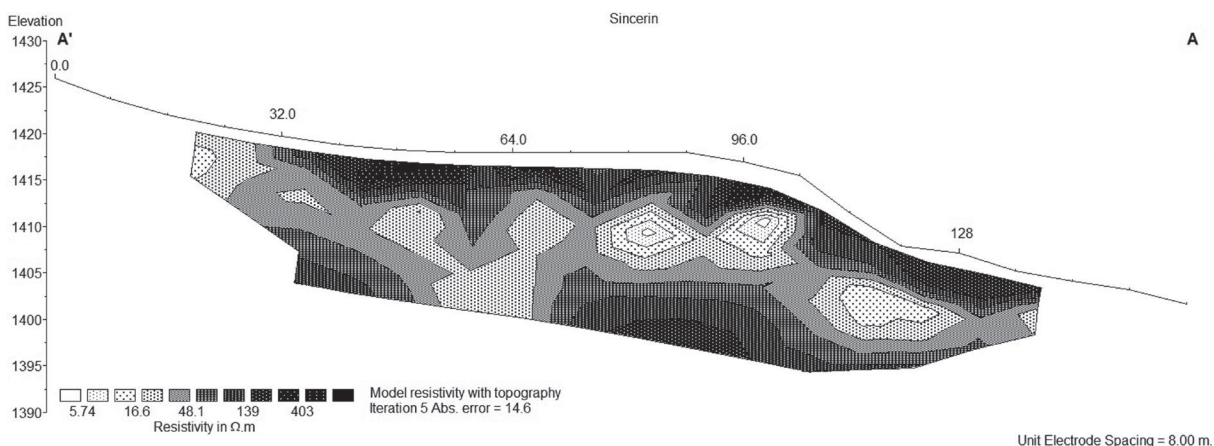


FIGURA 12. Perfil de resistividad eléctrica para el sector de Sincerín. La localización de la línea eléctrica se encuentra en la FIGURA 3.

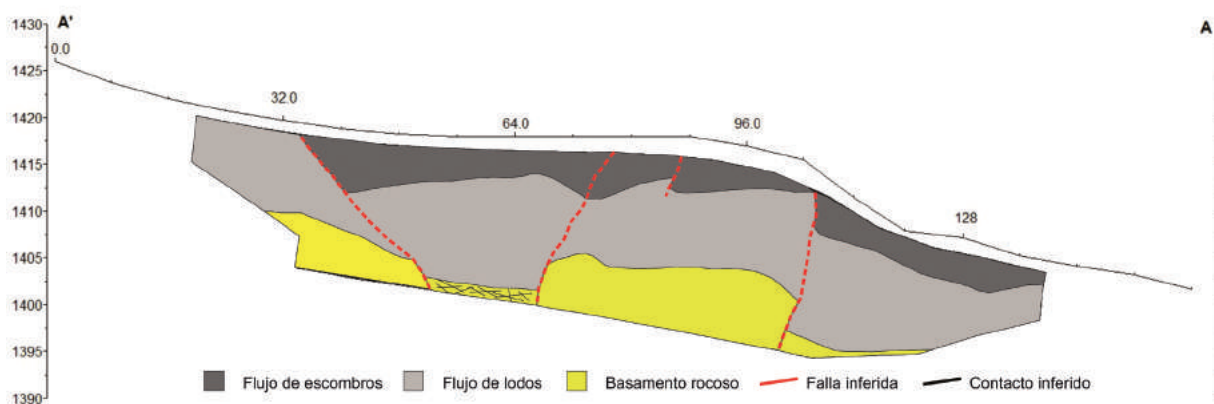


FIGURA 13. Perfil geológico del sector de Sincerín en el que se detalla la interpretación estratigráfica y estructural de la Falla Abriaquí.

En la parte superior del perfil es posible identificar un área cuyos valores de resistividad son relativamente altos y que va desde la superficie hasta unos 5 m de profundidad; en ella las resistividades se encuentran entre 500 a 1.700 $\Omega.m$. Esta capa es casi continua y contrasta de forma clara con la capa subyacente de resistividades menores a excepción de dos puntos, en los cuales el límite es menos evidente, a los 105 y 156 m desde el punto de referencia (FIGURA 14). Inmediatamente bajo la anterior capa se encuentra una cuyos valores de resistividad son de medios a bajos en la imagen analizada, estos valores bajos se encuentran entre 60 y 500 $\Omega.m$. Esta capa se encuentra localizada en tres partes de la imagen tomográfica: en los primeros metros de referencia (0 – 100 m) en los que es continua y sólo se ve interrumpida entre los 65 y 85 m por una zona de resistividades altas, y cuya terminación se da en una zona de alto gradiente a los 105 m; entre los 110 y 156 m se encuentra una zona muy similar a la anteriormente descrita, y que también presenta una

discontinuidad en la parte inferior por zonas de altas densidades; en último lugar, entre los 160 y 180 m se presenta una pequeña zona de resistividades bajas que también hace parte de esta capa (FIGURAS 14 y 15). Finalmente, en la parte inferior aparecen dos pequeñas zonas con resistividades eléctricas del orden de 600 a 1.500 $\Omega.m$, que interrumpen la continuidad de la capa intermedia de resistividades bajas y cuya profundidad es mayor a 15 m desde la superficie.

Así, con las descripciones anteriormente mencionadas se puede inferir que la capa superficial de resistividades mayores corresponde a coberturas de depósitos aluviales y aluviotorrenciales más recientes del río El Cerro; bajo esta capa se localizan las resistividades menores de 500 $\Omega.m$, que se asocian a antiguos flujos aluviales (FIGURA 15), los cuales actualmente presentan un alto grado de saturación debido a su ubicación cerca al drenaje. En la parte inferior, las dos pequeñas zonas con resistividades eléctricas del orden de 600 a 1.500 $\Omega.m$ se asocian a

fragmentos del basamento rocoso, el cual se encuentra a más de 15 m de profundidad. Al igual que en el perfil para Sincerín, los contrastes laterales definen la localización de cuatro zonas fracturadas asociadas con la actividad de la Falla Abriaquí (FIGURAS 14 y 15); sin embargo,

en este caso, la capa superficial correspondiente a depósitos aluviotorrenciales no presenta afectaciones considerables, lo que es consecuente con el desarrollo de pobres expresiones en superficie y con la granulometría gruesa del depósito (Noriega y Caballero, 2015).

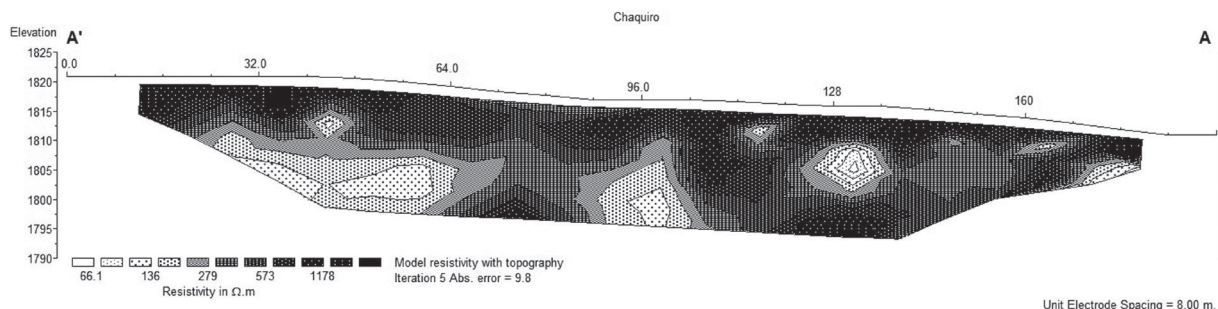


FIGURA 14. Perfil de resistividad eléctrica para el sector de El Chaquiro. La localización de la línea eléctrica se encuentra en la FIGURA 3.

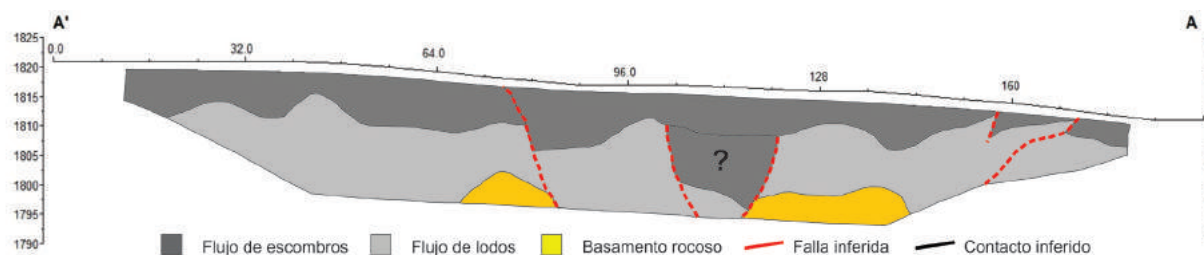


FIGURA 15. Perfil geológico del sector de El Chaquiro en el que se detalla la interpretación estratigráfica y estructural de la Falla Abriaquí.

CONCLUSIONES

Existe una alta correlación entre los resultados obtenidos en las tomografías de resistividad eléctrica y los modelos geológicos propuestos para los sitios Sincerín y El Chaquiro. Por otro lado, la raíz media cuadrática del desajuste entre la resistividad medida y la estimada por los modelos es aceptable, con valores inferiores a 15 %, siendo de 14,6 % para Sincerín y de 9,8 % para El Chaquiro.

Para el sitio Sincerín se aprecia deformación de los depósitos de vertiente recientes y una expresión en superficie que corresponde a un lomo de presión formado a partir de dos estructuras locales de la Falla Abriaquí, que deforma y moldea la morfología de la zona.

En el sector de El Chaquiro no es posible determinar afectaciones superficiales mayores ya que su expresión es apenas perceptible, por lo cual la evaluación geoelectrica sirve como criterio en la determinación de fragmentos de basamento levantados según los contrastes y cambios de resistividad aparente medidos y estimados en la tomografía, como lo sustentan los

perfiles de resistividad presentados en este estudio.

A partir de contrastes laterales en los valores de resistividad se determinó la posible ubicación de estructuras relacionadas con la Falla Abriaquí; las resistividades más bajas se han interpretan como zonas de debilidad, fracturadas y saturadas por efecto del fallamiento activo. Estos contrastes también permiten la individualización de fragmentos de basamento rocoso levantado como consecuencia de la actividad reciente de la Falla Abriaquí.

Al no existir muestreos directos, la geofísica de exploración, y para el caso puntual las tomografías de resistividad eléctrica, se convierten en una herramienta alternativa, indicadora de actividad tectónica en depósitos recientes y materiales fracturados, deformados y saturados; además, vale la pena mencionar que la exploración geoelectrica puede servir como base para futuras exploraciones directas en los sitios de interés con el fin de determinar tasas de movimiento, deformaciones, dataciones, estilos estructurales de la estructura, entre otras.

Es posible determinar con criterios geofísicos, fundamentados en un buen estudio morfotectónico y geomorfológico, fallas activas y su papel en la geología reciente.

AGRADECIMIENTOS

El equipo de trabajo quiere de antemano agradecer el apoyo y las herramientas brindadas por el Grupo de Investigación en Tecnologías Aplicadas – GITA, tanto en el desarrollo de software como de equipos de campo, y por su disponibilidad y paciencia para transmitir su valioso conocimiento; así como a Alejandra Romero por su valiosa colaboración en el entendimiento del manejo del software de inversión; al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Investigación – Colciencias por el soporte financiero mediante el proyecto: “Evidencias preliminares de tectónica activa entre la cuenca media del Río El Cerro y la vereda El Chuscal, Frontino - Antioquia, Cordillera Occidental”, desarrollado por medio del programa de Jóvenes Investigadores de Colciencias - 2012., y al Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por el apoyo académico y logístico. Finalmente el equipo investigador agradece a los dos evaluadores anónimos del manuscrito original, cuyas recomendaciones y sugerencias nutrieron los resultados, orden y discusión de lo planteado en este trabajo.

REFERENCIAS

Corredor, F. 2003. Seismic strain rates and distributed continental deformation in the Northern Andes and three-dimensional seismotectonics of northwestern South America. *Tectonophysics*, 372 (3-4): 147–66. doi:10.1016/S0040-1951(03)00276-2.

Cortés, M., and Angelier, J. 2005. Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes. *Tectonophysics*, 403 (1-4): 29–58. doi:10.1016/j.tecto.2005.03.020.

Demant, D., Vanneste, K., Jongmans, D., Camelbeeck, T., and Meghraoui, M. 2001. Case history: the use of geophysical prospecting for imaging active faults in the Roer Graben, Belgium. *Geophysics*, 66 (1): 78–89.

Duque-Caro, H. 1990. The Choco Block in the northwestern corner of South America: structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 3 (1): 71–84.

Ego, F., Sébrier, M., and Yepes, H. 1996. Is the Cauca-Patia and Romeral Fault System left or right lateral?. *Geophysical Research Letters*, 22: 33–36.

Fazzito, S., Rapalini, A., Cortés, J.M., and Terrizzano, C.M. 2009. Characterization of quaternary faults by electric resistivity tomography in the Andean Precordillera of Western Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 28 (3): 217–228.

GEOTOMO SOFTWARE, 2010. RES2DINV: Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least-squares method, www.geoelectrical.com, Malaysia, 148p.

González, H., y Londoño, A.C. 2003. Geología de las planchas 129 Cañasgordas y 145 Urrao. INGEOMINAS, Bogotá, 119p.

Herman, R. 2001. An introduction to electrical resistivity in geophysics. *American Journal of Physics*, 69 (9): 943.

Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I. 2002. An introduction to geophysical exploration. Third Edition. Blackwell Science, 262p.

Loke, M.H. 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, 67p.

Loke, M.H., Acworth, I., and Dahlin, T. 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2d electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, 34 (3): 182–87.

Lowrie, W. 2007. Fundamentals of geophysics. Second Edition. New York. Cambridge University Press, 381p.

Moisidi, M., Kershaw, S., Rust, D., Collins, P., Soupios, P., and Vallianatos, F. 2010. Geological and electrical resistivity tomography surveys applied to model the tectonic environment of the Kastelli-Kissamou basin, northwestern Crete, Greece. *Water and Geoscience*, 2: 184–89.

Montes, C., Bayona, G., Cardona, A., Buchs, C.M., Silva, C.S., Morón, S., Hoyos, N., Ramírez, D.A., Jaramillo, C.A. and Valencia, V. 2012. Arc-continent collision and orocline formation: closing of the Central American seaway. *Journal of Geophysical Research*, 117, B04105, doi:10.1029/2011JB008959.

Noriega, S., y Caballero, J. 2015. Morfotectónica de la falla Abriaquí y sismicidad histórica a propósito del sismo de 1903 en Frontino – Antioquia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39 (150): 100–110.

Page, W.D. 1986. Geología sísmica y sismicidad del noroeste de Colombia, Medellín. Woodward-Clyde Consultants, ISA, Integral, 156p.

París, G., Machete, M., Dart, R., and Haller, K. 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. U.S. Geological Survey (USGS), 61p.

Ramírez, J., Sierra, G.M., y Marin-Cerón, M.I. 2012. Anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) del miembro superior de la Formación Amagá, sección quebrada Sabaleticas, SW antioqueño y su relación con los movimientos del sistema de fallas Romeral en el Cenozoico tardío. Boletín de Ciencias de La Tierra, 32: 125–142.

Serna, L.M., Montes, L., y Vargas, C., 2008. Modelamiento geofísico de un área de la zona de Cerritos, municipio de Pereira, Risaralda. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 22 (123): 157-169.

Štěpančíková, P., Dohnal, J., Pánek, T., Łój, M., Smolková, V., and Šilhán, K. 2011. The application of electrical resistivity tomography and gravimetric survey as useful tools in an active tectonics study of the Sudetic Marginal Fault (Bohemian Massif, Central Europe). Journal of Applied Geophysics, 74 (1): 69–80. doi:10.1016/j.jappgeo.2011.03.007.

Taboada, A., Rivera, L.A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., and Rivera, C. 2000. Geodynamics of the northern Andes: subductions and intracontinental deformation (Colombia). Tectonics, 19 (5): 783–813.

Terrizzano, C.M., Fazzito, S., Cortés, J.M., and Rapalini, A. 2012. Electrical resistivity tomography applied to the study of neotectonic structures, northwestern Precordillera Sur, Central Andes of Argentina. Journal of South American Earth Sciences, 34: 47–60. doi:10.1016/j.jsames.2011.10.002.

Vanneste, K., Verbeeck, K., and Petermans, T. 2008. Pseudo-3D imaging of a low-slip-rate, active normal fault using shallow geophysical methods: the Geleen Fault in the Belgian Maas river valley. Geophysics 73 (1): 1-9.

Trabajo recibido: octubre 3 de 2014

Trabajo aceptado: junio 26 de 2015