



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE PUEBLA**

Facultad de Ingeniería

Colegio de Geofísica

*Tomografía eléctrica aplicada a caracterizar la cantera La Joya ubicada en el
municipio de Ixtacuixtla, Tlaxcala*

TESIS

Presentada para obtener el título de:

Licenciatura en Ingeniería Geofísica

Presenta:

Eliana Vargas Huitzil

Director

M.C José Serrano Ortiz

Puebla, Pue. Septiembre 2015

Índice

Resumen.....	I
Dedicatorias	II
Agradecimientos.....	III
Introducción.....	1
Generalidades	2
1.1 Localización de la zona de estudio.....	2
1.2 Geología regional	4
1.2.1 Fisiografía.....	4
1.2.1.1 Geomorfología.....	5
1.2.1.2 Geología de la zona de estudio	6
1.3 Antecedentes	8
Fundamentos teóricos.....	10
2.1 Prospección eléctrica de corriente continua.....	10
2.2 Fundamentos teóricos: Resistividad.....	11
2.2.1 Resistencia.....	12
2.3 El método eléctrico.....	12
2.3.1 Resistividad aparente	14
2.3.2 Inversión de datos	15
2.3.3 Dispositivos tetra-polares	15
2.3.3.1 Arreglo Wenner	16
2.3.3.2 Arreglo Wenner-Schlumberger.....	18
2.3.3.3 Arreglo Dipolo-dipolo.....	20

Metodología.....	22
3.1 Instrumentación.....	22
3.2 Planificación	23
3.3 Adquisición.....	24
3.3.1 Procesamiento de datos en Res2Dinv	27
Interpretación	29
4.1 Perfil geoelectrico 1	29
4.2 Perfil geoelectrico 2.....	33
4.3 Perfil geoelectrico 3.....	37
4.4 Perfil geoelectrico 4.....	41
4.5.1 Sección geológica 1	44
4.5.2 Sección geológica 2	45
4.5.3 Sección geologica 3	46
4.5.4 Sección geológica 4	47
4.6 visualización de los resultados en Voxler 3.....	48
4.6.1.1 Modelo volumétrico	52
Conclusiones.....	54
Recomendaciones.....	56
Limitaciones	58
Anexos	59
Bibliografía	63

Índice de figuras

Fig.1 División municipal del Estado de Tlaxcala (CONAFOR, Tlaxcala.....	3
Fig.1.1 Plano geológico regional.....	7
Fig. 1.2 Esquema de aplicación de corriente eléctrica al terreno.....	11
Fig.1.3 Se muestra la densidad de corriente J dirigida radialmente en dirección a la corriente I , con el electrodo puntual A	12
Fig.1.4 Distribución de distancias entre los electrodos de corriente y potencial.....	13
Fig.1.5-A Distribución electródica del arreglo Wenner.....	16
Fig.1.5-B Diagrama de puntos de atribución para el arreglo Wenner.....	17
Fig.1.6-A Distribución electródica del arreglo Wenner Schlumberger.....	18
Fig.1.6-B Diagrama de puntos de atribución para el arreglo Wenner-Schlumberger.....	19
Fig.1.7-A Distribución electródica del arreglo Dipolo-dipolo.....	20
Fig.1.7-B Diagrama de puntos de atribución para el arreglo Dipolo-Dipolo.....	21
Fig.1.8 Equipo para Tomografía eléctrica Saris Scintrex.....	22
Fig.1.9 Fotografía del Tendido de Tomografía eléctrica tomada en la cantera La Joya.....	24
Fig.1.10 Distribución de los tendidos eléctricos en la zona de estudio.....	26
Fig.1.11 Perfil 1 A) Resistividad aparente medida B) resistividad aparente calculada C) Modelo de resistividad.....	31
Fig.1.12 A) Ubicación del Perfil 1 B) Perfil 1: Modelo de resistividad con topografía.....	32
Fig.1.13 Perfil 2 A) Resistividad aparente medida B) Resistividad aparente calculada C) Modelo de resistividad.....	35

Fig.1.14 A) Ubicación del Perfil 1 B) Perfil 2: Modelo de resistividad con topografía	36
Fig.1.15 Perfil 3 A) Resistividad aparente medida B) Resistividad aparente calculada	
C) Modelo de resistividad	39
Fig.1.16 A) Ubicación del Perfil 3 B) Perfil 3: Modelo de resistividad con topografía	40
Fig.1.17 Perfil 4 A) Resistividad aparente medida B) Resistividad aparente calculada	
C) Modelo de resistividad	42
Fig.1.18 A) Ubicación del Perfil 4 B) Perfil 4: Modelo de resistividad con topografía	43
Fig.1.19 Sección geológica 1	44
Fig.1.20 Sección geológica 2	45
Fig.1.21 Sección geológica 3	46
Fig.1.22 Sección geológica 4	47
Fig.1.23 Visualización conjunta de los tendidos de Tomografía eléctrica	49
Fig.1.24 Modelo 3D de la zona de estudio A) Parte superior B) Vista transversal C) Parte inferior	51
Fig.1.25 Modelo volumétrico	53
Fig.1.26 Tendido (rojo) propuesto en la zona de estudio	56

Índice de tablas

Tabla 1 Información de los tendidos de tomografía eléctrica	25
Tabla 2 Tabla de investigación media Ze (Edwards 1977).....	59
Tabla 3 Valores de resistividad (W.M. Telford).....	60
Tabla 4 Valores representativos de las formaciones geológicas relacionadas al estudio geoelectrico de la cuenca de México (R. Rodríguez C. y C. Ochoa A.).....	61
Tabla 5 http://www.scielo.org.co/img/revistas/bcdt/n31/n31a03tab01.gif	62

Resumen

Se realizaron 4 perfiles de tomografía eléctrica con arreglo Wenner Schlumberger, 3 de estos con una extensión de 100 metros y 1 de 160 metros, los datos fueron procesados en el software RES2DINV obteniendo los modelos 2D para cada perfil y en base a los resultados se corroboró la presencia de andesita en la zona de la cantera La Joya. Así mismo en el modelo volumétrico 3D generado por Voxler, se observa que al NE de la zona de estudio se tiene probablemente la mayor concentración de andesita y se obtuvo el volumen aproximado de esta en la zona de estudio.

Dedicatorias

A mis padres, Abel Vargas y Leonor Huitzil, a quienes debo este importante pasó en mi vida profesional, por su amor y sacrificio en todos estos años; con amor y gratitud hacia ustedes.

A mi hermano Ricardo Vargas por su cariño y apoyo en todo momento; por ser un ejemplo a seguir.

‡ A mi abuela, Rosa Campos, por brindarme amor y sabiduría durante toda la vida.

Agradecimientos

Al M.C José Serrano Ortiz, por transmitir sus conocimientos y orientarme para la realización de esta tesis.

Al M.C Víctor Manuel Ramón Márquez y al Ing. Manuel Conrado Uribe Arriaga por transmitir sus conocimientos y ceder parte de su tiempo para leer este trabajo.

A los amigos que siempre estuvieron cerca, por su apoyo y amistad, a Fernando Barrientos, Jorge Santos, Germán Campeche, Liliana Cortés y Noé Lozada.

A mis profesores que durante todo este tiempo han transmitido sus conocimientos y experiencias. Por su paciencia y dedicación hacia cada uno de los estudiantes.

Introducción

La tomografía eléctrica es una técnica que genera imágenes a partir de la distribución de resistividades en el subsuelo (Tomografía 2D y 3D) donde los contrastes en la resistividad del subsuelo se asocian a estructuras geológicas u otro tipo de recursos de interés.

Prueba de ellos es la eficiencia de esta técnica para determinar plumas contaminantes, distribución subterránea de rocas (estructuras geológicas), investigación de acuíferos (profundos y superficiales) y para determinación del porcentaje de material aprovechable en función de su resistividad.

Objetivos

- ✓ El presente trabajo tiene como objetivo identificar la presencia de andesita en la zona de la Cantera La Joya, mediante tomografía eléctrica 2D, con el propósito que la información generada sirva para la posible explotación de la cantera.
- ✓ También se pretende generar un bloque 3D a partir de las tomografías 2D para aproximar la distribución de la litología en función de su resistividad en la zona de estudio.
- ✓ Finalmente aproximar el volumen de andesita.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Localización de la zona de estudio

El estado de Tlaxcala se ubica geográficamente en la región centro-oriental de la República Mexicana, se encuentra en las coordenadas UTM 14Q 580099.00 E, 2136185.00 N y 580562.00 E, 2136658.00 N.

La zona de estudio se localiza en el municipio de Ixtacuixtla de Mariano Matamoros el cual se ubica al poniente del Estado de Tlaxcala, La cantera queda comprendida entre las coordenadas UTM 14Q 564335.00 E, 2147342.00 N; 564404.00 E, 2147090.00 N; 564862.00 E, 2147362.00 N y 564800.00 E, 2147101.00 N.

En la figura 1, se presenta la división municipal del Estado de Tlaxcala y la ubicación del municipio de Ixtacuixtla de Mariano Matamoros y dentro de este la localización de la cantera La Joya (polígono rojo). El municipio colinda al norte con Españita y Hueyotlipan, al sur con Tepetitla de Lardizábal y Santa Ana Nopalucan y al este con Panotla.

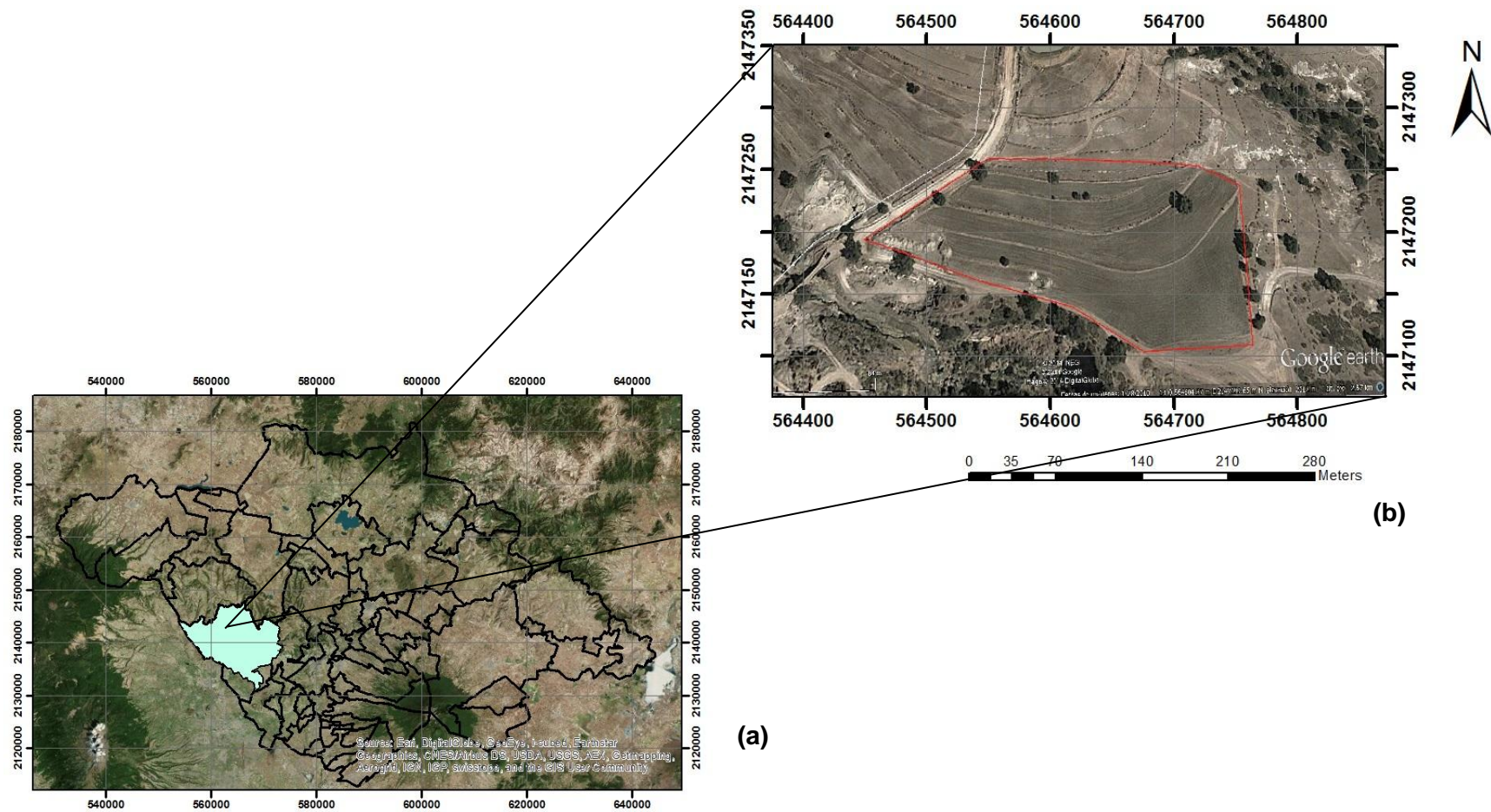


Fig. 1 División municipal del Estado de Tlaxcala (CONAFOR, Tlaxcala)
(a) Ubicación del municipio de Ixtacuixtla de Mariano Matamoros **(b)** Zona de estudio

1.2 Geología regional

Tlaxcala se ubica en el centro de la República Mexicana dentro de la Faja Volcánica Transmexicana, “este territorio accidentado se caracteriza por la presencia de mesetas, lomeríos, llanuras, un cañón y el volcán La Malinche o Matlacueyatl” (Samaniego Lermo , J & Bernal Esquia, I. (2006).Zonificación sísmica del estado de Tlaxcala,UNAM,p. 215-221)

Según datos obtenidos de la carta geológico-minera escala 1:250 000 de la Ciudad de México que también abarca parte del estado de Tlaxcala, expone la ausencia de yacimientos metálicos, pero pone énfasis en los minerales no metálicos y documenta alrededor de 400 minas de las cuales 100 están siendo explotadas para la obtención de arena, grava, caliza, etc.

1.2.1 Fisiografía

De acuerdo con el INEGI (2009) el estado de Tlaxcala queda comprendido dentro de la provincia denominada “Eje neovolcánico” el cual es descrita como una acumulación de estructuras volcánicas, esta provincia está constituida por “...grandes sierras volcánicas, colados lávicos, conos dispersos o en enjambre y depósitos de arenas y cenizas” (Obtenido de <http://132.248.9.195/pd2007/0611681/A5.pdf>).

“La provincia del Eje Neovolcánico está integrada por una cadena de estratovolcanes como: Volcán de Colima, Tancítaro, Zináltécatl (Nevado de Toluca), Popocatépetl, Iztaccíhuatl, Matlacuéyatl (Malinche) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), atravesando el

país de este a oeste” (Aguilar Murillo, C.A, (2012), Reconocimiento Geológico de la Zona de Skarn de la Sierra de Tlayca y Tlayecac en el Estado de Morelos, México, Tesis licenciatura, Universidad de Sonora, p.13).

A su vez el estado de Tlaxcala se encuentra inmerso en su totalidad dentro de la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac, es la mayor de las 14 provincias que integran al Eje neovolcánico y está conformada por sierras volcánicas alternadas con grandes llanuras.

El municipio de Ixtacuixtla forma parte de lo que los geólogos han denominado bloque de Tlaxcala, este se encuentra entre los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y las faldas del volcán Matlacuéyatl (Malinche), el bloque se caracteriza por la presencia de cañadas y zanjas.

1.2.1.1 Geomorfología

La morfología de la Faja volcánica transmexicana se caracteriza por presencia de fenómenos volcánicos durante casi todo el terciario lo que da lugar a la presencia de domos riolíticos, estrato volcanes y presencia de mesetas formadas por flujos piroclásticos y derrames basálticos, actualmente estos depósitos están en fase erosiva y la presencia de fallas y fracturas vinculadas a la actividad de la faja volcánica transmexicana han sido los factores importantes que han influido en la morfología actual.

En particular el área de estudio que se encuentra dentro del denominado Bloque Tlaxcala es región que se elevó debido a la presencia de una falla normal originada durante el Mioceno temprano. Esta región se conforma por secuencias lacustres del

terciario las cuales están cubiertas por roca volcánica de conos monogenéticos del Cuaternario (Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 64, núm. 1, 2012, p. 91-108).

1.2.1.2 Geología de la zona de estudio

De acuerdo con la carta geológico-minera (Fig 1.1) la región de la cantera La Joya, Ixtacuixtla, presenta elementos geológicos pertenecientes a la era Cenozoica pero corresponden a dos periodos, Cuaternario y Neógeno .Los depósitos del Cuaternario están constituidos por Aluvión (Qhoal), Lahar–Toba Andesítica (Qho Lb-TA), Andesita –Basalto (QptA-B5) y Toba Andesítica-Andesita (QptTA-A) , en particular en la región de Mariano Matamoros presenta depósitos del Neógeno constituidos por Toba Andesítica-Andesita (Tpl TA-T2) y Lacustre (Tpl Qpt la2).

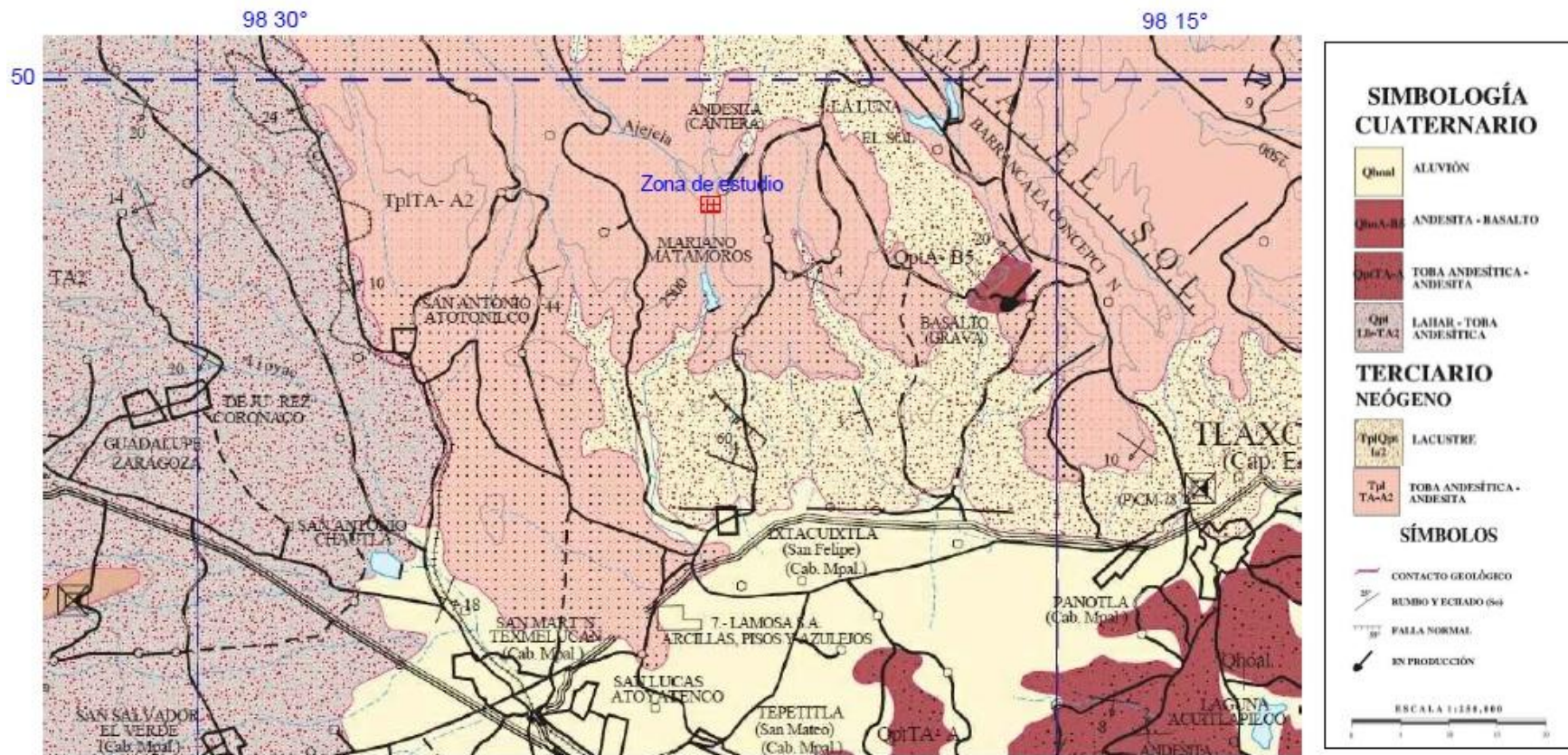


Fig. 1.1 Plano geológico regional

Modificado de Carta Geológica-Minera ciudad de México E14-2

1.3 Antecedentes

Aunque los métodos eléctricos han sido usados con frecuencia en la exploración de agua, en la actualidad se ha demostrado la eficiencia del método en otras áreas, como exploración de recursos minerales metálicos y no metálicos, es así como en los siguientes párrafos se presentan algunas aplicaciones de los métodos eléctricos en relación a la búsqueda de minerales no metálicos.

El Servicio Geológico Mexicano (2011) presentó un informe con conocimiento geocientífico el cual tiene como propósito divulgar el panorama minero del estado de Tlaxcala; esta información es solo de manera regional para dar una perspectiva de la distribución espacial y zonal de los minerales económicamente explotables con lo que se atraerá inversión y como consecuencia la generación de empleos en la zona

Ramón Márquez V.M. (2011) realizó estudios de resistividad en la localidad de Atexca, Municipio de Zacatlán, Puebla mediante diez sondeos eléctricos verticales con el objetivo de determinar el espesor y distribución de arenas feldespáticas susceptibles a explotación. Además generó un mapa de isopacas en el cual se puede observar la distribución del material y espesor, todo esto gracias a la integración de datos geofísicos y geológicos.

Bracamonte Gómez, M.E., & Calvo Martínez, K.E (2009) de la Universidad de El Salvador presentan en su investigación de yacimientos de Diatomita sondeos eléctricos verticales (Schlumberger) y sondeos eléctricos verticales Dipolo-dipolo, con el fin de determinar las zonas con mayor concentración del mineral de interés, en los resultados presentados el yacimiento posee forma de cuenca, también se

identificaron 3 sub-cuencas de tierras Diatomáceas las cuales presentan mayor pureza y espesores que las hacen aptas para la explotación de este mineral.

Daza Sánchez, A., (2011) de la Universidad de Córdoba, presenta aplicaciones industriales de Arcillas en la provincia de Córdoba, a fin de complementar su trabajo realizó investigación geofísica en Aguilar de la Frontera (Córdoba) donde el principal objetivo fue descubrir y caracterizar arcillas de interés económico mediante toma de muestras y sondeos eléctricos verticales, con lo cual se detectó la profundidad y continuidad de las arcillas.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1 Prospección eléctrica de corriente continua

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos de la prospección eléctrica que tiene como objetivo medir la resistividad del subsuelo emitiendo un campo artificial de corriente continua y registrando las diferencias de potencial; todo este proceso consiste fundamentalmente en inyectar corriente mediante un par de electrodos A y B conectados a una batería y a un amperímetro el cual medirá la intensidad de corriente para después medir la diferencia de potencial por medio de otro par de electrodos M y N conectados a un voltímetro (Fig. 1.2); a partir de las mediciones tomadas en campo se podrá estimar la resistividad real del suelo, la cual en "... un medio determinado cambia en todas las direcciones debido a la anisotropía y heterogeneidad del subsuelo" (Andrés Antonio López Hidalgo, M. H. (2006). Obtenido de <http://www.geotomosoft.com/Articulo.pdf>, p 3).

Dentro de los métodos eléctricos destaca la tomografía ya que otorga un modelo más preciso de la distribución espacial de la resistividad en el suelo y permite establecer las propiedades de ciertas estructuras, así en este capítulo se mostrará la teoría básica de la prospección eléctrica y los principales arreglos tetraelectródicos utilizados en la obtención de imágenes de resistividad 2D.

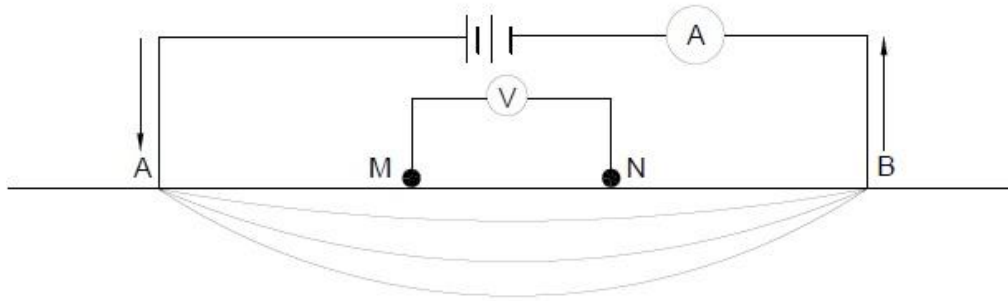


Fig. 1.2 Esquema de aplicación de corriente eléctrica al terreno

2.2 Fundamentos teóricos: Resistividad

La resistividad (ρ) como tal es una *propiedad* del conductor la cual se mide en ohm-m, en otros términos se refiere a una medida de dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso; esta medida es una constante para cada material es decir no dependerá de la variación de la corriente.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (1)$$

Donde sigma (σ) toma el nombre de conductividad eléctrica, la cual se define como la facilidad por la que la corriente eléctrica pasa a través de un material.

“La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales. Además, su valor depende de diversos factores como la temperatura, humedad o presión” (Javier S. Salgado Pareja, E. C. (2002). Obtenido de <http://www.utm.mx/temas/temas-docs/ensayo2t17.pdf>,p13)

2.2.1 Resistencia

La resistencia de un conductor es un comportamiento que detalla la relación proporcional que guarda con la longitud del conductor y su relación inversa con el área de la sección transversal, es decir un conductor más delgado tendrá mayor resistencia; pero esto solo se cumple siempre y cuando se involucre la resistividad del material, por lo que finalmente se tiene a la resistencia como:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1.1)$$

2.3 El método eléctrico

Basados en la proposición que hace Orellana, E. (1982), p.107, de “trazar alrededor del electrodo A y dentro de un semiespacio inferior una superficie semiesférica y en cualquier punto de ella a razón de su simetría, la densidad de corriente J tendrá el mismo valor que I y será dirigida radialmente” (Fig.1.3).

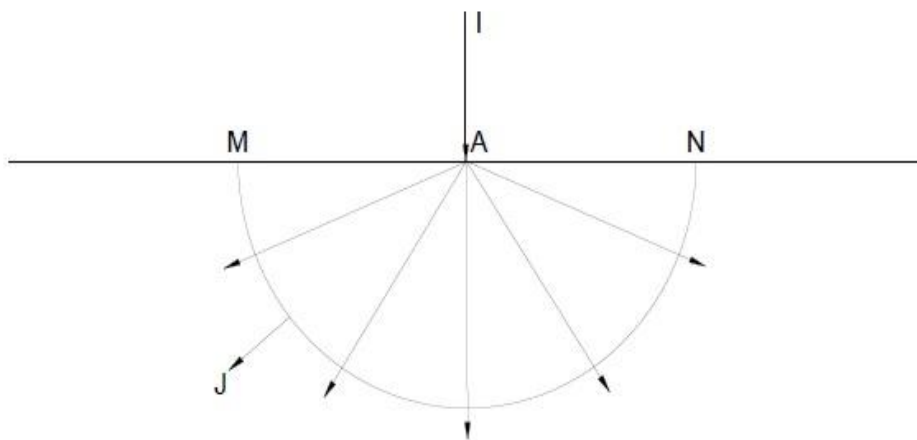


Fig. 1.3 Se muestra la densidad de corriente J dirigida radialmente en dirección a la corriente I , con el electrodo puntual A

Recordando que:

$$J = \sigma E \quad (1.2)$$

$$E = \frac{J}{\sigma} \quad (1.3)$$

Y la densidad de corriente J cuando se encuentra distribuida uniformemente se describe de la siguiente forma:

$$J = \frac{I}{A} \quad (1.4)$$

Ahora bien el área de la semiesfera es de $2\pi r^2$, con esto podemos obtener el campo eléctrico que genera el electrodo puntual, quedando de la siguiente forma:

$$E = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} \quad (1.5)$$

Ahora retomando la ecuación que define la diferencia de potencial entre dos puntos y aplicándola para obtener ΔV entre M y N, queda como se muestra, recordando:

$$\Delta V = - \int_A^B E ds \quad (1.6)$$

Para los puntos M y N (Fig. 1.4)

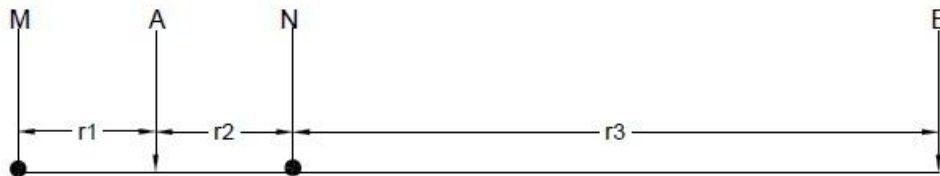


Fig. 1.4 Distribución de distancias entre los electrodos de corriente y potencial

$$\Delta V = - \int_N^M \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} dr \quad (1.7)$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.8)$$

Entonces el potencial para el punto M y N, tomando en cuenta el electrodo B que cierra el circuito, queda de la siguiente manera:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (1.9)$$

Despejando ρ , se obtiene la siguiente ecuación, en la cual se nota el factor geométrico que dependerá del tipo de arreglo utilizado.

$$\rho = \frac{2\pi}{\underbrace{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)}_{\text{Factor geométrico}}} \frac{\Delta V}{I} \quad (1.10)$$

Este factor geométrico se verá modificado por las distancias entre electrodos de cada arreglo, los cuales se describirán en los siguientes párrafos.

2.3.1 Resistividad aparente

El semiespacio considerado para la solución de las ecuaciones anteriores de prospección eléctrica son para un medio homogéneo, sin embargo esta condición es casi inexistente en la naturaleza, por lo tanto al aplicar la ecuación de resistividad (1.10) a medios heterogéneos resulta la resistividad aparente ρ_a , en consecuencia surge el problema inverso, el cual tiene como objetivo hallar la resistividad real.

2.3.2 Inversión de datos

La inversión geofísica está basada fundamentalmente en crear un modelo de una sección de la Tierra a partir de sus propiedades físicas, de esta manera el programa de inversión propone un modelo que se ajuste al modelo de los datos obtenidos en campo, para después inferir los parámetros reales.

En el caso de inversión de datos de resistividad aparente, el modelo propuesto por el programa es transformado en un modelo de resistividades reales mediante conjuntos de operaciones que permitirán hallar la respuesta al problema planteado, este modelo de resistividades reales tendrá que ser congruente con el objetivo del problema a resolver y la geología del lugar.

El método de inversión de datos más utilizado en prospección eléctrica es por aproximación de mínimos cuadrados, el cual tiene como objetivo minimizar las discrepancias entre los parámetros físicos medidos en laboratorio y los parámetros obtenidos en campo.

2.3.3 Dispositivos tetra-polares

En este trabajo se mencionarán los arreglos para tomografía eléctrica más frecuentes y útiles en la práctica debido a su resolución, rapidez y sus distintas aplicaciones.

2.3.3.1 Arreglo Wenner

En este arreglo los electrodos se colocan de la siguiente manera, $AM = MN = NB$ es decir los electrodos de corriente y de potencial se colocan a una distancia "a" constante, como se muestra en la figura 1.5-A, citando a Loke, M. H. (2001). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys, p28. "El arreglo Wenner es más sensible a cambios verticales de resistividad en el subsuelo debajo del centro del arreglo. Sin embargo es menos sensible a cambios horizontales". Ahora resolviendo la ecuación 1.7 para los cuatro electrodos, se obtendrá el factor geométrico $2\pi a$.

Una de las desventajas que muestra este arreglo, es la poca sensibilidad horizontal que se presenta al ir incrementando el espacio entre electrodos. La figura 1.5-B muestra los puntos de adquisición para 33 electrodos y 6 niveles, se puede observar que presenta menor pérdida de datos de manera vertical, lo cual como ya se mencionó es la ventaja de este arreglo.

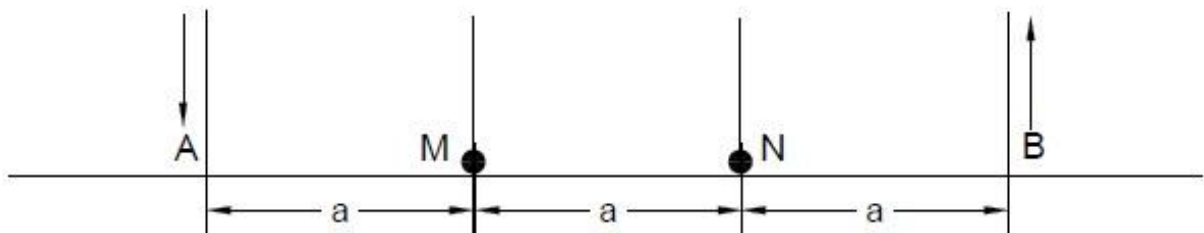


Fig. 1.5- A Distribución eléctrica del arreglo Wenner

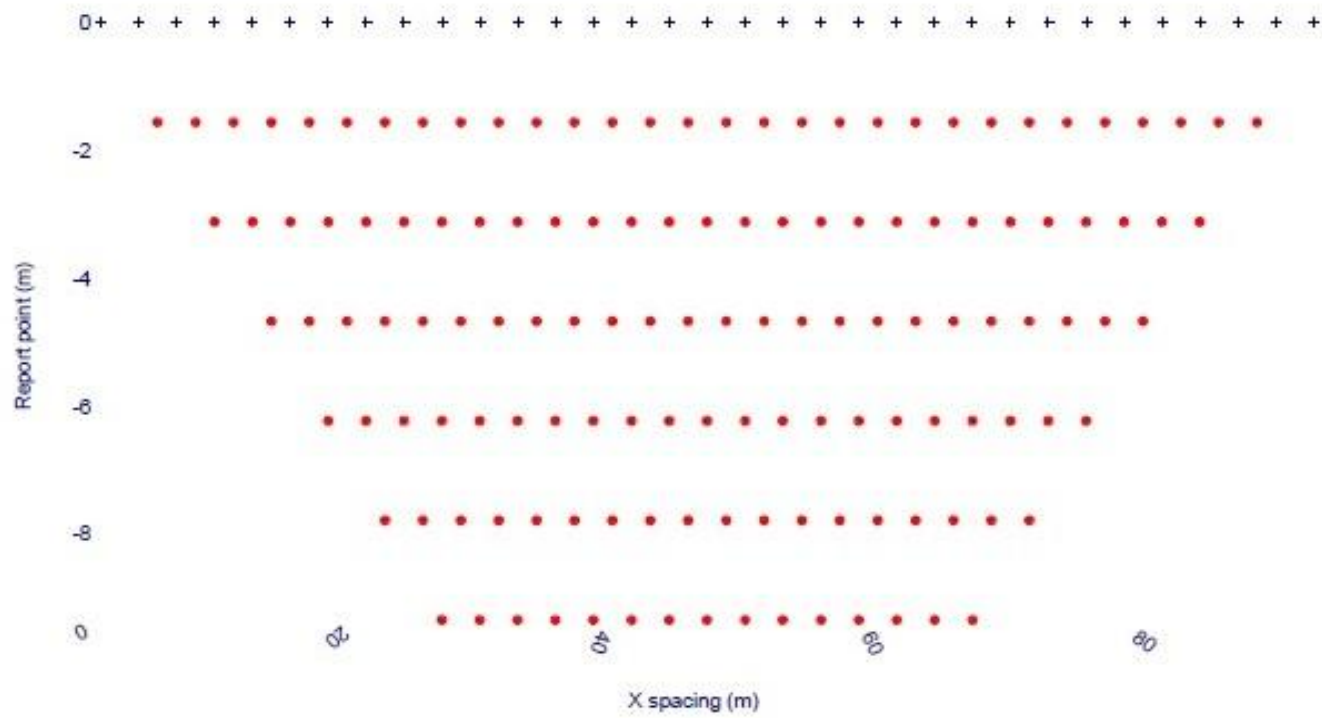


Figura 1.5-B Diagrama de puntos de atribución para el arreglo Wenner

Sánchez Reynoso A.R. (2011). Análisis comparativo entre diferentes arreglos de tomografía de resistividad eléctrica 2D.Tesis licenciatura, UNAM, p.16

2.3.3.2 Arreglo Wenner-Schlumberger

Este arreglo combina la resolución vertical de Wenner y la horizontal de Schlumberger, como se observa en la figura 1.6-A los electrodos AM y NB tienen un factor de espaciamiento “ na ” y MN un factor de “ a ” que permanece constante.

En el arreglo Wenner-Schlumberger se inicia colocando los cuatro electrodos a una distancia constante y la separación aumentará conforme aumente el factor n , Es así como resulta en una combinación que aporta resolución vertical y horizontal.

Resolviendo la ecuación 1.7 se obtendrá el factor geométrico $\pi an(n + 1)$. En la Figura 1.6-B se observará mejor el alcance del arreglo, el cual consta de 34 electrodos y 17 niveles, se puede observar que la toma de datos es más cerca entre un punto y otro en forma horizontal y vertical, lo cual representa la ventaja de este arreglo.

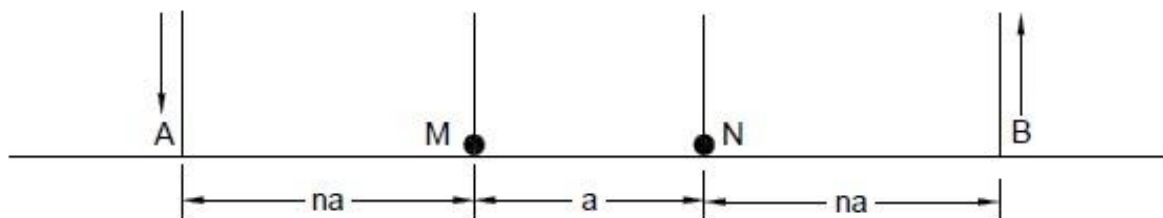


Fig. 1.6-A Distribución eléctrica del arreglo Wenner Schlumberger

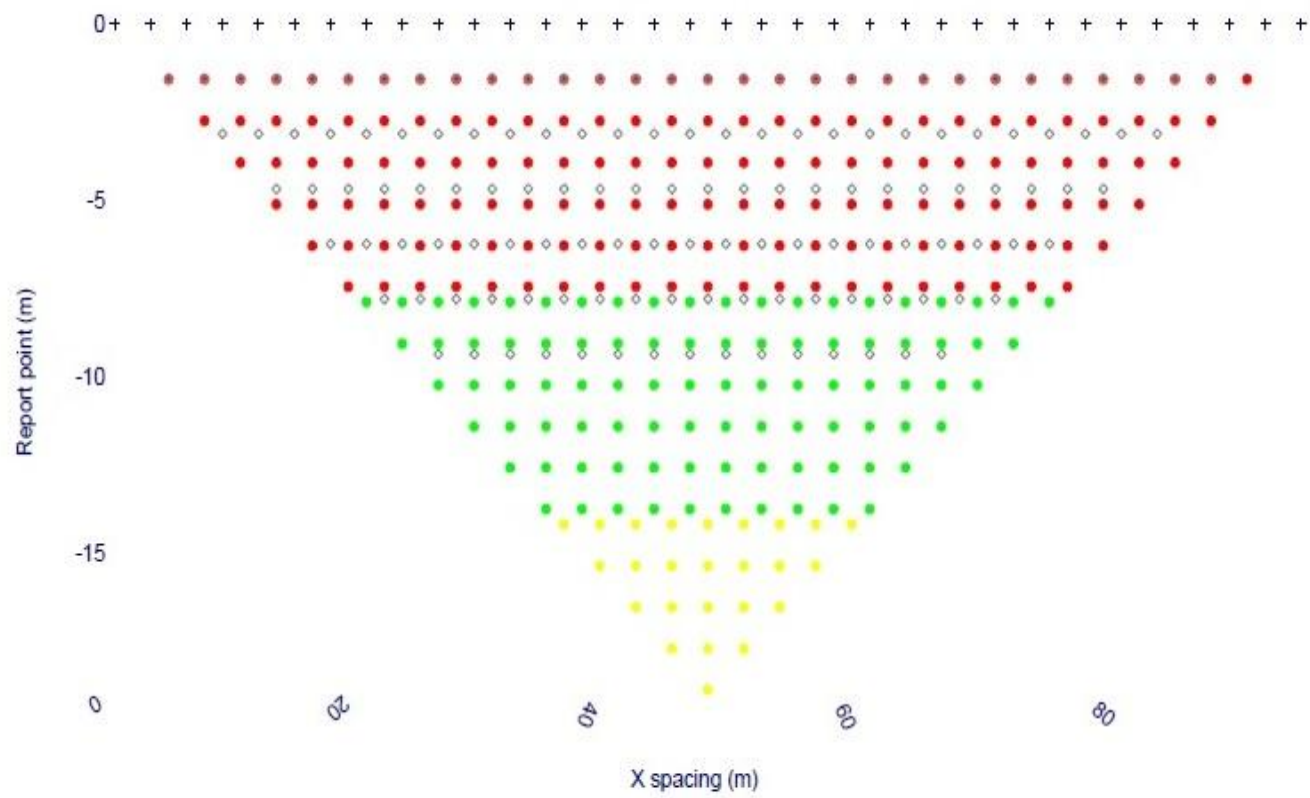


Fig. 1.6-B Diagrama de puntos de atribución para el arreglo Wenner-Schlumberger

Sánchez Reynoso A.R. (2011).p, 15

2.3.3.3 Arreglo Dipolo-dipolo

La figura 1.7-A presenta la distribución del arreglo dipolo-dipolo en el cual los electrodos de corriente AB se colocan en un extremo del tendido mientras que los electrodos de potencial MN se sitúan al final del tendido, los electrodos AB y MN se encuentran a una separación constante “a” mientras que BM se abren con el factor “na”. En la Figura 1.7-B se muestra la distribución de los puntos de atribución, el cual está conformado por 26 electrodos y 20 niveles, de los cuales se observa que para “n=1” se obtiene 23 puntos de adquisición y por cada nivel que desciende solo se pierde un dato, sin embargo al llegar a mayor profundidad se pierde más datos, por lo tanto el arreglo dipolo-dipolo tiene mayor resolución en los niveles cercanos a la superficie.

El factor geométrico, igual que para los demás arreglos se obtiene resolviendo la ecuación 1.7, y queda de la siguiente manera $\pi a n(n + 1)(n + 2)$

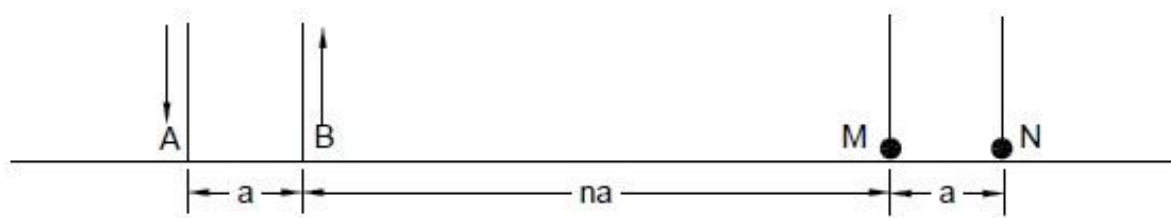


Fig. 1.7- A Distribución eléctrica del arreglo Dipolo-dipolo

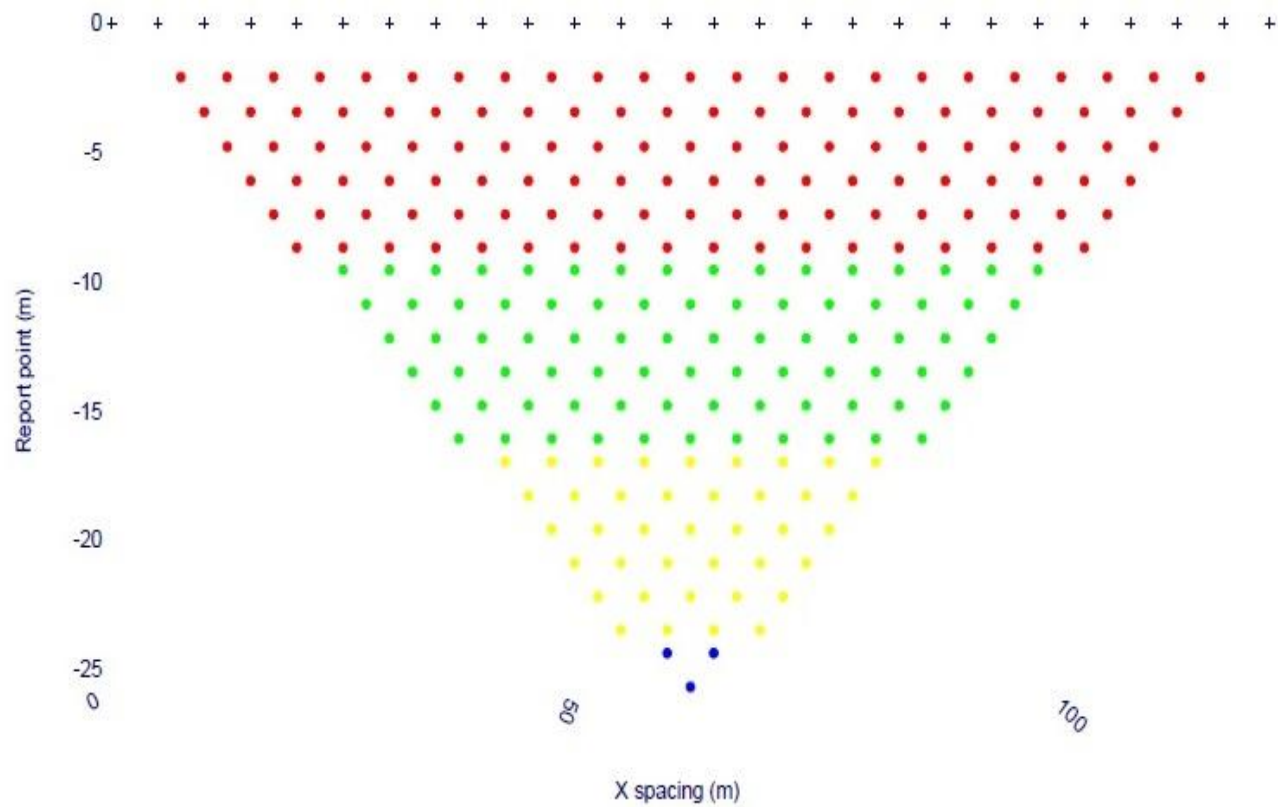


Fig. 1.7-B Diagrama de puntos de atribución para el arreglo Dipolo-Dipolo

Sánchez Reynoso A.R. (2011),p, 14

Capítulo 3

Metodología

3.1 Instrumentación

El equipo utilizado fue un Resistivímetro Saris Scintrex (Fig. 1.8). Es un receptor y transmisor, con una potencia de 100 V, 500 V y 1 A, cuenta con un micro procesador, memoria interna y una pantalla de visualización de gráficos, es capaz de soportar un sistema de cables inteligentes.



Fig. 1.8 Equipo para Tomografía eléctrica Saris Scintrex

Se requirió de 21 electrodos, los cuales fueron utilizados para montar el arreglo Wenner-Schlumberger en conjunto con 4 carretes de cable, un par de carretes se conecta al resistivímetro y a los extremos del arreglo los cuales tienen la función de transmitir corriente, el par restante se conecta a dos electrodos en el centro del

arreglo, los cuales medirán la diferencia de potencial. Otras herramientas utilizadas fueron marro, cinta métrica y GPS.

3.2 Planificación

Para iniciar con este proyecto y con la finalidad de obtener una buena ejecución, se desarrolló labores administrativas y logísticas previas al trabajo de campo. Las labores consistieron en una visita de campo a la cantera La Joya ubicada dentro del municipio de Ixtacuixtla de Mariano Matamoros para dar una tentativa de la distribución de los tendidos de tomografía eléctrica, también se realizaron pruebas previas con el equipo operativo para comprobar que se encontrará en condiciones óptimas y con el personal de trabajo para verificar el manejo de este y así obtener mediciones de manera rápida y eficaz.

Una vez terminada la revisión del equipo de trabajo, se procedió a realizar una solicitud de préstamo al laboratorio integral de la facultad de ingeniería (BUAP) y con base en todo lo mencionado se da paso a la siguiente etapa del proyecto, la cual se describirá en los párrafos siguientes.

Otro punto importante que se tomó en cuenta fue la planeación de los tendidos antes de proceder a la adquisición de datos, se escogió el arreglo Wenner- Schlumberger dado que presenta una resolución horizontal y vertical buena, por lo tanto se observaran de manera aceptable las variaciones laterales y la profundidad de la resistividad de la cantera La Joya. Antes de la medición se planteó llegar a una profundidad mínima de 15 metros, por lo que se realizó el cálculo de la profundidad

teórica tomando en cuenta la tabla de Edwards para una separación electródica de 5 y 8 metros, y para 8 niveles.

3.3 Adquisición

Los datos fueron recabados en una salida de campo de tres días, la cual inicio el sábado 21 de junio de 2014 y finalizo el lunes 23 de junio.

En primer lugar se procedió a verificar la extensión de los tendidos todo esto tomando en cuenta las limitaciones del terreno. Teniendo comprobada la extensión se procedió a colocar los electrodos con espacios equidistantes entre ellos y una vez colocados se efectuó la conexión de cables al resistivímetro y a los electrodos correspondientes (Fig. 1.9).



Fig. 1.9 Fotografía del Tendido de Tomografía eléctrica tomada en la cantera La Joya

Concluida la verificación de las conexiones entre el resistivímetro y los electrodos se procedió a inyectar corriente y a la toma de datos. De esta manera se sigue una secuencia de medidas abriendo el espacio entre los electrodos de corriente para cada cambio de nivel hasta llegar a $n=8$, este mismo procedimiento se efectuó para las 4 tomografías. En la tabla 1 se muestra las coordenadas iniciales y finales de los tendidos, así como la extensión, niveles y factor de espaciamento.

Wenner-Schlumberger						
Tendido	a (m)	n	zona	Coordenada inicial	Coordenada final	Longitud (m)
1	5	8	14 Q	564488 E 2147187 N	564585 E 2147171 N	100
2	5	8	14 Q	564529 E 2147155 N	564558 E 2147250 N	100
3	5	8	14 Q	564630 E 2147130 N	564728 E 2147131 N	100
4	8	8	14 Q	564731 E 2147114 N	564731 E 2147117 N	168

Tabla 1 Información de los tendidos de tomografía eléctrica

En la figura 1.10 se muestra la distribución de los tendidos de tomografía en la cantera La Joya, como ya se ha mencionado se tuvieron limitaciones en cuanto al área del terreno, sin embargo se ajustaron los tendidos para abarcar la mayor área posible de la cantera.



Fig. 1.10 Distribución de los tendidos de tomografía eléctrica en la zona de estudio

3.3.1 Procesamiento de datos en Res2Dinv

El primer paso para iniciar con el procesamiento de datos obtenidos del resistivímetro es ordenarlos en un formato que es requerido por el programa Res2Dinv para que puedan ser leídos.

- Fila 1 Nombre
- Fila 2 Separación electródica
- Fila 3 Tipo de dispositivo electródico (Wenner-Schlumberger ; 7)
- Fila 4 Número de puntos obtenidos
- Fila 5 Punto de atribución (centro del electrodo se indica con el número 1)
- Fila 6 Se coloca cero ya que solo existen datos de resistividad aparente
- Fila 7 Se coloca los datos en cuatro columnas: la posición de X, separación electródica, n y el valor de resistividad obtenido.

Al final de los datos se coloca un 2 para indicar que existen datos de topografía que se incluirán en el archivo *.dat, en la siguiente fila se coloca el número de datos topográficos obtenidos, finalmente se cierra el formato con cuatro ceros consecutivos.

Ya que se tienen ordenados los datos de esta forma, se abre en el programa Res2Dinv y se selecciona el parámetro en el cual se trabajará que en este caso será “Least-squares” el cual calculará los valores de resistividad mediante el método de mínimos cuadrados, terminado este proceso el programa pedirá guardar un nuevo archivo con extensión *.INV.

Al terminar este proceso, nuevamente desde Res2Dinv se le da la opción en el menú *Display / show inversion results* el cual abrirá una nueva ventana desde la cual se leerán los datos que han sido procesados con topografía, una vez abierto el resultado de inversión se mostrara las características del procesado incluyendo el tipo de arreglo, la separación electródica , localización de los electrodos, niveles, numero de electrodos , iteraciones realizadas por el programa Res2Dinv y los datos de topografía. Para visualizar el resultado con topografía se selecciona el menú *Display section / include topography in model display*.

Los resultados obtenidos a partir del proceso de inversión en el programa Res2Dinv se muestran e interpretan en los siguientes párrafos.

Capítulo 4

Interpretación

4.1 Perfil geoeléctrico 1

En la figura 1.11-A se muestra la pseudosección con resistividad aparente medida, la cual presenta una distribución de resistividades con un rango entre 17 y 97.0 ohms-m distribuida de manera uniforme en franjas horizontales, de igual forma la pseudosección con resistividad calculada (Fig. 1.11-B) muestra rangos de resistividades entre los 17 y 97.0 Ohms-m. Por otro lado, el modelo 2D de resultados de inversión (Fig.1.11-C) muestra un rango de resistividades de 17 a 225.4 ohms-m.

En el modelo 2D con topografía (Fig. 1.12-B) se puede observar que en la parte superficial se tiene resistividades de entre 17 y 37 ohms-m las cuales corresponden a una mezcla de arcillas y limos saturados debido a las lluvias de la época en la zona de estudio. Al inicio del modelo de resistividad y hasta los 20 m de longitud se tiene espesores de 2.5 m, sin embargo al llegar a la longitud de 42.5 se observa un aumento de espesor de 3m, para el resto del tendido permanece constante con espesores de aproximadamente 2.5 m hasta terminar en un 1 m de espesor.

La segunda zona se vuelve más resistiva, al presentar rangos de resistividades de 57 a 97 ohms-m la cual corresponde a depósitos limo-arena. En un inicio el modelo de resistividad presenta un espesor de 2.5 m el cual se reduce hasta 1 m conforme avanza al centro hasta que se aumenta el espesor a 3 m en una longitud de 42.5 m

del perfil, el espesor de esta zona de adelgaza conforme avanza hacia el final del perfil.

La tercera zona presenta rangos de resistividades de entre 117 a 225.4 ohms-m y se asocia a la roca denominada andesita esta zona se encuentra de forma constante en todo el perfil de resistividad, presentado al inicio del modelo un espesor de 6 m el cual aumenta de manera progresiva hasta 11 m conforme se avanza al centro del perfil sin embargo, al llegar a los 42.5 m de longitud del perfil se presenta un espesor de 6 m para nuevamente aumentar de manera constante hasta 8 conforme se avanza al final del tendido, y posteriormente regresar al espesor de 6m en el extremo del modelo.

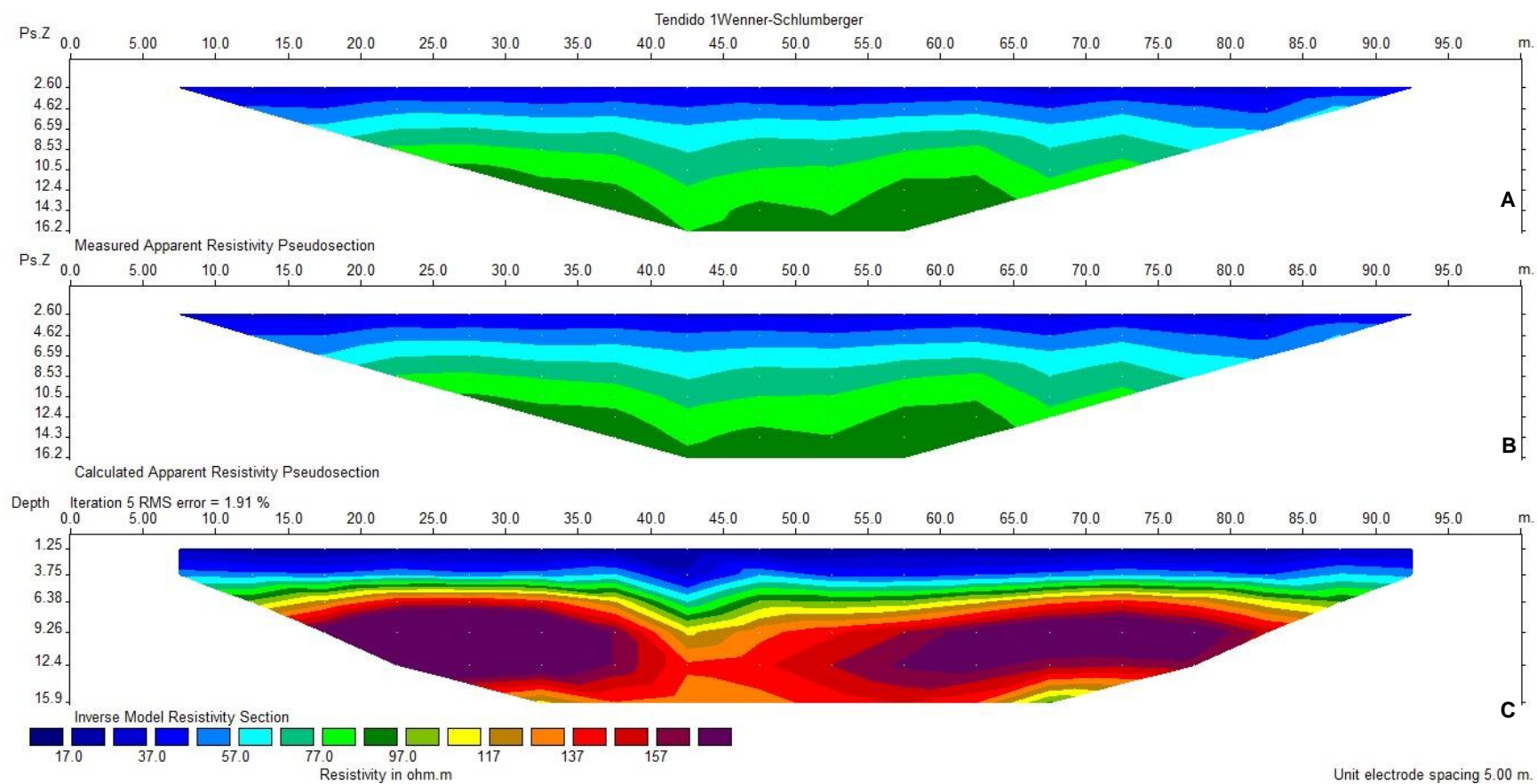


Fig. 1.11 Perfil 1 A) Resistividad aparente medida B) Resistividad aparente calculada C) Modelo de resistividad

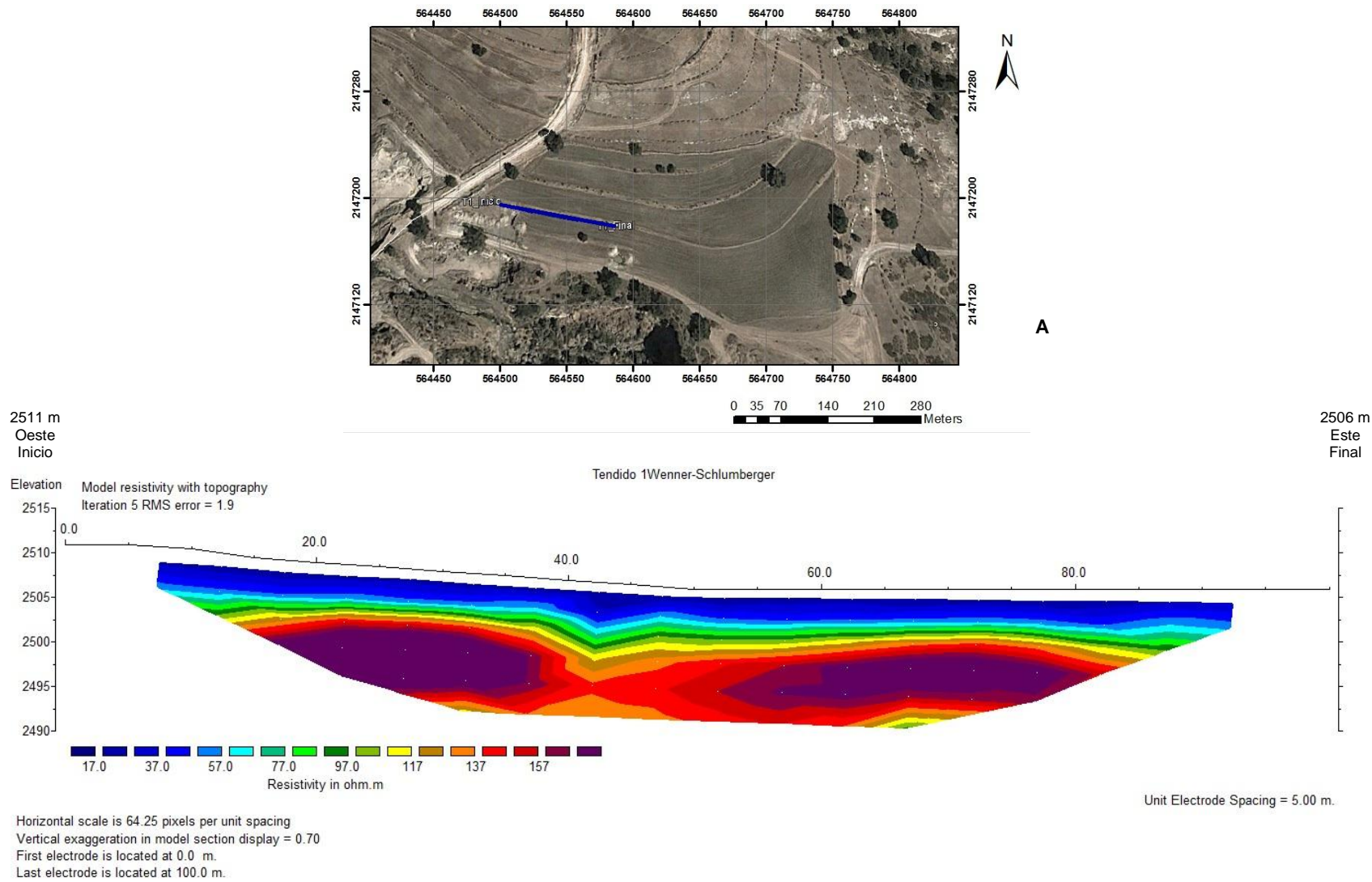


Fig. 1.12 A) Ubicación del Perfil 1 B) Perfil 1: Modelo de resistividad con topografía

4.2 Perfil geoelectrico 2

En la figura 1.13-A se muestra la pseudosección con resistividad aparente medida, la cual presenta una distribución de resistividades con un rango entre 11.9 y 91.9 ohms-m distribuida de manera uniforme en franjas horizontales, de la misma manera la pseudosección con resistividad calculada (Fig. 1.13-B) muestra rangos de resistividades entre los 11.9 y 91.9 Ohms-m. Por otro lado, el modelo 2D de resultados de inversión (Fig.1.13-C) muestra un rango de resistividades de 11.9 a 264.9 ohms-m.

En la figura 1.14-B se presenta el modelo resistividad 2D con topografía, el cual conserva el rango de resistividades similar al perfil 1 (Fig. 1.12) que van entre 11.9 a 31.9 ohms-m en la superficie debido a la mezcla de arcillas y limos saturados. Esta zona se muestra en todo el perfil, presentándose espesores de 1.25 m aproximadamente al inicio, teniendo un aumento de espesor de 5 m a los 35 m de longitud, reduciéndose a 1.25 m aproximadamente a los 43 m de longitud para retomar un espesor constante de 3.7 m, sin embargo a los 80 m de longitud se muestra un espesor de 7.5 m.

La segunda zona con resistividades entre 51.9 a 91.9 ohms-m se presentan en todo el perfil, la resistividad de esta zona se asocia a limo-arena. Al inicio del modelo de resistividad se presenta espesores de 2.5 m sin embargo, al avanzar al centro del perfil el espesor aumenta a 11 m bajo 43 m de longitud y al inicio de los 49 m de longitud se tienen espesores de 9 m, permaneciendo constantes en casi todo el perfil, hasta llegar casi al final con un espesor de 8 m.

Ahora la tercera zona muestra rangos de resistividades de 112 a 264.9 ohms-m está zona se encuentra presente solo al inicio del tendido hasta los 46 m de longitud con un espesor máximo de 7 m.

Este perfil al tener una variación importante en cuanto a la elevación que presenta se observó una modificación en la limitación de la zona geoelectrica alta, la cual se puede observar en el modelo de resistividad sin topografía y con topografía (fig.1.13 y 1.14)

Se destaca que el perfil 1 (fig.1.12) se intercepta con el perfil 2 (fig.1.14) a los 51 y 24 m, respectivamente y con base en esto se hace notar que los rangos de resistividades asociados a la andesita coinciden entre uno y otro perfil.

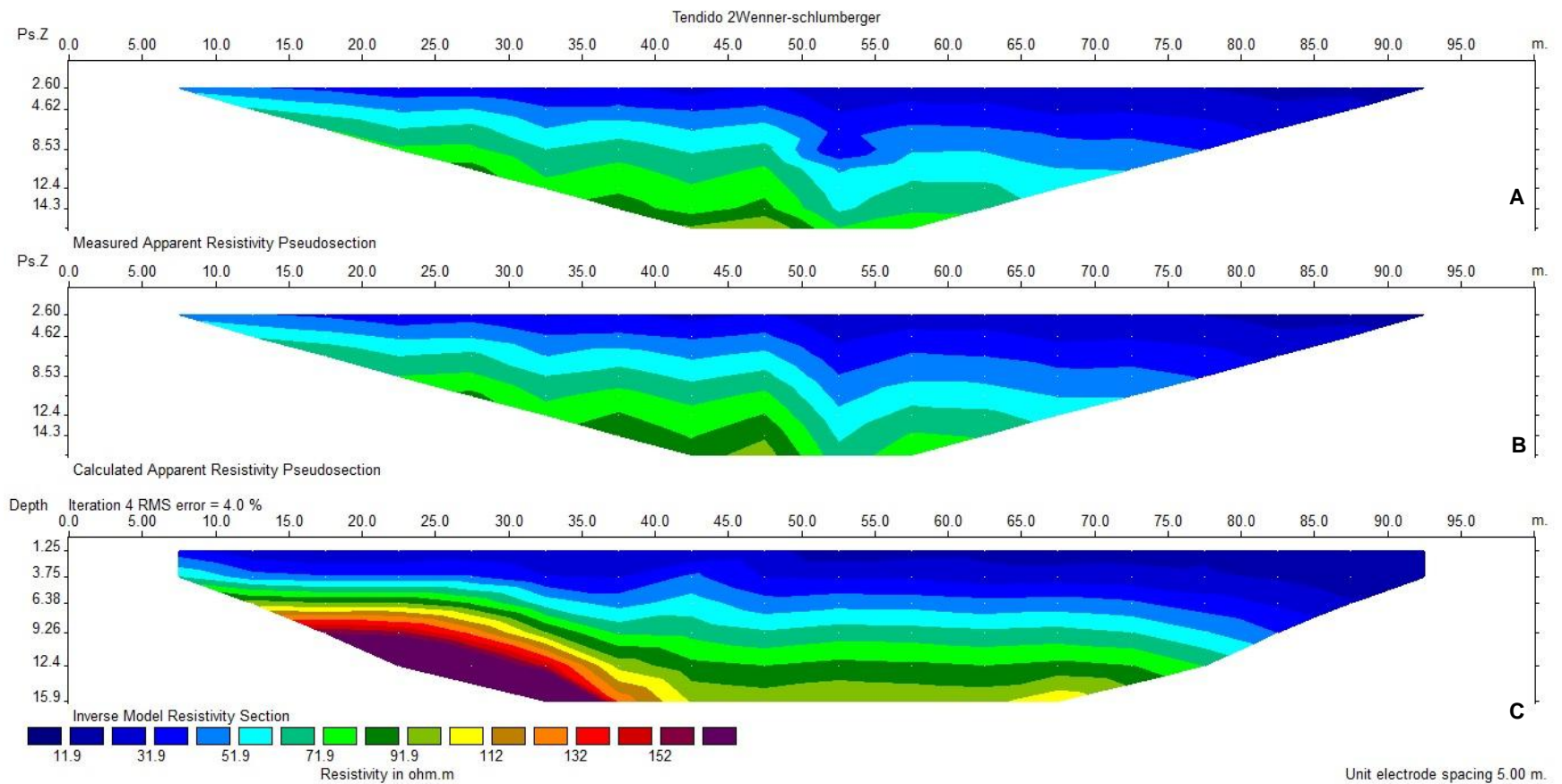


Fig. 1.13 Perfil 2 A) Resistividad aparente medida B) Resistividad aparente calculada C) Modelo de resistividad

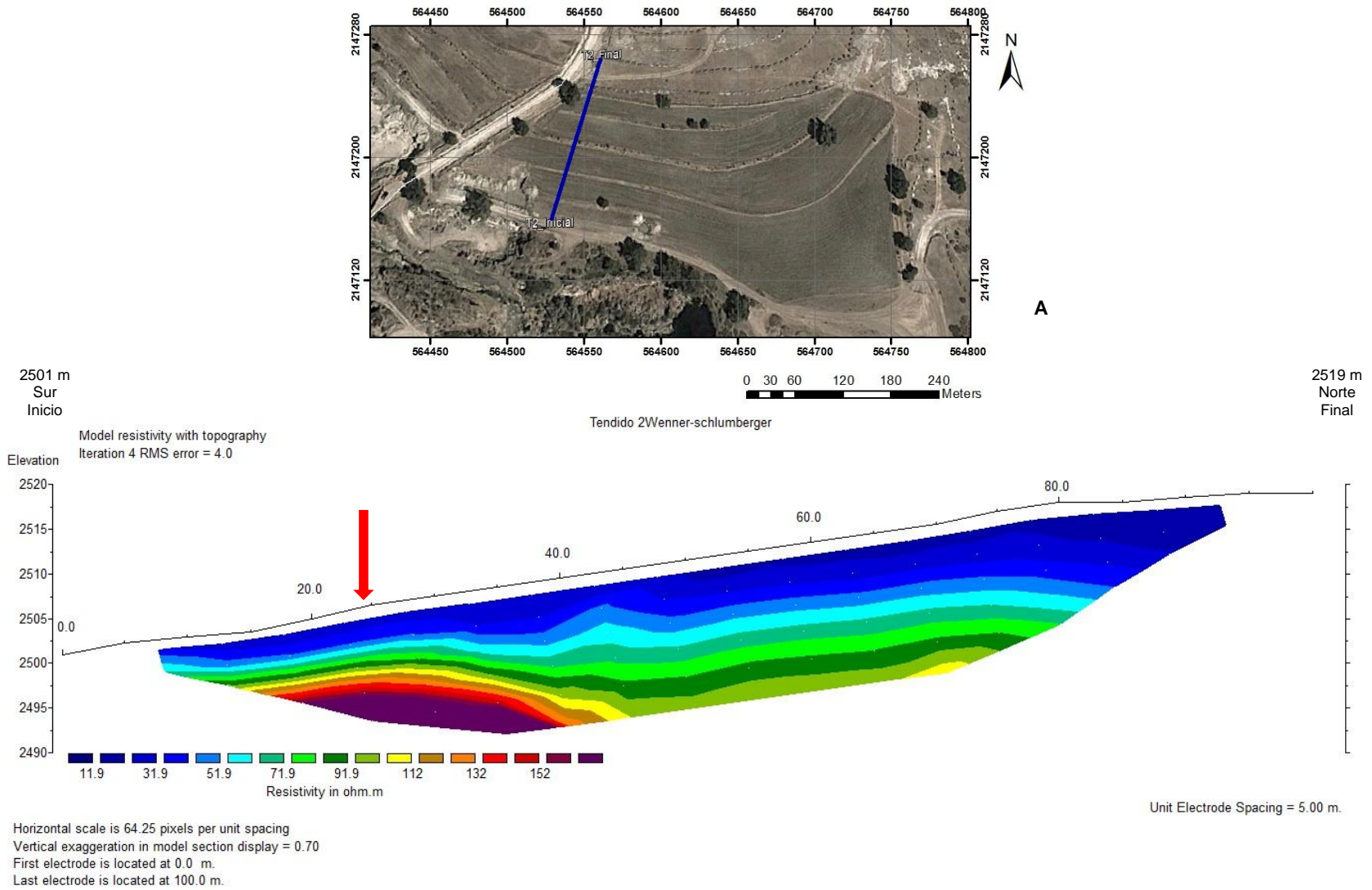


Fig. 1.14 A) Ubicación del Perfil 2 B) Perfil 2: Modelo de resistividad con topografía

4.3 Perfil geoelectrico 3

En la figura 1.15-A de la pseudosección con resistividad aparente medida, se tiene un rango de resistividades de entre 7.68 y 87.7 ohms-m, para la pseudosección de resistividades calculadas (fig.1.15-B) se muestran resistividades de 7.68 a 87.7 ohms-m. Sin embargo el modelo 2D de resultados de inversión (Fig.1.15-C) presenta resistividades entre 7.68 y 546.1 ohms-m.

La primera zona del modelo de resistividad 2D con topografía (Fig. 1.16-B) tiene un rango de resistividades entre 7 y 27.7 ohms-m la cual se asocia a mezcla de arcillas y limos saturados, esta primera capa tiene 1 m de espesor, al inicio del perfil y al llegar a los 37 m de longitud aproximadamente se da un aumento de espesor de entre 2 y 4 m máximo, para después terminar con un espesor de 2m.

La segunda zona con resistividades entre 47.7 y 87.7 ohms-m se presentan en todo el perfil, con resistividad asociada a depósitos de limo-arena. Al inicio del modelo de resistividad se presenta espesores de 2 m sin embargo, al avanzar al centro del perfil el espesor aumenta a 5 m bajo los 58 m de longitud, el cual nuevamente se reduce hasta 2 m hasta el final del perfil.

La tercera zona presenta rangos de resistividades de 108 a 546.1 ohms-m la cual se asocia a la roca denominada andesita, esta zona muestra espesores al inicio del perfil de 2 m que conforme se avanza al centro se da un aumento de hasta un máximo de 10 m bajo los 33 m de longitud , se reduce a 3 bajo los 58 m de longitud del tendido , conforme avanza a los 65 -70 m de longitud aumenta el espesor a 7 m ,

hacia el final del perfil desciende el espesor de la capa hasta llegar al final del tendido con un espesor de 3 m.

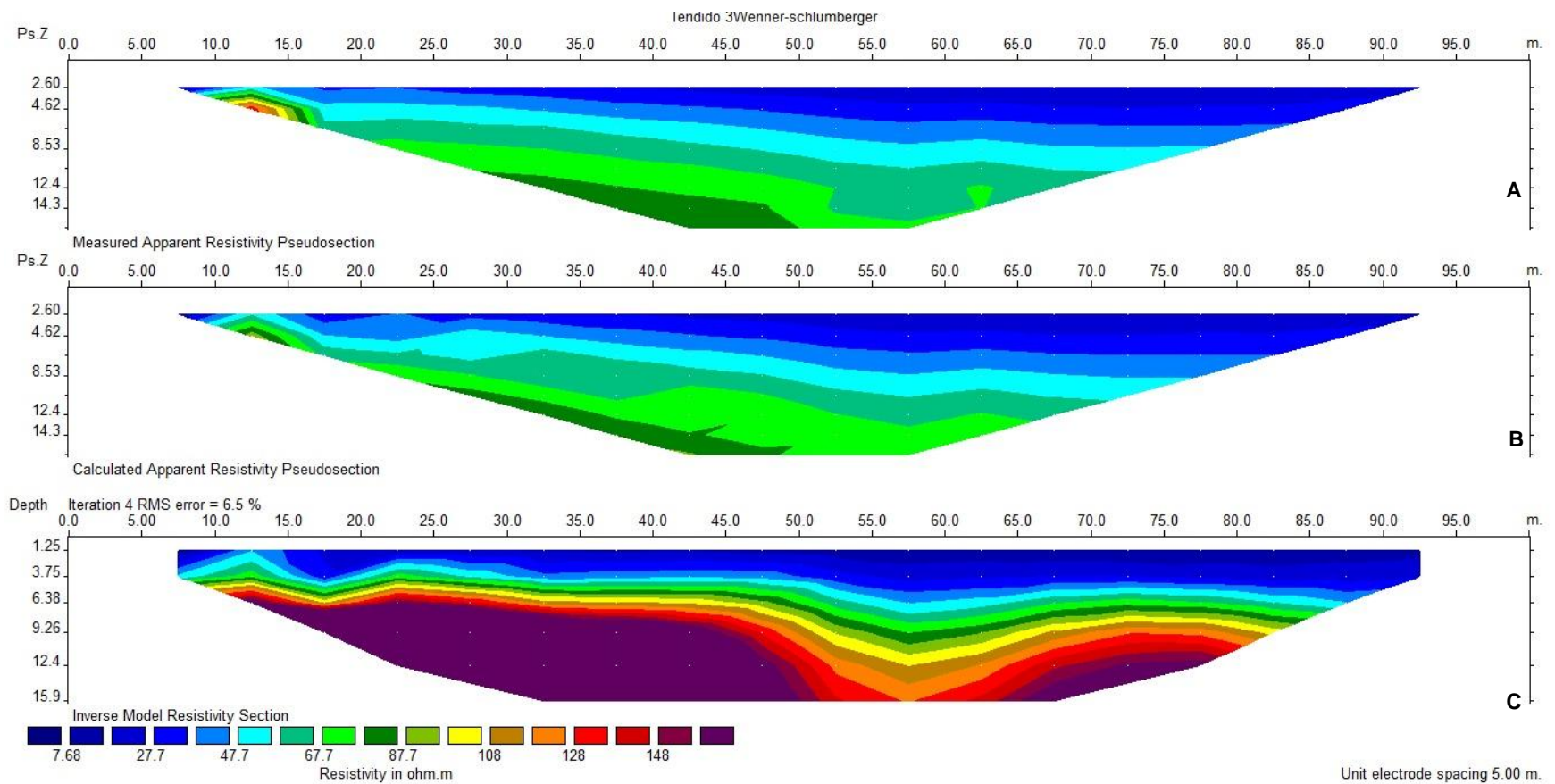


Fig. 1.15 Perfil 3 A) Resistividad aparente medida B) Resistividad aparente calculada C) Modelo de resistividad

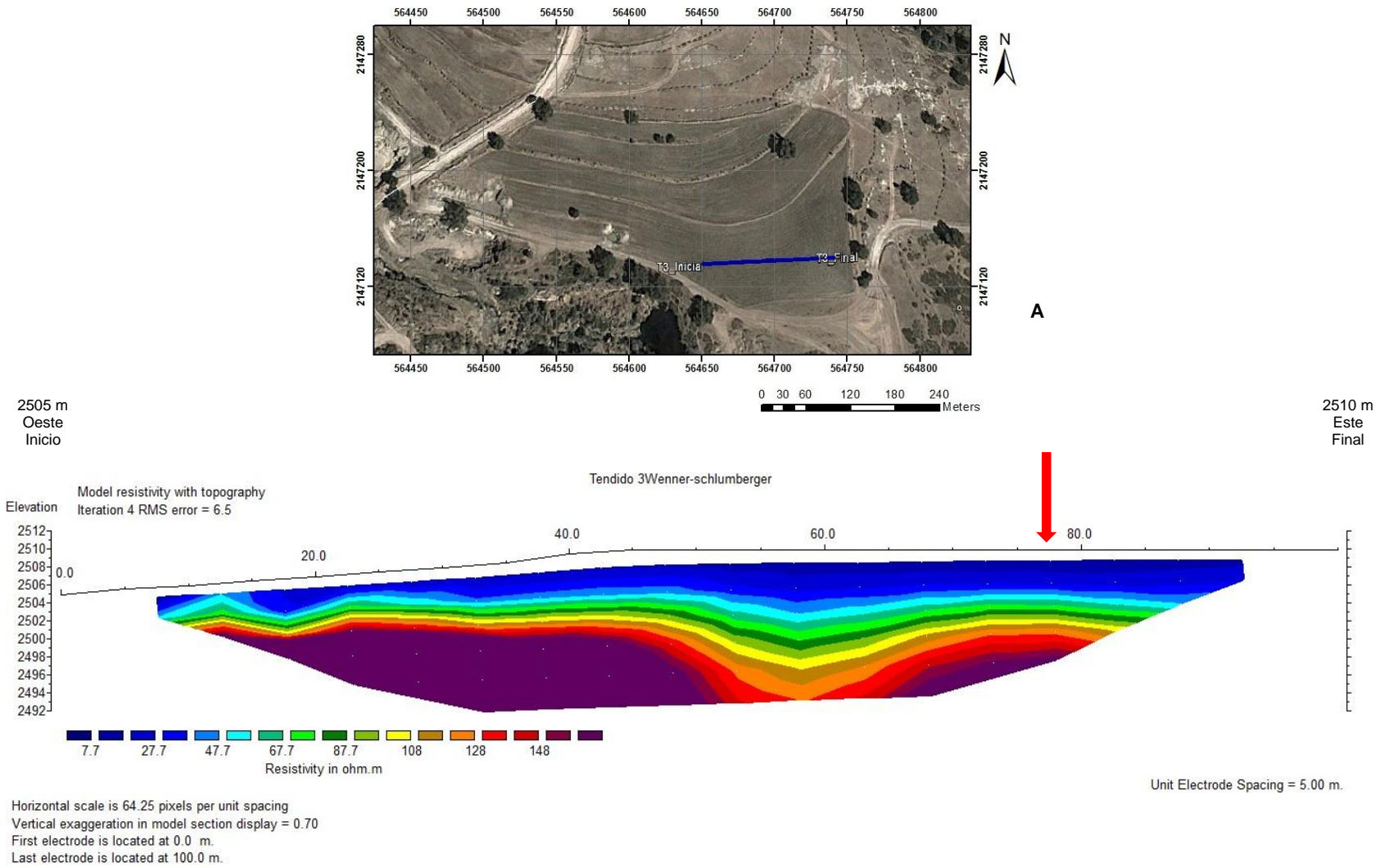


Fig. 1.16 A) Ubicación del Perfil 3 B) Perfil 3: Modelo de resistividad con topografía

4.4 Perfil geoelectrico 4

En la figura 1.17-A se muestra la pseudosección de las resistividades tomadas en campo, la cual presenta resistividades entre 10.1 y 110 ohms-m, para la pseudosección de resistividades calculadas (Fig.1.17-B) presenta rangos de resistividad de entre 10.1 y 110 ohms-m. Sin embargo para el modelo de resistividad 2D (Fig. 1.17-C) se tiene resistividades entre 10.1 y 224.1 ohms-m.

La primera zona del modelo de resistividad 2D con topografía (Fig.1.18-B) se tienen rangos de resistividad entre 10.1 y 30.1 ohms-m lo cual se asocia a mezcla de arcillas y limos saturados, esta zona presenta espesores de 2.5 al inicio del perfil de manera constante, sin embargo conforme se acerca al centro del perfil se reduce el espesor hasta 1 m, para nuevamente retomar el espesor constante del inicio hasta el final del perfil.

La segunda zona del modelo de resistividad 2D con topografía muestra rangos de resistividades entre 50.1 y 90.1 ohms-m, asociado a depósitos de limo-arena. Esta zona presenta espesores de aproximadamente 1 m a lo largo de todo perfil.

La tercera zona del modelo 2D con topografía presenta resistividades entre 110 y 224.1 ohms-m, lo cual se asocia a la roca denominada andesita, los espesores presentes son de 10 m al inicio del tendido, aumentando hasta los 15 m y manteniéndose de forma constante hasta llegar a los 115 m de longitud, donde el espesor se reduce hasta 12.5 m finalizando el perfil con un espesor de 3 m.

Cabe mencionar que el perfil 3 (Fig.1.16) y el perfil 4 (Fig.1.18) se interceptan en 78 y 28 m respectivamente, lo cual coincide con las resistividades asociadas a la andesita.

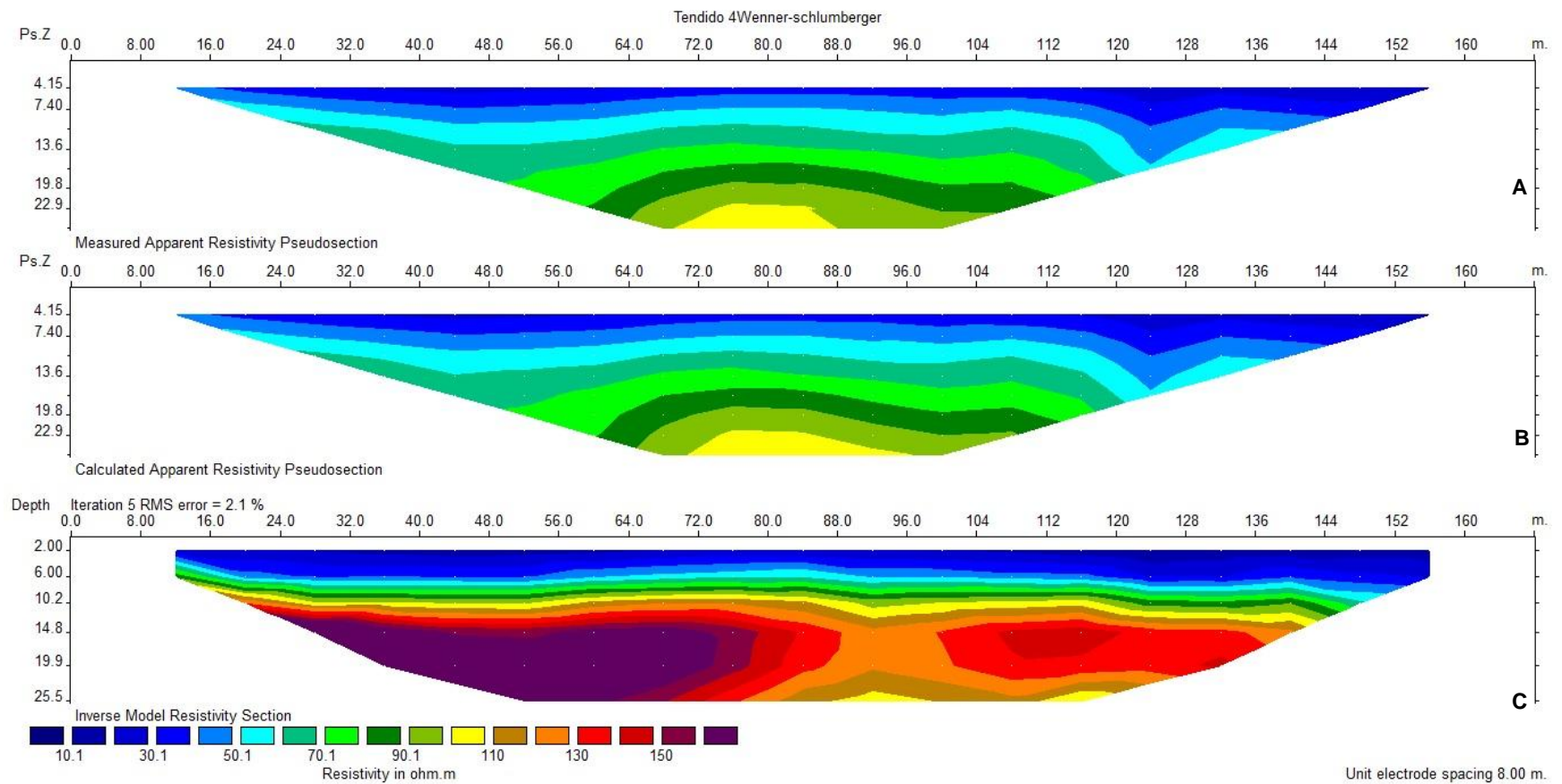


Fig. 1.17 Perfil 4 A) Resistividad aparente medida B) Resistividad aparente calculada C) Modelo de resistividad

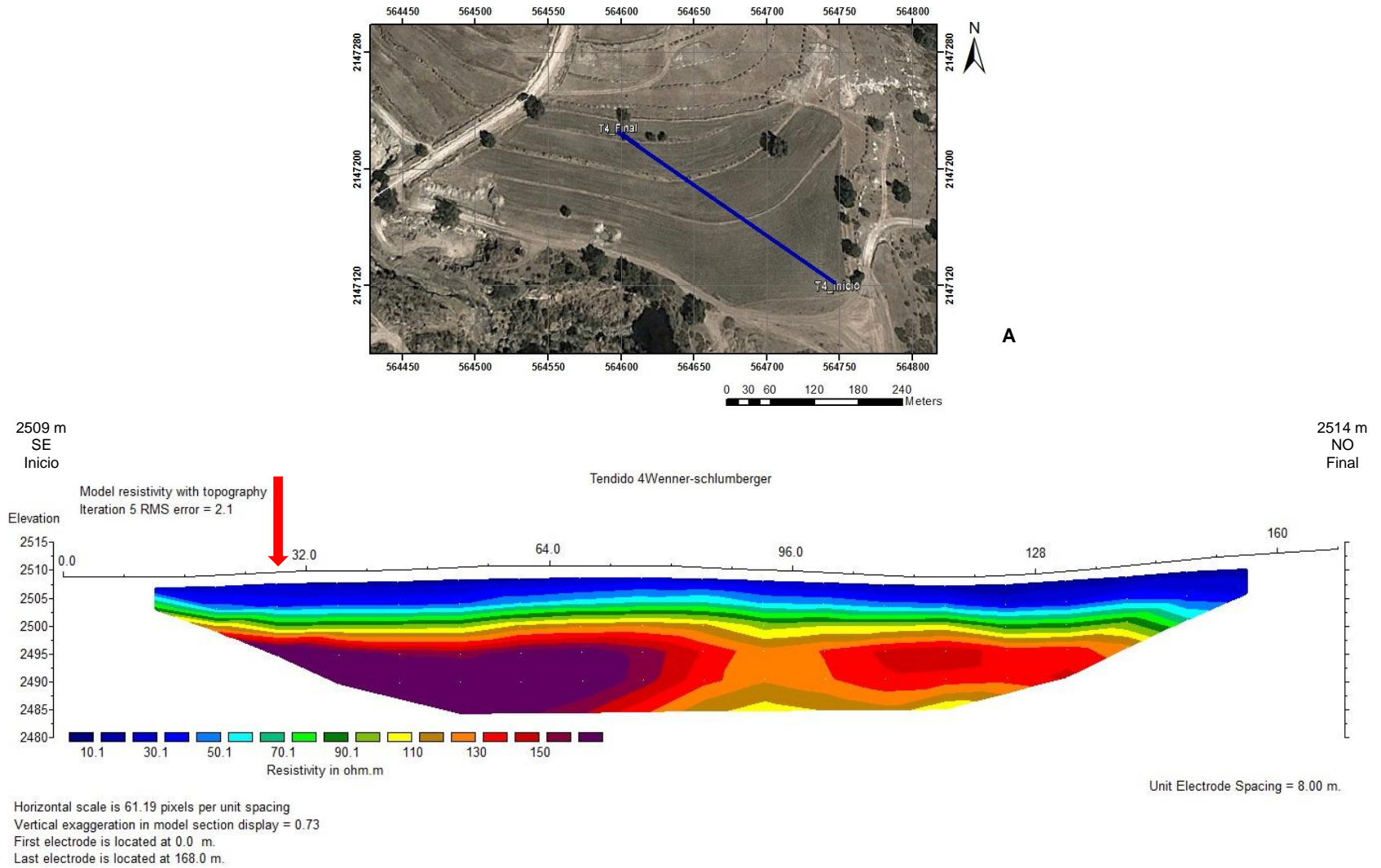


Fig. 1.18 A) Ubicación del Perfil 4 B) Perfil 4: Modelo de resistividad con topografía

4.5.1 Sección geológica 1

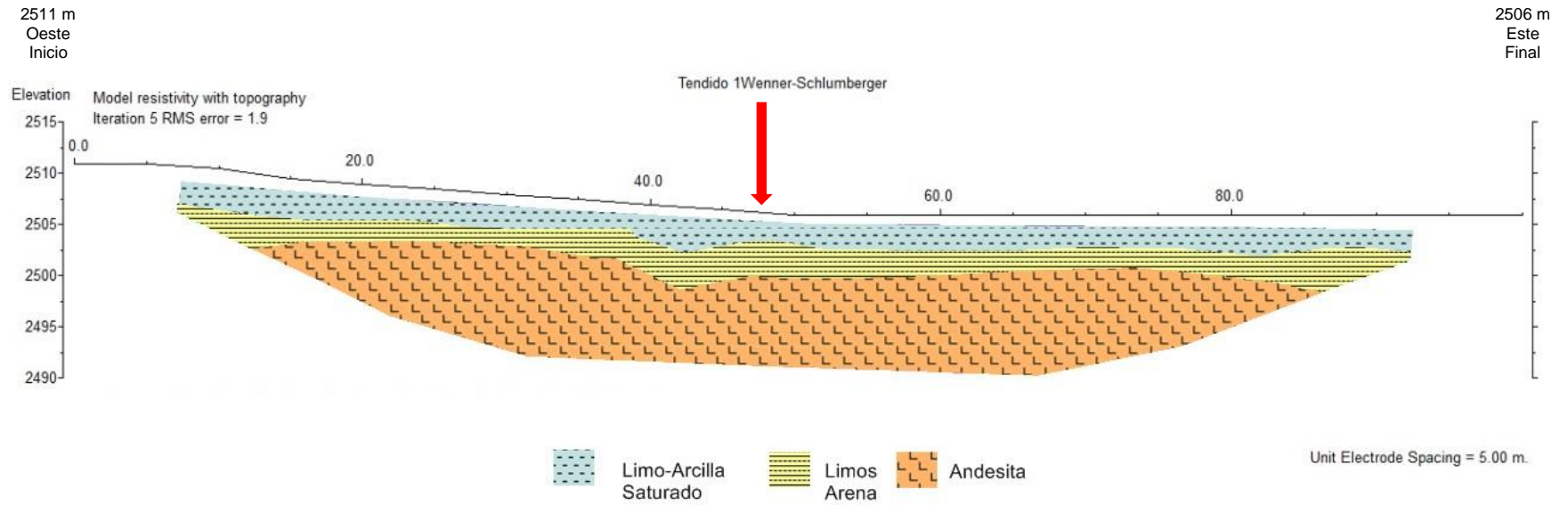


Fig. 1.19 Sección geológica 1

4.5.2 Sección geológica 2

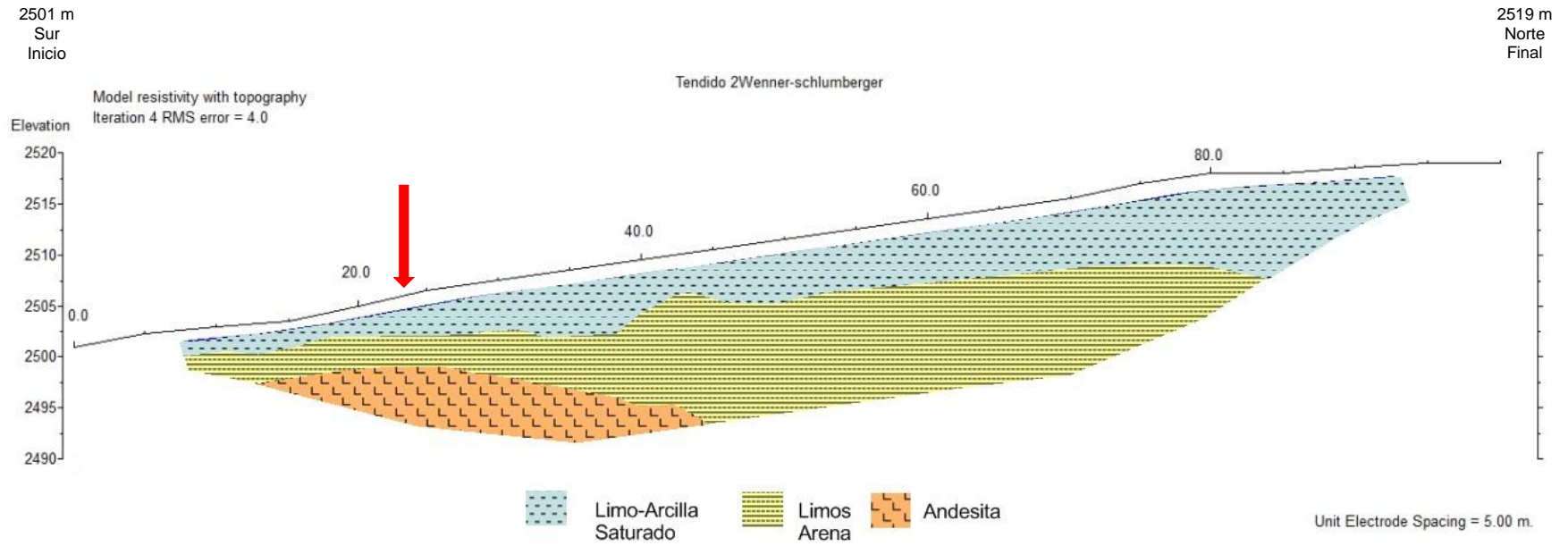


Fig. 1.20 Sección geológica 2

4.5.3 Sección geológica 3

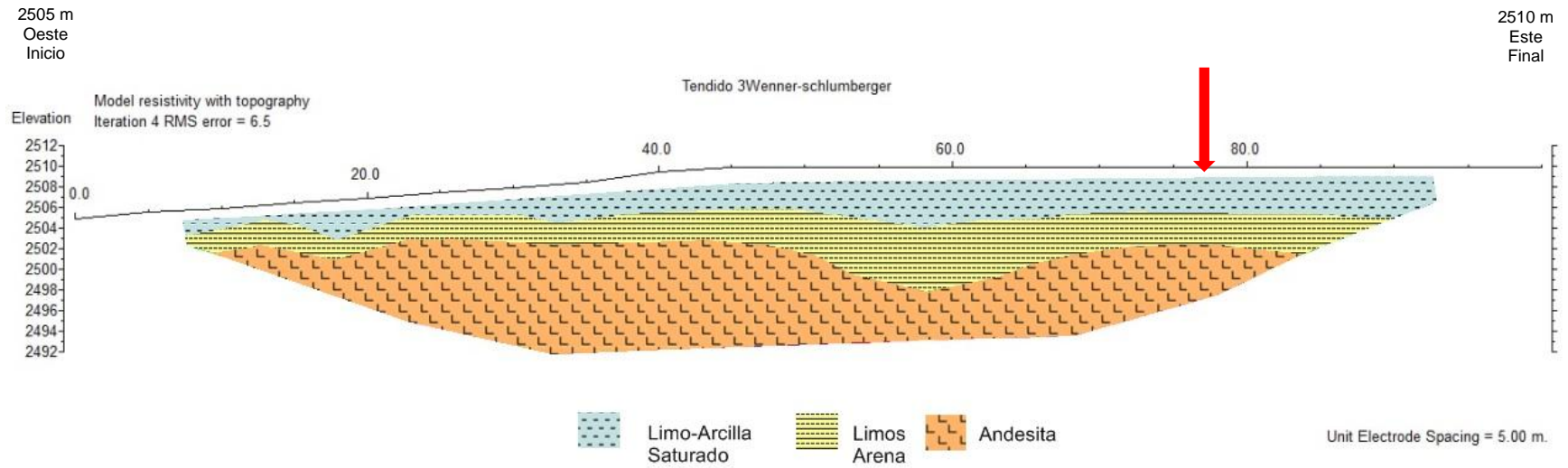


Fig. 1.21 Sección geológica 3

4.5.4 Sección geológica 4

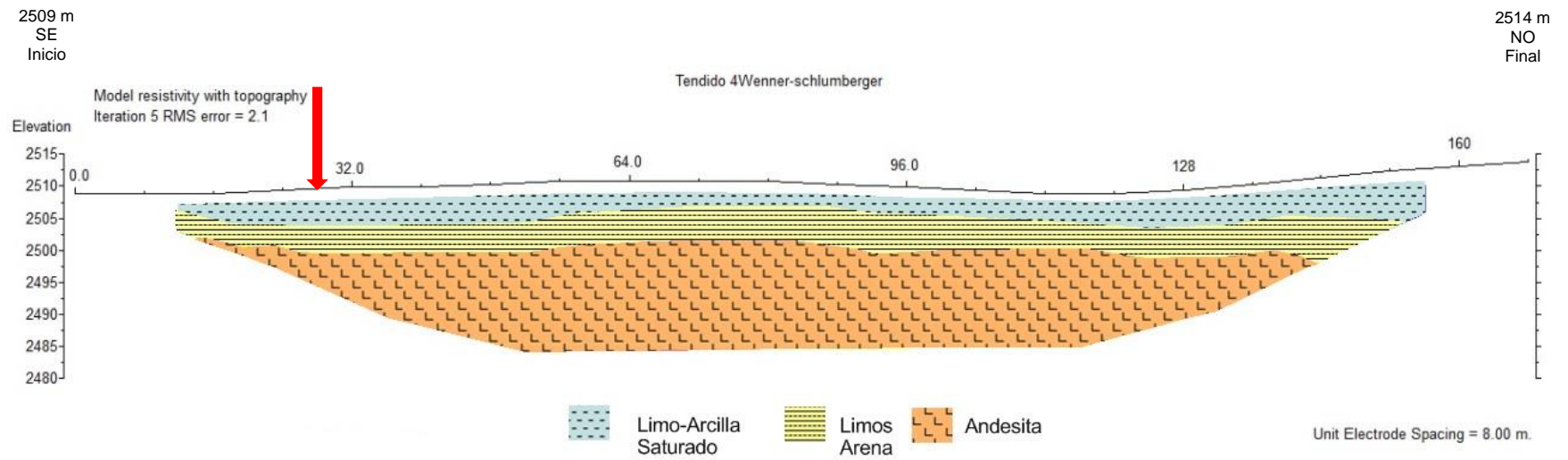


Fig. 1.22 Sección geológica 4

4.6 Visualización de los resultados en Voxler 3

Una vez obtenidos los modelos bidimensionales mediante el programa RES2DINV, se prosiguió a realizar la visualización de los resultados con ayuda del programa Voxler 3 de Golden Software, con el cual se pudo crear imágenes 3D interpolando las tomografías y así representar de manera conjunta el trabajo realizado en todo el terreno.

Para poder visualizar los datos en Voxler se necesitó de un tratamiento previo de los perfiles con el programa Surfer 9 de Golden Software, ya que el programa de visualización 3D requiere de datos XYZC, siendo XYZ la posición y C los valores de resistividad obtenidos.

Como se puede observar en la figura 1.10 los tendidos 1 y 2 tienen un punto de cruce así como los tendidos 3 y 4, también se observa en cada uno de los perfiles que la distribución de la resistividad asociada a la andesita sigue un comportamiento similar, es decir se observan capas de resistividades semejantes en cada uno de los perfiles de tomografía eléctrica.

Con el propósito de observar mejor la distribución de la resistividades, se sobrepuso la imagen satelital (Fig.1.10) al modelo realizado con el programa Voxler 3, en el cual se visualiza de manera conjunta los puntos de intersección de los tendidos (Fig.1.23).

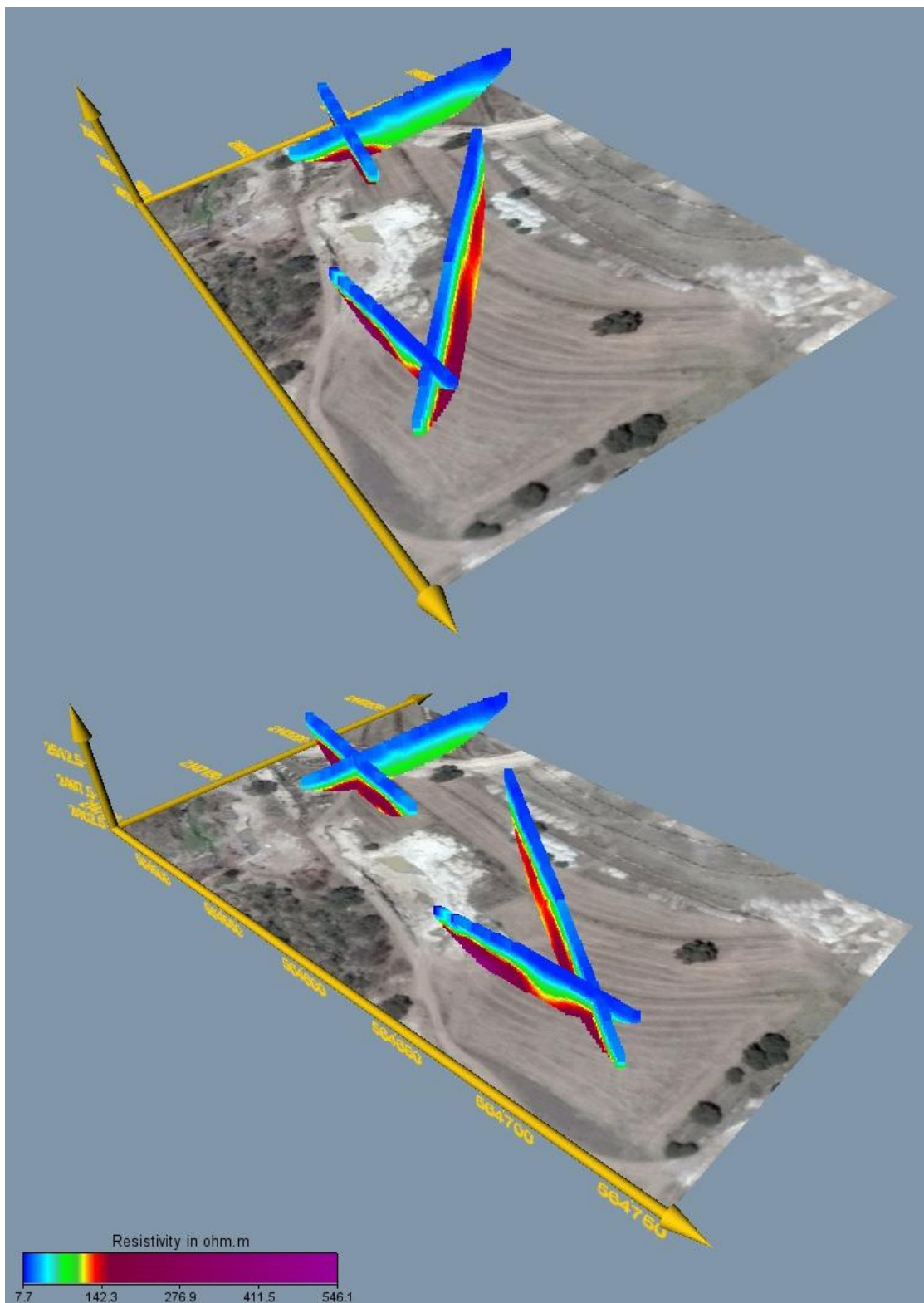


Fig. 1.23 Visualización conjunta de los tendidos de Tomografía eléctrica

4.6.1 Visualización 3D en Voxler 3

De manera adicional y con la ayuda del software Voxler 3 se procedió a realizar un modelo 3D a partir de las 4 tomografías. El modelo obtenido (Fig. 1.24) alcanza una profundidad de 25.49 m.

La finalidad del bloque 3D es proporcionar una predicción de la distribución de resistividades de manera vertical, horizontal y en profundidad. Del análisis del resistivo de interés que se ha asociado a la andesita se observa que la mayor concentración se encuentra al NE de la zona de estudio, lo cual también se evidencia en los perfiles 3 y 4 de la tomografía 2D, ya que son los perfiles que presentan mayor homogeneidad y espesor de andesita.

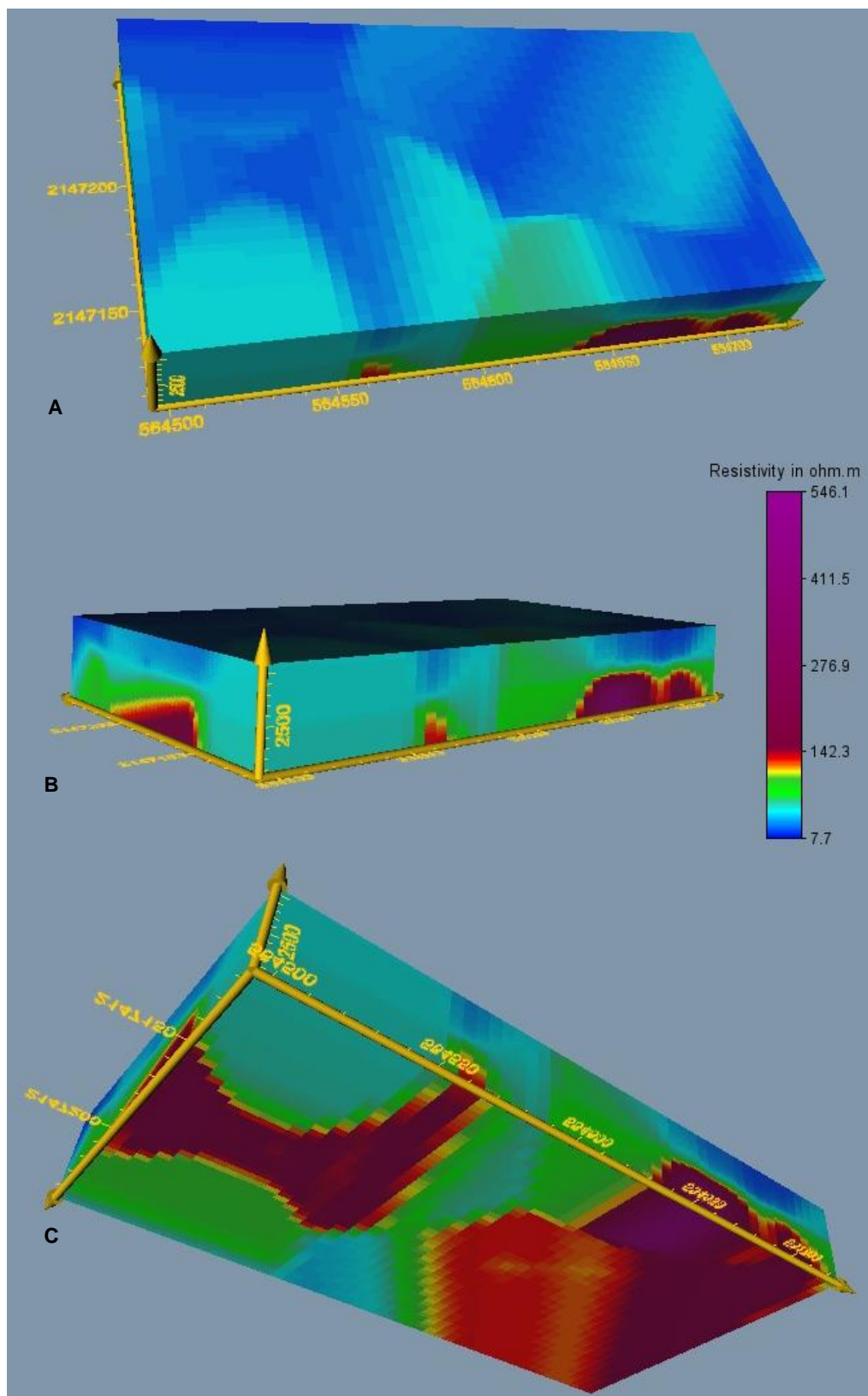


Fig. 1.24 Modelo 3D de la zona de estudio

A) Vista superior B) Vista transversal C) Vista inferior

4.6.1.1 Modelo volumétrico

Del tratamiento de datos para la obtención del bloque 3D se puede generar superficies de igual valor de resistividad, con lo cual se podrá delimitar el resistivo correspondiente a la andesita, que para este caso se le asignó un valor de 110 ohms-m como mínimo, esta superficie se puede observar en la figura 1.25.

Puesto que Voxler calcula el volumen total del bloque 3D, al delimitar la zona resistiva a 110 ohms-m el programa proporciona el volumen de la resistividad menores a 110 ohms-m y el volumen de las resistividades mayores a 110 ohm-m el, con lo que se obtuvo que el volumen de la andesita es de aproximadamente $229,734.71 \text{ m}^3$

Conclusiones

Los resultados de Tomografía eléctrica en conjunto con la investigación geológica, confirmaron la naturaleza litológica de la cantera La Joya, la cual presento rangos de resistividades entre 108 a 546.1 omhs-m que se correlaciona con la roca andesita, también se observa que la mayor concentración de esta se localiza al sureste de la cantera La Joya, como se muestra en la tomografía 3 orientada Oeste a Este y la tomografía 4 orientada SE- NO, se observa la mayor concentración.

En el perfil 1 se encontraron espesores de andesita entre 6 y 10 m, este espesor que se puede apreciar a lo largo de todo el perfil a una profundidad de 6 m aproximadamente, mientras que en el perfil 2 la andesita se localizó en los primeros 46 m de longitud con un espesor máximo de 6 m y una profundidad de aproximadamente 5 m, en el perfil 3 se hallaron espesores de andesita entre 3 y 10 m en todo el perfil localizándose entre 4 y 9 m de profundidad, para el perfil 4 debe tomarse en cuenta que la longitud y la distancia eléctrica fueron mayores que los anteriores y por lo tanto se obtuvo mayor profundidad de investigación obteniendo así espesores de andesita entre 7 y 15 m el cual tiene presencia en todo el perfil a una profundidad aproximada de 4 m.

El tratamiento de datos 2D para su visualización en Voxler 3 permitió observar los perfiles 1 al 4 en conjunto, en los cuales se tienen mejor apreciación de las intersecciones de estos y se observa que en los 4 perfiles se tiene la presencia de andesita.

La visualización 3D en Voxler permitió determinar la distribución de resistividades en toda el área de estudio, el modelo 3D proporciono información aproximada del volumen de la andesita.

El modelo volumétrico permitió obtener información cuantitativa a partir de la delimitación del rango de resistividades asociadas a la andesita, de este modo se obtuvo que el volumen de andesita es de 204,956.64 m³.

Recomendaciones

Las recomendación que se hacen es realizar 3 tomografías más en la zona de estudio ya que el modelo 3D que genera el programa Voxler 3 exagera el volumen por la falta de datos, las tomografías se proponen con arreglo con arreglo Wenner-Schlumberger ya que este proporciona buena resolución de manera vertical y horizontal.

El primer tendido orientado de SE a NO (Línea roja) ya que es el área con mayor presencia de resistividades altas asociadas a la andesita con lo cual se lograría caracterizar de manera precisa esta zona y aportaría información necesaria con lo cual el modelo 3D generado en Voxler tendría mayor precisión.

El tendido se propone con longitud de 100 m y separación electródica de 5 m, con estas medidas se abarcaría de manera eficiente la zona y se conservaría la profundidad mínima teórica propuesta.

El segundo perfil orientado Oeste-Este (línea amarilla) en el área con la mayor presencia de resistividades altas con lo cual nuevamente se caracterizaría de manera precisas la zona. Con esta tomografía se obtendría mayor precisión en el borde del modelo 3D.

El perfil se propone con una extensión de 168 m y separación electródica de 8 m, con lo cual se obtendría mayor profundidad de investigación y se abarcaría de manera eficiente la zona.

El tercer perfil estará compuesto por dos tendidos orientados de Este a Oeste (línea turquesa), cada tendido se propone con extensión de 168 m y separación eléctrica de 8 m, con lo cual se obtendrá mayor profundidad al NE de la cantera y posiblemente se encontrarían la resistividad altas que no se lograron detectar con el Tendido 2.

Para estos tendidos es necesario empalmarlos para evitar que se tenga una pérdida de datos entre uno y otro tendido debido a la pérdida de resolución a los extremos de cada uno, el empalme se realizaría a los 64 m de longitud del primer tendido que corresponde al electrodo 8 del primer tendido con lo cual finalmente se obtendría una longitud de 232 m y se abarcará convenientemente el área permitida de la zona de estudio.

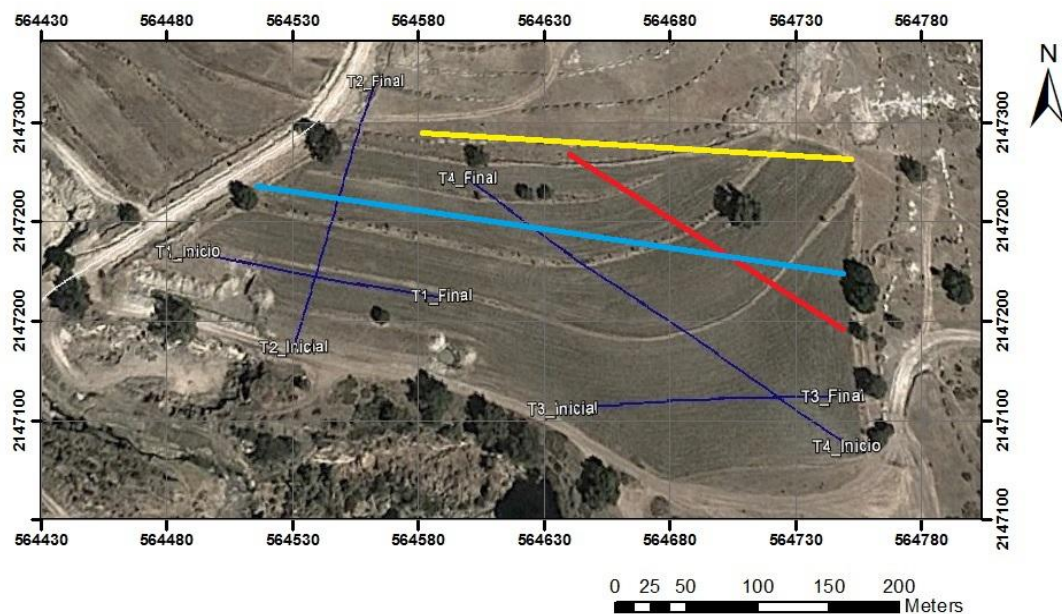


Fig. 1.26 Tendidos propuestos en la zona de estudio

Limitaciones

En cuanto al modelo 3D generado en Voxler se tiene limitaciones ya que el programa exagera el volumen en las zonas con ausencia de datos.

Durante la adquisición de datos se presentaron restricciones en el área de estudio.

Anexos

Array type	z_e/a	z_e/L	Geometric Factor	Inverse Geometric Factor (Ratio)
Wenner Alpha	0.519	0.173	6.2832	0.15915 (1.0000)
Wenner Beta	0.416	0.139	18.850	0.05305 (0.3333)
Wenner Gamma	0.594	0.198	9.4248	0.10610 (0.6667)
Dipole-dipole				
n = 1	0.416	0.139	18.850	0.05305 (0.3333)
n = 2	0.697	0.174	75.398	0.01326 (0.0833)
n = 3	0.962	0.192	188.50	0.00531 (0.0333)
n = 4	1.220	0.203	376.99	0.00265 (0.0166)
n = 5	1.476	0.211	659.73	0.00152 (0.0096)
n = 6	1.730	0.216	1055.6	0.00095 (0.0060)
n = 7	1.983	0.220	1583.4	0.00063 (0.0040)
n = 8	2.236	0.224	2261.9	0.00044 (0.0028)
Equatorial dipole-dipole				
n = 1	0.451	0.319	21.452	0.04662 (0.2929)
n = 2	0.809	0.362	119.03	0.00840 (0.0528)
n = 3	1.180	0.373	367.31	0.00272 (0.0171)
n = 4	1.556	0.377	841.75	0.00119 (0.0075)
Wenner - Schlumberger				
n = 1	0.519	0.173	6.2832	0.15915 (1.0000)
n = 2	0.925	0.186	18.850	0.05305 (0.3333)
n = 3	1.318	0.189	37.699	0.02653 (0.1667)
n = 4	1.706	0.190	62.832	0.01592 (0.1000)
n = 5	2.093	0.190	94.248	0.01061 (0.0667)
n = 6	2.478	0.191	131.95	0.00758 (0.0476)
n = 7	2.863	0.191	175.93	0.00568 (0.0357)
n = 8	3.247	0.191	226.19	0.00442 (0.0278)
n = 9	3.632	0.191	282.74	0.00354 (0.0222)
n = 10	4.015	0.191	345.58	0.00289 (0.0182)
Pole-dipole				
n = 1	0.519		12.566	0.07958 (0.5000)
n = 2	0.925		37.699	0.02653 (0.1667)
n = 3	1.318		75.398	0.01326 (0.0833)
n = 4	1.706		125.66	0.00796 (0.0500)
n = 5	2.093		188.50	0.00531 (0.0334)
n = 6	2.478		263.89	0.00379 (0.0238)
n = 7	2.863		351.86	0.00284 (0.0178)
n = 8	3.247		452.39	0.00221 (0.0139)
Pole-Pole	0.867		6.28319	0.15915 (1.0000)

Tabla 2 Tabla de investigación media Z_e (Edwards 1977)

Table 5.3. Resistivities of various rocks and sediments

Rock type	Resistivity range (Ωm)
Granite porphyry	4.5×10^3 (wet) – 1.3×10^6 (dry)
Feldspar porphyry	4×10^3 (wet)
Syenite	10^2 – 10^6
Diorite porphyry	1.9×10^3 (wet) – 2.8×10^4 (dry)
Porphyrite	10 – 5×10^4 (wet) – 3.3×10^3 (dry)
Carbonatized porphyry	2.5×10^3 (wet) – 6×10^4 (dry)
Quartz diorite	2×10^4 – 2×10^6 (wet) 1.8×10^5 (dry)
Porphyry (various)	60 – 10^4
Dacite	2×10^4 (wet)
Andesite	4.5×10^4 (wet) – 1.7×10^2 (dry)
Diabase (various)	20 – 5×10^7
Lavas	10^2 – 5×10^4
Gabbro	10^3 – 10^6
Basalt	10 – 1.3×10^7 (dry)
Olivine norite	10^3 – 6×10^4 (wet)
Peridotite	3×10^3 (wet) – 6.5×10^3 (dry)
Hornfels	8×10^3 (wet) – 6×10^7 (dry)
Schists (calcareous and mica)	20 – 10^4
Tuffs	2×10^3 (wet) – 10^5 (dry)
Graphite schist	10 – 10^2
Slates (various)	6×10^2 – 4×10^7
Gneiss (various)	6.8×10^4 (wet) – 3×10^6 (dry)
Marble	10^2 – 2.5×10^6 (dry)
Skarn	2.5×10^2 (wet) – 2.5×10^6 (dry)
Quartzites (various)	10 – 2×10^8
Consolidated shales	20 – 2×10^3
Argillites	10 – 8×10^2
Conglomerates	2×10^3 – 10^4
Sandstones	1 – 6.4×10^8
Limestones	50 – 10^7
Dolomite	3.5×10^2 – 5×10^3
Unconsolidated wet clay	20
Marls	3 – 70
Clays	1 – 100
Oil sands	4 – 800

Tabla 3 Valores de resistividad (W.M. Telford)

ROCA	RANGO	UBICACION
Arcilla	8-16 Ω -m 19-30 Ω -m 18-32 Ω -m	HUEHUETOCA-ZUMPANGO OTUMBA-TEOTIHUACAN APAN
Arenas, Gravas Pómez	12-16 Ω -m	HUEHUETOCA
Arenas, Tobas Arcillas, gra- vas	4-20 Ω -m 30-35 Ω -m 60-66 Ω -m	HUEHUETOCA IROLO-APAN APAN
Aluviones	10-24 Ω -m 17-31 Ω -m 15-28 Ω -m 12-24 Ω -m 16-37 Ω -m 8-17 Ω -m	TEOTIHUACAN OTUMBA-PACHO2 IROLO APAN ZUMPANGO HUEHUETOCA
Limos	16-38 Ω -m	ZUMPANGO-TECAMAC
Arenas Basal ticas	62-85 Ω -m	ZUMPANGO-HUEHUETOCA
Basaltos (sanos)	500-3000 Ω -m 3000 Ω -m	PACHO2 TEOTIHUACAN
Basaltos (frac- turados)	119-455 Ω -m 151-400 Ω -m 300 Ω -m 200-585 Ω -m 48-70 (saturados) 132-230 Ω -m	ZUMPANGO-HUEHUETOCA ZUMPANGO-TECAMAC-TEO- TIHUACAN TEOTIHUACAN PACHO2 PACHO2 IROLO
Andesitas	102-334 Ω -m 137-250 Ω -m 185 Ω -m	APAN ZUMPANGO HUEHUETOCA
Piroclastos del Plioceno (grano fino)	>10 Ω -m >14 Ω -m	OTUMBA-TEOTIHUACAN- TECAMAC-ZUMPANGO APAN
Piroclastos del Plioceno (grano grosso)	26-45 Ω -m 24-55 Ω -m	OTUMBA-TEOTIHUACAN- TECAMAC-ZUMPANGO-HUE- HUETOCA PACHO2-IROLO-APAN
Piroclastos del Mioceno	22-39 Ω -m	HUEHUETOCA

Tabla 4 Valores representativos de las formaciones geológicas relacionadas al estudio geoelectrico de la cuenca de México (R. Rodríguez C. y C. Ochoa A.)

Material	Resistividad (Ωm)
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500-5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	1-100
Gruss no saturado	500-1000
Gruss saturado	40-60
Saprolito no saturado	200-500
Saprolito saturado	40-100
Gravas no saturadas	500-2000
Gravas saturadas	300-500
Arenas no saturadas	400-700
Arenas saturadas	100-200
Limos no saturados	100-200
Limos saturados	20-100
Limos saturados con agua salada	5-15
Arcillas no saturadas	20-40
Arcillas saturadas	5-20
Arcillas saturadas con agua salada	1-10
Andosoles secos	1000-2000
Andosoles no saturados	300-1000
Andosoles saturados	100-300

Tabla 5 <http://www.scielo.org.co/img/revistas/bcdt/n31/n31a03tab01.gif>

Bibliografía

Aguilar Murillo, C.A, (2012), *Reconocimiento Geológico de la Zona de Skarn de la Sierra de Tlayca y Tlayecac en el Estado de Morelos, México*, Tesis licenciatura, Universidad de Sonora, p.13

Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 64, núm. 1, 2012, p. 91-108

Bracamonte Gómez, M.E & Calvo Martínez, K.E (2009). *Evaluación de usos potenciales de un yacimiento de minerales no metálicos*. Tesis Licenciatura, Universidad de El Salvador, p.182

Carta Geológico-minera de la Ciudad de México obtenido de http://mapserver.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/cartas250/geologia/89_E14-2GM.html

Daza Sánchez, A (2011). *Aplicaciones industriales de los terrenos arcillosos de la provincia de Córdoba*. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba, p.211

Loke, M. H. (2001). *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*, p.118

López Hidalgo A. A, (2006). *Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (tomografía eléctrica 2d y 3d)*. Obtenido de <http://www.geotomosoft.com/Articulo.pdf>, p.1-36

Orellana, E. (1982). *Prospección geoeléctrica de corriente continua (2° ed.)*. S.A Ediciones Paraninfo, p.569

Provincia del eje neovolcánico. (2007).Obtenido de <http://132.248.9.195/pd2007/0611681/A5.pdf>, p.25

Ramón Márquez, V.M., (2011), *Determinación de espesores de arenas feldespáticas por medio del método de sondeos eléctricos verticales en Atexca, Zacatlán Puebla*. Tesis de licenciatura, BUAP

Ravelo Matos Daniela J. (2007).*Inversión e interpretación de datos de resistividad aparente en 2D adquiridos en relieve topográfico*. Tesis Licenciatura, Universidad Simón Bolívar, p.118

Rodríguez, R. & Ochoa, A. (1989) Estudio geoelectrico del sistema acuifero de la cuenca de México, Geof. Int., Vol. 28-2 , pp.191-205

Salgado Pareja J. S., (2002). *Aplicaciones de la tomografía geoelectrica 2-d al estudio del subsuelo*. Obtenido de <http://www.utm.mx/temas/temas-docs/ensayo2t17.pdf>,p13

Samaniego Lermo, J & Bernal Esquia, I. (2006).Zonificación sísmica del estado de Tlaxcala, UNAM, p. 215-221

Sánchez Reynoso A.R. (2011). *Análisis comparativo entre diferentes arreglos de tomografía de resistividad eléctrica 2D*. Tesis licenciatura, UNAM [http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/5802/\(4\)Lermo.pdf](http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/5802/(4)Lermo.pdf), p. 215-221