



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Colegio de Ingeniería Geofísica

Tomografías geoelectricas aplicadas en el Cerro del Encanto, del municipio

Libres, Puebla, para identificar la estructura arqueológica principal.

Tesis para obtener el título de:
Ingeniero Geofísico

Presenta:
Alfonso Sánchez Ramírez

Director:
M.C. José Serrano Ortiz

Febrero 2018



BUAP

Oficio D-SA 3969/2017

**C. ALFONSO SÁNCHEZ RAMÍREZ
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
GEOFÍSICA
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

“TOMOGRAFÍAS GEOELÉCTRICAS APLICADAS EN EL CERRO DEL ENCANTO DEL MUNICIPIO DE LIBRES, PUEBLA, PARA IDENTIFICAR LA ESTRUCTURA ARQUEOLÓGICA PRINCIPAL”.

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como asesor al M.C. JOSÉ SERRANO ORTIZ.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 07 de noviembre de 2017

M. en I. Fernando Daniel Lázcano Hernández
Director

M'FDLH/M' JADT/BARV
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

80 AÑOS
DE UNIVERSIDAD

Facultad
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. 108 C, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

M. en I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P r e s e n t e.

El que suscribe: M. C. José Serrano Ortiz, Asesor del tema de tesis:

**“TOMOGRAFÍAS GEOELÉCTRICAS APLICADAS EN EL CERRO DEL ENCANTO DEL MUNICIPIO DE LIBRES,
PUEBLA, PARA IDENTIFICAR LA ESTRUCTURA ARQUEOLÓGICA PRINCIPAL”.**

Presentada por el C. Alfonso Sánchez Ramírez, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. D – SA 3969/2017 con fecha de emisión 07 de noviembre de 2017, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Z. a 10 de noviembre de 2017



M.C. JOSÉ SERRANO ORTIZ

Asesor

M'JSO/BARV

C.c.p. Interesado

C.c.p. Archivo

Índice.

Dedicatoria.	I
Agradecimientos.	II
Resumen.	III
Introducción.	1
Objetivos.	2
Capítulo 1. Zona de estudio y generalidades.	3
1.1 Localización de la zona de estudio.	3
1.2 Geología regional.	4
1.2.1 Geomorfología.	5
1.3 Geología local.	6
1.4 Antecedentes históricos de la zona de estudio.	8
1.5 Antecedentes de la tomografía geoelectrica aplicada a zonas arqueológicas.	8
Capítulo 2. Fundamentos teóricos.	10
2.1 Prospección eléctrica de corriente continua.	10
2.2 Resistividad en las rocas.	11
2.3 Fundamentos teóricos de resistividad.	13
2.3.1 Resistencia.	13
2.4 El método geoelectrico.	14
2.4.1 Resistividad aparente.	17

2.4.2 Dispositivos tetra-polares.....	18
2.4.3.1 Dipolo - Dipolo.....	19
2.4.3.2 Wenner.....	20
2.4.3.3 Wenner – Schlumberger.....	21
2.4.2 Inversión de datos.....	22
Capítulo 3. Metodología.....	23
3.1 Planificación.....	23
3.2 Instrumentación.....	25
3.3 Toma de datos.....	26
3.4 Procesamiento y modelación.....	28
3.4.1 Res2dinv (Geotomo Software Inc.).....	28
3.4.2 Voxler 3 (Golden Inc.).....	29
Capítulo 4. Resultados obtenidos y su interpretación.....	31
4.1 Perfiles geoelectricos.....	31
4.1.1 Perfil 1.....	31
4.1.2 Perfil 2.....	34
4.1.3 Perfil 3.....	37
4.2 Correlación Geofísica – Geológica.....	40
4.2.1 Perfil I.....	41
4.2.2 Perfil II.....	42

4.2.3 Perfil III	43
4.3 Modelación 3D, Voxler V.3.....	44
Conclusiones.	47
Recomendaciones.	49
Anexos.	53
Bibliografía.	57

Índice de figuras.

Fig. 1. A) División municipal del estado de Puebla. B) Municipio de Libres. C) Zona de estudio.	4
Fig. 2. Porción Centro-Oriente del Eje Neovolcánico (Datos Básicos de la Geografía de México – INE, 1986):	5
Fig. 3. Plano geológico regional modificado de carta Geológica Minera, Veracruz E14-3, 1:250,000	7
Fig. 4. Principio del método geoelectrico resistivo (Eunice Álvarez, 2015).	11
Fig. 5. Rango de variaciones de la resistividad eléctrica en rocas, minerales y químicos en Ohm•m (Orellana, 1982).	12
Fig. 6. Fuente puntual de corriente continua en la superficie de un medio homogéneo. Modificado de (Telford, 1992).	15
Fig. 7. Distribución electródica, arreglo Dipolo-Dipolo y su ecuación de resistividad.	19
Fig. 8. Distribución electródica, arreglo Wenner y su ecuación de resistividad.	20
Fig. 9. Distribución electródica arreglo Wenner - Schlumberger y su ecuación de resistividad. .	21
Fig. 10. Zona de estudio, Cerro del Encanto, Libres, Puebla.	24
Fig. 11. Sección de la estructura estudiada que sobre sale en la parte baja al Noroeste de la zona de estudio.	24
Fig. 12. Sección de la estructura de estudio, que sobresale en la parte Sur de la zona prospectada.	25
Fig. 13. Resistivímetro Saris Scintrex.....	25
Fig. 14. Fotografía la adquisición de datos mediante tomografía eléctrica resistiva, en la zona de estudio, Cerro del Encanto, Libres.....	26

Fig. 15. Distribución de los tendidos en la zona de estudio, ladera del Cerro del Encanto.....	27
Fig. 16. Perfil 1: A) Resistividad aparente medida, B) Resistividad aparente calculada, C) Modelo inverso resistivo obtenido.....	32
Fig. 17. Perfil 1: a) Ubicación del tendido, b) Modelo tomográfico eléctrico de resistividad real con topografías.....	33
Fig. 18. Perfil 2: A) Resistividad aparente medida, B) Resistividad aparente calculada, C) Modelo inverso resistivo obtenido.....	35
Fig. 19. Perfil 2: a) Ubicación del tendido, b) Modelo tomográfico eléctrico de resistividad real con topografías.....	36
Fig. 20. Perfil 3: A) Resistividad aparente medida, B) Resistividad aparente calculada, C) Modelo inverso resistivo obtenido.....	38
Fig. 21. Perfil 3: a) Ubicación del tendido, b) Modelo tomográfico eléctrico de resistividad real con topografías.....	39
Fig. 22. Perfil I: Sección Geológica.....	41
Fig. 23. Perfil II: Sección Geológica	42
Fig. 24. Perfil III: Sección Geológica	43
Fig. 25. Modelo Voxler: Conjunto de los tres modelos resistivos, en la zona de estudio. Parte de enfrente, de Sur a Norte.	45
Fig. 26. Modelo Voxler: Conjunto de los tres modelos resistivos, en la zona de estudio. Parte trasera, de Norte a Sur.....	46
Fig. 27. Tendidos de perfiles geoelectricos propuestos para la estructura principal arqueológica del Cerro del Encanto, Libres, Puebla.	49

Fig. 28. Sugerencia de tendidos geoelectricos en el Cerro del Encanto, Libres, Puebla. A) Vista satelital vertical, B) Vista satelital horizontal.	52
Fig. 29. Modelos volumetricos resistivos de la zona de estudio, calculados con el programa Voxler, en diferentes angulos.	54
Fig. 30. Modelo volumetrico resistivo de la zona de estudio. Destacando cuerpos con resistividades que van de los 231 Ohms•m hasta 980 Ohms•m	55

Índice de tablas.

Tabla 1. Especificaciones de los tendidos realizados en el estudio geoelectrico.....	27
Tabla 2. Material específico de los perfiles geológicos según su rango resistivo	40
Tabla 3. Especificaciones de los tendidos geoelectricos sugeridos, para la estructura principal arqueológica, en donde se realizó el estudio, Cerro del Encanto, Libres, Puebla.	50
Tabla 4. Especificaciones de los tendidos geoelectricos sugeridos, para el Cerro del Encanto, Libres, Puebla.	51
Tabla 5. Valores de resistividad de rocas y sedimentos (W.M. Telford, 1992).....	56
Tabla 6. Resistividad de las rocas y minerales M.H.Loke (1996-2001).....	56

Dedicatoria.

A mis abuelas Concepción Galindo Barrientos y Margarita Vázquez Barrientos, por la sabiduría, el amor y comprensión que me brindaron.

“Para mí solo recorrer los caminos que tienen corazón, cualquier camino que tenga corazón. Por ahí yo recorro, y la única prueba que vale es atravesar todo su largo. Y por ahí yo recorro, mirando, mirando, sin aliento.”

Carlos Castañeda

Agradecimientos.

A mi madre *María del Pilar Ramírez Vázquez* por su apoyo, comprensión y amor a lo largo de toda mi preparación académica y todos los proyectos que he emprendido.

A mi padre *Alfonso Sánchez Galindo* por su amor, apoyo, e ideales que me han acompañado toda mi vida.

A mis hermanas *Pilar Nayeli Sánchez Ramírez* y *Magali Citlalli Sánchez Ramírez* por su amor que me da vida.

A *Izani Chimal González* por el amor y apoyo que fue capaz de ayudarme a concluir esta etapa de mi vida.

A mis colegas *Fernando Barrientos Baltazares*, *Magiarely Ángeles Romero Minero*, *Albérico Rodríguez Carredano* y *Maestro José Serrano Ortiz* por apoyarme con su tiempo y esfuerzo en este proyecto.

A los arqueólogos *Arnulfo Allende Carrera*, *Lillian Torres de Alejandría* y *Philippe Thierry*, por el apoyo y trabajo brindado en el proyecto.

A mis primos *Fabiola Cervantes Galindo* y *José Romario Pérez Ramírez*, por su compañía y alegrías.

Resumen.

En el presente trabajo se exponen tres modelos Geoeléctricos utilizando la modalidad de Tomografía Eléctrica Resistiva con el arreglo electródico Wenner-Schlumberger; de una longitud promedio de ochenta y seis metros, con el objetivo de identificar y modelar la estructura principal de los vestigios arqueológicos hallados en la zona del Cerro del Encanto, del municipio de Libres, Puebla.

Las resistividades obtenidas en la zona de estudio fueron procesadas en el software Res2Dinv (Geotomo Software Inc.) para el modelamiento en 2D, de igual manera se obtuvo un modelo en 3D con la ayuda del programa Voxler 3 (Golden Inc.). En la distribución de las resistividades, dentro de los modelos, se pueden observar que las altas resistividades se hallan en la parte cercana a la superficie de la zona de estudio, las cuales son relacionadas al material andesítico que conforma la estructura arqueológica de interés.

Introducción.

La geofísica, como una rama ingenieril, ha servido de apoyo ampliamente para el modelamiento estructural y hallazgo de zonas con recursos naturales, como acuíferos, yacimientos minerales y petroleros, así como también se ha aprovechado en el área civil y el desarrollo ambiental. Sin embargo en las últimas décadas ha surgido un auge en la aplicación de la geofísica somera dentro de la arqueología, llamada así ya que la zona a explorar es cercana a la superficie. Las cualidades de apoyo que la geofísica brinda a la arqueología en la labor de investigación de estructuras antiguas en el subsuelo implica menor tiempo de exploración y una buena descripción de la zona estudiada, puesto que la tomografía eléctrica, sondeos eléctricos verticales, gravimetría, geo-radar y la magnetometría en conjunto con los datos arqueológicos oportunos, como la zona en la que se pueden hallar y el aspecto de las estructuras, puede determinar y localizar zonas potenciales para su posterior excavación o descripción, pues los datos que estos métodos nos proporcionan concluyen en una imagen clara del subsuelo en su parte somera que es la zona en la que mayormente se encuentran las estructuras arqueológicas.

Este trabajo trata una zona arqueológica en la cual se principian los estudios debido a que el descubrimiento de la misma es contemporáneo, lo cual dio inicio a los trabajos arqueológicos y geofísicos de investigación de la zona del Cerro del Encanto, los cuales concluyeron en un reconocimiento espacial por parte del equipo de arqueología y un modelamiento resistivo de una estructura arqueológica enterrada por parte del equipo conformado por estudiantes del colegio de Ingeniería Geofísica de la BUAP.

Los datos de posicionamiento de la edificación enterrada, en este caso la estructura principal arqueológica del cerro del Encanto, fueron proporcionados por el equipo arqueológico conformado por Lic. Arnulfo Allende Carrera y un comité de arqueólogos especialistas.

Objetivos.

General.

-Identificar la estructura arqueológica principal del Cerro del Encanto del municipio de Libres, Puebla, mediante el uso de la tomografía eléctrica resistiva.

Específicos.

-Establecer modelos geoelectricos a partir de las resistividades medidas de la zona de estudio, mediante la técnica de tomografía eléctrica resistiva

-Generar modelos geológicos, mediante el cotejo de la geología local y las medidas de resistividad obtenidas.

-Estipular la unidad estructural arqueológica que se encuentra en el área de estudio.

Capítulo 1. Zona de estudio y generalidades.

1.1 Localización de la zona de estudio.

El municipio de Libres se encuentra en la zona Centro-Oriental de la República Mexicana, dentro del estado de Puebla en la zona Norte, con coordenadas geográficas de longitud -97.68513° W, latitud 19.46462° N, a una altitud de 2380 metros. Colinda al Norte con los municipios de Ocoatepec, Cuyoaco e Ixtacamaxtitlán, al Oriente con Oriental y Tepeyahualco, en el Poniente y Sur con el estado de Tlaxcala.

La zona de estudio se encuentra en la parte Noroeste del municipio de Libres, en el Cerro del Encanto, que forma parte de la sierra volcánica del Eje Neovolcánico que representa en su mayor parte al municipio de Libres. En la figura 1, se presenta el mapa del municipio, seguido del polígono sobre la ladera donde se realizó la investigación, que se encuentra entre los puntos geográficos de longitud -97.71729° W, latitud 19.49972° N.

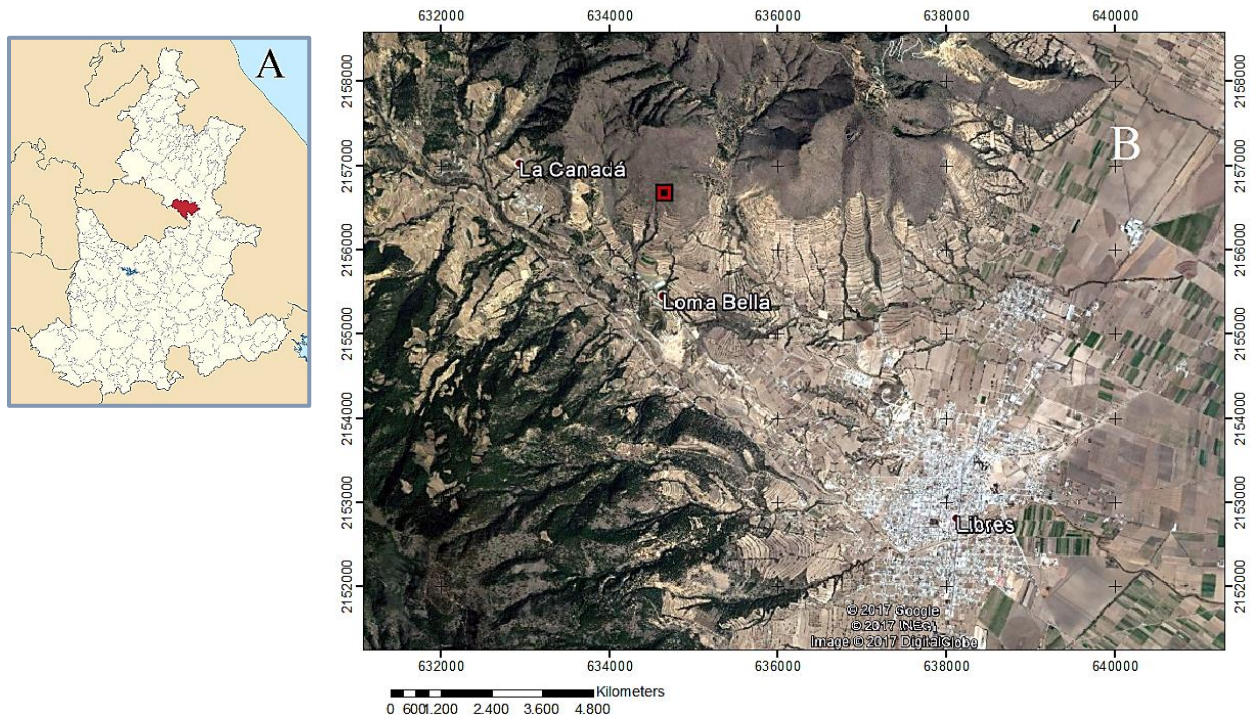




Fig. 1. A) División municipal del estado de Puebla. B) Municipio de Libres. C) Zona de estudio.

1.2 Geología regional.

El municipio de Libres se encuentra en la parte Este de la faja Volcánica Mexicana o Eje Neovolcánico (fig. 2), en la subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac, formado en una zona de fallas de tensión, que dieron lugar a grandes fosas tectónicas y aparatos volcánicos.

El Eje Neovolcánico inicia en la costa Occidental de México, en la desembocadura del río Grande Santiago a la Bahía de Banderas, continuando hacia el Sureste hasta encontrar el volcán de Colima, para después continuar aproximadamente sobre el paralelo 19° latitud norte, hasta llegar al pico de Orizaba y el Cofre de Perote, alcanzando una longitud de 880 km y una amplitud aproximada entre los 80 y los 230 km. Su origen se debe principalmente a la subducción de la placa de Cocos bajo la placa Norteamericana, lo cual produjo grandes eventos tectónicos en el centro de la República Mexicana. Los principales volcanes que las entidades comparten son

estratovolcanes de grandes dimensiones y lomeríos, estas grandes estructuras fueron formadas por emisiones alternadas de productos piroclásticos y derrames lávicos. (UNAM, Instituto de Geología, 1978)

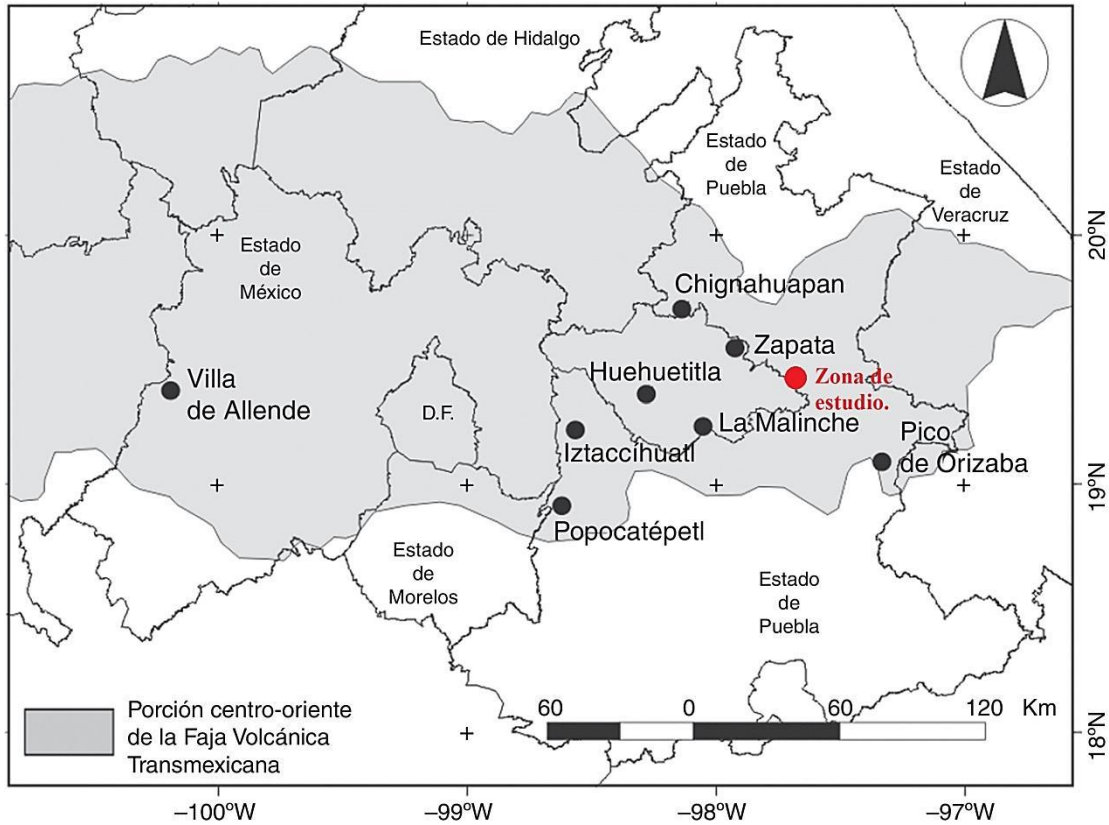


Fig. 2. Porción Centro-Oriente del Eje Neovolcánico (Datos Básicos de la Geografía de México – INE, 1986):

1.2.1 Geomorfología.

El Eje Neovolcánico se puede describir como una enorme masa de rocas volcánicas de todos los tipos, de diversas edades, desde mediados del Terciario hasta el Cuaternario. Se pueden destacar depósitos de areniscas, conglomerados y cenizas, que se encuentran dispersos entre extensas llanuras y lomeríos; materiales volcánicos que conforman grandes sierras volcánicas y coladas lávicas. Incluye la cadena de grandes estratovolcanes: volcán de Colima, Tancítaro, Nevado de Toluca, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Malinche y Citlaltépetl, que casi en línea recta atraviesan el país, dando trazo a la gran falla de Clarión.

La zona de estudio se encuentra dentro de la subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac, que abarca una extensión política en los estados de Toluca, Pachuca, Tlaxcala, Puebla y Cuernavaca (fig.2). Representada por el característico relieve del Eje Neovolcánico de sierras escarpadas, lomeríos y llanuras aluviales, conformadas de material volcánico como: andesitas, riolitas, basaltos, tobas y brechas volcánicas. Con amplias zonas sedimentarias en las partes bajas de la provincia conformadas de: sedimentos fluviales, lacustres y brechas sedimentarias. (López Ramos E., 1993)

1.3 Geología local.

La parte Este del municipio de Libres es una planicie de origen lacustre, conocida como los Llanos de San Juan, la región Noreste forma parte de la Sierra Norte, en la zona Sureste se puede distinguir la llanura que hace contraste a la zona Oeste conformada por sierra volcánica de laderas escarpadas, que forman parte de la subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac. Las altitudes en algunos puntos llegan hasta 3,200 metros sobre el nivel del mar, la llanura en cambio se encuentra a 2,360 metros.

Dentro del municipio se han presentado actividades volcánicas en diferentes periodos geológicos, los más importantes durante el Terciario y en su mayor parte el Cuaternario. Representando al Terciario se encuentran rocas piroclásticas y de composición ígnea, principalmente coladas. En el Cuaternario se encuentran suelos aluviales, residuales y algunas coladas con despegamientos tobáceos, piroclastos y cenizas que componen suelos sedimentarios de granulometría limo-arenosa, también se presentan afloramientos de rocas calizas, limolitas y areniscas, algunos cubiertos por los eventos volcánicos con materiales riolíticos, andesíticos, y otras ya se presentan conformando los suelos del mismo territorio. (INEGI, 2009)

En el cerro del Encanto (fig. 3), lugar donde se realizó el estudio, se distinguen materiales limo-arenosos producto de suelos aluviales, así mismo, andesita conformando la estructura de estudio y derrumbes producto de la erosión de la misma estructura, aunque también se pudo discernir rocas volcánicas como basaltos y riolitas.

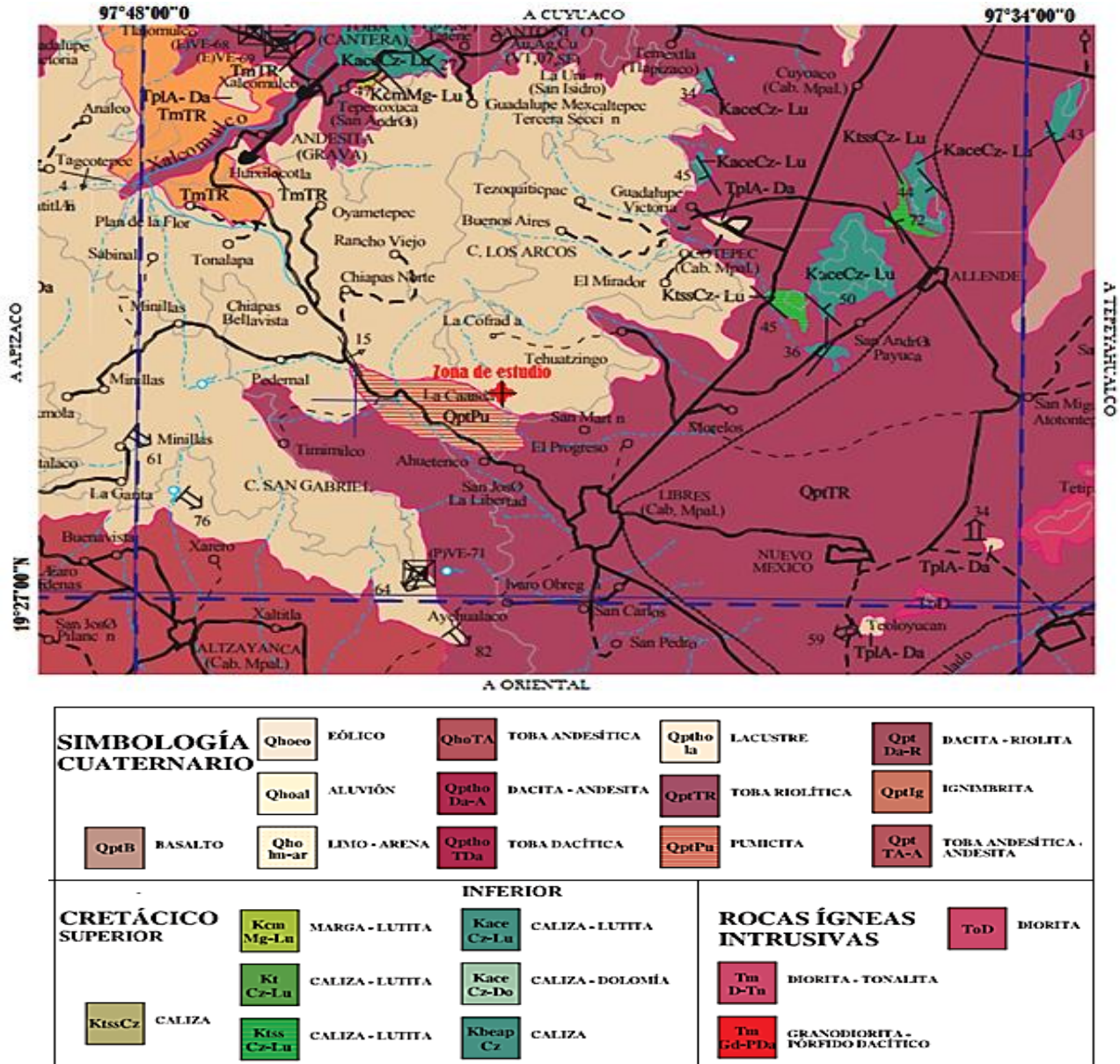


Fig. 3. Plano geológico regional modificado de carta Geológica Minera, Veracruz E14-3, 1:250,000

1.4 Antecedentes históricos de la zona de estudio.

Originalmente el municipio de Libres se llamó Hueytlalli, estuvo ocupado primero por Otomíes y Nahuas. Según el arqueólogo Arnulfo Allende, 2016: las culturas Nahuas fueron las que tuvieron más presencia en esta parte del país, en concreto la parte que abarca la colindancia entre los estados de Veracruz y Puebla, en los municipios de Puebla, Oriental, Perote, Libres y Tepeyahualco. Las razones de la presencia de las culturas en estos lugares, se debía principalmente al siempre presente paso comercial que ha existido en esta zona, ya que las civilizaciones encontraban paso de la parte Sureste, Este y Noreste por esta región, logrando cruzar hacia la parte importante o central que se encontraba en la ahora ciudad de México. Debido al gran caudal de personas que cruzaban por estos lares se lograron formar grandes comunidades y ciudades, que son los vestigios que ahora se encuentran como evidencia de las grandes civilizaciones que aquí existieron.

1.5 Antecedentes de la tomografía geoelectrica aplicada a zonas arqueológicas.

La tomografía geoelectrica tiene un ideal empleo en la arqueología, pudiendo determinar estructuras aisladas, como muros, túmulos o cimientos, principalmente resulta útil en edificaciones que presentan características geométricas definidas. Se suele implementar previo a la excavación, aportando modelos resistivos de posibles restos en una zona determinada. Actualmente en México se usa dentro de zonas arqueológicas importantes, en algunos casos para la localización de las estructuras que se encuentran bajo el suelo, en otros para saber lo que está bajo las mismas estructuras y también se da uso para la descripción del interior de ellas.

Científicos del Instituto de Geofísica y de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, así como del Instituto Nacional de Antropología e Historia (2016), presentaron el trabajo de “Tomografía geoeléctrica aplicada a la pirámide de Kukulcán”, en Chichén Itzá, Yucatán. Confirmaron la presencia de una segunda subestructura en el interior de la pirámide de Kukulcán. El hallazgo fue hecho con los resultados de una tomografía geoeléctrica tridimensional.

Dra. Denisse Lorenia (2017) del Instituto Nacional de Antropología e Historia, anuncio el estudio “Proyecto de conservación integral de la Plaza de la Luna”, en la zona arqueológica de Teotihuacán. Se identificó una cavidad recta a diez metros de profundidad que iría del centro de la plaza a la Pirámide de la Luna, al realizarse una tomografía geoeléctrica. El hallazgo confirmaría que los teotihuacanos reprodujeron el mismo patrón de túneles asociados a sus grandes monumentos

Iriarte Sierra Lizbeth (2013) de la Universidad Nacional Autónoma de México, expuso en su tesis de licenciatura “Imágenes 3D de tomografía eléctrica en la zona arqueológica de Pahñú”, estado de Hidalgo. Con el fin de determinar la profundidad, geometría y grosor del relleno que se encuentra por debajo de la “pirámide principal”, cuyos desplazamientos por efectos de la erosión están afectando la pared Norte de la misma. En el caso de la “pirámide principal” se determinaron las dimensiones y la posición del relleno que afecta la pared Norte, además, se encontraron anomalías que podrían indicar zonas de posibles ofrendas realizadas por los constructores. En el trabajo se implementó la técnica de tomografía geoeléctrica en 2D y 3D,

Capítulo 2. Fundamentos teóricos.

2.1 Prospección eléctrica de corriente continua.

Dentro de la ingeniería geofísica existen diversos métodos de estudio de la Tierra que representan una herramienta importante para la descripción de la misma, entre los cuales se encuentran los métodos eléctricos con múltiples modalidades, cada una con sus propias aplicaciones y ventajas, entre ellas se encuentran los estudios geoeléctricos y su modalidad de tomografía eléctrica resistiva, basado en un dispositivo multieléctrodico que produce imágenes en 2D y 3D de la zona de estudio con la determinación de resistividades y el análisis de estas.

Para obtener los modelos de resistividades se procede a crear un campo de corriente continua con intensidad de corriente regulada en el subsuelo y así poder medir una diferencia de potencial eléctrico en la sección de estudio. Enterrados en la superficie cuatro electrodos, que se colocan de acuerdo a un arreglo geométrico; los electrodos representados como A y B inyectan corriente al subsuelo la cual es generada por una batería, mientras que los electrodos M y N son encargados de medir la diferencia de potencial del campo eléctrico creado. Las diferencias de potencial eléctrico se ven afectadas en los cálculos obtenidos debido a la heterogeneidad del suelo, con la ayuda de la teoría basada en las *Leyes de Maxwell*, se obtiene una descripción de diferencias de Resistividades de la zona de estudio.

Aunque los Métodos Geoeléctricos se remontan al siglo XVIII con la investigación de la Resistividad de las rocas por Gray y Wheeler (1720), el descubrimiento de que el suelo es un conductor por Watson (1746), y el hallazgo de que ciertos minerales producen débiles corrientes eléctricas apreciables en la superficie, utilizando la polarización espontanea por Robert Fox (1815) “el abuelo de los geofísicos“, no fue hasta 1915 que los mineros Schlumberger y Frank

Wenner idearon un dispositivo tetraelectródico que será la base de los estudios geoelectricos.
(Orellana E., 1982)

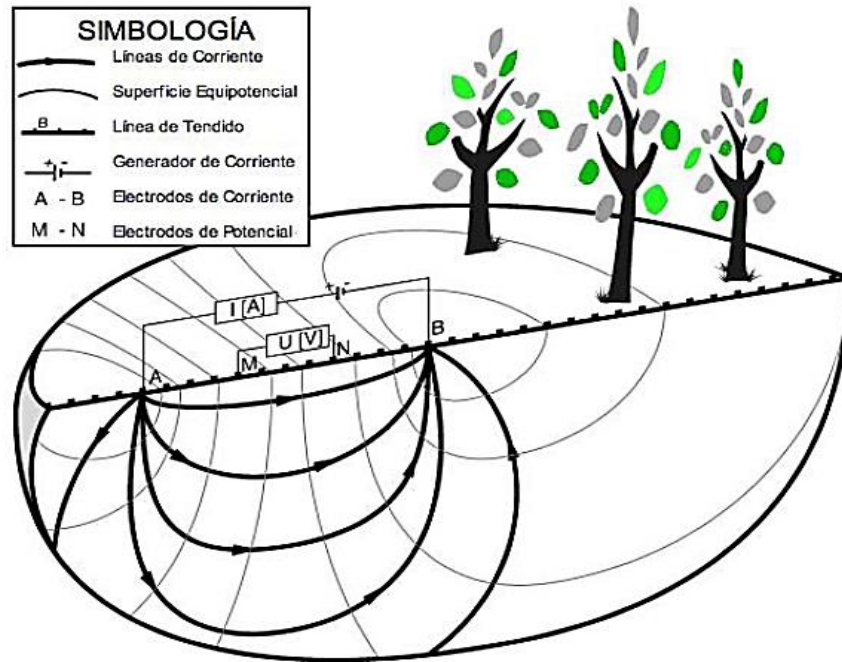


Fig. 4. Principio del método geoelectrico resistivo (Eunice Álvarez, 2015).

2.2 Resistividad en las rocas.

El conocimiento de las propiedades electromagnéticas de las rocas en el campo y dentro del laboratorio es un punto esencial para la aplicación del método geoelectrico. En un modelo geoelectrico se expresa la resistividad (ρ), magnitud que sirve para la descripción del medio estudiado y su modelamiento, afectada por las propiedades de las rocas, describe la dificultad con la que la corriente eléctrica pasa por las diversas zonas del subsuelo.

Debido a que las propiedades de las rocas en el subsuelo son diferentes se puede modelar la zona de estudio, algunas de estas rocas considerándose hasta aislantes eléctricos, dependen todas de diferentes características obtenidas a lo largo del tiempo y propiedades intrínsecas de la materia, las cuales se deben considerar dentro de la geología in-situ para el estudio. Las

propiedades hidráulicas, térmicas, porosas, salinas, la temperatura, el relleno, etc., de las rocas son los factores que alteran las resistividades medidas, de esta manera:

“Las propiedades que interesan al prospector son las de las rocas y minerales reales, tal como se encuentran en la naturaleza, con sus impurezas, fisuras, diaclasas, humedad, etc. (...) Los datos que aparecen en algunas tablas de constantes, son obtenidos de muestras cuidadosamente escogidas y desecadas, estas carecen de interés para la prospección.”

(Orellana E., 1982).

Si las resistividades de las rocas solo dependieran de su composición mineralógica la mayoría de estas se comportaría de una manera aislante y los estudios geoelectrónicos no podrían llevarse a cabo, sin embargo, gracias a el agua y los electrolitos que también las componen las rocas se comportan como conductores iónicos con un rango de oscilaciones resistivas, como se muestra en la tabla.

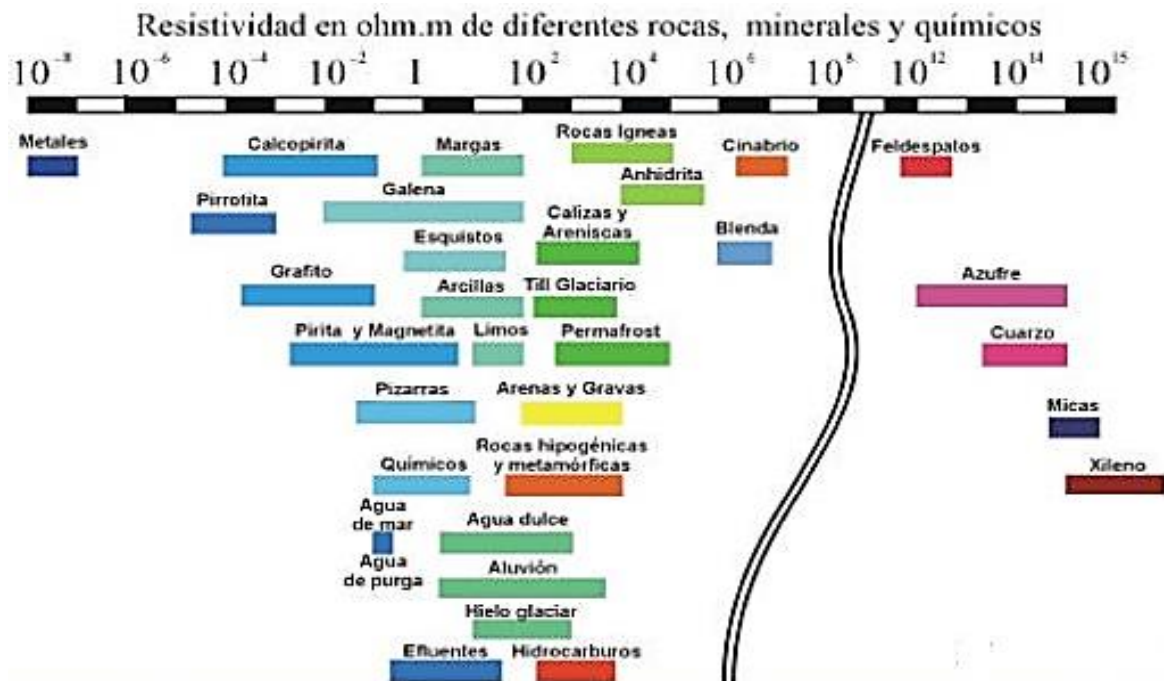


Fig. 5. Rango de variaciones de la resistividad eléctrica en rocas, minerales y químicos en Ohm*m (Orellana, 1982).

2.3 Fundamentos teóricos de resistividad.

La resistividad eléctrica (ρ) es una magnitud que se determina numéricamente por la fuerza que opone un material dado al flujo de corriente eléctrica dirigida a este, dependiendo de su composición y las propiedades intrínsecas de la materia. En la exploración eléctrica la unidad de medida es la resistividad expresada en *Ohm-m*, teniendo como magnitud inversa a la conductividad eléctrica (σ) cuya unidad es *Siemens/metro*, representa que tan fácil pasa la corriente eléctrica por el material; entonces se representa.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (1.1)$$

2.3.1 Resistencia.

La resistencia eléctrica representa la oposición de corriente eléctrica que pasa por un cuerpo, la cual depende de: la resistividad del material (ρ), es proporcional a su longitud, lo que implica que la resistencia aumenta conforme es mayor la longitud (L) y es inversamente proporcional a su sección transversal, donde la resistencia disminuye conforme aumenta el grosor o sección transversal (A).

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1.2)$$

De esta manera son existentes materiales conductores, los cuales tienen una mínima resistencia eléctrica, e inverso a esto se encuentran los cuerpos aislantes, que tienen una gran resistencia a la corriente eléctrica.

Por otra parte destaca la *Ley de Ohm*, que representa la relación entre la resistencia, la diferencia de potencial eléctrico y la corriente que atraviesa un conductor o cuerpo resistivo, dicha relación es de amplio uso dentro de las ecuaciones utilizadas en los estudios geoelectricos, entonces se tiene:

$$R = \frac{V}{I} \quad (1.3)$$

Donde (V) corresponde a la diferencia de potencial, (R) a la resistencia e (I) a la intensidad de la corriente. Las unidades de esas tres magnitudes en el sistema internacional de unidades son, respectivamente, voltios (V), ohmios (Ω) y amperios (A).

2.4 El método geoelectrico.

Dentro del estudio teórico geoelectrico, se considera una fuente puntual en donde se inyecta una cantidad de corriente (I) determinada al subsuelo, la cual produce un campo eléctrico de corriente continua, teniendo un medio homogéneo e isotrópico conductor, la propagación del campo describe una superficie semiesférica en el semiespacio inferior, que se extiende uniforme en todas direcciones. Las líneas de corriente son líneas radiales que parten del electrodo en la superficie, la superficie equipotencial es perpendicular a las líneas de corriente. La densidad de corriente (J) está regida en dirección normal y tiene siempre el mismo valor en todos los puntos del campo. De modo que la integral de la densidad de corriente (J) en toda la superficie semiesférica debe ser igual a la intensidad de corriente (I) inyectada. (Loper E. Orla, 1959)

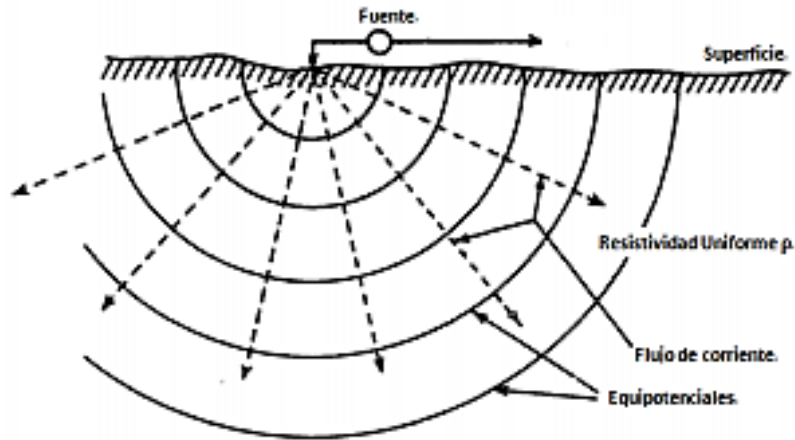


Fig. 6. Fuente puntual de corriente continua en la superficie de un medio homogéneo. Modificado de (Telford, 1992).

Para la descripción física del método eléctrico se tiene como bases las ecuaciones de Maxwell que representan por completo los fenómenos eléctricos. Se retoman dos de las cuatro ecuaciones, en su forma diferencial, que son de uso dentro de la teoría de la prospección eléctrica de corriente continua: *Ley de Faraday* (1.4) y *Ley de Amper* (1.5). (Orellana, 1982) propone:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.5)$$

Donde:

- E : Intensidad del campo eléctrico (V/m)
- B : Inducción magnética (T)
- H : Intensidad magnética (A/m)
- J : Densidad de corriente (A/m^2)
- D : Corriente de desplazamiento (C/m^2)

Considerando un campo eléctrico de corriente continua, tomando en cuenta la primera *ley de Maxwell - Faraday* (1.4), donde habrá que eliminarse las derivadas temporales por tratarse de un campo estacionario (1.6); se expresa de tal forma (1.7) que indica que el campo eléctrico es rotacional y que es posible describirlo a partir de un potencial eléctrico escalar (ΔU).

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad (1.6)$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} U \quad (1.7)$$

Retomando las relaciones constitutivas de la materia dentro del electromagnetismo, se tiene:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.8)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.9)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.10)$$

Siendo:

- ϵ : Permitividad eléctrica (F/m).
- μ : Permeabilidad magnética (H/m).
- σ : Conductividad eléctrica (S/m).

Los valores de ϵ y μ son constantes, ya que se considera al subsuelo como un medio de pérdidas mínimas que difieren muy poco de los valores en el vacío ($\epsilon = 8,85 \times 10^{12}$ F/m y $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m).

Con referencia a lo anterior, si (r) es el radio de la semiesfera, se tiene que:

$$2\pi r^2 J = I \quad (1.11)$$

Retomando (1.8) y sustituyendo:

$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1.12)$$

Se obtiene:

$$|E| = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (1.13)$$

De esta manera, para cualquier electrodo el valor del campo eléctrico (E) es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (r).

Retomando la ecuación (1.7) que define la diferencia de potencial, se puede calcular la magnitud entre dos puntos, en este caso M y N.

$$\Delta U_N^M = - \int_N^M E \cdot dl \quad (1.14)$$

Sustituyendo con (1.13), se obtiene:

$$\Delta U_N^M = \frac{I\rho}{2\pi} \int_1^2 \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.15)$$

En la que ΔU_N^M pertenece a la diferencia de potencial eléctrico entre los puntos M y N, y r_1 y r_2 son las distancias a los electrodos de corriente.

2.4.1 Resistividad aparente.

Dentro del problema directo en el campo de estudio se tiene la medición de resistividades aparentes (ρ_a) para posterior determinación de un modelo de la distribución de resistividades reales (ρ_r).

Este cálculo se realiza utilizando la ecuación de la variación de potencial en el medio (1.15), de un arreglo con configuración lineal de dos electrodos de corriente A-B y dos electrodos de potencial M-N, se tiene entonces:

$$\Delta U_N^M = \Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (1.16)$$

Despejando la resistividad, que es la magnitud a estudiar en el terreno, se obtiene:

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \frac{\Delta V}{I} \quad (1.17)$$

En esta ecuación está representado el coeficiente geométrico del dispositivo, que se verá modificada de acuerdo a la configuración de los electrodos utilizada.

La ecuación (1.17) es para un arreglo de cuatro electrodos y un medio homogéneo. Dado que la configuración homogénea del subsuelo es casi imposible, las resistividades obtenidas en los estudios son aparentes (ρ_a), lo cual proporciona la resolución del problema directo, sin embargo, para la finalidad de un modelo acorde a la naturaleza geológica de la zona de estudio se presenta un problema inverso, que nos dará como resultado una configuración de resistividades reales (ρ_r).

2.4.2 Dispositivos tetra-polares.

Un dispositivo electródico es un conjunto de electrodos distribuidos de una forma concreta en el terreno a investigar. Los electrodos son distribuidos de acuerdo a un arreglo geométrico en el que las distancias entre ellos son constantes o variables de acuerdo al arreglo elegido. Se toman cuatro electrodos conectados a una batería y a un resistivímetro o a un computador capaz de procesar dicha información, la distribución es con dos electrodos de corriente A-B y dos que medirán la diferencia de potencial eléctrico M-N.

De acuerdo a esto se pueden manipular los arreglos geométricos conforme a las características de cada uno de ellos y las necesidades del estudio. Dentro de la tomografía eléctrica existen variedad de arreglos y tres son de los más usados.

2.4.3.1 Dipolo - Dipolo.

El modo en que los electrodos son colocados en el arreglo Dipolo – Dipolo sostiene que A-B se ubica en un extremo inicial del arreglo y M-N en el final del mismo, entre ellos, a una distancia “a” que será constante, pero con un factor “n” entre A y M que cambiará para la profundidad de investigación, (fig. 7). (M. H. Loke, 1996) menciona que:

“El arreglo geométrico dipolo-dipolo es muy sensible a cambios horizontales en la resistividad, pero relativamente insensibles a los cambios de resistividad verticales (...) esto significa que es bueno en la cartografía de estructuras verticales, tales como diques y cavidades, pero relativamente pobre en la cartografía de estructuras horizontales tales como capas.”

La profundidad media de investigación de este arreglo geométrico depende tanto del espaciamiento "a" y el factor "n". En general, este arreglo tiene una profundidad de investigación menor, pero de alta resolución.

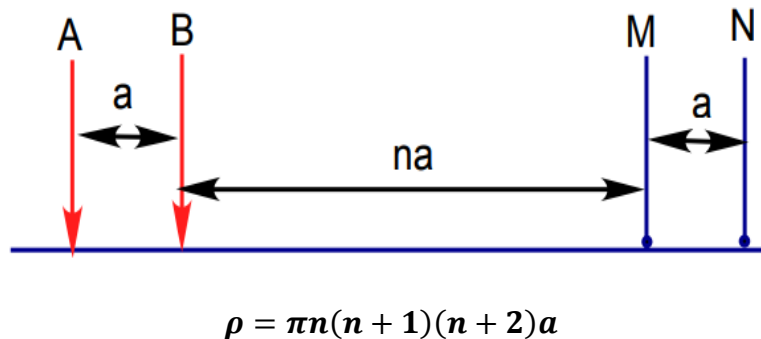


Fig. 7. Distribución eléctrica, arreglo Dipolo-Dipolo y su ecuación de resistividad.

La ecuación de la resistividad se obtiene resolviendo la ecuación (1.17) para dicho arreglo geométrico.

2.4.3.2 Wenner.

En el arreglo Wenner las distancias son constantes entre electrodos, quedando de esta manera: $AM = MN = NB$, quiere decir que la distancia “a” siempre será la misma entre los electrodos. (Fig. 8). (M. H. Loke, 1996) dice que:

“La sensibilidad para el arreglo geométrico Wenner es en extensiones horizontales debajo del centro del arreglo (...) debido a esta propiedad Wenner es relativamente sensible a los cambios verticales en la resistividad subsuperficial debajo del centro del arreglo (es decir, estructuras horizontales), sin embargo, es menos sensible a los cambios horizontales en la resistividad subsuperficial (es decir, estructuras verticales estrechas). La sección de sensibilidad muestra que las regiones más profundas asignadas para este arreglo están por debajo de los dos electrodos exteriores A-N, y no por debajo del centro del arreglo.”

La profundidad media de investigación para Wenner es aproximadamente 0.5 veces “a”. Con una buena intensidad de corriente, aunque la zona de estudio tenga un alto ruido de fondo pero con una cobertura horizontal relativamente pobre, esto podría ser un problema si se utiliza espaciamientos pequeños en “a”.

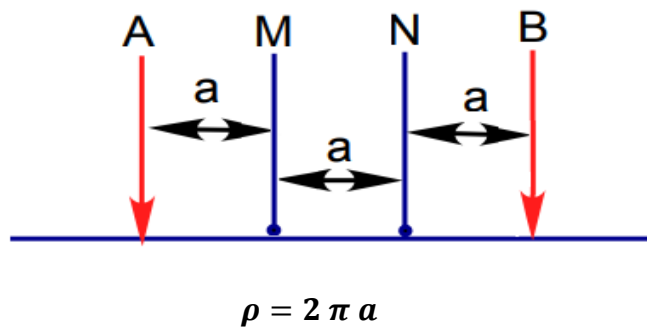


Fig. 8. Distribución electródica, arreglo Wenner y su ecuación de resistividad.

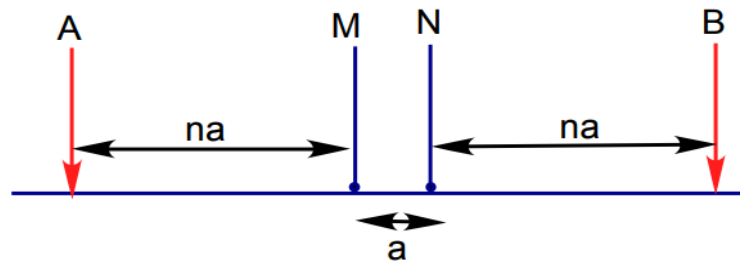
La ecuación de la resistividad se obtiene resolviendo la ecuación (1.17) para dicho arreglo geométrico.

2.4.3.3 Wenner – Schlumberger.

El arreglo Wenner – Schlumberger es un híbrido entre los dos arreglos que componen su nombre, combina una sensibilidad horizontal de Schlumberger y una alta resolución vertical de Wenner. El arreglo coloca los electrodos a la misma distancia en la toma más somera (“a” = “an”) y conforme aumenta la profundidad, la variable “n” da un cambio de distancia entre electrodos, lo que propicia que M-N se mantengan en la misma distancia pero que AB se alejen (fig. 9). (M. H. Loke, 1996) hace referencia a:

“El área de mayor valor positivo de sensibilidad es por debajo del centro del arreglo geométrico, concentrado por debajo de M-N (...) mientras el factor "n" aumenta junto con la profundidad de investigación, los contornos de sensibilidad tienen una ligera curvatura vertical debajo del centro (...) en (n= 6), los valores de alta sensibilidad de M-N son separados aproximándose a A-B, esto significa que este arreglo es moderadamente sensible a cambios horizontales (para valores bajos de "n") y en estructuras verticales (para valores "n" altos).”

De esta manera el arreglo Wenner – Schlumberger es de gran uso dentro de la tomografía eléctrica, debido a su alta resolución ya sea vertical u horizontalmente.



$$\rho = \pi n(n + 1)a$$

Fig. 9. Distribución eléctrica arreglo Wenner - Schlumberger y su ecuación de resistividad.

La ecuación de la resistividad se obtiene resolviendo la ecuación (1.17) para dicho arreglo geométrico.

2.4.2 Inversión de datos.

En la inversión, se busca determinar un modelo que dé una respuesta similar a los datos medidos en el estudio, que sea coherente con las propiedades geológicas de la zona, infiriendo así resistividades reales.

El modelo es una representación matemática idealizada de una sección de la Tierra, llevado a cabo previamente por diferentes estudios y cálculos que son tomados en cuenta dentro de los programas para el procesamiento geoelectrico.

En los problemas de inversión no solamente se trata de obtener una solución matemática aceptable, si no que dicha solución de a representar una realidad física de la forma más fidedigna posible de acuerdo a las mediciones realizadas y a la información disponible del estudio.

La expresión matemática del proceso de medición geofísica puede expresarse como 1.18 donde d representa los datos, m representa el modelo y G la relación física entre ellos.

$$G m = d \quad (1.18)$$

El operador G viene dado por ecuaciones de derivadas parciales. (Bárbara Biosca, 2011)

Las ecuaciones para la inversión de los datos de resistividades aparentes más usado, es por el algoritmo de mínimos cuadrados Quasi-Newton que resuelve el problema de la discrepancia entre los datos de resistividad aparente obtenidos y el modelo propuesto.

Capítulo 3. Metodología.

El estudio geoelectrico de tomografía eléctrica resistiva con aplicación en la arqueología, comparte el empleo de todo tipo de técnicas multidisciplinarias como métodos observacionales, investigaciones geológicas, arqueologías y prospección geofísica. En particular, se valora el uso de la tomografía eléctrica resistiva como método útil para obtener información de las zonas arqueológicas de estudio. Existen ya estudios eléctricos anteriores, algunos aquí presentados, que avalan las conclusiones aquí redactadas.

Las tomografías realizadas forman parte de un estudio arqueológico aun no presentado por las estancias correspondientes. De esta manera se presenta parte del estudio que corresponde al modelamiento tomográfico eléctrico resistivo de la estructura principal que yace en la zona arqueológica del Cerro del Encanto, Libres, Puebla.

3.1 Planificación.

Dentro del marco institucional se precisó a cumplir los requerimientos para la disposición del resistivímetro “Saris”, perteneciente a la BUAP. La planificación se llevó a cabo por un equipo de estudiantes del Colegio de Ingeniería Geofísica, en conjunto con docentes pertenecientes a la misma institución, dedicados al estudio arqueológico, arquitectónico, histórico y geofísico, que son citados en el presente documento como agradecimiento a su aportación.

El día 25 de junio del 2016, se inició con un reconocimiento con tomas satelitales fotográficas y posteriormente se concibió un reconocimiento de campo. Por parte del equipo de arqueólogos; precisaron algunas zonas de interés para el modelamiento de estructuras enterradas, esto con base en sus expectativas de estudio de la zona y partes de estructuras arqueológicas visibles que

rodeaban el lugar. Por parte del equipo de geofísica; se consideró la zona de estudio para la adquisición de datos, la forma de los tendidos, la extensión de los mismos y la composición geológica, para una buena descripción del subsuelo y las estructuras a estudiar.



Fig. 10. Zona de estudio, Cerro del Encanto, Libres, Puebla.



Fig. 11. Sección de la estructura estudiada que sobre sale en la parte baja al Noroeste de la zona de estudio.



Fig. 12. Sección de la estructura de estudio, que sobresale en la parte Sur de la zona prospectada.

3.2 Instrumentación.

El equipo utilizado para el estudio fue un Resistivímetro Saris de la marca Scintrex (fig. 13), con una potencia mínimo de 100, un máximo 500 Voltios y una intensidad de corriente eléctrica de 1 Amperio. Dentro de sus componentes de sistema cuenta con un microprocesador, memoria interna y pantalla para gráficos. Trabaja con un sistema de cables multielectrónico para la recepción y transmisión eléctrica del levantamiento en la zona.



Fig. 13. Resistivímetro Saris Scintrex.

Se trabajó con un máximo de 24 electrodos, para la toma de datos en tres perfiles, con el arreglo Wenner – Schlumberger, utilizando dos carretes de cable que transmitía la corriente eléctrica al terreno (A-B) y otros dos midiendo la diferencia de potencial eléctrico (M-N). También como herramientas de ayuda de campo se utilizó cuatro marros, un par de radios de comunicación, cinta de aislar, pinzas, un GPS, tres cintas métricas y transporte para el equipo.

3.3 Toma de datos.

En la toma de datos se concluyó el realizar tres perfiles con arreglo Wenner – Schlumberger, por su buena resolución tanto horizontal como vertical, los tendidos fueron colocados en intercalación para su correlación en el momento de la interpretación de los modelos adquiridos. La profundidad de investigación fue planeada dentro del rango de 15 m, de esta forma se obtiene una buena descripción de la estructura tanto en su basamento como someramente.



Fig. 14. Fotografía la adquisición de datos mediante tomografía eléctrica resistiva, en la zona de estudio, Cerro del Encanto, Libres.

A continuación se presenta la tabla con las especificaciones de los tres tendidos de tomografía eléctrica resistiva llevados a cabo en el estudio, con su ubicación, longitud, así como la separación eléctrica de cada uno, niveles a los que se llegó y el número de referencia de los mismos.

Arreglo Wenner-Schlumberger.					
Perfil	"a" (m)	"n"	Coordenada inicial	Coordenada final	Longitud (m)
1	4	8	634572 E , 2156676 N	634635 E, 2156609 N	92
2	4	8	634569 E, 2156672 N	634635 E, 2156620 N	84
3	4	8	634568 E, 2156662 N	634645 E, 2156627 N	84

Tabla 1. Especificaciones de los tendidos realizados en el estudio geoelectrico.

En la imagen satelital (fig.15) se muestra la distribución de los tendidos en el Cerro del Encanto, Libres, Puebla. La zona de interés permitió una buena distribución de los tendidos, para el alcance de los objetivos tanto vertical como horizontalmente.

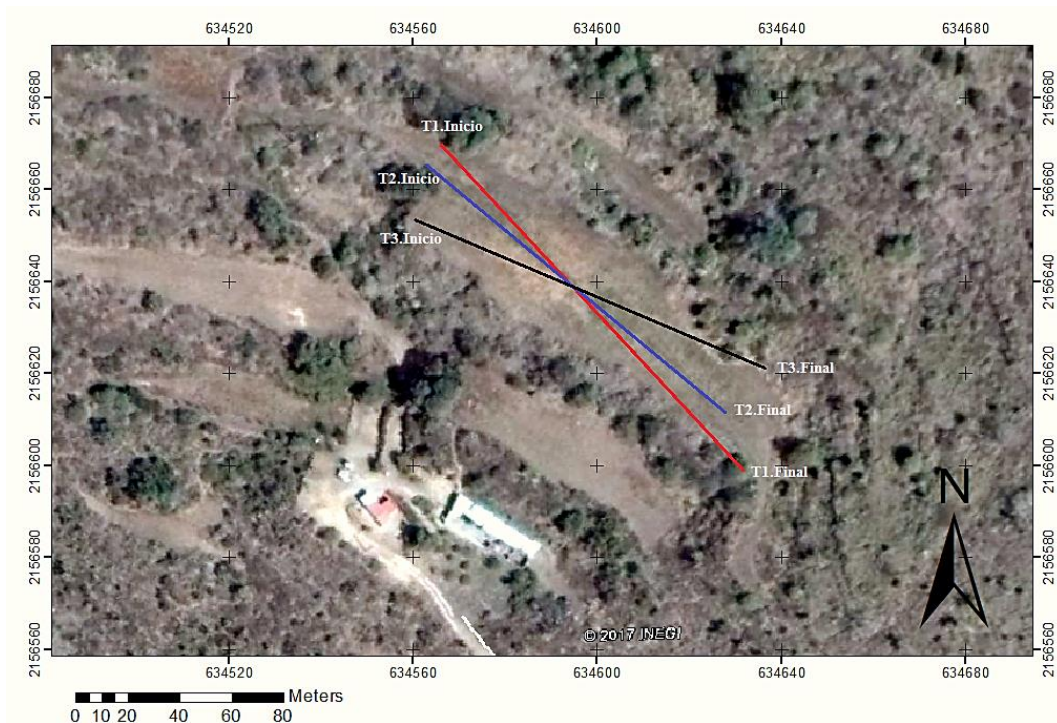


Fig. 15. Distribución de los tendidos en la zona de estudio, ladera del Cerro del Encanto.

3.4 Procesamiento y modelación.

Una vez obtenidas las resistividades aparentes en campo se pasa al procesamiento. Los perfiles geoelectricos resistivos han sido tratados con el programa especializado Res2dinv (Geotomo Software Inc.) que usa el problema inverso para obtener el modelo de las resistividades reales del subsuelo. La presentación gráfica tridimensional de los resultados se ha realizado con programas comerciales Surfer V.12 y Voxler V.3 (Golden Inc.). Salvo pequeños detalles, el trabajo de tratamiento de los datos, ha sido el mismo para todos los perfiles. A continuación se presentan los programas y sus pasos para la obtención de los modelos finales:

3.4.1 Res2dinv (Geotomo Software Inc.).

El objetivo de este programa es obtener el modelo de resistividades reales de cada uno de los perfiles y la visualización e interpretación de los modelos resistivos obtenidos. El método de trabajo de este programa se lleva a cabo de esta manera:

1) Se colocan los resultados de campo en formato “.dat”, de cada uno de los perfiles, de acuerdo a las exigencias del programa, comenzando con el nombre del archivo, espaciamento entre electrodos, arreglo geométrico, número de datos, lugar de inicio eléctrico en el arreglo, después se pasa a colocar los datos de campo distribuidos en columnas, de cada punto tomado, se especifica su localización, espaciamento “a”, factor de separación “n”, resistividad aparente, y por último un bloque con las topografías del tendido en diferentes puntos del mismo.

2) Dentro del programa Res2dinv se editan las medidas espurias más evidentes, si procede, de cada uno de los perfiles. Estos puntos se suelen diferenciar porque presentan valores disímiles entre medidas contiguas.

3) Se realiza una primera inversión en cada uno de los perfiles, con la disposición de materiales geológicos de la zona, para crear un criterio de correlación e interpretación entre la primera iteración y lo que se espera del perfil.

4) Ensayados los perfiles obtenidos, se procede al modelamiento con los parámetros convenientes:

- Tamaño del tendido, espaciamiento electródico, topografías y número de puntos.
- Criterio geológico zonal.
- Algoritmo de inversión usado: mínimos cuadrados (Quasi-Newton).
- Máximo de iteraciones.

3.4.2 Voxler 3 (Golden Inc.).

La finalidad de la representación con un modelo en Voxler; es la buena visualización y análisis en 3D de los modelos de resistividades reales obtenidos, al igual que la correlación de los perfiles y una aproximación del volumen del cuerpo estudiado. El modo de trabajo del programa es de la siguiente manera:

1) Ya obtenidos los perfiles resistivos reales, se procede a hacer una base de datos con una extensión “.dat”. Datos que representan las resistividades reales en las extensiones totales de cada uno de los perfiles.

2) Se utiliza el programa Surfer 12 (Golden Inc.) para poder transformar los datos obtenidos en un “grid”, con una resolución deseada (en este caso serán cien por cien pixeles). El resultado del proceso se guarda con formato “.datxyz”, que representa los datos en un eje de coordenadas x, y, z, para su posterior empleo.

3) Se procede a trabajar con el programa Excel que sirve de ayuda para organizar los datos del archivo obtenido (.datxyz), disponiendo 4 columnas para su posterior lectura en Voxler, ordenadas de manera que la primera son las coordenadas en X, la segunda las coordenadas en Y, la tercera la disposición en Z y por último la columna de las resistividades.

4) El trabajo que se realiza con el modelo en Voxler, es la visualización de los tres perfiles en conjunto y su correlación, así como de disponer de las herramientas de cálculo volumétrico que proporciona el programa,

Capítulo 4. Resultados obtenidos y su interpretación.

4.1 Perfiles geoelectricos.

4.1.1 Perfil 1.

En la primera pseudosección (fig. 16, A) se muestra el modelo de resistividades aparentes tomadas en campo, que varía de los 5 a los 350 *Ohms·m*. En la sección de resistividades aparentes calculada por el programa (fig. 16, B) se pueden observar magnitudes que van de los 5 hasta los 350 *Ohms·m*. Y para el modelo inverso resistivo (fig. 16, C) se tiene que los valores resistivos van de los 5 a los 980 *Ohms·m*.

Analizando el modelo resistivo que considera topografías, tras realizar 3 iteraciones con un error de 23.6% (fig. 17, b), se definen tres zonas:

-La primera zona y más superficial, está representada con tres cuerpos que se distinguen por sus tonalidades que van del marrón al rojo, con resistividades de los 231 a los 980 *Ohms·m*, ubicados en las longitudes de: 10 a 46 *m*, 47 a los 64 *m* y de los 68 *m* hasta el final del perfil, con un ancho promedio de 3 *m*, atribuidos a andesita que compone las estructuras de interés

-Considerada como una interfaz entre los rangos altos y pequeños de resistividad se encuentra la segunda zona, con tonalidades de verde fluorescente a amarillo, con rangos de 43 a los 230 *Ohms·m*. Este se extiende a lo largo de todo el perfil, desde el punto más somero hasta una profundidad de 5 *m* en promedio, envolviendo así a los cuerpos altos resistivos, conformado de material limo-arena.

-Como basamento se tiene la tercera zona, con tonos de azul fuerte a un verde azulado, de resistivos de los 5 a los 42 *Ohms-m*. Se extiende a lo largo de todo el perfil, a una profundidad que va de los 4 hasta el 13 *m*, constituido de material limo-arena saturado.

Este perfil representa con mayor exactitud los cuerpos de interés, debido a que cruza la zona de estudio de forma transversal, sin embargo en los posteriores perfiles se puede ver la continuidad que existe de los mismos.

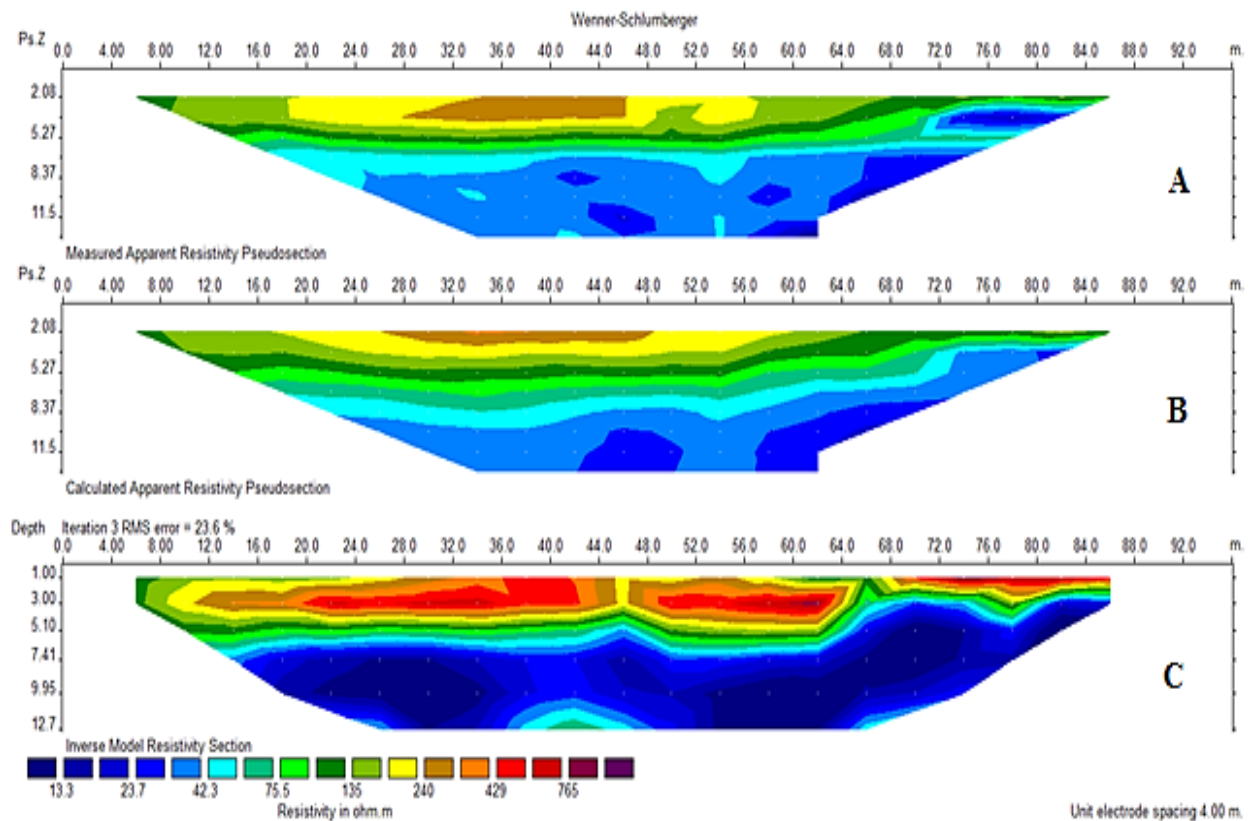
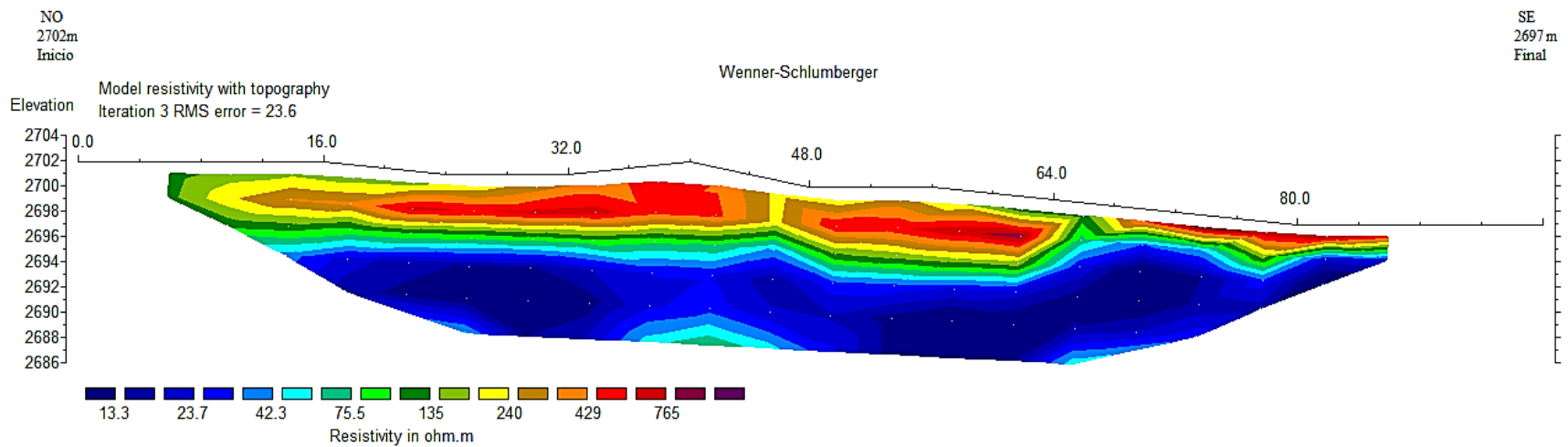


Fig. 16. Perfil 1: A) Resistividad aparente medida, B) Resistividad aparente calculada, C) Modelo inverso resistivo obtenido.



Fig. 17. Perfil 1: a) Ubicación del tendido, b) Modelo tomográfico eléctrico de resistividad real con topografías



Horizontal scale is 49.96 pixels per unit spacing
 Vertical exaggeration in model section display = 0.80
 First electrode is located at 0.0 m.
 Last electrode is located at 96.0 m.

Unit Electrode Spacing = 4.00 m.

b

4.1.2 Perfil 2.

En la primera pseudosección (fig.18, A) se muestra el modelo de resistividades aparentes tomadas en campo, que varía de los 5 a los 560 *Ohms·m*. En la sección de resistividades aparentes calculada por el programa (fig.18, B) se pueden observar magnitudes que van de los 5 hasta los 560 *Ohms·m*. Para el modelo inverso resistivo obtenido mediante el programa (fig.18, C) se tiene que los valores resistivos que van de los 5 a los 980 *Ohms·m*.

Analizando el modelo resistivo obtenido, que considera las topografías, tras realizar 3 iteraciones con un error de 7.8% (fig.19, b), se definen tres zonas:

-La primera zona y más superficial, diferenciándose por sus tonalidades que van del marrón al rojo, con resistividades de los 231 a los 980 *Ohms·m*, atribuido a la estructura andesítica a la intemperie, llegando a una profundidad de 7 *m* en la parte izquierda del perfil hasta los 16 *m* a lo largo y una pequeña extensión de un ancho promedio de 1 *m* adyacente a esta, sin embargo observando la parte derecha de los 42 a 76 *m* de la tomografía el cuerpo disminuye hasta alcanzar una profundidad de 1 *m* de ancho.

-La segunda zona, considerada como una superficie de contacto entre los rangos altos y bajos de resistividad, con tonalidades de verde fluorescente a amarillo, de resistividades de los 43 a los 230 *Ohms·m*, extendiéndose a lo largo de todo el perfil, desde un punto somero hasta los 2.5 *m* de profundidad en la parte derecha y central, en contraste con la parte izquierda que llega a una profundidad de 10 *m*, rodeando así a los cuerpos altos resistivos, representado de material limo-arena.

-En la parte inferior se encuentra la tercera zona con tonos que van de azul hasta un verde azulado, con resistivos de los 5 a los 42 *Ohms-m*, se encuentra a lo largo de todo el perfil empieza a una profundidad de 3 *m* en promedio, a excepción de la parte izquierda, donde se localiza la estructura andesítica, de esta manera la longitud del basamento empieza de los 18 *m* hasta el final de la tomografía en la parte derecha, conformado con material limo-arenoso saturado.

En este perfil se puede observar la zona más resistiva de los tres perfiles obtenidos, esto debido a que representa la parte expuesta a la intemperie de la estructura andesítica estudiada y se relaciona en su parte media a la continuidad de la estructura.

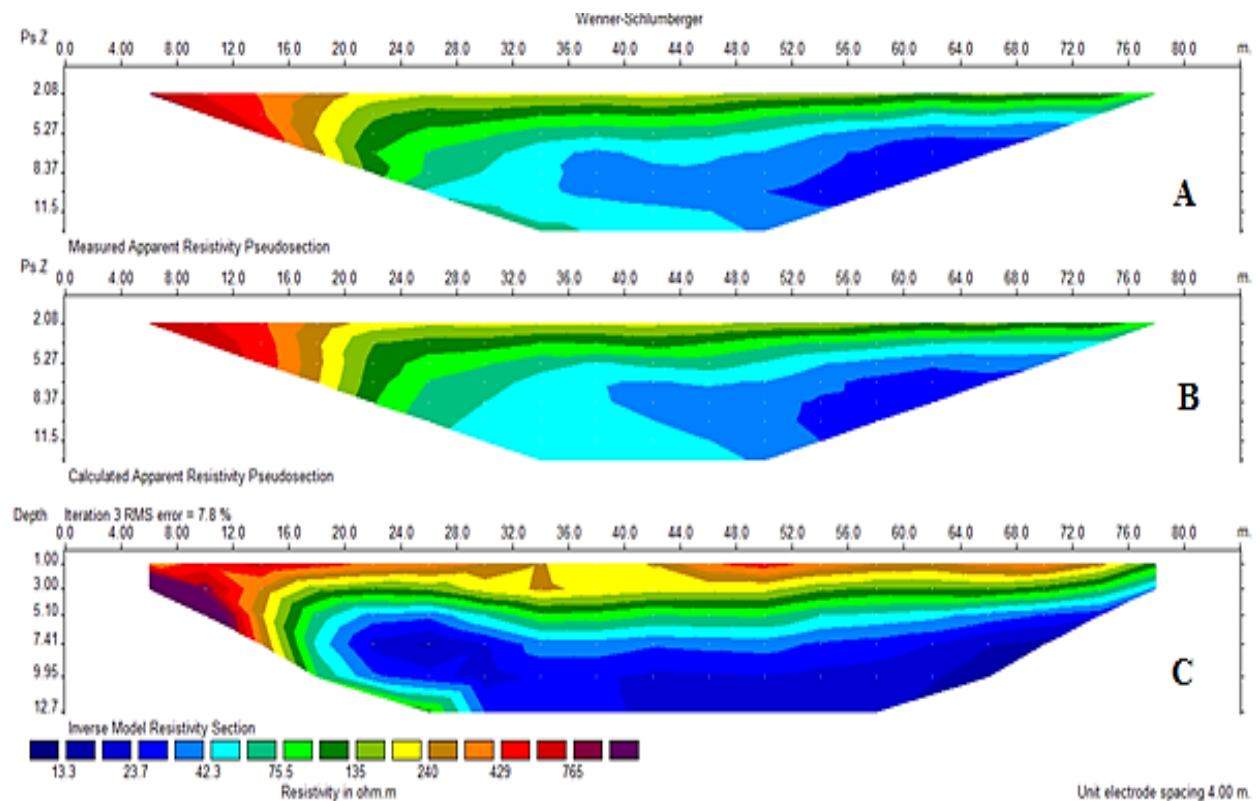
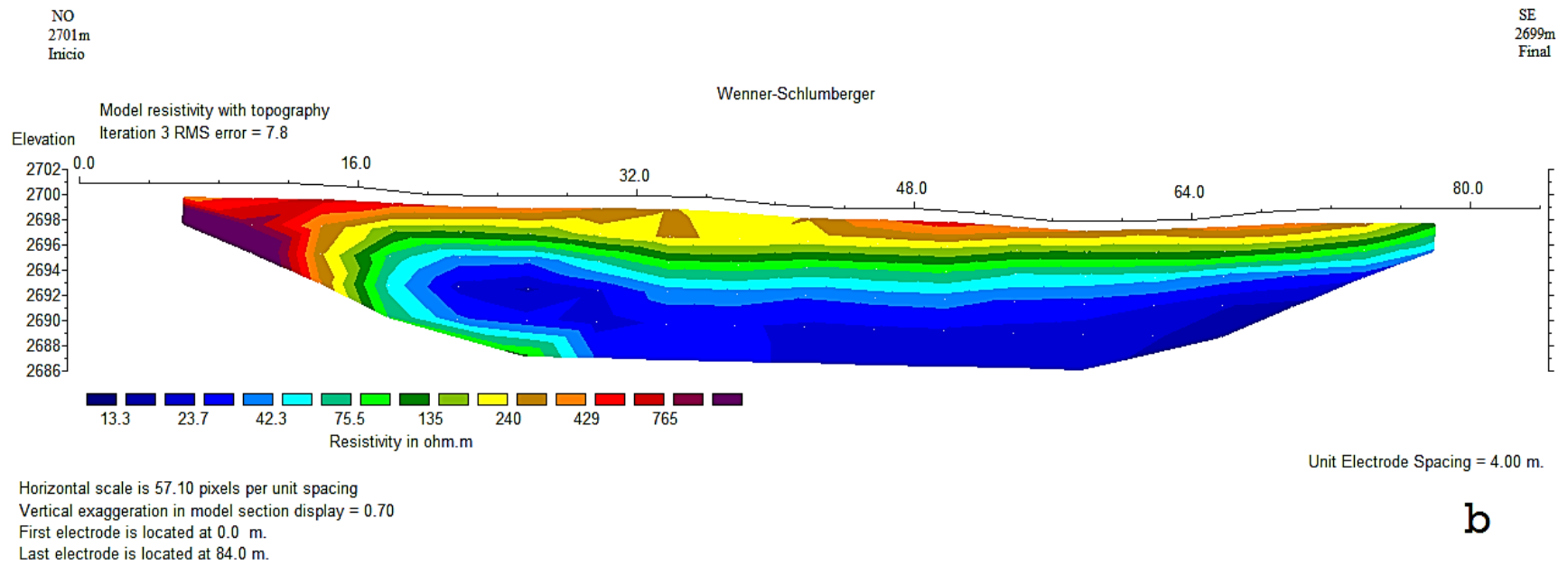


Fig. 18. Perfil 2: A) Resistividad aparente medida, B) Resistividad aparente calculada, C) Modelo inverso resistivo obtenido.



Fig. 19. Perfil 2: a) Ubicación del tendido, b) Modelo tomográfico eléctrico de resistividad real con topografías



b

4.1.3 Perfil 3.

En la primera pseudosección (fig.20, A) se muestra el modelo de resistividades aparentes tomadas en campo, que varía de los 5 a los 240 *Ohms·m*. En la sección de resistividades aparentes calculada por el programa (fig.20, B) se pueden observar magnitudes que van de los 5 hasta los 240 *Ohms·m*. Y para el modelo inverso resistivo calculado (fig.20, C) se tiene que los valores resistivos que van de los 5 a los 980 *Ohms·m*.

Analizando el modelo resistivo obtenido, que considera las topografías, tras realizar 3 iteraciones con un error de 17.5% (fig.21, b), se definen tres zonas:

-La primera zona y más allegada a la superficie, representada con 3 cuerpos distinguidos por sus tonalidades que van del marrón al rojo, de resistividades de los 231 a los 980 *Ohms·m*, con una base a una profundidad de 2.5 *m* en promedio, sobre las longitudes de: 6 a los 58 *m* y de los 68 *m* al final del perfil, estos atribuidos a andesitas que componen las estructuras de interés.

-Tomada como una zona de unión entre los rangos altos y pequeños de resistividad se encuentra la segunda zona, con gamas de verde fluorescente a amarillo, pertenecientes a rangos resistivos de 43 a los 230 *Ohms·m*, extendiéndose a lo largo de todo el perfil alcanzando una profundidad de 4 *m* encerrando así a los cuerpos altos resistivos, representada de material limo-arena.

-En la parte baja se encuentra la tercera zona, con tonos de azul hasta un verde azulado, este con resistivos de los 12 a los 42 *Ohms·m*, extendiéndose a lo largo de todo el perfil a una profundidad que va de los 4 hasta los 13 *m* en promedio, conformados con material limo-arenoso saturado.

Este perfil representa la continuación de los cuerpos de interés, debido a que corta los dos perfiles anteriores y cruza transversalmente la zona de estudio, sin embargo llega a demostrar que los cuerpos altos resistivos, atribuidos a andesita, se encuentran en el centro de la zona.

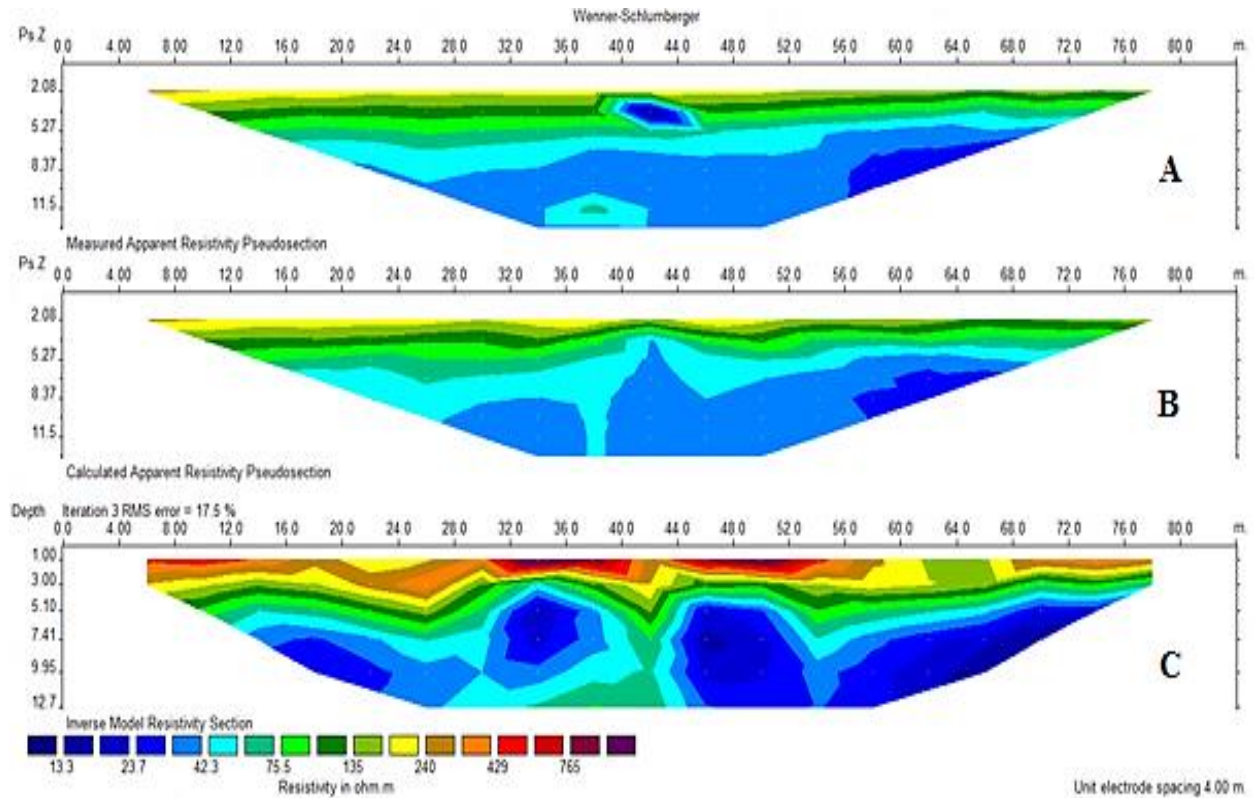
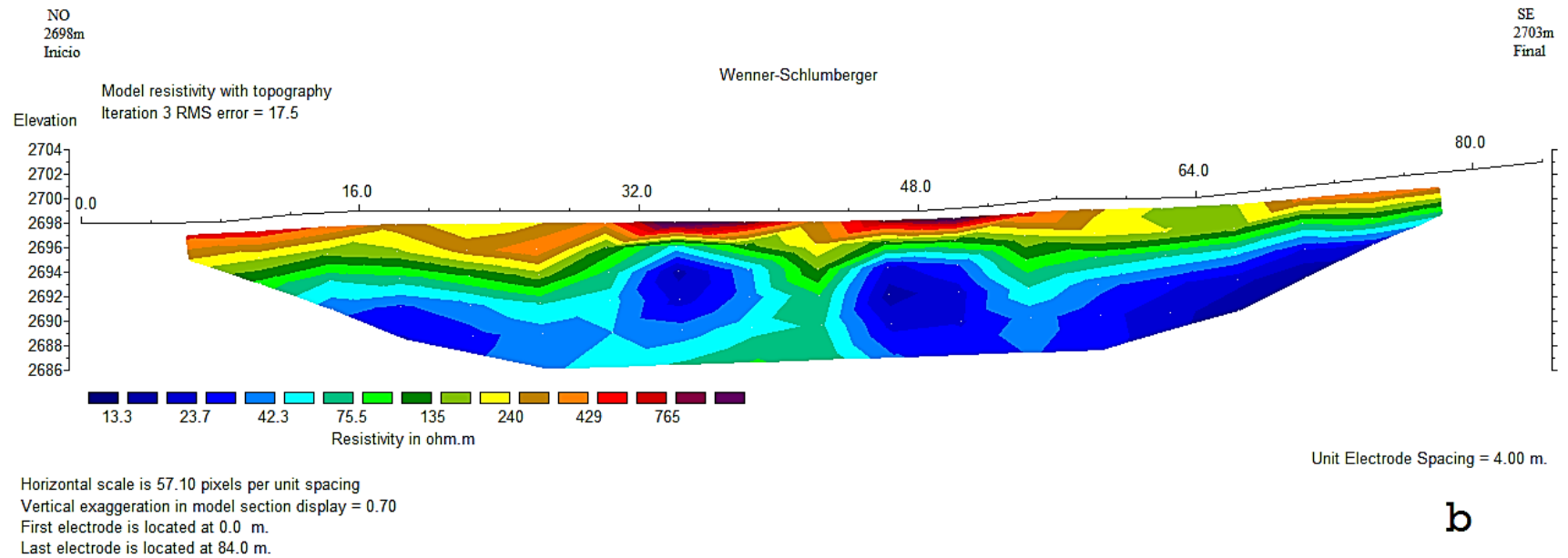


Fig. 20., Perfil 3: A) Resistividad aparente medida, B) Resistividad aparente calculada, C) Modelo inverso resistivo obtenido



Fig. 21. Perfil 3: a) Ubicación del tendido, b) Modelo tomográfico eléctrico de resistividad real con topografías.



b

4.2 Correlación Geofísica – Geológica.

A continuación se muestran los tres perfiles con topografías incluidas (fig. 22, 23, 24), con las unidades geológicas asignadas respecto a: las resistividades reales obtenidas, el reconocimiento geológico de la zona de estudio y los datos obtenidos en las cartas geológicas. Editados en el programa Strater (Golden Software).

<i>Unidad.</i>	<i>Intervalo resistivo.</i>	<i>Descripción.</i>
U1.	5- 42 Ohms•m	Zonas bajas , de los 6 hasta los 13 m de profundidad en promedio, de bajos resistivos que evidencian la saturación del suelo limo-arenoso .
U2.	43 -230 Ohms•m	Fracciones someras , desde la parte aledaña a la superficie hasta los 6 m, se consideró como una interfaz entre los rangos altos y bajos resistivos, de composición arena-limo .
U3.	231 - 980 Ohm•m	Zonas altas con fracciones de altos resistivos, con una profundidad de 3 m material clasificado como andesita , el cual conforma la estructura de interés.

Tabla 2. Material específico de los perfiles geológicos según su rango resistivo

4.2.1 Perfil I.

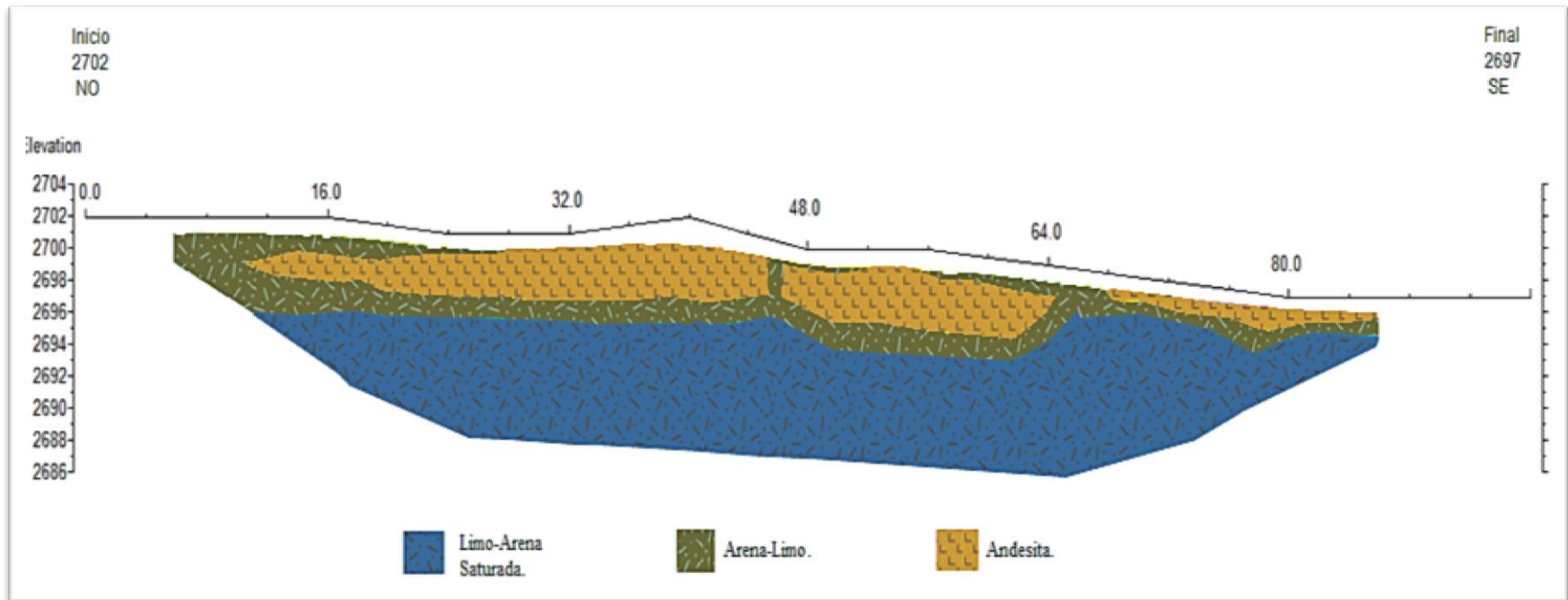


Fig. 22. Perfil I: Sección Geológica.

4.2.2 Perfil II.

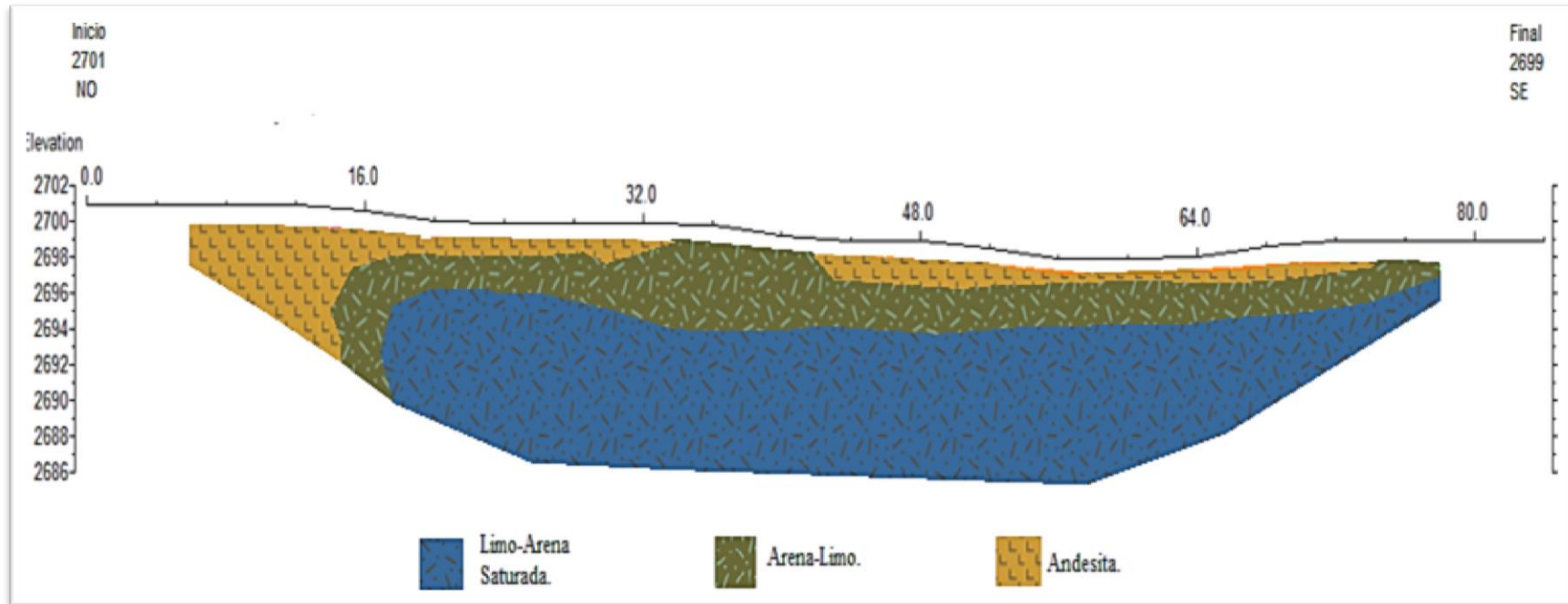


Fig. 23. Perfil II: Sección Geológica

4.2.3 Perfil III.

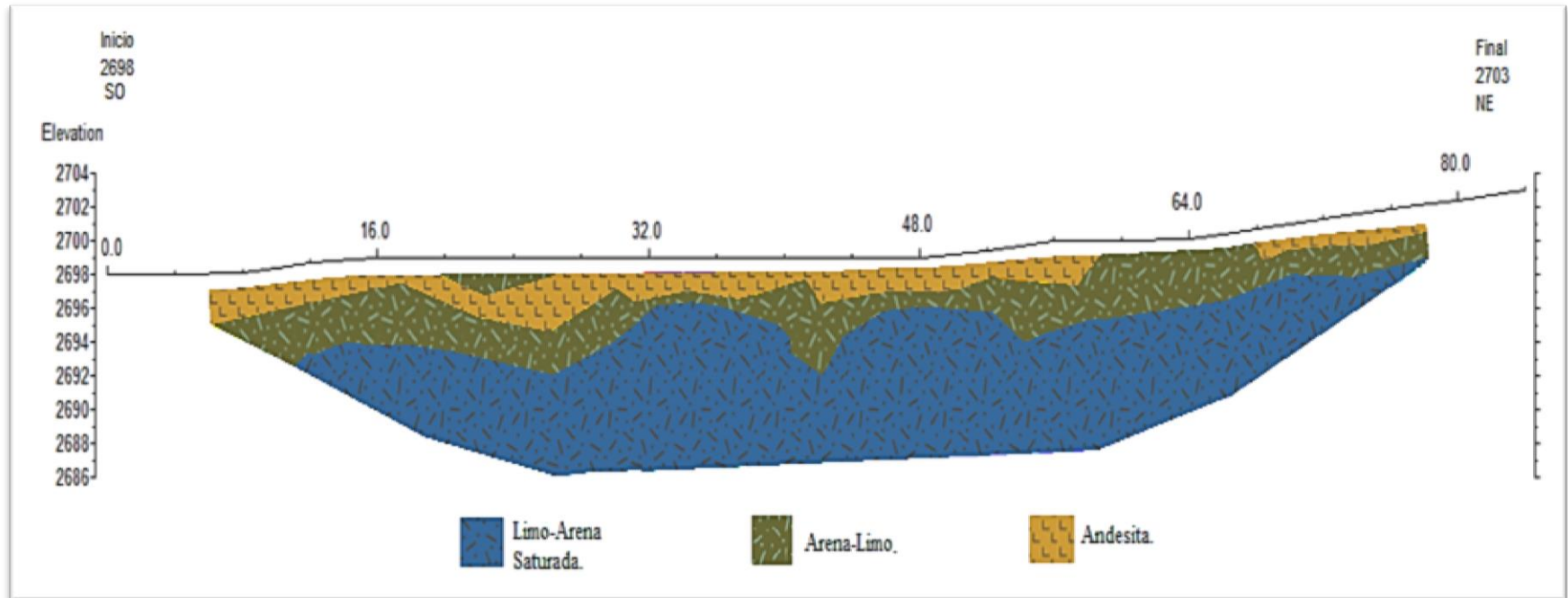


Fig. 24. Perfil III: Sección Geológica

4.3 Modelación 3D, Voxler V.3.

Ya obtenidos los tres perfiles geoelectricos de la zona de estudio se procede a una visualización en tercera dimensión para una mejor interpretación y correlación de los mismos.

Los perfiles derivados del programa Res2dinv (Geotomo Software Inc.) son procesados en Surfer V.12 (Golden Inc.), con la interpolación de los datos de resistividad obtenidos y su posterior manejo en Voxler 3 como campo de magnitudes (*Metodología, 3.4.2 Voxler 3 (Golden Inc.)*). Visualizando todos los perfiles en una sola imagen de estudio, con una imagen satelital de la zona de estudio procesada en el software Global Mapper 12 para su uso dentro de Voxler V.3 (Golden Inc.).

En la imagen obtenida del programa Voxler V.3 (Golden Inc.) (fig. 25, 26) se puede visualizar la correlación que existe entre las tomografías eléctricas resistivas, sobre todo en la parte media de las mismas donde se observan las resistividades altas correspondientes a la estructura de interés, relacionada al color rojo y naranja, interpretado como el material andesítico. Dentro del perfil 1, en su parte media, se visualiza su relación con los 2 perfiles contiguos, ya que en el perfil 1 tiene mayor presencia la estructura de interés. También se puede observar la continuación de la estructura que se encuentra en intemperie del perfil 2 hasta el perfil 3 sobre la parte Noroeste. De igual manera es distinguible cómo el espesor de la estructura andesítica disminuye en los tres perfiles conforme se acercan a la parte Sureste de la zona de estudio. Se puede observar el material arena-limo no saturado, con tonalidades de amarillo a verde, siempre presente en todos los perfiles, envolviendo así a las estructuras de interés y como este ya se hace a una base promedio de 3 m por debajo del suelo. Así mismo se enfatiza el material limo-arena saturado, de tonalidades azules, el cual se puede afirmar que es el material más abundante en las zonas.

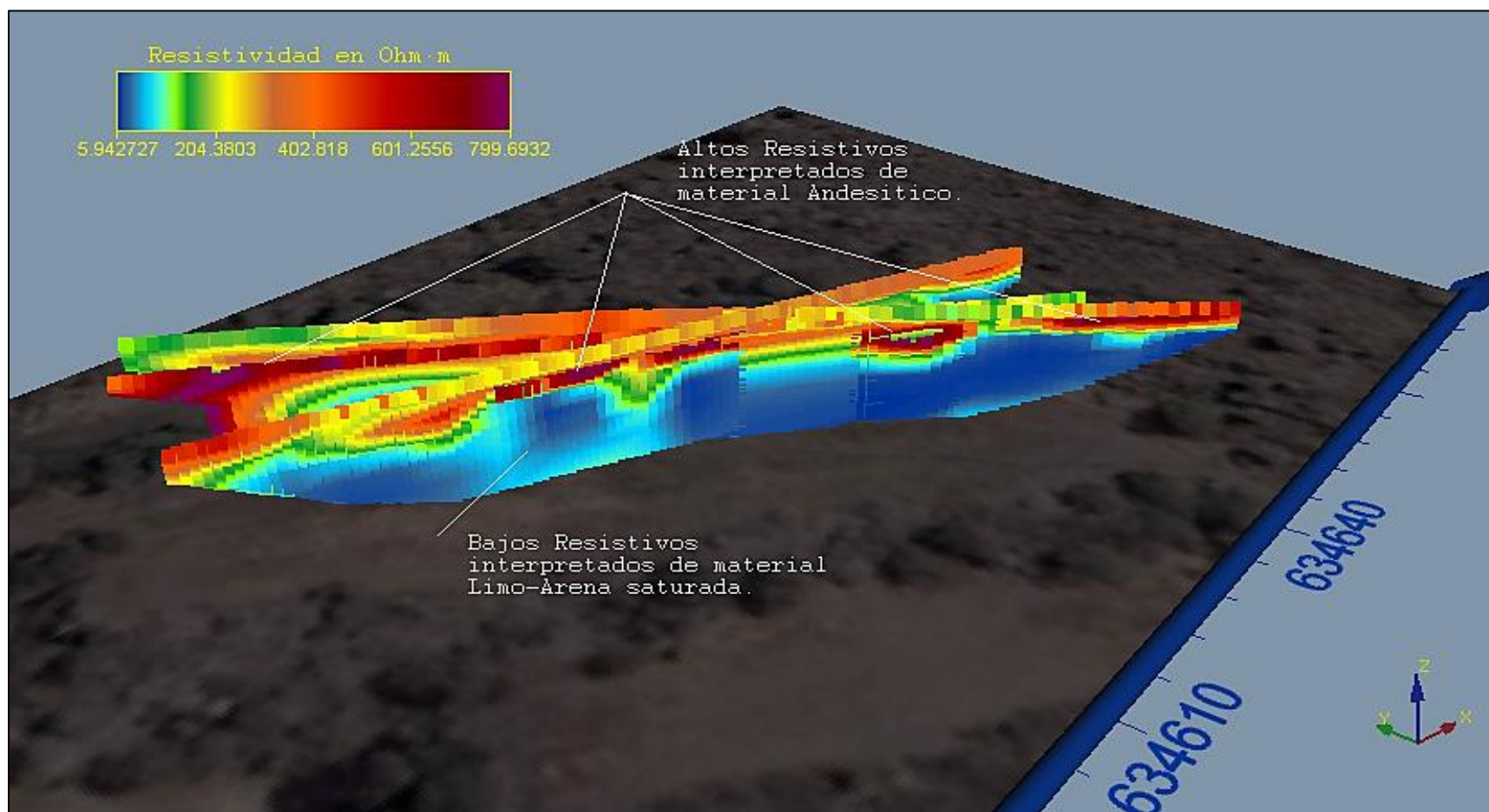


Fig. 25. Modelo Voxler: Conjunto de los tres modelos resistivos, en la zona de estudio. Parte de enfrente, de Sur a Norte.

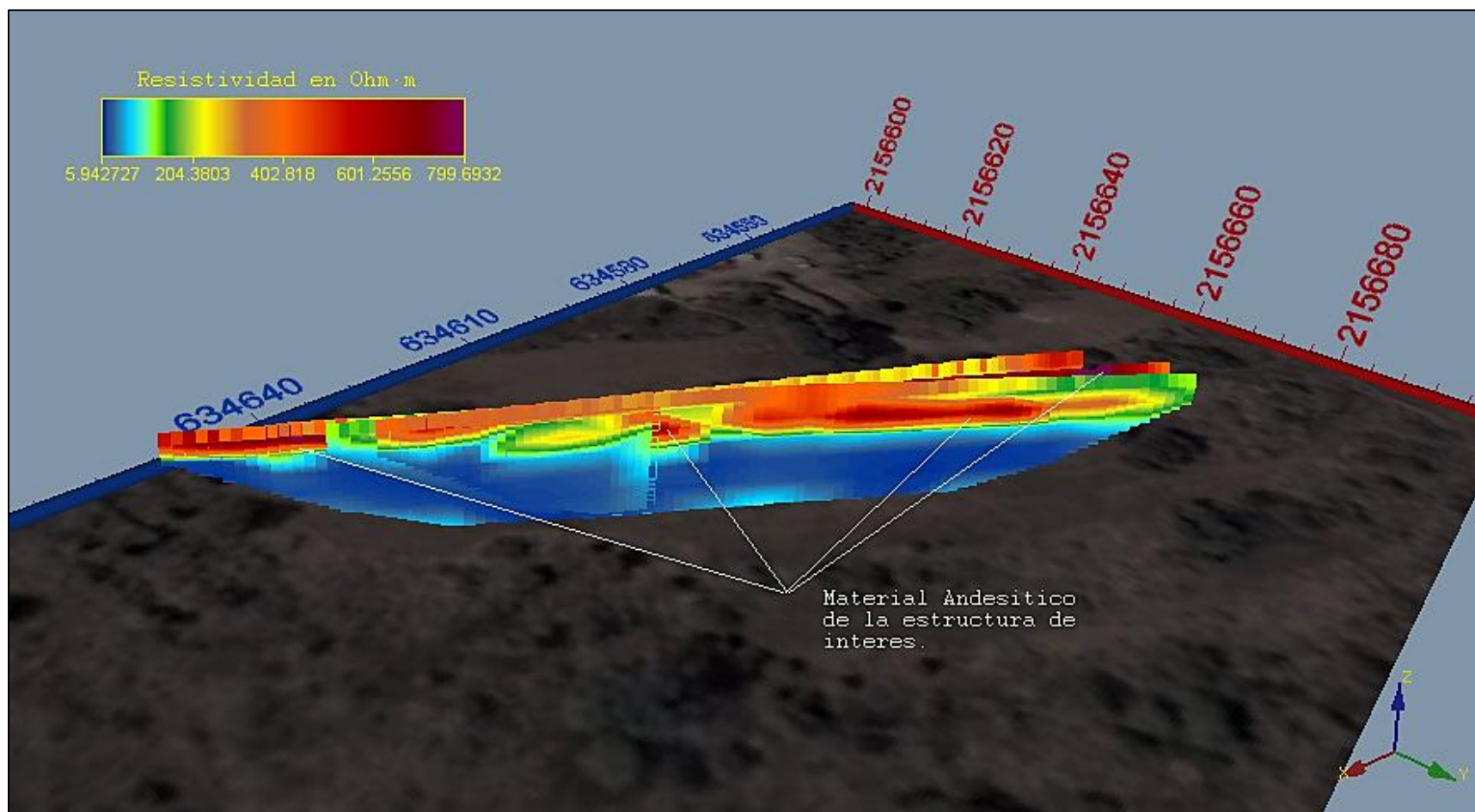


Fig. 26. Modelo Voxler: Conjunto de los tres modelos resistivos, en la zona de estudio. Parte trasera, de Norte a Sur

Conclusiones.

El estudio geoelectrico sobre el que trato este trabajo, en conjunto con un análisis geológico, permitió la localización de fracciones estructurales de interés arqueológico, describiéndolo con datos específicos como la profundidad a las que se hallan, su espesor, extensión y el tipo de material que las componen. Se corroboró la naturaleza litológica del cerro del Encanto, Libres, Puebla; el cual presenta suelos de material aluvial con granulometría limo-arenosa de composición volcánica. Se pudieron visualizar tres tipos de materiales, dentro de la zona de estudio, con diferencias de saturación, granulometría y composición, con rangos resistivos que van de los 5 hasta los 980 *Ohms·m*. Por una parte en las *zonas bajas*, de los 6 hasta los 13 *m* de profundidad en promedio, existen muy bajos resistivos de 5 hasta los 42 *Ohms·m* que evidencian la saturación del suelo limo-arenoso, dentro de las *fracciones someras*, desde la parte cercana a la superficie hasta los 6 *m*, se consideró como una interfaz entre los rangos altos y bajos resistivos, de composición arena-limo no saturado, con resistividades de 43 hasta los 230 *Ohms·m*, después se encuentran las *zonas altas con* fracciones de altos resistivos, que van de los 231 hasta los 980 *Ohms·m*, material presentado como andesita, el cual conforma la estructura de interés.

Los tres perfiles mostraron la estructura andesítica señalada como la “estructura de interés”. Dentro del *perfil número 1* se localizó con un espesor promedio de 3 *m*, separados en tres bloques, que cubren casi en su totalidad la parte superior del perfil, el primero de 35 *m* de largo entre los 10 y 45 *m* de la tomografía, un segundo bloque de 18 *m* de largo entre las longitudes de 46 y 64 *m* y el tercero entre las longitudes de 70 y 86 *m* con un largo de 16 *m* y de 1 *m* de ancho en el final de la tomografía. En el *perfil número 2* se presenta una porción grande de la estructura

sobre la parte izquierda de la tomografía llegando a una profundidad de 7 m, con un largo de 10m entre las longitudes de 6 a 16 m, en la parte derecha un segundo bloque de un ancho promedio de 1 m, con un largo de 18 m entre las longitudes de 16 a los 34 m, y continúa con un tercer bloque de 1 m de ancho y 32 m de extensión, entre las longitudes de 42 y 74 m. En el *perfil número 3* se exhibe a lo largo de casi toda la tomografía la estructura andesítica, en dos bloques, con un ancho promedio de 2.5 m, el primer bloque de un largo de 52 m de los 6 a 58 m en longitud y otro más en la parte derecha en las longitudes de 68 y 78 m con una extensión de 10 m.

En la visualización con el programa Voxler V.3 (Golden Inc.), se logró una correlación entre las tres tomografías eléctricas resistivas obtenidas en el campo, mostrando una tendencia horizontal de la estructura de interés, extendida a lo largo del polígono que forma la zona de estudio. Se pudo observar la profundidad promedio de 3 m del material andesítico, el lugar espacial que la misma estructura ocupa dentro del mapa satelital, la relación entre dos *perfil 2, 3* con el material a la intemperie en la parte Noroeste, y como el espesor del material andesítico disminuye en la parte Sureste de la zona de estudio.

Se logró observar la continuidad de la estructura de interés que se encuentra a la intemperie, la cual está en la parte Noroeste de la zona de estudio; presentándose en el *perfil 2*, donde se distingue que va más allá del modelo tomográfico obtenido ya que supera la profundidad de estudio de 7 m en la parte izquierda. Se puede decir que la estructura mide 10 m a lo largo, más de 7 m de profundidad y que tiene una continuidad horizontal que se ve en los perfiles contiguos. De esta forma se infiere lo grande de la estructura y que solo una porción se encuentra a la vista.

Recomendaciones.

Estudios geoelectricos propuestos en la zona del presente trabajo.

En el proceso de obtener un trabajo de investigación más amplio de la zona estudiada del trabajo expuesto, buscando una medición del volumen total del polígono de investigación sobre la zona de estudio, se recomienda la realización de dos tomografías más (Fig.27, Tabla 3), de una forma paralela, con el arreglo Wenner-Schlumberger, de tal manera que sea viable un cálculo del volumen de la estructura arqueológica aquí descrita, con la ayuda del Software Voxler V.3 (Golden Inc.) y las tres tomografías ya procesadas.



Fig. 27. Tendidos de perfiles geoelectricos propuestos para la estructura principal arqueológica del Cerro del Encanto, Libres, Puebla.

	Arreglo Wenner-Schlumberger				
Perfil	"a" (m)	"n"	Coordenadas iniciales	Coordenadas Finales	Longitud (m)
Ta	4	8	634572 E, 2156676 N	634649 E, 2156624 N	92
Tb	4	8	634568 E, 2156662 N	634635 E, 2156609 N	92

Tabla 3. Especificaciones de los tendidos geoelectricos sugeridos, para la estructura principal arqueológica, en donde se realizó el estudio, Cerro del Encanto, Libres, Puebla.

Ya que el programa Voxler V.3 (Golden Inc.), para el cálculo volumétrico realiza una interpolación de las magnitudes obtenidas en el terreno creando un polígono calculado, de esta forma entre más datos se tengan de la zona de estudio tendrá mayor exactitud el volumen supuesto. La recomendación es sugerida para la comparación de los cálculos realizados, ya que en el presente documento se hizo, como anexo, un cálculo volumétrico del material de interés andesítico, junto con una proyección 3D del volumen total del polígono de la zona de estudio (*Anexos, Modelos Volumétricos*), este representa solo una aproximación preliminar del volumen exacto, sin embargo es de gran ayuda para los estudios posteriores.

Estudios Geoelectricos propuestos en el Cerro del Encanto, Libres, Puebla

Se recomienda realizar 7 Tomografías extras dentro del Cerro del Encanto, Libres, Puebla, con el mismo tipo de arreglo Wenner-Schlumberger, debido a su gran resolución y mediana penetración, que abarca la profundidad de interés (fig.28); se propone para la delimitación de la zona arqueológica y la posible extensión estructural, así como el hallazgo de nuevas estructuras.

También se recomienda realizar un estudio electromagnético con geo-radar, a una frecuencia central de 75 MHz, para una profundidad de investigación entre 13 y 15 m con una buena resolución, en paralelo con las tomografías presentes y futuras; para una mejor descripción de la profundidad de la estructura de estudio y su situación espacial.

Se plantea realizar 6 tomografías (tabla 4) en el perímetro del área de estudio, de manera que formen un polígono como se muestra en la (fig. 28), con objetivo de la correlación con las tomografías ya procesadas en el presente trabajo, delimitación de la estructura y una mejor descripción.

Y una tomografía (tabla 4, G) extra en la ladera contigua de donde se realizó el primer estudio, para determinar si existen estructuras más allá de la zona de interés.

Con coordenadas como se muestra en la (tabla 4), de extensión de 92 m, una separación electródica de 4 m, de 8 niveles y así establecer la misma profundidad teórica presente.

Arreglo Wenner-Schlumberger				
Perfil	"a" (m)	"n"	Coordenada	Longitud (m)
A	4	8	634587 E, 2156469 N	92
B	4	8	634390 E, 2156480 N	92
C	4	8	634482 E, 2156745 N	92
D	4	8	634730 E, 2156689 N	92
E	4	8	634798 E, 2156811 N	92
F	4	8	634097 E, 2156693 N	92
G	4	8	633792 E, 2156774 N	92

Tabla 4. Especificaciones de los tendidos geoelectrónicos sugeridos, para el Cerro del Encanto, Libres, Puebla.

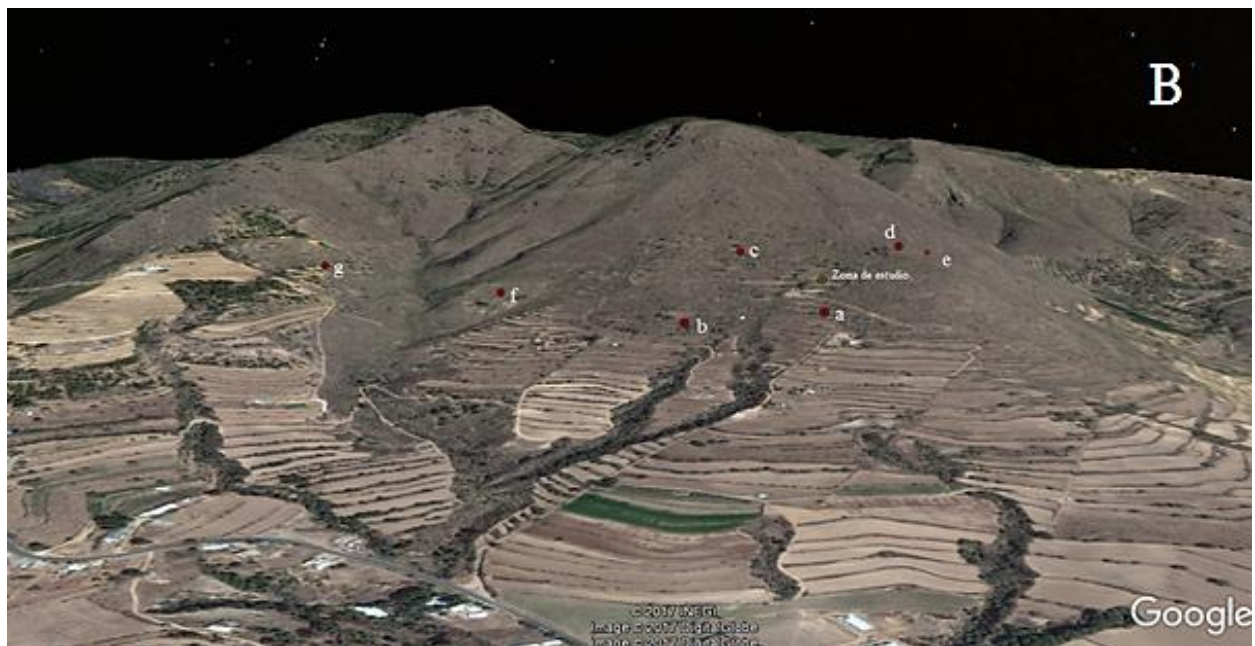
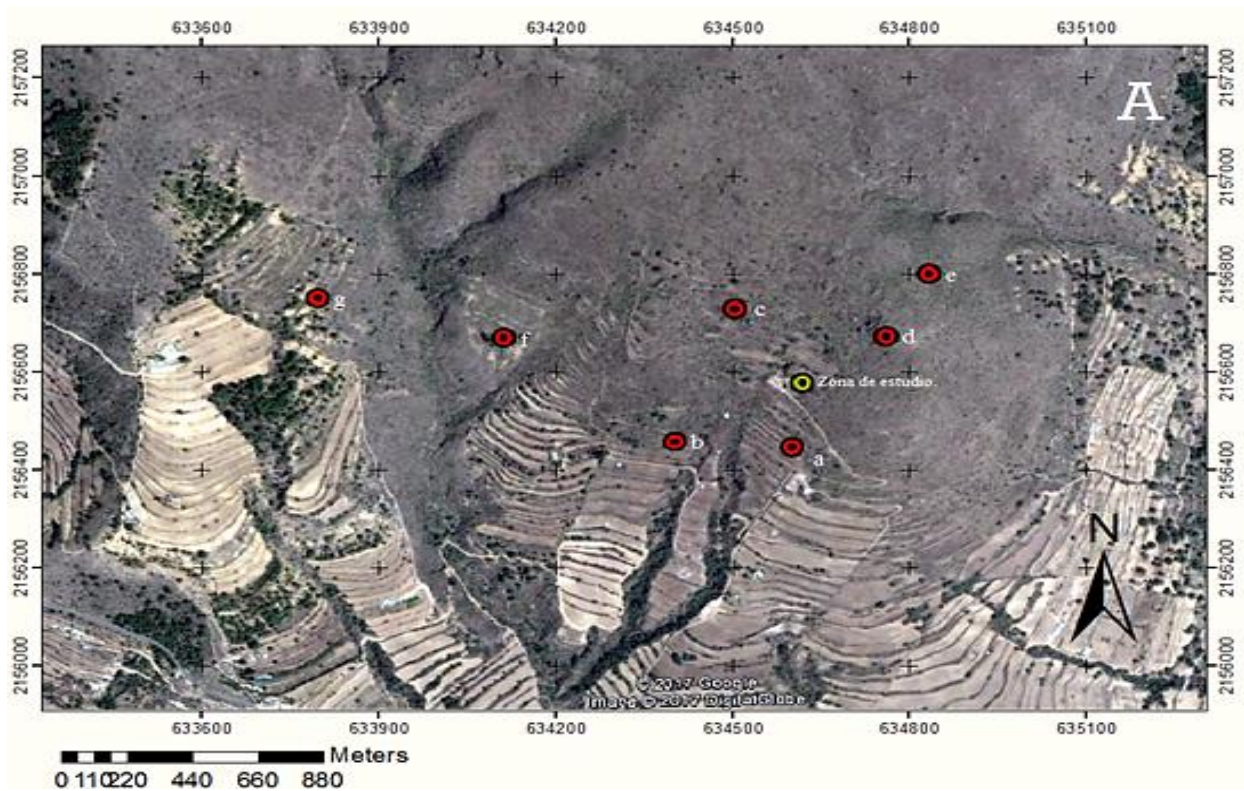


Fig. 28. Sugerencia de tendidos geoelectricos en el Cerro del Encanto, Libres, Puebla. A) Vista satelital vertical, B) Vista satelital horizontal.

Anexos.

Modelos volumétricos Voxler V.3 (Golden Inc.).

Dentro del procesamiento en Voxler V.3 (Golden Inc.) se obtuvo un modelo volumétrico de las magnitudes calculadas en este proyecto, consta de un polígono del volumen total de la misma área de estudio en 3D creado por el software, la continuidad estructural del material de interés, interpretado como andesita y su medición volumétrica total, dentro de los límites del programa.

El programa Voxler V.3 (Golden Inc.) calcula el volumen con respecto a un área rectangular tridimensional abarcando la totalidad del plano en donde se encuentran las tres tomografías obtenidas en este proyecto, con la profundidad ajustada en base a estas y la interpolación de los datos resistivos reales adquiridas. De esta manera el cálculo volumétrico es una aproximación preliminar del volumen real de la estructura trabajada. Se adjunta al proyecto para dar una estimación cuantitativa del volumen general del área de estudio y del material de interés. (Fig. 29, 30)

El modelo Volumétrico abarca un total de $78372.290 m^3$, con coordenadas UTM, 14Q con límites: X (634574.7715 a 634656.5725), Y (2156609.67 a 2156674.66), Z (2686.18398 a 2700.92602) (fig. 29), se puede observar la continuidad de la estructura de interés a lo largo de todo el prisma en su parte superior, con coloraciones que van de los naranjas a los rojos, de un ancho promedio de 3 m a excepción de una fracción en el lado Noreste en donde la estructura de interés abarca una profundidad superior a la prospectada, así mismo se visualiza con tonos de verde a amarillo la intercalación del material areno-limoso entre los altos resistivos y como basamento de matices azules, de bajos resistivos, material limo-arena saturado.

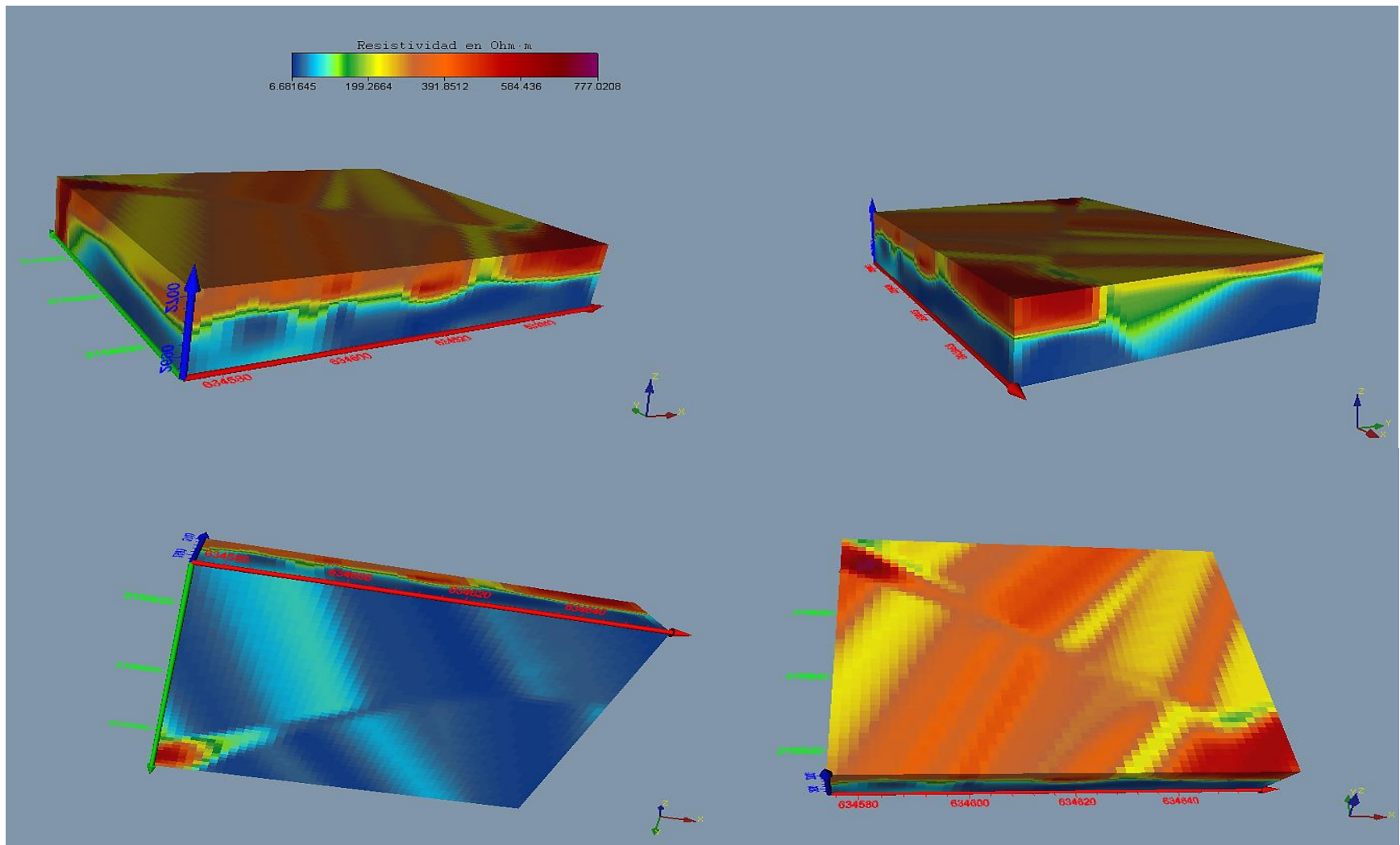


Fig. 29. Modelos volumétricos resistivos de la zona de estudio, calculados con el programa Voxler, en diferentes ángulos.

Los resultados obtenidos del programa Voxler V.3 (Golden Inc.) para el cálculo del volumen estimado del material andesítico, de altos resistivos, entre las resistividades de 231 hasta 980 $\text{Ohms}\cdot\text{m}$., en un total de 78372.290 m^3 , arrojan un total de 22089 m^3 del material de interés, que abarca casi en su totalidad la parte superior del área de estudio (fig. 30).

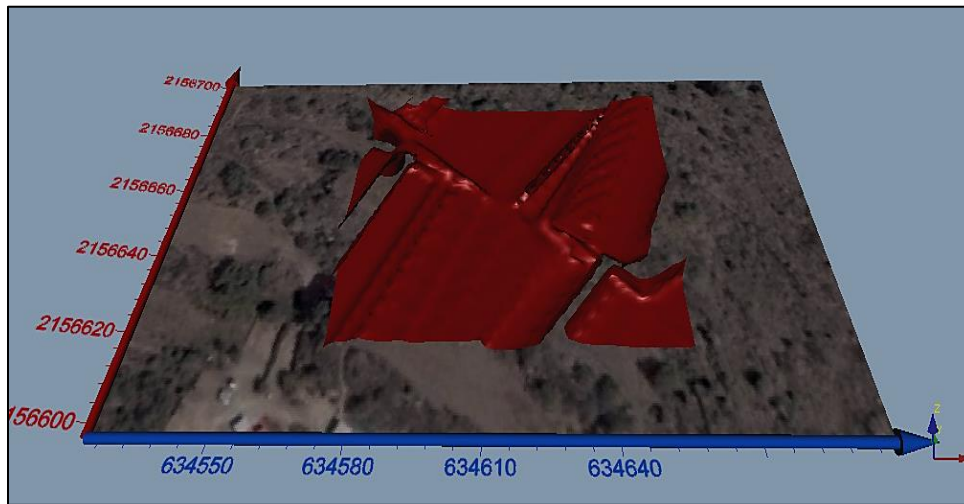
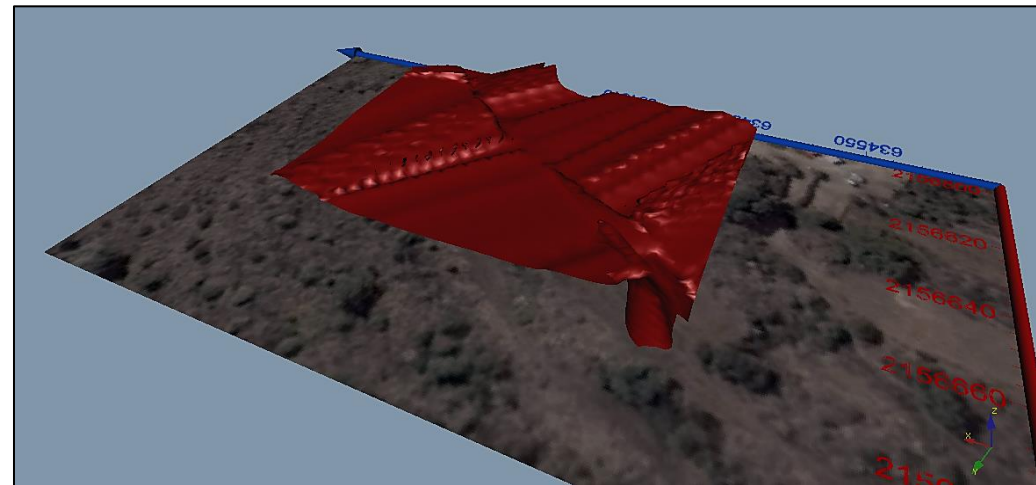


Fig. 30. Modelo volumétrico resistivo de la zona de estudio. Destacando cuerpos con resistividades que van de los 231 $\text{Ohms}\cdot\text{m}$ hasta 980 $\text{Ohms}\cdot\text{m}$



Tablas de resistividades

Las resistividades expuestas en las siguientes tablas, las cuales fueron de ayuda en el presente trabajo, son consecuencia de ensayos en laboratorio en donde se estudia la respuesta eléctrica de distintos materiales al hacer circular una intensidad de corriente a través del material, el cual opondrá una resistencia al paso de la corriente continua y entre sus extremos podrá medirse una diferencia de potencial mediante un circuito eléctrico; sí el conductor es Óhmico, la resistencia eléctrica se podrá determinar mediante la *Ley de Ohm* (Ecu. 1.3). Tablas que son de amplio uso en las prospecciones geoelectricas.

Tabla 5. Valores de resistividad de rocas y sedimentos (W.M. Telford, 1992)

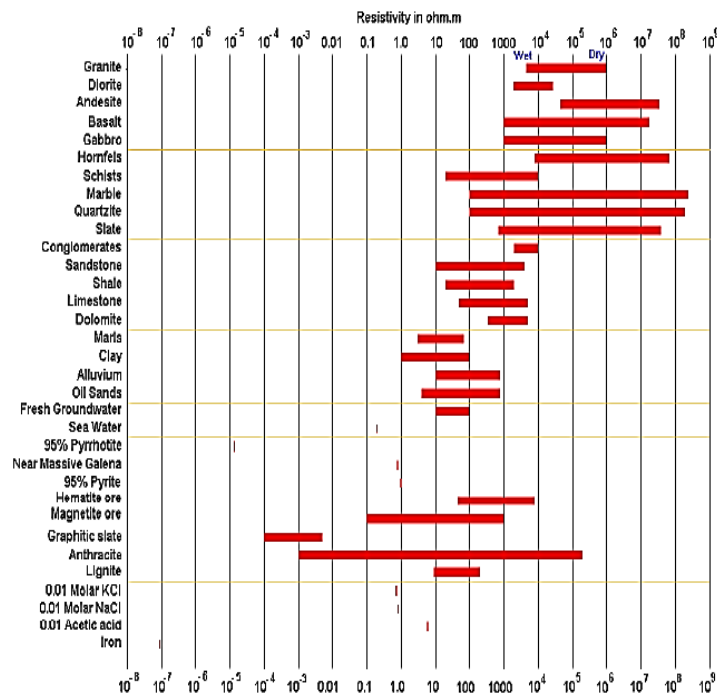


Table 5.3. Resistivities of various rocks and sediments

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	$10 - 5 \times 10^6$ (wet) – 3.3×10^3 (dry)
Carbonatized porphyry	2.5×10^3 (wet) – 6×10^4 (dry)
Quartz diorite	$2 \times 10^4 - 2 \times 10^6$ (wet) – 1.8×10^2 (dry)
Porphyry (various)	$60 - 10^4$
Dacite	2×10^4 (wet)
Andesite	4.5×10^4 (wet) – 1.7×10^2 (dry)
Diabase (various)	$20 - 5 \times 10^3$
Lavas	$10^2 - 5 \times 10^4$
Gabbro	$10^3 - 10^6$
Basalt	$10 - 1.3 \times 10^7$ (dry)
Olivine norite	$10^3 - 6 \times 10^1$ (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) – 10^3 (dry)
Graphite schist	$10 - 10^2$
Slates (various)	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$
Gneiss (various)	6.8×10^4 (wet) – 3×10^6 (dry)
Marble	$10^2 - 2.5 \times 10^8$ (dry)
Skarn	2.5×10^2 (wet) – 2.5×10^8 (dry)
Quartzites (various)	$10 - 2 \times 10^8$
Consolidated shales	$20 - 2 \times 10^3$
Argillites	$10 - 8 \times 10^2$
Conglomerates	$2 \times 10^3 - 10^4$
Sandstones	$1 - 6.4 \times 10^8$
Limestones	$50 - 10^7$
Dolomite	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
Unconsolidated wet clay	20
Marls	3 – 70
Clays	1 – 100
Oil sands	4 – 800

Tabla 6. Resistividad de las rocas y minerales (M.H.Loke (1996-2001)

Bibliografía.

- Alimonti Leandro, 2015, Aplicación de tomografía eléctrica 3D para la evaluación de la Intrusión salina en la zona de playa de San Clemente del Tuyú, Tesis de grado, Universidad Nacional de La Plata Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas.
- Álvarez Barrientos Eunice, 2015, Tomografía Eléctrica Resistiva 3D en la caracterización del subsuelo bajo estructuras civiles, Tesis Licenciatura, México, UNAM.
- Carre Jean, 1974, Lectura de las fotografías aéreas, Madrid, Paraninfo.
- Compton R. Robert, 1962, Geología de campo, México D.F., Pax.
- C. R. Nave, 2010, Hyperphysics, Department of Physics and Astronomy, Georgia State University.
- Clark F. Kenneth, G.A. Salas-Piza, R.C. Estrada, 2009, Geología Económica de México, México, SGM.
- Biosca V. Bárbara, 2011, Optimización de los procesos de medida e interpretación de la tomografía geoelectrica en la prospección superficial, Tesis Doctoral, Madrid, E. T. S. ingenieros en minas Madrid.
- Dawes L. Chester, 1994, Tratado de electricidad, Corriente alterna, México, GG.
- Emons H. William, I.S. Allison, C.R. Stauffer, G.A. Thiel, Mc. Graw-Hill, 1965, Geología: Principios y Procesos, New York.
- INEGI, 1986, Síntesis geográfica de Tlaxcala, PDF.
- INEGI, 2000, Síntesis geográfica del estado de Puebla, PDF.
- Iriaerte S. Lizbeth, 2011, Imágenes 3d de tomografía eléctrica en la zona arqueológica de Pahñú, en el estado de Hidalgo, Tesis Licenciatura, UNAM.
- I.U. V. Iakubovskii, L.L. Liajov, 1980, Exploración eléctrica, Moscú, Nedra.
- Loper E. Orla, 1959, Fundamentos de corriente continua, México, Dina.

- López Ramos E., 1993, Geología General y de México, México, Trillas.
- Loeches Martín, T. Teixidó, 2009, Prospección eléctrica de corriente continua, Dpto. de Geología de Universidad de Alcalá de Henares, Miguel.
- Márquez V. Ramón M., 2011, Determinación de espesores de arena feldespáticas por medio del método de sondeo eléctrico vertical en Atexca Zacatlán Puebla, Tesis licenciatura, BUAP.
- Milsom John, 1939, Field Geophysics, the geological field guide series, London, Third.
- M. H. Loke, 1996, Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys, Copyright.
- Orellana E., 1982, Prospección geoelectrica de corriente continua, Madrid, Paraninfo S.A.
- Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Libres, Puebla, Clave geoestadística 21094, 2009.
- Quintana Berlanga Álvaro R., 2013, Aplicación de la Tomografía eléctrica en la caracterización del deslizamiento de Doña Mencía, Tesis Máster, Universidad de Granada.
- Rodríguez Hernández Nahema, 2015, Determinación de zonas potencialmente almacenadoras de agua a partir de sondeos eléctricos verticales en la localidad de José María Morelos, Municipio de Cupixtla, Tlaxcala, Puebla, Tesis licenciatura, BUAP.
- Tarbuck J. Edward, K. Lutgens Frederick, 2005, Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física, Copyright España, Pearson.
- Taussing Scott William, 1962, La física de la electricidad y el magnetismo, New York, Continental.
- Telford W. M., Geldar L., Sheriff R., 1992, Applied Geophysics, Inglaterra, Cambridge University Press.
- Universidad Autónoma de México, 1978, Instituto de geología, Revista. Vol. 2, núm.2.
- Vargas Huitzil Eliana, 2015, Tomografía eléctrica aplicada a caracterizar la cantera La Joya ubicada en el municipio de Ixtacuixtla, Tlaxcala, Puebla, Tesis licenciatura, BUAP.

Páginas web.

·Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2017, Repositorio institucional, Puebla.

Recuperado de: <http://benem-mt.iii.com/iii/cpro/>

·Google Earth, 2017, Imágenes satelitales, USA, Recuperados de:

<https://www.google.com.mx/intl/es/earth/>

·Google Maps, 2017, Mapas e imágenes, USA. Recuperados de:

<https://www.google.com.mx/maps>

·Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009, Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Libres, Puebla. Recuperado de:

http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21094.pdf

·Instituto Nacional de Antropología e Historia, 2011, Especialistas del INAH localizan posible túnel bajo la plaza y pirámide de la Luna en Teotihuacán, México. Recuperado de:

<https://www.inah.gob.mx/>

·Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, México, Recuperado de:

<http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21094a.html>

·Servicio Geológico Mexicano, 1999, Carta geológica minera Veracruz E14-3 1:250,000.

México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/sgm>

·Universidad Nacional Autónoma de México, 2016, Descubren subestructura en la pirámide de

Kukulcán, México. Recuperado de: [http://www.gaceta.unam.mx/20161117/descubren-](http://www.gaceta.unam.mx/20161117/descubren-subestructura-en-la-piramide-de-kukulcan/)

[subestructura-en-la-piramide-de-kukulcan/](http://www.gaceta.unam.mx/20161117/descubren-subestructura-en-la-piramide-de-kukulcan/)