



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INFORME

**ESTUDIO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDAD
ELECTROMAGNÉTICA PARA DEFINIR LAS
CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS
DEL ACUÍFERO APAN EN UN PREDIO
DELIMITADO**

TRABAJO PROFESIONAL

PARA PRESENTAR TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA:

EDGAR ALONSO HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE PROYECTO: DR. ANDRÉS TEJERO ANDRADE



2016



ÍNDICE

1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	4
2. DESCRIPCIÓN DEL PUESTO DE TRABAJO	5
3. PARTICIPACIÓN DEL TRABAJADOR EN LA EMPRESA	7
4. ESTUDIO GEOFÍSICO PARA DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS DEL ACUÍFERO APAN EN UN PREDIO DELIMITADO	8
4.1 INTRODUCCIÓN	8
4.2 LOCALIZACIÓN	9
4.3 MARCO FÍSICO	11
4.3.1 ACUÍFERO APAN	11
4.3.2 FISIOGRAFÍA	12
4.3.3 GEOMORFOLOGÍA	13
4.3.4 ESTRATIGRAFÍA	14
4.3.5 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	16
4.3.6 HIDROGRAFÍA	17
4.3.7 CLIMA	18
4.4 MARCO TEÓRICO: TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (TDEM)	19
4.4.1 PRINCIPIOS GENERALES DEL MÉTODO TEM	19
4.4.2 CONFIGURACIONES PARA TEM	21
4.4.3 TAMAÑO DE LA BOBINA	23
4.4.4 FUENTES DE AFECTACIÓN AL MÉTODO TEM	23
4.4.5 FACTORES QUE AFECTAN LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	25
4.5 PLANEACIÓN DEL ESTUDIO	26
4.5.1 ADQUISICIÓN DE DATOS	26
4.5.2 EQUIPO	27
4.6 PROCESAMIENTO DE DATOS	28
4.6.1 MODELOS SUAVIZADOS	29
4.6.2 MODELO UNIDIMENSIONAL	30



4.7	RESULTADOS	32
4.7.1	CLASIFICACIÓN GEOELÉCTRICA	32
4.7.2	PERFILES GEOELÉCTRICOS	34
4.8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
BIBLIOGRAFÍA		44
SOFTWARE		44
APÉNDICE A		45
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO		
ECUACIONES DE MAXWELL		45
ECUACIÓN DE ONDA		46
CONDICIONES DE FRONTERA		48
SOLUCIÓN A LA ECUACIÓN DE ONDA		49
RESPUESTA TRANSITORIA		50
CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD APARENTE		52
ANEXO DE CURVAS DE RESISTIVIDAD		54



RESUMEN

Este trabajo profesional muestra los resultados de un proyecto que tiene como finalidad la ubicación de un sitio, con las características ideales para la perforación de un pozo exploratorio, del que pueda extraerse agua subterránea para el abastecimiento de un parque industrial.

El propósito de exponer los trabajos de exploración, análisis y procesamiento de datos geofísicos es demostrar que los conocimientos adquiridos durante la carrera, en conjunto con los desarrollados en la etapa laboral, han complementado mi formación profesional y soy capaz de realizar y defender con lógica los proyectos que se me presenten actualmente.

Para esta finalidad se ocupó el método geofísico de Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TDEM) desarrollándose en 2 etapas principales: la adquisición de datos en campo y el procesamiento de datos en gabinete. Para la adquisición de datos en campo se hizo un estudio previo de las condiciones del sitio, planeación de la ubicación de sondeos, levantamiento de datos y análisis de la calidad de los mismos in situ. La etapa de gabinete consistió en el análisis detallado de los datos adquiridos, procesamiento, preparación de imágenes y mapas, correlación geológica, interpretación de resultados y recomendaciones pertinentes.

Se realizaron un total de 15 sondeos TEM con un loop de 300x300 m, que están localizados en las cercanías de la ciudad de Apan en el Estado de Hidalgo, sobre un depósito de aluvión, al que le subyacen rocas volcánicas del terciario. Se alcanzó una profundidad de investigación de 600 m, dentro de los que se definieron 3 unidades geoelectricas principales, de las cuales, las subunidades U2a y U3a presentan características georresistivas atractivas para la saturación por líquido subterráneo.

A partir de los 15 sondeos realizados se trazaron 7 perfiles geoelectricos, que permiten visualizar claramente la distribución de los estratos resistivos; del análisis de estos perfiles se tiene que los espesores más grandes de la subunidad U2a se encuentran en la zona Noroeste y el sondeo PI-02 es adecuado para la perforación de un pozo exploratorio, el cual deberá alcanzar una profundidad de 500 m para asegurar que quede emplazado dentro del acuífero.



1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

GEOTEM INGENIERÍA S.A. DE C.V. EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

Geotem Ingeniería es una empresa mexicana dedicada a la exploración del subsuelo mediante métodos geofísicos. A través de sus 10 años de existencia ha logrado ser innovadora, brindando servicios especializados de alta calidad y de última generación en áreas multidisciplinarias, entre las que destacan: el mapeo de aguas subterráneas, exploración minera, medio ambiente y sustentabilidad, evaluación de riesgos geológicos, exploración petrolera, geotermia y arqueología.

MISIÓN

Ser reconocida como una empresa líder en exploración geofísica, con altos estándares de calidad e innovación constante, para generar resultados que contribuyen con el progreso y mejora de la calidad de vida.

VISIÓN

Ofrecer servicios de exploración confiables y representativos del subsuelo mediante la excelencia operativa, capacitación constante y vanguardia tecnológica, permitiendo satisfacer eficazmente las necesidades de nuestros clientes.



2. DESCRIPCIÓN DEL PUESTO DE TRABAJO

De acuerdo al organigrama de la empresa, el puesto que ocupé fue el de ingeniero de campo, dentro del departamento de exploración, el cual se encarga principalmente de programar y atender los trabajos de campo solicitados por los diversos clientes. Dentro de las diversas labores que realicé están la adquisición de datos en campo para técnicas como Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TDEM), Perfilaje Electromagnético (PE), método Magnetotelúrico y sus variantes en frecuencia y fuente (MT, AMT, CSAMT), Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), Tendidos Sísmicos y sus variantes (TRS, MASW, SPAK). El control de calidad de datos durante la adquisición es indispensable, por lo que me encuentro capacitado para procesar de forma rápida y confiable la información obtenida, para así poder definir el rumbo de los proyectos en tiempo real.

De igual forma me encargo de analizar y procesar los datos obtenidos con mayor detalle, para posteriormente obtener las imágenes y resultados correspondientes, las cuales se integran a un reporte final, que incluye un análisis de los resultados, interpretación, conclusiones y recomendaciones pertinentes.

El proceso y análisis de los datos geofísicos requiere de un manejo de softwares especializados, así como paqueterías básicas de editores de texto e imágenes, por lo que durante mi estancia en la empresa desarrollé habilidades para el manejo de múltiples programas.

Como parte de la realización de trabajos de exploración geofísica, se encuentran pequeños detalles que en conjunto logran llevar al éxito a un proyecto; por ejemplo la segura transportación de equipos, el cuidado pertinente para cada uno de ellos, las medidas de seguridad apropiadas para las diferentes zonas o instalaciones donde se realiza la exploración, el uso adecuado de recursos materiales y económicos, y sobre todo la atención al cliente.



El objetivo de mi puesto como Ingeniero de Campo es integrar esos detalles con los conocimientos adquiridos durante la carrera profesional, para desarrollar habilidades que al ser aplicadas correctamente nos ayuden a obtener los resultados correctos y satisfacer las necesidades del cliente.

Los retos actuales que tengo como futuro Ingeniero Geofísico son ampliar mis conocimientos en el manejo de software especializado, incrementar mi habilidad para resolver problemas, aprender nuevas técnicas de prospección geofísica y profundizar aún más en las técnicas ya dominadas, así como mantenerme actualizado en las nuevas tendencias tecnológicas.



3. PARTICIPACIÓN DEL TRABAJADOR EN LA EMPRESA

Durante mi estancia en GEOTEM INGENIERÍA, me dediqué principalmente a la adquisición de datos, procesamiento y entrega de resultados para proyectos relacionados con la caracterización geohidrológica.

El método de Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TDEM) ha sido utilizado con gran demanda para la exploración de acuíferos profundos en gran parte del país, ya que permite obtener resultados con una buena resolución vertical, es fácil de aplicar en campo, rápido y requiere de poca infraestructura.

En el presente trabajo se muestran los resultados de un proyecto solicitado a GEOTEM INGENIERÍA en el año 2014, que tiene por objetivo definir las características georresistivas de un predio ubicado en el municipio de Apan, en el estado de Hidalgo, para posteriormente delimitar las zonas más atractivas para la extracción de agua y proponer los sitios exactos para la realización de pozos exploratorios, así como la profundidad adecuada para obtener los gastos requeridos.



4. ESTUDIO GEOFÍSICO PARA DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS DEL ACUÍFERO APAN EN UN PREDIO DELIMITADO

4.1 INTRODUCCIÓN

Debido al actual crecimiento poblacional, el desarrollo urbano, la producción agrícola y los incesantes cambios climáticos, los cuales son factores que incrementan el consumo de agua potable y provocan su escasez, se ha tenido la necesidad de buscar nuevos y más grandes abastecimientos de agua para consumo humano y para uso de industrias. Esto ha conllevado a desarrollar técnicas de exploración que nos permitan obtener información del subsuelo, que nos ayude a comprender la distribución espacial de sus estratos y las características físicas que se puedan asociar a la presencia de agua subterránea. En la zona de estudio se contempla realizar la construcción de un Parque Industrial que albergará grandes empresas, que a su vez contribuirán con el desarrollo económico de la zona. Uno de los requisitos previos a la construcción de dicho Parque Industrial es asegurar el abastecimiento de agua para los fines que convengan a las empresas que poblaran la zona.

Por esas razones se encargó a GEOTEM INGENIERÍA la realización de un estudio exploratorio con la técnica de Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo con el objetivo de definir las características geohidrológicas del acuífero Apan y establecer zonas de interés para la perforación de pozos exploratorios.

Mi formación universitaria basada en Ciencias de la Tierra, específicamente en el ramo de la Geofísica me permitió participar en este proyecto en las etapas de adquisición de datos, procesamiento de los mismos, análisis e interpretación de los resultados y por último la entrega de un reporte final para el cliente. A



continuación se detallan los procesos que se llevaron a cabo para obtener un producto final donde se resuelven los problemas del interesado.

4.2 LOCALIZACIÓN

El primer paso, antes de comenzar con la planificación del estudio fue localizar el área de estudio, la cual se encuentra en el estado de Hidalgo, 67 km al noreste de la Ciudad de México y 50 Km al sureste de Pachuca. Los sondeos se encuentran distribuidos en una zona de aproximadamente 10 km². Se tienen un total de 15 sondeos, de los cuales 13 se encuentran en el municipio de Apan y 2 en el municipio Emiliano Zapata.

El traslado a la zona se realizó desde la Ciudad de México por la carretera 136 que en su primer tramo corre del Distrito Federal a la ciudad de Texcoco de Mora, continua hasta Calpulalpan y a partir de ahí se toman carreteras locales para arribar al sitio.



ESTUDIO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDAD ELECTROMAGNÉTICA PARA DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS DEL ACUÍFERO APAN EN UN PREDIO DELIMITADO

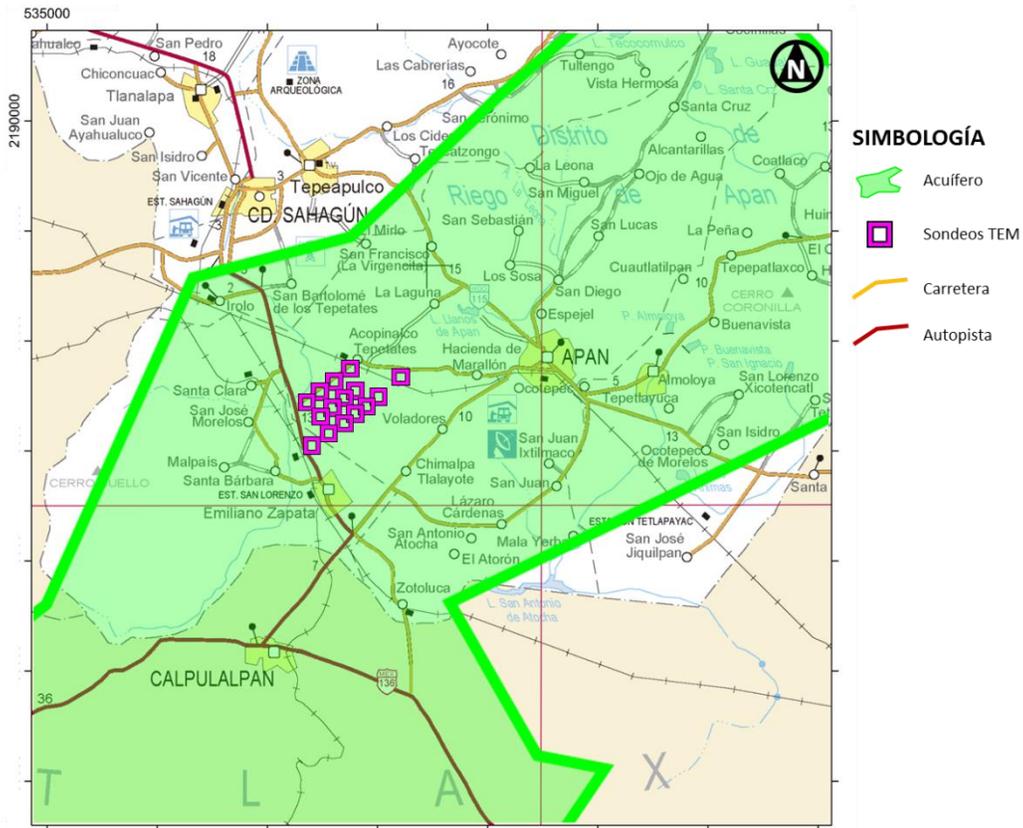


FIGURA 1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO EN MAPA DE ACCESOS

La altura a la que se encuentran los sondeos en relación con el nivel del mar es de entre 2470 y 2490 m, la cual desciende hacia el Noreste.

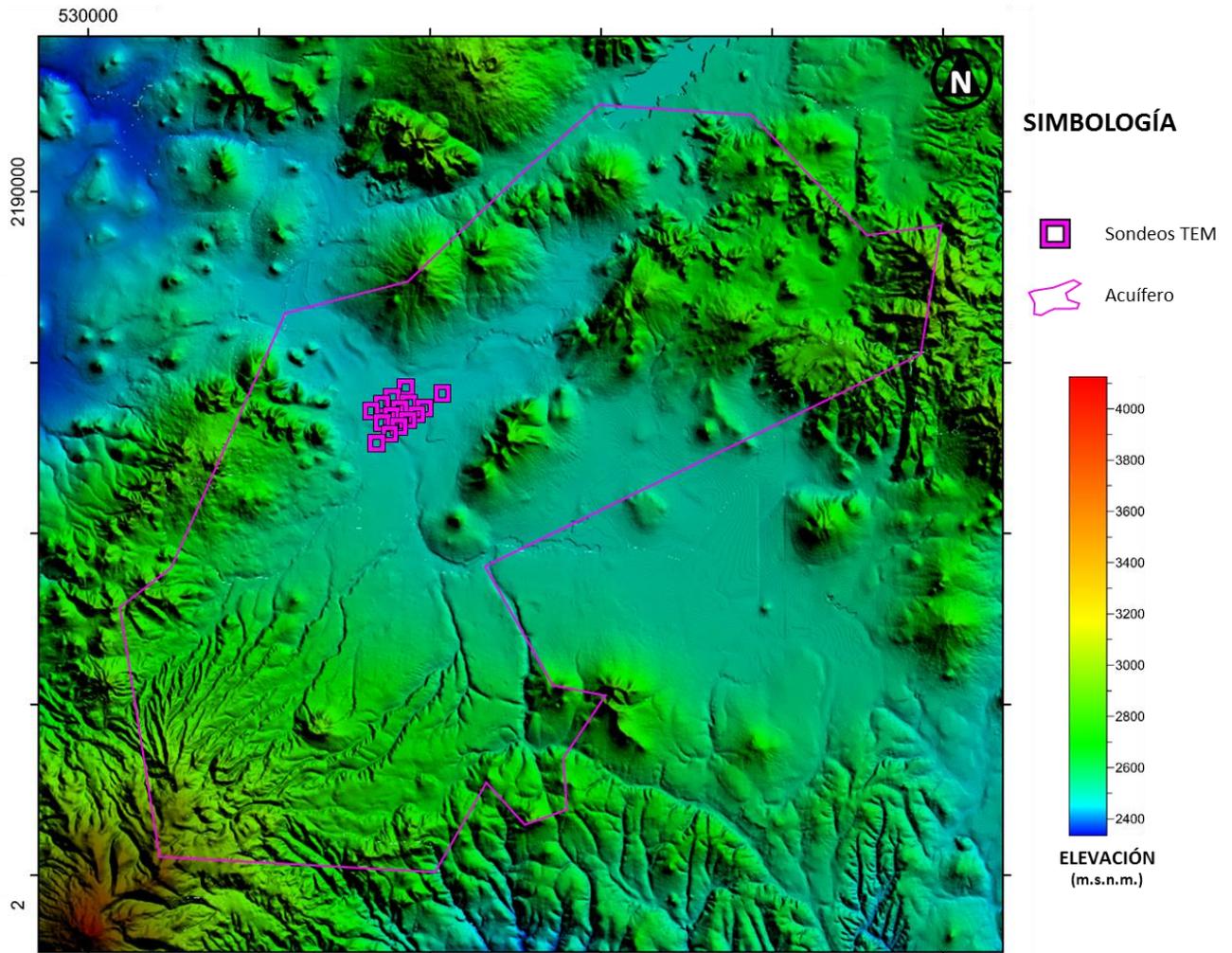


FIGURA 2. LOCALIZACIÓN DE SONDEOS EN MAPA DIGITAL DE ELEVACIONES

4.3 MARCO FÍSICO

4.3.1 ACUÍFERO APAN

El Acuífero Apan cuenta con un área de 1,518 km² aproximadamente, pertenece a la Cuenca del Valle de México que a su vez corresponde a la Región Hidrológica XIII y a la subcuenca Apan-Tochac. Se trata de un acuífero semiconfinado subexplotado y su condición administrativa es de veda intermedia.

El acuífero Apan involucra varios municipios, por parte del estado de Hidalgo se encuentra bajo los municipios Apan, Almoloya, Tepeapulco y Emiliano Zapata, mientras que del estado de Tlaxcala se ven involucrados los municipios de Españita, Calpulalpan, Hueyotlipan, Sanctorum de Lázaro Cárdenas, Nanacamilpa de Mariano Arista y Tlaxco.

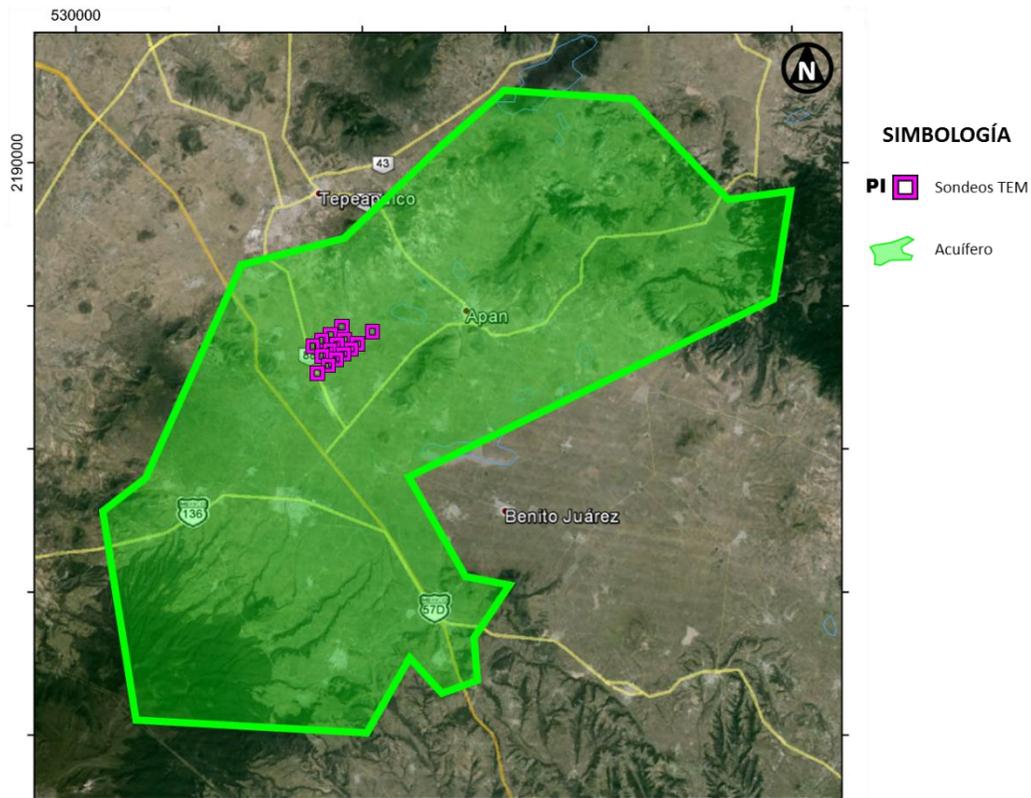


FIGURA 3. MAPA DE LA ZONA DE ESTUDIO CON PROYECCIÓN DEL ACUÍFERO APAN

4.3.2 FISIOGRAFÍA

4.3.2.1 Provincia Fisiográfica

La cuenca del Valle de México se ubica en la provincia fisiográfica denominada "Eje Neovolcánico Transmexicano" que cruza al Territorio Nacional del Golfo al Pacífico; se divide en tres zonas principales: Zona Meridional, Zona Septentrional y Zona Nororiental. La Zona Septentrional es la continuación de la planicie



meridional, por el norte se extiende hasta la sierra de Pachuca; hacia el oeste y noroeste llega a las Sierras de Monte Alto y Tepozán; hacia el este alcanza Apan y Tochac. Litológicamente está constituida por rocas volcánicas, principalmente coladas de lava y materiales piroclásticos que han sido depositados en ambientes lacustres hasta fechas recientes.

El área en general del acuífero Apan corresponde a una planicie aluvial en donde se encuentran arcillas de alta plasticidad y dispersamente arcillas cementadas. Existen también aparatos volcánicos compuestos por lavas, brechas y cenizas cuya composición litológica va desde rocas basálticas a riolíticas con edades que varían desde el Plioceno Tardío hasta el reciente, lo que ha originado alteración por intemperismo en las rocas superficiales. Se tienen llanuras y cuencas formadas por rellenos aluviales o lacustres que contienen gran variedad de rocas mezcladas con cenizas volcánicas.

4.3.3 GEOMORFOLOGÍA

4.3.3.1 Relieve Terrestre

La cuenca del Valle de México está cerrada por una cadena de montañas y no cuenta con una salida natural, mientras que la cuenca anexa del Río Tula es menos abrupta que la del Valle de México y descarga sus aguas al Río Moctezuma.

En promedio la planicie de la Cuenca del Valle de México se encuentra a 2,250 msnm, sin embargo tiene puntos naturales sobresalientes como el Cerro El Manantial al Norte, con 3,190 msnm y el Cerro San Antonio con 2,570 msnm, al este las Sierras Chichucatlán y del Tepozán que se derivan de la Sierra Madre



Oriental en la que destacan los cerros Agua Azul con 3,020 msnm; y la Perla con 3,200 msnm; Las Tetillas 3,020 msnm y la Peñuela con 3,350 msnm.

Al sureste La Sierra Nevada donde sobresalen en su porción septentrional los cerros El Mirador y El Telapón que sobrepasan los 4,000 msnm y en la meridional El Iztaccíhuatl a 5,220 msnm y el Popocatepetl de 5,500 msnm. Al Sur La Sierra Chichinautzin con el pico del Águila a 3,952 msnm en el Ajusco, al Suroeste, las sierras de las Cruces con elevaciones superiores a los 3,500 msnm; al Oeste las Sierras de Monte Alto y Monte Bajo y de la Catedral con elevaciones de más de 3,500 m y al Noroeste la Sierra de Zimapán con alturas mayores a los 3,000 msnm.

La presencia de estas formaciones orográficas ha evitado en gran medida la erosión de las tierras cultivadas con azolve de cauces naturales y con otras formas de deterioro de las riquezas.

En el caso del acuífero Apan se observa una tendencia de recarga natural en las zonas de lagunas ya que los gradientes disminuyen, razón por la cual posiblemente dichas lagunas constituyan zonas de recarga.

4.3.4 ESTRATIGRAFÍA

A continuación se tiene una descripción litológica general de las unidades geológicas más antiguas a las más jóvenes, primeramente las sedimentarias y posteriormente las ígneas.

Se tienen afloramientos de rocas del Cretácico, rocas calizas correspondientes a unidades sedimentarias de origen marino. Del Terciario Inferior se tienen conglomerados constituidos por clastos de caliza y pedernal mal seleccionados.



Del Terciario Superior se tienen lutitas, limolita arenisca, conglomerados con clastos de andesita.

Del Cuaternario se tiene un depósito clástico continental, compuesto por un conglomerado brechoide poco compactado y descansa de manera discordante sobre rocas ígneas del Terciario presentándose en forma de abanico aluvial. Corresponden a esta época los suelos aluviales que son depósitos clásticos no consolidados con gravas, arenas, limos y arcillas provenientes de las rocas preexistentes constituidas en forma de abanicos y planicies.

Las rocas ígneas del terciario superior, tales como andesitas, presentan pseudo estratificación y se intemperizan en forma de lajas presentándose morfológicamente como aparatos volcánicos de elevación, lomas y cerros bajos.

También se encuentra andesita y brecha volcánica intermedia, unidades formadas por derrames andesíticos compactos alternados con productos piroclásticos compuestos por brechas, cenizas y lapilli.

La brecha volcánica intermedia está constituida por fragmentos que varían desde lapilli hasta bloques inmersos en una matriz tobacea, su morfología es de lomeríos poco disectados. La Riodacita es una unidad constituida con fenocristales de plagioclasa sódica y se presenta en forma masiva y en algunos sitios se encuentra caolinizada. La unidad de Basalto está constituida por coladas basálticas de olivinos, piroxenos y andesitas.

Las Tobas Intermedias son una unidad ígnea piroclástica constituida por tobas de ceniza y lapilli de composición intermedia, dispuestas en pseudo estratos medianos y gruesos poco consolidados. Del Cuaternario existe Basalto que es una unidad constituida por derrames vesiculares y bloques de basalto olivino,

generalmente poco intemperizados, morfológicamente se presentan en forma de mesetas pequeñas y cerros bajos.

La Toba básica se trata de una unidad piroclástica de composición básica, constituida por pseudo estratos delzables y compactos de ceniza volcánica y lapilli, se presenta en forma de planicies o como conos cineríticos.

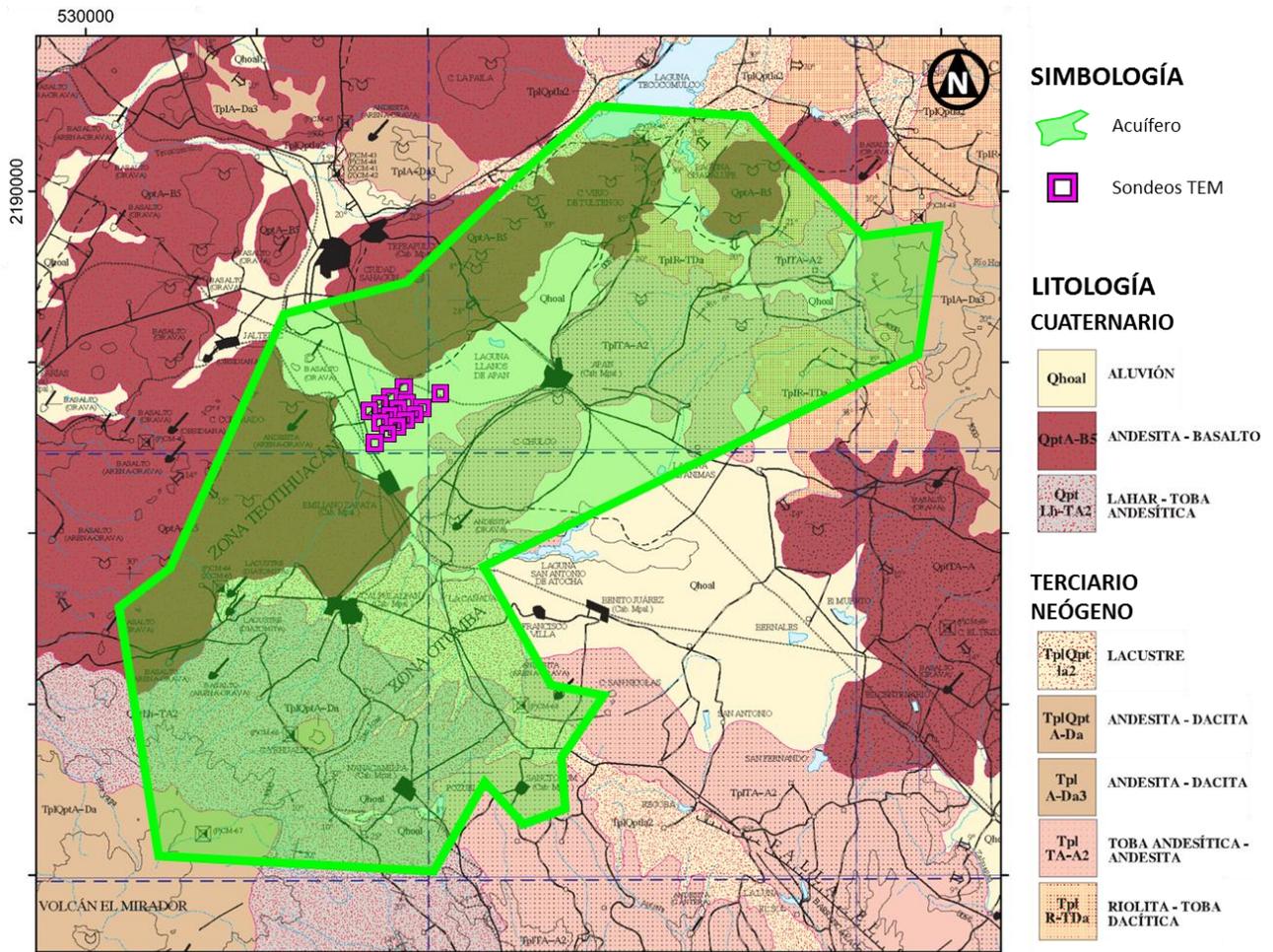


FIGURA 4. MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.3.5 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El relieve estructural de la región está íntimamente relacionado con una intensa actividad volcánica iniciada a principios del Terciario y desarrollada



durante el Pleistoceno Inferior. El conjunto de estructuras que caracterizan el relieve de esta provincia evolucionó sobre una paleogeografía constituida por sedimentos mesozoicos plegados, los cuales correspondían a la Sierra Madre Oriental.

La cantidad y espesor de este paquete volcánico formado por sucesivas coladas de lava superpuestas, es testimonio de la durabilidad del fenómeno durante un lapso grande de tiempo que abarcó desde principios del Terciario hasta épocas recientes.

En algunas zonas como las de las Sierras de Chichinautzin, Nevada y de Pachuca se ha estimado que la suma de espesores de las formaciones volcánicas depositadas rebasan los 4,000 m. Por lo cual en esta región se aprecia un conjunto de aparatos volcánicos complejos y además notables como son el Popocatépetl, Iztaccíhuatl, Ajusco, Xitle etc.

Existen en la región sistemas de fracturas y fallas regionales siendo tres las principales: La primera tiene dirección Noroeste-Sureste y afectó previamente a las rocas mesozoicas y está asociada al patrón estructural de la Sierra Madre Oriental, los otros dos sistemas están orientados Norte Sur y Noreste-Oeste Sureste y están asociados a los esfuerzos de Tensión que afectaron a las rocas volcánicas del Mioceno.

4.3.6 HIDROGRAFÍA

La red hidrográfica en la Cuenca del Valle de México está representada por un gran número de corrientes; estas integran un sistema general bastante definido; controlado principalmente por los sistemas de fracturamiento y fallamiento por lo que sus cauces son de dimensiones reducidas con paredes escarpadas.



Las condiciones naturales de los escurrimientos han sido modificadas con el transcurso del tiempo debido a los crecimientos de las áreas urbanas.

Anteriormente el Lago de Texcoco recibía escurrimientos de las corrientes existentes y de las excedencias de los lagos periféricos a él y topográficamente eran más altos, las únicas corrientes que no aportaban directamente al Lago de Texcoco eran las que se ubican al Noreste de la Cuenca del Valle de México, específicamente son las que corresponden a las Subcuencas de Tecocomulco, Apan y Tochac que mediante obras de drenaje vierten parte de sus aguas hacia el Río Papalote y al Río de las Avenidas de Pachuca para descargar al Lago de Zumpango.

Estas corrientes no son caudalosas debido a que la precipitación pluvial en la zona es baja con una fuerte evaporación y permeabilidad vertical alta controlada por sus características geológicas, principalmente en las brechas volcánicas, basaltos en bloques y riolitas verdes que han sido afectadas por el Tectonismo.

Por lo antes mencionado el Acuífero de Apan pertenece a los depósitos lacustres o de planicie aluvial ocupada por las lagunas someras de Tecocomulco con 20 km² de área aproximada, Apan y Tochac con 5.5 km² entre otras de menor cuantía.

4.3.7 CLIMA

El acuífero Apan, que pertenece a la Región XIII del Valle de México, se encuentra influenciado por las características topográficas existentes y por lo tanto se tiene una gran diversidad de climas, sin embargo dentro de esa variedad predomina el templado o mesotérmico siguiendo en importancia los climas secos y semisecos y en menor grado los climas fríos y semifríos.



4.4 MARCO TEÓRICO: TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (TDEM)

4.4.1 PRINCIPIOS GENERALES DEL MÉTODO TEM

El objetivo principal del método electromagnético TEM es mostrar la distribución del subsuelo; siendo que es una técnica con gran resolución vertical, es posible obtener una imagen lo más real posible de las condiciones del subsuelo. Los resultados de este método están en función de la resistividad y enlazando dos o más sondeos se pueden construir secciones geoeléctricas con las que se logran observar las heterogeneidades (zonas anómalas) debidas a estructuras geológicas, cambios de facies y fracturamiento de la roca, donde además la presencia del agua influye en el valor medido, provocando cambios importantes en la resistividad que es el parámetro experimental de campo que se mide.

En general, la técnica del TEM consiste en construir una espira o bobina con un cable en forma de cuadrado, por la que se deja pasar una corriente continua de gran intensidad que cree un campo magnético primario en la vecindad del loop; después de cierto tiempo se interrumpe abruptamente el flujo de corriente y de acuerdo a la Ley de Faraday, se produce la inducción electromagnética de una corriente eléctrica en el subsuelo, que a su vez mantiene instantáneamente el campo magnético primario.

Del mismo modo, esta corriente genera un campo magnético secundario transitorio. Los cambios del campo magnético secundario con el tiempo inducen un voltaje en la bobina receptora conocido como transitorio. La forma del decaimiento de este voltaje contiene información sobre la distribución de la resistividad del terreno debido a que la magnitud y la distribución de la corriente inducida dependen de él.

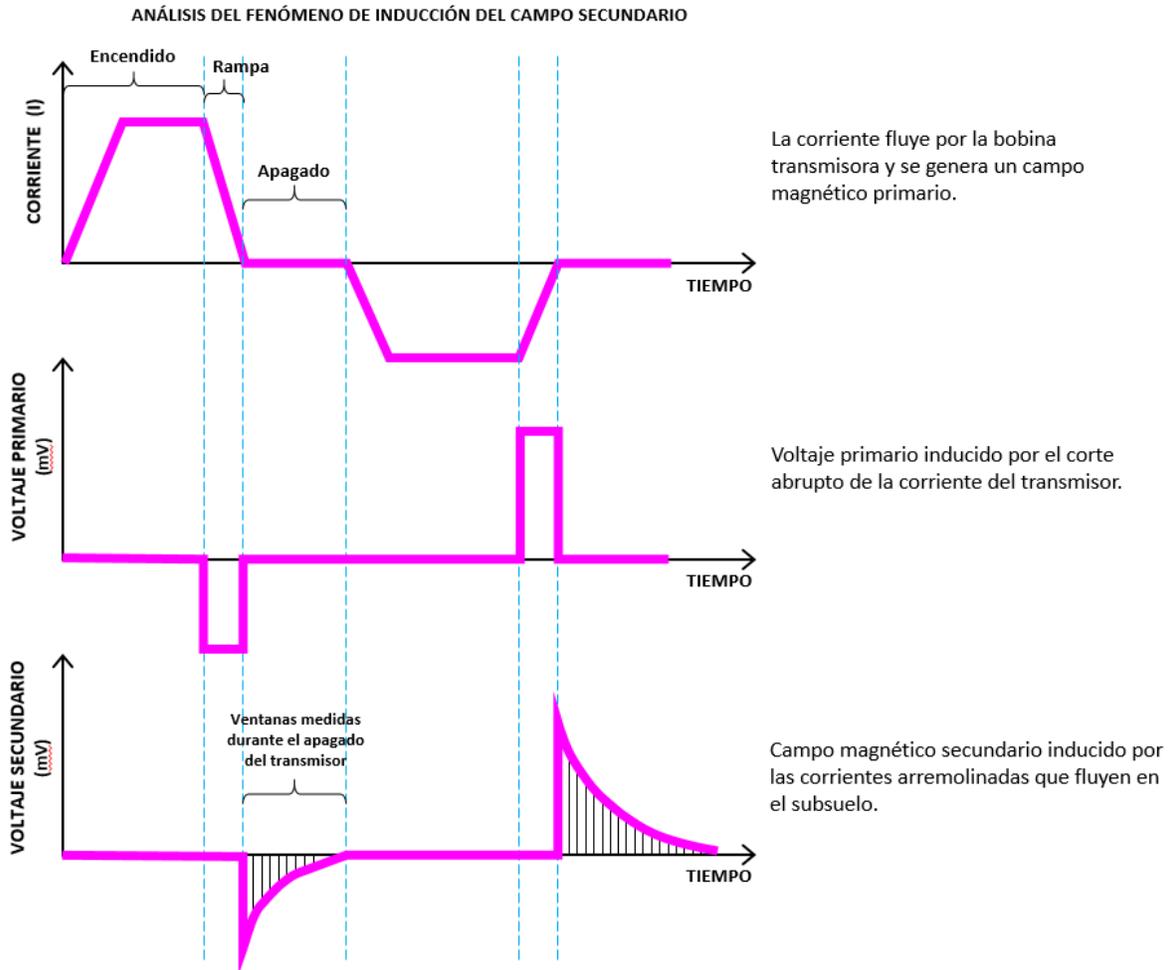


FIGURA 5. COMPORTAMIENTO DE LA SEÑAL POR TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (Modificado de McNeill, 1990)

La forma en que la corriente migra en profundidad ayuda a controlar la profundidad de investigación, donde los voltajes de tiempos cortos proveen información de la resistividad somera y los voltajes de tiempos largos otorgan información de la resistividad a mayor profundidad.

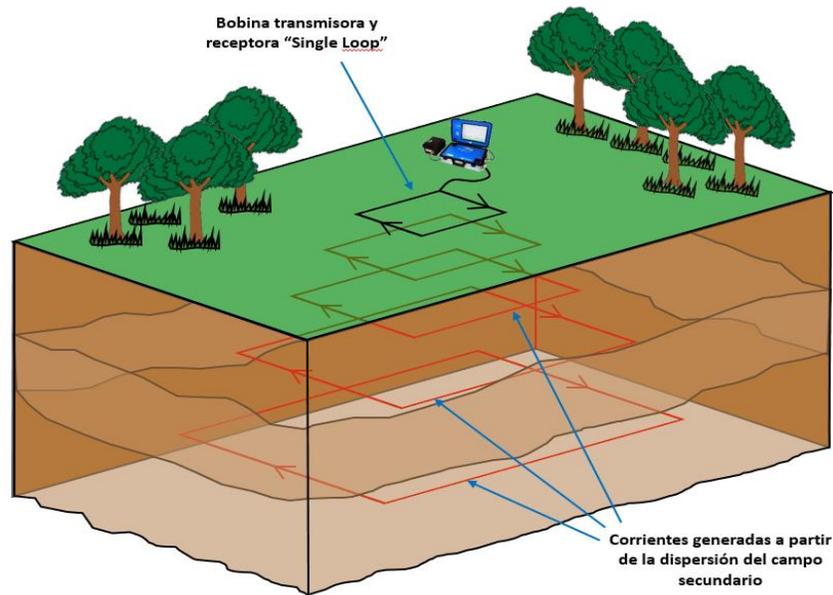


FIGURA 6. FENÓMENO DE LA INDUCCIÓN DEL CAMPO SECUNDARIO

4.4.2 CONFIGURACIONES PARA TEM

El arreglo geométrico que se utiliza en todas las técnicas electromagnéticas inductivas en el dominio del tiempo es una bobina con forma rectangular casi perfecta, la cual sirve como transmisor. Existen varios tipos de arreglos para TEM, que están en función de la configuración que presenten el transmisor y receptor, y son los siguientes:

Bobina simple. La configuración de este arreglo consta de una sola bobina, que funge como receptor y transmisor, donde la bobina actúa como transmisora en el mismo instante en que fluye la corriente a través de ella. Una vez que se apaga la corriente, la bobina se conecta al receptor y se mide la señal transitoria durante todo el periodo en el que el transmisor está en reposo. Las bobinas pueden presentar forma cuadrada o rectangular donde cada lado tiene una longitud que puede variar de 5 a 300 m.



Bobina coincidente. Tiene la misma geometría y respuesta que el arreglo de bobina simple, pero aquí el transmisor y receptor son bobinas independientes que coinciden en tamaño.

Bobina central. Es variante de la bobina coincidente; se utiliza como un dipolo múltiple que se coloca en el centro de la bobina transmisora.

Bobinas separadas. Transmisor y receptor se encuentran separados a una distancia fija y las bobinas tienen longitudes de hasta unas cuantas decenas de metros por lado. La variante principal en este arreglo es que el dipolo receptor permanece fijo a una distancia en el exterior de la bobina transmisora.

Bobina doble. Para este arreglo se utilizan dos bobinas adyacentes y conectadas en paralelo. Con esta configuración se reduce significativamente el ruido causado por fuentes remotas que interfieren con la señal: sin embargo, en zonas donde la conductividad varía lateralmente dicho ruido no se logra reducir.

Transmisor largo fijo con receptor móvil. Consiste en una bobina grande y fija que funciona como transmisora, mientras que el receptor es pequeño y móvil para tomar mediciones a lo largo de líneas perpendiculares a la bobina. La longitud de cada lado de la bobina va de unos cuantos metros hasta un máximo de 2 km, aunque también han sido utilizadas bobinas de hasta 5 km.

TEM en pozo. Es una extensión del arreglo del transmisor fijo, en donde el dipolo receptor se baja a lo largo de un pozo. De esta manera se puede medir a diferentes profundidades la componente del campo magnético transitorio orientada a lo largo del eje del pozo.

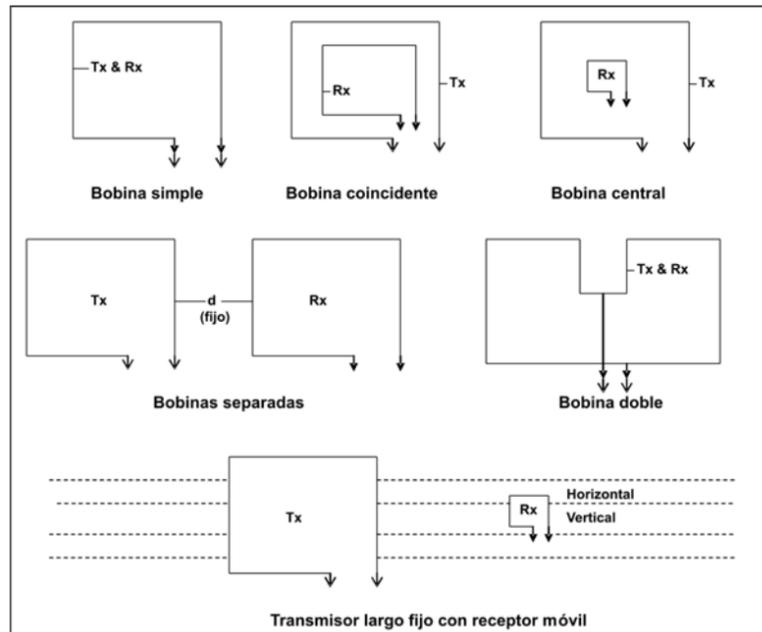


FIGURA 7. CONFIGURACIONES DE BOBINAS PARA TEM

4.4.3 TAMAÑO DE LA BOBINA

Una bobina transmisora grande, por lo general alcanza mayor profundidad de investigación, esto porque al incrementar el área, la fuerza del campo primario asociado y el momento dipolar del transmisor aumentan. Se sabe además, que la tasa de decaimiento del campo magnético de una bobina grande es de $1/r$, mientras que para una bobina pequeña es de $1/r^3$ (Nabighian, 1991).

4.4.4 FUENTES DE AFECTACIÓN AL MÉTODO TEM

Existen diversas fuentes que pueden generar errores o distorsiones en las lecturas, algunas de ellas son:



Geometría. La causa más común de este tipo de errores es la relación geométrica presente entre el transmisor y el receptor, en dispositivos de bobina simple y bobina coincidente, estos efectos son despreciables. Otro factor que influye de esta manera es la topografía, cuando la roca es muy resistiva se debe considerar la posición relativa entre cada estación y el sistema de corrientes inducidas.

Infraestructura antropogénica. Materiales conductores como tuberías, vallas, líneas de teléfono y alta tensión, entre otros, inducen corrientes que provocan anomalías en los TEM's. Dichos materiales tienen la capacidad de canalizar las corrientes inducidas en el subsuelo, lo que usualmente genera fuertes anomalías. Esta respuesta ruidosa se minimiza colocando bobinas transmisoras simétricamente sobre las fuentes de ruido.

Ruido electromagnético. Se refiere a las señales geomagnéticas con frecuencias menores a 1Hz provenientes principalmente de la ionosfera, las señales por encima de este rango se deben a tormentas eléctricas que generan campos transitorios naturales. También construcciones hechas por el hombre, tales como la red de distribución eléctrica y las estaciones de radio generan ruido significativo en las mediciones electromagnéticas, las primeras tienen una frecuencia media de ruido de 50 a 60 Hz, mientras que las segundas generan altas frecuencias de ruido que alcanzan los 25 KHz.

Otro factor de ruido significativo es el movimiento inducido o microfonía, este ruido se genera al mover los sensores de campo dentro del campo geomagnético, las mediciones de campo se verán afectadas ya que el campo de la Tierra es exageradamente más grande que los campos usados en el TEM. Este efecto también se conoce como ruido de viento.



4.4.5 FACTORES QUE AFECTAN LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Los factores que afectan mayormente en la conductividad eléctrica (recíproco de la resistividad) del suelo o la roca como un todo son:

- Porosidad
- Conductividad de la humedad del suelo
- Forma de los espacios porosos del suelo o roca
- Grado de saturación (fracción del espacio poroso lleno de humedad)
- Temperatura
- Presencia de arcillas (como alteración hidrotermal de la roca) con capacidad de intercambio catiónico de medio a alto
- Existencia de minerales secundarios por depositación hidrotermal

De acuerdo a Keller y Frischknecht (1970) se considera que la presencia de arcillas agrega una componente adicional a la conductividad eléctrica, la cual es una función del contenido y tipo de arcilla. Esta relación está representada por la siguiente función:

$$\sigma a = \sigma w \Phi m + \sigma arcilla$$

Donde:

σa = Conductividad Eléctrica
 Φm = Factor de formación

σw = Conductividad del medio saturado
 $\sigma arcilla$ = Conductividad eléctrica de la arcilla

El significado de la contribución de la arcilla es claramente mayor cuando la concentración de los conductores iónicos es baja, llegando a ser despreciable en grandes cantidades de concentraciones iónicas, especialmente para arcillas con una capacidad de intercambio de cationes baja a moderada.



4.5 PLANEACIÓN DEL ESTUDIO

4.5.1 ADQUISICIÓN DE DATOS

Para realizar este estudio se decidió realizar loops de 300x300 m. con un área de bobina de 90,000 m², utilizando el arreglo denominado “Loop Simple”, es decir donde únicamente se utiliza una bobina, la cual actúa en ciertos instantes de tiempo como transmisora de la señal y en otros es receptora.

Con este arreglo se realizaron 15 sondeos TEM, en los que se variaron diferentes parámetros, tales como:

- Pruebas de la resistencia del circuito de transmisión y recepción
- Análisis de la intensidad de corriente circulante
- Análisis de ruido y respuesta del equipo con diferentes ganancias
- Análisis de la penetración de la señal en el subsuelo (profundidad de investigación)
- Análisis de la repetibilidad de la respuesta medida por el equipo
- Apilamiento de la señal con promedios de 256, 512, 1024 y 2048 muestras

La distribución de los sitios de estudio se hizo de forma que los sondeos fueran representativos de las condiciones generales del sitio.

El tiempo de medición se fijó con una duración entre 40 a 52 ventanas, con la serie de tiempo denominada Early Time del equipo "TerraTEM". Las mediciones se realizaron con ganancias de 1, 4, 16, 32, y 64, aumentando el número de lecturas en sitios donde el ruido geológico era alto, esto con el fin de aumentar la calidad en la estadística de los datos.



4.5.2 EQUIPO

TERRATEM

Consola Receptor/transmisor	TerraTEM
Capacidad de registros	400 registros completos
No. de Ventanas	53 en tres series
Rango de mediciones	50 microsegundos a 2 segundos
Promedios de señal	1-9999 muestras (seleccionable)
Tiempo de retraso	0-9999 microsegundos (seleccionable)
Filtros	50/60 Hz
Desplegado en campo	Normalizado de valores de Resistividad Aparente (en modo textual o gráfico)
Peso	10 kg



FIGURA 8. EQUIPO TERRATEM, FABRICADO POR MONEX GEOSCOPE



4.6 PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesado de los registros se efectuó en las siguientes etapas, para cada sondeo y fueron:

- Transferencia de los registros del equipo a la computadora.
- Edición de las curvas registradas con cada ganancia para obtener una curva final de nV/AMP contra tiempo (curva de decaimiento).
- Conversión de la curva de decaimiento a Resistividad Aparente contra tiempo
- Cálculo del modelo estratificado
- Cálculo del modelo suavizado (inversión Occam)
- Impresión gráfica del modelo unidimensional
- Transferencia de las curvas y los modelos generados al paquete WINGLINK
- En Winglink, formación de la base de datos
- Elaboración de plantas y secciones de isorresistividad e impresión de resultados gráficos.

Todas las etapas del proceso anterior se realizaron en la oficina, y los datos de campo fueron analizados el mismo día que fueron levantados, para conocer la calidad de la información.

Para la ubicación de los sitios de medición, se utilizó un geo posicionamiento tipo GPS, empleando para ello un GPS de mano marca “Magellan”, modelo “Explorist 510”, el cual nos proporciona para cada sitio de medición sus coordenadas (X,Y), mientras que la elevación fue tomada de las cartas topográficas editadas por el INEGI.



En el proceso de los datos se siguieron los estándares internacionales que se aplican para este fin, utilizando software y equipos de patente, de los cuales se tienen versiones originales, para ello podemos citar el siguiente equipo y software:

- Equipo Terratem con número de serie 1503
- Programa TEMIXS para el proceso primario de los datos
- Programa WINGLINK para utilizarlo como base de datos y formar secciones y mapas de resistividad.

El proceso de los datos, para cada sondeo, consiste en:

Obtener un modelo unidimensional, partiendo de la curva de resistividad aparente la cual es procesada en una primera etapa mediante el modelado por capas planas, siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de las curvas y los tiempos en los que ocurren las inflexiones.

Una segunda etapa en el proceso de la curva de resistividad aparente es aplicar una regresión tipo Occam con lo cual se logra obtener un modelo multicapas (17 capas) para integrar secciones y simular un comportamiento bidimensional de la sección. A continuación se describe cada proceso.

4.6.1 MODELOS SUAVIZADOS

El procesado de los datos consistió en obtener los modelos suavizados mediante una regresión tipo Occam, en la que se propone una resistividad inicial y una final, basada en los datos de campo.



El algoritmo requiere de un número de capas inicial, un valor de ajuste al que se quiere llegar y un número máximo de iteraciones, estos tres últimos parámetros no intervienen en la obtención del modelo suavizado, por lo que este sólo depende de los valores de resistividad de campo. Entonces la técnica se basa en el precepto filosófico dictado por William de Occam en los albores del siglo XIV que dice: "Es en vano hacer con más lo que puede ser hecho con lo menos", y en el uso de la regresión Ridge, para encontrar un modelo que cumpla con el error marcado en el ajuste o con el mínimo error posible.

4.6.2 MODELO UNIDIMENSIONAL

También los datos fueron procesados por el modelado por capas o unidimensional, se hizo siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de la curva de campo, las pendientes de la curva y los tiempos a los que ocurren las inflexiones.

Se aprovechó la facilidad del paquete TEMIXS que permite la interacción con la computadora en un proceso conocido como interpretación interactiva. Este proceso posibilita que el intérprete modifique los parámetros del modelo y presenta el cálculo de las curvas teóricas de las modificaciones realizadas, esta característica hace que el ajuste del modelo sea rápido.

Una vez que se ha obtenido un ajuste aceptable, el modelo generado se somete a una regresión automática con las técnicas de Ridge y de Marquardt con algoritmos de aproximación de tipo Anderson para obtener, por inversión, el mejor ajuste bajo el criterio del error cuadrático medio mínimo. Los modelos obtenidos, son sometidos a un nuevo proceso para obtener una serie de modelos equivalentes que cumplan con el mismo error de ajuste. Los modelos equivalentes posibilitan



establecer el intervalo de variación de los espesores y resistividades en cada capa del modelo original con fines de correlación electro estratigráfica.

Para la obtención de un modelo unidimensional es necesario interpretar la curva de resistividad aparente mediante un modelado por capas planas, siguiendo la metodología de prueba y error. Seguido se aplica una regresión tipo Occam para obtener un modelo multicapas (17 capas) para integrar secciones y simular un comportamiento bidimensional de la sección.

Posteriormente se lleva a cabo un proceso llamado Inversión Unidimensional (Modelos 1D), que consiste en obtener una curva de resistividad contra profundidad mediante una regresión tipo Occam, en la que se propone un valor de resistividad inicial, un número de hasta 17 capas y una profundidad estimada; esta curva de resistividad calculada es comparada con los datos reales de campo. El algoritmo requiere de un número de capas inicial, un valor de ajuste al que se quiere llegar y un número máximo de iteraciones; estos parámetros no intervienen en la obtención del modelo suavizado, por lo que la obtención de un modelo representativo de la curva medida sólo depende de los valores de resistividad de campo.

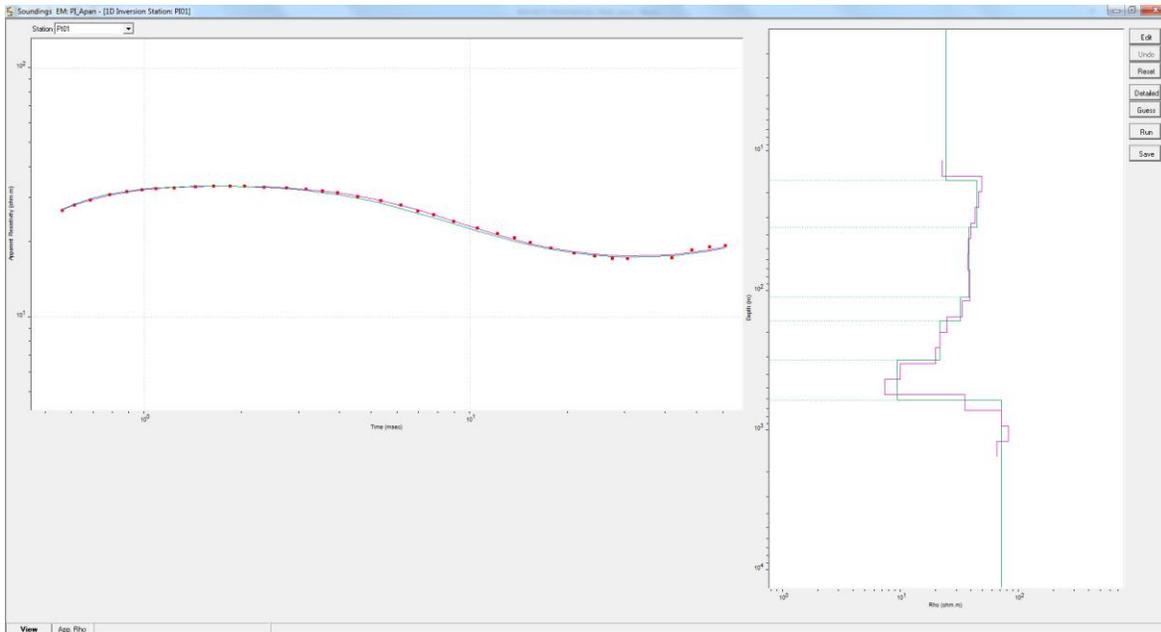


FIGURA 9. AJUSTE DE LA INVERSIÓN UNIDIMENSIONAL

4.7 RESULTADOS

4.7.1 CLASIFICACIÓN GEOELÉCTRICA

A partir de los contrastes de resistividad observados en los perfiles geoelectricos y la información geológica disponible, fue posible definir 3 unidades geoelectricas principales, de las cuales, una fue subdividida para lograr un mejor análisis. Estas unidades representan variaciones litológicas o facies de los diversos cuerpos estratigráficos que componen el subsuelo. La siguiente tabla muestra la clasificación geofísica obtenida.



TABLA 1. CLASIFICACIÓN GEOFÍSICA

UNIDAD	INTERVALO RESISTIVO (Ohm*m)	DESCRIPCIÓN
U1	5 a 30	Capa de cobertura correspondiente a depósitos aluviales compuestos por arenas, gravas, limos y arcillas.
U2a	5 a 20	Estrato formado por materiales de origen volcánico de buena permeabilidad, tales como tobas con posible fracturamiento y posibilidades de contener saturación.
U2b	20 a 40	Capa compuesta por materiales piroclásticos como tobas y brechas volcánicas con poco fracturamiento y regular permeabilidad.
U3a	20 a 50	Estrato formado por materiales de origen volcánico con intercalaciones de arenas. Se considera de regular permeabilidad y posible saturación.
U3b	Mayor a 50	Unidad integrada por rocas de mayor compacidad, de origen volcánico, tales como andesitas y basaltos.

Unidad 1: Capa de cobertura

La unidad U1 corresponde a la capa de cobertura, la cual está integrada por depósitos aluviales tipo arcilla que presentan valores resistivos de entre 5 y 30 Ohm*m y un espesor promedio de 20 m sin interrupciones en su continuidad lateral.

Unidad 2: Material Volcánico

U2 ha sido subdividida para un mejor análisis, donde la subunidad U2a es un estrato formado por materiales de origen volcánico que presumen tener buena permeabilidad y posibilidades de saturación por agua subterránea, determinado por sus valores resistivos que oscilan entre 5 y 20 Ohm*m, que pueden asociarse a tobas con un grado considerable de fracturamiento. La subunidad U2b presenta valores de resistividad de 20 a 40 Ohm*m, que se asocian a materiales



piroclásticos como tobas y brechas volcánicas con poco fracturamiento y regular permeabilidad.

Unidad 3: Rocas Volcánicas

U3 también ha sido subdividida; la subunidad U3a muestra un intervalo resistivo de entre 20 y 50 Ohm*m, valores que se asocian a materiales de origen volcánico con intercalaciones de arenas, que se consideran de regular permeabilidad y posible saturación. U3b muestra valores resistivos mayores a 50 Ohm*m, que se asocian a rocas de mayor compacidad que de igual forma son de origen volcánico, como andesitas y basaltos.

4.7.2 PERFILES GEOELÉCTRICOS

A partir de los 15 sondeos por Transitorio Electromagnético realizados en el área, se trazaron 7 perfiles geoelectrónicos, que se obtuvieron de los modelos suavizados. Son de gran utilidad, pues conjuntan las variaciones de resistividad en el plano vertical y ayudan a definir las características de los materiales, además de mostrar la distribución geoespacial de la resistividad del subsuelo como respuesta de los materiales rocosos que conforman los estratos en conjunto con posibles fluidos emplazados en su interior.

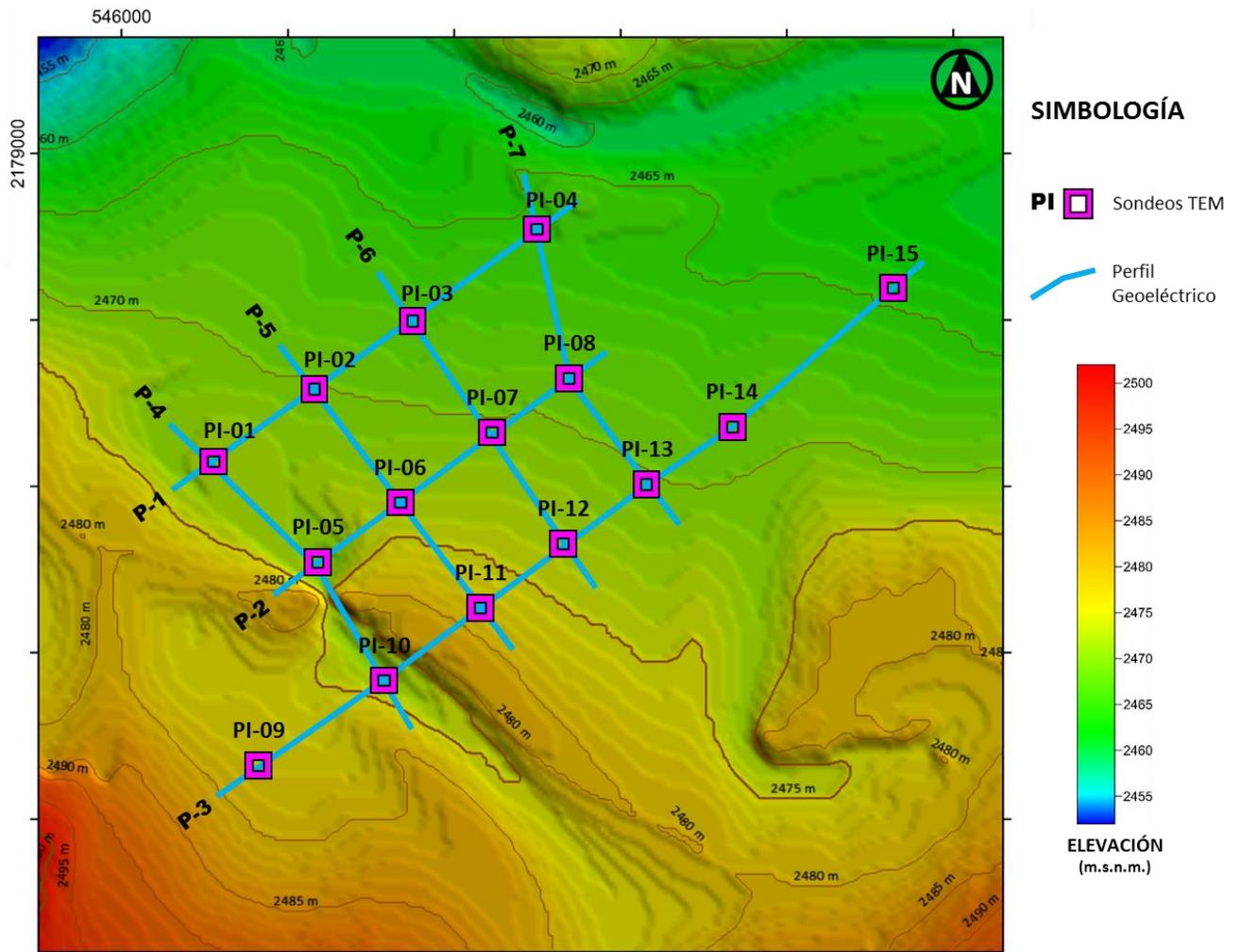


FIGURA 10. MAPA DIGITAL DE ELEVACIONES CON PROYECCIÓN DE SONDEOS Y PERFILES

Los perfiles P-1, P-2 y P-3 son paralelos entre sí, tienen una dirección general SW-NE y longitudes de 3230 m, 2765 m y 5710 m respectivamente. El Perfil P-1 está formado por los sondeos PI-01 a PI-04; el Perfil P-2 por los sondeos PI-05 a PI-08 y el Perfil P-3 por los sondeos PI-09 a PI-15. Los perfiles P-4, P-5, P-6 y P-7 tienen dirección NW-SE y una longitud promedio de 2600 m; cada uno está conformado por 3 sondeos cubriendo la zona central del área de exploración. De esta forma se tienen múltiples vistas de la distribución georesistiva del subsuelo y



por lo tanto es posible definir el mejor sitio para el emplazamiento de un pozo exploratorio.

En base a la clasificación geoeléctrica, se tiene una distribución de unidades georresistivas con buena continuidad lateral en casi todos sus estratos y perfiles. Variando únicamente en sus espesores y profundidades. El análisis de los perfiles se realiza en 2 grupos principales, de acuerdo a su orientación.

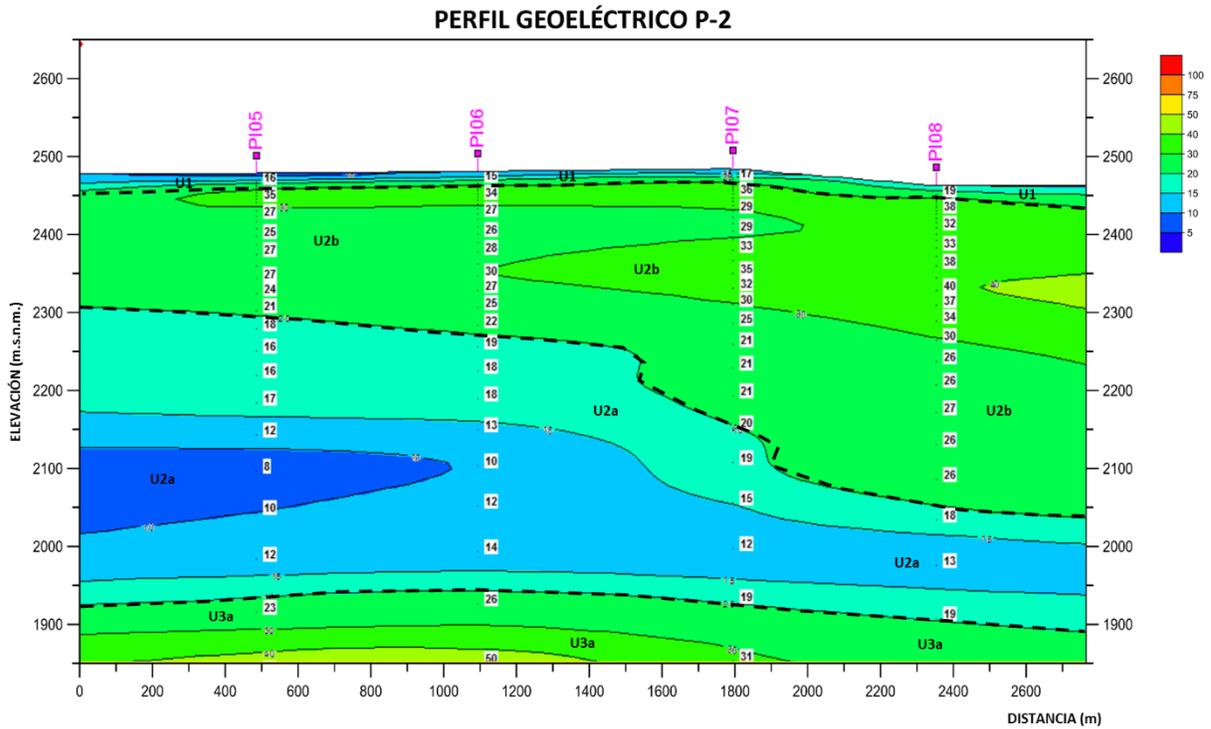
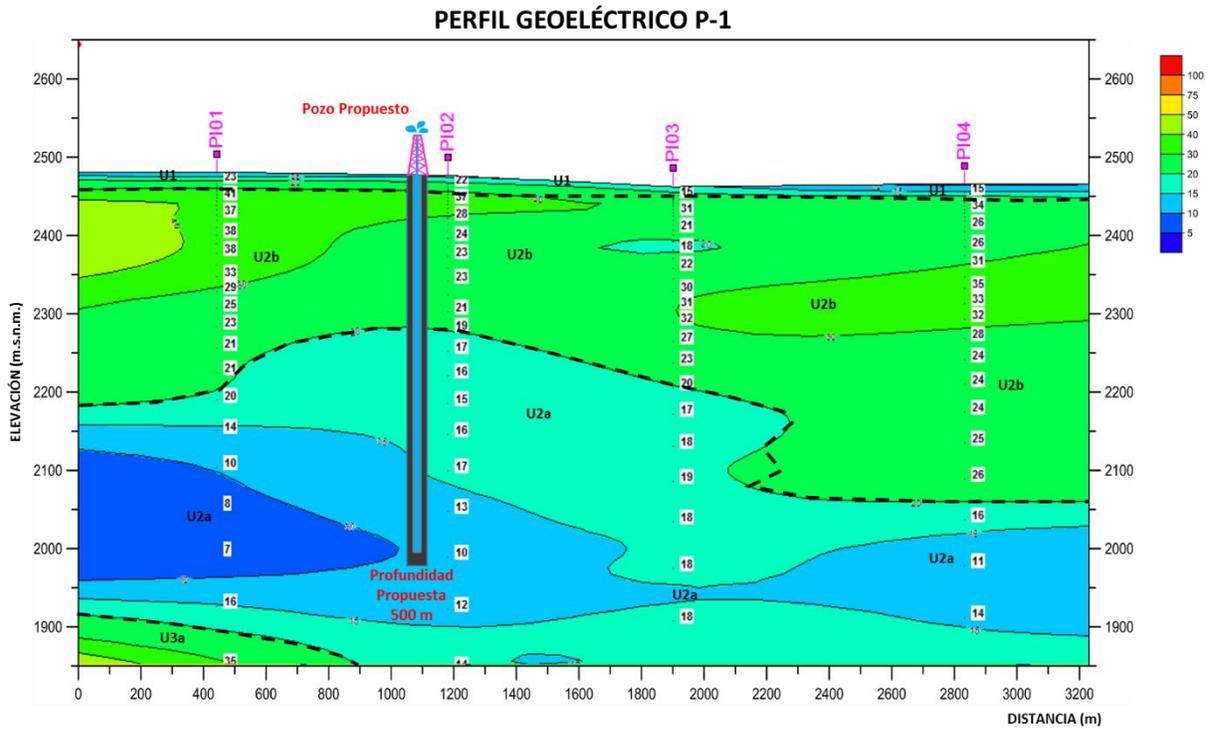
Perfiles P-1, P-2 y P-3

Los 3 perfiles muestran una capa de cobertura U1 correspondiente al aluvión que predomina en la superficie de la zona, con un espesor promedio de 20 m y que se extiende a lo largo de los perfiles sin interrupciones. Subyaciendo se encuentra la subunidad U2b que presenta un espesor considerable, superior a los 150 m y bajo algunos sondeos alcanza los 350 m de espesor, como es el caso de los sitios PI-04 y PI-08. Debajo de U2b se encuentra un estrato de valores resistivos menores a 20 Ohm*m, lo cual es indicador de posible saturación por líquido subterráneo; esta subunidad nombrada U2a corresponde a materiales de origen volcánico de buena permeabilidad, posiblemente tobas dacíticas y andesíticas con un grado considerable de fracturamiento. Muestra un espesor variable, en el perfil P-1 oscila entre 250 y 400 m, para P-2 es de entre 150 y 350 m y para P-3 es de entre 120 y 250 m, siendo la zona sur la de menor espesor en la zona saturada.

A los 550 m de profundidad aproximadamente, comienzan a incrementar nuevamente la resistividad de los materiales, por lo que se marca un contacto con un estrato de valores resistivos que oscilan entre 20 y 50 Ohm*m, nombrado U3a, que corresponde a rocas de origen volcánico con posible fracturamiento y regular permeabilidad. Tiene un espesor de entre 50 y 150 m y una continuidad lateral homogénea. Subyaciendo a U3a se observa el estrato más profundo del perfil,



que tiene valores resistivos mayores a 50 Ohm*m, los cuales se relacionan con roca de origen volcánico de mayor compacidad y baja permeabilidad.



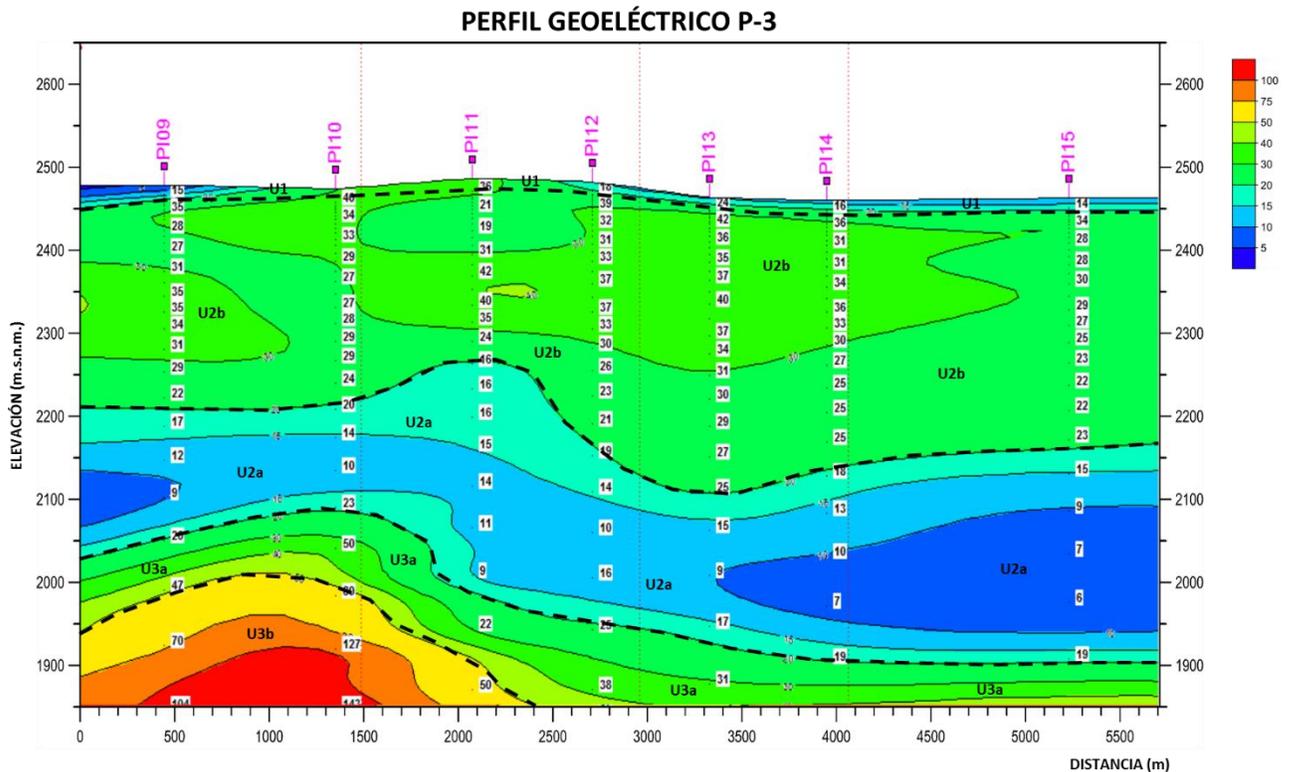


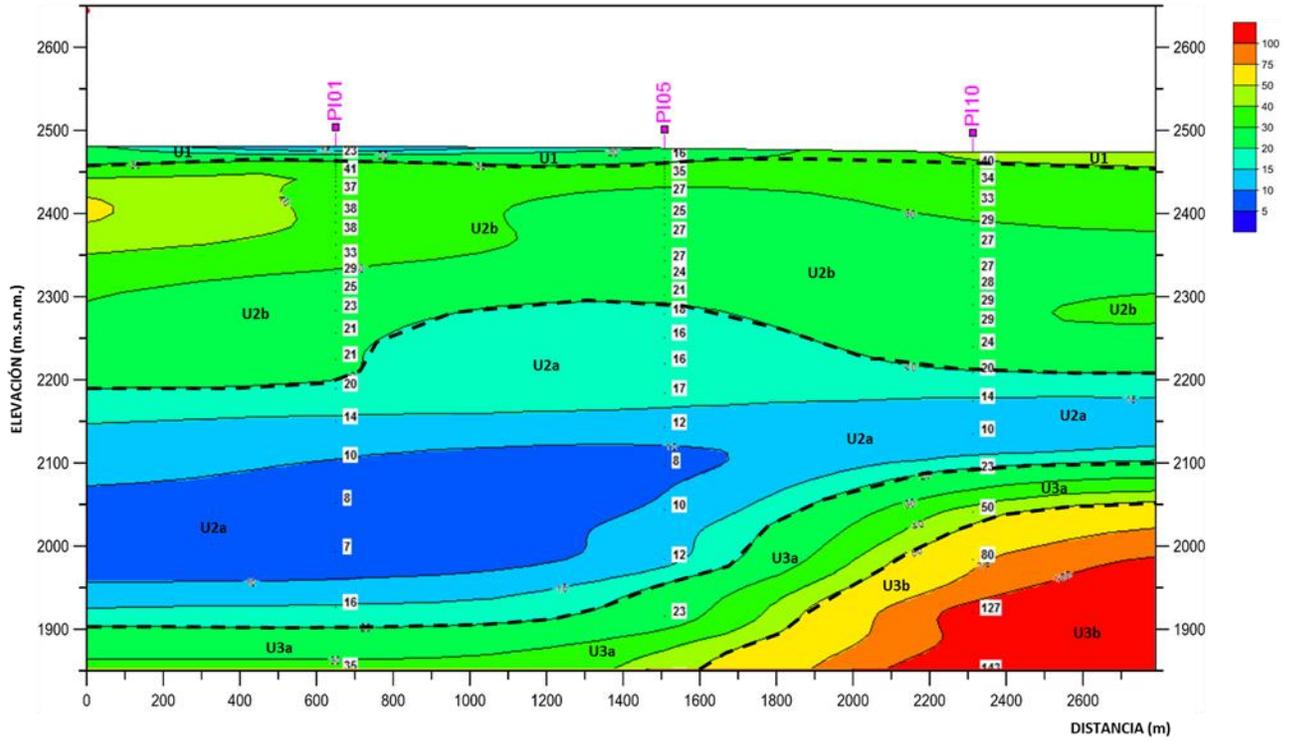
FIGURA 11. PERFILES GEOELÉCTRICOS P-1, P-2 Y P-3

Perfiles P-4, P-5, P-6 y P-7

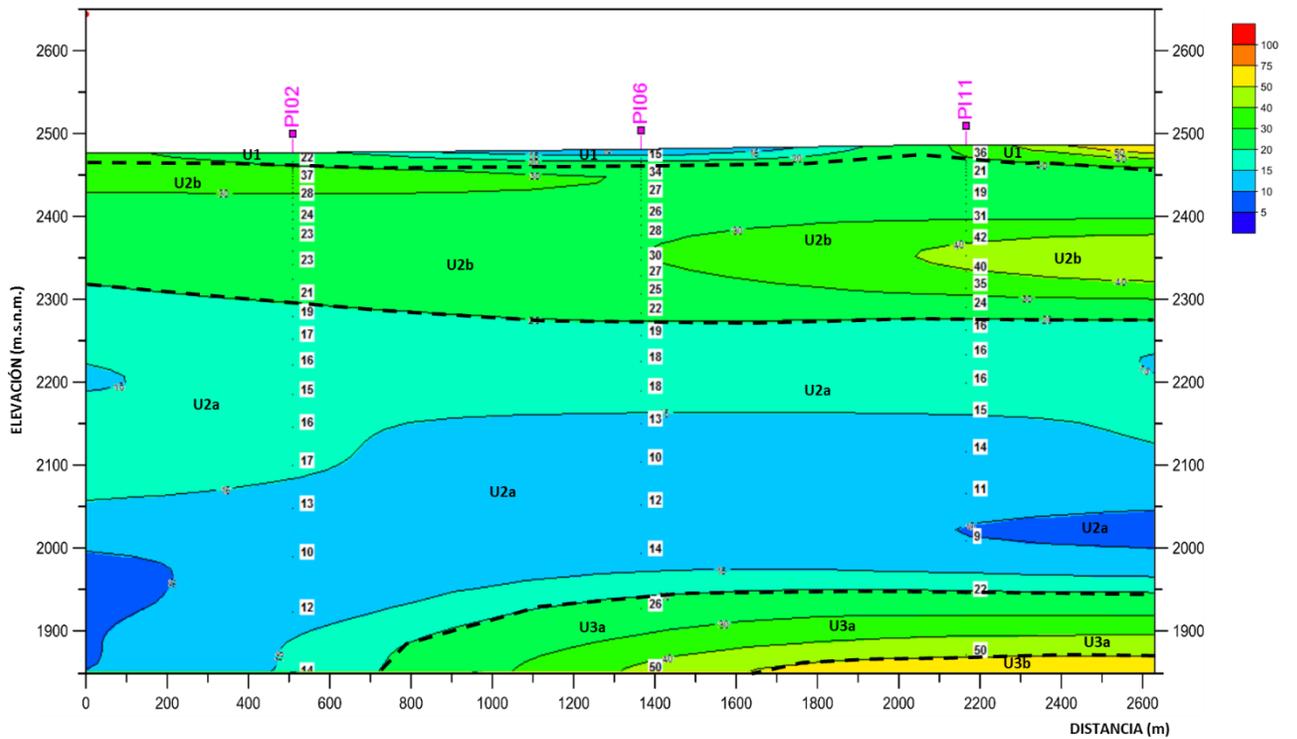
Estos perfiles muestran una distribución de capas similar a los perfiles anteriores, donde todos los estratos tienen buena continuidad lateral y únicamente difieren en sus espesores. Analizando la profundidad y espesor de cada unidad se puede observar que la subunidad U2b aumenta su espesor hacia el oriente de la zona, mientras que la subunidad U2a disminuye en la misma dirección. Siendo el perfil P-5 donde se observa que el estrato conductor U2a que está relacionado con la posible zona saturada, muestra su mayor espesor, por lo tanto se considera la parte NW de la zona de estudio como la mejor zona para realizar la perforación de un pozo exploratorio.



PERFIL GEOELÉCTRICO P-4



PERFIL GEOELÉCTRICO P-5



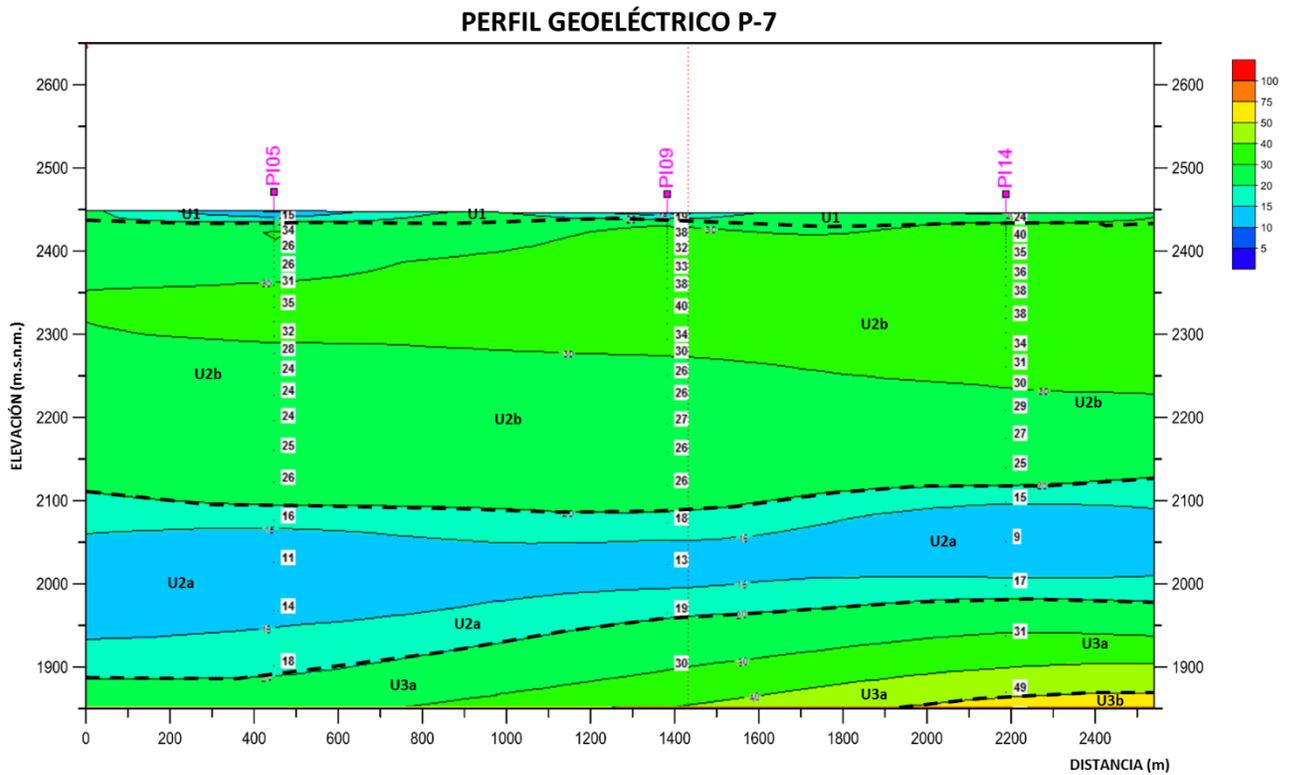
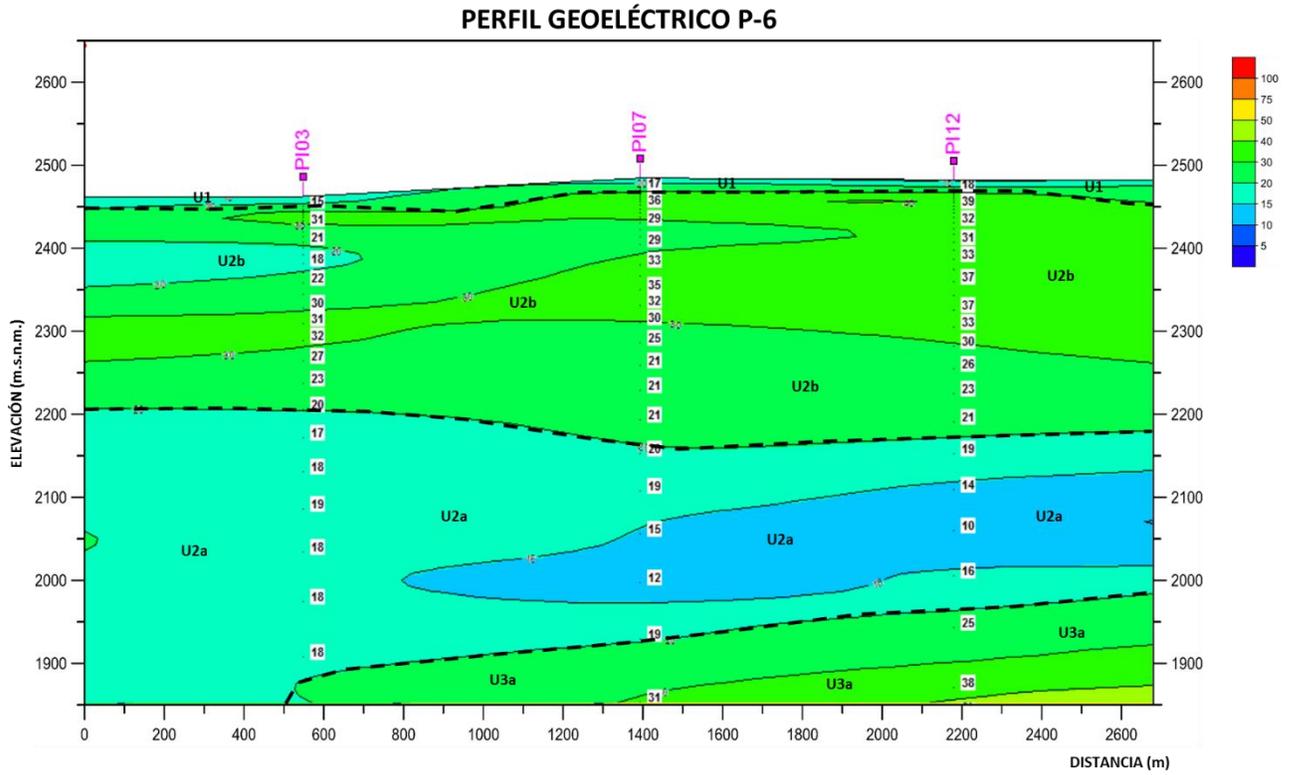


FIGURA 12. PERFILES P-4, P-5, P-6 Y P-7



4.8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo al análisis de los perfiles geoelectricos y la información geológica y geohidrológica recabada se concluye lo siguiente:

- El acuífero Apan cuenta con un área de 1,518 km² aproximadamente, pertenece a la Cuenca del Valle de México, Región Hidrológica XIII, subcuenca Apan-Tochac.
- El área del acuífero Apan corresponde en su mayoría a una planicie aluvial, formada por arcillas de alta plasticidad y arcillas cementadas. Se tiene presencia de aparatos volcánicos compuestos por lavas, brechas y cenizas cuya composición litológica va desde rocas basálticas a riolíticas con edades que varían desde el Plioceno Tardío hasta el reciente.
- Con la finalidad de conocer la distribución de resistividad en el subsuelo y conocer la características georesistivas del acuífero Apan bajo la zona de estudio, se realizó un estudio geofísico en la modalidad de Transitorio Electromagnético (TEM). Se definieron 15 sitios de estudio con loops de 300x300 m con los que se alcanzó una profundidad de 700 m aproximadamente.
- Del procesamiento y análisis de la información se definieron 3 unidades geoelectricas principales, 2 de ellas con subdivisiones; de las cuales las subunidades U2a y U3a se consideran con potencial geohidrológico importante. La subunidad U2a tiene un intervalo resistivo de entre 5 y 20 Ohm*m, valores asociados a materiales de origen volcánico de buena permeabilidad como tobas con posible fracturamiento y posibilidades de presentar saturación por agua subterránea. También se considera como estrato de interés a la subunidad U3a que subyace a U2a, que presenta valores resistivos de entre 20 y 50 Ohm*m, asociados a materiales de



origen volcánico con intercalaciones de arenas y se considera de regular permeabilidad con posible saturación.

- Se crearon 7 perfiles geoelectricos con los que se cubre la totalidad del área de estudio, 3 de ellos con dirección NW-SE y 4 con dirección SW-NE.

De acuerdo con los resultados encontrados en el presente trabajo y lo concluido anteriormente, se observa que en general se muestran condiciones geológicas similares en los 15 sondeos TEM realizados, donde los espesores de cada unidad es el principal factor para la elección del mejor sitio para la perforación de un pozo, por lo tanto se recomienda lo siguiente:

- El sondeo que muestra el mayor espesor de U2a es el sondeo PI-02, por lo tanto se considera este sitio como el más recomendable para la realización de un pozo exploratorio, que deberá alcanzar una profundidad del orden de 500 m para asegurar que quede emplazado dentro del acuífero profundo de Apan. De este modo se podrá asegurar el gasto requerido para el Parque Industrial.
- Se recomienda realizar un registro geofísico de pozo con una sonda multiparámetros que pueda aportar información de radiación gamma natural, resistencia del fluido, SP, curvas de resistividad y temperatura para realizar un dictamen más integral, en cuanto a las posibles zonas permeables.

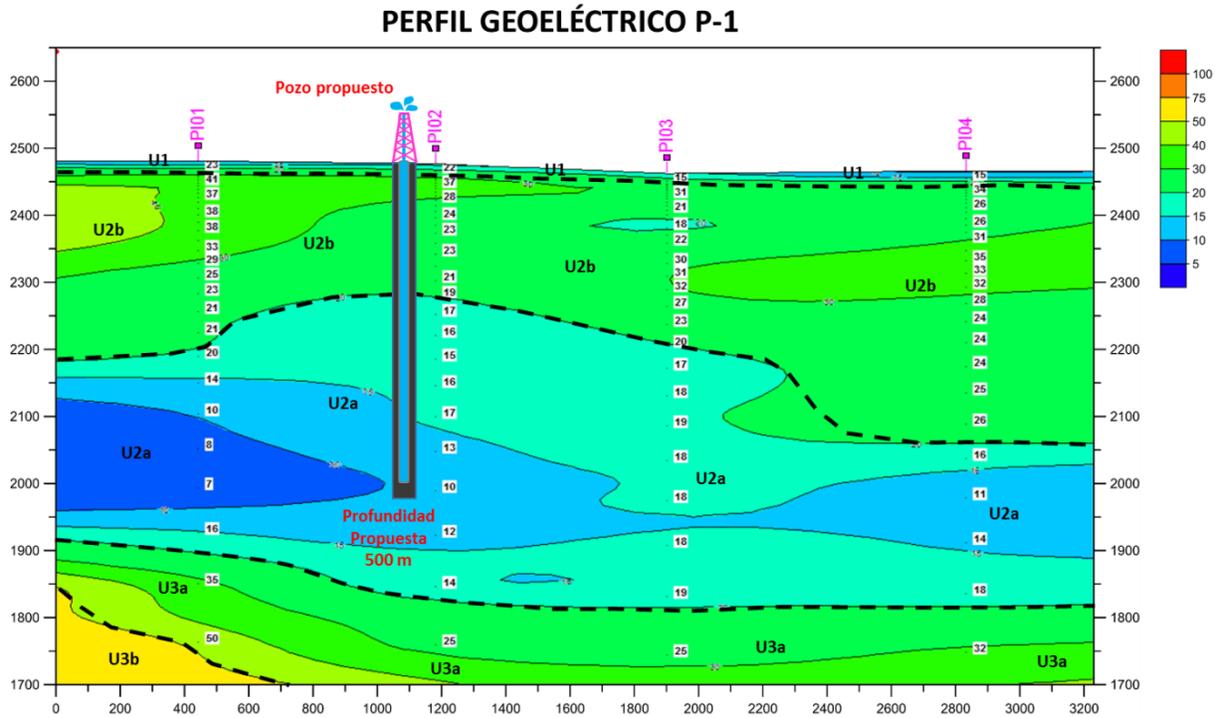


FIGURA 13. PERFIL P-1 CON UBICACIÓN DE POZO PROPUESTO A 500 M DE PROFUNDIDAD



BIBLIOGRAFÍA

- CONSTABLE S.C., Parker R.L., Constable C.G., "Occam's Inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data", *Geophysics*, v 52, n3, Marzo 1987.
- APPLIED GEOPHYSICS SECOND EDITION, W.M. Telford, L.P. Geldart, R.E. Sheriff, Cambridge University Press, United Kingdom 1990.
- Flores, L, C., La exactitud del problema directo de sondeos electromagnéticos transitorios, *GEOS*, Vol 20, 2, 70-88.
- Mc Neill, J.D., 1994, Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding, Technical Note TN-27, 1-15.
- Nabighian, M.N., and Macnae, J.C., 1991, Time domain electromagnetic prospecting methods, in *EMAG*, v.2, Applications, Part A, Nabighian (ed.), 427-479.
- Orellana, S. E., 1982, Prospección geoeléctrica en corriente continua, *PARANINFO*, 2da Edición.
- Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas Subgerencia (2008). Determinación de la Disponibilidad de agua en el acuífero 3218 Cedros, Estado de Zacatecas. México: CONAGUA.
- Hidrología de la Cuenca del Valle de México SRH-CHCUM año 1964.
- Estudio de Geología en el Valle de México con fines Geohidrológicos realizado a contrato en 1987 para CAVM por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

SOFTWARE

- WINGLINK, User´s Manual, Edition 4, © Geosystem srl, Milan, Italia, 1994.
- ©Interpex Limited, Golden Co. 1993.
- OFFICE 2013
- TEMIX S
- SURFER v12.0
- AUTOCAD 2014



APÉNDICE A

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

ECUACIONES DE MAXWELL

Los métodos de prospección electromagnética tienen un principio físico basado en las ecuaciones de Maxwell, las cuales relacionan los fenómenos electromagnéticos en su forma más general, y se comportan conforme a las siguientes ecuaciones (Orellana, 1972):

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Ley de Faraday}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Ley de Ampere}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{Ley de Gauss para campos eléctricos}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Ley de Gauss para campos magnéticos}$$

Donde:

\vec{E} es el vector de intensidad del campo eléctrico en V/m

\vec{B} es el vector de inducción magnética en Wb/m² o Tesla

\vec{H} es el vector de intensidad del campo magnético en A/m

\vec{D} es el vector de desplazamiento dieléctrico en C/m²

\vec{j} es el vector de densidad de corriente eléctrica

ρ es la densidad de carga eléctrica en C/m²

Adicional a las ecuaciones de Maxwell, se utilizan relaciones constitutivas, las cuales involucran las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia y la aplicación de la transformada de Fourier (Ward y Hohmann, 1988). Con ellas se puede analizar y comprender el comportamiento de los fenómenos electromagnéticos en el dominio del tiempo. Son las siguientes:

$$D = \varepsilon(\omega, E, r, t, T, P) \cdot E$$

$$B = \mu(\omega, H, r, t, T, P) \cdot H$$



$$J = \sigma(w, E, r, t, T, P) \cdot E$$

Donde:

ϵ es el tensor de la permitividad eléctrica en F/m

μ es el tensor de la permeabilidad magnética en H/m

σ es el tensor de la conductividad eléctrica en S/m

Por lo tanto X, Y y Z están en función de la frecuencia, intensidad del campo eléctrico o magnético, posición, tiempo, temperatura y presión.

La solución a los fenómenos electromagnéticos considera que los medios son homogéneos, lineales e isótropos y que además las características electromagnéticas no dependen de la temperatura, tiempo o presión y que la permeabilidad magnética es la del vacío.

A partir de las relaciones constitutivas mencionadas anteriormente se transforman al dominio de la frecuencia las leyes de Faraday y de Ampere, quedando de la siguiente manera:

$$\nabla \times \vec{E} + \hat{z} \vec{H} = 0$$

$$\nabla \times \vec{H} + \hat{y} \vec{E} = 0$$

Donde:

$\hat{z} = i\mu\omega$ es la impedancia

$\hat{y} = \sigma + i\epsilon\omega$ es la admitancia (Harrington, 1961)

ECUACIÓN DE ONDA

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell, la ecuación de onda describe la propagación de los campos eléctricos y magnéticos en el interior de la Tierra. Aplicando el rotacional a las leyes de Faraday y de Ampere, se obtiene (Ward y Hohmman, 1988):

El estudio de la interacción de las ondas electromagnéticas con el subsuelo nos lleva al análisis de la ecuación de onda y la forma en que se propaga el campo eléctrico y magnético, por lo tanto se ocupan las ecuaciones de Maxwell para aplicar el rotacional a las leyes de Faraday y de Ampere (Ward y Hohmman, 1988), obteniendo:



$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) + \nabla \times \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) = \mathbf{0}$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{H}) - \nabla \times \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) = \nabla \times \mathbf{J}$$

Considerando las relaciones constitutivas en el dominio del tiempo en un medio no dispersivo se tiene:

$$\mathbf{D} = \epsilon \vec{\mathbf{E}}$$

$$\mathbf{B} = \mu \vec{\mathbf{H}}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \vec{\mathbf{E}}$$

Aplicando estas simplificaciones a las leyes de Ampere y Faraday se asume que los campos eléctricos y magnéticos son continuos por intervalos y poseen primera y segunda derivada, quedando de la siguiente forma:

$$\nabla^2 \vec{\mathbf{E}} - \mu \epsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{\mathbf{E}}}{\partial t^2} \right) - \mu \sigma \left(\frac{\partial \vec{\mathbf{E}}}{\partial t} \right) = \mathbf{0}$$

$$\nabla^2 \vec{\mathbf{H}} - \mu \epsilon \left(\frac{\partial^2 \vec{\mathbf{H}}}{\partial t^2} \right) - \mu \sigma \left(\frac{\partial \vec{\mathbf{H}}}{\partial t} \right) = \mathbf{0}$$

Aplicando la transformada de Fourier se obtienen las ecuaciones de onda en el dominio de las frecuencias:

$$\nabla^2 \vec{\mathbf{E}} + (\mu \epsilon \omega^2 - i \mu \sigma \omega) \vec{\mathbf{E}} = \mathbf{0}$$

$$\nabla^2 \vec{\mathbf{H}} + (\mu \epsilon \omega^2 - i \mu \sigma \omega) \vec{\mathbf{H}} = \mathbf{0}$$

Donde el número de onda k se define como $k^2 = \mu \epsilon \omega^2 - i \mu \sigma \omega$, lo que significa que las corrientes de desplazamiento son mucho más pequeñas que las corrientes de conducción de los materiales de la Tierra, en cambio para frecuencias menores a 105 Hz se tiene que $\mu \epsilon \omega^2 \ll i \mu \omega$ y por lo tanto el número de onda $k^2 \approx -i \mu \sigma \omega$. Tomando estas consideraciones, las leyes de Faraday y Ampere se pueden expresar de la siguiente forma (Ward y Hohmman, 1988):

En el dominio del tiempo se tiene:



$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t^2} \right) = 0$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\sigma \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t^2} \right) = 0$$

En el dominio de la frecuencia se tiene:

$$\nabla^2 \vec{E} - i\mu\sigma\omega \vec{E} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{H} - i\mu\sigma\omega \vec{H} = 0$$

Estas ecuaciones describen el desarrollo de los fenómenos electromagnéticos a través de las ecuaciones de Maxwell en los dominios del tiempo y la frecuencia.

CONDICIONES DE FRONTERA

Las condiciones de frontera, que se derivan de las ecuaciones de Maxwell en su forma integral, se consideran para fenómenos electromagnéticos homogéneos, lineales e isotropos y son las siguientes (Ward y Hohmann, 1988):

La componente normal del campo magnético B_n es continua a través de la interface que separa al medio uno del medio dos: $B_{n1} = B_{n2}$

La componente normal del campo dieléctrico D_n es continua a través de la interfase por la acumulación en la densidad de carga superficial ρ_n : $D_{n1} - D_{n2} = \rho_n$

La componente tangencial del campo eléctrico E_i , es continua a través de la interfase: $E_{i1} = E_{i2}$

La componente tangencial del campo magnético H_i , es continua a través de la interfase si no existe corriente superficial: $H_{i1} = H_{i2}$

La componente normal de la densidad de corriente J_i , es continua a través de la interface si no existe corriente superficial: $J_{i1} = J_{i2}$



SOLUCIÓN A LA ECUACIÓN DE ONDA

A continuación se muestra una de las dos soluciones existentes para las ecuaciones diferenciales de segundo orden obtenidas a partir de las leyes de Faraday y de Ampere, que considera una onda plana con dependencia sinusoidal en el tiempo, lo que quiere decir que presenta una variación armónica $e^{i\omega t}$ (Ward y Hohmman, 1988):

$$\begin{aligned}\vec{E} &= E_0^+ e^{-i(kz-\omega t)} + E_0^- e^{i(kz-\omega t)} \\ \vec{H} &= H_0^+ e^{-i(kz-\omega t)} + H_0^- e^{i(kz-\omega t)}\end{aligned}$$

En donde k está en el dominio de los números complejos y se describe como $k = \alpha - i\beta$; además E_0^\pm y H_0^\pm son las amplitudes de las ondas y el signo indica la dirección de su propagación.

Para el fenómeno físico donde las corrientes de conducción dominan sobre las corrientes de desplazamiento se tiene que α y β son iguales, por lo que quedan definidas como:

$$\alpha = \beta = \left(\frac{\omega\pi\sigma}{2}\right)^{1/2}$$

Las soluciones de las ecuaciones considerando que existe decaimiento en la dirección del eje Z positivo son:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= E_0^+ e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \\ \vec{H} &= H_0^+ e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t}\end{aligned}$$

A partir de estas ecuaciones se observa que el término $e^{-\beta z}$ tiende a cero conforme aumenta el valor de z ; lo anterior representa una atenuación en la amplitud de la onda electromagnética en una distancia δ , siguiendo una relación establecida de $1/e$. A esta distancia δ se conoce como penetración nominal y está dada por (Ward Hohmman, 1988):

$$\delta = \left(\frac{2}{\omega\mu\sigma}\right)^{1/2} = 503 \left(\frac{1}{f\sigma}\right)^{1/2} [m]$$

Este concepto es de gran importancia en la exploración geofísica debido a que es necesario conocer parámetros electromagnéticos en función de la profundidad, para



analizar a partir de ella los cambios de resistencia de un conductor y así conocer los contactos geológicos que se presentan en el subsuelo.

RESPUESTA TRANSITORIA

Para generar una respuesta transitoria del campo electromagnético se utiliza un dipolo magnético vertical, también llamado bobina, que para fines prácticos en campo se tiende en forma de cuadrado, pero teóricamente, para obtener la componente vertical del campo magnético se considera como una circunferencia. Por lo tanto la respuesta en la bobina está dada por (Ward y Hohmann, op.cit.):

$$H_z = -\frac{I}{k^2 a^3} [3 - (3ika - k^2 a^2) e^{-ika}]$$

Donde a es el radio de la bobina y k es el número de onda o constante de propagación. A continuación se divide entre $i\omega$ y se aplica la transformada inversa de Laplace para obtener la respuesta transitoria de una señal tipo escalón. Por lo tanto la ecuación del campo magnético en el centro de la bobina una vez que se ha apagado la corriente queda de la siguiente manera:

$$H_z = \frac{I}{2a} \left[\frac{3}{\sqrt{\pi\theta a}} e^{-\theta^2 a^2} + \left(1 - \frac{3}{2\theta^2 a^2} \right) \text{erf}(\theta a) \right]$$

En donde erf es la función error definida como $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ y $\theta = \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma}{4t}}$.

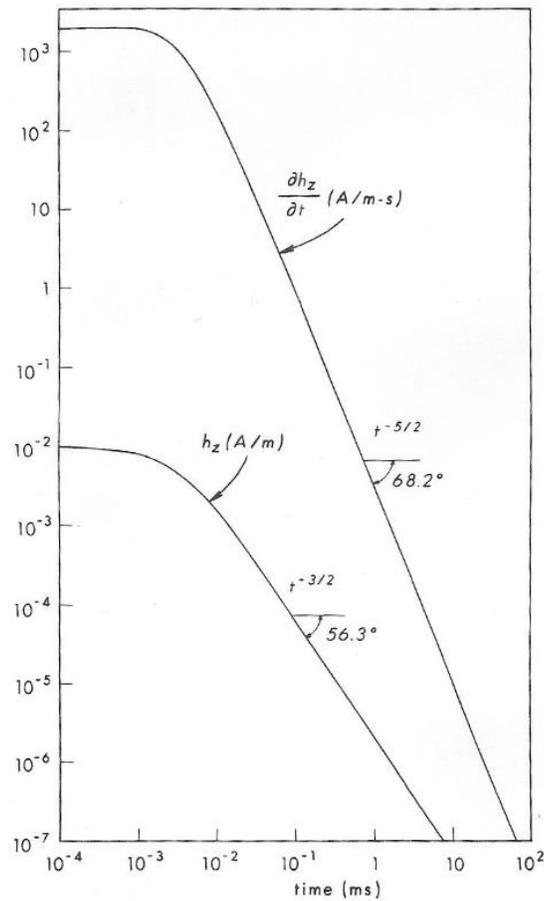
El campo magnético presente en el espacio libre antes de interrumpir el flujo de corriente está representado por $\frac{I}{2a}$, que al ser multiplicado por el segundo término da como resultado el decaimiento del campo magnético. Por lo que la derivada del campo magnético con respecto del tiempo se expresa como:

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{I}{\mu_0 \sigma a^3} \left[3 \text{erf}(\theta a) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} (3 + 2\theta^2 a^2) e^{-\theta^2 a^2} \right]$$

El decaimiento del campo magnético y su derivada con respecto al tiempo se da en el centro de la bobina y como demostró Nabighian (1979), el campo magnético transitorio se debe a un sistema de corrientes circulares que fluyen en la misma dirección que la



corriente transmisora; demostró también que el campo magnético puede ser aproximado al de un filamento circular de corriente similar a un anillo de humo que se mueve hacia abajo con una velocidad dada por $\frac{2}{(\pi\sigma\mu_0 t)^{1/2}}$, y su radio está dado por la expresión $\left(\frac{4.37t}{\sigma\mu_0}\right)^{1/2}$. Fuera de la bobina, el signo del campo magnético cambia cuando el anillo de humo pasa aproximadamente debajo del punto de observación, pero lo mantienen al centro de la bobina.



Campo magnético y su derivada con respecto al tiempo (Nabighian, 1979).

Para valores pequeños de θ y tiempos tardíos se tiene que:

$$h_z \approx \frac{I\sigma^{3/2}\mu_0^{3/2}a^2}{30\pi^{1/2}} t^{-3/2}$$



$$\frac{\partial h_z}{\partial t} \approx \frac{-I\sigma^{3/2}\mu_0^{3/2}a^2}{20\pi^{1/2}} t^{-5/2}$$

La resistividad aparente del subsuelo se calcula a partir de esta última derivada, que también representa la respuesta transitoria de la Tierra, principalmente porque sus mediciones presentan menor sensibilidad en la profundidad a cuerpos conductores (Spies, 1989). En la figura 3.5, se muestra una gráfica logarítmica de la respuesta transitoria de la Tierra para el caso del semiespacio homogéneo, esta respuesta es una función matemáticamente compleja que se puede dividir en tres etapas:

- Temprana: respuesta constante en el tiempo.
- Intermedia: respuesta varía conforme al tiempo.
- Tardía: respuesta lineal en una gráfica.

CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD APARENTE

Para obtener los valores de resistividad se utiliza la expresión que representa el voltaje registrado por el receptor, donde la resistividad varía según el comportamiento del decaimiento del campo magnético, que tiene dos etapas primordiales de las que se puede definir el voltaje para tiempos cortos y para tiempos largos (Spies et al., 1986).

$$\text{Tiempos cortos} \quad V = \frac{3mI}{\sigma a^3} \qquad \text{Tiempos largos} \quad V = \frac{I\sigma^{3/2}\mu^{5/2}ma^2}{20\sqrt{\pi}t^{5/2}}$$

En donde m representa al producto del número de vueltas de la bobina receptora por el área de la misma.

La resistividad aparente, expresada con las unidades $\Omega \cdot m$, se obtiene a partir de técnicas de series de expansión y técnicas iterativas. Por lo tanto las expresiones para tiempos cortos y para tiempos largos son las siguientes:

$$\text{Tiempos Cortos} \quad \rho_a = \frac{a^3V}{3mI} \qquad \text{Tiempos largos} \quad \rho_a = \frac{I^{2/3}a^{4/3}m^{2/3}\mu^{5/3}}{20^{2/3}\pi^{1/3}t^{5/3}V^{2/3}}$$

La resistividad aparente para tiempos cortos se aproxima a la resistividad real de los estratos superiores, mientras que la de tiempos largos se aproxima a la resistividad real



de los estratos inferiores. Christensen (1995) define que es posible obtener una resistividad aparente válida para todos los tiempos cuando se trata de una señal tipo escalón, la cual se expresa como:

$$\rho_a = \frac{\mu a^2}{4t(\theta a)^2}$$

Para modelos estratificados esta resistividad presenta una suave transición conforme cambia la resistividad en el subsuelo. Sin embargo, para lograr que las curvas de resistividad aparente se aproximen más a la distribución de las resistividades reales del subsuelo, es necesario asociar cada medida con una profundidad. Para esto, Christensen (1995) demostró que elaborando la gráfica de resistividad aparente para todos los tiempos en función de la profundidad de difusión se obtienen resultados más fidedignos a los reales. La profundidad de difusión en un semiespacio homogéneo se define:

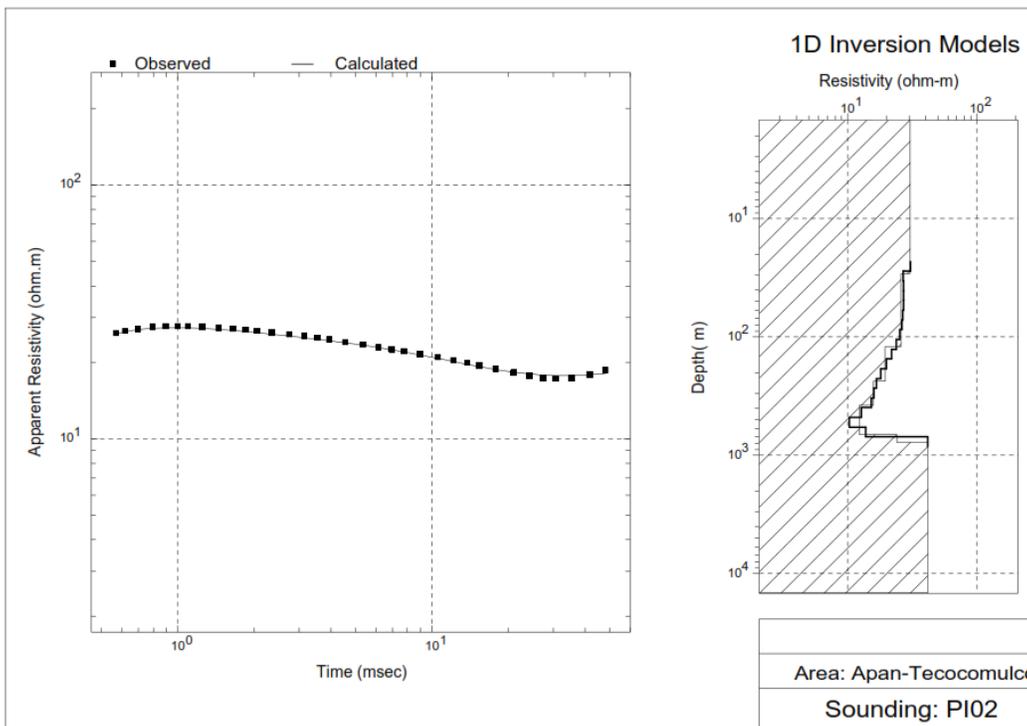
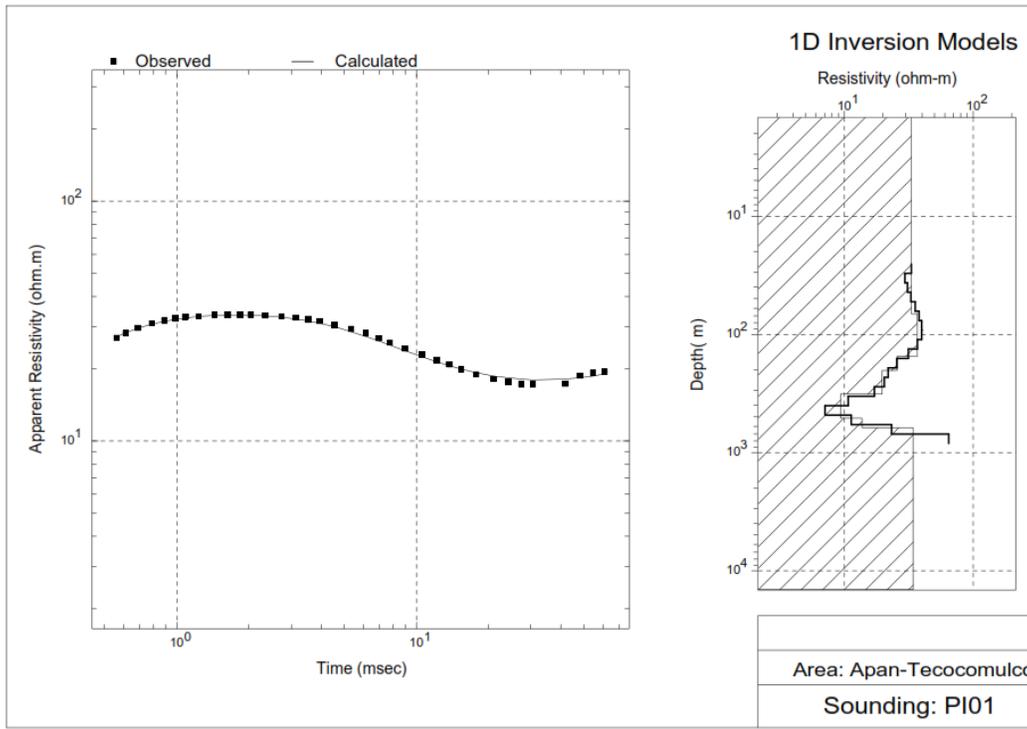
$$d = \sqrt{\frac{2t}{\mu\sigma}}$$

Por último se define la profundidad de difusión para cada dato de resistividad aparente medido y que fue previamente calculado.

$$d = \sqrt{\frac{2t\rho_a(t)}{\mu}}$$

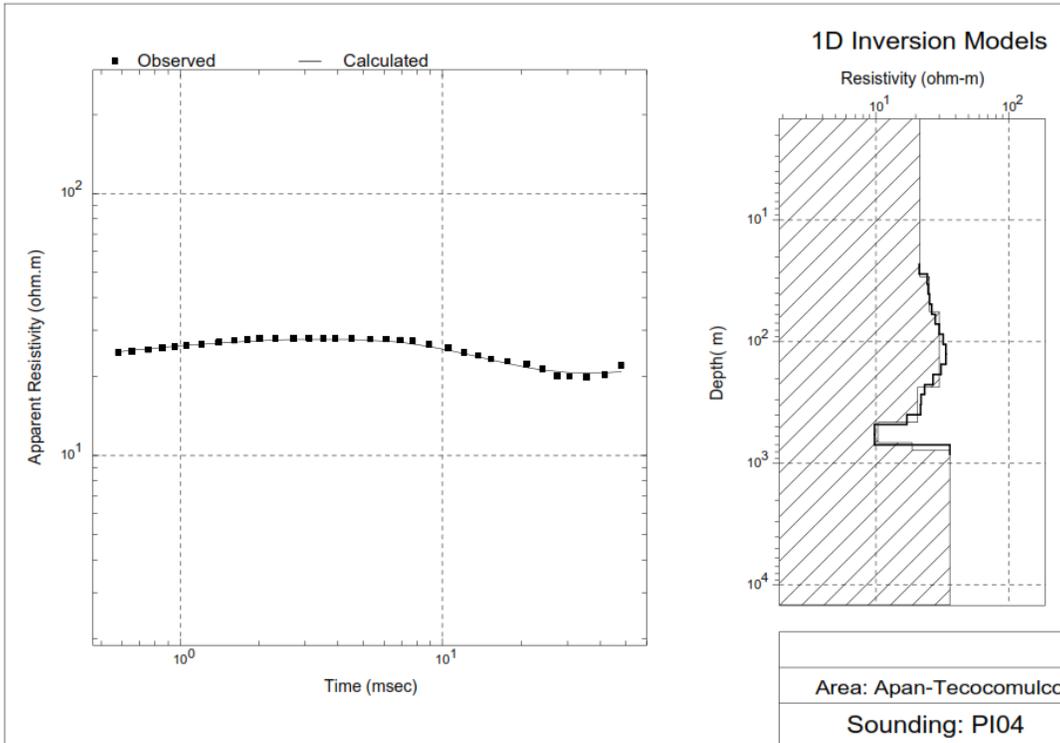
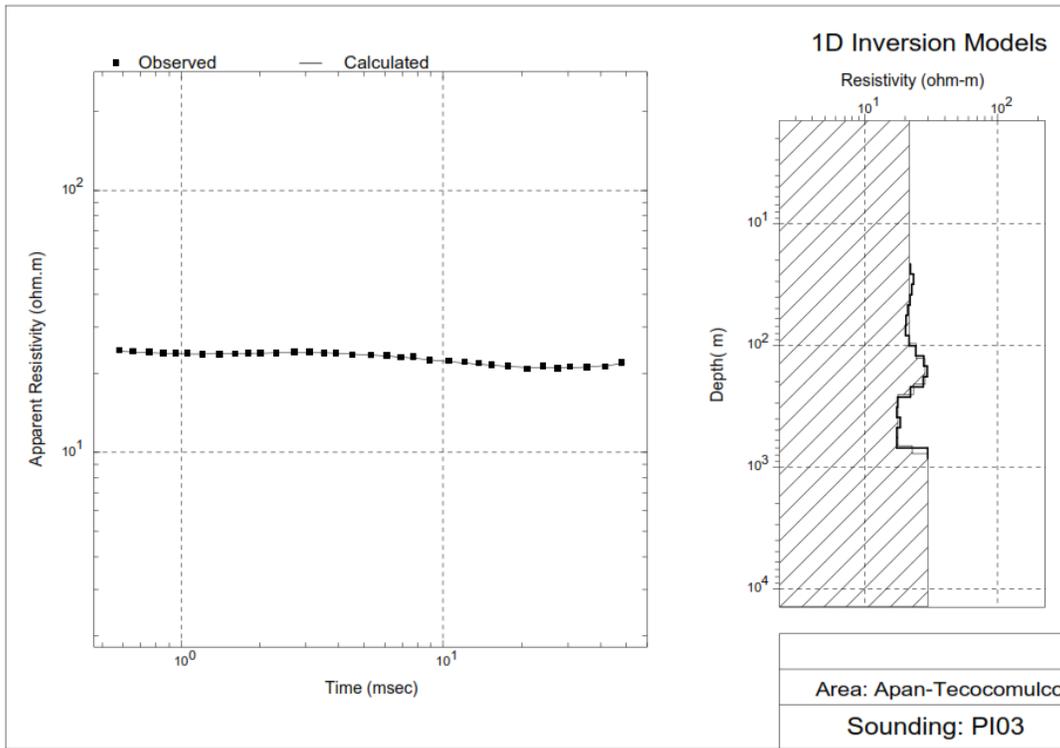


ANEXO DE CURVAS DE RESISTIVIDAD



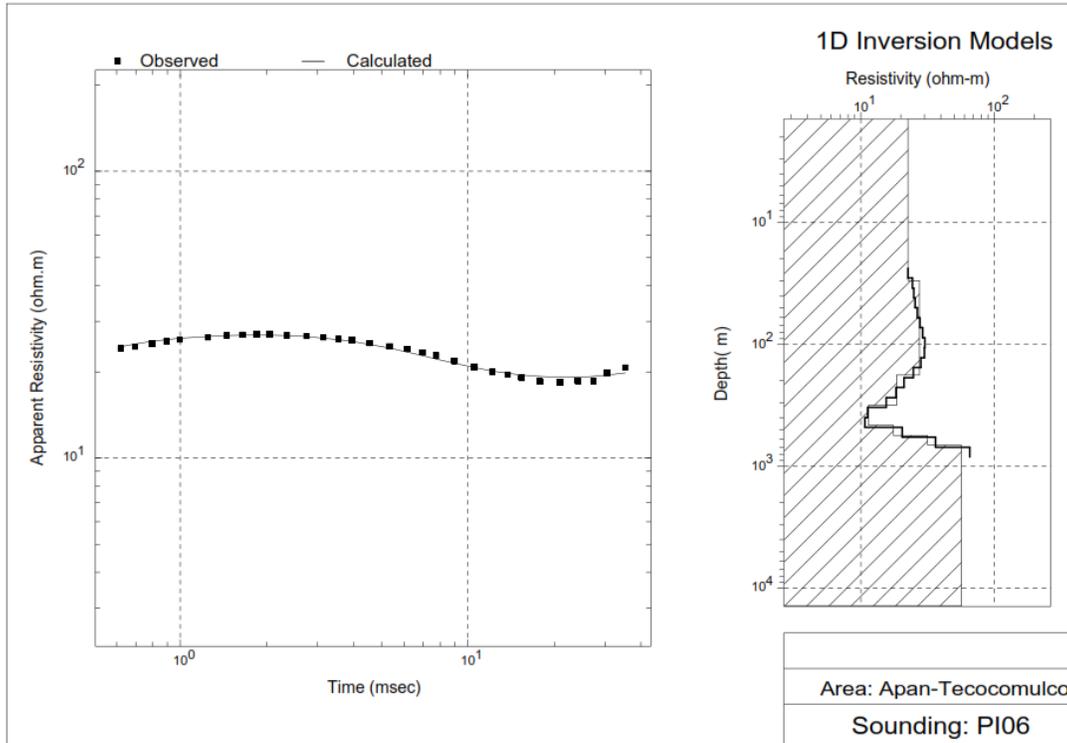
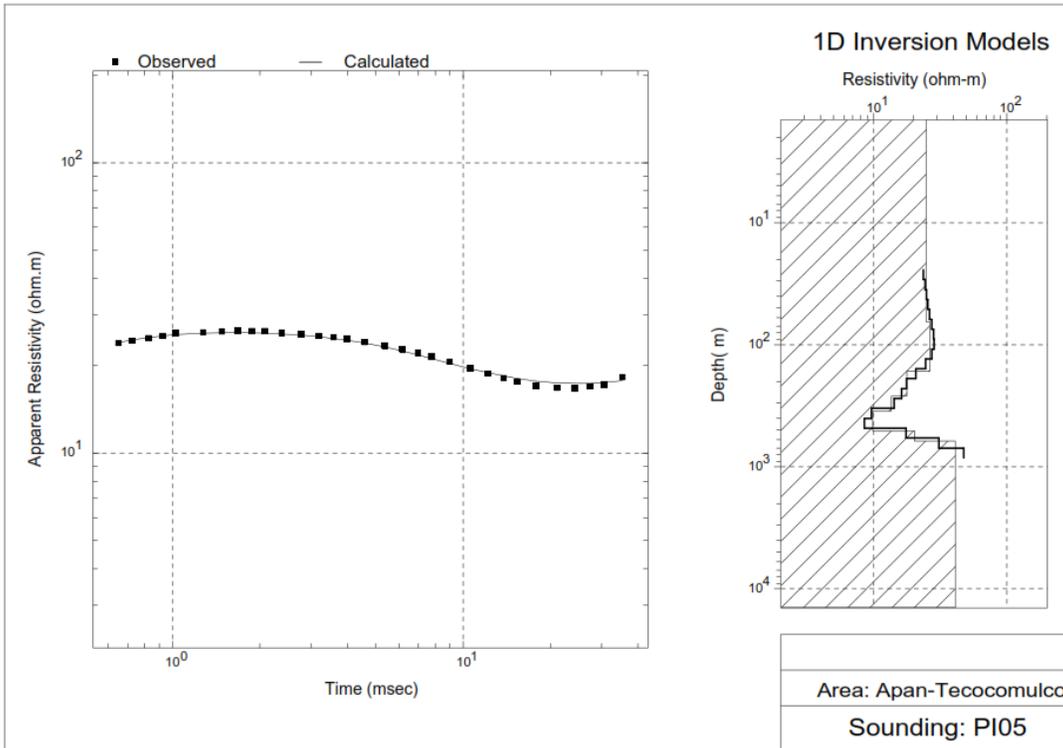


ESTUDIO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDAD ELECTROMAGNÉTICA PARA DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS DEL ACUÍFERO APAN EN UN PREDIO DELIMITADO



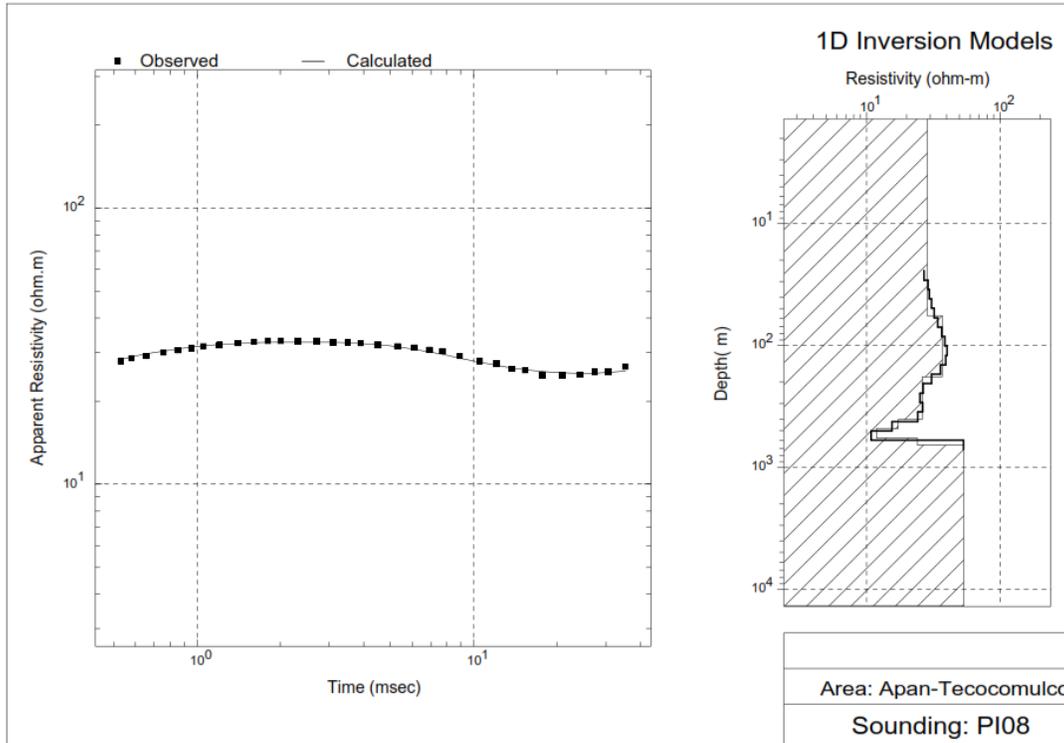
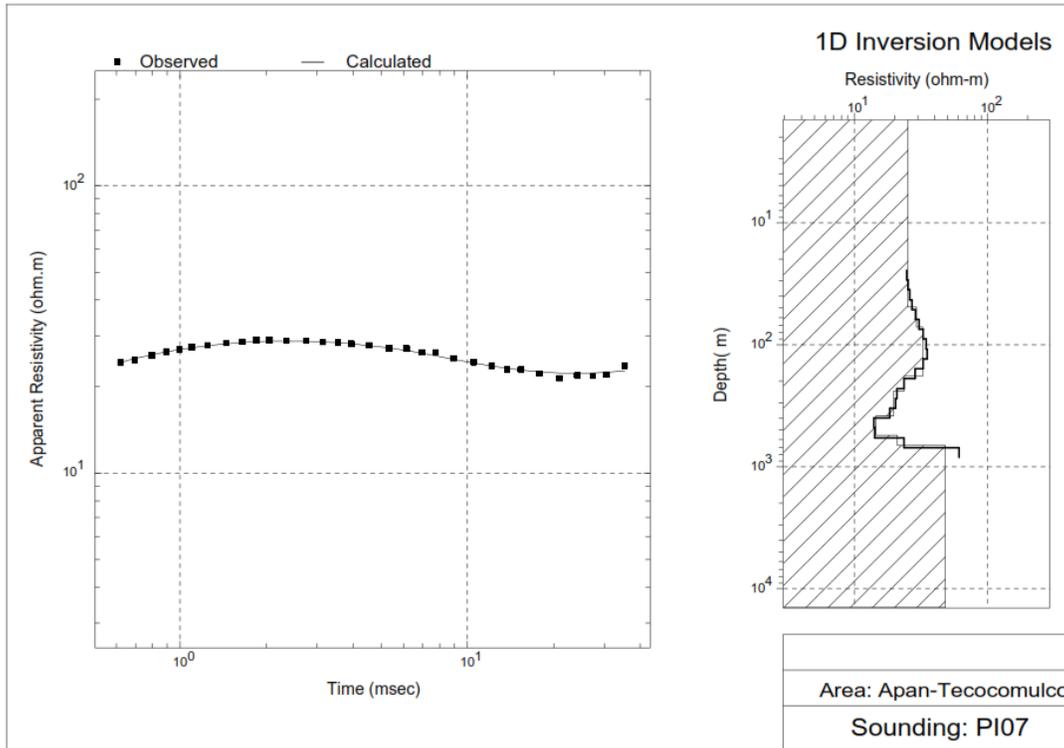


ESTUDIO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDAD ELECTROMAGNÉTICA PARA DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS DEL ACUÍFERO APAN EN UN PREDIO DELIMITADO



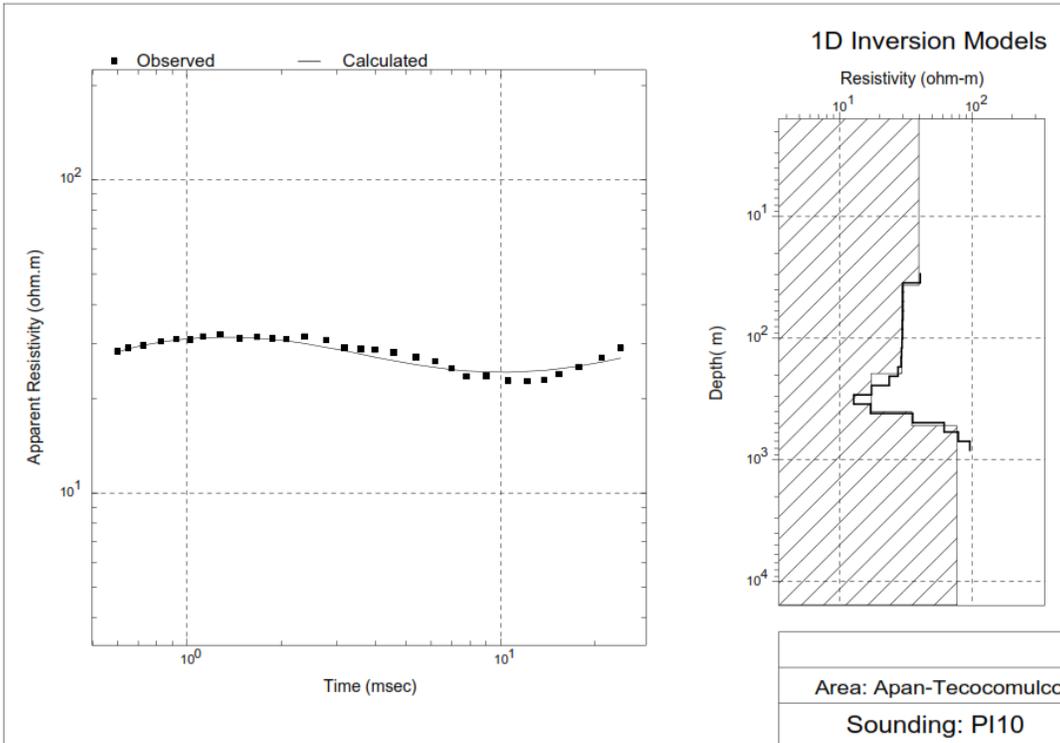
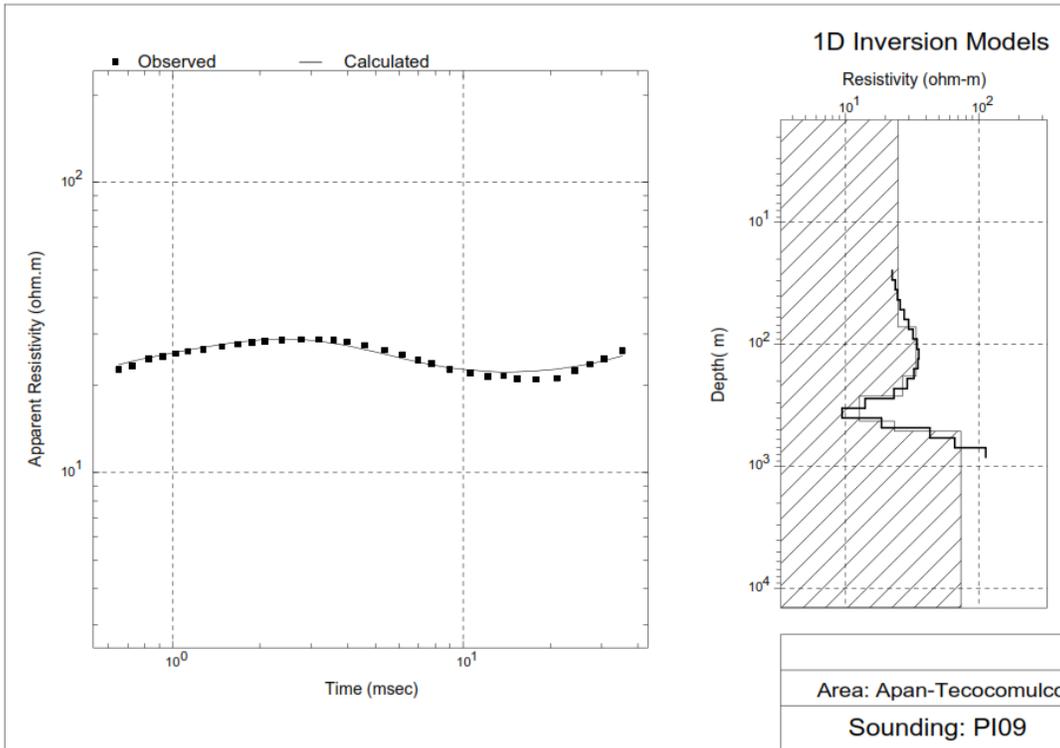


ESTUDIO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDAD ELECTROMAGNÉTICA PARA DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS DEL ACUÍFERO APAN EN UN PREDIO DELIMITADO



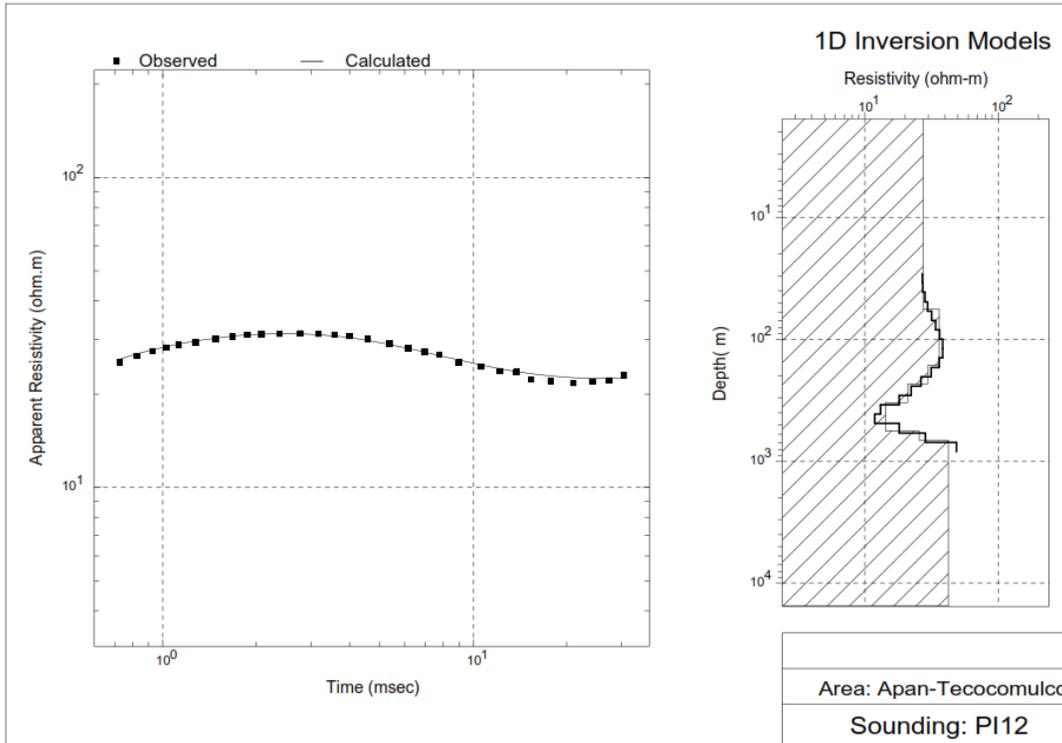
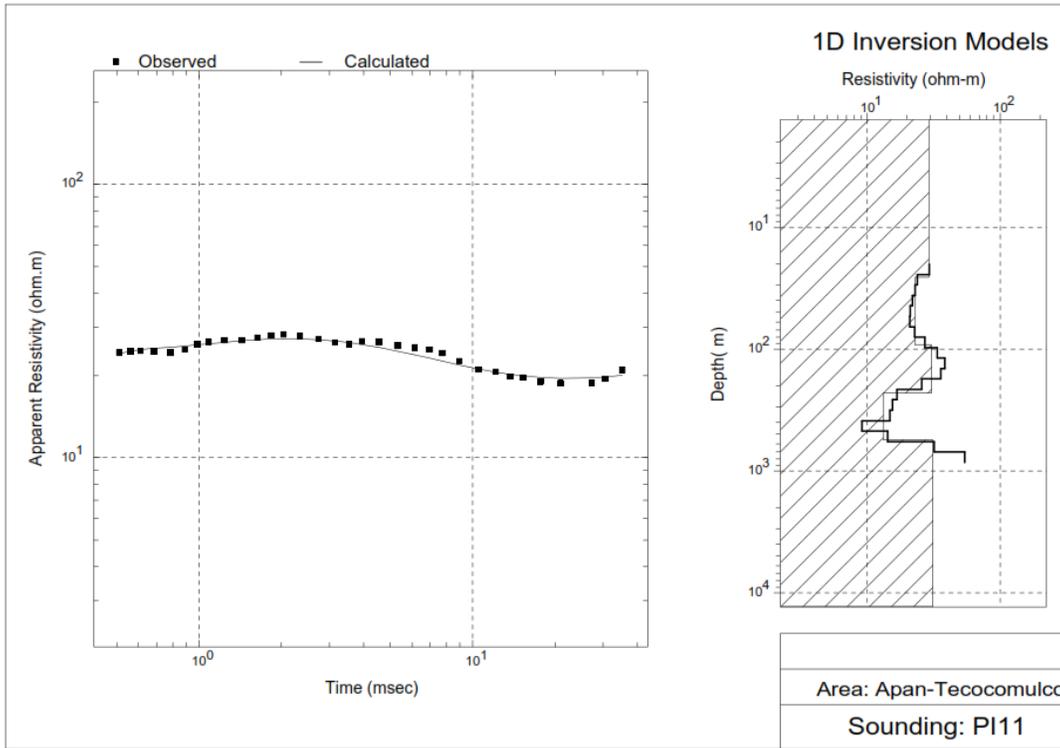


ESTUDIO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDAD ELECTROMAGNÉTICA PARA DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS DEL ACUÍFERO APAN EN UN PREDIO DELIMITADO



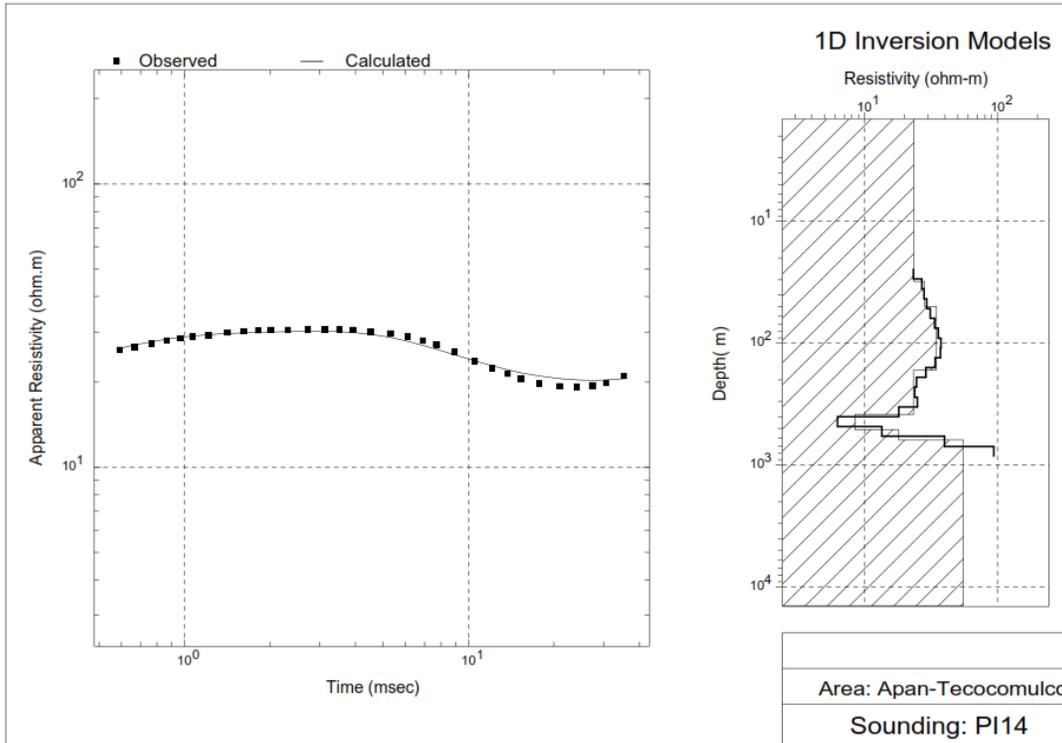
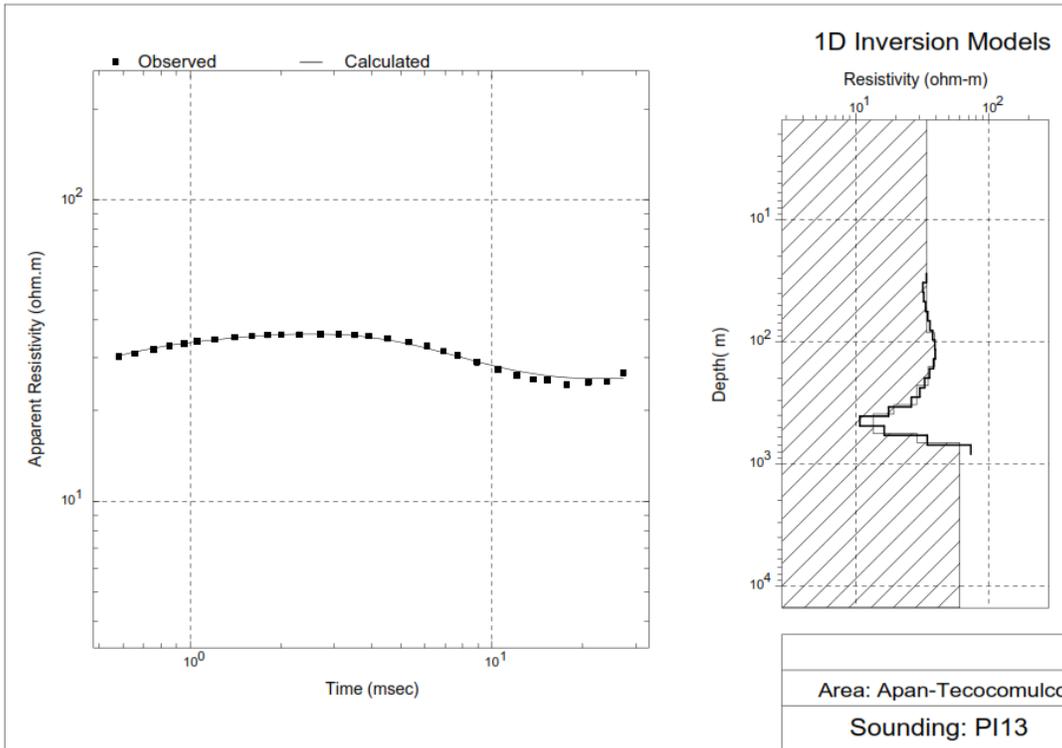


ESTUDIO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDAD ELECTROMAGNÉTICA PARA DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS DEL ACUÍFERO APAN EN UN PREDIO DELIMITADO





ESTUDIO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDAD ELECTROMAGNÉTICA PARA DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS DEL ACUÍFERO APAN EN UN PREDIO DELIMITADO





ESTUDIO GEOFÍSICO DE RESISTIVIDAD ELECTROMAGNÉTICA PARA DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS GEOHIDROLÓGICAS DEL ACUÍFERO APAN EN UN PREDIO DELIMITADO

