



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MÉTODO DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA DETERMINAR ESTRUCTURAS
VOLCÁNICAS**

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA:

LUCIANO DANIEL CONSTANTINO RODRÍGUEZ

ASESOR: DR. RENÉ EFRAÍN CHÁVEZ SEGURA



México, D.F.

2011.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

“Este trabajo esta dedicado a mis padres y hermanos, por haberme apoyado y brindado su cariño durante todo el camino...”

“Es un error capital teorizar
antes de tener datos.
sin darse cuenta, uno empieza
a deformar los hechos para
que se adapten a las teorías,
en lugar de adaptar las teorías
a los hechos”

Sherlock Holmes

En Escándalo en Bohemia,

de ARTUR CONAN DOYLE

(1891)

***“A mis amigos, que siempre me han dado la libertad de seguir mi camino,
aunque no sea el mismo que ellos siguen”.***

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a la Universidad Nacional Autónoma de México, por todos los apoyos brindados durante mi formación académica.

A la Facultad de Ingeniería, que me hizo ver mis deficiencias y fortalezas académicas, pero que permitió formarme.

Al Instituto de Geofísica, por los apoyos prestados a través del Departamento de Exploración y Geomagnetismo, que permitieron conocer la forma de trabajar en la área de investigación.

Al Dr. René Chávez por el interés y la atención prestada durante la realización de este trabajo. Por explicarme aquellos conceptos que tenían poco claros y que ayudaron a tener este trabajo.

Al Dr. Andrés Tejero por su colaboración durante la adquisición de datos y en elaboración del trabajo escrito, así como de sus valiosas sugerencias para mejorar este trabajo.

Al M. C. Gerardo Cifuentes por su amistad, por darme la oportunidad de pertenecer al Departamento de Exploración y Geomagnetismo, además, de tener la atención en aclararme dudas en conceptos de la carrera tanto teórica como práctica. ¡Gracias!

A la Dra. Ana Lillian Martin del Pozzo, por sus sugerencias en para el mejoramiento de este trabajo tanto en contenido, como en presentación.

A la Dra. Claudia Arango por sus acertadas sugerencias en este escrito, así como por el interés en mejorarme académicamente.

Al M. C. Esteban Hernández por la confianza brindada estos 2 años, por las correcciones de este y otros trabajos, que permitieron mejorar mis escritos y perspectiva de la Geofísica, además, del apoyo dado en el Departamento de Exploración y Geomagnetismo. ¡Gracias!

Y a muchas otras personas más, dentro y fuera de la universidad, a mis amigos,- numerosos para poder mencionarlos a todos-, contribuyeron también eficazmente proporcionando sus opiniones, puntos de vista y observaciones en beneficio de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Finalmente, expreso mi agradecimiento a mi familia y en especial a mis padres, Luciano Pedro y Leticia, que me siguen apoyando en mi preparación y desarrollo. Mis hermanos Viridiana y Mauricio, por soportarme en mis ratos de ocio.

RESUMEN

El método de Tomografía Eléctrica fue aplicado en un predio en la delegación Tlalpan del Distrito Federal conocido como “Los Encinos”, donde estudios geológicos anteriores señalan la existencia de tubos volcánicos ó lávicos.

Los objetivos de este estudio fueron:

- a) Aplicar el Método de Tomografía Eléctrica en una zona de alto contraste resistivo, mediante la comparación de los resultados obtenidos con tres diferentes tipos de arreglos (Dipolo - Dipolo, Wenner - Schlumberger y Wenner).
- b) Caracterizar los tubos lávicos en perfiles de resistividad 2D y modelos 3D, con los diferentes tipos de arreglos (La geometría detallada de estas estructuras del subsuelo es de interés para su correcta caracterización e interpretación).

Los tubos lávicos son estructuras de origen volcánico, que son difíciles de encontrar en la naturaleza por que se originan en las lavas poco viscosas como las pahoehoe, la importancia de conocerlos y preservarlos son debido a su origen totalmente natural y que sirven de hábitats a especies animales y vegetales muchas veces endémicos. Por otra parte encontrar los tubos en la ciudad de México, aumenta su interés debido a que el crecimiento de la ciudad propicia su destrucción en obras civiles, con lo que este estudio permite conocer sus características y localización en una zona al sur de la ciudad para preservarlos.

Se realizaron cinco líneas de 125 m de longitud con separación de 5 m entre electrodos y de 25 m entre líneas. Con los datos de resistividad aparente se calculó la distribución de la resistividad verdadera en el subsuelo mediante los programas de inversión EarthImager 2D y 3D (Advanced

Geosciences, Inc., 2008), obteniendo un perfil de resistividad 2D para cada línea y un modelo 3D para cada tipo de arreglo electrodo empleado.

El método de inversión que se utilizó fue un modelo robusto por que es el mejor en mapear regiones homogéneas y con cambios abruptos de resistividad, además, de ser una solución estable al problema directo, en el caso de zonas con un alto ruido en los datos. Este estudio presenta esas características, ya que se esperan cambios importantes de resistividad debido a los tubos volcánicos, en comparación con la roca ígnea circundante.

Los resultados obtenidos a partir de los diferentes tipos de arreglos en los perfiles de resistividad 2D, indican la existencia de por lo menos 2 tubos lávicos, con espesores que van de 2 hasta 10 m, localizados a una profundidad aproximada de entre 4 y 8 m. Los modelos 3D, permiten una caracterización tridimensional de la estructura en estudio, con lo que se observan 2 grupos de tubos volcánicos que existen, con dimensiones de 20 a 40 m y a una profundidad similar a la descrita anteriormente.

Al comparar los diferentes resultados de los arreglos, en la caracterización de tubos lávicos el arreglo Dipolo-Dipolo permite obtener una visualización de la ubicación de los tubos y su espesor, por la resolución lateral que presenta y la mayor densidad de datos que se tienen de esta configuración; el Wenner-Schlumberger, permite la caracterización en 3D del conjunto de tubos volcánicos, debido a su sensibilidad horizontal y vertical; y el Arreglo Wenner aporta información muy pobre para este estudio debido a su escasa sensibilidad horizontal que no permite identificar el tipo de estructura buscada, además, de tener una densidad de datos inferior a los otros arreglos.

En la conclusión se presentan los resultados de los dos arreglos Dipolo-Dipolo en los perfiles 2D, y Wenner-Schlumberger en el modelo 3D, para la interpretación Geológica-Geofísica final del estudio.

Resumen	1
1. Introducción	3
2. Descripción de la zona de estudio	5
3. Marco Geológico	7
3.1. Tipos de coladas de lava	8
3.2. Estructuras Volcánicas	9
3.2.1. Tipos de Tubos volcánicos	12
3.2.2. Importancia de los Tubos lávicos	13
3.3. Geología en la zona de estudio	14
4. Marco Teórico	16
4.1. Tomografía Eléctrica Resistiva	16
4.2. Teoría básica de inversión	18
4.3. Error RMS (root mean square)	22
4.4. Configuraciones electródicas	22
5. Metodología	25
5.1. Adquisición de datos	25
5.2. Procesado de datos	26
6. Análisis / Discusión Resultados	30
6.1. Resultados Dipolo-Dipolo	32
6.1.1. Perfiles de Resistividad 2D	32
6.1.2. Modelo 3D	35
6.1.3. Comparación de modelos 2D y 3D	36
6.2. Resultados Wenner-Schlumberger	37
6.2.1. Perfiles de Resistividad 2D	37
6.2.2. Modelo 3D	40
6.2.3. Comparación de modelos 2D y 3D	41

6.3. Resultados Wenner	42
6.3.1. Perfiles de Resistividad 2D	42
6.3.2. Modelo 3D	45
6.3.3. Comparación de modelos 2D y 3D	46
6.4. Discusión de Resultados	46
7. Conclusiones	53
Bibliografía	55

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los tubos volcánicos son difíciles de encontrar en la naturaleza debido a que son creados en lavas basálticas que producen coladas del tipo pahoehoe, debido a su viscosidad pueden formar esta estructura volcánica. Los más conocidos se encuentran ubicados en Hawaii; lo que hace que este estudio sea especial debido a que se buscará caracterizarlos en la Ciudad de México, originadas por erupción del Xitle hace $2,030 \pm 60$ años aproximadamente y que formó la zona conocida como el Pedregal de San Ángel (Martín del Pozzo *et al.*, 1997a).

El objetivo de este trabajo radica en dar una localización y caracterización (espesor y profundidad) de los tubos lávicos en un área de 100 x 125 m, en un predio conocido como “Los Encinos” en el Pedregal, en la delegación Tlalpan, esto ayudará a tratar de protegerlos por su importancia ecológica y geológica, del avance en la urbanización que los pone en riesgo por obras civiles.

Este trabajo se presenta para mostrar una aplicación del Método de Tomografía Eléctrica, el cual ha sido una de las técnicas más empleadas en la prospección eléctrica en la disciplina de Ingeniería Geofísica, por sus resultados óptimos en la caracterización de cavidades, fallas, etcétera (Tejero *et al.*, 2002), aplicarlo para la determinación de estructuras volcánicas, lo pone a prueba, si se considera que las rocas ígneas tiene una resistividad aparente entre 10 a 1.3×10^7 (seco) $\text{ohm} \cdot \text{m}$ (Telford *et al.*, 1976), es interesante ver que los resultados obtenidos son correlacionables con los estudios geológicos de la zona.

Los tubos lávicos son de especial interés debido a que son los hábitats de especies animales endémicas y presentan información geológica de la región; la descripción de los rasgos importantes de este tipo de estructura y de otras que existen en la zona, además, de las características de las lavas (origen, composición) que los originan y estudios geológicos en la zona comprueban la existencia de tubos lávicos en “Los Encinos”.

Los fundamentos teóricos del método de Tomografía Eléctrica, así como las características de los distintos arreglos que se emplean en la adquisición de datos como son: Dipolo-Dipolo, Wenner y Wenner-Schlumberger, por ser los más utilizados actualmente y de fácil manejo en

campo, en conjunto con la teoría del problema inverso empleada en este trabajo, permite la obtención de los perfiles de resistividad 2D y los modelos 3D.

Se presenta la metodología empleada, donde se aborda los problemas presentados durante la adquisición de datos de resistividad aparente y su posterior procesado con los programas EarthImager 2D y EarthImager 3D (Advanced Geosciences, Inc., 2008), se mencionan las iteraciones empleadas y los parámetros elegidos para la obtención de nuestros resultados.

El Análisis y Discusión de Resultados parten de los perfiles de resistividad 2D y modelos 3D, se discute cuales son las ventajas y desventajas de aplicar los distintos arreglos y como afectan nuestros resultados obtenidos al caracterizar un mismo problema, considerando que los contrastes de resistividad mayores a 10,000 ohm•m en los perfiles se asocian con los tubos volcánicos buscados.

El estudio realizado representa un esfuerzo para dar un panorama de las implicaciones del método de Tomografía Eléctrica y su aplicación a problemas ambientales en rubros donde no es típico como es el vulcanismo, a su vez reafirmar que las técnicas clásicas de prospección geofísica siguen siendo utilizadas y con los avances tecnológicos, permiten tener resultados que llevan a una interpretación adecuada al fenómeno observado.

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza al SW de la ciudad de México entre los $19^{\circ}17'43''$ y los $19^{\circ}18'18''$ de latitud norte y los $99^{\circ}12'48''$ y los $99^{\circ}13'11''$ de longitud oeste, a una altitud de 2,400 m.s.n.m. El predio se denomina “Los Encinos” ubicado en el límite norte de la delegación política de Tlalpan en el Distrito Federal a un costado de las instalaciones de la Televisora TV Azteca (Fig. 2.1). El extremo norte colinda con el Periférico, arteria que funge como límite Delegacional entre Tlalpan y Coyoacán, al sur colinda con la Colonia Lomas de Padierna, al oeste con la Unidad Habitacional PEMEX-Picacho, y al este con la Universidad Pedagógica Nacional, la Televisora TV Azteca y el Colegio de México.

A continuación se muestra el predio los encinos:

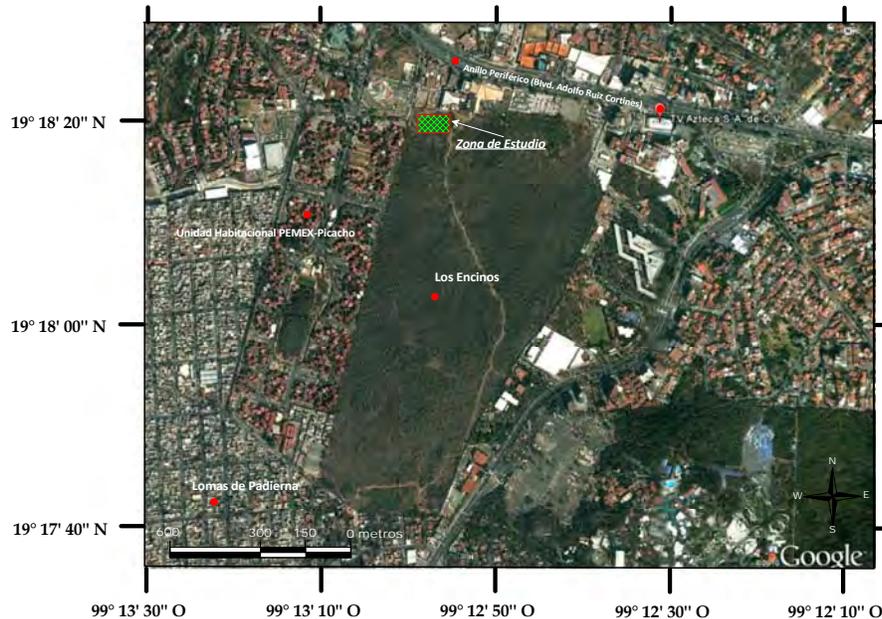


Figura 2.1 Localización del Predio Los Encinos, Delegación Tlalpan, Distrito Federal (Modificada de Google Earth, 2010).

De la Figura 2.1 se observa que es un área verde dentro de la ciudad de México lo que lo hace valioso y que se debe perdurar, para beneficio del ambiente y de los pobladores cercanos. Cuenta con una superficie total de 25 ha. El lugar es de gran relevancia ecológica, ya que cuenta con una superficie considerable de vegetación natural endémica en buen estado de conservación, que proporciona beneficios ambientales en la retención de partículas contaminantes, el amortiguamiento de los cambios de temperatura diurnos y estacionales al sur de la Ciudad de México especialmente a las colonias cercanas.

En el contexto hidrológico-geológico, el área tiene una capacidad natural para la infiltración de agua hacia los mantos acuíferos, de más de 257 millones de litros de agua, además, comprende parte del Sistema de Cuevas Padierna, conformado por 4,291 m de tubos lávicos, que representan el sistema más extenso del Distrito Federal y uno de los más complejos de origen volcánico de la República Mexicana (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2009).



Figura 2.2 Acercamiento al área de estudio (Modificada de Google Earth, 2010).

En la parte noroeste de Los Encinos, es donde se ubica el estudio como se muestra en el área marcada en la Figura 2.2, abarcando una superficie de 100 x 125 m.

CAPÍTULO III

MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca de México pertenece a la Faja Volcánica Transmexicana (Fig. 3.1) esta constituida por lavas y piroclastos principalmente.



Figura 3.1 Localización de los principales volcanes de México (triángulos negros), estos se agrupan entre el paralelo 19° y 20° de latitud norte para formar la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) (Macías, 2005).

En la Sierra de Chichinautzin se tiene la mayor extensión de rocas volcánicas cuaternarias al Sur de la cuenca de México. Las rocas incluidas cubren en forma discordante unidades estratigráficas desde cretácicas marinas plegadas hasta cuaternarias lacustres formando un campo volcánico monogenético, con depósitos cinéuticos y derrames de lavas muy extensos, vesiculares y masivos. La composición petrográfica de estas lavas es principalmente andesítico-basáltico, basáltico y dacítica (Martin Del Pozzo, 1982).

La última actividad volcánica en el valle de México fue en tiempos históricos y está representada por el derrame de composición basáltica conocida con el nombre de Pedregal de San Ángel; tuvo su origen en la pendiente norte de la Sierra de Chichinautzin y se extiende unos 13 o 14 Km hacia el norte (Badilla-Cruz, 1977). En el lugar donde se encuentra un cono cinéutico conocido actualmente con el nombre de Xitle, y hay evidencias de actividad explosiva, tanto antes como después de la efusión de lava.

Maldonado-Koerdell (1954) estima la erupción del Xitle entre 2,000 y 3,000 años basado en la observación morfológica, actualmente Martin del Pozzo *et al.* (1997) determinaron una edad de $2,030 \pm 60$ años, señalan que la erupción empezó con emisión de ceniza, posteriormente un flujo de lava en un área de más de 80 km (distancia entre el Xitle y Chichinautzin).

3.1 Tipos de derrames de lava

Las lavas con bajo contenido de sílice (*básicas*) dan lugar a rocas llamadas basaltos; estas lavas son muy fluidas y a menudo las erupciones ocurren sin explosiones y cubren de lava grandes extensiones, pero no forman volcanes muy altos. De acuerdo con la morfología y la estructura interna de las coladas de lava se dividen en tres grandes grupos: las derrames tipo aa, pahoehoe (ambos nombres provienen del idioma nativo de la isla de Hawai) y bloques (Macdonald, 1972).

Derrame tipo aa (Fig. 3.2a) se caracteriza por una superficie extremadamente áspera parecen escombros, en contraste con la superficie más lisa de pahoehoe, la fragmentación de la superficie de la aa es resultado a la interrupción en los flujos y al movimiento de un flujo debajo de una corteza mas viscosa. La el superficie espinosa se debe al movimiento del flujo que causas fragmentos debido a que los rompe al fluir por debajo de la corteza (Macdonald, 1972).

Derrame pahoehoe o lavas cordadas (Fig. 3.2b) tienen diferentes características a las lavas aa, lo cual se debe a que se desplazan con menor velocidad que las lavas aa, la característica más espectacular de la superficie en los derrames pahoehoe es la aparición de algunas zonas en las que se arruga la corteza formando pliegues, estas formas resultan de la torsión y el arrastre de la corteza delgada, por el movimiento de la lava líquida por debajo de la corteza generada por una temperatura en la superficie. La viscosidad de la lava disminuye rápidamente hacia el interior del derrame (Macdonald, 1972).

El avance de la lava se produce en forma de irregular que se desplazan al mismo tiempo y fluyen por debajo de una costra rígida, solidificada, que evita el enfriamiento de la parte central del conducto como se muestra en la Figura 3.2b. Es común que los tuneles o conductos queden

vacios por el avance de la lava y también son comunes las depresiones producida por el colapso del techo de los mismos (Macdonald, 1972).

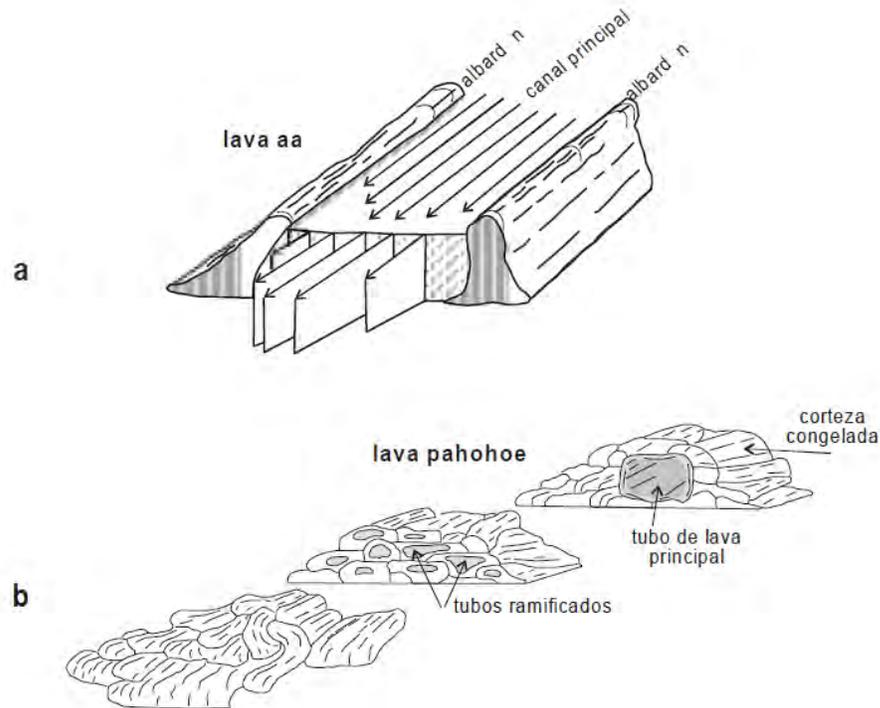


Figura 3.2 Esquema de flujo de lavas aa(a) y pahoehoe(b). Las lavas aa fluyen a través de un canal abierto, con albardones en sus costados. Las lavas pahoehoe fluyen en forma de tubos ramificados por debajo de una corteza solidificada previamente (Llambias, 2001).

Derrames tipo bloque es llamado algunas veces a los flujos de lava que se cubren con fragmentos angulares, en su composición contiene una mayor cantidad de sílice que los derrames aa, por lo que la hace más viscosa y que su desplazamiento sea más lento. Las superficies de los flujos de bloques de lava por lo general son muy irregulares y con crestas de forma perpendicular a la dirección del flujo de lava (Macdonald, 1972).

3.2 Estructuras Volcánicas

El volcán Xitle es un cono cinéritico asociado con lavas pahoehoe extendidas al norte del cono, en donde se observan estructuras como: túmulos, hornitos, tubos de lava, etcétera, con un máximo de profundidad de 35 m, variable debido a la topografía de la zona. El volcán Xitle abarca una área de 80 Km², con un volumen de lava de 0.96 Km³ y 0.12 Km³ de tefra (Delgado *et al.*, 1998; Martín del Pozzo *et al.*, 1997b).

De las estructuras volcánicas identificadas en la zona de estudio por parte de Badilla-Cruz (1977) en las canteras del Cerro de la Escondida Cuicuilco, Ciudad Universitaria, Estadio Azteca, Puente de Piedra, Isidro Fabela, Copilco, se encontraron:

-**Túmulos**. Formas domica-elipsoidal con fracturamiento radial, diámetro entre 10 a 40 m, de altura variable entre los 2 a 5 m y capas buzando hacia todas direcciones, que son numerosas en el área.

La génesis de esta estructura se debe a que al empezar a enfriarse la lava, comienza a cristalizarse de la superficie hacia el centro y de la base hacia el centro del derrame, entonces la parte superior ejerce una presión hidrostática sobre la lava aún líquida de la parte central del derrame que provoca el rompimiento de la costra (capa solidificada) superior y hundimientos de los bloques sobre la lava, esto trae como consecuencia que la lava líquida sea presionada e inyectada hacia los lugares de debilidad, ejerciendo sobre los bloques fracturados un empuje vertical de abajo hacia arriba, lo cual trae como resultado el levantamiento de los bloques, fracturación Radial y formación del túmulo.

-**Crestas de Presión**. Existe en la superficie del derrame una gran cantidad de estas estructuras. Se caracteriza por presentar placas de lava de dimensiones de varios metros cuadrados, con una inclinación variable entre 10° y 80°, divididos por una fractura central de varios metros de longitud, los bloques que la constituyen tienen una anchura de aproximadamente 30 m y una altura variable entre 1.5 y 3 m.

La formación de esta estructura se debe a que al comenzar a enfriarse la lava se empieza a cristalizar de la superficie hacia el centro y de la base hacia la parte central del derrame. Una vez cristalizada la parte superior, ésta ejerce una presión hidrostática debido a su peso sobre la lava aún fluida de la parte central del derrame, que trae como consecuencia el rompimiento de la placa de lava de la parte superior ya consolidada a través de una fractura central que al hundirse en sus extremos sobre la lava líquida trae como resultado las crestas de presión.

-**Derrame de lava** o simplemente colada, es la salida de magma no fragmentado. Desde un punto de vista reológico se trata de un fluido que contiene partículas sólidas. Los derrames pierden calor rápidamente durante su desplazamiento por la superficie, aumentando su viscosidad. Por esta razón, la distancia que recorren depende de la viscosidad, además de la pendiente. Para igual composición los flujos de lava son mucho más viscosos que los flujos piroclásticos (Llambías, 2001).

Las **Diaclasas** son tipo de derrame de lava que se presenta en la roca con una serie de fracturas, perpendiculares a la superficie de la roca preexistente, que dan lugar a una serie de columnas de diferentes formas geométricas. El origen de esta estructura se debe a fracturas que se desarrollan debido a una disminución de volumen que experimenta la lava al consolidarse y continuar el proceso de enfriamiento, esta contracción de la lava trae como consecuencia esfuerzos tensionales que actúan en plano horizontal y provocan el fracturamiento de este tipo de rocas ígneas.

Los **Filamentos y arrugas** son las estructuras superficiales más características de este tipo de roca volcánica, que pertenecen a los derrames de lava. Los primeros una serie de bordos de unos cuantos centímetros de largo, mientras que las arrugas son bordos de forma parabólica de unos cuantos centímetros a varios metros de radio ornamentados por filamentos perpendiculares a su contorno; cuando se encuentran retorcidas semejando cuerdas y en este caso reciben el nombre de estructura cordada.

En canteras son fácilmente reconocibles, pues presentan tres zonas vesiculares; una vesicular inferior de unos cuantos centímetros de espesor; una zona escasamente vesicular intermedia y una última zona densamente vesicular en la parte superior; además, en la superficie de cada derrame se observan filamentos y en ocasiones arrugas que son estructuras características de la superficie de la lava tipo pahoehoe.

-Tubos Volcánicos. Los tubos volcánicos son un medio muy eficiente para el transporte de la lava-aislada térmicamente de la temperatura ambiente a grandes distancias y para recubrir zonas mucho más amplias que las coladas sin tubos (Carracedol *et al.*, 2003).

Según la definición de Kilburn y Guest (1993) son tubos de forma cilíndrica con algún tipo de pendiente, lleno con un líquido viscoso de alta temperatura incrustado en un medio sólido. Los tubos en realidad pueden tener formas rectangulares, circulares e incluso triangulares. Kauahikaua (1998) menciona que raramente los tubos se encuentran llenos de lava, debido a que el líquido fluye bajo la fuerza gravitacional y el calor es transferido por la conducción del medio circundante.

Estos tubos se forman generalmente cuando el aporte de lava es sostenido y uniforme, que contribuye a construir edificios volcánicos más extensos y a que las coladas canalizadas puedan transportar lavas hasta zonas muy alejadas de los flancos de los edificios volcánicos, generando escudos volcánicos de baja pendiente con relación entre la anchura y la altura, de ahí su importancia de este tipo de estructura, los tubos de lava permiten el transporte de lava por grandes distancias.

Por el contrario, las coladas sin tubos tienden a acumular lavas más cerca de los centros de emisión, situadas generalmente en las cumbres de los edificios volcánicos, frecuentemente en rifts bien definidos, por lo que dan lugar a edificios cónicos o dorsales con mayor altura (Carracedol *et al.*, 2003).

Los tubos se forman en los derrames de lava de una erupción volcánica basáltica, sigue una trayectoria dependiendo de la topografía de la zona, y forma ciertos canales por donde converge, estos canales hacen fluir la lava, la cual en contacto con las paredes, el suelo y la atmósfera se empieza a enfriar y por lo tanto a cristalizar, formando una corteza solidificada en la parte superior del flujo, que al paso del tiempo y del flujo, se vuelve más dura y espesa por lo que se forma un tubo (Fig. 3.2). La lava fluye en su interior que se enfría con menor velocidad que si fluyera en el exterior.

Eventualmente, la actividad del flujo de lava se restringe a un conducto dentro del mismo flujo de basalto, el cual alimenta la parte delantera, este conducto es el tubo primitivo de lava. El cese del material volcánico limita del suministro de lava a los ductos, la lava fluye por acción de la gravedad, dejando un ducto vacío o tubo de lava con longitud que puede llegar desde unas decenas de metros hasta algunos kilómetros.

El factor más importante para la formación de tubos de lava es la viscosidad, que se encuentra directamente relacionada con la temperatura, química y los gases disueltos. Un flujo de lava es más fluido y menos viscoso si es de alta temperatura y/o contiene alto contenido de gases disueltos en el fluido. Cuando la lava se enfría, pierde gases, y se cristaliza, se convierte en una

lava más viscosa. El basalto es lo suficientemente fluido que permite el desarrollo de tubos, pero no todos los basaltos que existen forman este tipo de estructura debido a que algunos son demasiado viscosos para su generación (Greeley, 1971).

3.2.1 Tipos de Tubos Volcánicos (Lávicos)

Rusell y Harter (1982) hicieron una clasificación de los tubos volcánicos basada en la estructura de las paredes de la roca encajonante y propone cinco tipos de tubos de lavas: tubos de rift, trinchera verdadera, semitrinchera, tubos de superficie y tubos de interior (Fig. 3.3):

-Tubos de Rift (Rift Tubes): Cuando la lava sale a la superficie en una explosión volcánica (forma fallas o grietas), ésta fluye cuesta abajo. Si la falla sigue cuesta abajo, la lava tiene tendencia a seguir la falla y se le puede llamar tubo de rift. Este canal puede ampliarse y luego puede reducirse drásticamente. Este tipo de tubos tiene forma de cavernas que usualmente son altas y estrechas; las paredes están hechas de roca madre que existía antes de la explosión.

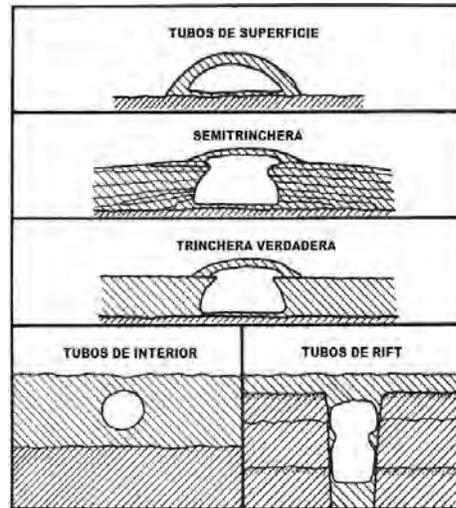
-Trinchera verdadera (True Trenches): Son canales encajonados en una unidad poco consolidada de flujo por la solidificación diferencial de la lava. En las áreas de cuesta abajo, la lava se encuentra con una cavidad o un lugar donde se almacena la lava, haciendo una masa sola (una unidad de flujo), con un canal a través de él. La geometría del canal se parece al de un canal de corriente de agua. Las paredes del tubo son generalmente un solo estrato grueso de lava solidificada.

-Semitrinchera (Semitrenches): Si las paredes de un tubo están compuestas de un número de capas delgadas en vez de un solo estrato de roca ígnea, el tubo es una semitrinchera. Las paredes de la semitrinchera se forman por repetidos desbordamientos a los lados del canal, y hacen diques que se inclinan gradualmente fuera del canal. Los desbordamientos son unidades pequeñas de flujo de lava. Dentro de los tubos de lava fría, los desbordamientos se pueden observar como pequeños estratos horizontales en las paredes. El espesor de los estratos es típicamente de aproximadamente siete a ochenta centímetros.

-Tubos de Superficie (Surface tube): Una corriente pequeña de lava puede solidificarse en su exterior sobre su superficie. Esto forma un tubo donde el techo y las paredes consisten en un solo arco estrato. El tubo se forma enteramente por encima de la superficie, por lo que se le conoce como tubo de superficie. Los tubos de la superficie son típicamente pequeños y son alimentados de tubos de mayor tamaño (trinchera o de rift).

-Tubos de Interior (Interior Tube): Dentro de una sola unidad de flujo de lava gruesa, los canales pueden formarse dentro del interior de la masa de lava. Los tubos yacen enteramente dentro de una sola unidad de flujo, los tubos interiores son de sección elíptica, con la anchura cercana al 10 % mayor que la altura. El tubo interior es la forma termal de equilibrio, así es que los otros tipos de tubos tienden a tomar esta forma. Este tipo de tubo es el que buscamos caracterizar mediante el presente estudio.

A continuación se presenta la Figura 3.3 donde se ilustran los diferentes tipos de tubos volcánicos, ya mencionados que clasificaron Rusell y Harter (1982):



//// Roca del terreno o antes del flujo //// Lava del flujo del tubo

Figura 3.3 Diferentes tipos de tubos volcánicos (Russell y Harter, 1982).

En las paredes de los tubos volcánicos se pueden identificar algunas estructuras donde se encuentra descubierta la roca encajonante, debido a colapsos del mismo tubo, exponiendo los estratos de la pared. Habrá vesículas del gas cerca de la mitad de las unidades delgadas del flujo, debido al proceso de enfriamiento de la lava, que sirven para identificar la cantidad de flujo que existió de lava durante la formación del tubo (Greeley, 1971).

3.2.2 Importancia de los tubos lávicos

Al igual que con otros tipos de cavernas, los tubos de lava proveen únicos y frágiles ecosistemas de flora y fauna. Cuando los tubos de lava colapsan crean una entrada o tragaluz, formando una zona protegida de depredadores y de cambios de clima, pueden albergar una colección variada de plantas y animales como son roedores, ardillas, búhos, aves, y las colonias de insectos que pueden ser encontrados vivos en la caverna de lava.

Los tubos de lava generalmente se forman cerca de la superficie, así las raíces de árboles crecen por encima de los pasajes y pueden extenderse en la caverna. Estas raíces pueden formar una especie de selva cubierta, donde pueden existir animales como el Troglobite que es un organismo adaptado para vivir en oscuridad total. Puede haber otras especies de animales como: cangrejo de río, salamandras, insectos, peces y arañas.

Otra característica importante de los tubos volcánicos es el desarrollo de formaciones primarias como: estalactitas, estalagmitas, columnas, entre otras. Algunas con colores llamativos como rojo volcánico, amarillo, y naranja, así como también el gris más común o el negro de pahoehoe común (National Speleological Society, 2010).

3.3 Geología en la zona de estudio

El Xitle es uno de los últimos volcanes monogénéticos en el campo del Chichinautzin, consiste de lavas tipo basáltico (51-53% SiO₂). Ocupa un área aproximada de 80 Km², con un flujo principal hacia el norte de más que 13 Km que abarca una zona de 70 Km² (Fig. 3.4a), que se extendió mediante un sistema complicado de tubos de lava, formando otras estructuras volcánicas como: hornitos (los conos salpicados), túmulos, cordilleras de presión, etcétera (Martín del Pozzo *et al.*, 1997b).

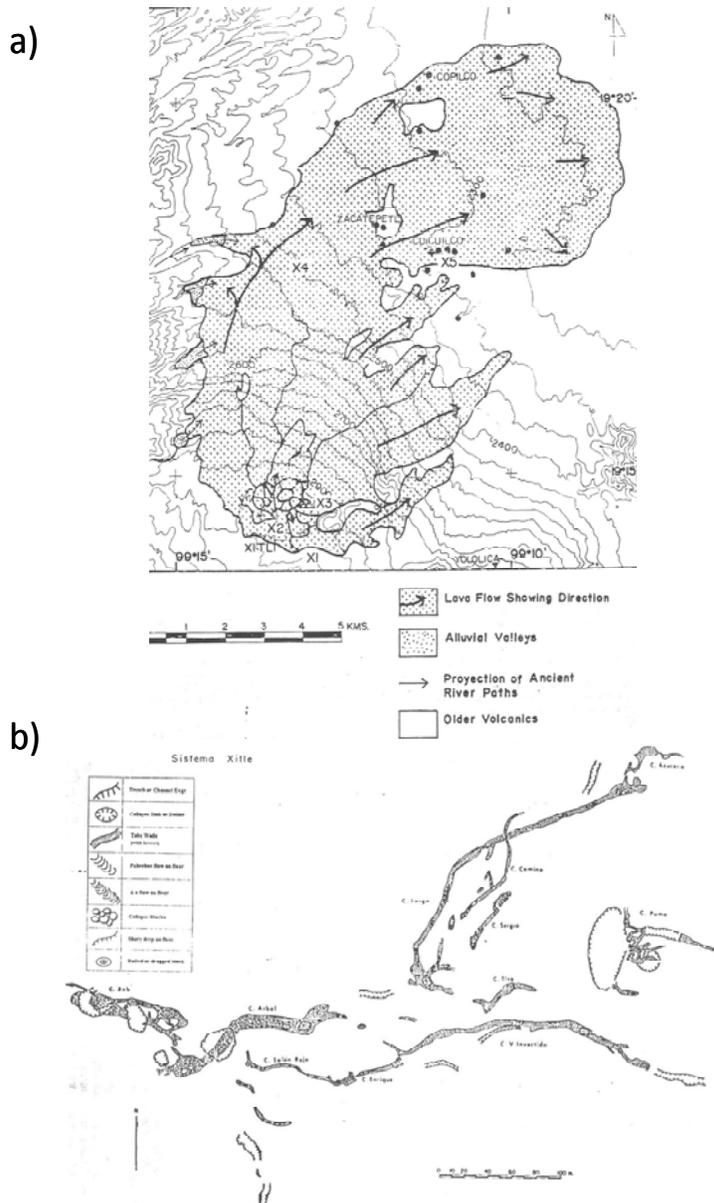


Figura 3.4 a) Mapa de la extensión de la erupción del Xitle, b) Mapa del sistema de tubos de lava del Xitle (Martín del Pozzo *et al.*, 1997).

De acuerdo con Martín del Pozzo *et al.* (1997b), la explicación de la formación de los tubos de lava en la zona es la solidificación de una corteza de la superficie sobre lava líquida y a la existencia de tubos secundarios de lava, por los que siguió fluyendo una cantidad continua de lava, que por la temperatura existente permitió fundir la corteza que separaba entre sí a los secundarios tubos, ayudando a que se unieran una cantidad de tubos y formando un tubo maestro (anastomosis) . Estos tubos en el Xitle se extienden por 8 Km en un sistema complejo de tubos como los que se muestran en la Figura 3.4b. Entre más lejana era la distancia, menor era el flujo de lava que circulaba por los tubos secundarios, lo que impedía que se siguieran formando tubos maestros. En base a estos estudios se estarían buscando tubos maestros y de acuerdo a la clasificación de Russell y Hartet (1982), los tubos interiores son la estructura ígnea que se estaría buscando en la zona de Los Encinos, con diferentes morfologías y tamaños en este estudio.

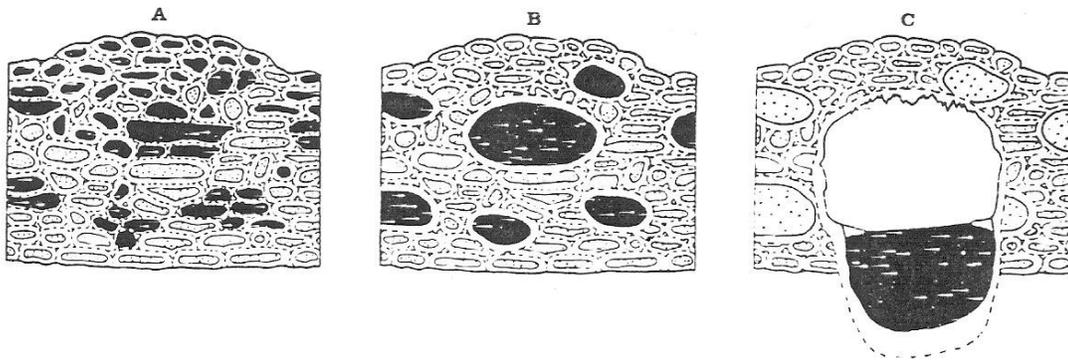


Figura 3.5 La evolución de los tubos lávicos dentro de un flujo de lava (Martín del Pozzo *et al.*, 1997).

De la Figura 3.5, se desprende que las etapas que tiene la evolución de un tubo de lava son:

- a) El flujo principal es separado como una serie de pequeñas unidades de flujo (tubos secundarios), la mayor parte de de ellos se enfría (solidificándose) completamente, algunos se continúan alimentando de la parte principal del flujo, el calor origina que se fundan las capas que separan a las unidades mas cercanas y creen unidades de mayor tamaño (tubos volcánicos).
- b) Como el flujo avanza, las unidades siguen creciendo al unirse con mas unidades por de flujo (anastomosis), esto genera un sistema tridimensional de tubos de mayor tamaño y longitud.
- c) Un tubo volcánico en una buena posición eventualmente captura el flujo del resto de los secundarios tubos cercanos, el calor hace que las partes inferiores del tubo se fundan, permitiendo que el flujo de lava continúe fluyendo y/o creando nuevos tubos secundarios.

CAPÍTULO IV

MARCO TEORICO

4.1 Tomografía Eléctrica Resistiva

Tomografía Eléctrica Resistiva o ERT (del inglés Electrical Resistance Tomography) es un método utilizado para estimar la distribución de resistividad eléctrica en una sección del subsuelo, a partir de la adquisición de mediciones de resistividad aparente realizadas con un cuadripolo de electrodos (2 corriente y 2 potencial) en una geometría determinada, posteriormente se les aplica un algoritmo de inversión, para obtener así una imagen eléctrica (un modelo de resistividad verdadera en 2D ó 3D del subsuelo).

Una corriente eléctrica continua puede propagarse en rocas y minerales de tres maneras distintas: por conducción electrónica u óhmica (los electrones fluyen libremente dentro de la estructura cristalina del material), por conducción electrolítica (la corriente es portada por los iones de soluciones salinas, a una velocidad lenta, y se mueven a través de los poros interconectados de suelo permeable, sedimentos no consolidados y rocas) y por conducción dieléctrica (en materiales de baja conductividad o aislantes cuando se aplica una corriente variable en el tiempo). La mayoría de las rocas no contienen materiales de tipo metálico, por lo que su conductividad eléctrica se debe a los iones y a su movilidad a través del agua almacenada en los poros de las rocas; la presencia de iones está estrechamente relacionada con el contenido de agua en la roca y las sales que contenga en disolución (Telford *et al.*, 1976).

La resistividad del subsuelo varía de acuerdo con el contenido y clase de minerales y fluidos, de su porosidad y grado de saturación de agua (Loke y Baker, 1996a).

Para representar las mediciones en un sondeo eléctrico 2D se utiliza el método de contornos o pseudosección. En estos casos, la ubicación horizontal del punto de medición (punto de atribución) se pone en medio entre los electrodos del arreglo o dispositivo utilizado. La ubicación vertical del punto de medición se dispone a una distancia que es proporcional a la separación entre los electrodos.

La pseudosección presenta una distribución aproximada de la resistividad del subsuelo, debido a que la forma de los contornos depende del tipo de arreglo o configuración eléctrica utilizada,

así como también, de la resistividad del subsuelo. Las diferentes configuraciones utilizadas para una misma zona pueden dar origen a representaciones gráficas o pseudosecciones muy diferentes. Una equivocación común es tratar de usar la pseudosección como una imagen final de resistividad verdadera del subsuelo.

Una aplicación práctica y de gran utilidad de la pseudosección es escoger y reconocer medidas de resistividad aparente “malas”, ya que tales medidas comúnmente aparecen como puntos con valores extraordinariamente altos o bajos.

En comparación con los SEVs (Sondeos Eléctricos Verticales) y las calicatas que utilizan cuatro electrodos y se toman unas decenas de mediciones, la tomografía requiere hablar de diez o centenares de electrodos y hacer centenares o miles de tales medidas. Claramente, los sistemas manuales disponibles de medidas que fueron diseñados para una, o quizá algunas medidas a la vez, no fueron prácticos para Tomografía Eléctrica. Los sistemas de alta velocidad, automatizados fueron necesarios y son los que utilizan actualmente en la adquisición de información.

El sistema automatizado actual es mucho más rápido que la adquisición manual y eliminó el cambio de conexión con los electrodos y errores en la transcripción de datos a un medio digital (computadora). El día de hoy, los sistemas de medidas están comercialmente disponibles, resultando de diez a veinte veces más rápido (hasta algunas mil medidas por hora) el proceso de la toma de medidas, además, pueden tomarse simultáneamente medidas con centenares de electrodos (Butler *et al.*, 2005).

En una ERT, se usan cuatro electrodos para hacer la medida, para minimizar el efecto de resistencia de contacto en la interfaz entre el agua del poro del terreno y el electrodo. Una corriente conocida es inyectada en dos electrodos y la diferencia potencial es medida en los otros electrodos.

Los errores en la medición no son generalmente aleatorios, dependen entre otras cosas del entorno en donde se lleve a cabo las mediciones, la inversión de datos se ve afectada fuertemente por este tipo de errores, además, la resolución del perfil final dependerá de la distribución de la resistividad en el subsuelo y de la geometría de electródica, entre otros factores (Tejero *et al.*, 2002).

Butler *et al.* (2005) asegura que:

- 1) Es importante lograr que todos los datos sean linealmente independientes para probar la configuración de electrodos. Con esto se logra cualquier medida adicional mediante la superposición lineal de medidas ya asumidas.
- 2) Es necesario para probar el arreglo, obtener cada medida y su recíproco. Una medida recíproca se hace intercambiando el par de electrodos que se empleó para la medida de voltaje con el par de electrodos que se usó para la inyección. La impedancia de transferencia para estos dos casos será idéntica si el sistema responde linealmente (i.e., según la ley de Ohm) y allí no habrá ningún error de medida. Por consiguiente, una

comparación de una resistencia de medida con su recíproco provee una estimación del error de datos que es un señalizador más confiable de error que repetibilidad del equipo.

4.2 Teoría básica de inversión

La finalidad de la inversión de los datos para una Tomografía Eléctrica Resistiva es hallar un modelo de la distribución de resistividades de una sección del subsuelo que se ajuste con las mediciones de resistividad obtenidas sobre la superficie (Loke y Baker, 1996b).

Para calcular una imagen de resistividad de datos mediante el método de Tomografía Eléctrica, hay que llevar a cabo un procedimiento de inversión que produce un modelo que da un ajuste "aceptable" para los datos y satisface cualquier restricción prescrita en el modelo, desafortunadamente, un ajuste aceptable puede ser mirado como subjetivo.

Se puede empezar con una función objetivo que define qué tan bien el modelo de inversión reproduciría el campo de las mediciones (mediciones de campo) para un nivel de incertidumbre en los datos (error). Así, el procedimiento numérico requiere tres elementos:

- a) Un modelo directo que calcula la resistencia para secciones 2D ó 3D.
- b) Una función objetivo que indica los criterios del modelo de ajuste que será adoptada,
- c) y un algoritmo de búsqueda que determina la forma en la cual el modelo "óptimo" de resistividad es encontrado.

Dahlin *et al.* (2002), dice que el método de mínimos cuadrados con ajuste suavizado se utiliza para determinar la resistividad de los bloques en el modelo de inversión para los datos adquiridos en campo, este método se basa en la siguiente ecuación:

$$(\mathbf{J}_i^T \mathbf{J}_i + \lambda_i \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \Delta \mathbf{r}_i = \mathbf{J}_i^T \mathbf{g}_i \dots (1)$$

Donde i el número de iteración, \mathbf{J}_i es la matriz Jacobiana de las derivadas parciales, \mathbf{g}_i es el vector que contiene la diferencia entre los algoritmos de los valores medidos y calculados de la resistividad aparente. λ_i es el factor de amortiguamiento. El vector $\Delta \mathbf{r}_i$ contiene los cambios en los valores del modelo de resistividad para cada iteración, y \mathbf{r}_{i-1} son los valores del modelo de resistividad previo en cada iteración. El filtro de rugosidad \mathbf{C} es usado para el ajuste suavizado del modelo de resistividad resultante con el con el fin de impedir soluciones inestables y extremas. El factor de amortiguamiento determina relativamente la importancia de reducir datos desajustados y la suavidad del modelo. Los métodos de diferencias finitas o elemento finito se usan para calcular los valores de resistividad aparente, así como los valores de la matriz Jacobiana para el modelo de inversión.

Se utilizan métodos iterativos para obtener en cada iteración el modelo (la matriz de sensibilidad o Jacobiana) y los datos usando algún método numérico (diferencias finitas o elemento finito), el tiempo de cálculo y capacidad computacional (capacidad de cálculo), limitan estos métodos. Loke y Barker (1996b) utilizan el método de cuasi-Newton que reduce el tiempo de cálculo.

Loke y Barker (1996b) y Dahlin *et al.* (2002), describen el método de cuasi-Newton, el cual consiste básicamente en calcular la matriz Jacobiana J_i para cada iteración i -ésima es remplazada por la aproximación B_i , que se obtiene de la siguiente ecuación:

$$B_{i+1} = B_i + u_i p_i^T \dots(2)$$

Donde:

$$u_i = (\Delta y_i - B_i p_i) / p_i^T p_i$$

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i,$$

B_{i+1} es la aproximación de la matriz Jacobiana para cada $(i+1)$ esima iteración, y_i es el modelo resultante en cada i -ésima iteración y Δy_i es el cambio en el modelo resultante en cada i -ésima iteración.

Loke y Barker (1996b), mencionan un modelo 2-D de inversión basado en el criterio de mínimos cuadrados, divide la superficie del subsuelo en un número de bloques rectangulares, la resistividad de estos bloques se ajusta de una manera iterativa para minimizar la diferencia entre los valores medidos y los calculados de la resistividad aparente

Esta aproximación da resultados satisfactorios para las modalidades Wenner y Wenner-Schlumberger donde el punto de atribución en la pseudosección cae en un área con valores altos de sensibilidad. Sin embargo, esto no es aplicable para modalidades tales como Dipolo-Dipolo y Polo-Dipolo donde el punto de atribución en la pseudosección cae en un área con valores de sensibilidad bajos (Urbieta, 2001).

Tejero *et al.* (2002) menciona que para obtener la imagen eléctrica (perfil de resistividad) puede ser dividida en 2 pasos: 1) adquisición de datos, y 2) inversión para estimar la resistividad verdadera del subsuelo. El modelo matemático comprende los siguientes pasos:

- 1) Obtener la resistividad aparente mediante algún método como diferencias finitas o elemento finito.
- 2) Seleccionar una técnica de optimización no lineal.
- 3) Evaluar los elementos de la matriz Jacobiana.
- 4) Resolver el sistema de ecuaciones.

Un semiespacio homogéneo con una resistividad constante se asume que contiene inhomogeneidades laterales para aproximar el modelo de la tierra. El modelo de la tierra se compone de una serie de prismas cercanos 2D (dominios). Cada dominio se supone homogéneo

y de extensión infinita en la dirección “y”, por lo tanto, una mejor representación de la resistencia lateral en profundidad se puede obtener usando un mallado mas fino. Sin embargo, la densidad de datos y errores de medida limita la calidad de las soluciones.

Loke y Barker (1995, 1996b) desarrollaron el algoritmo matemático empleado para obtener la imagen de resistividad (cuasi-Newton). Esta técnica está basada en el método de mínimos cuadrados.

A continuación se describe brevemente el proceso inverso tomado de Tejero *et al.* (2002) para obtener el modelo de resistividad del terreno en 2D:

La resistividad aparente (ρ_{app}) puede ser expresada en términos de un desarrollo de Taylor de primer orden como:

$$\rho_{app} = F(\vec{p}) + \sum_{k=1}^M \frac{\partial F(\vec{p})}{\partial p_k} \delta p_k \dots (3)$$

Donde \vec{p} es el vector de parámetros de dimensión M. por ejemplo, la resistividad verdadera del prisma k_{th} es p_k y $F(\vec{p})$ es la función para determinar la resistividad aparente.

Se define la diferencia entre la resistividad observada y calculada en el sitio observado j_{th} por la ecuación 3 como:

$$\delta \rho_{appj} = \rho_{appj}^{obs} - \rho_{appj}^{est}$$

Donde ρ^{obs} es resistividad observada y ρ^{est} es resistividad estimada.

La función de error cuadrático puede estar definida como:

$$E^2 = \sum_{j=1}^N \delta \rho_{appj}^2 = \sum_{j=1}^N (\rho_{appj}^{obs} - \rho_{appj}^{est})^2 = \sum_{j=1}^N (\rho_{appj}^{obs} - F_j(\vec{p}) - \sum_{k=1}^M \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k} \delta p_k)^2 \dots (4)$$

Donde N es el número de mediciones.

Simplificando la ecuación 4 con respecto al vector \vec{p} tenemos que:

$$\frac{\partial E^2}{\partial \delta p_i} = 2 \sum_{j=1}^N (\rho_{appj}^{obs} - F_j(\vec{p}) - \sum_{k=1}^M \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k} \delta p_k) \left(-\frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_i} \right) = 0 \dots (5)$$

Donde $i= 1, \dots, M$. La expresión (5) se define como la ecuación de ajuste normal, que se puede mostrar como:

$$\sum_{k=1}^M \delta p_k \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k} \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_i} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k} \delta \rho_{appj} \dots (6)$$

La ecuación (6) es comúnmente expresada en forma de matrices, que se modifica para obtener una solución en términos de $\delta \vec{p}$ (Loke y Barker, 1995), donde:

$$\delta \vec{p} = (J^T J + \lambda C^T C)^{-1} J \delta \vec{\rho}_{app} \dots (7)$$

Símbolo (T) indica la matriz transpuesta, los elementos de la matriz Jacobiana (J) son definidas en la ecuación (7) de la forma:

$$J_{jk} = \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k} \dots (8)$$

λ en la ecuación (7) es el factor de amortiguamiento y C es un filtro de alisamiento usado para limitar la suavidad de los parámetros del modelo a un valor constante.

Loke y Barker (1995) resolvieron la ecuación (8) usando el método llamado deconvolucion de mínimos cuadrados. El valor de la derivada de la función $F(\vec{p})$ es la derivada de la función potencial $U(\vec{r})$ con respecto a la resistividad verdadera de cada uno de los prismas. Para un arreglo de electrodos la función se encuentra por superposición. Por lo tanto, para una fuente en las coordenadas $(a, 0, 0)$, y para un potencial en los electrodos con coordenadas $(x, 0, 0)$, la derivada de la función potencial puede ser expresada como:

$$\frac{\partial U(r)}{\partial p_i} = \frac{\partial}{\partial p_i} \sum_{i=1}^L U_i(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{V_i} \left[\frac{x'(x'-a) - y'^2 - z'}{[x'^2 + y'^2 + z'^2]^{3/2} [(x-x')^2 + y'^2 + z'^2]^2} \right] dV_i \dots (9)$$

x' , y' , z' son el conjunto de coordenadas dentro del prisma, L es el numero de prismas y dVi es el volumen en cada dominio.

La ecuación (9) es valida para pequeños contrastes de resistividad de prismas cercanos.

Urbietta (2001) ha demostrado que cuando existe un contraste de resistividad entre diferentes estructuras del subsuelo, el algoritmo derivado por Loke y Barker (1996a) da buenos resultados en la definición de grandes contrastes de resistividad (por ejemplo, cuevas), lamentablemente, el método subestima la verdaderas resistividades, a pesar de dar la ubicación correcta de la función anómala.

4.3 Error RMS (Root Mean Square)

El error RMS (root mean square) es la diferencia entre los valores medidos y modelados es conocido como error cuadrático medio, sirve como criterio de paro en el proceso de inversión, que se define:

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{\left(\frac{d_i^{pred} - d_i^{meas}}{d_i^{meas}} \right)^2}{N}} * 100\%,$$

Donde N es el numero total de mediciones, d^{pred} son datos del modelo calculado y d^{meas} es el dato medido.

De los objetivos de una inversión es el de reducir los datos entre el campo medido y los datos calculados con la reconstrucción del modelo. Las mediciones usualmente tienen un error de entre 1% y 5%, debido a errores numéricos y de redondeo (Advanced Geosciences, Inc., 2008).

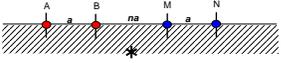
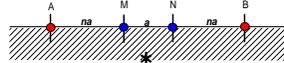
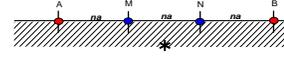
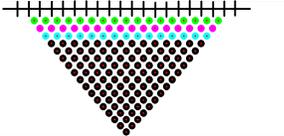
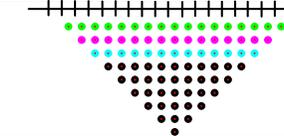
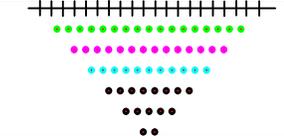
4.4 Configuraciones electródicas

Una configuración electródica, arreglo, modalidad, geometría o dispositivo electródico, consiste en electrodos de potencial y electrodos de corriente; aquellos por medio de los cuales se inyecta una corriente (I) al subsuelo son los de corriente, los de potencial son aquellos en los que se lee el valor de la diferencia de potencial (ΔV) generado por la corriente inyectada.

En la practica, un dispositivo electrodo consta de 4 electrodos (dipolares); dos de corriente y dos de potencial, que pueden adoptar cualquier disposición geométrica sobre el plano que representa la superficie del terreno (Urbietta, 2001), sin embargo, existen otras configuraciones como la Polo-Polo y Polo-Dipolo, que no utilizan este número de electrodos.

Se presenta la Tabla 1, donde se muestran las tres configuraciones utilizadas en este estudio, señalando sus características más importantes:

Tabla 1 Diferentes configuraciones donde: Z_e profundidad media de investigación (Edwards, 1977), a espaciamiento entre 2 electrodos (dipolo), n factor de separación entre el dipolo, ρ resistividad.

Arreglo	Dipolo-Dipolo	Wenner-Schlumberger	Wenner																								
Configuración del arreglo																											
Pseudosección																											
Factor Geométrico (k)	$n(n+1)(n+2)\pi a$	$n(n+1)\pi a$	$2\pi a$																								
Z_e/a	<table border="1"> <tr><td>n=1</td><td>0.416</td></tr> <tr><td>n=2</td><td>0.697</td></tr> <tr><td>n=3</td><td>0.962</td></tr> <tr><td>n=4</td><td>1.220</td></tr> <tr><td>n=5</td><td>1.476</td></tr> <tr><td>n=6</td><td>1.730</td></tr> </table>	n=1	0.416	n=2	0.697	n=3	0.962	n=4	1.220	n=5	1.476	n=6	1.730	<table border="1"> <tr><td>n=1</td><td>0.52</td></tr> <tr><td>n=2</td><td>0.93</td></tr> <tr><td>n=3</td><td>1.32</td></tr> <tr><td>n=4</td><td>1.71</td></tr> <tr><td>n=5</td><td>2.09</td></tr> <tr><td>n=6</td><td>2.48</td></tr> </table>	n=1	0.52	n=2	0.93	n=3	1.32	n=4	1.71	n=5	2.09	n=6	2.48	0.519
n=1	0.416																										
n=2	0.697																										
n=3	0.962																										
n=4	1.220																										
n=5	1.476																										
n=6	1.730																										
n=1	0.52																										
n=2	0.93																										
n=3	1.32																										
n=4	1.71																										
n=5	2.09																										
n=6	2.48																										
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> -Profundidad de investigación aproximada del 15% de la longitud total del tendido. -Presenta buena resolución lateral. -Es el más sensitivo a los cambios ρ entre los electrodos de cada par bipolar. -Sensitivo a cambios horizontales de ρ. -Tiene buena cobertura horizontal, mejor que el Arreglo Wenner. 	<ul style="list-style-type: none"> -Profundidad de investigación aproximada del 30% de la longitud total del tendido. -Intensidad de señal bastante fuerte. -Esta modalidad es moderadamente sensitiva tanto a estructuras horizontales como verticales. -Ligeramente mejor cobertura horizontal que la configuración Wenner. 	<ul style="list-style-type: none"> -Profundidad de investigación aproximada del 20% de la longitud total del tendido. -Resolución lateral razonablemente buena. -Sensitivo a cambios verticales en la ρ del subsuelo, bajo el centro del arreglo. -Ideal para estructuras horizontales. Su intensidad de señal es fuerte. Esto puede ser un factor decisivo si el estudio es hecho en áreas con alto nivel de ruido ambiental. 																								
Desventajas	-Profundidad	La intensidad de la señal	-Es menos sensitivo a																								

	<p>investigación somera.</p> <p>-El ruido ambiental afecta los datos fuertemente.</p> <p>-Se pierde muy rápido la señal.</p> <p>-Es relativamente insensitivo a cambios verticales de ρ.</p> <p>-La intensidad de señal es pequeña para valores muy grandes de n.</p>	<p>es mas pobre que la configuración Dipolo-Dipolo y mayor que la del arreglo Wenner.</p> <p>-Pobre resolución lateral.</p>	<p>cambios horizontales de ρ.</p> <p>-Su densidad de datos es muy pobre.</p> <p>-Pobre en la detección de estructuras verticales.</p> <p>-Pobre cobertura horizontal.</p>
Aplicaciones	<p>-Es útil para mapear estructuras verticales como: fallas, diques cavernas, etcétera</p>	<p>En la búsqueda de estructuras horizontales y verticales.</p>	<p>Ideal para mapear estructuras horizontales sills o estratos sedimentarios.</p>

CAPÍTULO V

METODOLOGÍA

Los objetivos planteados según la geología existente y el tiempo de su realización son:

- a) Aplicar el Método de Tomografía Eléctrica en una zona de alto contraste resistivo, mediante la comparación de los resultados obtenidos con tres diferentes tipos de arreglos (Dipolo - Dipolo, Wenner - Schlumberger y Wenner).
- b) Caracterizar y/o mapear los tubos lávicos en perfiles de resistividad 2D y modelos 3D, con los diferentes tipos de arreglos (La geometría detallada de estas estructuras del subsuelo es de interés para su correcta caracterización e interpretación).

Con dichos objetivos se planteó la campaña de campo: hacer 5 Líneas de Tomografía Eléctrica con dirección Este-Oeste, con una longitud de 125 m, con espaciamiento entre electrodos de 5 m y de 25 m entre cada una de las líneas a medir, en la zona de estudio en “Los Encinos” (Fig. 2.2).

Se hace la mención que el lugar para hacer dichas líneas de Tomografía Eléctrica fueron propuestas debido a que en esa zona se observan por la geología indicios de las estructuras volcánicas (tubos lávicos) que cruzan perpendicularmente, por lo que se busca caracterizar dichos tubos volcánicos a profundidad.

El equipo empleado fue un Resistivímetro automatizado SYSCAL-PRO, Switch 48 de Iris Instruments, el cual se empleó para la toma de mediciones de los tres arreglos que se emplearon: Dipolo-Dipolo, Wenner-Schlumberger, Wenner.

La toma de datos topográficos se realizó con el nivel LEICA, modelo NA724 en cada una de las posiciones de los electrodos, las irregularidades en la zona de estudio aumentó la dificultad en la adquisición de los datos de resistividad.

5.1 Adquisición de datos

Teniendo determinada la zona donde se realizaría el estudio y la dirección de las líneas, se estableció la ubicación de cada uno de los electrodos que se colocarían en las cinco líneas, que permitirían mediante los distintos tipos de arreglos, hacer Tomografías Eléctricas para determinar las características morfológicas de las estructuras volcánicas, en ese lugar.

Debido a que en el lugar de estudio, el suelo roca ígnea (alto contraste resistivo), su dureza no permite que los electrodos se han fácilmente colocados, por lo que se procedió a realizar perforaciones en cada uno de los lugares que correspondía a cada electrodo, con una profundidad promedio de 10 cm, situación que en conjunto con los cambios topográficos en la zona, hizo que se complicara la colocación del equipo, lo que aumento el tiempo que se tenía planeado para la adquisición de datos.

5.2 Procesado de datos

Para el procesado de la información obtenida se utilizaron los programas EarthImager 2D (Advanced Geosciences, Inc., 2008) y EarthImager 3D (Advanced Geosciences, Inc., 2008), utiliza tres algoritmos de inversión los cuales son: mínimos cuadrados con amortiguamiento, modelo suavizado e inversión robusta. Genera un modelo de las variaciones laterales y verticales de la distribución de la resistividad del subsuelo por medio de perfiles. El algoritmo utiliza un método iterativo de inversión. El proceso de inversión minimiza la diferencia entre los valores de resistividad aparente calculados y medidos. El algoritmo determina la resistividad de los “bloques rectangulares” que son los parámetros del modelo y producen una sección de resistividades aparentes que corresponde a los datos obtenidos. El número de bloques rectangulares coincide con el mismo número de datos obtenidos con la sección de resistividades aparentes y además son arreglados de manera similar. El método de inversión es relativamente rápido, pero la reconstrucción del modelo de resistividades tiende a ser rugoso debido a la falta de condicionamiento rugoso. El método de inversión robusta es el que mejor funciona sobre datos ruidosos y resuelva fronteras de resistividades. El método de inversión con suavizado es estable y robusto (Urbieta, 2009).

Se eliminaron los datos erróneos mediante la visualización de la pseudosección de los datos adquiridos en campo, siguiendo el criterio de eliminar aquellas mediciones extremas que se salieran del rango observado en cada pseudosección.

Las resistividades aparentes negativas en estudios 2D se deben a problemas en la adquisición del equipo, debido a que la en las mediciones del diferencia de potencial (ΔV) son tan pequeñas en algunas ocasiones que están por debajo de la precisión del equipo, afectando el la medición hecha, además, la influencia del factor geométrico (k), hacen que las resistividades negativas se consideren como erróneas, la demostración de lo señalado se encuentra fuera de los objetivos de este trabajo. Por lo tanto se eliminaron las resistividades negativas en las inversiones 2D.

La inversión de un modelo robusto tiende a producir regiones homogéneas y con límites abruptos de resistividad, por lo que conviene aplicarlo cuando previamente se esperan estas características en el subsuelo (Urbieta, 2009), en el presente trabajo se esperan resistividades altas ($> 10,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) asociadas a los tubos lávicos, con lo que se esperarían cambios de resistividad en comparación con la roca ígnea ($1,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$). Tomando en consideración este antecedente se eligió este tipo de inversión.

Como ejercicio se realizo una inversion suavizada en 2D debido a que era estable y robusta, dando resultados con resistividades verdaderas menores en $2,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ con respecto a la inversion robusta, pero debido a las anomalias de alta resistividad que en este estudio se asocian

con los tubos volcánicos, en la inversión suavizada no se alcanzaba a observar de la misma forma que en la inversión robusta, esto se le atribuyó a que una inversión suavizada utiliza interpolaciones en los procesos numéricos, que afectan los modelos, por lo que no se escogieron dichos resultados en este trabajo.

Según Butler *et al.* (2005) las soluciones numéricas para el modelo directo para distribuciones de resistividad se usan las técnicas del elemento finito (FE) o las aproximaciones de diferencias finitas (FD). En ambos casos las regiones están discretizadas en puntos o nodos y una solución aproximada es determinada en estos puntos. La variación en la resistividad es lograda asignando valores en un elemento por elemento (FE) o de celda por celda (FD).

En comparación con el método de diferencias finitas la aproximación del elemento finito acepta flexibilidad en la discretización y así puede ser preferida para lugares donde la topografía es irregular y los electrodos quedan posicionados irregularmente. La aproximación FD, sin embargo, es por mucho más simple en funcionamiento y computacional y más eficiente para una geometría plana.

Los parámetros escogidos se debieron a que eran los más óptimos para nuestros objetivos, de entre ellos se procedió a utilizar el elemento finito como método para la solución del problema directo, por que los cambios en la topografía en la zona de estudio afectan el modelo inverso que el programa EarthImager 2D (Advanced Geosciences, Inc., 2008) genera, para obtener los perfiles de resistividad finales.

Se empleó un RMS de 5% en este estudio, los resultados que se obtuvieron en los perfiles de resistividad 2D y modelos 3D, no satisficieron este error en algunas ocasiones, el criterio de paro que el programa de inversión EarthImager 2D y EarthImager 3D (Advanced Geosciences, Inc., 2008) que empleo fue el número de iteraciones que se le asignaron, se decidió no tratar de bajar el valor de RMS de esos modelos, por que se perdían resolución en las imágenes eléctricas al realizarlo.

Los parámetros de resistividad máxima y mínima empleados dependieron de los datos obtenidos en campo, colocando valores mayores a ellos, este rango de resistividades afectaban al modelo de inversión final. Las quince iteraciones usadas como criterio de paro, permitían resultados acordes a los esperados en nuestros perfiles de resistividad 2D.

Los datos topográficos fueron procesados en una hoja de cálculo, tomando como referencia principal el electrodo 1 de la línea 1, para tener la topografía de la zona referida a un punto, debido a que la zona de estudio se tienen cambios abruptos de topografía, asociados a estructuras volcánicas como: túmulos y crestas de presión; además de la existencia de colapsos de tubos lávicos. Los efectos topográficos abruptos causan dispersión de la corriente inducida cerca de la superficie del terreno provocando anomalías de conducción y por ende datos erróneos de resistividad aparente (Urbieta, 2001).

A los datos en el EarthImager 2D (Advanced Geosciences, Inc., 2008) se le agregaron la información de la topografía de cada línea, antes de realizar la inversión (Fig. 5.2), que dio como resultado cinco perfiles de resistividad para cada uno de los arreglos empleados.

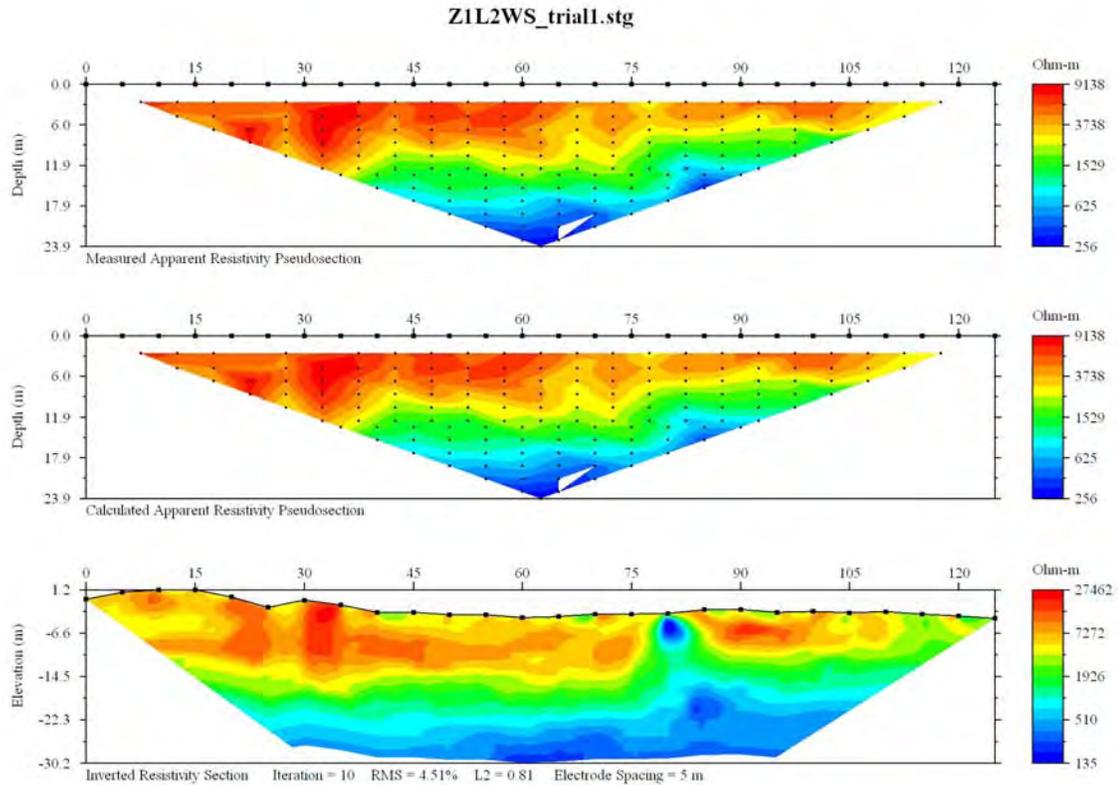


Figura 5.2 Se muestra un ejemplo de la forma, como se presentan los resultados obtenidos al realizar la inversión con el programa EarthImager 2D (Advanced Geosciences, 2008).

De la Figura 5.2 se observa arriba la pseudosección de resistividad aparente de los datos medidos en campo, en medio el modelo de inversión generado a partir de los parámetros y abajo el modelo 2D generado a partir de los datos medidos, con el error RMS y la norma L_2 . Los errores se derivan de la diferencia cuantitativa existente entre la pseudosección y el modelo de inversión, la elección del mejor modelo de resistividad verdadera, dependerá de la forma en que se visualice el objetivo planteado y del error generado en el programa de inversión utilizado (De la Torre-González, 2010).

Al tener los modelos de resistividad verdadera se visualizaron en el programa Surfer 8 (Golden Software, 2002) mediante una interpolación Kriging, para una mejor visualización en algunos detalles y colocar una misma escala de resistividades en todos los modelos obtenidos.

Para los modelos 3D, se procedió a la creación de los archivos tomando las mediciones de resistividad aparente en 2D, la topografía de cada línea y sabiendo que la separación de 25 m entre cada línea, permitió realizar la inversión con el programa EarthImager 3D (Advanced Geosciences, 2008), en la cual se escogieron los parámetros a partir de las características observadas en los modelos 2D, como: tipo error y el método de solución al problema directo.

Se procedió a escoger los parámetros iniciales, en los cuales el principal era el tipo de inversión, por lo que se eligió un modelado inverso suavizado, con la intención de poder identificar las estructuras de forma suave. Se aclara que se eliminan las resistividades negativas debido a la forma de adquisición de datos fue en 2D, y la creación de los modelos 3D, se realizó con las mediciones en las 5 líneas, ya mencionadas en este estudio.

Para el modelado directo, debido a las recomendaciones del manual, se empleó el gradiente conjugado como solución de la matriz de inversión, el método numérico de solución que es más acorde al problema debido a la topografía fue el de elemento finito.

Para la inversión de resistividades debido a las diferentes resistividades aparentes medidas en las diferentes líneas varían en un rango de 10 $\text{ohm}\cdot\text{m}$ a 22,000 $\text{ohm}\cdot\text{m}$, se procedió a elegir un número de cuatro iteraciones y un RMS de 10 %, mediante la observación con otras iteraciones realizadas, los resultados a partir de esta iteración variaban muy poco, por lo que se eligió este número de iteraciones para los modelos Wenner (Fig. 6.6) y Wenner-Schlumberger (Fig. 6.8).

Para el modelo 3D Dipolo-Dipolo (Fig. 6.4) se realizaron quince iteraciones, donde lo mostrado se encontró con el mínimo error posible y se observan algunas pequeñas estructuras, con las otras iteraciones se observa sólo una placa de resistividades altas que no permiten mejorar la resolución en los resultados, aún variando factores como el de amortiguamiento y el error.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se elaboraron cinco perfiles de resistividad 2D para cada uno de los dispositivos electrónicos; Dipolo-Dipolo, Wenner-Schlumberger y Wenner; cada una de las líneas corresponde a la zona de estudio mostrada en la Figura 6.1 con las características mencionadas anteriormente. A continuación se muestran el análisis y los resultados obtenidos.



Figura 6.1 Esquema de la zona de estudio y las líneas estudiadas (Modificada de Google Earth, 2010).

El estudio requiere una profundidad de investigación de 15 m, factor relacionado con el arreglo eléctrico o configuración electrodomica que se empleó, de manera que los modelos de resistividad alcanzaran tal profundidad.

Se menciona que las interpretaciones realizadas parten de la forma de las anomalías de resistividad que relacionamos con tubos lávicos y con la alta resistividad, considerando la existencia de aire dentro de la estructura buscada y/o que los tubos se encuentran parcialmente rellenos, no se descarta la posible infiltración de agua en la zona que afectara a nuestros resultados.

La zona de estudio presentó cambios abruptos de topografía mayores a 5 m como se muestran en la Figura 6.2 con lo que se realizó corrección topográfica a los perfiles 2D obtenidos, para tener una mejor certeza en las dimensiones de los tubos lávicos, además, estos cambios se deben a la existencia de estructuras ígneas como son los túmulos, crestas de presión y colapsos de tubos volcánicos, con lo que hacer esta corrección permite conjuntar los resultados de este estudio con la geología de Los Encinos.

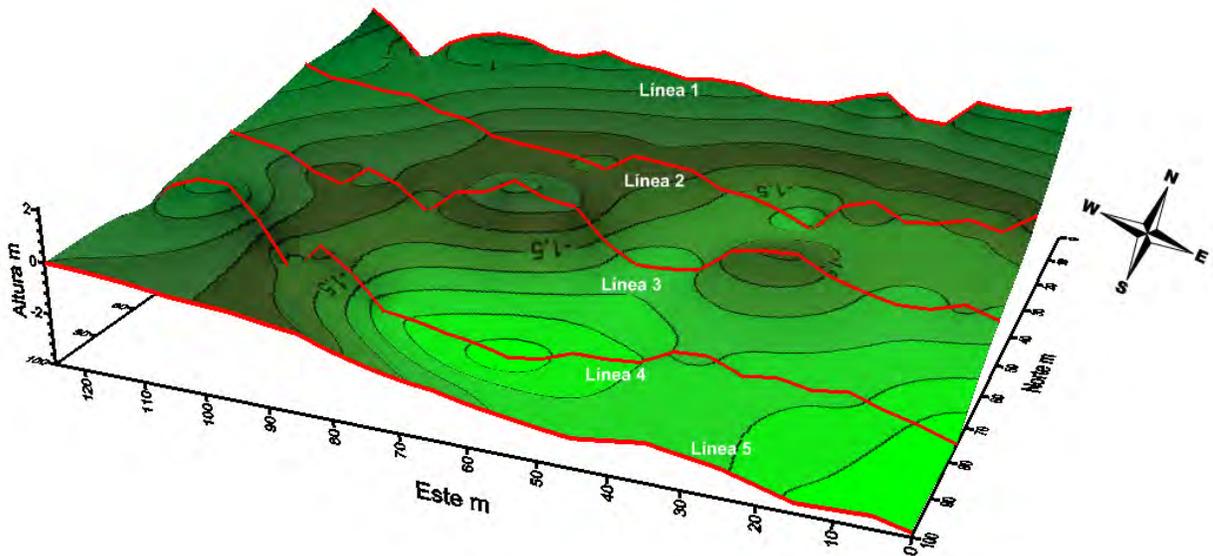


Figura 6.2 Esquema de la topografía de la zona de estudio zona de estudio.

6.1 Resultados Dipolo-Dipolo

6.1.1 Perfiles de Resistividad 2D

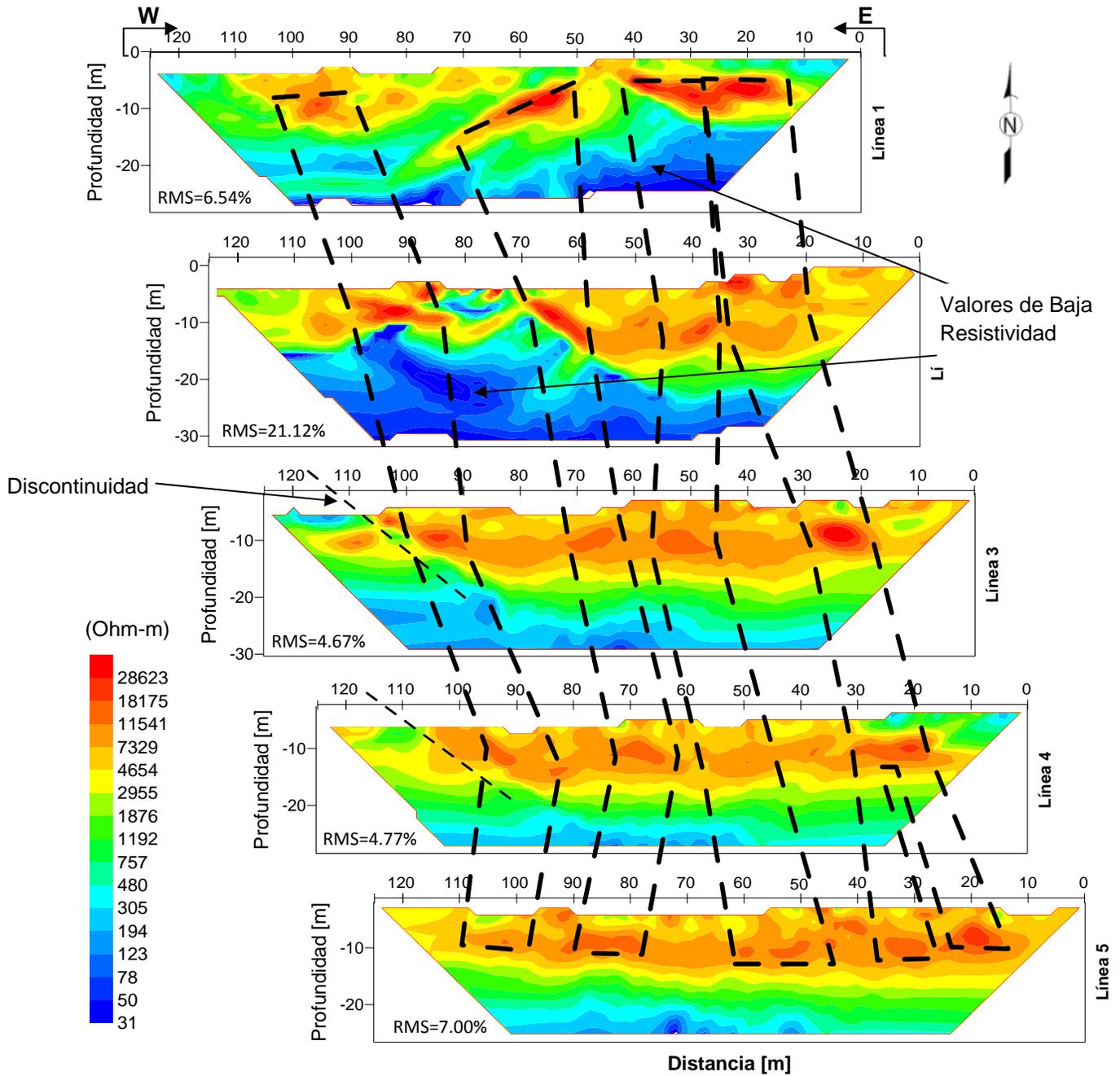


Figura 6.3 Perfiles de resistividad de la Línea 1 a 5, con la configuración Dipolo-Dipolo, correlacionado los distintos tubos volcánicos ubicados en cada modelo.

Con los 5 perfiles de resistividad (Fig. 6.3) se puede estimar la ubicación de cuatro tubos lávicos, a una profundidad de entre 5 a 15 m y anchura de 5 a 10 m, a partir de las anomalías de mayor resistividad, sabiendo que los basaltos tienen una resistividad de 10 a 1.3×10^7 (seco) $\text{ohm}\cdot\text{m}$ (Telford *et al.*, 1976) sin fracturamiento, el basalto de zona de esta zona estudio se encuentra bastante sano debido a las resistividades altas obtenidas, los tubos lávicos presentan una alta resistividad debido a su condición de aislamiento de la temperatura y del intemperismo externo, por lo que las resistividades de 25,000 $\text{ohm}\cdot\text{m}$ a 80,000 $\text{ohm}\cdot\text{m}$, son los valores máximos encontrados en el estudio, la sensibilidad de este arreglo permitió ubicarlos debido a que es muy sensible a cambios horizontales y permite mapear cavidades o diques.

La geología de la zona señalaba la posible existencia de tubos de lava perpendiculares a las líneas de Tomografía Eléctrica, al comparar los cinco perfiles del arreglo Dipolo-Dipolo se puede tener una correlación debido a que dichas anomalías se pueden localizar en las mismas posiciones aunque a menor tamaño y forma como se muestran en la Figura 6.3, parecen corroborar su existencia y tener una tendencia como la descrita por la geología.

El bajo valor de resistividad encontrado en los perfiles 1 y 3 ($x=85$ m), con respecto al perfil 2 donde se visualiza mejor; permitió ver que en esa zona existe alguna estructura con resistividad entre 50 y 20 $\text{ohm}\cdot\text{m}$, que se localiza a una profundidad de entre los 10 y 24 m, debido a que no se tiene información geológica o hidrológica, no se puede concluir al respecto.

Línea 1

Este perfil se presenta tres valores de alta resistividad ($> 10,000$ $\text{ohm}\cdot\text{m}$) a una profundidad aproximada de 4 a 12 m, con un anchura de 30 a 6 m, por la forma y características se relacionan con los tubos volcánicos.

Cabe mencionar que la línea se encontraba cercana a una pared de roca, hallándose escombros y desperdicios de construcción, razón que puede afectar los resultados.

La profundidad de investigación alcanzada fue de 28 m, permitió buscar otras anomalías relacionadas con los tubos lávicos en la parte profunda que fueran de nuestro interés o que se comportaran resistivamente como los valores encontrados en la parte media del modelo, pero esto no sucedió. Se localizó un contorno de bajo valor de resistividad (100 $\text{ohm}\cdot\text{m}$) en $x=85$ m, se relaciona con la presencia de agua, aunque no se tiene la certeza debido a la que existe poca información al respecto y a que esta anomalía se encontró a los 20 m de profundidad.

Línea 2

Se observan algunos valores de resistividad altos ($> 10,000$ $\text{ohm}\cdot\text{m}$) dispersos en la parte superior del perfil 2, los relacionamos con los tubos lávicos buscados a una profundidad de entre 5 y 14 m, de tamaños menores a 8 m de anchura.

Se observan bajos contraste de resistividad de 20 $\text{ohm}\cdot\text{m}$ ($x=85$ m), tanto en la parte superior como a una profundidad de 20 m, una posible explicación para dicho contraste es en la parte superior el electrolito empleado está presente, debido a que hace al material se comporte como

un buen conductor; y en la zona inferior se localiza posiblemente agua o algún material altamente conductor, aparte de ello no aparecen algunas otras anomalías relevantes en los 30 m de profundidad que se alcanzaron.

Línea 3

La forma que presentan cinco valores altos de resistividad ($> 12,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) observados en la Figura 6.3, son del tipo de anomalía esperado para poder relacionarlo con los tubos lávicos, ubicándolas a profundidades de entre 6 y 10 m, con anchura de 5 a 15m, la posición de tres valores de alta resistividad se localiza en la misma posición que en los modelos 1 y 2 de este arreglo.

En la parte oeste del modelo se observa una discontinuidad en las resistividades, que pudiera deberse a una fractura en el material que se extiende en la profundidad, además, debajo de ese lugar ($x= 85 \text{ m}$), aparece una anomalía de baja resistividad ($<300 \text{ ohm}\cdot\text{m}$), a los 22 m de profundidad, en la misma posición que en los perfiles 1 y 2, en esta imagen eléctrica es la última donde aparece dicho contraste resistivo, el estudio no tiene el alcance para determinar que tipo de estructura origina este fenómeno.

Línea 4

En este perfil se presentaron seis anomalías de diferentes anchuras de 4 a 20 m a una profundidad de entre 6 y 14 m, las anomalías pequeñas debido a nuestro espaciamiento de 5 m entre electrodos es difícil decir si existen o no, debido a que no se pueden comprobar con algún otro perfil, por otro lado, la discontinuidad ubicada en el perfil 3, quedan algunos rasgos, pero se necesita corroborar dicha discontinuidad con otro tipo de arreglo debido a que no se aprecia claramente.

Línea 5

El perfil presento más de siete anomalías de alta resistividad ($>10,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) a una profundidad de entre 4 y 10 m, con una anchura de entre 20 y 4 m. Este perfil presentó mas anomalías que los otros perfiles de este arreglo, los valores de resistividad que en este perfil resultaron, muestran los cambios que pueden ocurrir con solo una separación de 25 m que existen entre cada línea.

6.1.2 Modelo 3D

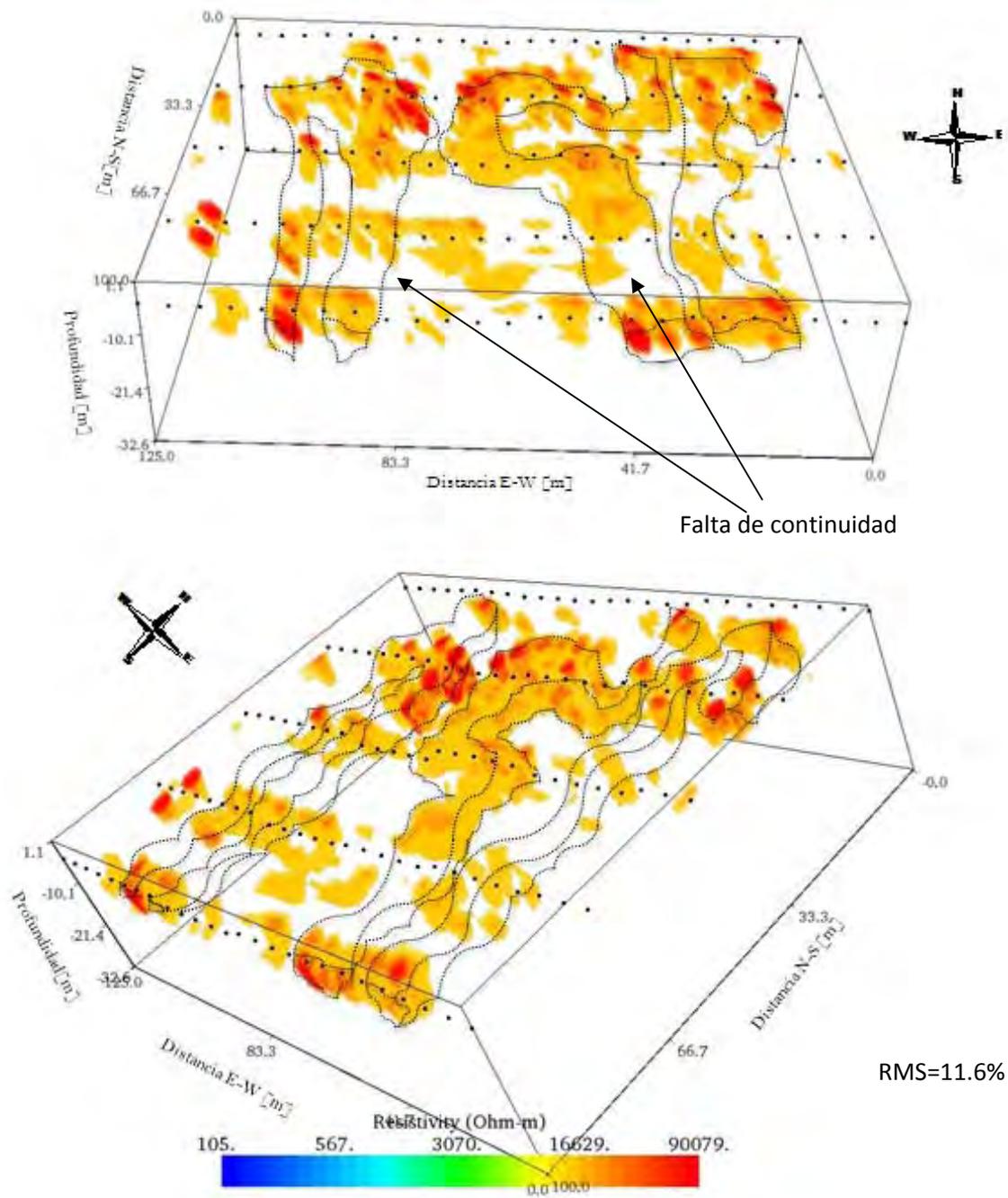


Figura 6.4 Modelo 3D obtenido a partir de una inversión 3d con la información de las líneas estudiadas, con un filtrado de resistividades, eliminando las menores a 16,000 ohm•m, a) Modelo 3D muestra la profundidad de los tubos lávicos, b) muestra la morfología de la estructura estudiada.

El modelo obtenido después de una inversión 3D (Fig. 6.4), de las diferentes líneas, no produjo un resultado que mostrara claramente los tubos de lávicos, debido a la falta de continuidad en los valores de resistividad, sin embargo, considerando solo los valores de altas resistividades ($>15,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$), se puede hacer una interpretación como la mostrada que caracteriza los tubos volcánicos a partir de estas resistividades, la profundidad a la que se localizan las formas obtenidas no superan los diez metros. Se infieren cuatro tubos lávicos con valores de resistividad mayores a $15,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$, una anchura de 5 a 15 m aproximadamente, la confiabilidad de esta interpretación y de la existencia de los tubos lávicos es baja, debido como ya se menciona, a la falta de continuidad en los valores de resistividad y la separación existente entre las líneas de medición.

Con el arreglo Dipolo-Dipolo, la señal se ve disminuida con la separación entre separación de los electrodos, por lo que afecta a los resultados al realizar la inversión; por otra parte la sensibilidad horizontal que caracteriza esta configuración no ayuda a localizarlos, aunque es bueno en la localización de cavidades, en los tubos lávicos, no lo permitió, debido la alta resistividad por parte del terreno y los cambios abruptos de topografía que existen entre línea y línea.

6.1.3 Comparación entre modelos 2D y 3D

Al comparar los modelos se observa que para los perfiles de resistividad 2D, se pueden ubicar fácilmente los altos valores de resistividad y por la forma se relacionan con los tubos lávicos, lo que permite saber por lo menos la existencia de 4 tubos, que se muestran en el modelo propuesto en la Figura 6.3, al compararlos con el modelo 3D (Fig. 6.4), aparece una anomalía correlacionable en la posición $x=90 \text{ m}$, sabiendo que una inversión 3D los datos que se invierten son todos los tomados en campo, los modelos obtenidos difieren bastante, por otra parte el ruido y la sensibilidad de arreglo, dificultan la caracterización de los tubos mostrados en el modelo 3D.

6.2 Resultados Wenner-Schlumberger

6.2.1 Perfiles de Resistividad 2D

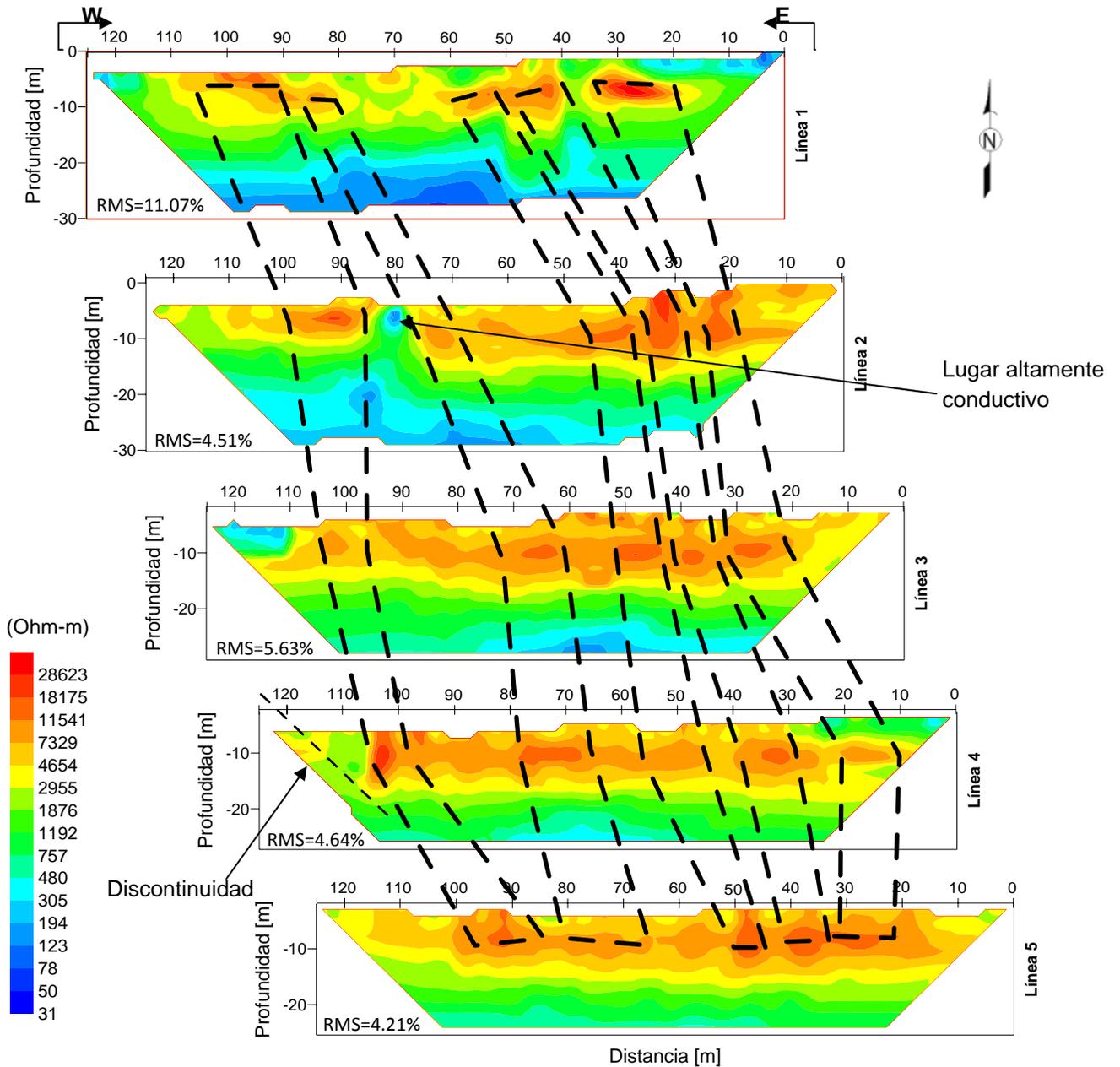


Figura 6.5 Perfiles de resistividad de la Línea 1 a 5, con la configuración Wenner-Schlumberger, correlacionado los distintos tubos volcánicos ubicados en cada modelo.

Con el arreglo Wenner-Schlumberger, se observan en la Figura 6.5 los altos valores de resistividad ($> 8,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) asociados con los tubos volcánicos buscados, aunque se pierden detalles de las estructuras geológicas que existen, sirve para tener una clara caracterización de cinco probables tubos lávicos, debido a que los valores de resistividad se observan en la misma profundidad de entre 6 y 12 m, con una anchura aproximadamente de 6 a 15 m.

Para este arreglo sabemos que tiene una modalidad sensibilidad a las estructuras horizontales y verticales, en base en ello esta configuración sirve para corroborar los resultados de los dispositivos Wenner y Dipolo-Dipolo, aunque los resultados obtenidos son bastante aceptables, partiendo de que en los 5 perfiles, las anomalías siguieron una tendencia en forma y ubicación.

Línea 1

El perfil 1 de este arreglo presenta la existencia de cuatro anomalías con anchura de entre 5 a 15 m, a una profundidad de entre 3 y 12 m, con altos valores de resistividad ($>8,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$), la profundidad de investigación que se logro alcanzar fue de 30 m. Las características morfológicas de estos valores son diferentes a las observadas en el perfil 1 del arreglo Dipolo-Dipolo, se mapean de una forma simple, sin rugosidades, pero su ubicación como longitud son bastantes similares.

Línea 2

Las cinco anomalías que se muestran en el perfil 2 son en base a los altos valores de resistividad ($>8,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$), con distancia con respecto a la superficie de 6 m hasta 12 m, con anchura de 3 a 6 m. En el punto $x= 80 \text{ m}$, aparece una anomalía ($200 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) por lo que el suelo puede tener características muy conductoras por la presencia de agua en ese lugar o por poner mal el electrodo en ese punto, por lo que se observa un cambio importante en comparación con las anomalías de $8,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ encontradas en la superficie y que se relacionan con los tubos lávicos buscados.

Otra anomalía de baja resistividad ($200 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) localizada a una profundidad de 20m en $x=85 \text{ m}$, ya ubicada en los perfiles de 2, 3 y 4 del arreglo Dipolo-Dipolo, en este caso, solo se muestra en esté perfil, y de un tamaño menor, falta información para determinar si es una estructura o algún error en la inversión o adquisición de datos.

Línea 3

El perfil de resistividad 3, muestra cinco valores de resistividad altos ($>8,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) en la parte de $x=20 \text{ m}$ a $x=110 \text{ m}$, que parecen pequeñas cavidades no mayores a 6 a 10 m de ancho, las anomalías observadas son pequeñas y agrupadas en una sola zona, que se localizan a una profundidad de 6 a 12 m.

Línea 4

En el punto $x=110$ m del perfil 4, aparece una discontinuidad en la resistividad, podría ser un fallamiento en la roca basáltica o roca fracturada, algo similar se observa en las secciones 3 y 4 de Dipolo-Dipolo, pero considerando que la existencia de paredes cercanas a esos puntos, puede deberse a un material de relleno o de desecho que se afecta nuestros resultados, situación que nuestro estudio no abarca.

Se encontraron cuatro valores de resistividad altos ($>8,000$ ohm•m) distribuidos a una profundidad de entre 6 y 12 m, con anchura de 5 a 15 m, similares a los demás perfiles de este tipo de dispositivo electródico, con la profundidad alcanzada de 27 m.

Línea 5

El perfil 5 del arreglo Wenner-Schlumberger muestra tres anomalías de forma alargada (tubos volcánicos) a profundidades de entre 6 a 12 m como en las demás secciones 2D, pero su anchura de 20 m difiere en comparación con el modelo 4 de este tipo de arreglo, por lo que tener 2 o más tubos lávicos cercanos en algunas zonas puede ser la explicación de la forma alargada de la anomalía resistividad.

Las resistividades que se asociamos con tubos volcánicos de este arreglo fueron mayores a ($>8,000$ ohm•m) y se obtuvo una profundidad de investigación de 26 m, se menciona en este línea se obtuvieron las menores profundidades de penetración, por lo que la roca era lo bastante resistiva (sana) en comparación con los demás tendidos.

6.2.2 Modelo 3D

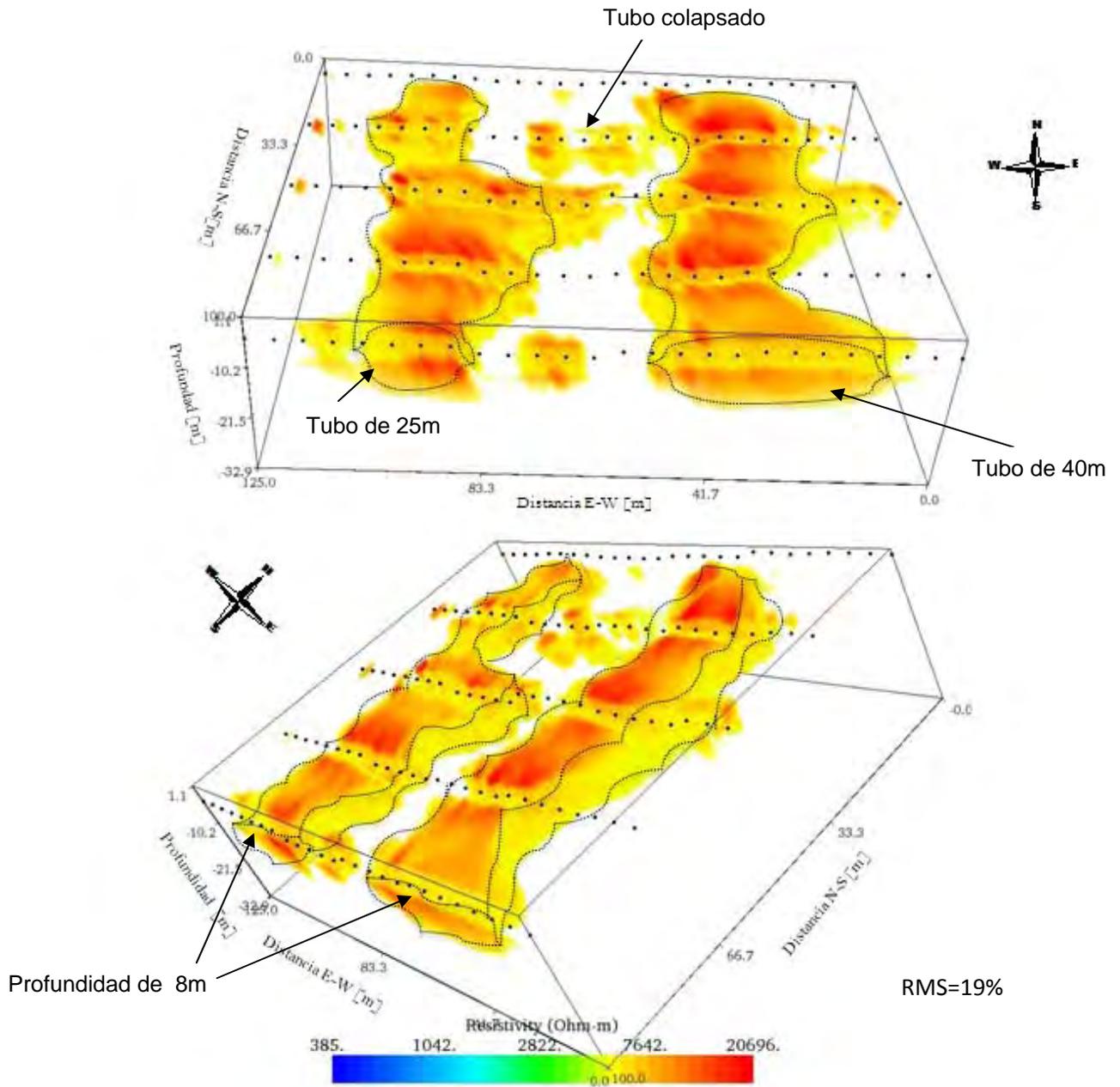


Figura 6.6 Modelo 3D obtenido a partir de una inversión 3d con la información de las líneas estudiadas, con un filtrado de resistividades, eliminando las menores a 7,000 ohm•m, a) Modelo 3D muestra la profundidad de los tubos lávicos, b) muestra la morfología de la estructura estudiada.

El modelo obtenido mediante una inversión 3D (Fig. 6.6), y después de mostrar sólo las resistividades mayores a $7,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$, se tienen dos estructuras claramente identificadas de orientación S-N, que poseen un alto valor de resistividad ($>8,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$), asociándolo al aire existente en los tubos lávicos, uno de esos tubos se observa truncado, si se visualiza la topografía de la zona de estudio se relaciona con una depresión en ese lugar.

La anchura de los túneles mostrados en el modelo 3D, varía de 25 a 40 m, lo que hace parecer son tubos lávicos de grandes dimensiones, pero por la falta de resolución y el tipo de inversión imposibilita esa opción, lo que se observa son tubos volcánicos en conjunto, lo suficientemente cercanos, debido a la inversión empleada no permiten una visualización detallada, además de que la separación entre líneas (25 m) no ayuda a ello, con esto resultados se puede inferir que en esa zona existe una o varias estructuras a una misma profundidad máxima de 10 m.

La sensibilidad del arreglo Wenner-Schlumberger, permite una caracterización de los tubos lávicos debido a su sensibilidad horizontal y vertical, en comparación con los otros arreglos, para este estudio es importante esa propiedad, debido a que la profundidad y grosor de la estructura esta estrechamente relacionada en ambas direcciones espaciales.

6.2.3 Comparación entre modelos 2D y 3D.

Los perfiles de resistividad 2D, permiten una ubicación de los altos valores de resistividad ($>8,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) que los relacionamos con los tubos lávicos, por lo que el espesor encontrado y profundidad se ajusta a la información geológica, además, la inversión permite visualizarlos de forma clara y hacer una interpretación por separado de cada perfil de resistividad 2D, con ello se realizó la interpretación, pero sabiendo que cada línea se hizo con una separación de 25 m, los cambios en la anchura de los tubos volcánicos, pueden ser diferentes a los mostrados, con el modelo 3D se podría dar una correlación de dichos modelos, pero la resolución del 3D, no permite la identificación de tubos por separado, permite visualizar un conjunto de tubos lávicos que se localizan muy próximos.

6.3. Resultados Wenner

6.3.1. Perfiles de Resistividad 2D

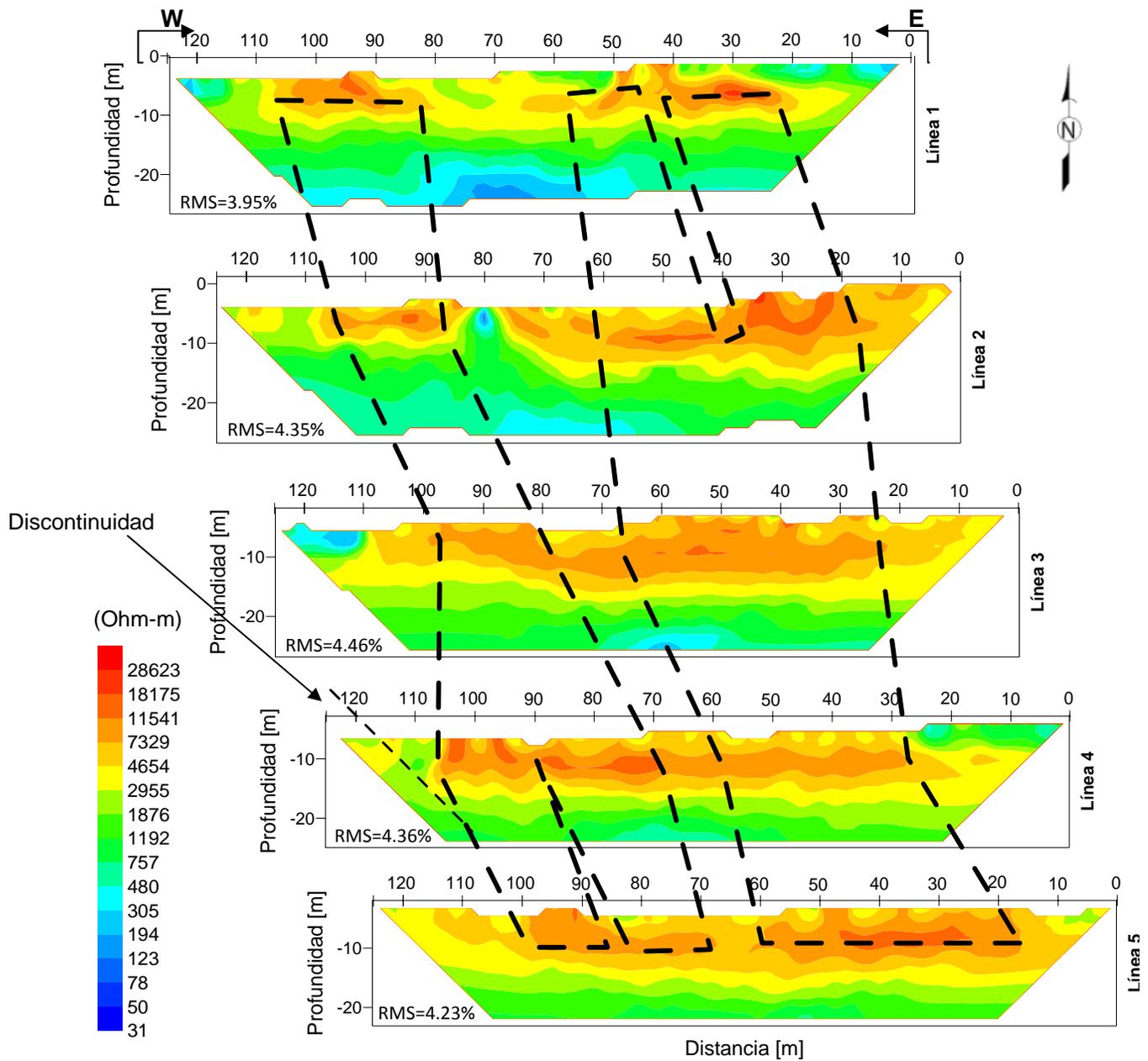


Figura 6.7 Perfiles de resistividad de la Línea 1 a 5, con la configuración Wenner, correlacionado los distintos tubos volcánicos ubicados en cada modelo.

La modalidad Wenner, no permite una correcta determinación de estructuras volcánicas su sensibilidad vertical es muy pobre y la horizontal en este caso sirve poco, en la interpretación mostrada en la Figura 6.7, se muestran 2 tubos lávicos a una profundidad de 5 a 12 m y una anchura de 15 a 40 m. Las anomalías aparecen alargadas y no se distinguen del material de su alrededor, la profundidad que se alcanzó fue de 20 a 30 m, varía demasiado para ser una zona bastante homogénea.

En los perfiles 3, 4 y 5, es difícil ubicar las anomalías relacionadas a los tubos volcánicos, por lo que el modelo planteado en la Figura 6.7 es muy poco justificado con la información que se posee, además de la anchura de los mismos es demasiado grande, lo rescatable del arreglo es que muestra una homogeneidad resistivamente en los perfiles en dirección horizontal, lo que ayuda a nuestro objetivo de localizar los tubos lávicos, debido a que no muestra la presencia de algún otra estructura que pudiera afectar nuestra interpretación.

Línea 1

Con el arreglo Wenner se obtuvo el perfil 1, muestra dos anomalías ($>10,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) las relacionamos con los tubos volcánicos a una profundidad de 4 a 8 m y una anchura de 8 a 12 m, en el perfil se obtuvo una profundidad de 27 m, el resto del perfil se muestra una homogeneidad de las resistividades, permite saber que no hay alguna otra estructura o contraste resistivo en ese perfil.

Línea 2

El perfil de resistividad 2, presenta cuatro valores de resistividad altas ($>10,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) a una profundidad de 5 a 8 m, una de ellas con una anchura de 14 m, por lo que el arreglo Wenner tiene una buena sensibilidad horizontal, y la falta de datos da como resultado este tipo de anomalías, además aparecen resistividades mínimas de $300 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ y máximas de $12,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ en la parte superficial del perfil de resistividad, la roca se encuentra bastante resistiva, por lo que el medio en total parece bastante homogéneo hasta los 27 m que se alcanzó con la inversión.

En la posición $x=80 \text{ m}$ la resistividad es baja ($<300 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) como se observó en los perfiles de resistividad de los otros arreglos, es un lugar bastante conductor que afecta la continuidad de la resistividad de la zona.

Línea 3

En el perfil 3 obtenido al igual que el perfil de resistividad 2 del arreglo Wenner, presenta anomalías alargadas, donde se puede distinguir 3 resistividades mayores a $22,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ a una profundidad de entre 4 y 8 m, de anchura 3 a 5 m, no muestra la existencia de las estructuras buscadas, por lo que no ayuda a dar una posible interpretación de la forma de las mismas, pero sí para saber la extensión de las altas resistividades ($>10,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$), con la profundidad alcanzada 25 m.

Línea 4

Los efectos debidos a los electrolitos hacen disminuir la resistividad natural de la roca por lo que en la parte superficial del modelo se observan los lugares donde se colocó dicho electrolito, que se muestran en la modelo 4, la distribución de la resistividad se encuentra en el rango de 23,000 ohm•m a 500 ohm•m como mínima, a la profundidad alcanzada de 25 m, el arreglo limita la localización clara de los tubos lávicos en comparación con los otros dos arreglos.

Además se localiza la misma discontinuidad en $x= 110$ m, debido a que la resistividad de ese lugar es menor a la de sus alrededores, por lo que un fracturamiento en esa zona es lo más posible o un relleno de material como se había mencionado anteriormente.

Cuatro pequeñas anomalías de alta resistividad ($>23,000$ ohm•m), a una profundidad entre 5 y 12 m, con una anchura de 5 a 15 m, son las que el perfil de resistividad presenta, concentrados entre $x= 70$ m y $x= 110$ m.

Línea 5

Las dos anomalía observadas en el perfil 5 son alargadas, no presentan similitud con las anomalías vistas en todo el estudio, solo se visualizan los valores de alta resistividad distribuidos de forma horizontal, que al igual que los perfiles de resistividad anteriores de este tipo de configuración no se pueden correlación entre si, debido a que solo se presentan anomalías en la parte central de la misma de una extensión de 30 m a una profundidad de 4 a 10 m. Las resistividades obtenidas están en un rango de 800 a 14,000 ohm•m, la roca es poco conductiva, se corrobora la dificultad de fluir de la corriente eléctrica con la profundidad alcanzada de 20 m.

6.3.2 Modelo 3D

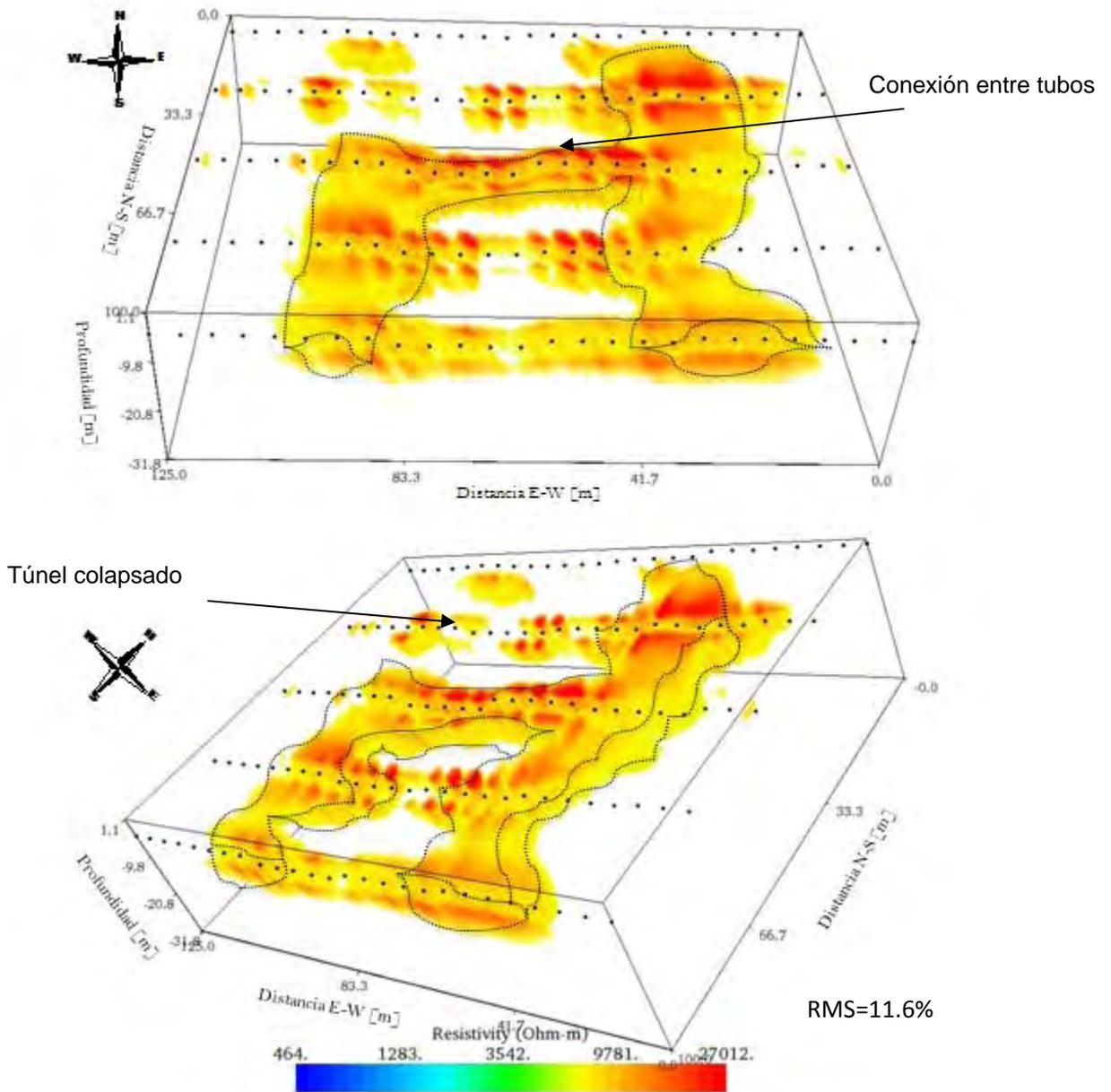


Figura 6.8 Modelo 3D obtenido a partir de una inversión 3d con la información de las líneas estudiadas, con un filtrado de resistividades, eliminando las menores a 10, 000 ohm•m, a) Modelo 3D muestra la profundidad de los tubos lávicos, b) muestra la morfología de la estructura estudiada.

El modelo 3D obtenido con la configuración Wenner permite determinar una estructura de alta resistividad mayor a 10,000 ohm•m interconectada, debido a la sensibilidad vertical del arreglo, la estructura que se observa es de forma plana, que no es posible relacionarlo con los tubos lávicos, la tendencia que sigue es similar a las estructuras encontradas en el modelo 3D del arreglo Wenner-Schlumberger, e incluso el colapso o truncamiento de la estructura a los 50 m (línea 2) permite observar que algún fenómeno geológico ocurre ahí, que afecta la continuidad de resistividades en la estructura mostrada en la Figura 6.8, su localización de la estructura es somera no rebasa los 5 m con respecto a la superficie, la anchura es variante de entre 10 a 30 m, en una zona incluso se conectan algunos segmentos de los valores de alta resistividad en el modelo, probablemente por efectos de los electrodos, que producen dicho fenómeno y a la inversión empleada.

6.3.3 Comparación entre modelos 2D y 3D

Esta configuración en particular, en comparación con los demás estudiados en este trabajo, no permite una interpretación mas confiable para la caracterización de tubos lávicos, debido a que es un arreglo útil para cambios verticales, pero nos permite saber que no hay estructuras horizontales que se localicen en la zona de estudio, como lo muestran los perfiles de resistividad 2D, las altos valores de resistividad se localizaron en una zona no mayor a 10 m de profundidad, pero no la identificación particular de algunas anomalías, por lo que son muy similares las interpretaciones en el modelo mostrado en la Figura 6.7 y modelo 3D (Fig. 6.8), debido a esa falta de datos y de sensibilidad del arreglo.

Dichas tendencias de las estructuras encontradas corresponde a los tubos lávicos, que se identifican en las configuraciones Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger.

6.4 Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos con los distintos dispositivos electrónicos permitió obtener perfiles de resistividad 2D y modelos 3D, donde se muestran la posible localización de los tubos lávicos, a una profundidad aproximada de entre 6 y 12 m con respecto a la superficie, debido a que en esa zona se encontraron los altos valores de resistividad (>10,000 ohm•m), se infiere a partir de ello la existencia de por lo menos tres tubos lávicos que se hallan en la zona de estudio, aunque los grosores de los mismo puede variar al paso de las diferentes líneas.

En la parte oeste de los perfiles 3 y 4, de los diferentes arreglos se observa una discontinuidad en las resistividades, considerando que en las cercanías se localiza una pared y que material de construcción (ladrillos, arena, varillas, etcétera) se encontraba en la superficie, puede deberse a ello y ha un relleno de ese tipo de material, por otro lado la vegetación se encontraba de tamaños mayores a 2 m, por lo que si no es relleno, es un fracturamiento de la roca ígnea en ese lugar.

La línea 2 en el punto $x = 80$ m tiene una región de valores de baja resistividad (<300 ohm•m) probablemente la infiltración en la roca del electrolito empleado o la existencia de una base de uno torre de alta tensión, pero por su forma y tamaño en los perfiles sugiere un fracturamiento en la roca, debido a que es solo son un par de metros donde ocurre ese fenómeno.

El error RMS obtenido por el Programa EarthImager 2D (Advanced Geosciences, Inc., 2008) es el mínimo, los resultados no cambiaban si el error aumentaba a valores mayores a 15 %, este parámetro da confianza a la inversión utilizada, además, la profundidad a la que se llegó fue mayor a 20 m permitió visualizar algunas estructuras a esa profundidad.

Las resistividades aparentes son mayores 10,000 ohm•m, con ese tipo de resistividad y a la geología, el basalto que encontramos es sano (>10,000 ohm•m), es decir con el mínimo de intemperismo y fracturamiento, las zonas donde la resistividad llegó a bajar hasta 20 ohm•m, se debe a la infiltración de agua meteórica, debido a que es una zona de amplia vegetación que crea lugares por donde se infiltre el líquido.

El dispositivo Dipolo-Dipolo, permitió ubicar claramente los tubos volcánicos en su posición y espesor, ayudo a caracterizar que dichos perfiles de resistividad 2D fueran correlacionables, a pesar de que la separación entre líneas es de 25 m, los tubos se comportaron de una forma bastante lineal y las anomalías aparecieron.

Con la modalidad Wenner-Schlumberger, permitió ver que los tubos existen pero con una menor resolución en los perfiles 2D, con ello se pudo ver que las anomalías aparecen en las mismas ubicaciones que el Dipolo-Dipolo, y que por las características de este arreglo, se aprecia en el modelo 3D un alto contraste de resistividades (>7,000 ohm•m) congruente con los perfiles 2D.

El arreglo Wenner ayudó a ver el estado de la roca, que se encontró bastante homogénea, no hay cambio abrupto de litología o estructuras que pudieran confundirse con los tubos volcánicos, debido a que los altos valores de resistividad (>10,000 ohm•m) se localizaron en el mismo lugar donde se determinaron los tubos volcánicos.

Cabe mencionar que las profundidades de investigación de cada perfil de resistividad 2D son diferentes a pesar de ser el mismo arreglo con las mismas características de separación de electrodos y longitud, se debe a la topografía que se le esta ingresando esta siendo referenciada con respecto al primer electrodo de la primera línea, con lo que las líneas posteriores se encuentran arriba o debajo de este nivel, las variaciones de hasta 5 m se deben a eso. Por otro lado los niveles de medición profundidad medida a los que las configuraciones llegaron fueron: Dipolo-Dipolo de 20, Wenner de 8 y el de Wenner-Schlumberger 13. Que según Edwards (1977), para estos niveles se alcanzarían profundidades teóricas después de invertir de 29 m, 21m, 23 m respectivamente, resultados aproximados a los obtenidos en los perfiles 2D como se observa en la tabla 2.

Los modelos 3D, obtenidos carecen de resolución horizontal y vertical, debido a que la inversión realizada es con base en todo el conjunto de datos adquiridos. Los resultados no permiten una caracterización de un tubo lávico en particular, sino a un conjunto de tubos o a tubos con dirección oblicua a nuestras líneas, las dimensiones que se visualizan en estos modelos son mayores a 10 m en anchura, corroborando con los perfiles de resistividad 2D, no hay anomalías tan grandes en los arreglos Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger, por lo que se descartan que halla tubos de esas dimensiones en la zona de estudio, pero se infiere que por la

cercanía de los tubos, lo que se muestra en las imágenes eléctricas 3D son los tubos lávicos en conjunto, pues siguen una tendencia S-N, y una profundidad no mayor a los 12 m, esto se muestra principalmente en los arreglos Wenner-Schlumberger y Wenner, para el caso del Dipolo-Dipolo su densidad de datos impide una inversión mejor.

En conjunto el aplicar las tres configuraciones, permitió tener la certeza que en la zona de estudio se localizan estructuras de alto contraste resistivo ($>7,000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$), que al correlacionarla con la geología del lugar, es viable la existencia de tubos lávicos sabiendo que poseen aire en dicha estructura lo que hace que sean altamente resistivo, además, con las diferentes configuraciones se estudiaron los cambios verticales y horizontales de la resistividad en la zona.

A continuación se presenta la Tabla 2, donde se muestran los resultados obtenidos con las tres configuraciones utilizadas en este estudio, señalando los parámetros más importantes para caracterizar los tubos lávicos.

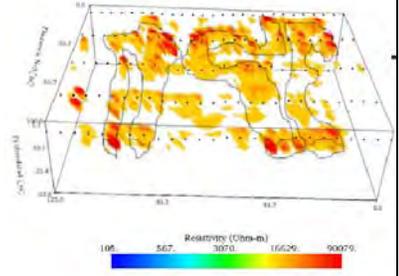
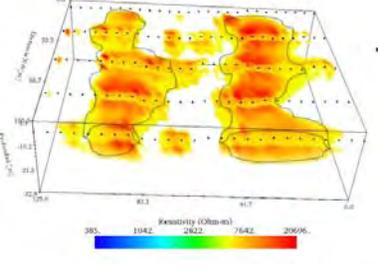
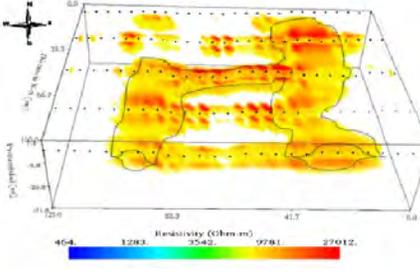
Tabla 2 Resultados de las diferentes configuraciones aplicados en la caracterización de tubos lávicos.

PERFILES DE RESISTIVIDAD 2D

Arreglo	Li	Dipolo-Dipolo	Wenner-Schlumberger	Wenner	Resultados
Interpretación					<p>Los tres arreglos muestran anomalías de alta resistividad asociados con tubos lávicos. Características del arreglo con resultados sean distintas, muestran profundidades y ubicaciones similares.</p>
	<p>Número de tubos lávicos</p>	<p>1 4 a 5 2 4 a 5 3 5 4 6 5 Más de 7</p>	<p>1 4 2 5 3 5-6 4 4 5 3</p>	<p>1 2-3 2 4 3 3 4 4 5 2</p>	<p>El número de tubos: 5 a partir de los arreglos D-D y W-Sch. (sensibilidad.)</p>
	<p>Anchura de los tubos lávicos (m).</p>	<p>1 6 a 30 2 Menos a 8 3 5 a 15 4 4 a 20 5 4 a 20</p>	<p>1 5 a 15 2 3 a 6 3 6 a 10 4 5 a 15 5 20</p>	<p>1 8 a 12 2 Menor a 14 3 3 a 5 4 5 a 15 5 30</p>	<p>Anchura de tubos de 5 a 10 m, en promedio</p>
	<p>Profundidad aproximada de tubos</p>	<p>1 4 a 12 2 5 a 14 3 6 a 10 4 6 a 14 5 4 a 10</p>	<p>1 3 a 12 2 6 a 12 3 6 a 12 4 6 a 12 5 6 a 12</p>	<p>1 4 a 8 2 5 a 8 3 4 a 8 4 5 a 12 5 4 a 10</p>	<p>Tubos entre los 6 a 12 m</p>

MÉTODO DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA DETERMINAR ESTRUCTURAS VOLCÁNICAS

Profundidad del arreglo (m).	1	28	30	27	Profundidades alcanzadas: Dipolo-Dipolo 27 m Wenner-Schlumberger 28 m Wenner 24m.
	2	30	30	27	
	3	30	28	25	
	4	25	27	25	
	5	25	26	20	
	Observaciones.	1	Valores de baja resistividad en x= 85 m, a una profundidad de 20 m.	Cuatro anomalías de alta resistividad.	
2		Valores de baja resistividad en x= 85 m, superficialmente y a una profundidad mayor de 20 m.	Valores de baja resistividad en x= 85 m, superficialmente y a una profundidad mayor de 20 m.	Valores de baja resistividad en x= 80 m, superficialmente.	Zona de baja resistividad, asociada con base de alta tensión.
3		Una discontinuidad en la parte oeste.	Las anomalías aparecen en una área de x=20 m y x= 110 m.	La anchura de las anomalías 3 a 15 m	D-D y W-Sch, muestran tubos lávicos en la misma posición y ubicación.
4		Una discontinuidad en la parte oeste.	Una discontinuidad en la parte oeste.	Una discontinuidad en la parte oeste.	Fractura probable discontinuidad.
5		Gran número de anomalías de resistividad.	Tres anomalías de alta resistividad.	La forma de las anomalías alargadas.	Ruido reflejado en el número de las anomalías.
Resultados General.		4 tubos lávicos, a una profundidad de 5 a 15 m y anchura de 5 a 10 m.	5 tubos lávicos, a una profundidad de 6 a 12 m y anchura de 6 a 15 m.	2 tubos lávicos, a una profundidad de 5 a 12 m y anchura de 15 a 40 m.	La interpretación de Wenner-Schlumberger se adecua a nuestros resultados por que mostro características presentes en los demás arreglos

MODELOS 3D				
Arreglo	Dipolo-Dipolo	Wenner-Schlumberger	Wenner	Resultados
Interpretación				Los altos valores de resistividad mostrados en los tres modelos, difieren debido al ruido y al arreglo, con ello se muestran dos tendencias en los arreglos W-Sch y Wenner, que se infieren siguen los tubos lávicos.
Número de tubos lávicos.	4	2	1	Dificultad con definir numero de tubos.
Anchura de los tubos lávicos (m).	5 a 15	25 a 40	10 a 30	Por el ancho de las anomalías, se piensa que son un conjunto de tubos lávicos cercanos.
Profundidad aproximada de tubos lávicos (m).	Menor a 10	10	Menor a 5	Profundidad aproximada de los tubos <10 m
Profundidad de del arreglo (m).	Aproximadamente 30	Aproximadamente 30	Aproximadamente 30	Aproximadamente 30, corrección topográfica permite esa profundidad.
Observaciones.	Falta de continuidad en los valores de alta resistividad.	Tubos lávicos de anchura demasiado grande.	Se juntan los tubos lávicos en la línea 3.	Discontinuidad en la resistividad, en parte NE asociada c una base de alta tensión.
Resultado General.	La falta de continuidad en los valores de alta resistividad hace poco confiable el modelo 3D.	Se visualizan al conjunto de tubos lávicos en dos paquetes.	Presentan un paquete de tubos lávicos que bifurca en la línea 3.	Dos paquetes de tubos lávicos se presentan con W-Sch y Wenner, para DP-DP falta de continuidad para definir número de tubos.

A continuación se presenta los tubos lávicos en la Figura 6.9 con base en el arreglo Wenner-Schlumberger, debido a los resultados obtenidos en los perfiles de resistividad 2D.



Figura 6.9 Mapa de los tubos lávicos, obtenidos a partir de los modelos 2D con la configuración Wenner-Schlumberger, profundidad de 6 a 12m y longitud de 3 a 15 m.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

El método de Tomografía Eléctrica permitió caracterizar los tubos lávicos y saber su posible ubicación, la información Geológica de la zona fue importante, sin ella, no se hubiera podido tener la determinar una posición idónea en la colocación de las líneas.

Con los objetivos planteados se tiene que:

Aplicar el método de Tomografía Eléctrica en este estudio permitió visualizar la distribución de las resistividades del predio los Encinos; los estudios geológicos señalan que se formo por la erupción de Xitle $2,030 \pm 60$ años aproximadamente (Martín Del Pozzo *et al.*, 1982), debido a la viscosidad de la lava (pahoehoe) dio origen a estructuras volcánicas como los tubos lávicos, entre otras, la alta resistividad que los caracteriza se debe al aire y a la compactación que existe dentro de los tubos, por lo que esta técnica Geofísica se empleo para determinar sus características morfológicas presentadas en los resultados, aunque no se comprueban su existencia hasta no realizarse alguna perforación o algún otro estudio Geofísico, que no los ponga en riesgo de destrucción, debido a que se busca su conservación por la importancia Ecología-Geológica que poseen.

Al comparar los diferentes arreglos al aplicarlos en la determinación de una estructura ígnea concluyo en:

La configuración Dipolo-Dipolo permite tener un amplia densidad de datos, mayor a los otros arreglos, lo cual es una desventaja, debido a que con un mayor numero de datos puede haber más ruido que se refleje en el modelo final, y una ventaja por la gran resolución que permite tener, además, de que la interpolación utilizada tiene mayor información que puede utilizar, lo sirve para un mapeado de estructuras verticales optimo, otro característica del arreglo es que la señal se aminora conforme se aumenta el nivel de medición, al igual que la profundidad de investigación, lo que para grandes tendidos, los resultados a profundidad son poco confiables.

La configuración Wenner ideal para estructuras horizontales con profundidad somera-media, con el problema de tener un señal fuerte, que puede ser afectada por el ruido ambiental y se refleje en las mediciones, aunado a eso, tener poca densidad de datos, por lo cual estos resultados no fueron aceptables en el estudio.

La configuración Wenner-Schlumberger, con su sensibilidad tanto horizontal y vertical, permitió mapear estructuras en ambas direcciones, lo que sirvió en este estudio ser un enlace entre las otros arreglos, además, la intensidad de señal es menor al Wenner y mayor al Dipolo-Dipolo, que permitieron en este estudio una caracterización 3D, aceptable de acuerdo a las condiciones en las que se realizó, la densidad de datos es menor al Dipolo-Dipolo, pero tiene una buena resolución y profundidad de investigación, factores que ayudaron al objetivo del problema.

Para este tipo de estudio, donde se requiere una resolución lateral y vertical para definir la estructura, y en base a nuestros resultados obtenidos, el arreglo Wenner-Schlumberger, es el que mejor resultados nos arroja y se ajusta a los estudios geológicos de la zona, debido a que se busca conservar los tubos lávicos de la zona, no se permite hacer perforaciones o algún otro tipo de estudio que ponga en peligro dichas estructuras, con lo que no se puede corroborar la eficiencia del arreglo y del tipo de inversión empleada en este estudio.

Si se requiere rapidez y confiabilidad en los resultados se recomienda la configuración Wenner-Schlumberger, siempre y cuando el grado de resolución no sea muy importante y las estructuras buscadas tengan una diferencia de resistividad alta entre ella y el medio circundante.

Los resultados obtenidos a partir de los diferentes arreglos empleados y de los modelos obtenidos, se llega a la conclusión de la existencia de un mínimo de 4 tubos lávicos que cruzan nuestra zona de estudio a una profundidad entre 6 y 12 m, de orientación S-N, y una anchura de 3 a 15 m, aproximadamente.

Dos conjuntos de tubos lávicos existen considerando la geología, es lo que se concluye con este trabajo, los perfiles de resistividad 2D permiten la ubicación de las anomalías de alta resistividad que se relaciona con los tubos lávicos, pero que por la separación entre líneas de medición es muy probable que haya cambios de dirección y de forma de los tubos, además, los modelos 3D, permiten ubicarlos en forma de grupo de tubos, la inversión utilizada, es en base a la teoría matemática, con una solución de diferencias finitas, por lo que el proceso computacional interviene en los resultados obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

Libros y Manuales

Butler, K., 2005, *Near Surface Geophysics*, Society of Exploration Geophysics, Geological survey, No.13, U.S.A., Kansas, 89-150, 529-540.

EarthImager 2D, 2008, Advanced Geosciences, Manual V. 2.2.8, 136.

EarthImager 3D, 2008, Advanced Geosciences, Manual V. 1.5.0, 97.

Llambías, J., 2001, *Geología de los cuerpos Ígneos*, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán, Instituto Superior de Correlación Geológica, Argentina, 179-183.

Macdonald, G. A., 1972, *Volcanoes*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 66-108.

Russell, H., and Harter, J., 1982, *The Geology of Lava Tubes Caves*, Guidebook NSS geology & Biology field trip 1982, National Speleological Society, Alabama, Oregon Grotto press, edited by Lynne Sims & Ellen M. Benedict. 41-47.

Surfer version 8.00, 2002, Golden Software.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sherif, R. E., 1976, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Edic. 1, U. S. A., 522-525.

Artículos

- Badilla-Cruz, R., 1977, *Estudio Petrológico de la lava de la parte Noreste del Pedregal de San Ángel*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Instituto de Geología, UNAM, México, D. F., 1, 40-57.
- Carracedol, J., Singer, B., Jicha, B., Guillou, H., Rodríguez, E., Meco, J., Pérez, F., Gimeno, D., Socorro, S., y Láinez, A., 2003, *La erupción y el tubo volcánico del volcán Corona (Lanzarote, Islas Canarias)*, Estudios Geol., España, 59, 277-302.
- Dahlin, T., Bernstone, C., and Loke, M. H., 2002, *A 3-D Resistivity Investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden*, Geophysics, 67, 1692-1700.
- Edwards, L. S., 1977. *A modified pseudosection for resistivity and induced polarization*. Geophysics, 42, 1020-1036.
- Delgado, H., Molinero, R., Cervantes, P., Nieto-Obregón, J., Lozano-Santa Cruz, R., Macías-Gonzalez H., Mendoza-Rosales, C., Silva-Romo G., 1998, *Geology of xitle volcano in Southern Mexico city-A 2000-year- old Monogenetic volcano in an Urban area*, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, UNAM, Instituto de Geología, México, D. F. , 15, 2, 115-131.
- Greeley, R., 1971, *Geology of selected lava tubes in the bend Area, Oregon*, space Sciences Division National Aeronautics and space Administration Moffett field, State of Oregon Department of geology and mineral industries 1,069 State office Building Portland, California, 71, 5-12.
- Kauahikaua, J., 1998, *Observations of the basaltic lava streams in tubes from Kilauea Volcano*, Geophysics, 103, 27303-27323.
- Kilburn, C. R. J., Guest, J. E., 1993. *Aa lavas of Mount Etna Sicily*. In: Kilburn C. R. J., Luongo, G. (Eds.), *Active Lavas*, University College London, London, 3, 73-106.
- Loke, M. H. and Baker, R. D., 1995. *Rapid Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections*, Geophysics, 60, 1,682-690.
- Loke, M. H. and Baker, R. D., 1996a. *Rapid Least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by Quasi-Newton method*. Geophysical prospecting, 44, 131-152.
- Loke, M. H. and Baker, R. D., 1996b. *Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion*. Geophysical prospecting, 44, 499-523.
- Macías, J., 2005, *Geología e historia eruptiva de algunos grandes volcanes activos en de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen conmemorativo del Centenario, Tomo LVII, Núm. 3, 379-424.
- Maldonado-Koerdell, Manuel, 1954, *La formación y caracteres del Pedregal de San Ángel: Escuela Nacional de Antropología e Historia*, Tlatoani, 8-9, 1-6.

Martín del Pozzo, A., 1982, *Monogenetic vulcanism in the Sierra Chichinautzin*, México, Bulletin of Volcanology, 41, 9-23.

Martín del Pozzo, A., Córdoba, C. and López, J., 1997a, *Volcanic Impact on the Southern Basin of Mexico during the Holocen*, Mexico, quaternary International, 43, 181-199

Martín del Pozzo, A., Espinoza, R., Barba, L., López, J., 1997b, *Volcanic Impact in Central México*, Puerto Vallarta, General Assembly, México, Field Guide, 19-24.

Tejero, A., Chávez, R., E., Urbietta, J., and Flores-Márquez E., L., 2002, *Cavity Detection in the Southwestern Hilly portion of México City by Resistivity Imaging*, JEEGUNAM, Fácultad de Ingeniería, México, D.F., 7, 3, 130-139,

Tesis

De la Torre-González, B., 2010, *Definición de zonas de fracturamiento empleando tomografía de resistividad eléctrica 3D*, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 19-54.

Urbietta, J., 2001, *La Tomografía Eléctrica en los Métodos de Corriente Continua*, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 7-63.

Urbietta, J., 2009, *Evaluación de las técnicas de Adquisición 2D y 3D con Tomografía de Resistividad Eléctrica en Pozo*, Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. 20-56.

Red

GACETA OFICIAL DEL DISTRITO FEDERAL, 2009.

<http://www.contraloria.df.gob.mx/prontuario/vigente/2506.htm>, Consultado en Marzo de 2010

Google Earth, 2010. <http://earth.google.com>, Consultado en Agosto de 2010

National Speleological Society, 2010, lava tubes.

<http://www.vulcan.wr.usgs.gov/Glossary/LavaTubes>, Consultado en Abril de 2010