



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Caracterización geoelectrica
superficial con el método transitorio
electromagnético en Acapulco,
Puebla**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Dávila Lamas Luis Antonio

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Claudia Arango Galván



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

Le agradezco a mi familia, en especial a mi madre Yolanda y mi padre Alberto que tuvieron la paciencia y me otorgaron su apoyo incondicional para que pudiera llegar a estas instancias.

Le agradezco a mi asesora Dra. Claudia Arango Galván por su enseñanza a lo largo de la carrera, así como su disposición para explicarme en cualquier momento y duda que surgiera durante este proceso.

Le agradezco a mis hermanos Daniel y Eduardo que fueron una guía para mí y siempre me compartieron sus experiencias y conocimiento para mejorar.

Le agradezco a Nayeli por ayudarme a crecer como persona y estar a mi lado para lograr mis objetivos en todo momento.

Le agradezco a mis amigos que hice en la facultad y en bachillerato que fueron pilares para poder completar la carrera, volviendo más agradable la experiencia y las complicaciones que se presentaron durante este proceso.

Le agradezco a mis profesores de la facultad de Ingeniería, en especial a mis profesores de jurado, que siempre estuvieron dispuestos a compartir su enseñanza y demostrar su vocación.

Le agradezco a la UNAM por brindarme la oportunidad de estudiar una carrera profesional en las mejores instalaciones posibles, así como los profesores capacitados para poder crear a los profesionistas de este país.

Índice

Resumen	1
Objetivos	2
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas	3
1. Introducción.....	5
2. Fundamentos Teóricos.....	6
2.1. Introducción a los métodos Electromagnéticos	6
2.1.1. Ecuaciones de Maxwell	6
2.1.2. Relaciones Constitutivas	7
2.1.3. Ecuación de Onda.....	8
2.2. Principios Básicos del Transitorio Electromagnético.....	11
2.2.1. Respuesta de una Bobina Horizontal Grande	14
2.2.2. Concepto de Resistividad Aparente.....	16
2.2.3. Configuración de los Sondeos TEM.....	17
2.2.4. Profundidad de Investigación	19
2.2.5. Fuentes de Error y Ruido.....	19
3. Geología del Lugar	20
3.1. Localización.....	21
3.2. Estratigrafía.....	22
3.3. Geología Superficial	23
3.4. Geología Estructural	25
4. Adquisición de Datos	26
5. Procesamiento y Resultados	29
6. Análisis de Resultados.....	36
7. Conclusiones.....	40
8. Recomendaciones	42
9. Anexo	43
10. Referencias	73

Resumen

Se realizó una caracterización geoelectrica en la zona interior del Complejo Calderico de Acoculco (CCA), ubicado al norte del estado de Puebla, con el método Transitorio Electromagnético (TEM). Se realizó un modelo 3D usando un interpolador con el método de Distancia Inversa para poder inferir las litologías superficiales a lo largo de la zona de estudio.

El objetivo es proporcionar información acerca de la geología superficial, cerca de 500 metros de profundidad, para que futuras investigaciones puedan determinar la viabilidad y zonas ideales para el aprovechamiento geotérmico del CCA.

Abstract

A geoelectric characterization was carried out in the interior zone of Acoculco Calderic Complex (ACC), located in the north of Puebla, Mexico, with the Transient Electromagnetic Method (TEM). A 3D model was made using an interpolator with the Inverse Distance method to be able to infer surface lithologies throughout the study area.

The objective is provide information about the surface geology, about 500 meters deep, so future research can determine the feasibility and ideal areas for the geothermal use of the ACC.

Objetivos

El objetivo general de la tesis es realizar una caracterización superficial de la resistividad eléctrica a partir de un Modelo 3D, usando el método Transitorio Electromagnético.

Los objetivos particulares planteados son los siguientes:

- Generar una única curva de voltaje de salida para cada estación a partir de 15 muestras.
- Generar un modelo de inversión a partir de la curva de resistividad aparente.
- Crear un modelo 3D usando el modelo de inversión para cada estación, y determinar la factibilidad del método de interpolación de Distancia Inversa para medios anisotrópicos.
- Inferir las litologías presentes en los primeros 500 metros de profundidad en el área de estudio.
- Complementar información de la zona para determinar la factibilidad de un posible yacimiento geotérmico.

Índice de Figuras

Figura 2.1 Las líneas de campo dentro de una superficie Gaussiana.....	7
Figura 2.2 Principio del método TEM	12
Figura 2.3 Curvas de decaimiento de fuerza electromagnética	13
Figura 2.4 Formas de onda producidas durante un levantamiento de TEM	13
Figura 2.5 Componente vertical del campo magnético de un alambre circular	16
Figura 2.6 Distintas configuraciones de sondeos TEM	18
Figura 3.1 Ubicación de Acoculco, Puebla	21
Figura 3.2 Columna estratigráfica del complejo de la caldera de Acoculco	23
Figura 3.3 Geología superficial de la caldera de Acoculco	24
Figura 3.4 Mapa topográfico de Acoculco Puebla	25
Figura 3.5 Geología Estructural de la Caldera Acoculco	26
Figura 4.1 Mapa de estaciones en Acoculco, Puebla	27
Figura 5.1 Señal de ruido de la estación AC008	29
Figura 5.2 Señal registrada de la estación AC060	31
Figura 5.3 Curva de resistividad aparente de la estación AC040	32
Figura 5.4 Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC040	32
Figura 5.5 Imagen superficial del modelo 3D generado a partir del modelo invertido de cada estación	34
Figura 5.6 Imagen 2D del modelo a 50 metros de profundidad	34
Figura 5.7 Imagen 2D del modelo a 100 metros de profundidad	35

Figura 5.8 <i>Imagen 2D del modelo a 250 metros de profundidad</i>	35
Figura 6.1 Unidades geoelectricas identificadas dentro del modelo 3D	36
Figura 6.2 Imagen del modelo superficial en [Ohm*m] dentro de la zona de estudio	37
Figura 6.3 Modelo 3D visto desde una perspectiva lateral oriental para determinar la unidad geoelectrica A	38
Figura 6.4 Modelo 3D visto de planta para determinar la unidad geoelectrica B	39
Figura 6.5 Modelo 3D visto de planta para determinar la unidad geoelectrica C	40

Índice de Tablas

Tabla 4.1 Serie de tiempo HR	28
Tabla 5.1 Valor máximo de ruido en cada estación	30
Tabla 6.1 Unidades geoelectricas observadas en el Modelo 3D	36

1. Introducción

A través de la historia la humanidad ha demostrado que su constante búsqueda de conocimiento requiere una gran cantidad de recursos y avances tecnológicos, dependiendo de la época existirán algunos recursos más demandados que otros, sin embargo, esos mismos avances han traído consigo una gran cantidad de problemas a nivel global. El más importante es el calentamiento global; generado por las emisiones de gases invernadero a la atmósfera, principalmente por la quema de combustibles fósiles para la producción de energía.

La constante demanda energética ha generado que se busquen distintas alternativas para reducir la huella de emisión de carbono en el mundo. La energía geotérmica se ha presentado como una nueva alternativa, que sigue en desarrollo, y ha surgido para diversos usos como lo es la producción de electricidad, calefacción, invernadero, entre otros. Actualmente, abarca solo el 0.4% de la energía mundial producida, no obstante, en México presenta el 1.6% de la electricidad producida en el país, generando 935 MW en tan solo cinco campos geotérmicos (Santiago-Villeda et al., 2022).

De acuerdo a diversos autores (Mercado, 1976; Alonso, 1985; Ordaz et al., 2011) se ha estimado el potencial de la cantidad de energía geotermoeléctrica a partir de la colocación de distintos campos a lo largo del territorio mexicano, dando un aproximado de 13 000, 12 000 y 9 600 MW, respectivamente. Lo que indica que México podría incrementar su producción de electricidad con el uso de esta energía renovable si se invierte en distintas zonas del país.

El uso de métodos geofísicos es indispensable para poder localizar las zonas que podrían explotar la energía proveniente del subsuelo. El método Transitorio Electromagnético (TEM) ha sido una herramienta importante dada su precisión, resolución para poder caracterizar y calcular la distribución de resistividad en el medio que se desea investigar, sobre todo en las primeras centenas de metros.

El presente trabajo abordará un estudio en la localidad de Acoculco, ubicado en el municipio de Chignahuapan en el estado de Puebla, México. Dentro de éste se realizaron 60 perfiles del método TEM para determinar la distribución de resistividad del suelo, así como realizar una caracterización superficial de la zona a partir de un modelo geoelectrico.

2. Fundamentos Teóricos

2.1. Introducción a los métodos Electromagnéticos

La prospección electromagnética consiste en la lectura de los campos eléctricos y magnéticos emitidos ya sea de forma natural dentro de un área de interés o por un pulso emitido de manera artificial como fuente de energía, además, es necesario un receptor capaz de adquirir la señal de respuesta con el objetivo de determinar propiedades del subsuelo como lo es la resistividad, conductividad, entre otras, a una frecuencia o tiempos específicos (Nabighian y Corbett, 1987).

2.1.1. Ecuaciones de Maxwell

De acuerdo a Sengupta y Sarkar (2003), James Maxwell propuso en 1864 la Teoría Dinámica del Campo Electromagnético que generó un cambio radical en el pensamiento de la Teoría Electromagnética al juntar distintas leyes preestablecidas de autores como Faraday, Ampere y Gauss. En su teoría manifestó que existen cuatro ecuaciones que están relacionadas entre sí y son parte de un mismo fenómeno que se conoce actualmente como Ondas Electromagnéticas. A pesar de que su teoría fue confirmada después de su muerte, Maxwell dio paso a un desarrollo tecnológico que hasta la fecha sigue en aumento.

La primera ecuación corresponde a la Ley de Faraday o Ley de la Inducción electromagnética en la cual se declara que un campo eléctrico genera un campo magnético variable en el tiempo.

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

donde \bar{E} es el vector de campo eléctrico y \bar{B} el vector de inducción magnética.

La Ley de Ampere o Ley de las corrientes establece que un campo magnético es generado únicamente por las corrientes que recorren un área determinada:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

donde \vec{H} es el vector del campo magnético, \vec{J} el vector de densidad de corriente y \vec{D} el vector de desplazamiento eléctrico.

La ley de Gauss para campos eléctricos determina que un campo eléctrico generado en una superficie Gaussiana (superficie equipotencial) es producido por la densidad de carga contenida en dicha superficie.

$$\nabla \times \vec{D} = q \quad (2.3)$$

donde q es la densidad de carga volumétrica

Finalmente, la última ecuación corresponde a la Ley de Gauss para campos magnéticos que afirma la inexistencia de los monopolos magnéticos, esto se debe a que las líneas de campo magnético se consideran cerradas, de forma tal que el flujo magnético que atraviesa una superficie Gaussiana es cero (Barco-Ríos et al., 2012), esto quiere decir, como se muestra en la Figura 2.1 que no existe un origen del cual partan las líneas de campo.

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

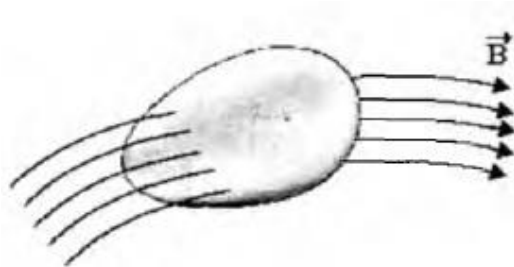


Figura 2.1. Las líneas de campo dentro de una superficie Gaussiana (Barco-Ríos et al., 2012)

2.1.2. Relaciones Constitutivas

Para cada uno de los vectores previamente descritos para los campos eléctricos y magnéticos existen ecuaciones que los relacionan, a éstas se les conoce como relaciones constitutivas, se encuentran dentro del dominio de la frecuencia y son (Nabighian y Corbett, 1987):

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.5)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E} \quad (2.7)$$

donde μ es la permeabilidad magnética y se define como la capacidad de un material para permitir que un flujo magnético pase a través de este y se denota con las unidades [H/m]; σ es la conductividad y es la capacidad de un material para permitir que circule corriente eléctrica a través de ellos, se denota con las unidades [S/m]; y ε la permeabilidad eléctrica cuya función es determinar que tanta carga eléctrica puede almacenar un material y se denota con las unidades [F/m]. Es importante señalar que cada una de las propiedades previamente descritas son tensores y solo en los casos donde el medio sea considerado homogéneo, lineal e isotrópico puede usarse como un valor escalar.

2.1.3. Ecuación de Onda

Cada uno de los fenómenos electromagnéticos se basan en la propagación de una onda electromagnética a través de un medio, es por eso que se requiere una función matemática que describa dicho fenómeno (Ward y Hohmann, 1988). La ecuación de onda es aquella que toma en consideración las propiedades físicas del medio sobre el cual se está investigando y es importante señalar que éste debe ser homogéneo, lineal e isotrópico. La ecuación parte de la aplicación de un rotacional a la Ley de Faraday, definida en la ecuación (2.1):

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{E}) = \nabla \times \left(-\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}\right) \quad (2.8)$$

Se hará uso de la relación de la ecuación (2.5) y se procede a sustituir el rotacional del campo magnético con la Ley de Ampere dando como resultado:

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{E}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\sigma \bar{E} + \varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}) \quad (2.9)$$

De acuerdo a Marsden y Tromba (1991) existe una identidad vectorial que es la ecuación (2.10) y será sustituida en la (2.9):

$$\nabla \times (\nabla \times A) = \nabla(\nabla \cdot A) - \nabla^2 A \quad (2.10)$$

$$\nabla(\nabla \cdot \bar{E}) - \nabla^2 \bar{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\sigma \bar{E} + \varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}) \quad (2.11)$$

Posteriormente se procede a que el campo eléctrico se cambie al dominio de la frecuencia y se considera que en el medio no hay carga, por lo que la divergencia del campo eléctrico se reduce a cero:

$$-\nabla^2 \bar{E} = -\mu \left(\sigma \frac{\partial}{\partial t} E_0 e^{-i(\omega t - \varphi)} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} E_0 e^{-i(\omega t - \varphi)} \right) \quad (2.12)$$

donde E_0 es la amplitud inicial del campo eléctrico, ω es la frecuencia angular y φ la fase.

Se realiza la derivada y se regresa de dominio:

$$-\nabla^2 \bar{E} = -\mu(\sigma(-i\omega\bar{E}) - \varepsilon\omega^2\bar{E}) \quad (2.13)$$

Se factorizan los campos eléctricos y despeja para dar como resultado:

$$\nabla^2 \bar{E} + (\varepsilon\omega^2\mu + i\omega\mu\sigma)\bar{E} = 0 \quad (2.14)$$

Finalmente se introduce una nueva constante conocida como constante de propagación que contiene las propiedades electromagnéticas del medio y se define como:

$$\gamma^2 = \varepsilon\omega^2\mu + i\omega\mu\sigma \quad (2.15)$$

Dando paso a la ecuación de onda para el campo eléctrico:

$$\nabla^2 \bar{E} + \gamma^2 \bar{E} = 0 \quad (2.16)$$

Para el campo magnético se realiza un procedimiento similar pero que parte de la Ley de Ampere (2.2), se procede a usar las relaciones constitutivas y el rotacional:

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{H}) = \sigma(\nabla \times \bar{E}) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \bar{E}) \quad (2.17)$$

Se aplica nuevamente la identidad de la ecuación (2.10) y sustituir la Ley de Faraday en ambos términos:

$$\nabla(\nabla \cdot \bar{H}) - \nabla^2 \bar{H} = \sigma(-\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (-\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}) \quad (2.18)$$

Dada la Ley de Gauss para campos magnéticos se elimina un término y se cambia al dominio de la frecuencia para poder realizar la derivada con respecto al tiempo:

$$-\nabla^2 \bar{H} = \sigma(-\mu \frac{\partial}{\partial t} H_0 e^{-i(\omega t - \varphi)}) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (-\mu \frac{\partial}{\partial t} H_0 e^{-i(\omega t - \varphi)}) \quad (2.19)$$

Se procede a realizar las derivadas y se cambia nuevamente de dominio:

$$-\nabla^2 \bar{H} = \sigma(-\mu i \omega \bar{H}) + \varepsilon(-\mu \omega^2 \bar{H}) \quad (2.20)$$

Se factoriza el campo magnético y se obtiene un resultado similar al del campo eléctrico:

$$\nabla^2 \bar{H} + (\varepsilon \omega^2 \mu + i \omega \mu \sigma) \bar{H} = 0 \quad (2.21)$$

Nuevamente se sustituye la constante de propagación (2.15) que contiene las propiedades electromagnéticas del medio y se obtiene la ecuación de onda para el campo magnético:

$$\nabla^2 \bar{H} + \gamma^2 \bar{H} = 0 \quad (2.22)$$

Una vez desplegada la constante de propagación para cada una de las ecuaciones se desplegará una nueva constante que no tiene representación física directa pero que es de mucha utilidad su resolución que es γ .

$$\gamma = \alpha + \beta i \quad (2.23)$$

donde α es la constante de fase y β es la constante de atenuación, es importante demostrar que cada uno de los valores anteriores proceden de las propiedades electromagnéticas del medio y se describen como:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu \omega}{2} [\sqrt{\sigma^2 + \varepsilon^2 \omega^2} + \varepsilon \omega]} \quad (2.24)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu \omega}{2} [\sqrt{\sigma^2 + \varepsilon^2 \omega^2} - \varepsilon \omega]} \quad (2.25)$$

Para poder dar una solución es necesario recurrir a las condiciones de frontera y las condiciones iniciales a las cuales se encuentra sujeta la onda electromagnética (Banjai y Sauter, 2009). Siendo la primera que dentro de un dominio espacial de tres dimensiones la onda se considera constante en ambas direcciones horizontales, únicamente varía respecto a la profundidad, por lo tanto, el operador Laplaciano de la ecuación (2.16) y (2.22) se convierte en una segunda derivada respecto a la profundidad, dando como resultado:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} E_z + \gamma^2 E_z = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} H_z + \gamma^2 H_z = 0 \quad (2.27)$$

La resolución para la ecuación de onda de segundo orden es propuesta por Ward y Hohmann (1988) para ambos campos y son:

$$\bar{E} = E_0 e^{-i(\gamma z - \omega t)} + E_0 e^{i(\gamma z + \omega t)} \quad (2.28)$$

$$\bar{H} = H_0 e^{-i(\gamma z - \omega t)} + H_0 e^{i(\gamma z + \omega t)} \quad (2.29)$$

Considerando que conforme aumenta la profundidad la amplitud decae hasta ser cero se simplifica la resolución y da como resultado las siguientes ecuaciones que describen la amplitud a cierta profundidad tanto del campo eléctrico como del magnético:

$$\bar{E} = E_0 e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad (2.30)$$

$$\bar{H} = H_0 e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad (2.31)$$

Dentro de ambas ecuaciones se observa que tienen una gran similitud, se componen de una amplitud inicial y tres factores exponenciales; el primero corresponde a la constante de fase, es un número imaginario y propone un comportamiento sinusoidal conforme aumenta la profundidad; el segundo que contiene la constante de amplitud que al ser un valor real indica el decaimiento del campo conforme aumenta la profundidad; y el último factor señala que tanto el campo eléctrico como magnético tendrán un comportamiento sinusoidal conforme aumenta el tiempo.

2.2. Principios Básicos del Transitorio Electromagnético

El método de sondeo geoelectrico por Transitorio Electromagnético (TEM) surgió como un procedimiento dentro de los métodos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (TDEM) capaz de caracterizar la distribución de resistividad en el subsuelo. Una de las ventajas que presenta contra los métodos convencionales de prospección eléctrica es que permite una investigación desde las decenas hasta unas cuantas centenas de metros de profundidad sin necesidad

de abarcar una gran extensión en la superficie y otorga buena resolución (Stewart y Gay, 1986).

El TEM consiste en colocar un cable en la superficie de interés que se conecta a un dispositivo transmisor que emite una corriente alterna por el cable hasta llegar a tener un campo electromagnético invariante; súbitamente se corta y el campo magnético primario producido por el cable, lo que genera corrientes inducidas en el subsuelo conocidas como corrientes de Eddy, Ley de Faraday, que a su vez comienza un proceso en cadena que se va transmitiendo de capa en capa (Figura 2.2). En una bobina receptora, pudiendo ser el mismo cable conectado al transmisor o algún otro cable externo, se registra la diferencia en el campo magnético secundario producido por las corrientes inducidas, este valor se conoce como el voltaje de salida. Este voltaje de salida es dependiente de las propiedades electromagnéticas del medio, la profundidad de las estructuras, entre otras (McNeill, 1980b). Mientras el material sea más conductivo la curva de decaimiento del voltaje de salida caerá de forma más lenta, esto quiere decir que si el material es muy resistivo la amplitud llegará a cero con mayor rapidez y viceversa, como se muestra en la Figura 2.3.

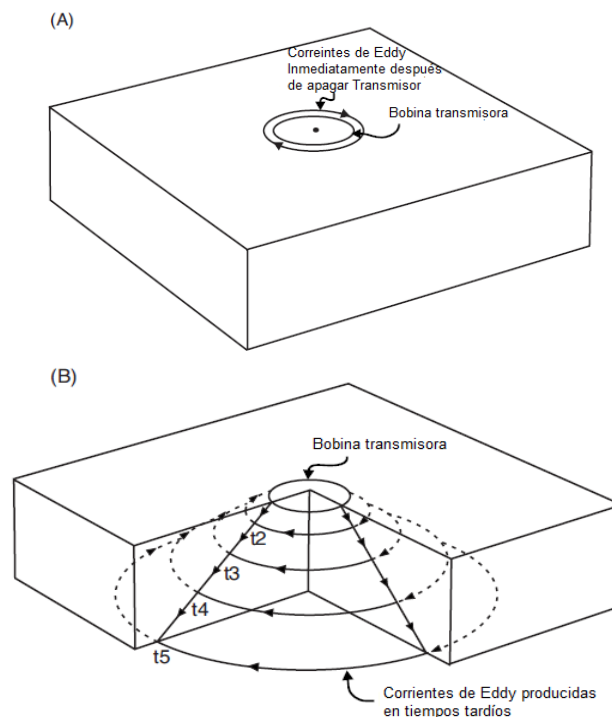


Figura 2.2. Principio del método TEM, inducción de corrientes por el campo magnético primario y transmisión en cadena, respectivamente (Reynolds, 2013).

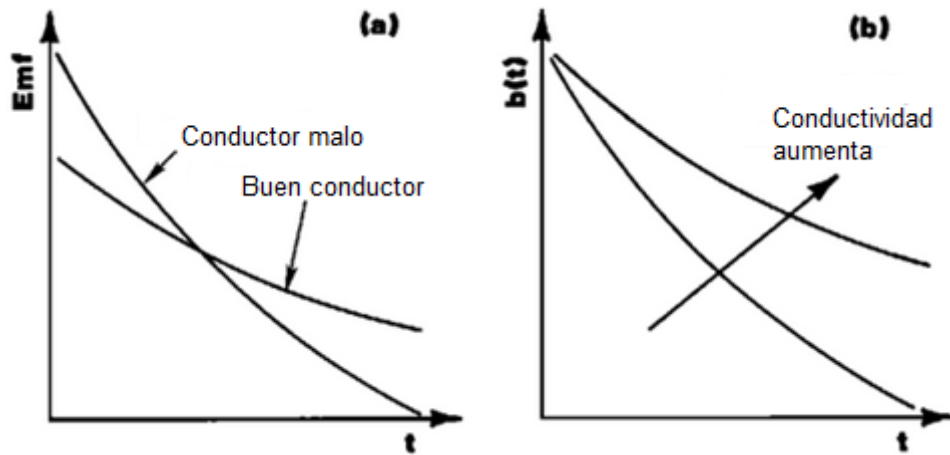


Figura 2.3. Curvas de decaimiento de fuerza electromagnética y diferencia de cambio magnético, izquierda y derecha respectivamente, donde muestra el comportamiento de acuerdo a la conductividad (Nabighian y Corbett, 1987).

En la Figura 2.4 se muestra las formas de onda de cada una de los instrumentos usados, donde la primera corresponde al campo magnético primario producido por el transmisor, el segundo corresponde a la fuerza electromagnética producida al momento de cortar súbitamente el campo primario, y la última corresponde al campo magnético secundario registrado por la bobina receptora.

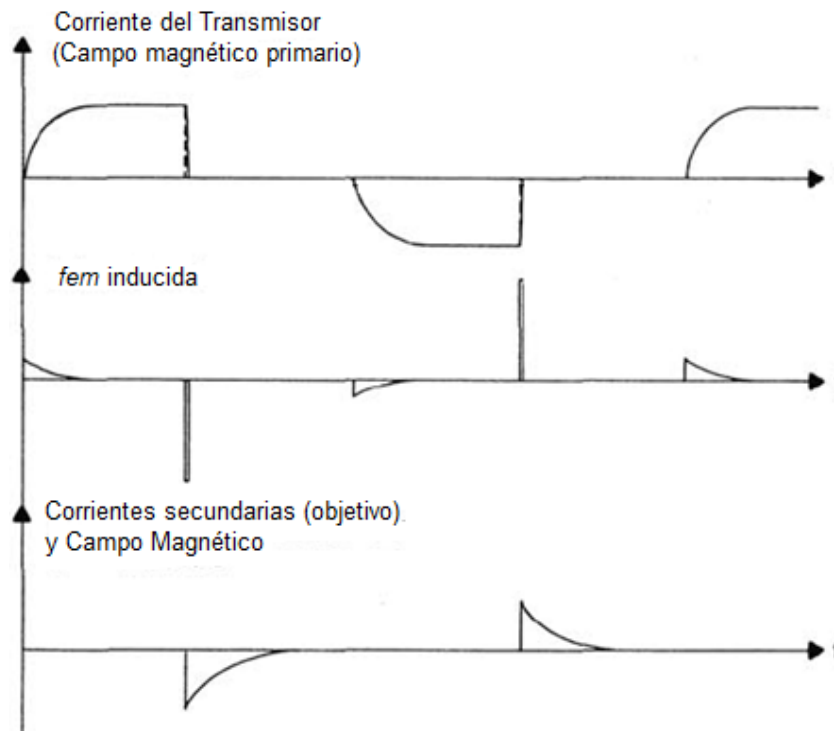


Figura 2.4. Formas de onda producidas durante un levantamiento de TEM (McNeill, 1980b).

Es importante resaltar que en las formas de onda la fuerza electromagnética (fem) y el campo secundario tienen una polaridad inversa a la del campo primario, esto es provocado por la Ley de Lenz que indica que la fem inducida debe tener un sentido tal que se oponga a la corriente que la produjo para mantener el principio de la conservación de la energía (Tippens, 1981).

Para poder crear un modelo de inversión e interpretar la respuesta de salida que indica la diferencia del campo magnético secundario producido por las corrientes inducidas es necesario separar dicha señal en tres etapas principales que son: etapa temprana, etapa intermedia y etapa final (Nabighian y Corbett, 1987). La etapa temprana se caracteriza por tener una amplitud constante dado que el campo magnético en el material se mantiene sin cambios; la intermedia se produce cuando las corrientes inducidas comienzan a propagarse por todo el medio y la energía del campo principal se disipa en todas las direcciones; y en la etapa final la resistencia e inductancia del material producen un decaimiento en la amplitud del campo magnético secundario con formas predefinidas, las cuales son la clave para poder determinar las propiedades y distribución de resistividad del medio.

2.2.1. Respuesta de una Bobina Horizontal Grande

Dentro de un levantamiento de TEM es necesario colocar un alambre con geometría cuadrada en la superficie sobre el cual se dejará pasar una corriente para poder interactuar con el medio y conocer su distribución de resistividad, sin embargo, para poder calcular la intensidad del campo magnético a una profundidad específica es necesario considerar que el transmisor es un alambre circular. Es por eso que se usa la fórmula descrita por Ward y Hohmann (1988) la cual solo considera la componente vertical del campo magnético primario y en su parte central, con el objetivo principal de evitar las heterogeneidades laterales que se presentan en la realidad

$$H_z = -\frac{I}{\gamma^2 a^3} [3 - (3 + 3i\gamma a - \gamma^2 a^2)e^{-i\gamma a}] \quad (2.32)$$

donde a es el radio de la bobina

Es necesario tener en mente que la ecuación (2.32) funciona únicamente para un campo estacionario, es por eso que se aplica una división entre $i\omega$ y la transformada inversa de Fourier, con el objetivo de poder ser aplicada a la respuesta producida por un campo transitorio.

$$H_z = \frac{I}{2a} \left[\frac{3}{\sqrt{\pi}\theta a} e^{-\theta^2 a^2} + \left(1 - \frac{3}{2\theta^2 a^2}\right) \text{erf}(\theta a) \right] \quad (2.33)$$

Donde $\text{erf}(\theta a)$ es la función de error y θ una constante definidas como:

$$\theta = \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma}{4t}} \quad (2.34)$$

$$\text{erf}(\theta a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\theta a} e^{-t^2} dt \quad (2.35)$$

donde μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío.

Es importante resaltar que la ecuación (2.33) se compone de dos partes principales, la primera corresponde al término $\frac{I}{2a}$ que depende completamente de la configuración del transmisor, es decir, la aportación del campo magnético en el espacio libre antes de que la corriente sea cortada; mientras que el resto es el segundo término cuya contribución es la del decaimiento del campo conforme se aleja de la fuente.

El siguiente paso corresponde a la derivada respecto al tiempo de la ecuación (2.33) y resulta ser fundamental para el proceso de inversión, dado que los voltajes registrados por el receptor durante los eventos del transitorio son transformados en curvas de resistividad aparentes contra el tiempo.

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{I}{\mu_0 \sigma a^3} \left[3\text{erf}(\theta a) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \theta a (3 + 2\theta^2 a^2) e^{-\theta^2 a^2} \right] \quad (2.36)$$

En la Figura 2.5 se representan dos funciones en escala logarítmica, la primera corresponde al valor de la componente vertical del campo magnético por una fuente transitoria de un alambre circular con ciertas especificaciones, mientras que la segunda muestra su derivada. No obstante, es necesario resaltar que en la etapa tardía de ambas funciones existe una tendencia a una pendiente, lo que permite desarrollar una aproximación y la ecuación (2.33) y su derivada se reescriben como funciones dependientes del tiempo que se describen como:

$$H_z \approx \frac{I\sigma^{3/2}\mu_0^{3/2}a^2}{30\sqrt{\pi}} t^{-\frac{3}{2}} \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} \approx -\frac{I\sigma^{3/2}\mu_0^{3/2}a^2}{20\sqrt{\pi}} t^{-\frac{5}{2}} \quad (2.38)$$

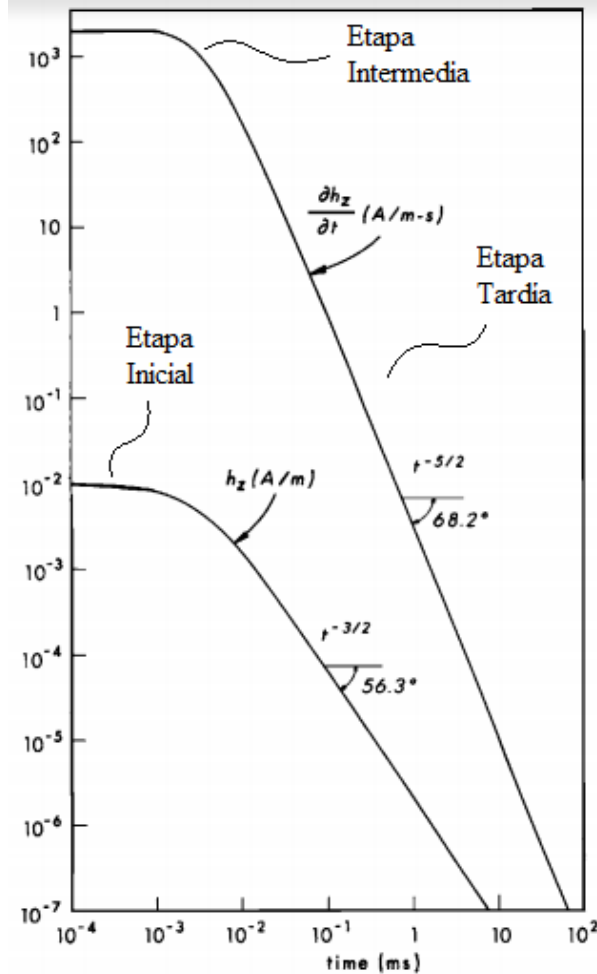


Figura 2. 5. Componente vertical del campo magnético de un alambre circular donde se muestran las etapas del transitorio (Ward y Hohmann, 1988)

2.2.2. Concepto de Resistividad Aparente

Como se mencionó en el apartado anterior, la Figura 2.5 muestra la gráfica generada por el logaritmo del voltaje de salida registrado por el receptor contra el logaritmo del tiempo la cual simplifica el cálculo de la resistividad aparente durante la etapa tardía. Es por eso que McNeill (1994) propone una nueva

ecuación que relaciona las propiedades electromagnéticas del medio con el voltaje de salida que es la siguiente:

$$e_s(t) = \frac{k_1 M \sigma^{3/2}}{t^{5/2}} \quad (2.39)$$

donde $e_s(t)$ es el voltaje de salida registrado por el receptor, M es el producto de la corriente inducida por el transmisor por el área y k_i es una constante predefinida por el autor.

Es importante resaltar que, a diferencia de los estudios convencionales de resistividad de corriente continua, los TDEM son más sensibles a las variaciones de tiempo que la geometría del transmisor, lo cual presenta una ventaja en la colocación y extensión del equipo en la superficie. Sin embargo, la conductividad presentada en la ecuación (2.39) tiene un exponente de $\frac{3}{2}$, lo que convierte el resultado de resistividad aparente más sensible a pequeñas variaciones a diferencia de otros tipos de sondeos. No obstante, se ha demostrado que conforme el tiempo incrementa también la profundidad máxima que alcanzan las corrientes inducidas lo hacen.

Finalmente, se propone una nueva ecuación que se deriva de la ecuación (2.39) la cual representa la resistividad aparente calculada a partir de la señal de salida registrada por el receptor, que es la siguiente:

$$\rho_a(t) = \frac{k_2 M^{2/3}}{e(t)^{2/3} t^{5/3}} \quad (2.40)$$

2.2.3. Configuración de los Sondeos TEM

De acuerdo a Nabighian y MacNae (1991) existen muchas configuraciones distintas de acomodo entre el transmisor y el receptor para un levantamiento de TEM, de las cuales las siguientes ocho sobresalen dada su facilidad y eficacia en campo: 1) bobina sencilla, en la cual se coloca únicamente un alambre que funciona como transmisor y receptor en forma cuadrada o rectangular y suele medir entre 5 y 200 metros de longitud (Figura 2.6 a); 2) bobina coincidente, se coloca un alambre transmisor y uno receptor con la misma geometría y en los mismos lugares (Figura 2.6 b); 3) bobina central, suele ser el más común y

consiste en colocar un alambre de transmisor y en su centro una bobina receptora de menor tamaño (Figura 2.6 c); 4) bobinas separadas por el arreglo de Slingram o por dipolo receptor, el transmisor y receptor son independientes y se encuentran separado uno de otro sin superponerse, la diferencia consiste en el tamaño del receptor siendo el primero del mismo tamaño que el transmisor y el segundo de menor, respectivamente (Figura 2.6 d); 5) bobina doble, usa dos alambres adyacentes conectados en paralelo para reducir la cantidad de ruido, puede ser con un único alambre que funcione como transmisor y receptor o con dos separados e independientes (Figura 2.6 e); 6) transmisor fijo con receptor móvil, el receptor toma constantes medidas durante su desplazamiento, el cual puede ser entre unos cientos de metros hasta dos kilómetros (Figura 2.6 f); 7) bobina en pozo, únicamente el receptor es colocado dentro del pozo; y 8) bobina en avión, tanto el receptor como transmisor se colocan en un avión para abarcar mayores distancias.

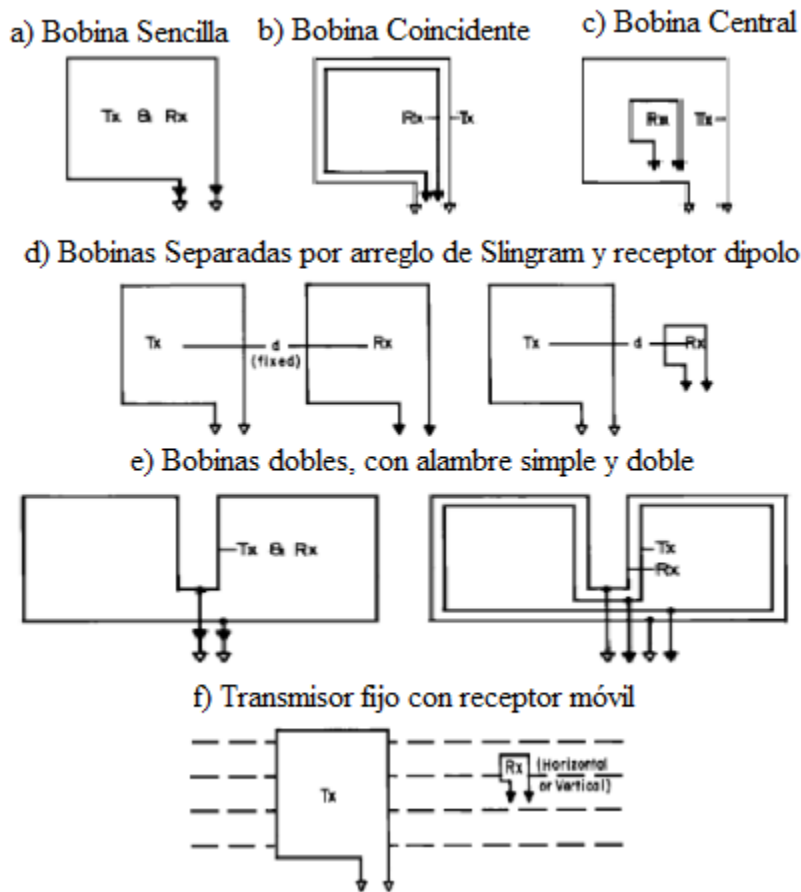


Figura 2.6. Distintas configuraciones de sondeos TEM (Nabighian y MacNae, 1991)

2.2.4. Profundidad de Investigación

Un concepto que suele ser de mucha importancia para la realización de cualquier método geofísico de exploración es el de profundidad máxima de investigación, esto se debe a que el principal objetivo es obtener buenos resultados con alta resolución y evitar desperdiciar energía o cualquier otro tipo de recurso.

Dentro del presente trabajo se explicarán dos distintas ecuaciones para poder calcular la profundidad máxima a la cual las corrientes inducidas dejarán de producir un efecto sobre el medio. Es importante resaltar que son estimaciones y no un valor absoluto, dado que, cada lugar donde se realice la prueba tiene distintas características y factores que pueden alterar el valor final.

La primera ecuación corresponde a Spies (1989) cuya investigación se basa únicamente para la zona cercana, para una bobina circular en superficie y para un medio estratificado con dos capas:

$$d_{max} = 0.55 \left(\frac{IA}{\sigma \eta_w} \right)^{1/5} \quad (2.41)$$

donde I es la corriente inyectada por el transmisor, A es el área del transmisor, σ es la conductividad del primer estrato y η_w es el nivel de ruido de voltaje en el receptor, el cual suele encontrarse en un valor aproximado de 0.5 [nV/m²].

La segunda ecuación fue desarrollada por McNeill (1980b) y se considera una distancia de difusión para un semiespacio homogéneo, esto quiere decir la posición en la cual la corriente inducida se vuelve invariante con el tiempo:

$$d = 2\pi \sqrt{\frac{2t}{\mu\sigma}} \quad (2.42)$$

2.2.5. Fuentes de Error y Ruido

Dentro de cualquier levantamiento de geofísica de exploración existen factores que deben ser considerados al momento de la adquisición de datos que son las posibles fuentes de error y ruido, esto se debe a que mientras mayor sea el conocimiento de los elementos que interfieran en la búsqueda de la señal que se

desea identificar mayor será la precisión del estudio realizado en la zona predefinida.

Para el caso de las fuentes de error, Nabighian y MacNae (1991) proponen una clasificación de tres principales que son: 1) los errores geométricos, que son aquellos presentes en la relación geométrica entre el transmisor y receptor, los principales son los efectos topográficos y pueden ser despreciables bajo ciertas condiciones; 2) efectos antropogénicos, son aquellos materiales conductivos colocados cerca del área de estudio como pueden ser líneas telefónicas, de corriente eléctrica, bancas de metal, entre otras, el efecto dentro de la respuesta del transitorio suelen ser de gran aporte y una solución es tender bobinas distribuidas simétricamente sobre el área de interés; y 3) ruido electromagnético, este puede ser producido por distintas fuentes que se explicarán a continuación.

De acuerdo a McNeill (1994) el ruido electromagnético presente en un levantamiento de TEM puede ser dividido en cuatro categorías principales que se explicarán a continuación: 1) ruido dentro del circuito, este depende de cada instrumento y conforme más moderno sea el receptor menor será su aporte; 2) ruido irradiado o inducido, que puede ser generado por señales generadas por radio o celulares, cualquier dispositivo electrónico que emita ondas electromagnéticas; 3) estructuras metálicas cercanas, este apartado se relaciona mucho con las fuentes de error antropogénicas; y 4) efectos electroquímicos, materiales con alto contenido de arcilla pueden generar polarización inducida al almacenar carga como un capacitor, para reducir su contribución suele usarse la configuración de bobina separada, ya que el suelo cerca del transmisor es aquel que más sufre de este efecto.

3. Geología del Lugar

El estado de Puebla se encuentra en su mayoría dentro de la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (TMVB), la cual se caracteriza por ser un arco volcánico de andesitas y dacitas con una extensión de 1200 km que cruza el centro de México (Palomo et al., 2002). Esta combinación de rocas andesíticas y dacíticas son derivadas del derretimiento

parcial de componentes máficos heterogéneos en la parte profunda de la corteza terrestre con materiales alcalinos.

Mooser et al. (1979) considera que la parte oriental y central de la TMVB comenzó hace 30 Ma, dejando únicamente rocas pertenecientes a los periodos neógeno y cuaternario en la parte más superficial de la provincia fisiográfica.

3.1. Localización

La localidad de Aocolco se encuentra ubicada en el Municipio de Chignahuapan, perteneciente al Estado de Puebla, México. De forma más precisa se encuentra en la parte noroccidental de Puebla, muy cerca del límite con el Estado de Hidalgo (Figura 3.1). La ciudad de Chignahuapan está a aproximadamente a 10 Km al suroriente de la localidad y a 85 km de la ciudad capital estatal de Puebla (Gama et al., 2016).

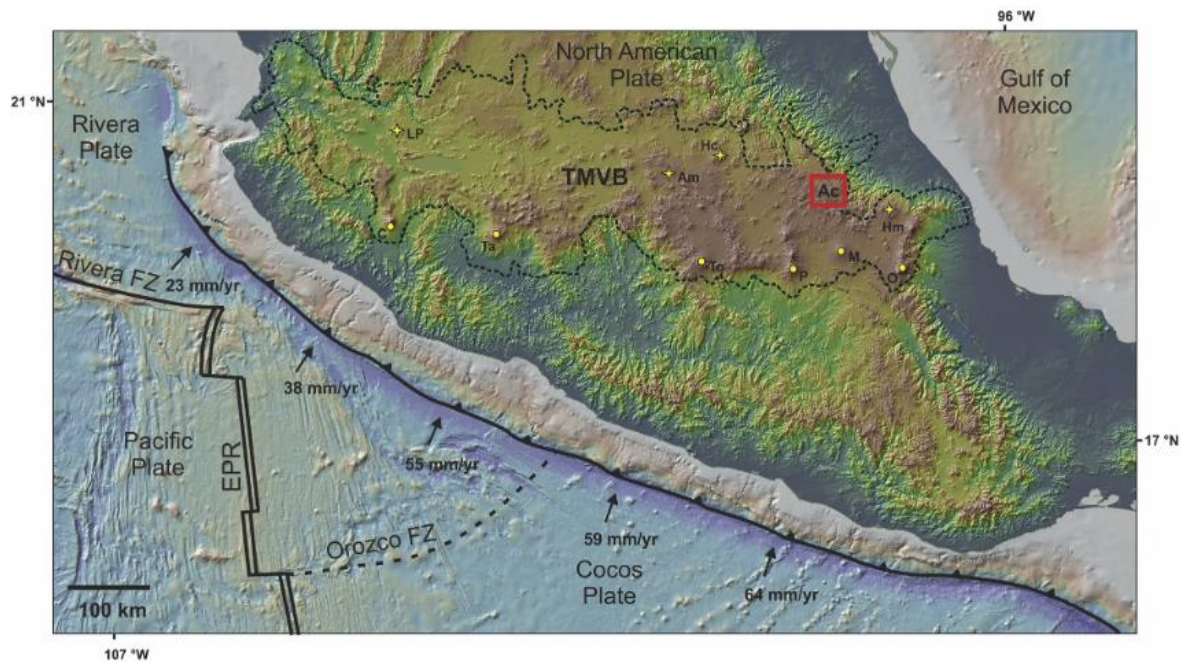


Figura 3.1. Ubicación de Aocolco, Puebla (Avellán et al. 2020).

Es importante resaltar que la localidad se encuentra sobre una estructura volcánica, que es la Caldera de Aocolco. Esta caldera tiene forma semicircular con 18 Km de diámetro, pertenece al complejo Tulancingo-Aocolco y su formación duró entre los 2.7 y 0.06 Ma (López-Hernández, 2009).

3.2. Estratigrafía

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizó dos pozos de investigación profunda en 1995, EAC-1 y EAC-2, para conocer las características de la caldera Acoculco y la secuencia estratigráfica presentes en la zona (López-Hernández, 2009). Sin embargo, estudios más recientes han otorgado información más detallada de la estructura; donde sobresalen 6 unidades principales, correspondientes a las etapas de formación de la caldera (Bolós et al., 2022; Avellán et al., 2020):

1. Basamento: Consiste en una serie de calizas del Cretácico pertenecientes a la Sierra Madre Oriental, que se encuentran en la superficie en los exteriores noreste, este y sureste de la caldera de Acoculco (Avellán et al., 2020). Este cuerpo masivo de rocas se encuentra por debajo de los 2000 msnm de altitud en la mayor parte del complejo.
2. Vulcanismo pre-caldera: El grupo está compuesto por dos principales domos de lava, Puente y Terrerillos, con edad entre los 3.9 y 3 millones de años; los domos son de roca andesítica y dacítica y se pueden encontrar en la superficie al occidente de la caldera (García-Tovar et al., 2015).
3. Syn-caldera: La unidad consta principalmente de la ignimbrita andesítica Acoculco, con una edad aproximada de 2.7 millones de años y se observa cubierta por depósitos más jóvenes en el suroeste y norte de la caldera (Avellán et al., 2020).
4. Vulcanismo post-caldera temprana: La secuencia está compuesta por flujos de lava de composición basáltica, andesítica y riolítica. Cada unidad litológica tiene distintas características y se observan en la parte interna y en el extremo de la caldera de Acoculco (Bolós et al., 2022).
5. Vulcanismo post-caldera tardía: De acuerdo a Avellán et al. (2020) las unidades que representan esta etapa de formación de la caldera son 11 domos, 5 flujos de lava y 4 conos de escoria, cada una de las estructuras tiene composición riolítica predominante y se encuentran en los bordes.
6. Vulcanismo extra-caldera: La etapa formó depósitos de ignimbrita, un domo riolítico y 5 conos de escoria de composición basáltica-andesítica en la parte sur y sureste de la caldera (Sosa-Ceballos et al., 2018). La edad aproximada de su formación es entre 0.9 y 0.6 millones de años.

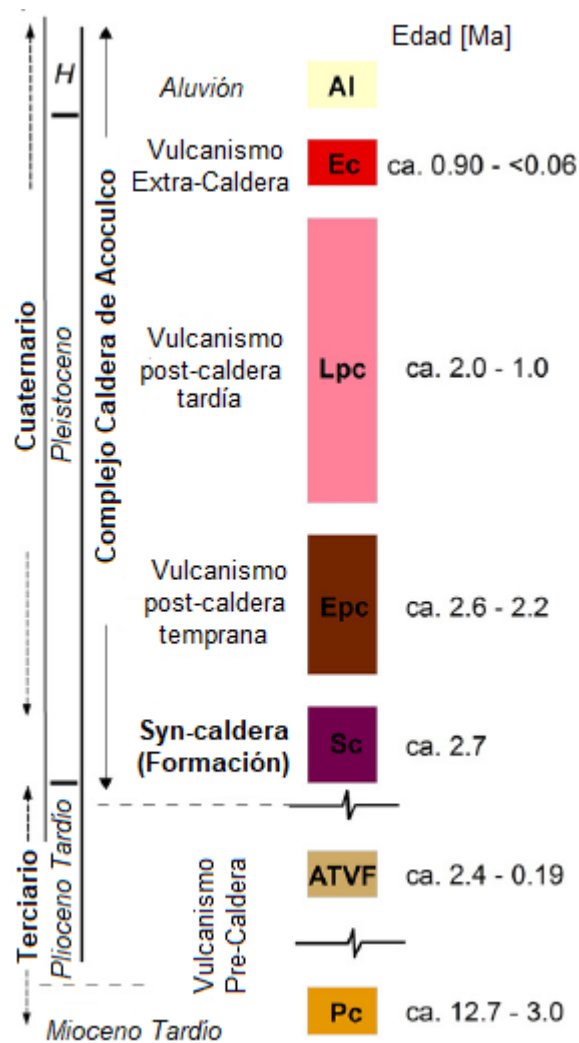


Figura 3.2. Columna estratigráfica del complejo de la caldera de Aocolco (Sosa-Ceballos et al., 2018).

3.3. Geología Superficial

Sosa-Ceballos et al. (2018) desarrollaron un mapa geológico de la caldera de Aocolco donde se demuestra la distribuci3n en superficie de los seis principales grupos presentados en la estratigrafía del presente texto. Es importante resaltar que en la Figura 3.3 se encuentra la ubicaci3n de los dos pozos realizados por CFE, adem3s las principales geologías en el centro de la caldera corresponden al evento post-caldera tardía y post-caldera temprana.

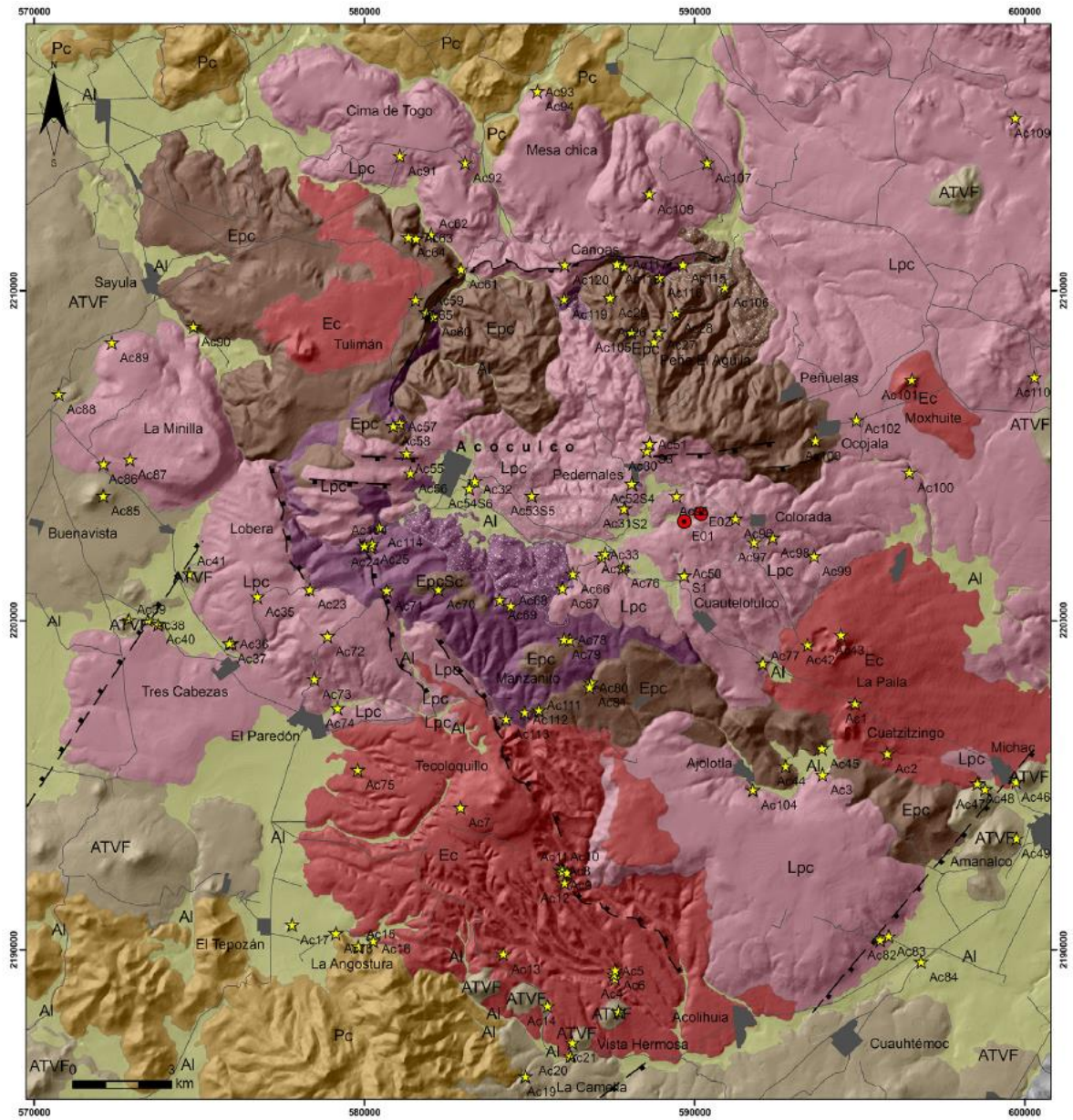


Figura 3.3. Geología superficial de la caldera de Acoculco (Sosa-Ceballos et al., 2018).

La elevación del terreno varía en unas cuantas centenas de metros, considerándose la estación más elevada y más baja de 2988 y 2656 metros sobre el nivel del mar, respectivamente. Esto quiere decir que la diferencia de altura entre cada estación debe considerarse al momento de la interpretación. La Figura 3.4 muestra un mapa de curvas de nivel donde se observa que la gran parte de la zona de estudio se encuentra entre los 2900 y 2800 msnm, mientras que el lado Norte y Este se tienen los mayores y menores valores de altitud.

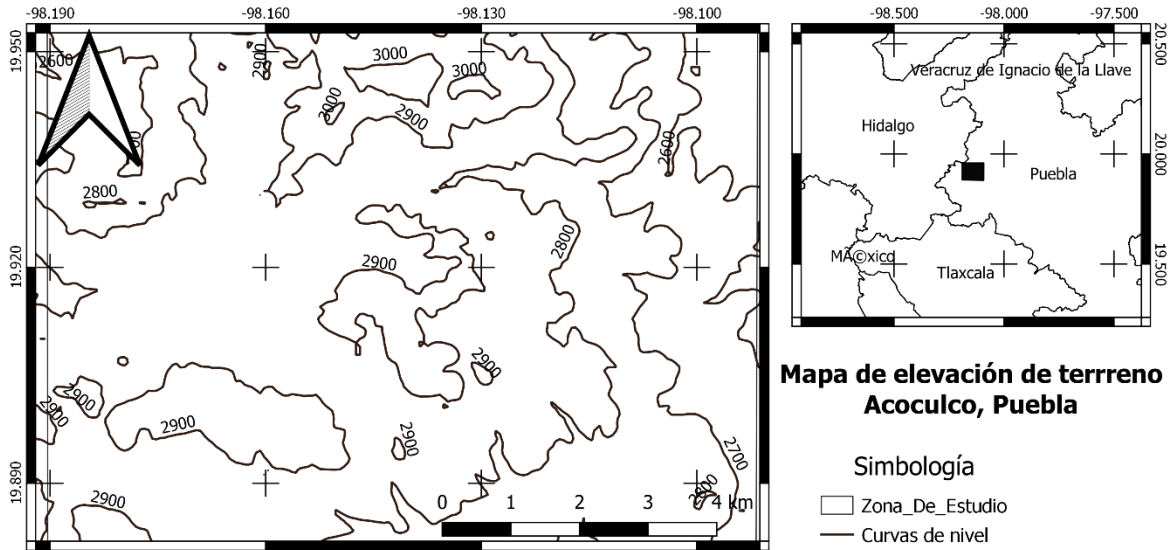


Figura 3.4. Mapa topográfico de Acozulco Puebla.

En cuanto a la presencia de ríos superficiales, el más cercano se encuentra al sur, donde el río Chignahuapan fluye hacia el norte del Estado y se separa de la zona de estudio por varios kilómetros.

3.4. Geología Estructural

El TMVB es producto de la subducción de la placa de Cocos por debajo de la norteamericana y tiene como consecuencia una serie de complejos volcánicos distribuidos a lo largo de la zona central de México.

La Caldera de Acozulco se encuentra bajo un régimen de extensión con dirección NW-SE, esto se dedujo a partir de la dirección de los diques, fracturas y fallas cercanas a la caldera (Avellán et al. 2020). Se considera tuvo origen por un episodio volcánico entre 1.7 y 0.24 millones de años que también produjo la Caldera Tulancingo (Peiffer et al., 2014). Existen dos sistemas de fallas principales cerca de la caldera, que son el Sistema de fallas Apan-Piedras Encimadas y el Sistema de fallas Tulancingo-Tlaxco (Figura 3.5), cada uno con una dirección preferencial NE-SW y NW-SE, respectivamente (López-Hernández, 2009). Es importante resaltar que el Sistema de fallas Apan-Piedras Encimadas se caracteriza por tener fallas normales asociadas con estructuras horst y graben resultantes de la dirección principal de esfuerzos en la zona de forma regional producido por el TMVB (Palomo et al., 2002).

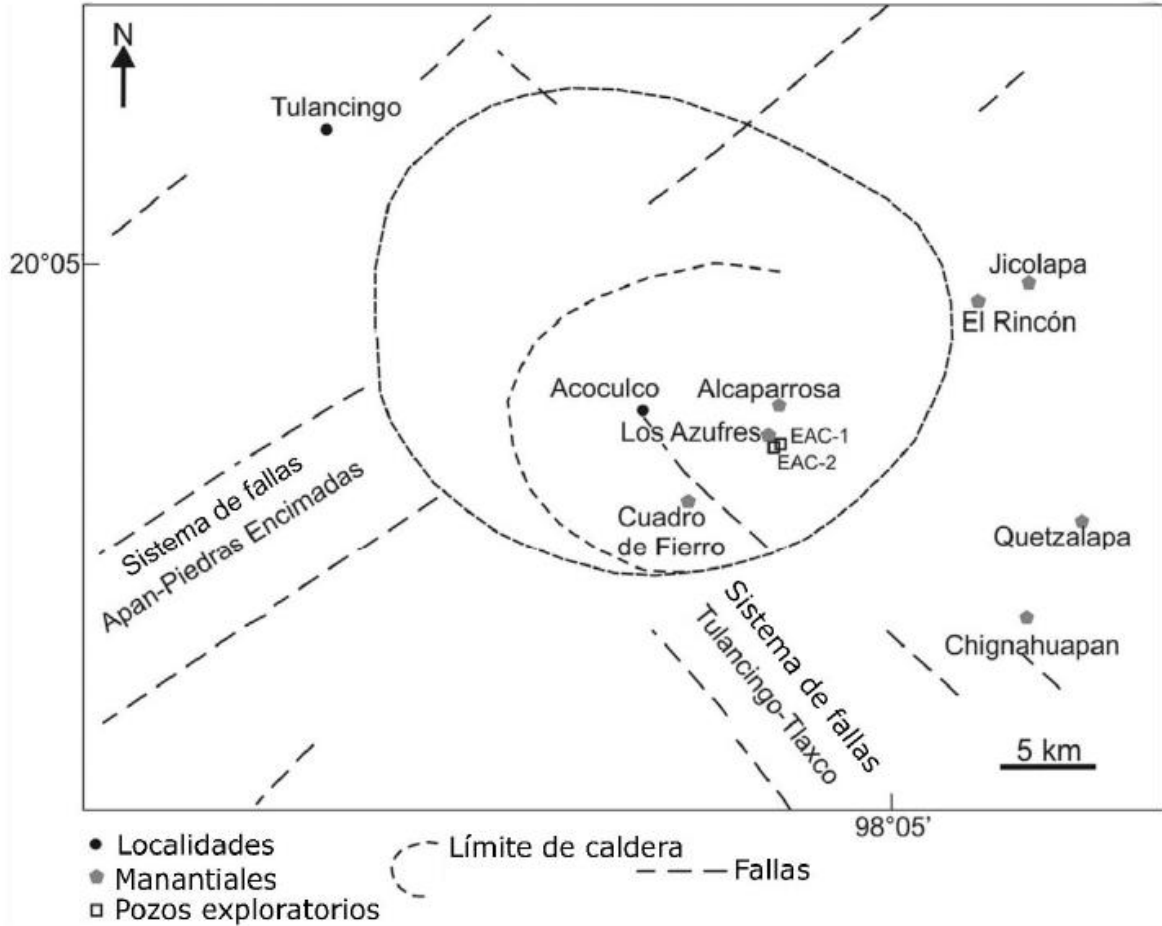


Figura 3.5. Geología Estructural de la Caldera Acoculco (Cortés, 2017)

4. Adquisición de Datos

El estudio abarca un rectángulo de aproximadamente 6700 m de ancho por 3500 m de alto y tiene una inclinación preferencial hacia el NE-SW. El proyecto inicial contemplaba 74 estaciones totales de las cuales fueron adquiridas únicamente 60, las 14 estaciones restantes fueron descartadas por motivos de acceso o permiso. En la parte interior del rectángulo existe una mayor concentración de puntos de adquisición en la parte central, teniendo una separación aproximada de 400 m entre cada estación, lo que indica una mayor resolución de datos. Mientras que en la parte exterior el espaciamiento se duplica, dejando un espacio de 800 m.

Tabla 4.1. Serie de tiempo HR.

Tiempo	Espaciamento
0.008	0.006
0.014	0.006
0.020	0.006
0.026	0.006
0.035	0.006
0.047	0.006
0.059	0.006
0.071	0.006
0.089	0.018
0.113	0.018
0.149	0.042
0.197	0.042
0.245	0.042
0.293	0.042
0.341	0.042
0.413	0.090
0.509	0.090
0.605	0.090
0.701	0.090
0.797	0.090
0.941	0.186
1.133	0.186
1.325	0.186
1.517	0.186
1.709	0.186
1.997	0.378
2.381	0.378
2.765	0.378
3.149	0.378
3.533	0.378
4.109	0.762
4.877	0.762
5.645	0.762
6.413	0.762
7.181	0.762
8.333	1.530
9.869	1.530
11.405	1.530
12.941	1.530
14.477	1.530
16.781	3.066
19.853	3.066

22.925	3.066
25.997	3.066
29.069	3.066
33.677	6.138
39.821	6.138
45.965	6.138
52.109	6.138
58.253	6.138
67.469	12.282
79.757	12.282
92.045	12.282

5. Procesamiento y Resultados

Para poder procesar los datos fue necesario el registro de una señal de ruido electromagnético presente en cada estación. Cada señal tiene una curva similar a la de la Figura 5.1 donde se observa un comportamiento aleatorio en sus valores. Es importante resaltar que la adquisición tiene una mayor concentración de información en los primeros tiempos de la señal, el intervalo de muestreo crece conforme aumenta el tiempo de registro, lo que da una mayor resolución y detalle a poca profundidad.

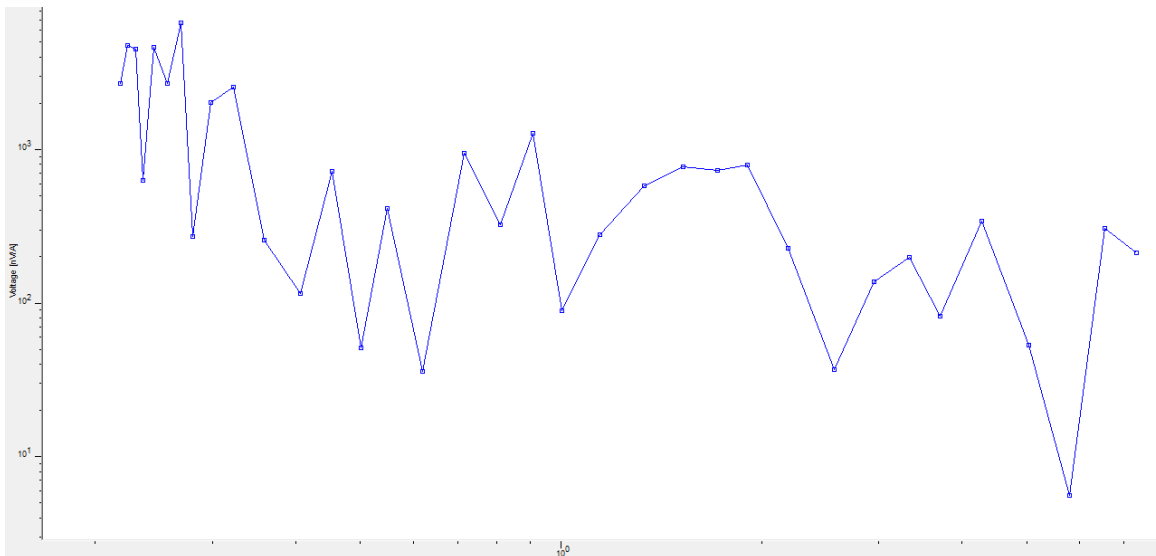


Figura 5.1. Señal de ruido de la estación AC008.

El siguiente paso consistió en registrar el valor máximo de cada una de las señales de ruido, donde los valores se observan en la Tabla 5.1. Se tomó en consideración el valor máximo de cada estación de ruido para eliminar los puntos con valores menores para cada una de las señales registradas.

Tabla 5.1. Valor máximo de ruido en cada estación

Rango de valores de Ruido	
Estación	Máximo [nV/A]
RAC002	4.974E+03
RAC003	1.975E+04
RAC005	3.686E+03
RAC006	4.837E+03
RAC008	6.689E+03
RAC009	6.374E+03
RAC013	4.432E+03
RAC016	5.543E+03
RAC017	1.172E+04
RAC018	1.469E+04
RAC019	6.144E+03
RAC020	1.271E+04
RAC021	7.276E+03
RAC022	2.696E+03
RAC023	4.490E+03
RAC025	3.670E+03
RAC026	2.843E+03
RAC027	4.839E+03
RAC028	7.176E+03
RAC029	1.386E+04
RAC031	4.560E+03
RAC035	5.848E+03
RAC040	5.105E+03
RAC041	1.052E+04
RAC042	9.189E+03
RAC044	5.157E+03
RAC047	9.901E+03
RAC048	3.481E+03
RAC052	8.352E+03
RAC053	6.501E+03
RAC057	5.800E+03
RAC058	6.475E+03
RAC059	1.437E+04

RAC060	3.626E+03
RAC063	8.291E+03
RAC064	1.050E+04
RAC065	5.137E+03
RAC066	1.076E+04
RAC071	5.111E+04
RAC072	8.498E+04
RAC073	5.031E+03
RAC074	3.375E+04

Una vez eliminado el ruido se procedió a obtener una única curva de decaimiento para cada estación, se eliminaron todos los puntos sobresalientes a la tendencia de los datos. En la Figura 5.2. se observa la estación AC060 donde se observa la tendencia general de la señal, así como el valor del ruido en la parte inferior de la figura que sirve como delimitante en determinar en qué punto la señal termina, también se observan algunos puntos que sobresalen en la parte central y que son eliminados.

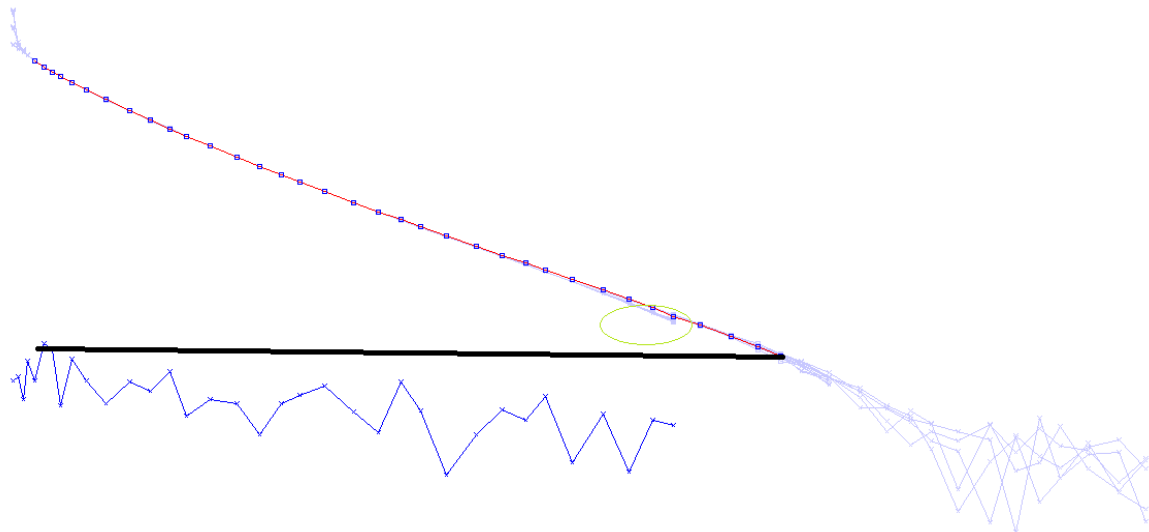


Figura 5.2. Señal registrada de la estación AC060. En elipses verdes se encierran los puntos sobresalientes, mientras que la curva resultante se observa de color rojo.

El siguiente paso consistió en la inversión de cada una de las curvas para generar un modelo de capas asociado. La Figura 5.3 demuestra con puntos rojos la curva de resistividad aparente calculada a partir de la curva de decaimiento, además, de color magenta se encuentra la curva asociada al modelo invertido.

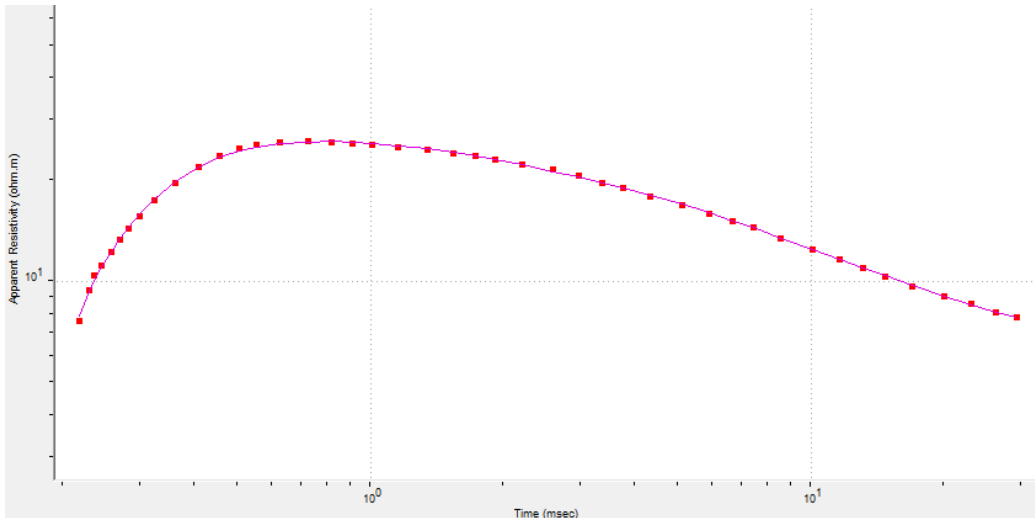


Figura 5.3. Curva de resistividad aparente de la estación AC040.

En la Figura 5.4 se observa el modelo de capas calculado por el software, donde se observa la profundidad de cada capa, así como su resistividad. En la sección de Anexo se encuentran las curvas de resistividad aparente de las demás estaciones, junto con sus respectivos modelos invertidos.

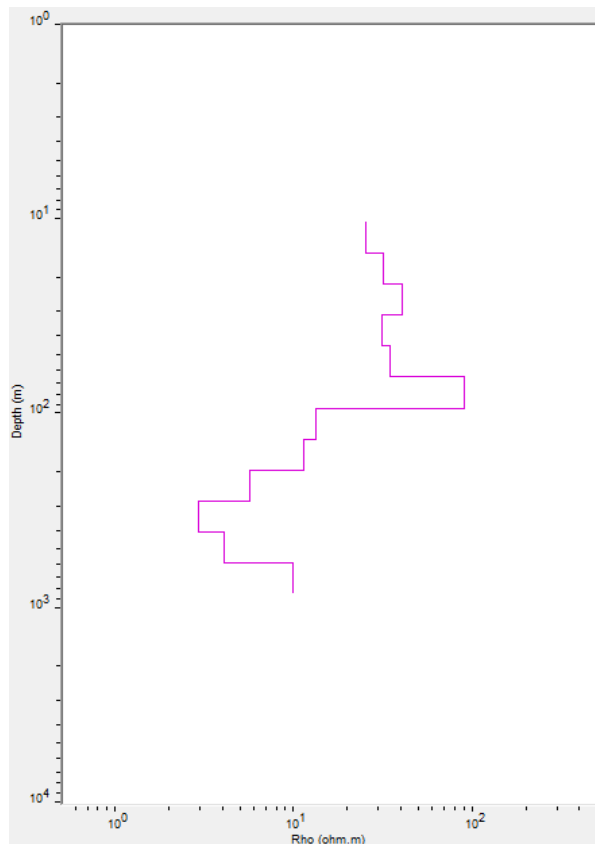


Figura 5.4. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC040.

El último paso del proceso de visualización consistió en generar un modelo 3D que contuviera la resistividad del suelo a partir de cada una de las estaciones. Es necesario resaltar que la distancia entre punto y punto en profundidad va aumentando, es decir que para poca profundidad la distancia aproximada entre cada punto es de un metro, mientras que la diferencia entre aquellos de mayor profundidad tiene una separación de 50 m entre sí. Esto se debe a que el método transitorio electromagnético al ser representado gráficamente en una escala logarítmica tiene mayor información en los primeros tiempos de lectura, que equivale a los detalles someros.

Para generar el modelo se usó un método de interpolación de Distancia Inversa, esto debido a que al tener material arcilloso en gran parte de la superficie debe considerarse un medio anisotrópico. El método de Distancia Inversa presenta un mejor desempeño en materiales anisotrópicos, a diferencia de los métodos de interpolación de Promedio de la Raíz de la Distancia (Merwade et al., 2006). El exponente usado para el método de interpolación fue de dos; esto significa que cada estación tendrá una mayor influencia en la malla cuando haya estaciones más alejadas (mientras el exponente crezca, menor será la influencia), es decir en el recuadro exterior donde las estaciones se separan a menos de un kilómetro de distancia. La Figura 5.5 demuestra la capa superficial del modelo 3D, donde es importante señalar que ésta se encuentra a 15 m de profundidad de la estación más alta.

Durante el proceso de visualización se generó un recuadro que contiene mucha información extrapolada, sobre todo en la parte noroeste y sureste del modelo. Esto genera anomalías de grandes extensiones que pueden no estar presentes y se deben tener en consideración para la interpretación. Esta falta de la ubicación de las estaciones, así como la información extrapolada, son limitantes del software de visualización. Dentro de la Figura 5.5 se resalta con un recuadro el área donde se concentran las estaciones y, por lo tanto, la zona donde se tiene información del levantamiento.

Además, se realizaron cortes 2D a diferentes profundidades para demostrar la parte interna del modelo 3D, donde la Figura 5.6 corresponde al modelo a los primeros 50 metros desde la superficie. La Figura 5.7 demuestra un corte a 100 metros de profundidad y dada la altitud de las estaciones se considera el punto

donde la gran mayoría de estaciones contienen información y no son datos extrapolados por el software de visualización. A pesar de eso, no se observa un cambio muy grande entre las estructuras visualizadas de la imagen superficial con la Figura 5.7. Es hasta los 250 metros donde empiezan a desaparecer distintas estructuras al noreste de la zona de estudio que corresponde a valores altos de resistividad (Figura 5.8).

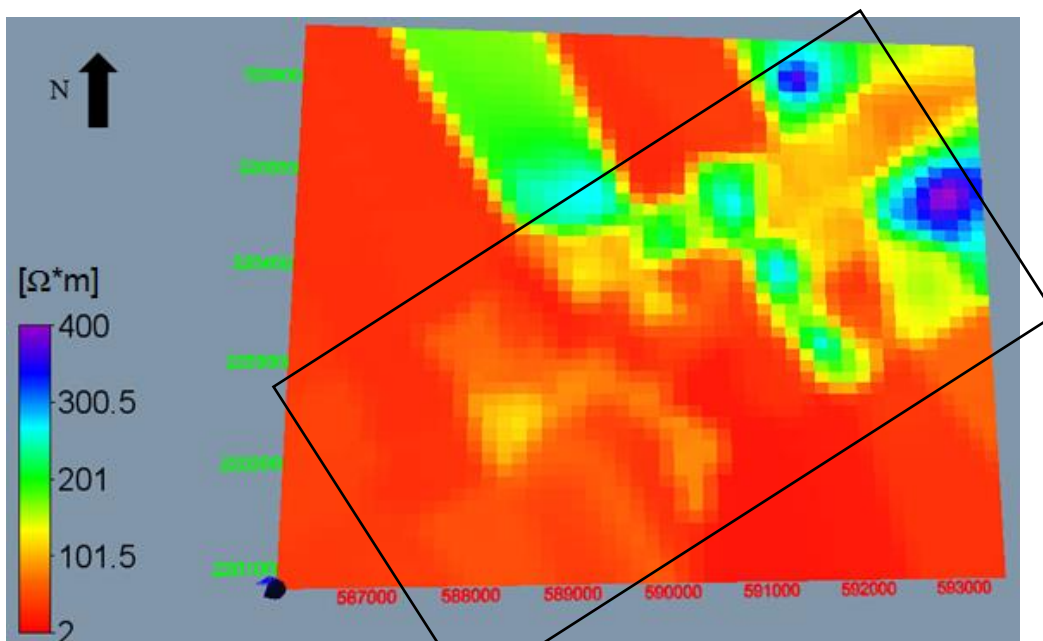


Figura 5.5. Imagen superficial del modelo 3D generado a partir del modelo invertido de cada estación.

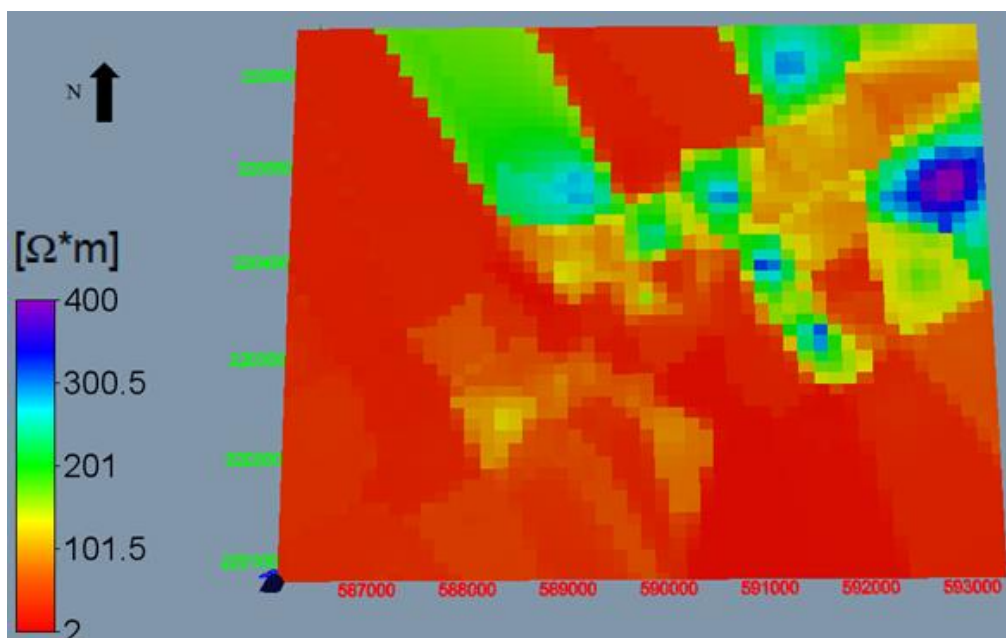


Figura 5.6. Imagen 2D del modelo a 50 metros de profundidad.

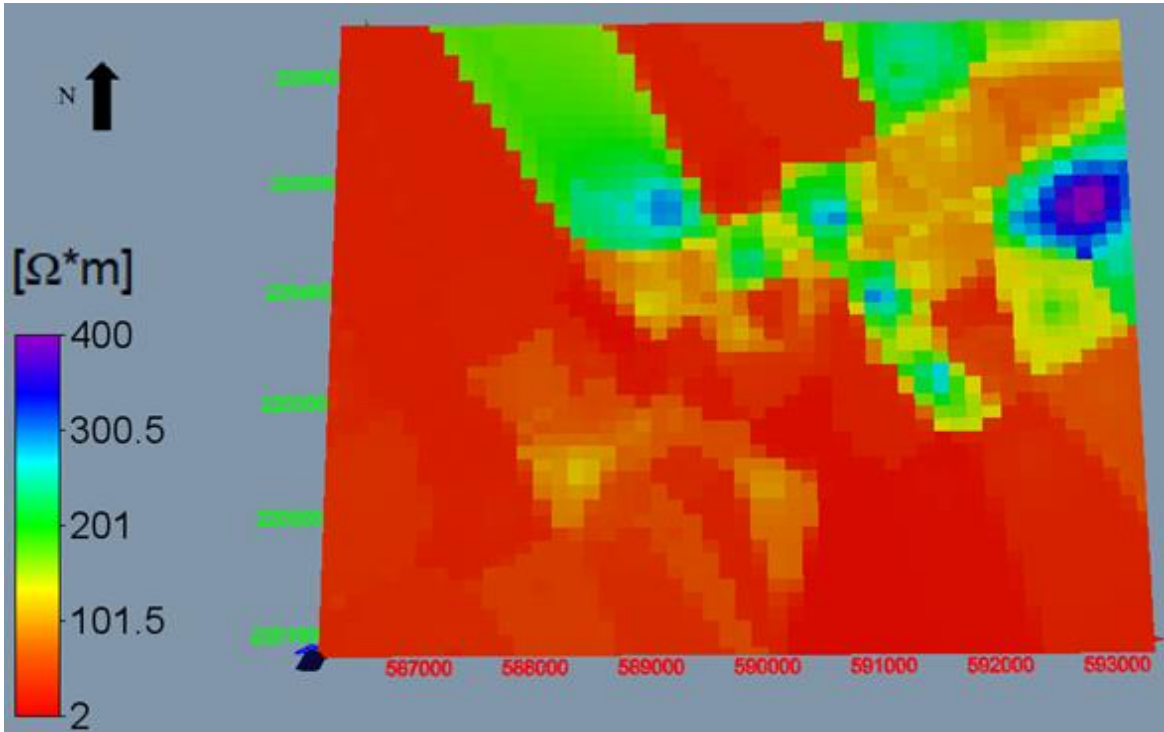


Figura 5.7. Imagen 2D del modelo a 100 metros de profundidad.

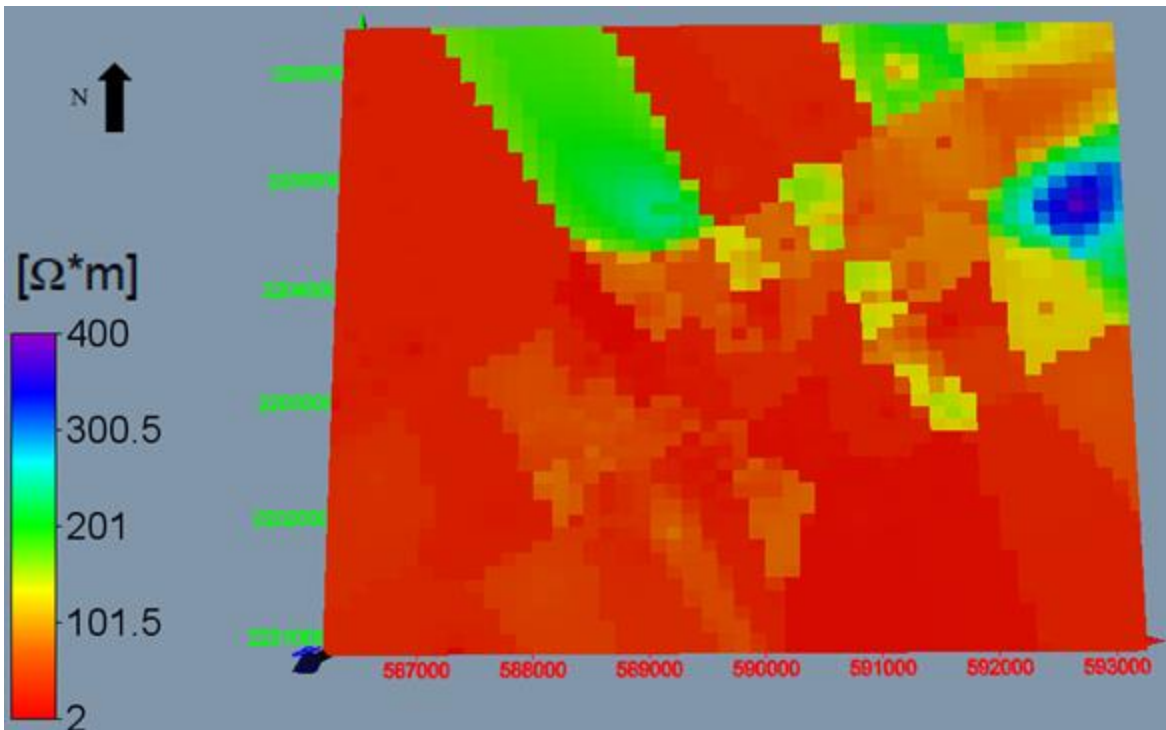


Figura 5.8. Imagen 2D del modelo a 250 metros de profundidad.

6. Análisis de Resultados

Dentro del modelo 3D, Figura 6.1, se observan 3 principales unidades geoelectricas a lo largo de la zona de estudio, los datos se muestran en la Tabla 6.1, donde se describe principalmente las zonas con mayor extensión de cada unidad.

Tabla 6.1. Unidades geoelectricas observadas en el Modelo 3D.

Unidad	Intervalo de resistividad [Ohm*m]	Zona donde se encuentra
A	400-350	Noreste
B	220-180	Parte central
C	50-2	Sur y Oeste

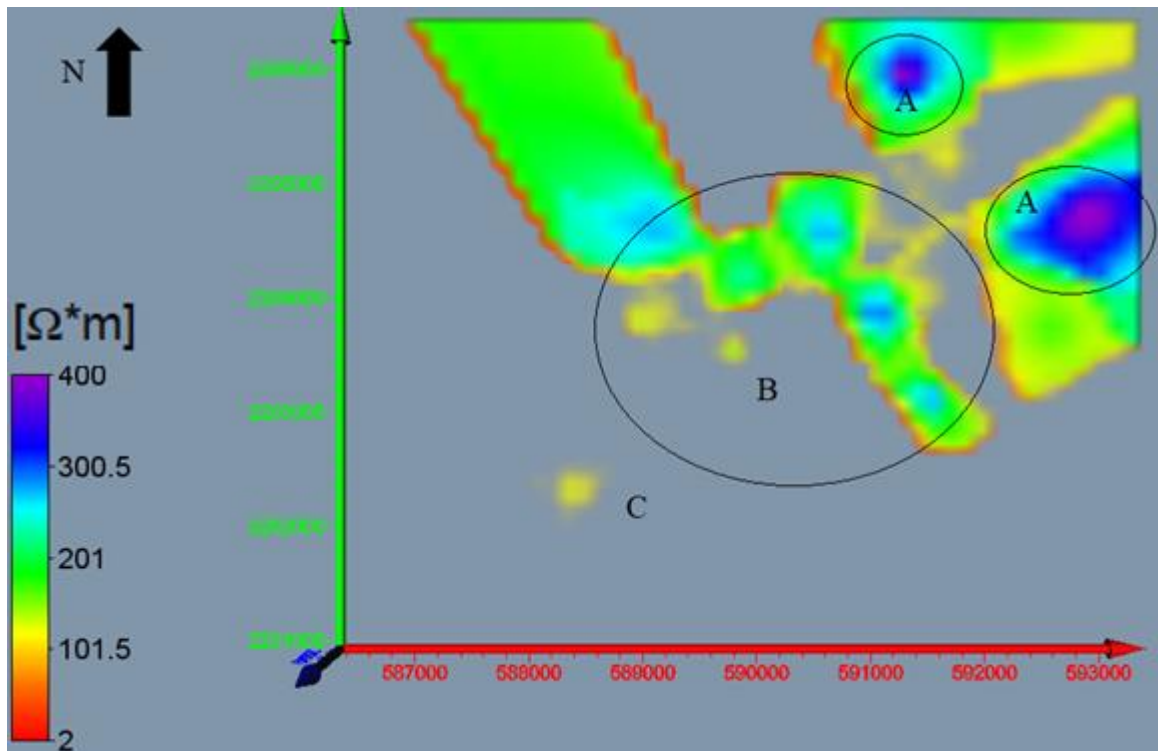


Figura 6.1. Unidades geoelectricas identificadas dentro del modelo 3D.

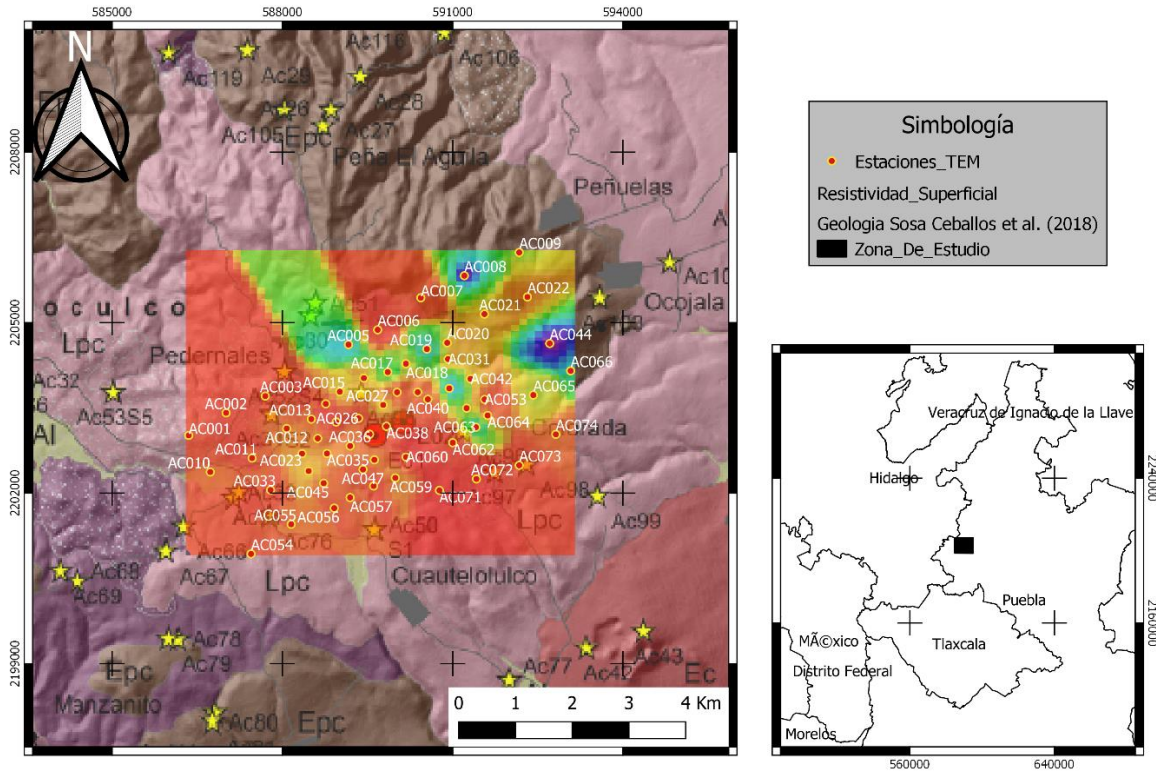


Figura 6.2. Imagen del modelo superficial en $[Ohm \cdot m]$ dentro de la zona de estudio (Modificado de Sosa-Ceballos et al. 2018).

Posteriormente se procedió a usar el mapa generado por Sosa-Ceballos et al. (2018) para determinar cuales son las litologías asociadas a cada una de las unidades geoelectricas identificadas dentro del modelo. De acuerdo a la Figura 6.2, las estaciones se encuentran sobre dos principales etapas de formación de la caldera, que son: la etapa de volcanismo Post-caldera tardía y de volcanismo Post-caldera temprana; donde predominan estructuras riolíticas y flujos de lava basálticos, respectivamente (Avellán et al., 2020).

La unidad geoelectrica A corresponde a materiales con una resistividad alta, que oscila entre los 400 y 350 $[Ohm \cdot m]$. La Figura 6.3, se enfoca únicamente en observar el Modelo 3D desde una perspectiva lateral desde el este para poder determinar la profundidad aproximada alcanzada por la unidad. Se observan dos estructuras dentro de esta unidad que resaltan; la A_1 y la A_2 . Cada una se encuentra en el extremo nororiental del modelo y, por lo tanto, no pude determinarse su extensión total por falta de información y porque los datos extrapolados pueden alterarlos.

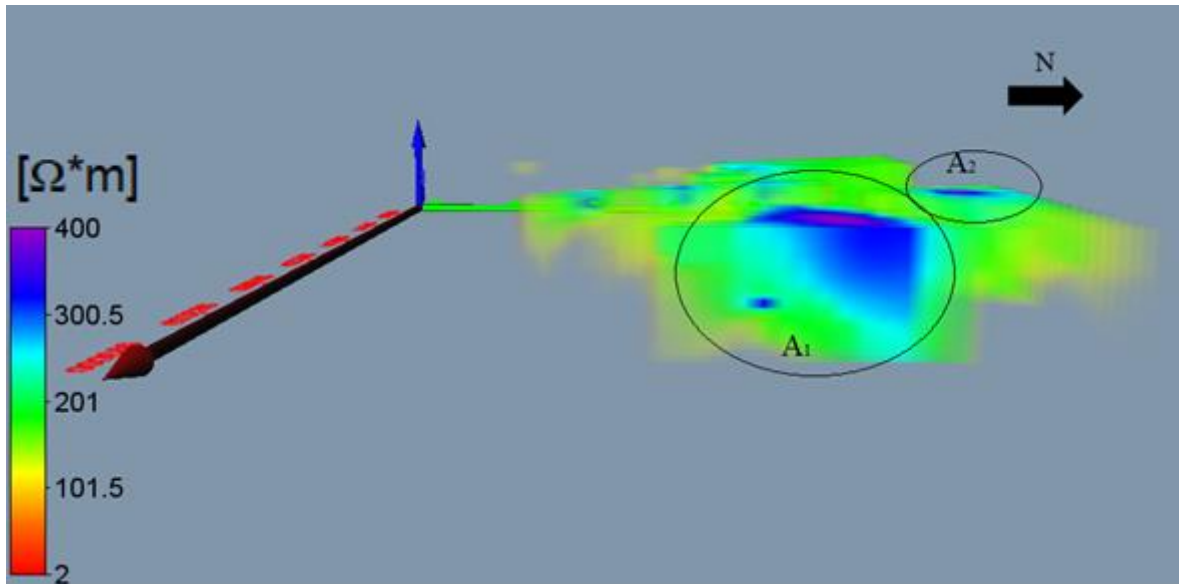


Figura 6.3. Modelo 3D visto desde una perspectiva lateral oriental para determinar la unidad geoelectrica A.

La unidad A_1 tiene una profundidad de 300 m, aproximadamente. La unidad A_2 se caracteriza por ser más superficial, abarcando cerca de los primeros 50 m. Es importante resaltar que dicha unidad geoelectrica se le asocia a material formado en la etapa post-caldera temprana (Sosa-Ceballos et al., 2018), donde sobresalen las rocas de composición riolítica.

La unidad geoelectrica B tiene una resistividad entre los 220 y 180 [Ohm*m]. Se observa en la parte central y en el extremo oriental de la zona de estudio. En la parte noroccidental hay una gran anomalía que no es considerada por ser principalmente datos extrapolados por el software de visualización. Dentro del modelo resaltan dos zonas con mayor extensión de la unidad geoelectrica que se definen como unidad B_1 y B_2 . La B_1 se encuentra en la parte central de la zona de estudio y se caracteriza por ser superficial, es decir, abarca los primeros 100 m de profundidad. La unidad B_2 se encuentra al este, tiene mayor profundidad a comparación de la anterior unidad y recubre la unidad A_1 . La unidad se asocia con el afloramiento de domos y conos de escoria de composición riolítica formadas en la etapa de volcanismo post-caldera tardía (Avellán et al., 2020).

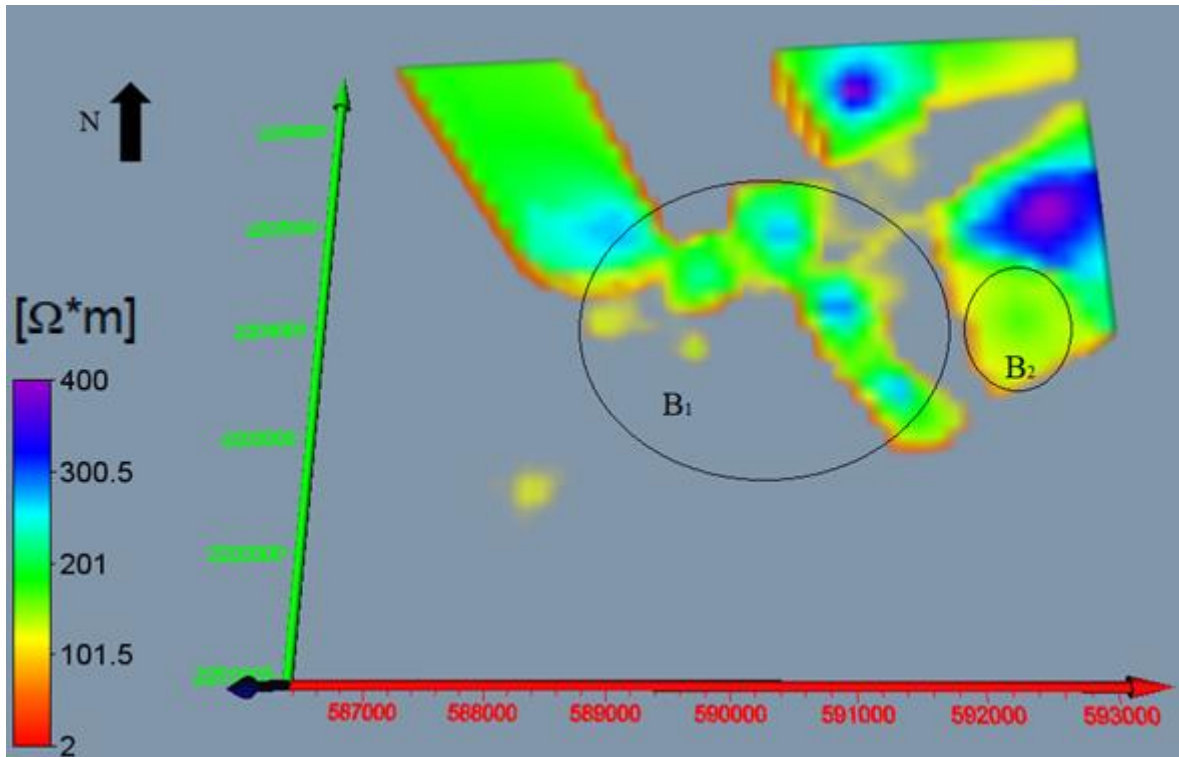


Figura 6.4. Modelo 3D visto de planta para determinar la unidad geoelectrica B.

La última unidad geoelectrica, la C, es aquella con mayor volumen dentro del Modelo 3D y se observa a lo largo de la zona de estudio, abarca todo el extremo sur, desde el este hasta el oeste. Además, rodea las anomalías generadas por las demás unidades geoelectricas. Tiene una resistividad entre los 2 y los 50 [Ohm*m] y se caracteriza por tener un color rojizo y anaranjado dentro de la Figura 6.5. Se extiende por los 6500 por 3200 de largo y ancho, así como los 600 metros de profundidad que abarca el modelo en su totalidad.

Esta unidad se asocia con la presencia de materiales arcillosos, esto se debe a que es el material con mayor conductividad. McNeill (1980a) indica que la presencia de arcillas disminuye la resistividad de una roca dado que, al tener una superficie mayor, la superficie de cada una de las partículas de la arcilla, permite que los iones sean absorbidos y facilita el paso de la electricidad por el medio. Sin embargo, la corriente se disipa con mayor facilidad y la profundidad máxima alcanzada es gravemente reducida.

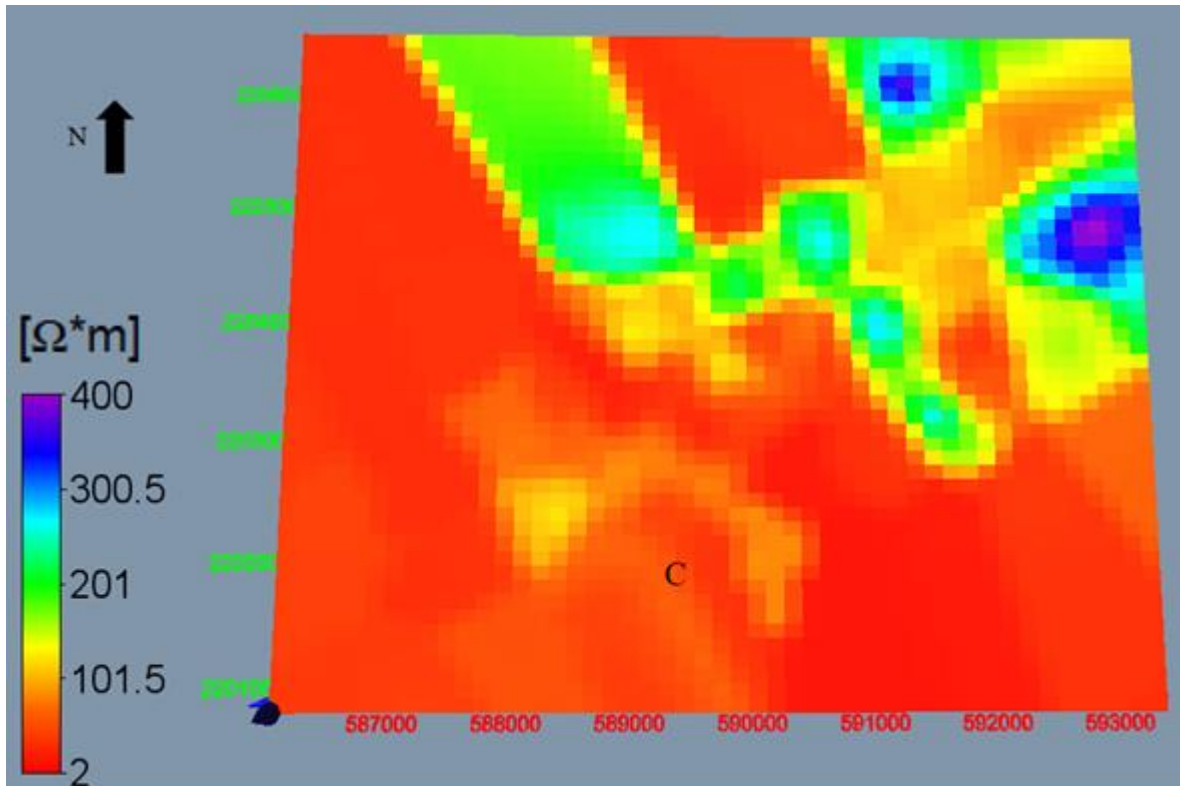


Figura 6.5. Modelo 3D visto de planta para determinar la unidad geoeléctrica C.

Dado que la arcilla es un tipo de roca impermeable sirve como roca sello para el almacenamiento de minerales hidrotermales y agua, su grosor es de al menos los 600 m de profundidad que abarca el modelo 3D, y se considera el motivo por el cual no se demuestran muchas filtraciones o evidencias del sistema geotérmico en la superficie (Rodríguez-Robles, 2021).

7. Conclusiones

El método Transitorio Electromagnético logró caracterizar la resistividad de un modelo 3D a partir del procesamiento de 60 estaciones ubicadas en la parte central de la caldera de Acoculco. El modelo tiene dimensiones aproximadas de 500 metros de profundidad, y 6.5 por 3 kilómetros. Es importante señalar que tiene una inclinación hacia el noreste de 30°.

Los extremos del área de investigación son las zonas que generan mayor incertidumbre y menor precisión en la interpretación debido a que aumenta la distancia entre cada estación, a diferencia de la parte central donde el espaciamiento se reduce a la mitad.

El área de investigación se divide en dos zonas principales, el extremo nororiental y el sur occidental; en el extremo nororiental se observan materiales con los mayores valores de resistividad y se asocian con las litologías de material riolíticos formadas durante la etapa Post-Caldera tardía y determinadas por Avellán et al. (2020), mientras que el extremo suroccidental presenta valores menores de resistividad asociados a litologías con una alta concentración de arcillas.

El método fue eficiente para determinar la distribución superficial de la zona debido a su alta concentración de información en los primeros metros de profundidad del Modelo 3D. Además, el método de interpolación de Distancia Inversa fue eficiente para localizar litologías con valores más elevados de resistividad, así como su extensión en la parte central del área de investigación. Al tener un mayor espaciamiento en los exteriores, las estructuras pueden ser deformadas por el método de interpolación y generar una interpretación incorrecta.

La unidad geoelectrica con menor valor de resistividad es aquella a la cual se asocia con una capa de material arcilloso, sirve como roca sello debido a su alta impermeabilidad e impide que haya manifestaciones de actividad hidrotermal en la superficie. Un estudio a mayor profundidad y extensión podría determinar la viabilidad del uso de la zona para la colocación de un Sistema Geotérmico Mejorado (EGS, por sus siglas en inglés).

8. Recomendaciones

La presencia de arcillas es un factor importante a considerar, ya que, al ser muy conductivas disipa la energía eléctrica rápidamente por el medio, además incrementa la incertidumbre de los resultados a mayores profundidades. El uso de otros métodos geofísicos, como lo son los registros de pozos, podría determinar el espesor de las capas, así como la posible presencia de agua a lo largo del CCA. La información obtenida serviría como complemento a los pozos generados por CFE y abarcaría una mayor área.

El espaciamiento en la parte exterior del área es de 800 metros entre cada estación, por lo que únicamente se podrían detectar estructuras con un tamaño del doble al espaciamiento. Es por eso que una distancia entre estaciones más reducida lograría definir con mayor precisión la extensión de las unidades geoelectricas.

El uso del método TEM se considera eficiente para inferir la geología superficial de la zona y su extensión a lo largo de la caldera podría sentar las bases para la construcción de infraestructura.

El Modelo 3D generado dentro de este trabajo puede dar paso a una investigación de mayores magnitudes y permitan generar un método de explotación del agua y de la energía generada por la caldera de Acoculco, y así favorecer las comunidades cercanas tanto en el aspecto hídrico como del energético.

9. Anexo

Figuras

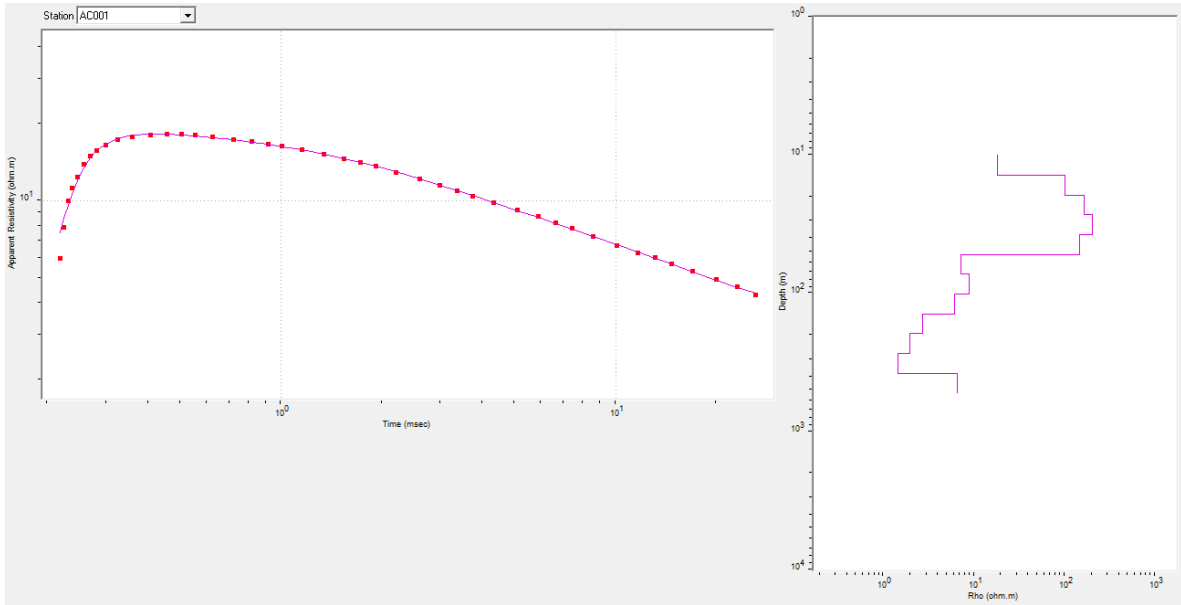


Figura A.1. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC001.

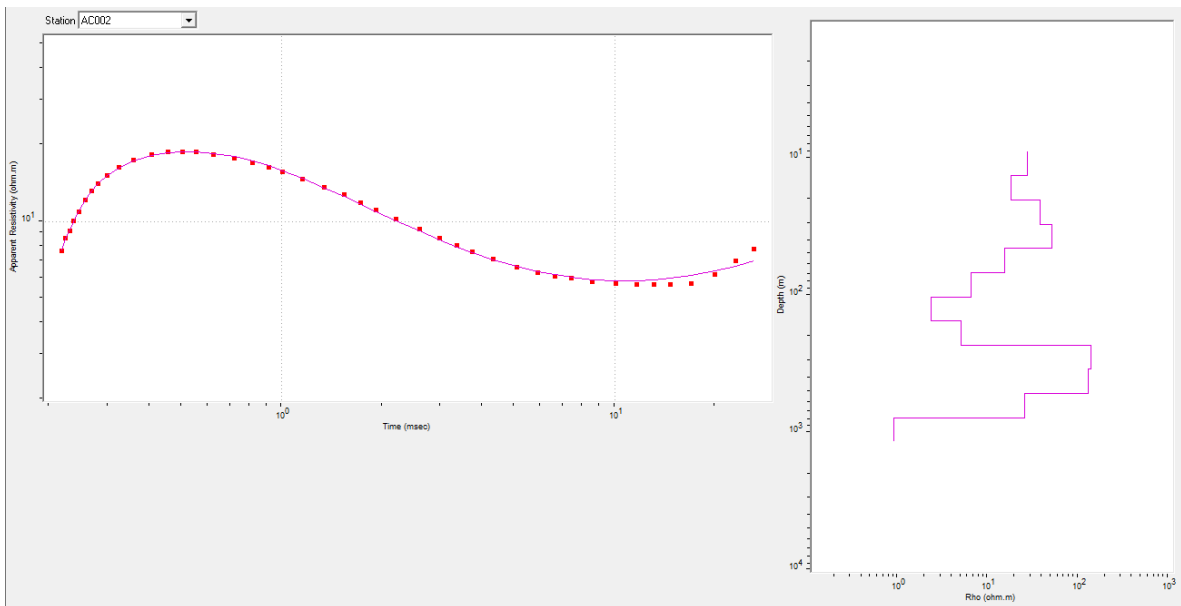


Figura A.2. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC002.

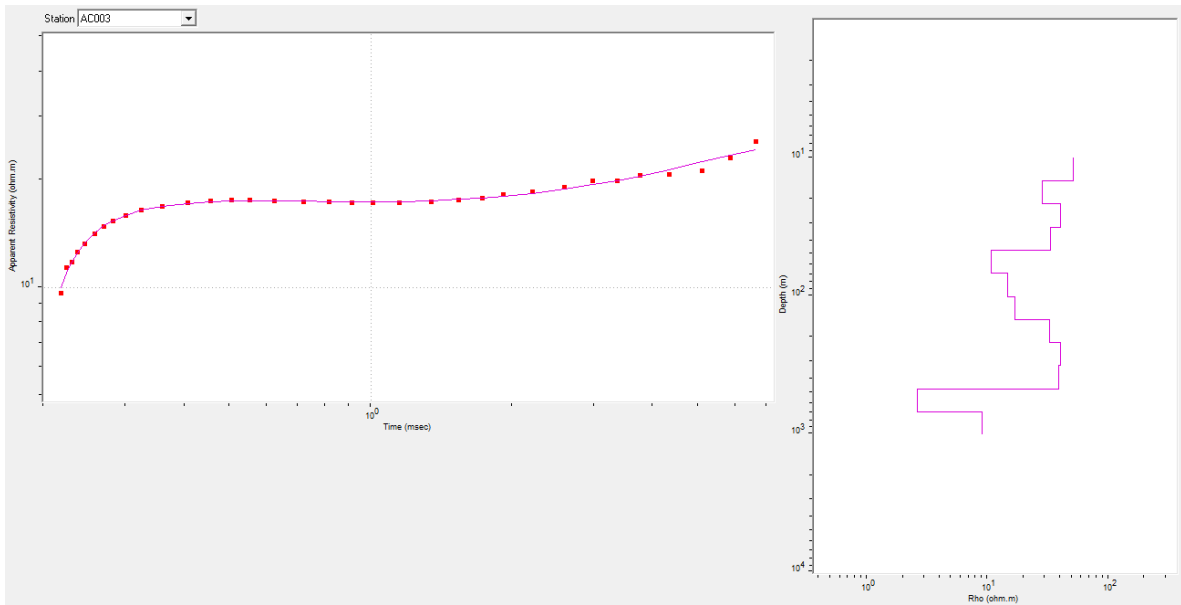


Figura A.3. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC003.

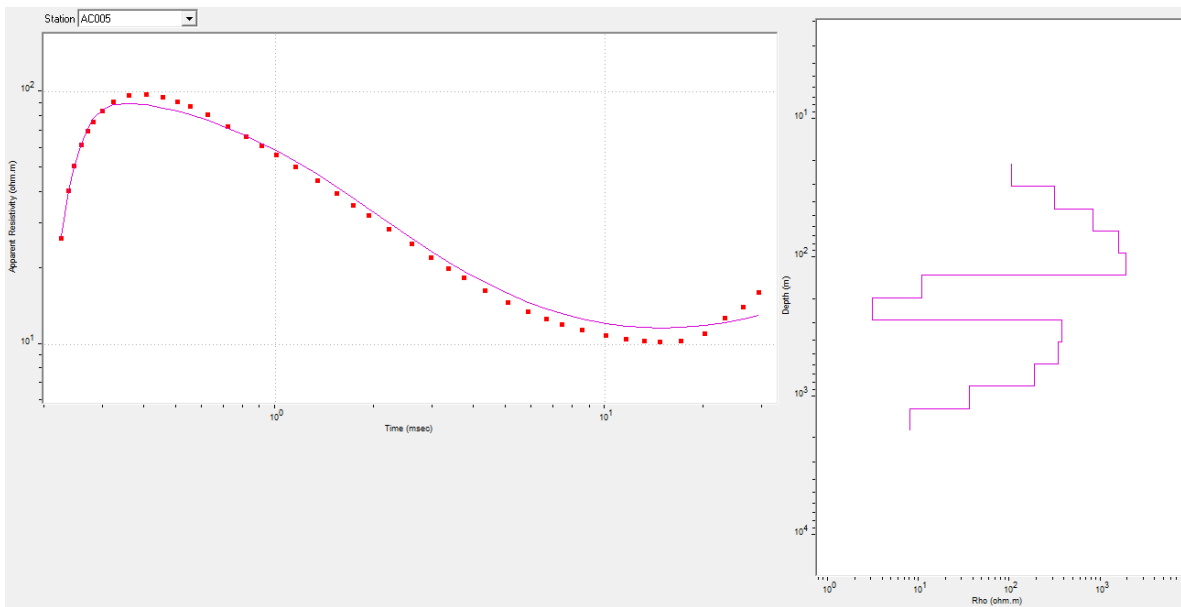


Figura A.4. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC005.

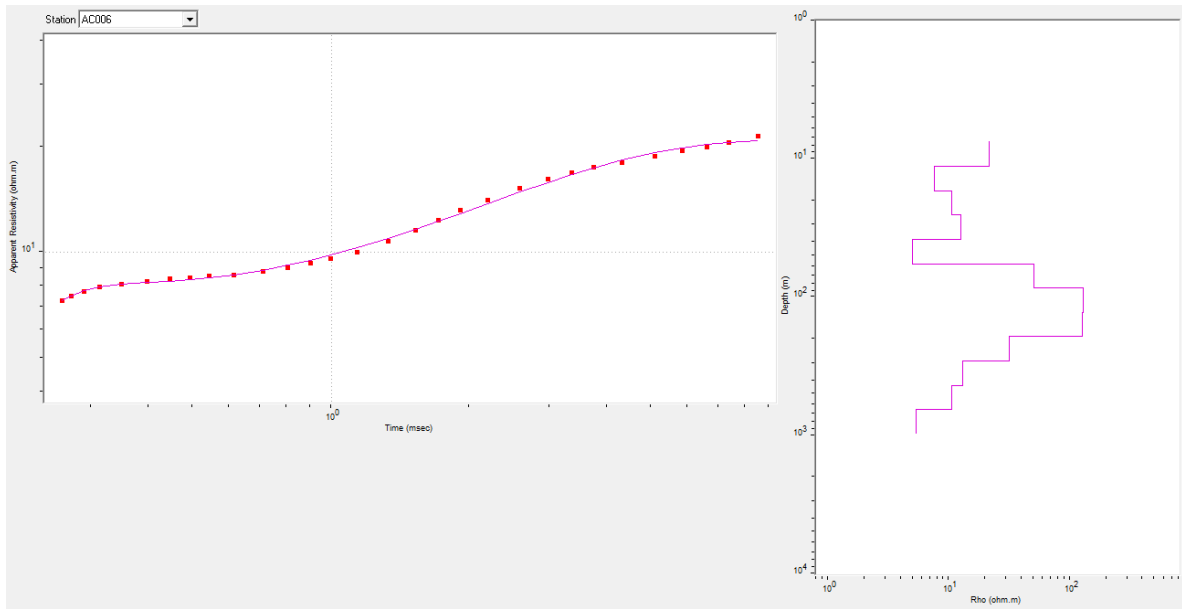


Figura A.5. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC006.

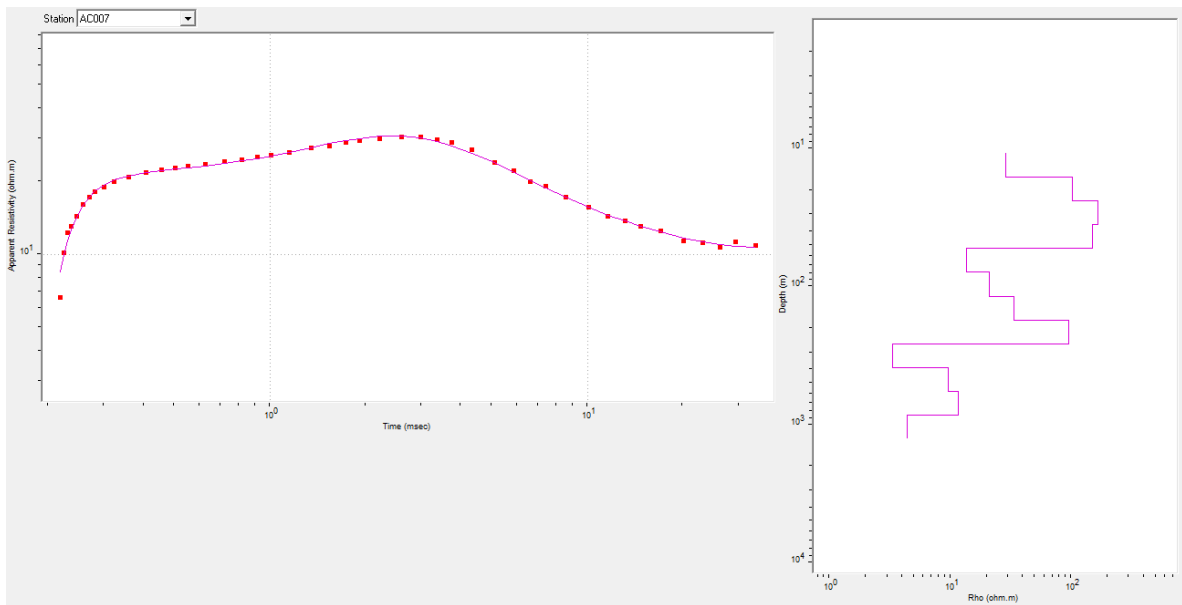


Figura A.6. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC007.

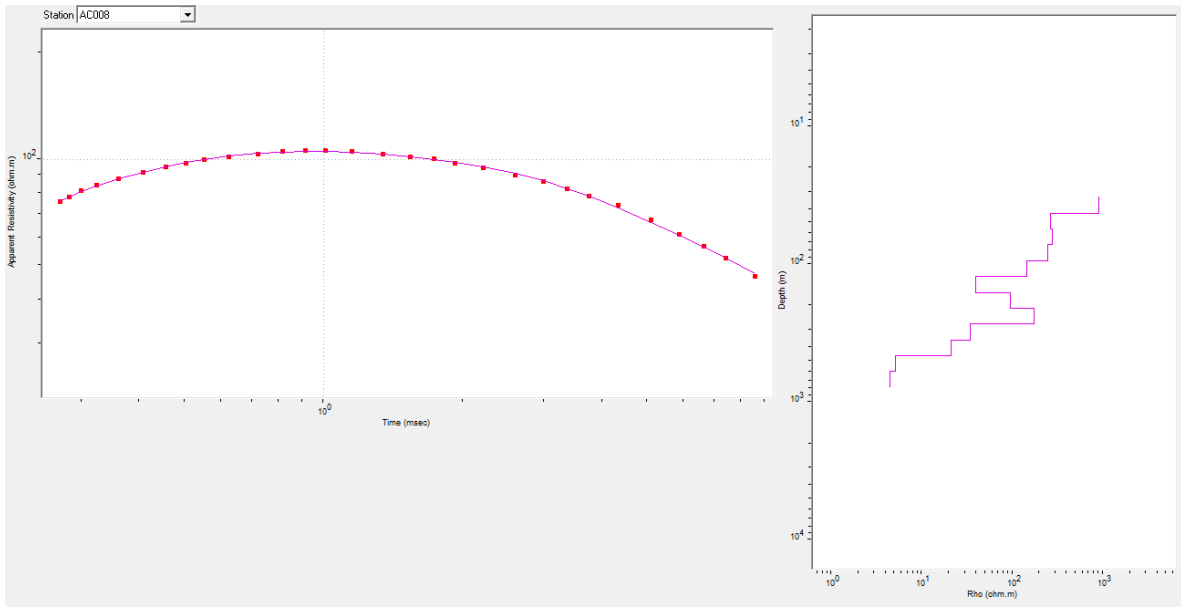


Figura A.7. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC008.

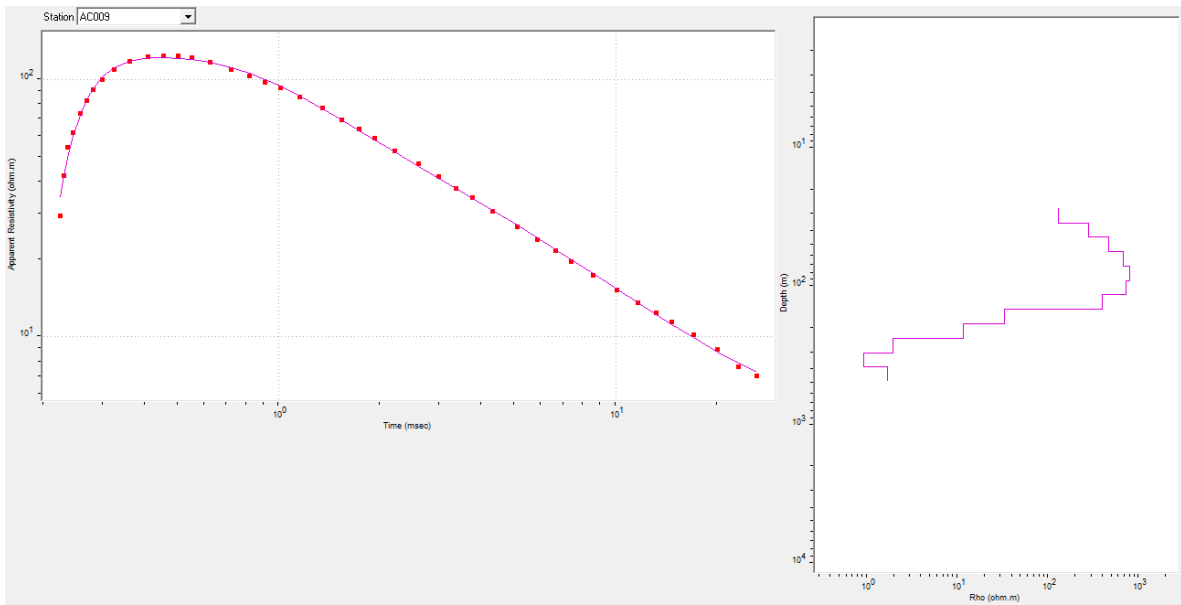


Figura A.8. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC009.

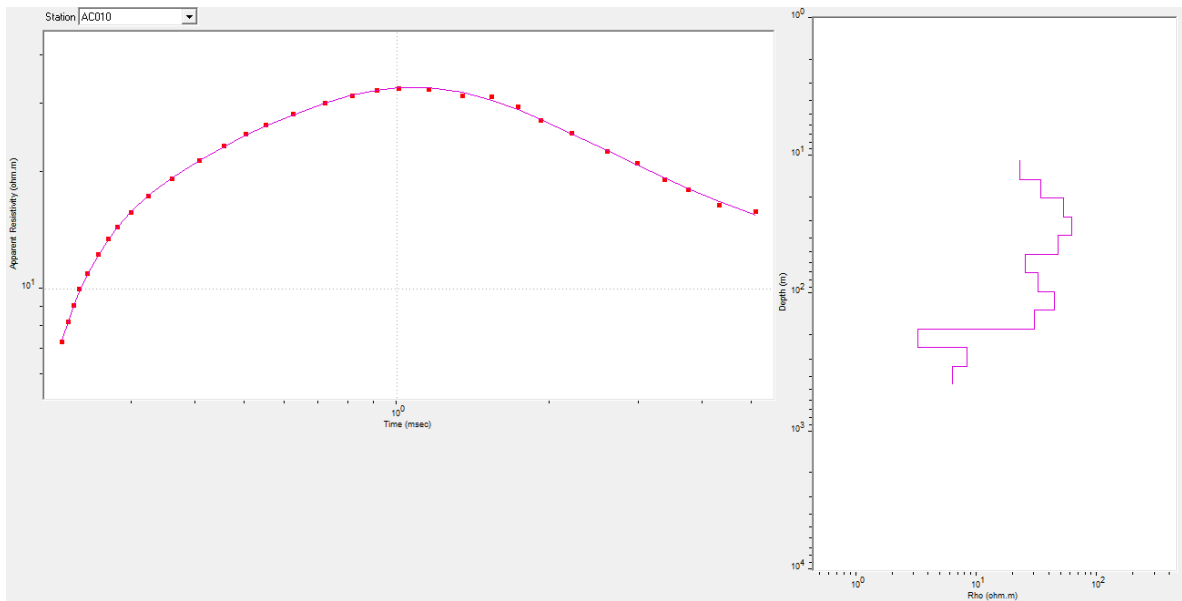


Figura A.9. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC010.

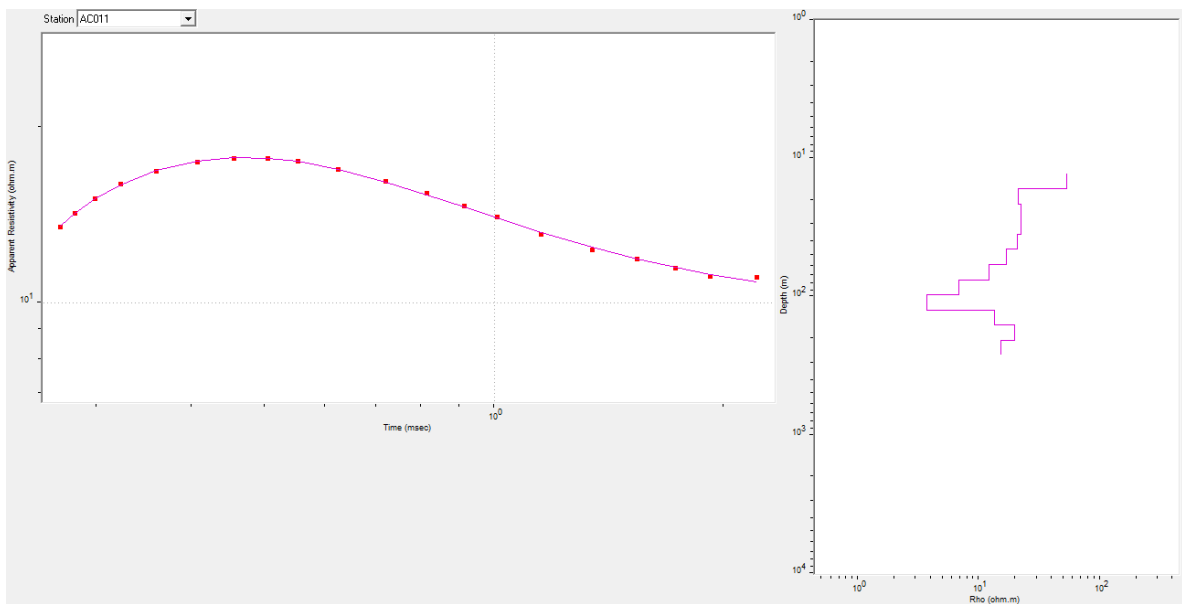


Figura A.10. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC011.

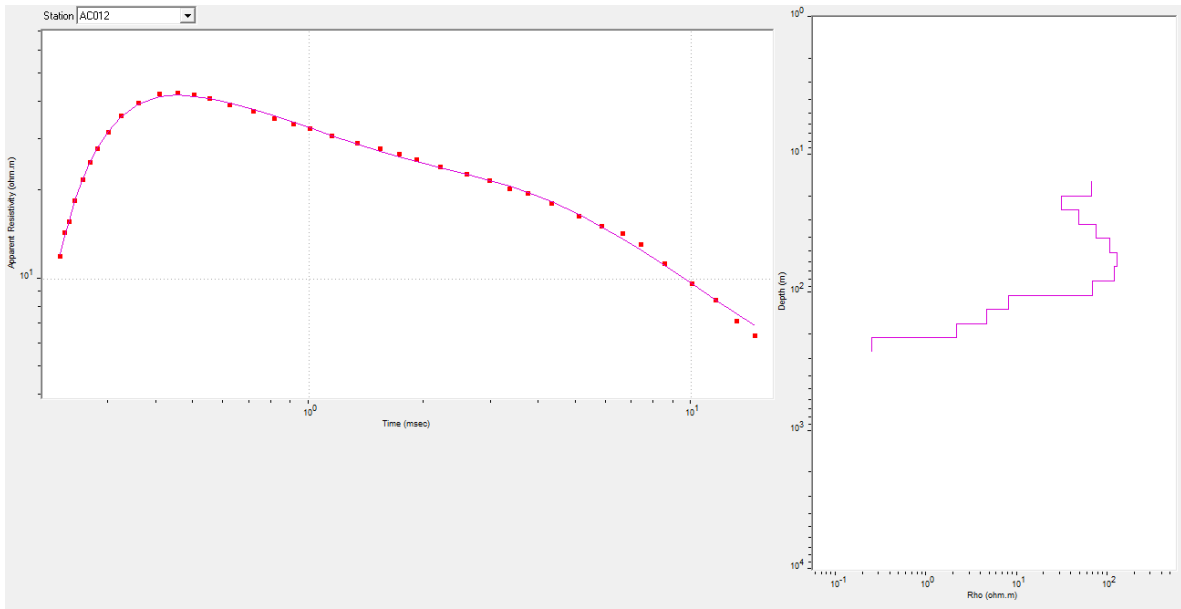


Figura A.11. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC012.

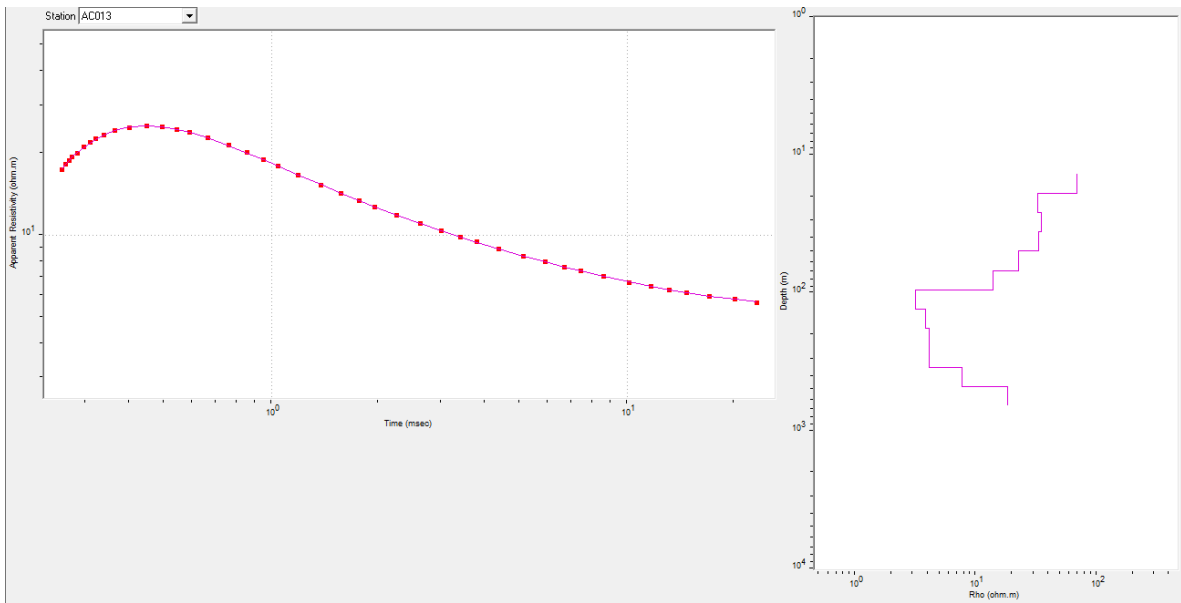


Figura A.12. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC013.

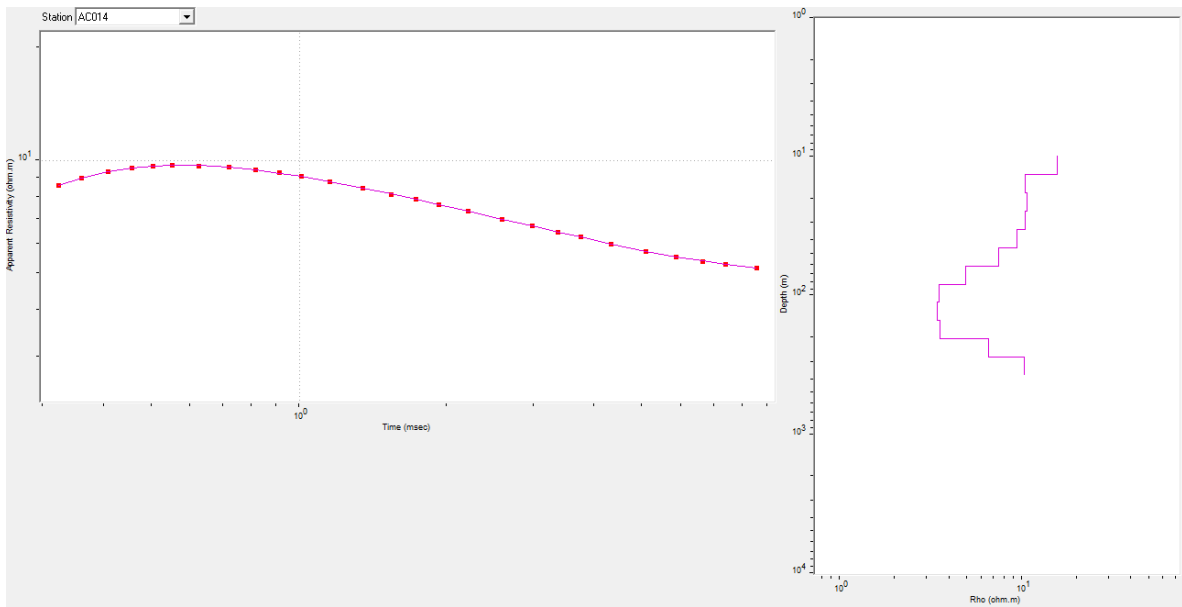


Figura A.13. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC014.

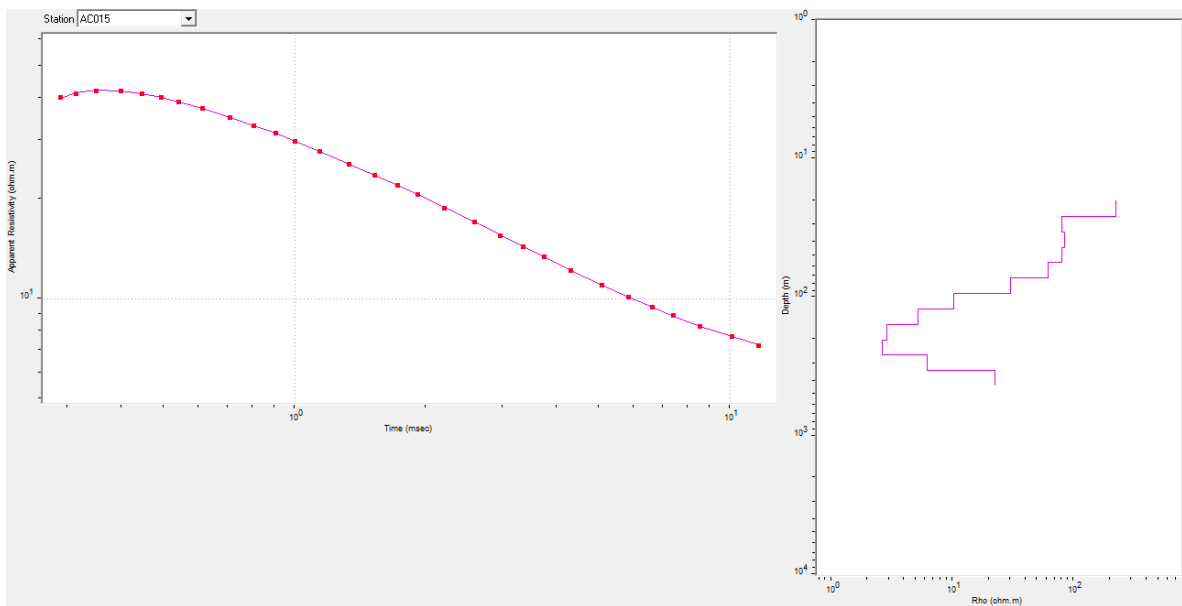


Figura A.14. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC015.

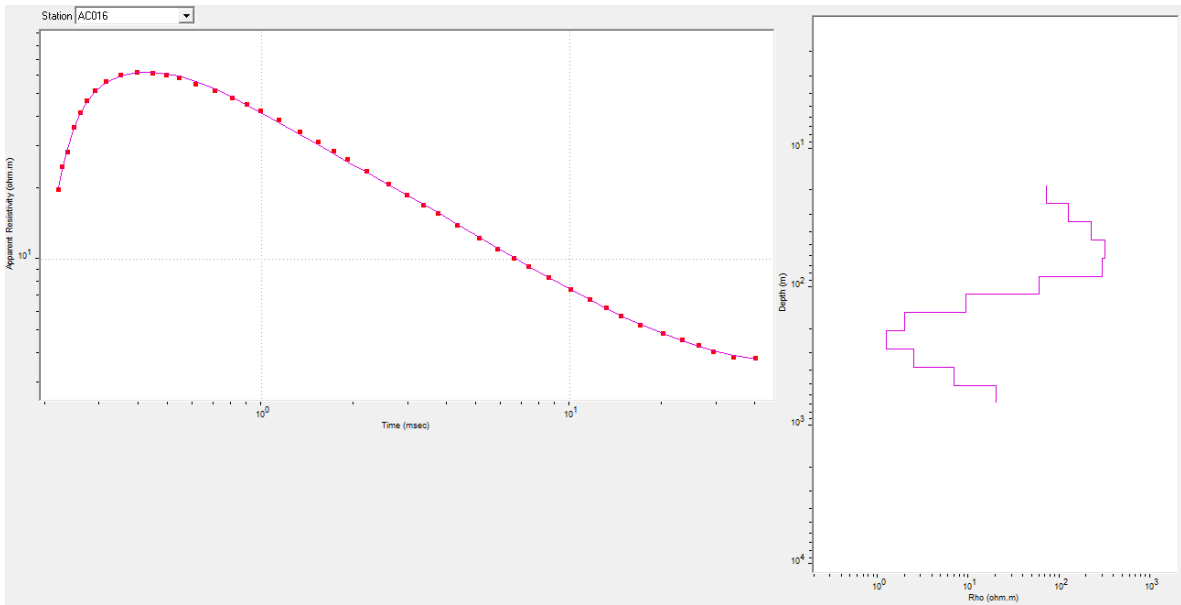


Figura A.15. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC016.

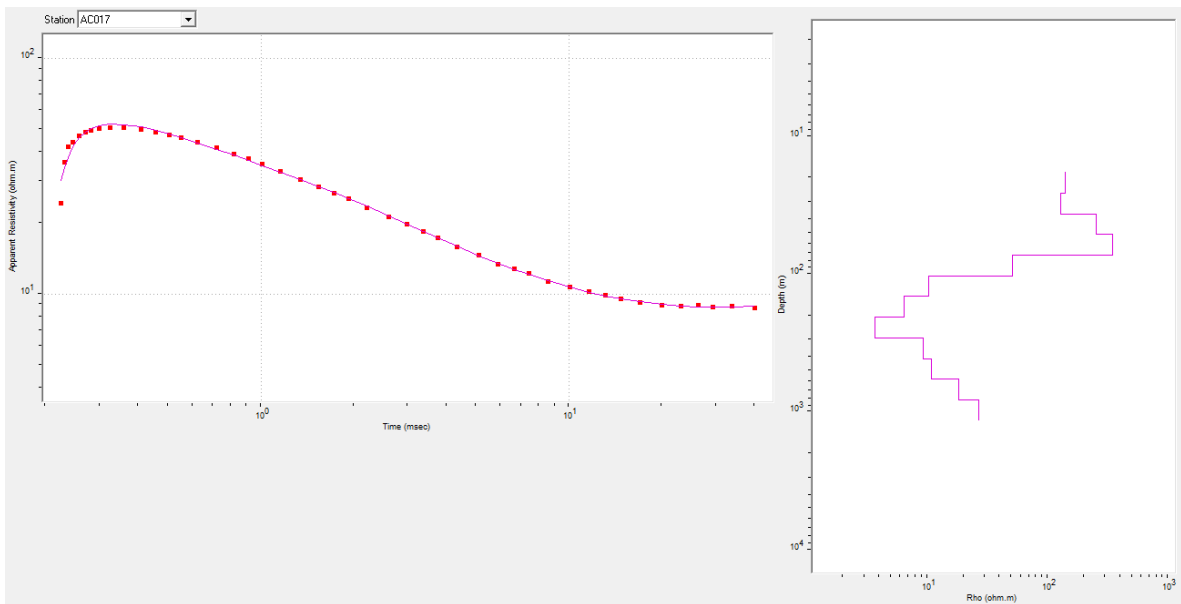


Figura A.16. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC017.

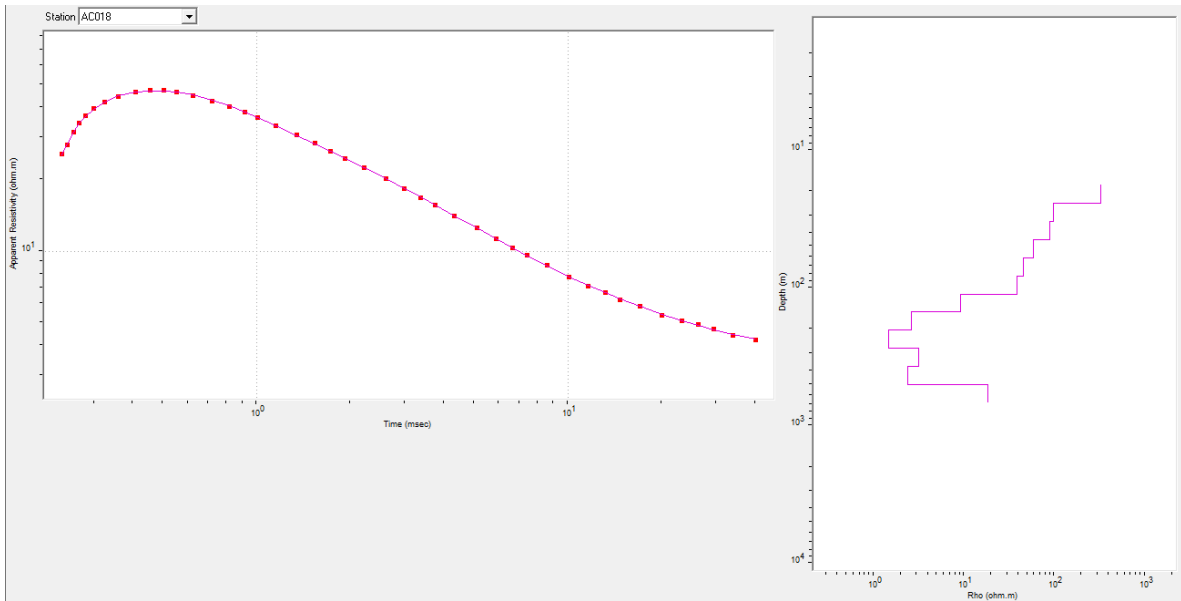


Figura A.17. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC018.

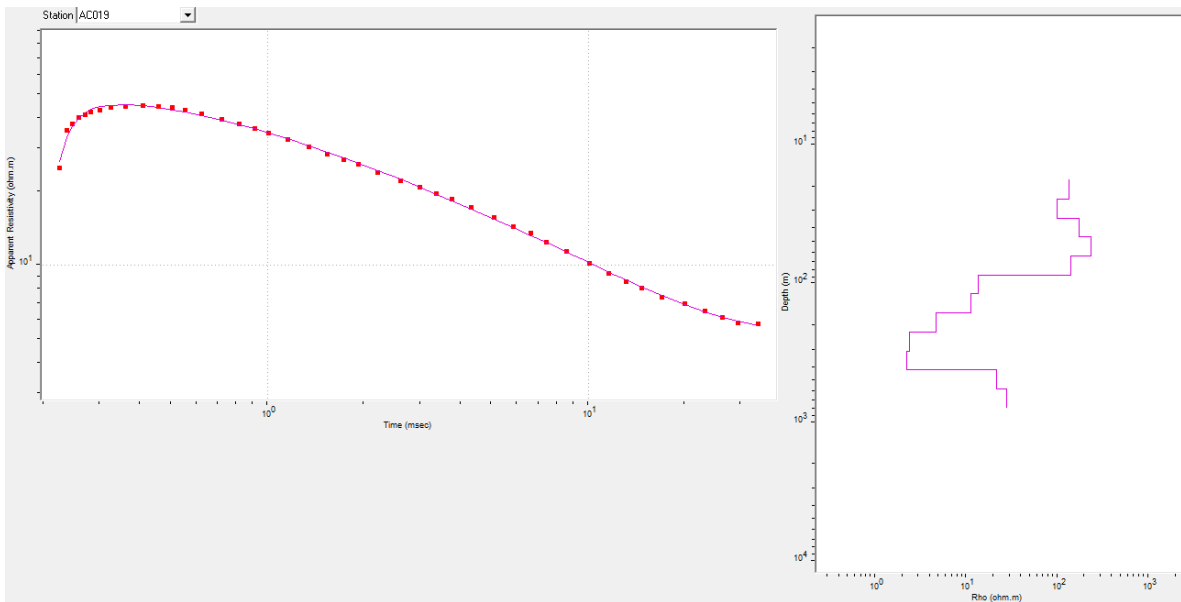


Figura A.18. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC019.

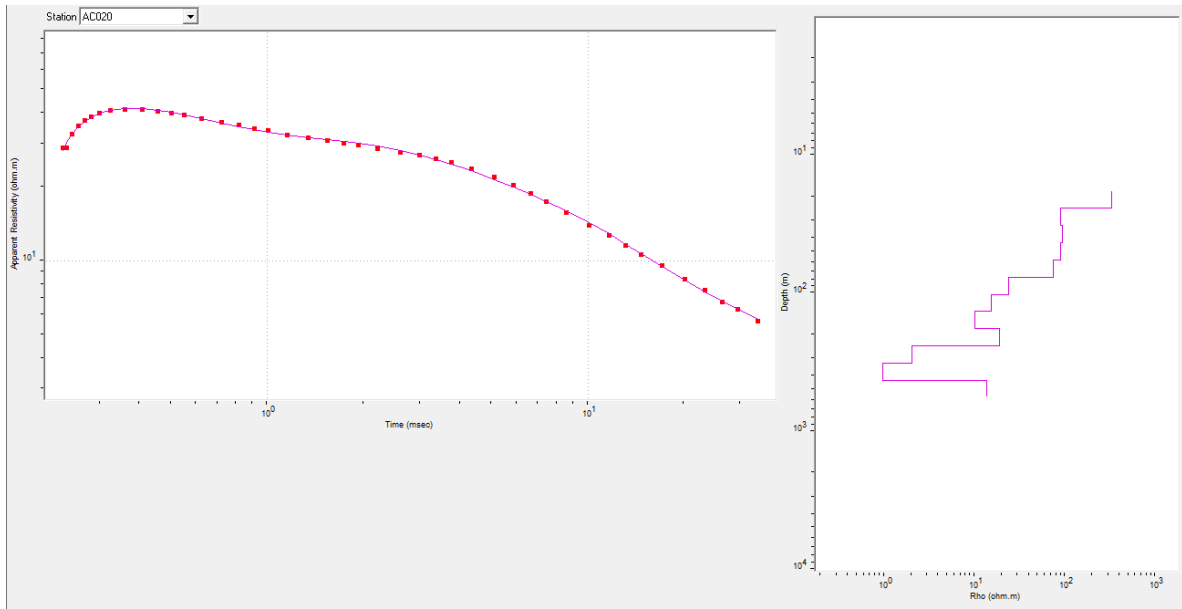


Figura A.19. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC020.

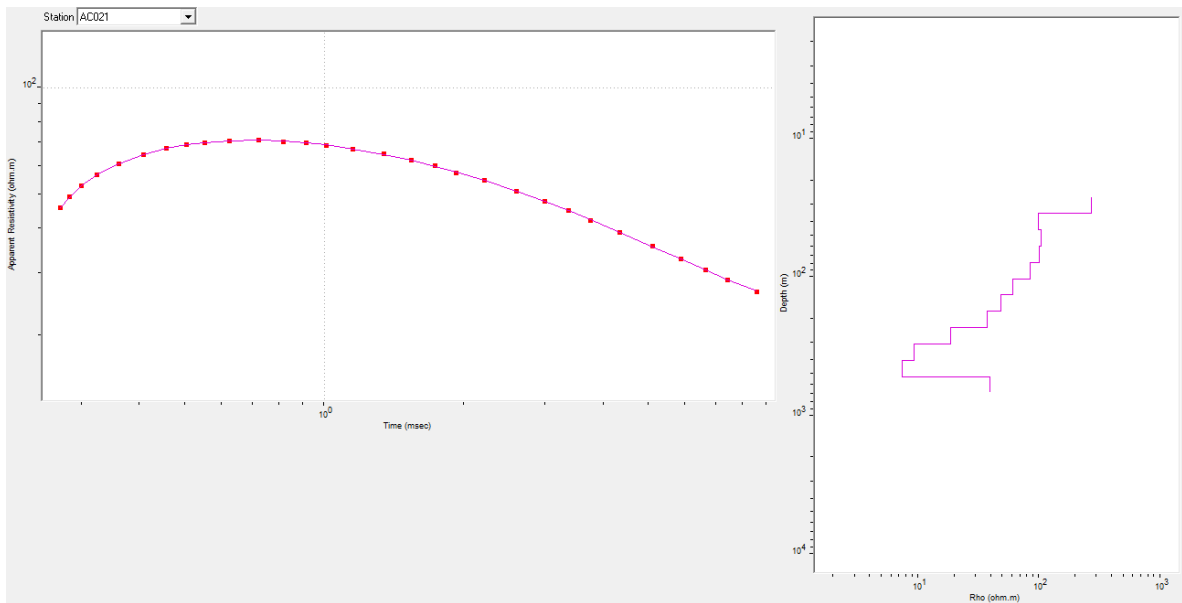


Figura A.20. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC021.

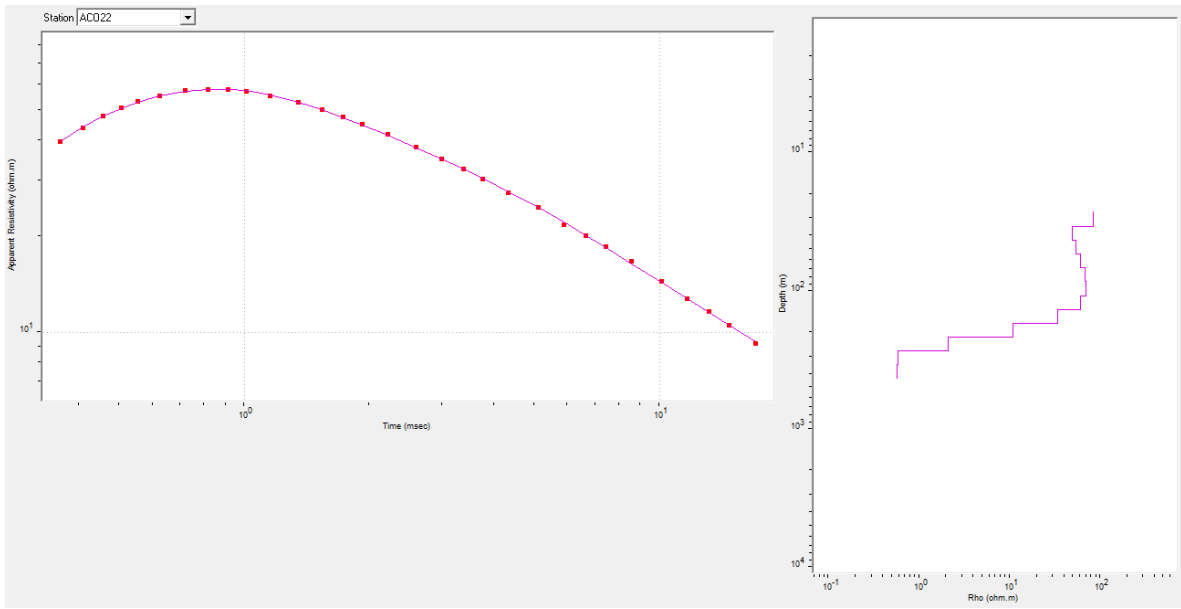


Figura A.21. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC022.

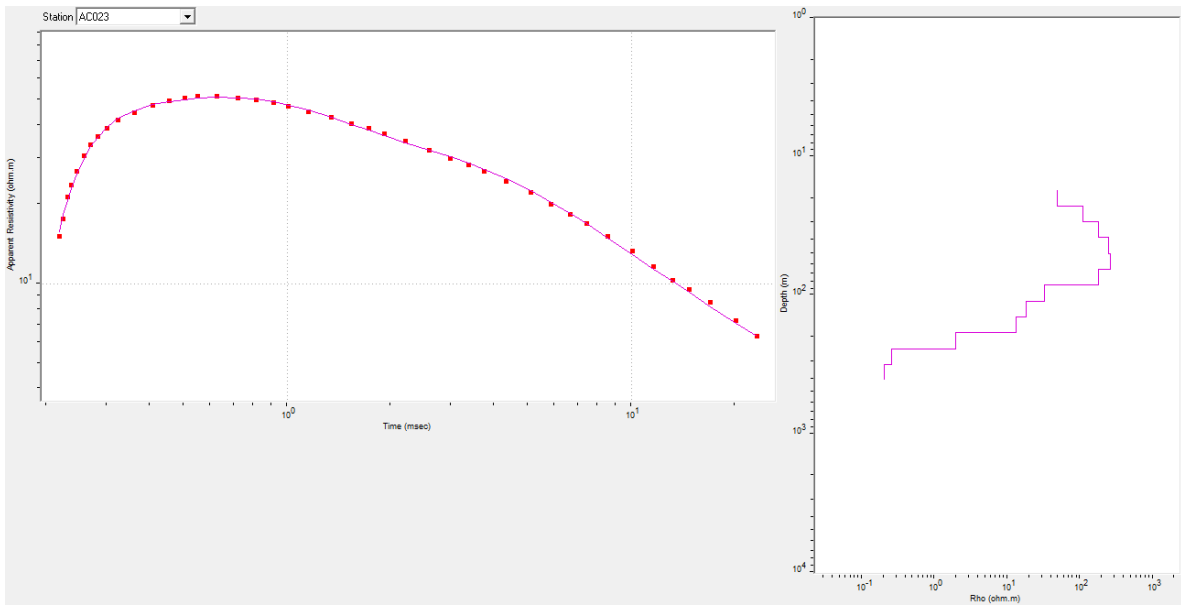


Figura A.22. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC023.

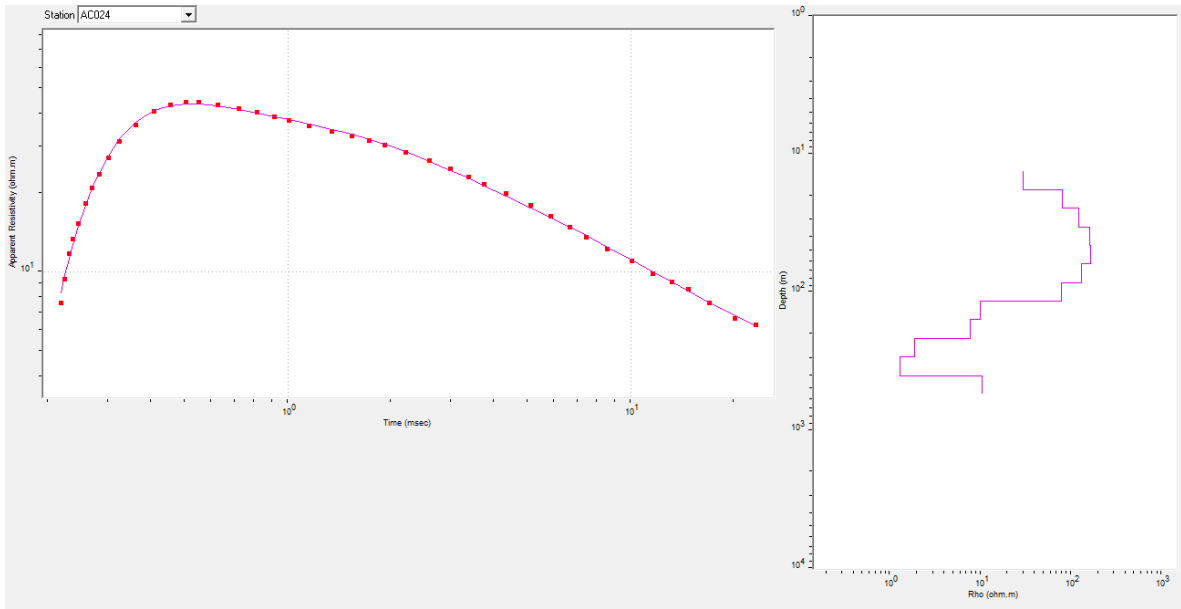


Figura A.23. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC024.

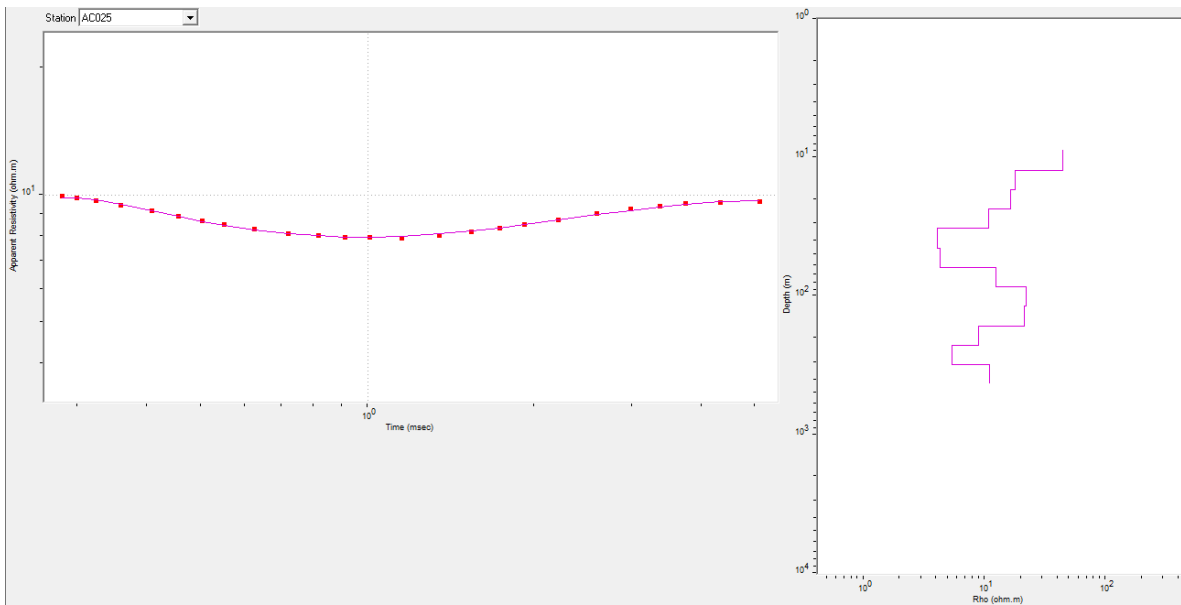


Figura A.24. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC025.

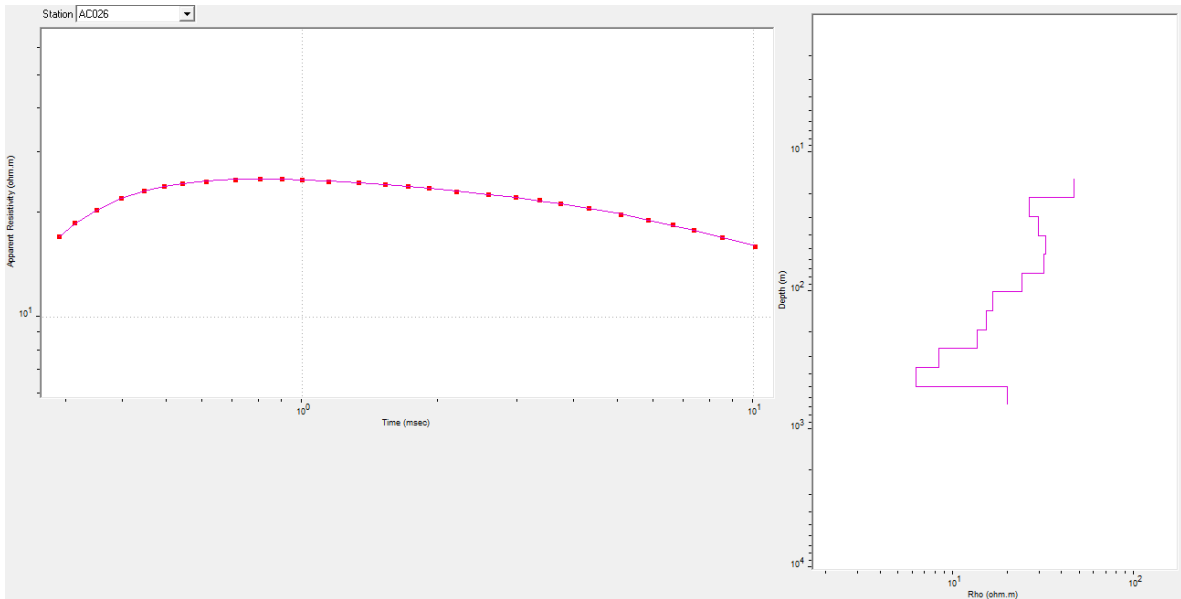


Figura A.25. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC026.

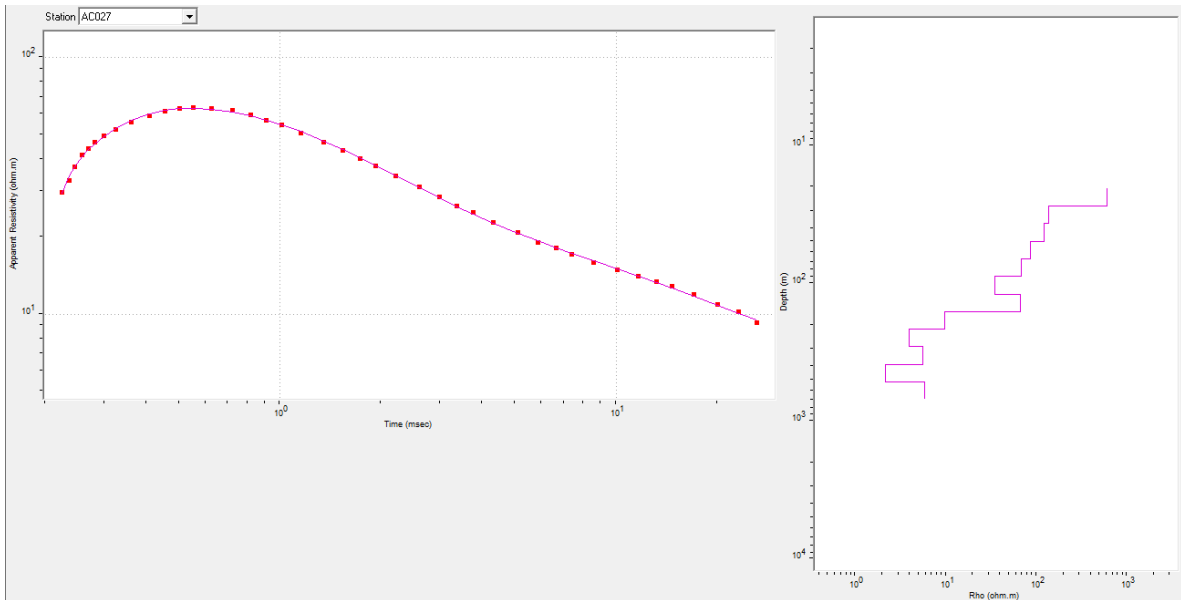


Figura A.26. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC027.

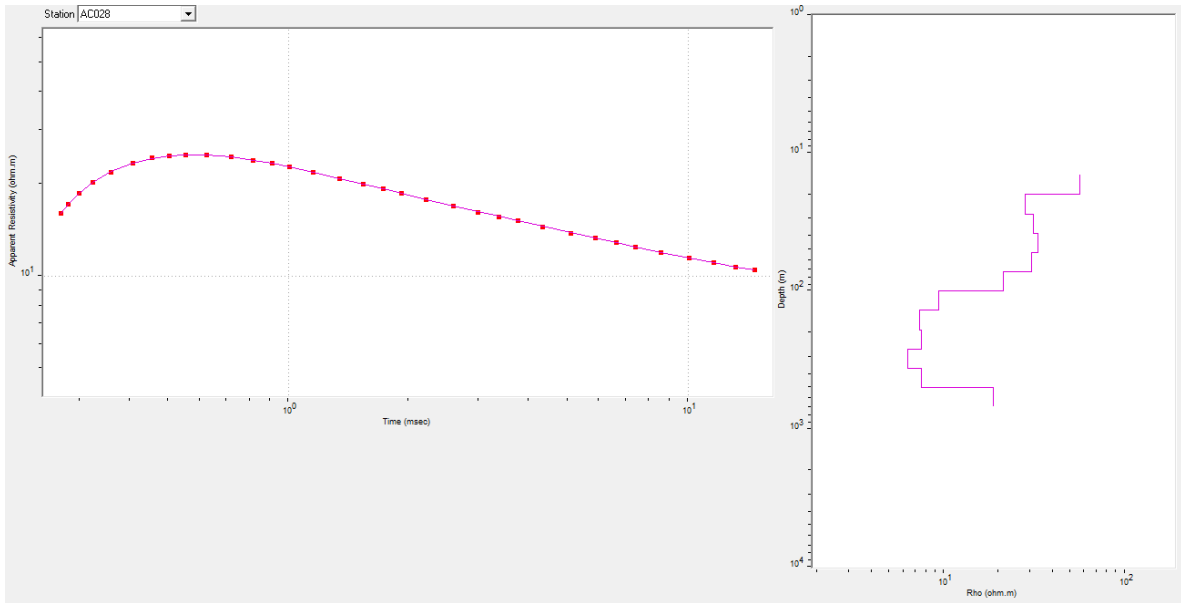


Figura A.27. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC028.

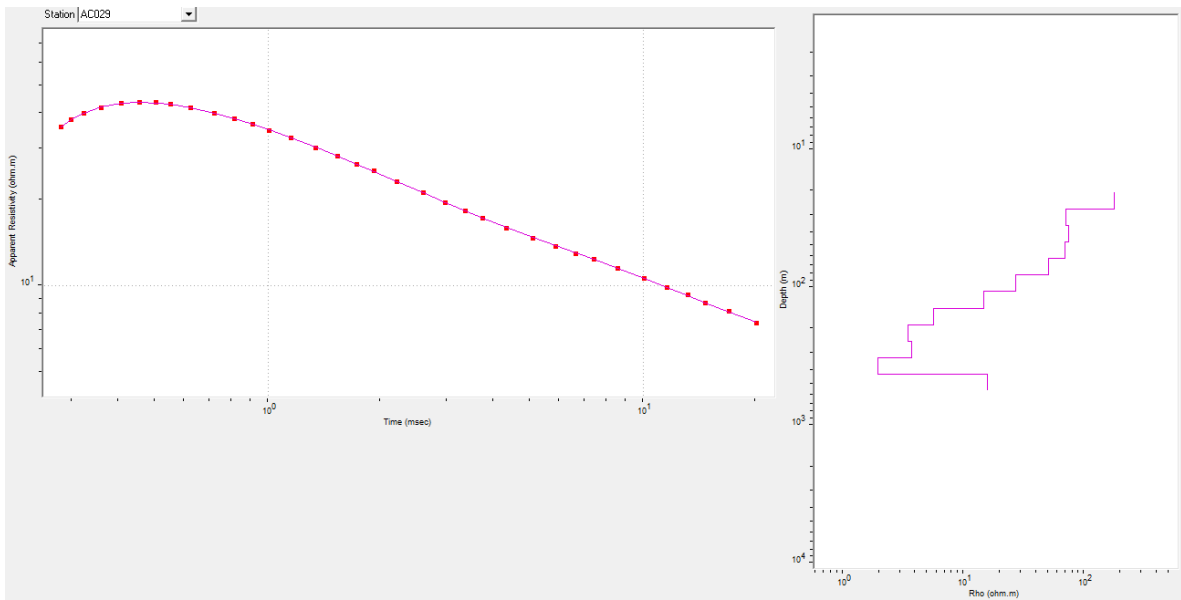


Figura A.28. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC029.

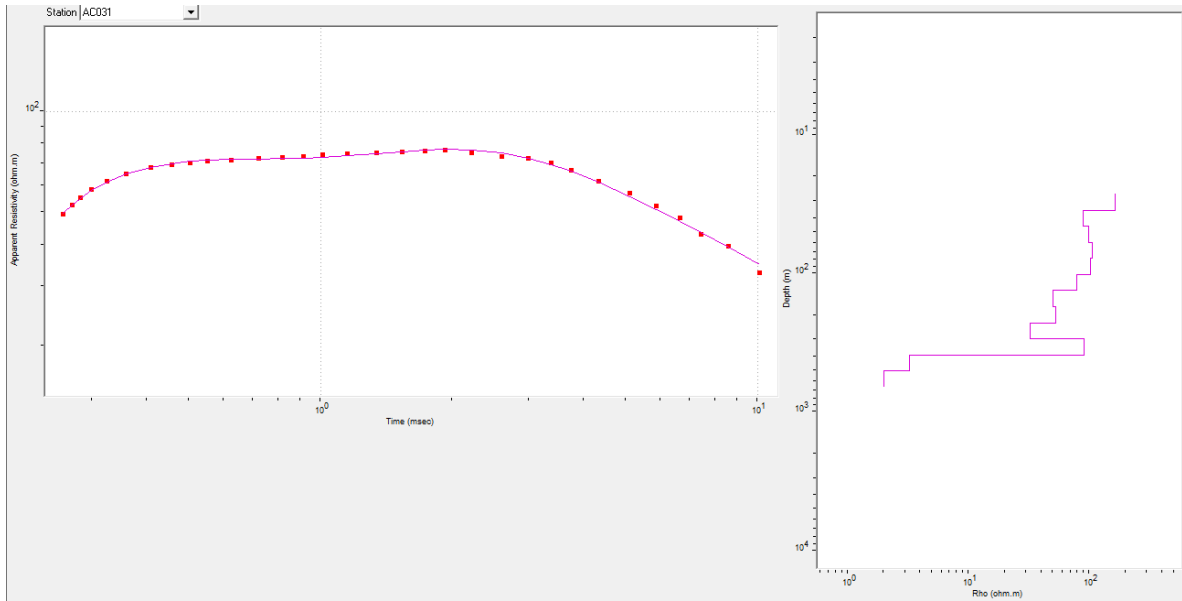


Figura A.29. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC031.

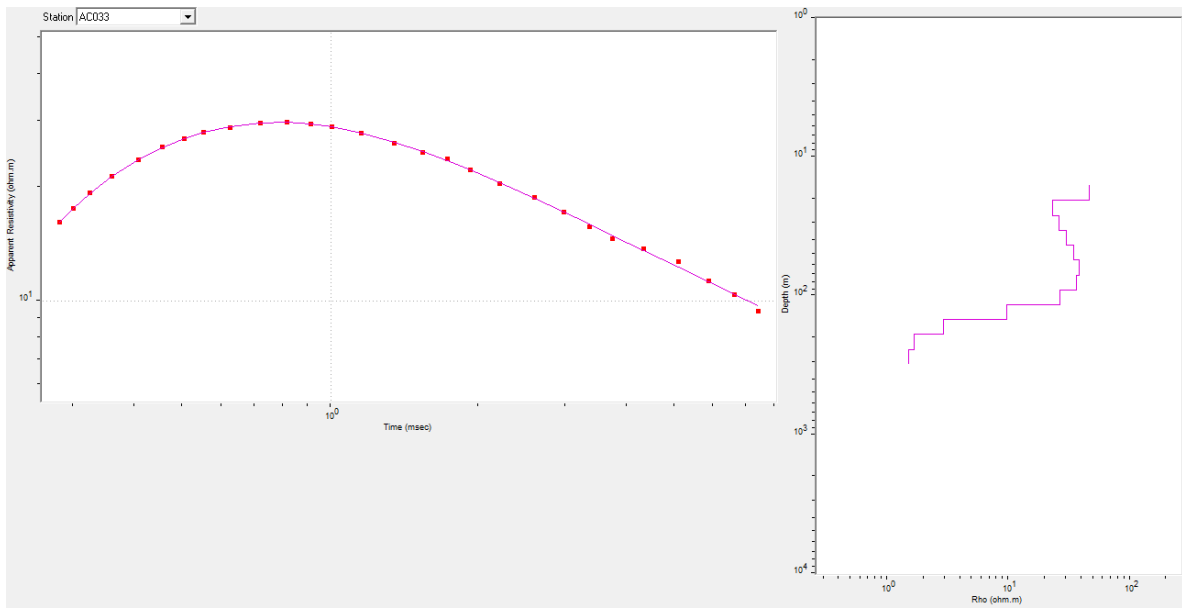


Figura A.30. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC033.

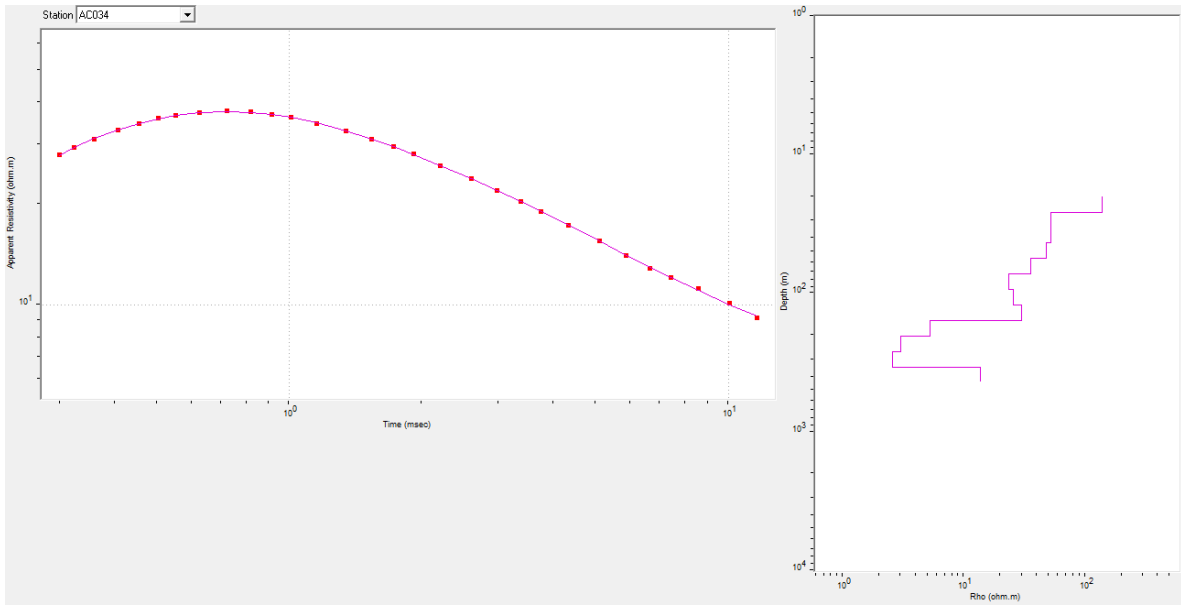


Figura A.31. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC034.

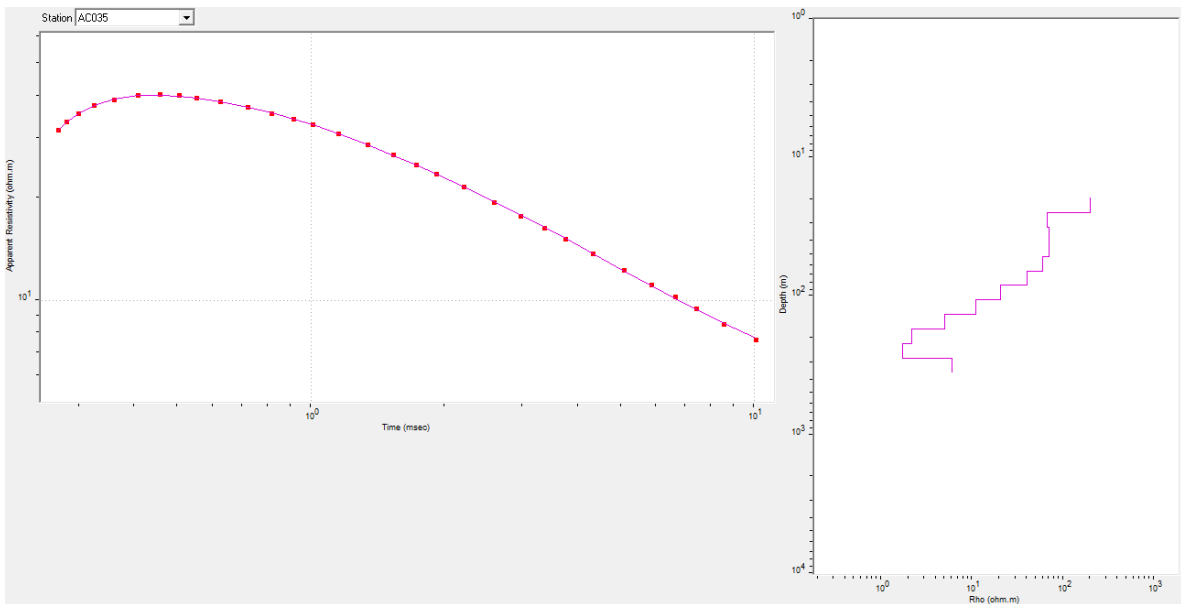


Figura A.32. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC035.

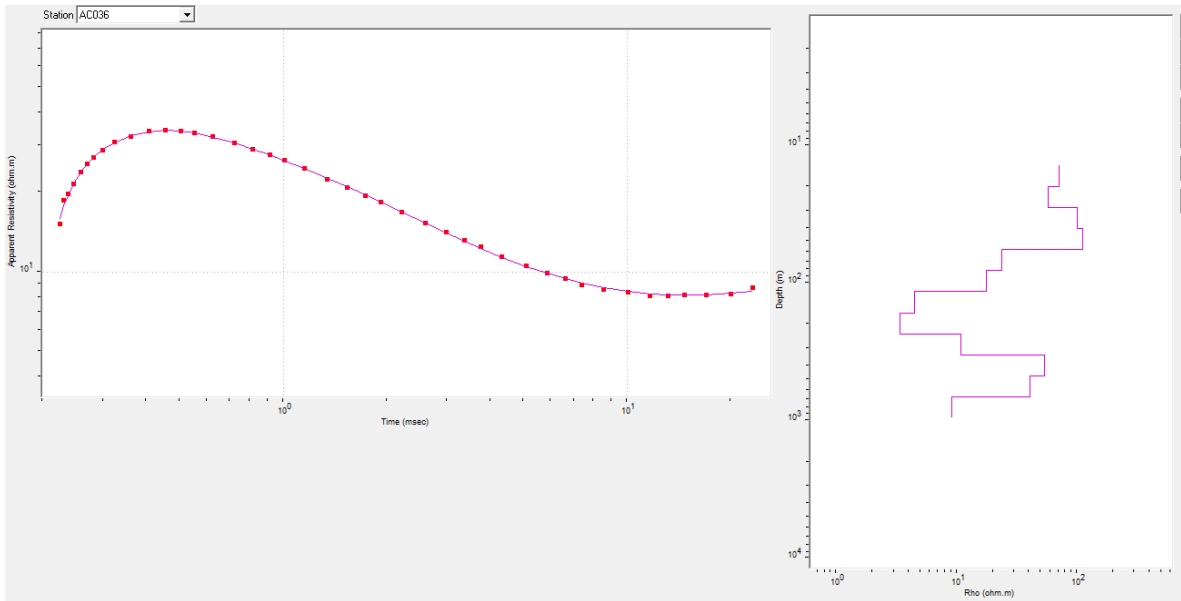


Figura A.33. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC036.

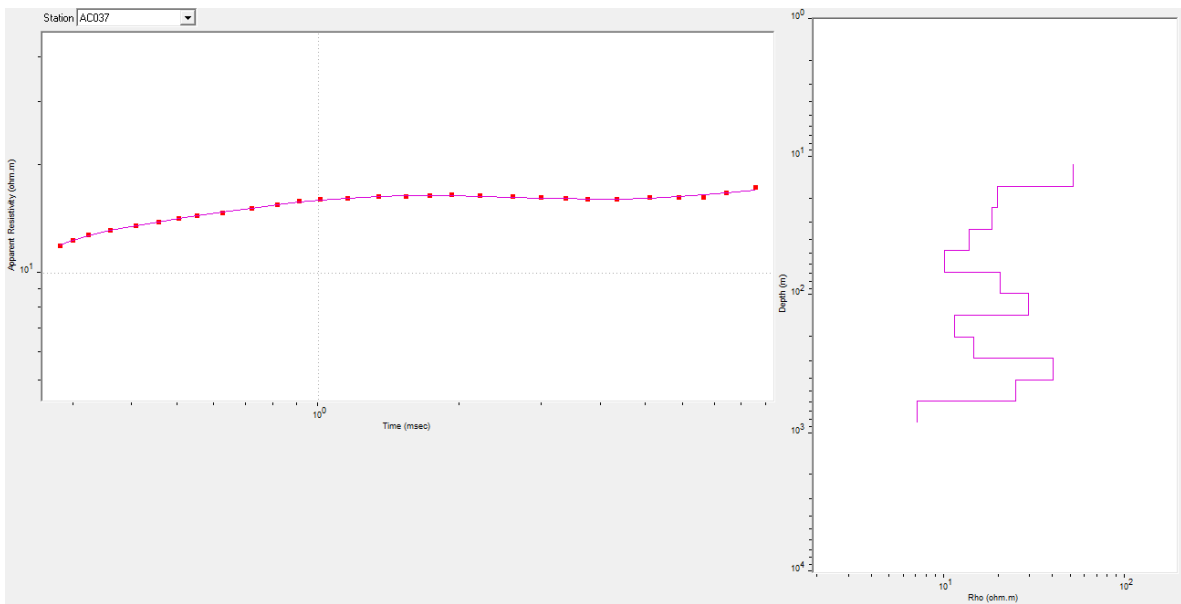


Figura A.34. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC037.

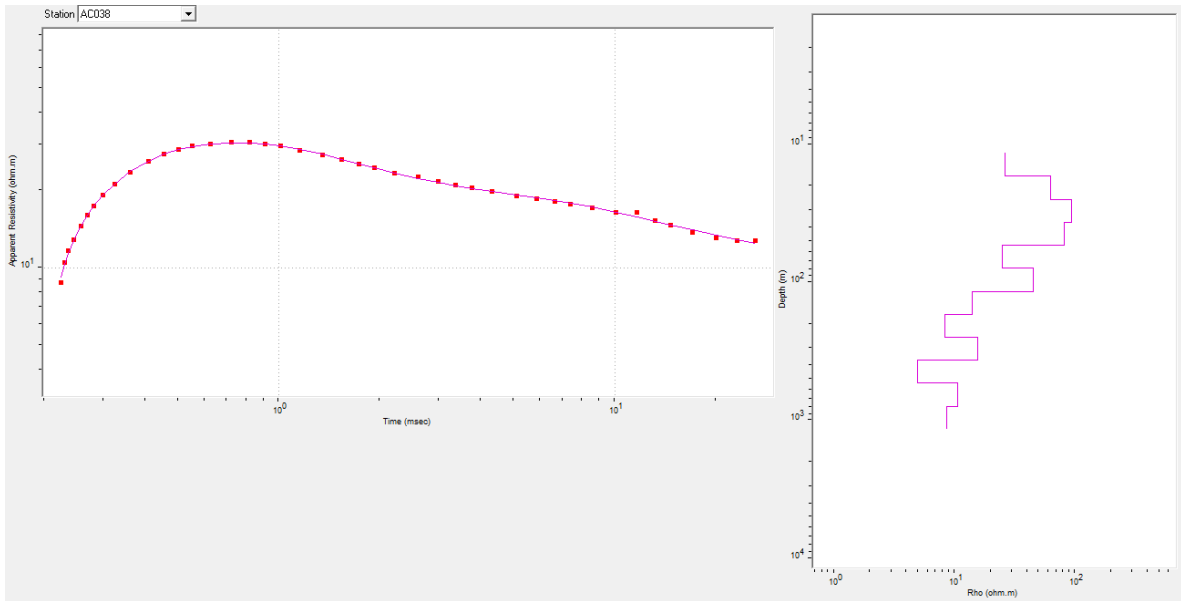


Figura A.35. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC038.

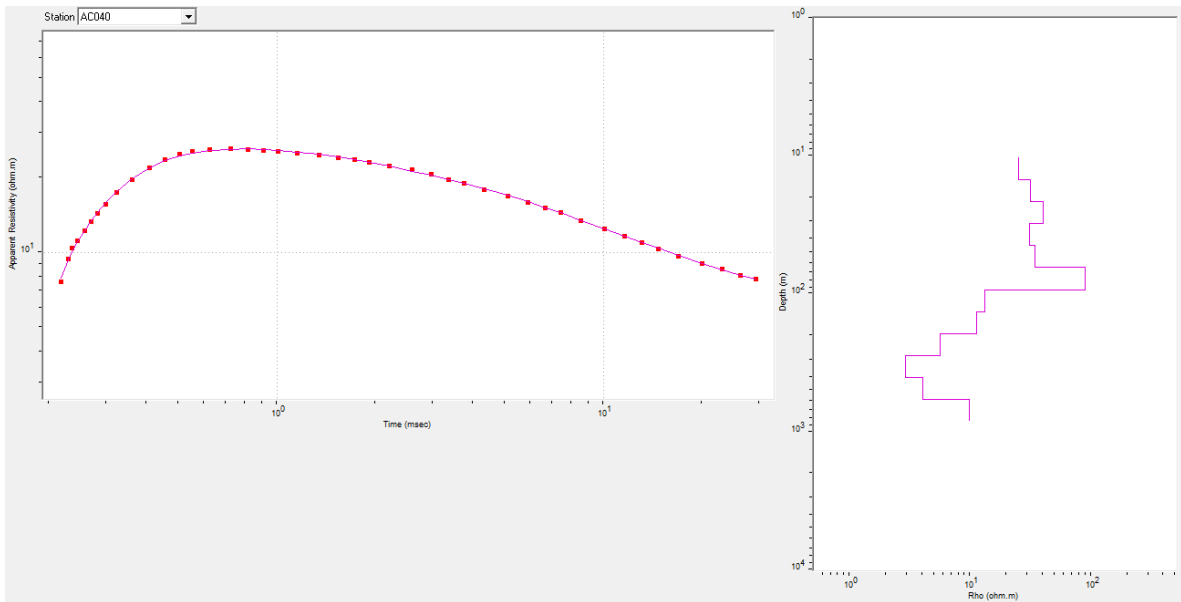


Figura A.36. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC040.

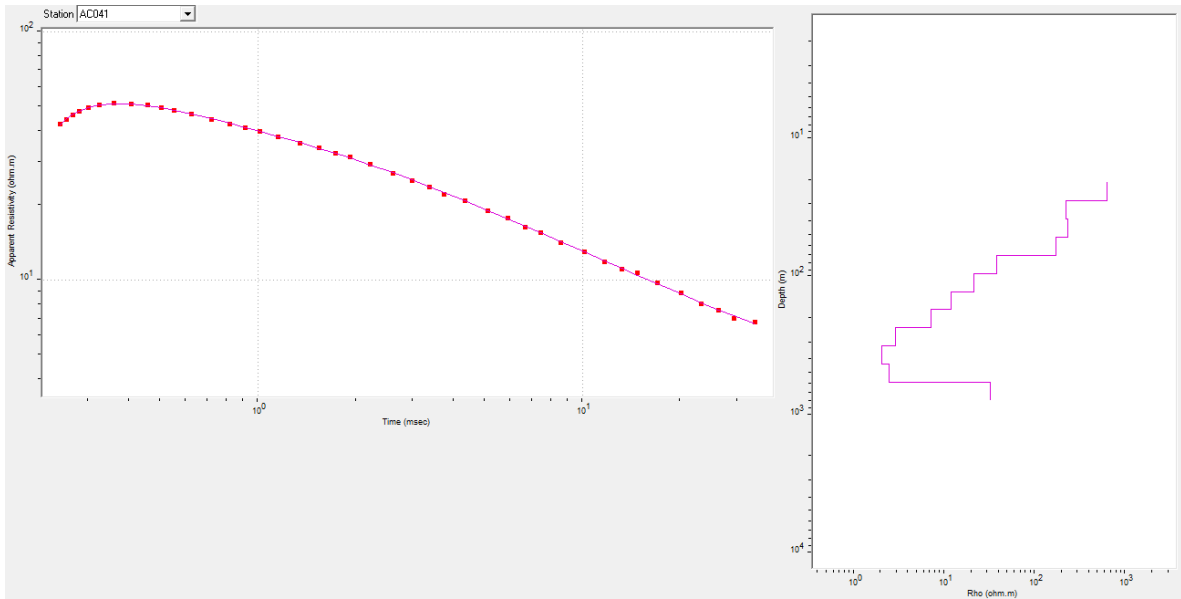


Figura A.37. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC041.

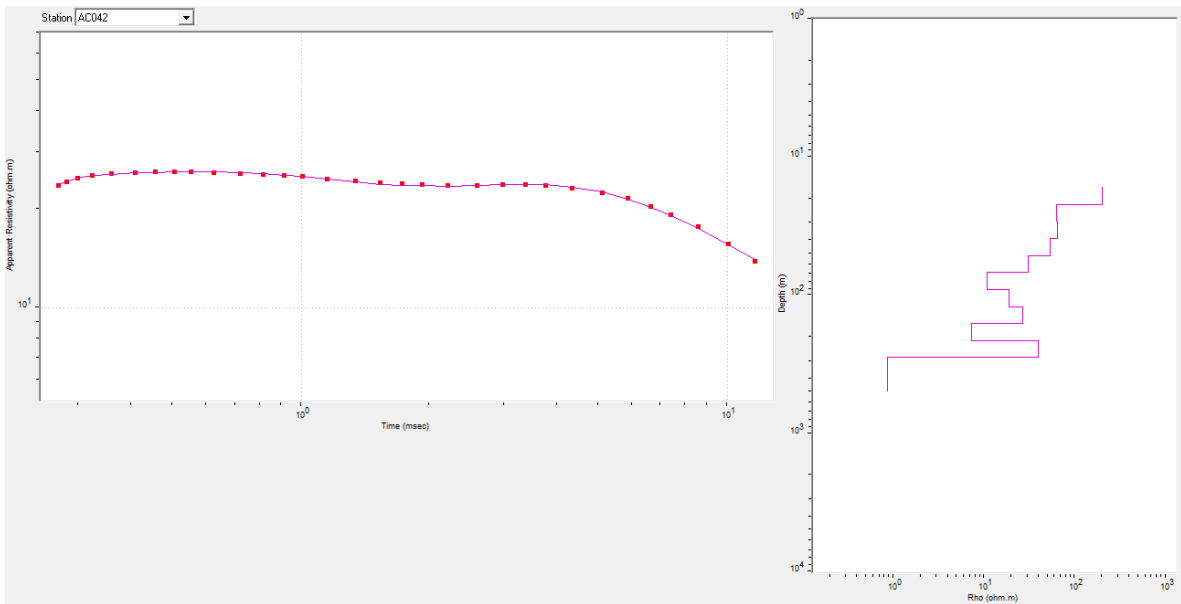


Figura A.38. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC042.

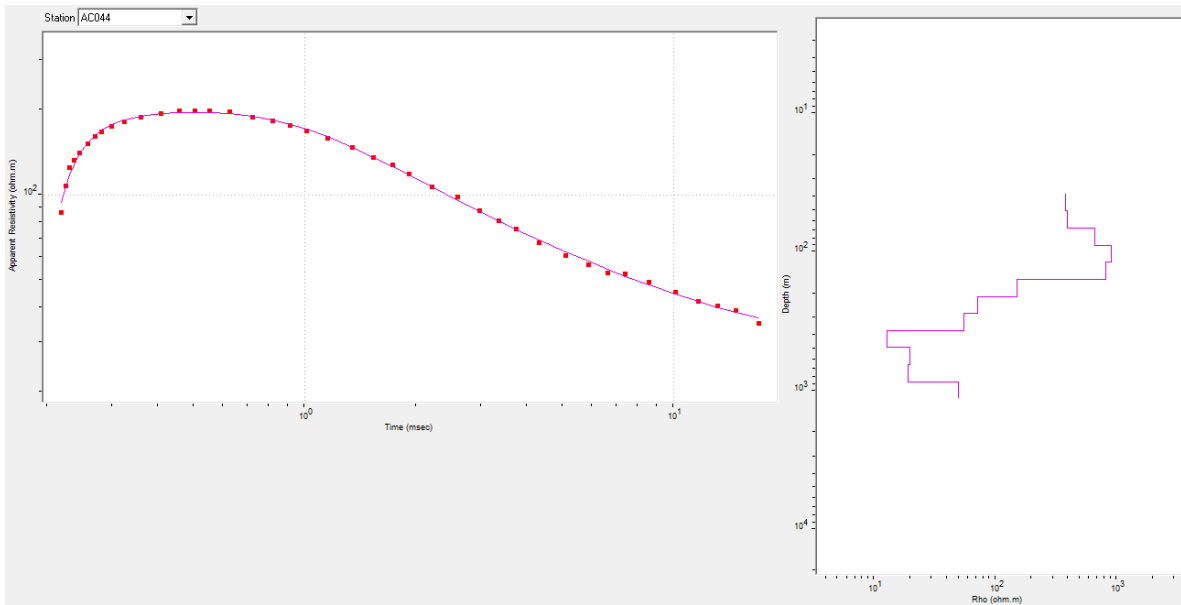


Figura A.39. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC044.

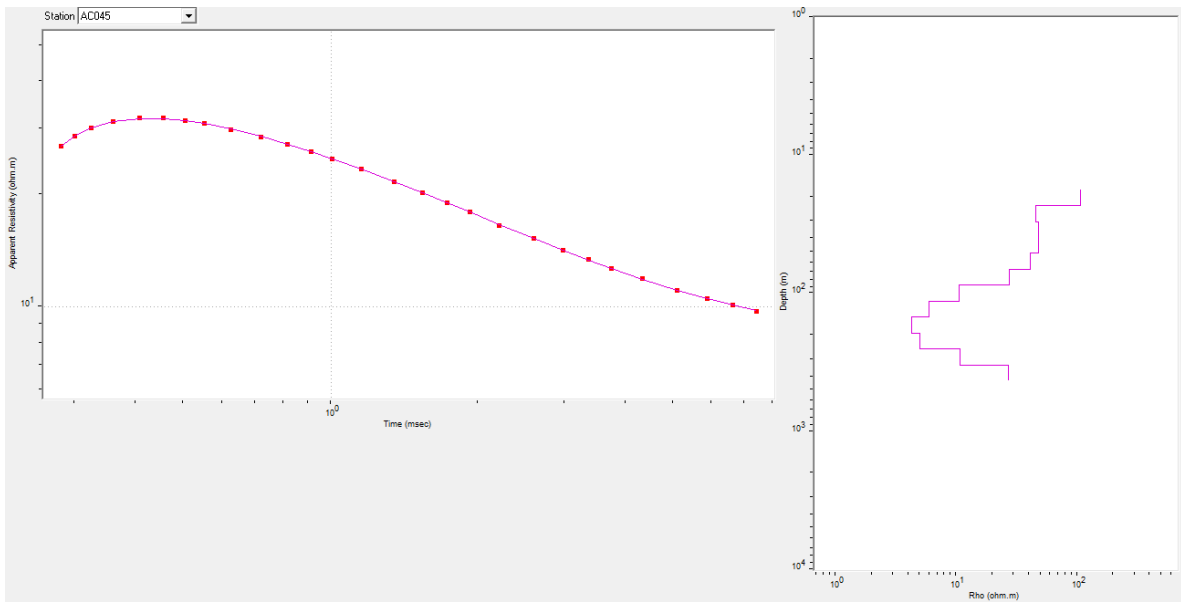


Figura A.40. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC045.

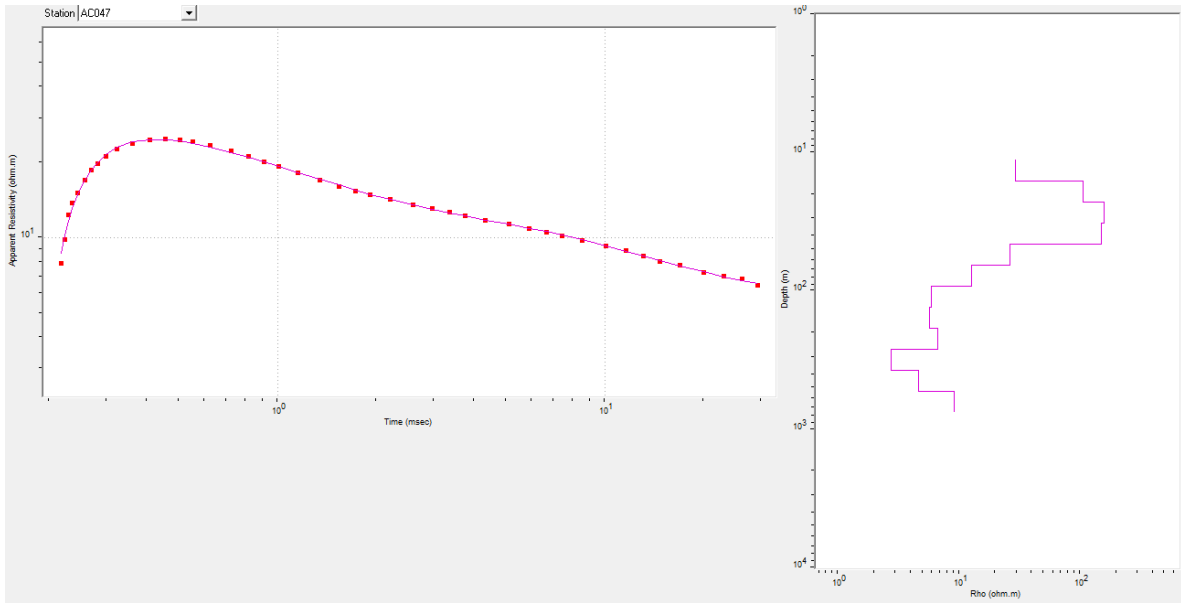


Figura A.41. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC047.

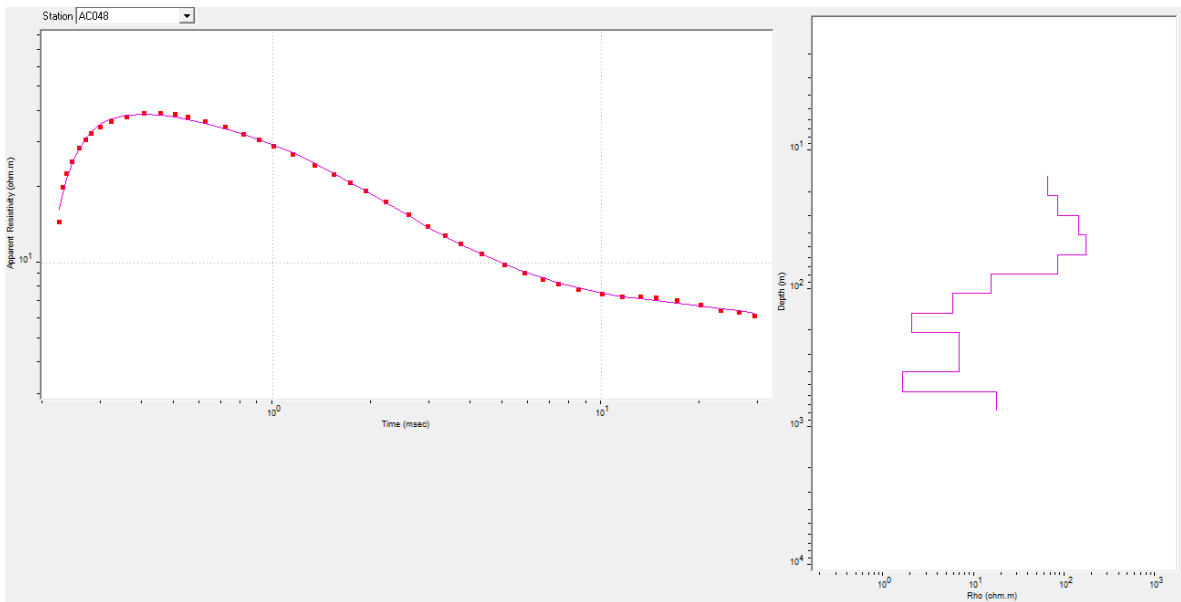


Figura A.42. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC048.

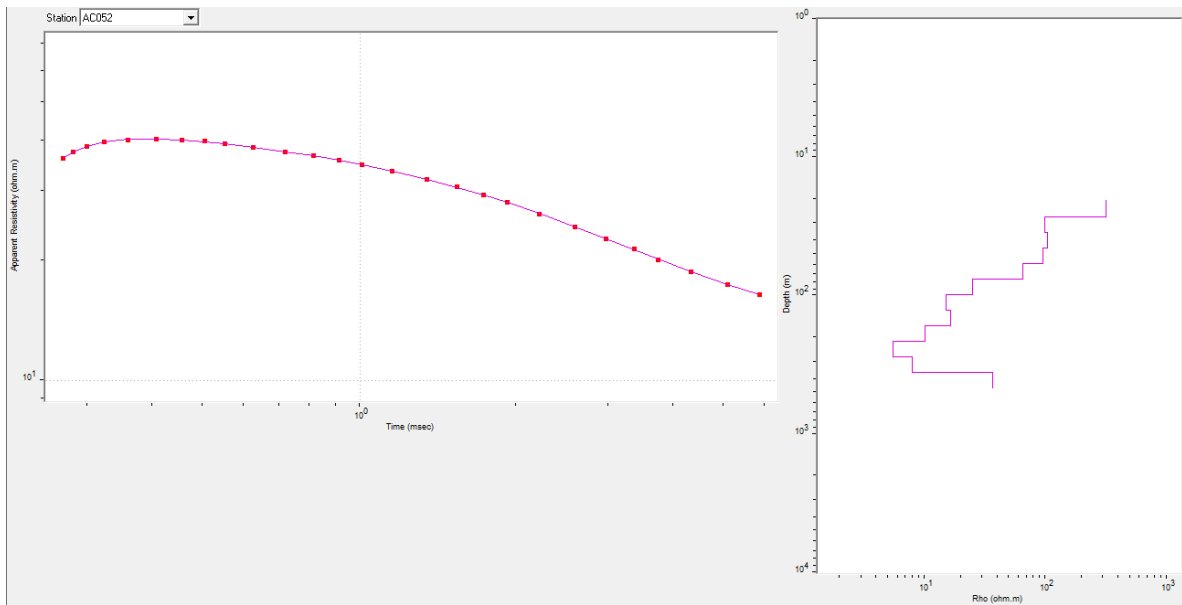


Figura A.43. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC052.

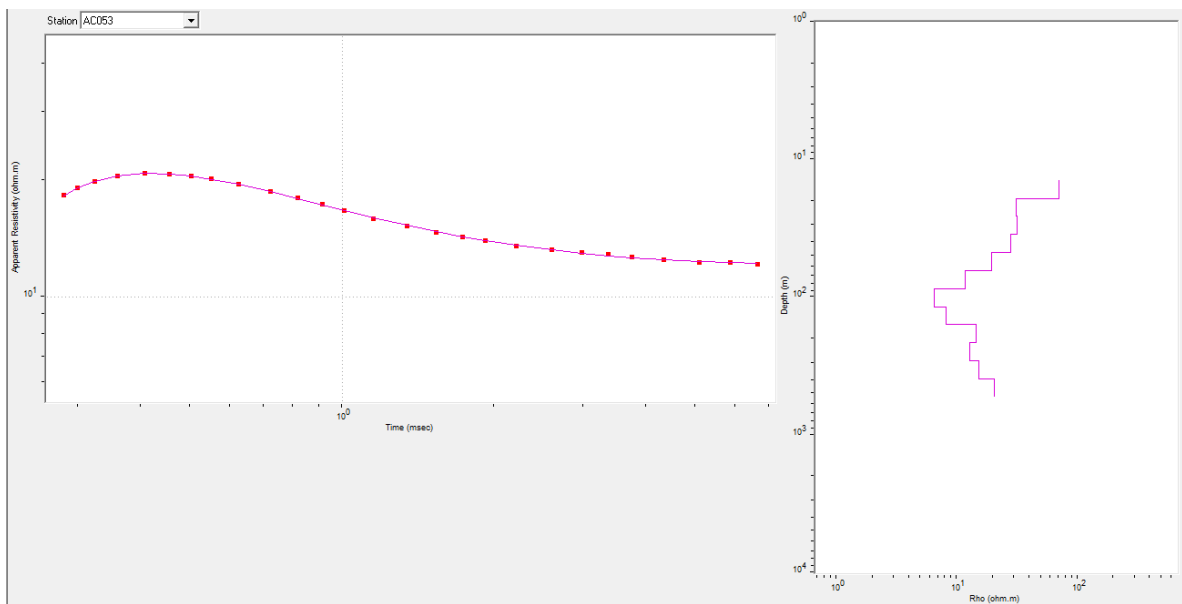


Figura A.44. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC053.

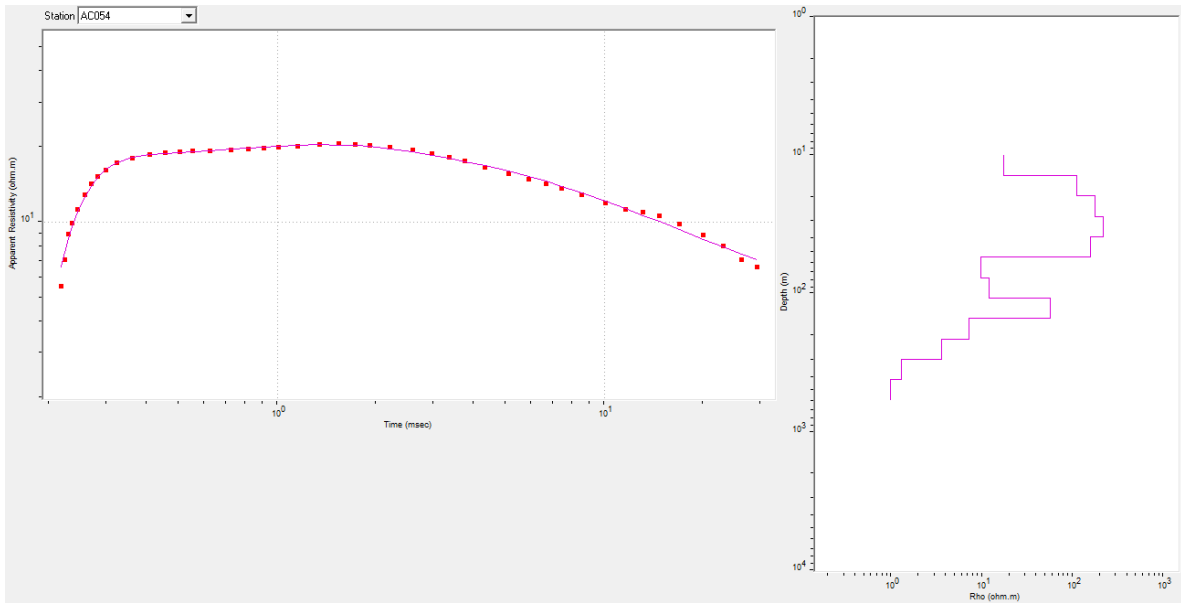


Figura A.45. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC054.

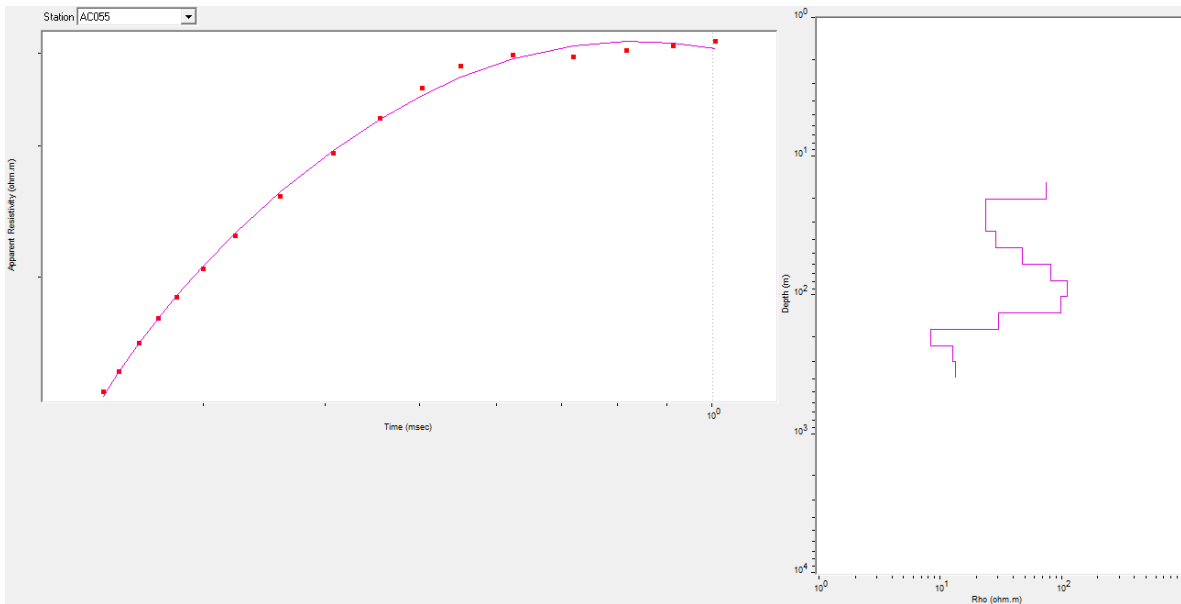


Figura A.46. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC055.

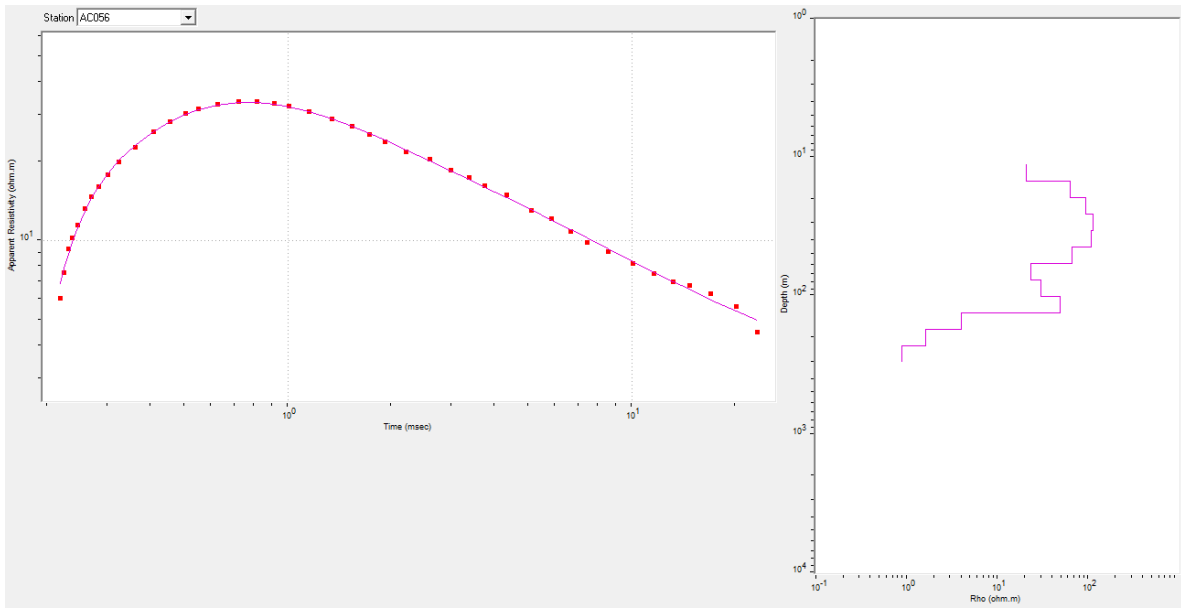


Figura A.47. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC056.

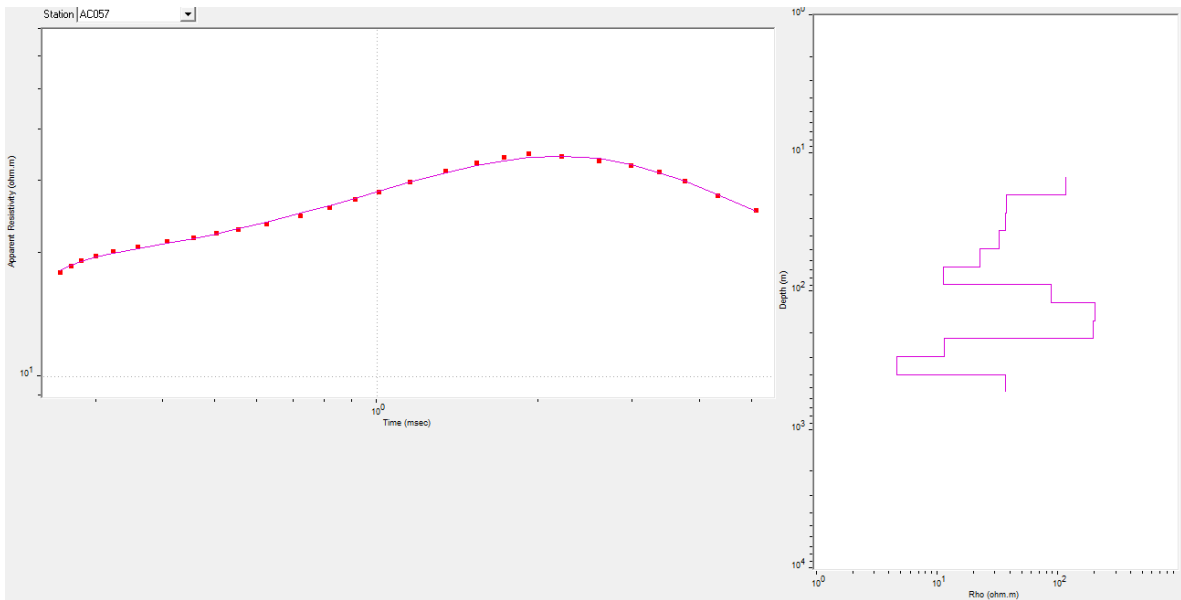


Figura A.48. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC057.

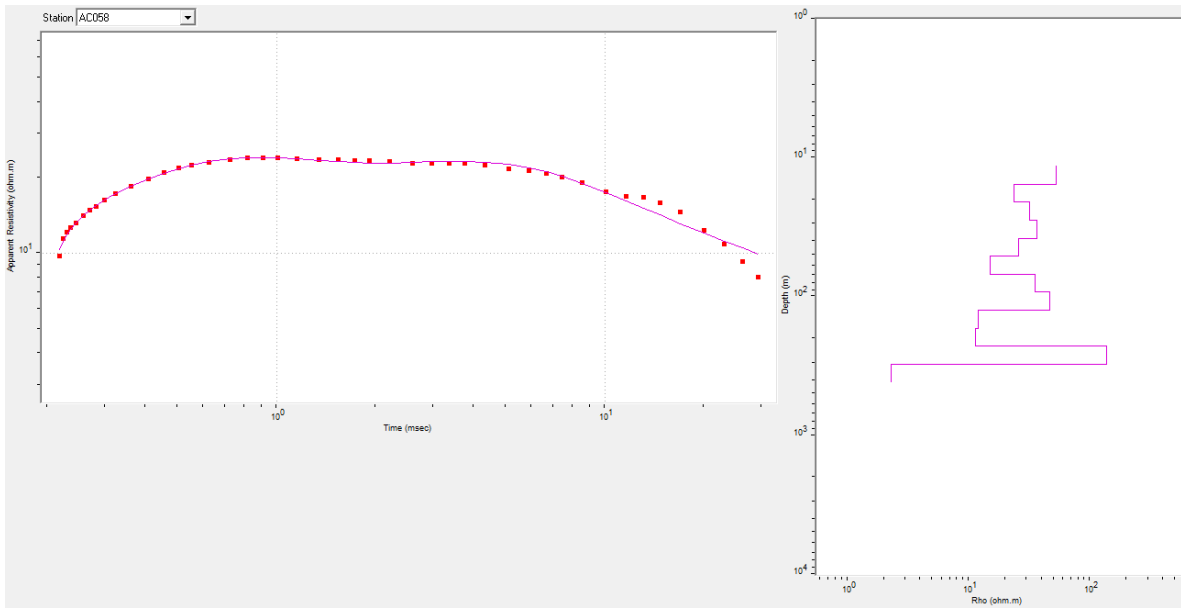


Figura A.49. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC058.

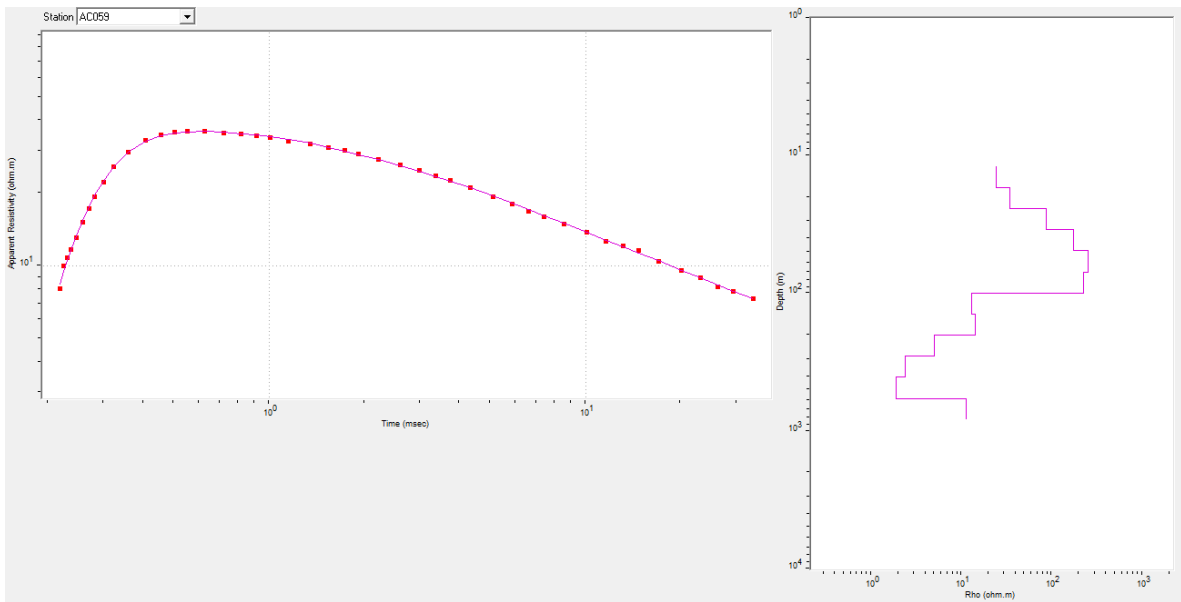


Figura A.50. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC059.

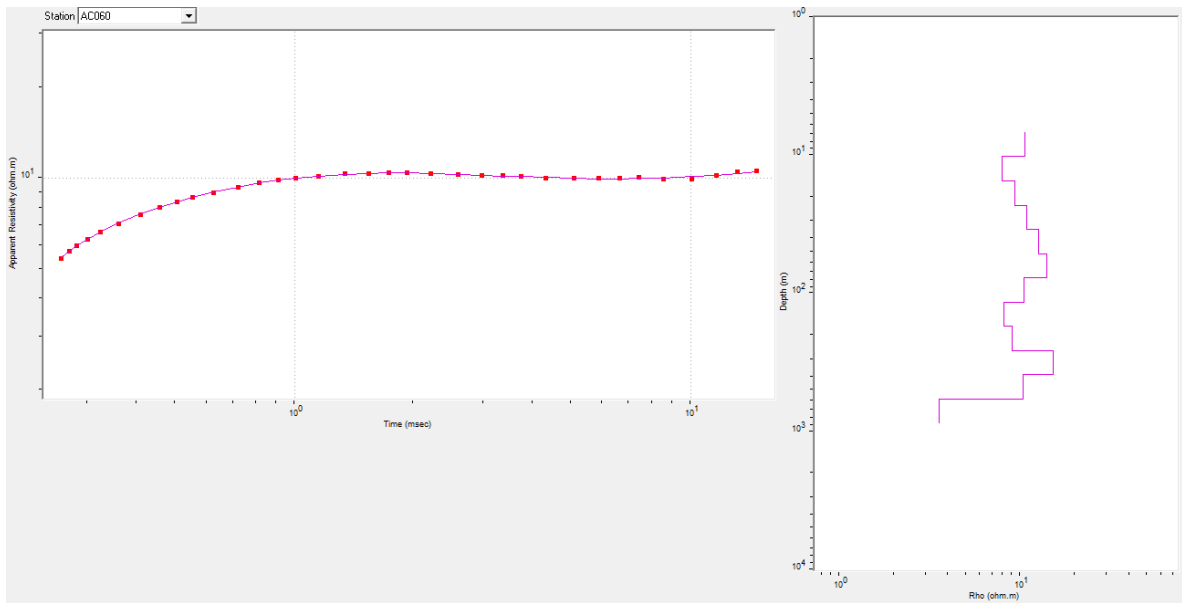


Figura A.51. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC060.

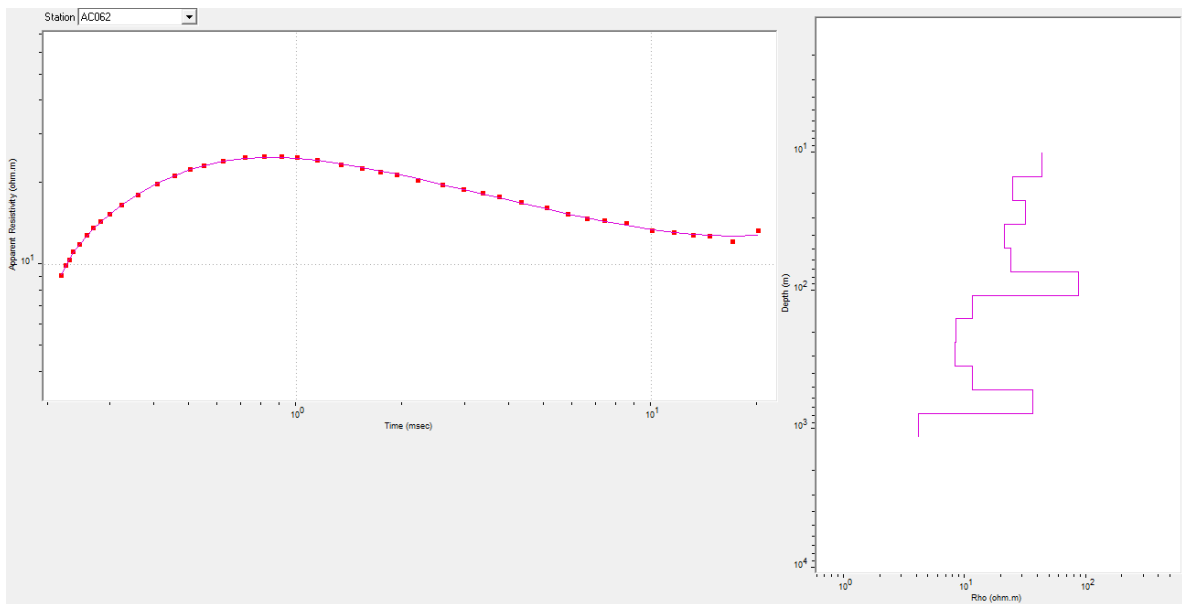


Figura A.52. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC062.

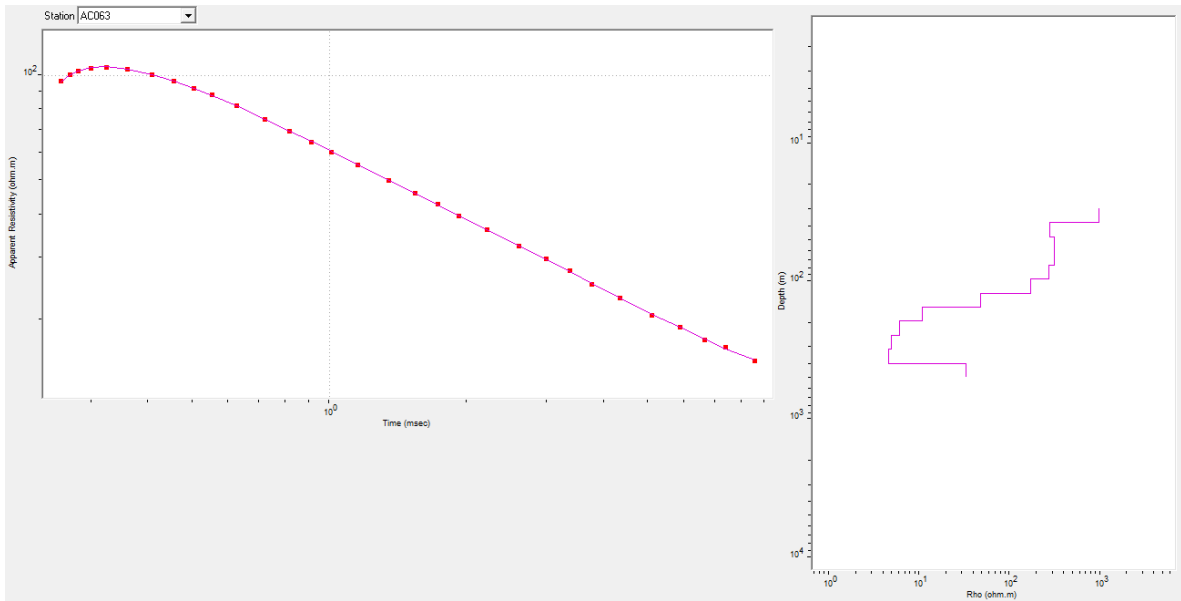


Figura A.53. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC063.

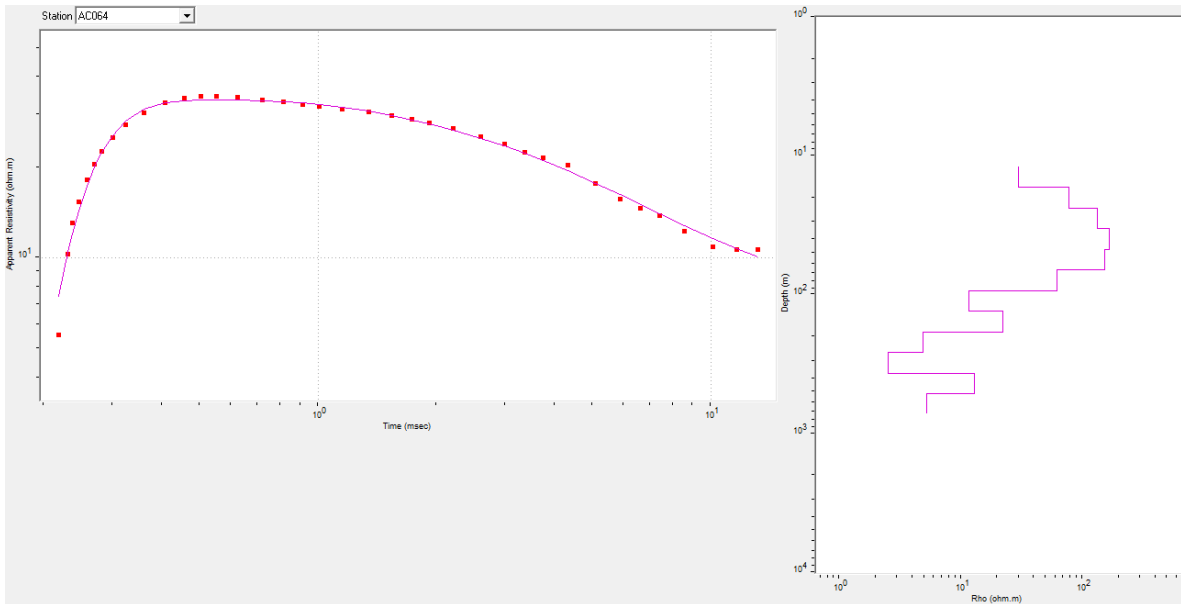


Figura A.54. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC064.

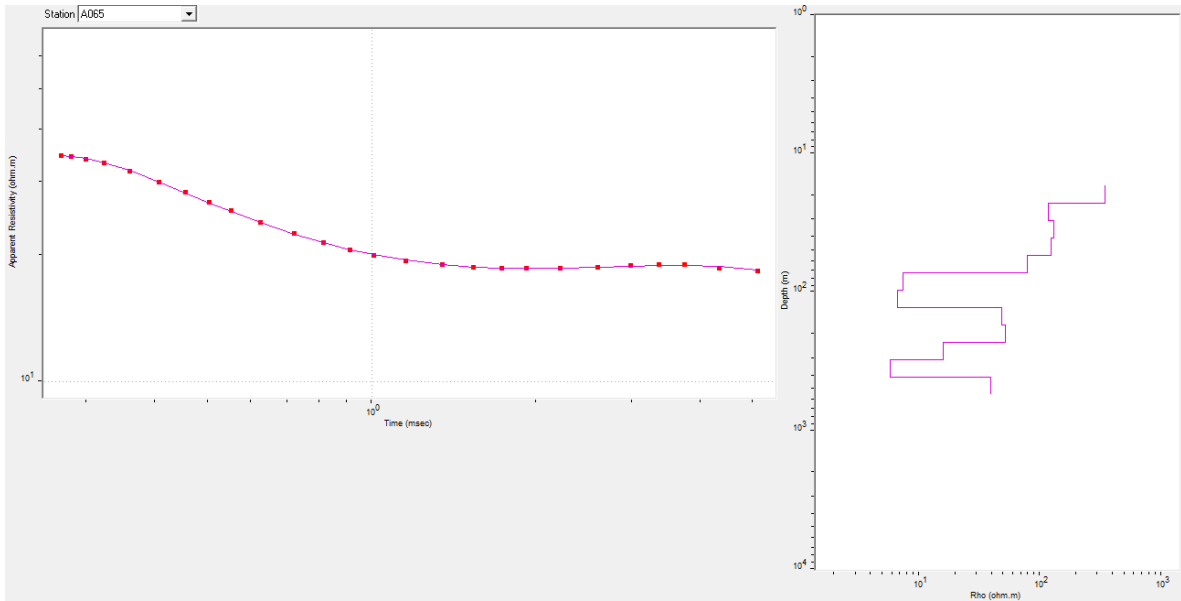


Figura A.55. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC065.

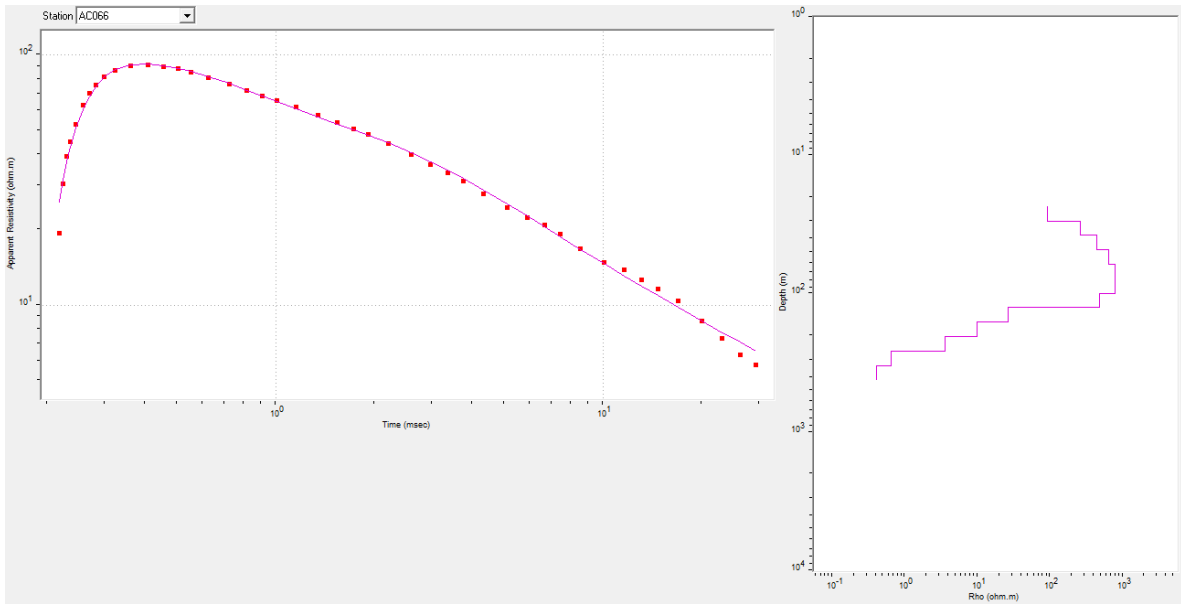


Figura A.56. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC066.

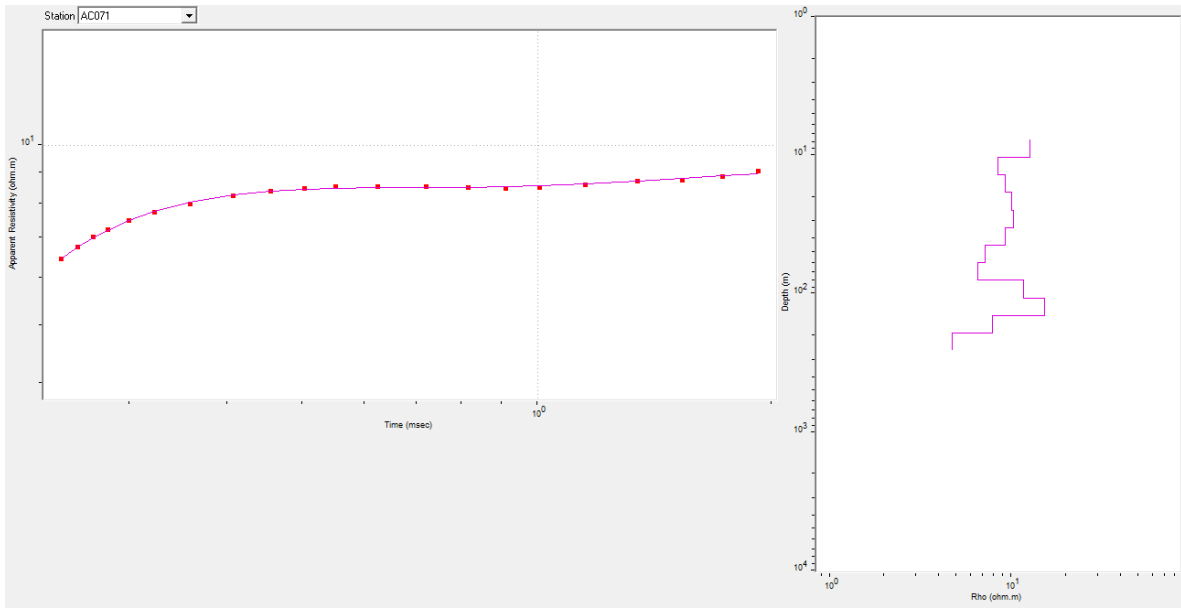


Figura A.57. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC071.

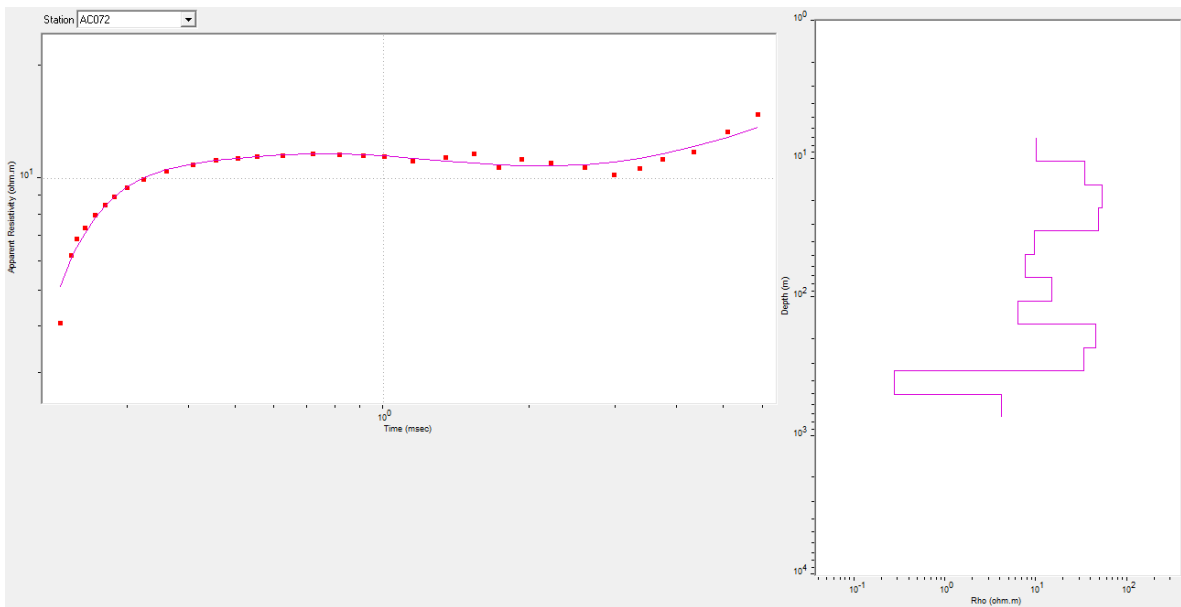


Figura A.58. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC072.

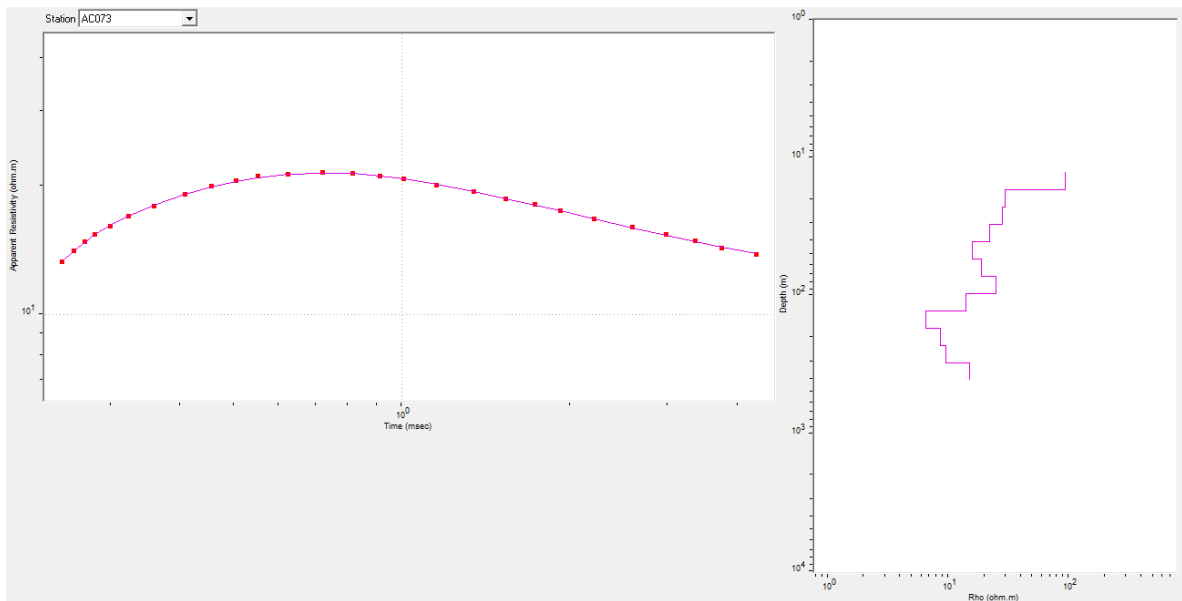


Figura A.59. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC073.

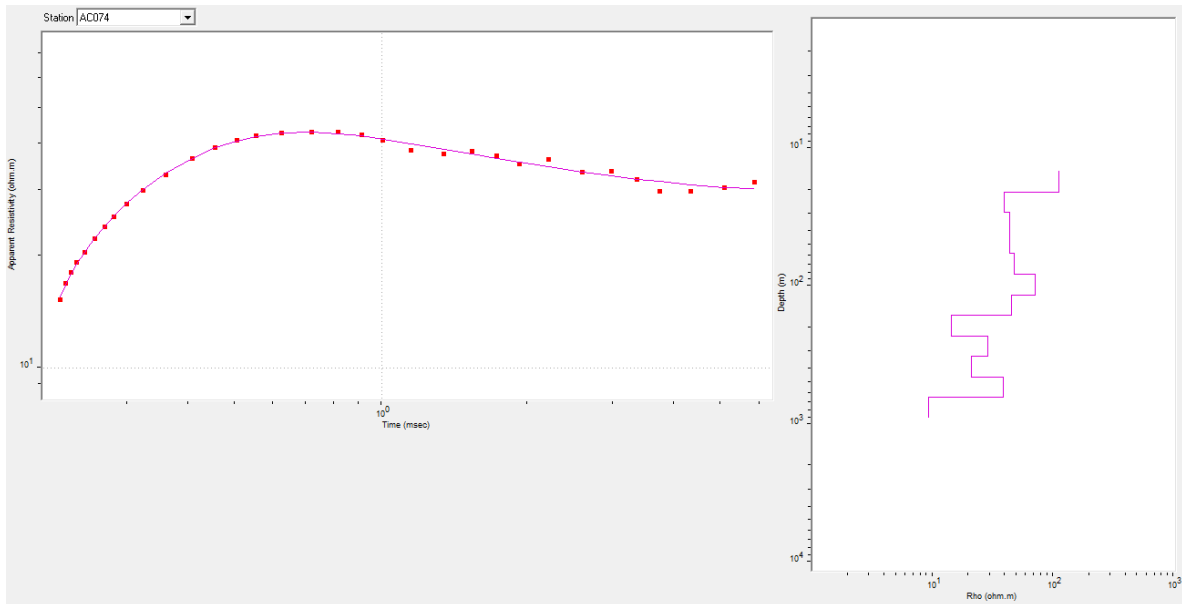


Figura A.60. Modelo de capas asociado a la curva de resistividad aparente de la estación AC074.

10. Referencias

- Alonso, H., (1985). Present and planned utilization of Geothermal Resources in Mexico. Transactions of the Geothermal Resources Council, Vol. 9, pp. 135-140.
- Avellán, D. R., Macías, J. L., Layer, P. W., Sosa-Ceballos, G., Gómez-Vasconcelos, M. G., Cisneros-Máximo, G., ... & Benowitz, J. (2020). Eruptive chronology of the Acoculco caldera complex—A resurgent caldera in the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt (México). *Journal of South American Earth Sciences*, 98, 102412.
- Banjai, L. y Sauter, S. (2009). Rapid Solution of the Wave Equation in Unbounded Domains. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 47(1), pp.227-249.
- Barco-Ríos, H., Rojas-Calderón, E. y Restrepo-Parra, E. (2012). Física. *Manizales: Universidad Nacional de Colombia*.
- Bolós, X., Del Ángel, V., Villanueva-Estrada, R. E., Sosa-Ceballos, G., Boijseauneau-López, M., Méndez, V., & Macías, J. L. (2022). Surface hydrothermal activity controlled by the active structural system in the self-sealing geothermal field of Acoculco (Mexico). *Geothermics*, 101, 102372.
- Cortés, J. A. (2017). Modelo térmico y de conductividad eléctrica en la caldera Tulancingo-Acoculco, Puebla.
- Gama, J. G. G., de Ciencias, P. A. M., & Partida, E. G. (2016). Procesos geológicos del campo geotérmico Acoculco, Puebla, México.
- García-Tovar, G. P., Martínez-Serrano, R. G., Solé, J., Correa-Tello, J. C., Núñez-Castillo, E. Y., Guillou, H., & Monroy-Rodríguez, E. (2015). Geología, geocronología y geoquímica del vulcanismo Plio-Cuaternario del Campo Volcánico Apan-Tecocomulco, Faja Volcánica Trans-Mexicana. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 32(1), 100-122.
- Le Bert, G. H., Gutiérrez-Negrín, L. C., Quijano León, H. L., Ornelas Celis, A., Espíndola, S., & Hernandez Carrillo, I. (2011). Evaluación de la energía geotérmica en México. Informe para el banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía.
- López-Hernández, A., & Aguirre Díaz, G. de J. (2009). Evolución volcánica del complejo Tulancingo-Acoculco y su sistema hidrotermal, Estados de Hidalgo y Puebla, México.
- Kruszewski, M., Hofmann, H., Alvarez, F. G., Bianco, C., Haro, A. J., Garduño, V. H., ... & Saenger, E. H. (2021). Integrated stress field estimation and implications for enhanced geothermal system development in Acoculco, Mexico. *Geothermics*, 89, 101931.
- Marsden, J. y Tromba, A. (1991). Cálculo vectorial. 3rd ed. Delaware, E.U.A.: *ADDISON-WESLEY IBEROAMERICANA*, p.550.
- McNeill, J. (1980a). TN-5, Electrical Conductivity of Soils and Rocks. Ontario, Canada. *Geonics Limited*.
- McNeill, J. (1980b). TN-7, Applications of Transient Electromagnetic Techniques. Ontario, Canada. *Geonics Limited*.
- McNeill, J. (1994). TN-27, Principles and Application of Time Domain Electromagnetic Techniques for Resistivity Sounding. Ontario, Canada. *Geonics Limited*.
- Mercado, S., 1976. The Geothermal Potential Evaluation of Mexico by Geothermal Chemistry. Proceedings of the International Congress on Thermal Waters, Geothermal Energy and Vulcanism of the Mediterranean Area. Atenas, Grecia, 1976.
- Merwade, V. M., Maidment, D. R., & Goff, J. A. (2006). Anisotropic considerations while interpolating river channel bathymetry. *Journal of Hydrology*, 331(3-4), 731-741.
- Mooser, F. and M. T. Ramírez. (1987). Faja Volcánica Transmexicana: Morfoestructura, Tectónica, y Vulcanotectónica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, XLVIII: 75-80.

- Nabighian, M. y Corbett, J. (1987). Electromagnetic methods in applied geophysics. Tulsa, Oklahoma: *Society of Exploration Geophysicists*.
- Olasolo, P., Juárez, M. C., Morales, M. P., & Liarte, I. A. (2016). Enhanced geothermal systems (EGS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 133-144.
- Ordaz-Méndez, C.A., Flores Armenta, M., y Ramírez Silva, G., (2011). Potencial geotérmico de la República Mexicana. *Geotermia*, Vol. 24-1, pp. 50-58
- Palomo, A. G., Macías, J. L., Tolson, G., Valdez, G., & Mora, J. C. (2002). Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional*, 41(2), 133-150.
- Peiffer, L., Bernard-Romero, R., Mazot, A., Taran, Y. A., Guevara, M., & Santoyo, E. (2014). Fluid geochemistry and soil gas fluxes (CO₂-CH₄-H₂S) at a promissory Hot Dry Rock Geothermal System: The Acoculco caldera, Mexico. *Journal of volcanology and geothermal research*, 284, 122-137.
- Reynolds, J. (2013). An introduction to applied and environmental geophysics. 2nd ed. Hoboken, N.J.: *Wiley*.
- Rodríguez-Robles, K. C. (2021). Análisis de mercurio en suelos, aire y líquenes de la Caldera Acoculco, Pue., como un posible indicador para una zona de interés geotérmico.
- Santiago-Villeda, M., Cuevas-Zuñiga, I. Y., & Soto-Flores, M. R. (2022). La energía geotérmica para mejorar el Desarrollo Energético Sostenible en México. EL DESARROLLO DEL MERCADO INTERNACIONAL Y EL LIDERAZGO DE LA MUJER COMO DETERMINANTES DE LA COMPETITIVIDAD, 285.
- Sengupta, D. y Sarkar, T. (2003). Maxwell, Hertz, the Maxwellians, and the early history of electromagnetic waves. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 45(2), pp.13-19.
- SGM. (2017). Carta Geológico-Minera. Chignahuapan E14-B13. Hidalgo y Puebla. Primera edición.
- Sosa-Ceballos, G., Macías, J. L., Avellán, D. R., Salazar-Hermenegildo, N., Boijseauneau-López, M. E., & Pérez-Orozco, J. D. (2018). The Acoculco Caldera Complex magmas: Genesis, evolution and relation with the Acoculco geothermal system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358, 288-306.
- Spies, B. (1989). Depth of investigation in electromagnetic sounding methods. *GEOPHYSICS*, 54(7), 872-888.
- Stewart, M. & Gay, M. (1986). Evaluation of Transient Electromagnetic Soundings for Deep Detection of Conductive Fluids. *Ground Water*, 24(3), pp.351-356.
- Tippens, P. (1981). Física, Conceptos y Aplicaciones. México: *McGraw-Hill*, p. 510.