



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

*"PROSPECCIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN EL VALLE  
DE CUATRO CIÉNEGAS, COAHUILA (MÉTODO DE  
TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO) "*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A :

KARLA MÓNICA TOLEDO NÚÑEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. OSCAR A. ESCOLERO FUENTES





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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

*A mi director de tesis y mis sinodales, con gratitud y admiración.*

*Dr, Oscar A. Escolero Fuentes*

*Dr. René E. Chávez Segura*

*Dra. Claudia Arango Galván*

*Dr. Andrés Tejero Andrade*

*Ing. Javier Urbietta Gómez*

**Karla Toledo**



## ***Dedicatoria***

*A mi esposo Javier, por su amor, apoyo y compañía durante estos 8 años.*

*A mis padres Martha y Antonio, por su amor, ejemplo y apoyo incondicional durante toda mi vida.*

*A mis hijos Paola y bebé sin nombre aún, por ser mi inspiración.*

*A mis hermanas Martha, Claudia y Brenda, por sus palabras de aliento y estar conmigo en todo momento.*

*A mis suegros Rosa y Felipe, por sus consejos y respaldo.*

*A mi cuñis Erika, por estar con nosotros en los momentos importantes.*

## ***Agradecimientos***

*A mi familia*

*Al Dr. René Chávez*

*A la Dra. Claudia Arango*

*Al Ing. Carlos Pita*

***Con Cariño, Karla Toledo***

# Índice

Resumen	
1. Generalidades.....	1
1.1 Antecedentes	
1.2 Objetivos	
1.3 Área de estudio	
2. Geología.....	7
2.1 Geología General	
2.2 Estratigrafía	
2.3 Paleogeografía	
2.4 Geología Estructural	
3. Fundamentos Teóricos.....	25
3.1 Base Teórica del Método TEM	
3.2 Principios Básicos del Método TEM	
3.3 Concepto de Resistividad Aparente en TEM	
3.4 Configuraciones de Campo	
4. Metodología.....	37
4.1 Localización de los TEM's	
4.2 Procesamiento de Datos	
5. Resultados y Conclusiones.....	41
Bibliografía.....	51
Anexo I. Instrumentación.....	52
Anexo II. Coordenadas.....	53
Anexo IV. Gráficas de Resistividad.....	54

## **Resumen**

El Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila ha sido objeto de muchos estudios debido a su importancia turística y geohidrológica. A lo largo de los últimos años se ha observado un descenso en el nivel del agua de la gran cantidad de pozas existentes, las cuales forman parte del atractivo turístico y del sistema geohidrológico del valle, que es el que provee de agua a ciudades cercanas. Debido a lo anterior, se busca delimitar el relleno del valle e identificar el basamento para saber si hay alguna característica geológica en la zona que explique el descenso del nivel del agua, para lo cual se usaron sondeos realizados por la Compañía de Consultores en Ingeniería Geofísica S. A. de C. V. (CIGSA), contratada por el IMTA y por el Instituto de Geología de la UNAM.

Fueron 28 los sondeos electromagnéticos usados para este trabajo, con el método de Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TEM), en la modalidad de loop coincidente. Se trazaron 6 secciones de forma tal que se cubriera la mayor parte del valle. El tratamiento de los datos fue realizado mediante una etapa de pre-procesamiento y una etapa de inversión. Finalmente se obtuvieron perfiles geoelectrónicos, los cuales coinciden con la geología de la zona.

Los resultados obtenidos coinciden con la geología de la zona. Sin embargo, debido a las características del medio, no fue posible alcanzar la profundidad a la cual se espera encontrar el basamento, pero sí se pudo obtener una delimitación del relleno fluvial.

En el capítulo 1, se explican los objetivos y las características del área de estudio; en el capítulo 2, se expone la geología de la zona dentro del cual se incluyen secciones estructurales que son usadas para la interpretación de los datos; en el capítulo 3, se explican los fundamentos teóricos del método. El capítulo 4 muestra cómo fueron procesados los datos obtenidos en campo y, por último, en el quinto capítulo se hace una interpretación de los datos, apoyada en las secciones estructurales y se obtienen conclusiones.

# **1.Generalidades.**

## **1.1 Antecedentes.**

En 2004, en el Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila; la Compañía de Consultores en Ingeniería Geofísica S. A. de C. V. (CIGSA) realizó un estudio electromagnético, usando el método Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TEM), para el Instituto Mexicano de Tratamiento de Agua (IMTA), el cual consistía en realizar 19 sondeos dentro del valle para poder determinar la modelación geofísica de la zona. También realizó un trabajo solicitado por el Dr. Oscar Escolero, en la misma zona; que consistía en 9 sondeos para la realización de la modelación geofísica del valle.

En este trabajo se han retomado los datos de ambos proyectos para realizar la modelación geofísica del valle, usando como herramienta la información geológica de la zona y finalizando con secciones geológicas trazadas sobre las líneas de los TEM's.

## **1.2 Objetivos.**

- Delimitar la geometría del relleno aluvial del valle
- Identificar la profundidad a la que se encuentra el basamento
- Encontrar alguna estructura geológica que explique el descenso del nivel de las pozas

## **1.3 Área de Estudio.**

Se trata de una zona desértica, con montañas hasta de 1900 msnm, cañones, abanicos aluviales. El valle es plano, con pequeñas colinas, una importante cantidad de manantiales, que dan vida a ríos, lagunas, pozas y pantanos. Además, cuenta con una importante área de dunas de yeso.

La población más importante es Cuatrociénegas, que está presente como cabecera municipal, cuya población es de 12 154 habitantes (INEGI 2004) y que está constituido de pequeños poblados. También se encuentra el Área de Protección de Flora y Fauna, denominada Cuatrociénegas.

### **1.3.1 Localización**

La Zona de Estudio comprende la Subprovincia de las Sierras y Llanuras Coahuilenses, está ubicada en la parte central del estado de Coahuila, entre los paralelos 26° 20' y 27° 20' de latitud norte y entre los meridianos 101° 45' y 102° 45' de longitud oeste.

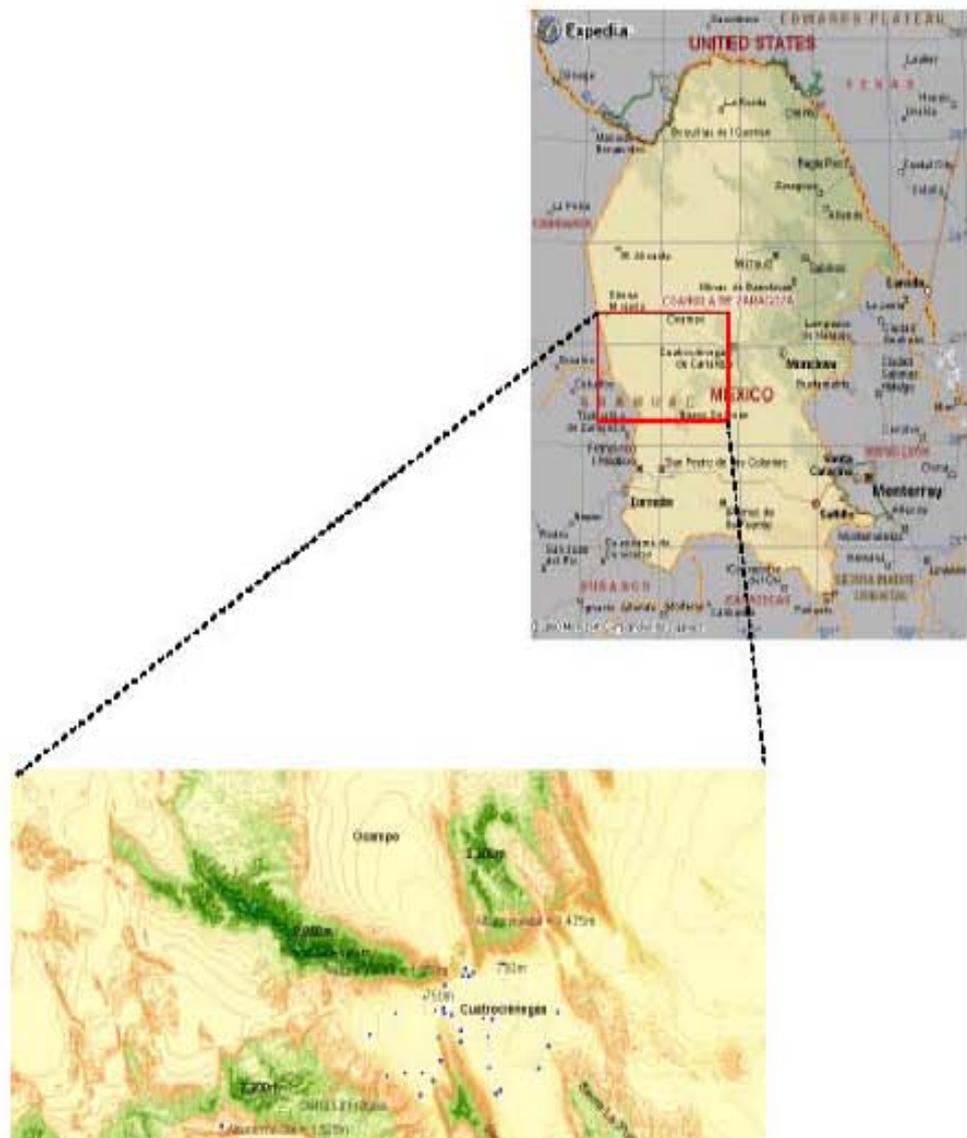


Fig. 1.1 localización de la zona de estudio. INEGI

### **1.3.2 Vías de Comunicación**

Las principales vías de comunicación son: la carretera federal No. 57, que comunica a la Ciudad de México con el norte del país, pasando por Saltillo, Monclova y llega hasta Piedras Negras; la carretera federal No. 30, que va de Monclova a Torreón pasando por Cuatrociénegas de Carranza; otra vía alterna

la constituye el ferrocarril, que une las ciudades de Saltillo, Monclova, Cuatrociénegas y Torreón.

En el estado de Coahuila hay cinco aeropuertos, ubicados en Monclova, Saltillo, Torreón, Piedras Negras y Ciudad Acuña. Los más cercanos a la zona de estudio son los de Monclova, Torreón y Saltillo. Sólo el aeropuerto de Torreón cuenta con servicio internacional.

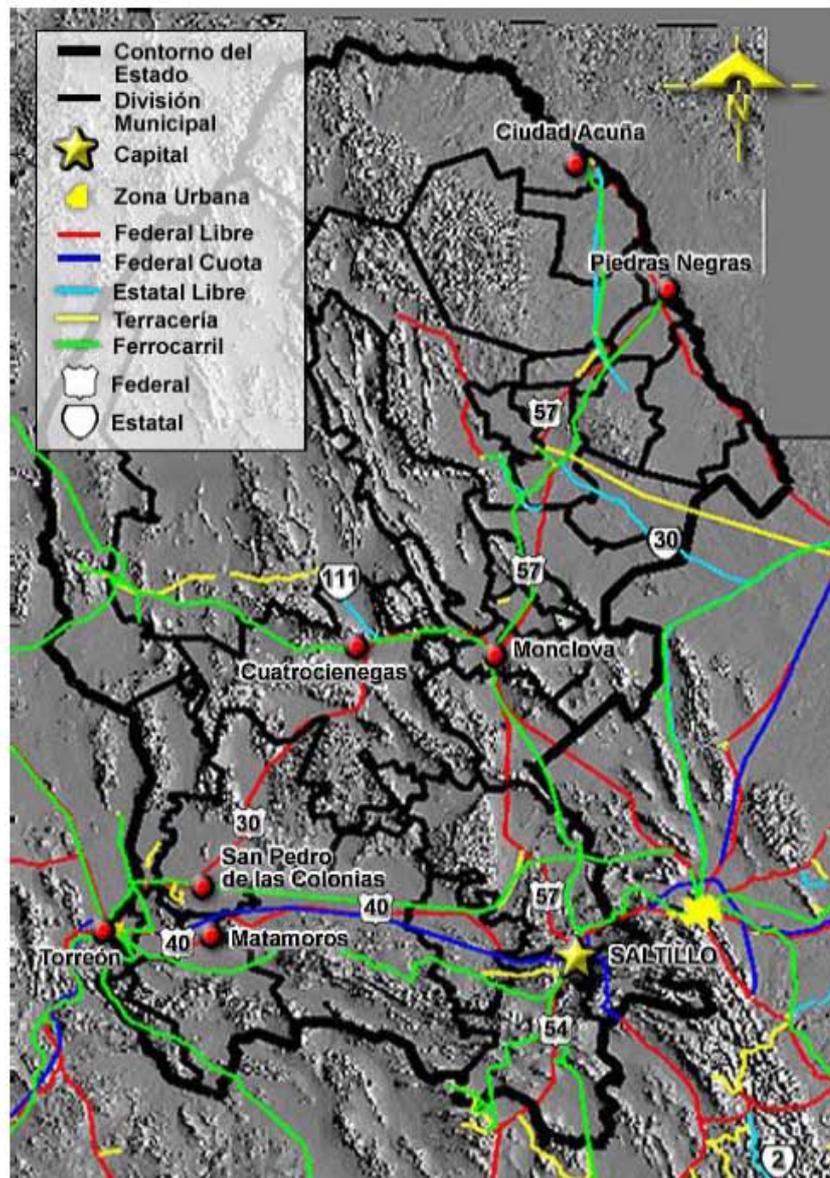


Fig 1.2. Mapa de carreteras en el estado de Coahuila. INEGI

### **1.3.3 Clima, fauna y vegetación**

El clima dominante en la zona corresponde a muy seco con invierno fresco y lluvias en verano, ocupa el 39.5% de la superficie en el centro, en áreas de llanura. También se tiene un clima seco semicálido con lluvias de verano en el 38.6 % del territorio, principalmente en el noroeste y en el sureste.

El clima seco con verano cálido con lluvias de verano, se presenta en el 12.95 % de la superficie en el sur del territorio, en las sierras y mesetas.

El clima seco propicia que la vegetación dominante sea el matorral desértico que se encuentra aproximadamente en el 57 % de la superficie, principalmente sobre las sierras y bajadas de suelos someros. Sus principales componentes son las palmas, los magueyes y lechuguilla. Otro tipo de vegetación importante (25 %) es el matorral desértico micrófilo que está en las zonas bajas y en algunas llanuras en terrenos aluviales.

La vegetación halófila es característica de las llanuras que tienen suelos ricos en sal. En lo que son las áreas de yeso las comunidades de vegetación están formadas por plantas cespitosas.

En cuanto a la fauna, se encuentran coyotes, venados, víboras de cascabel, osos, pumas, zorros, mapaches, corre caminos, gatos monteses, conejos, liebres, comadreja, jabalíes, tlacuaches, lince, tejones, entre otros.

### **1.3.4 Actividades Económicas**

Las principales actividades económicas encuentran su mayor desarrollo en los siguientes rubros:

### *Agricultura*

Dentro de la agricultura destacan los cultivos de algodón, maíz y forrajes.

### *Ganadería*

En esta zona se cría ganado bovino, porcino y caprino.

### *Industria*

Hay algunas microempresas que se dedican a la elaboración de alimentos y bebidas; también algunas plantas de yeso, una de yeso cerámico y otra de yeso industrial. Hay una planta de sales.

### *Minería*

Se explotan yacimientos de oro, plata, plomo y cobre.

## 2. Geología

### 2.1 Geología General

La estratigrafía de esta zona está representada por rocas principalmente del Cretácico Inferior y Superior. Las rocas plegadas que conforman el basamento son las más antiguas y se encuentran en la Sierra de San Marcos. Sobre este basamento, se encuentran areniscas del Cretácico Inferior de la Formación San Marcos. Sobreyaciendo a estas rocas, se encuentra una secuencia de rocas marinas cuyas características están influenciadas por el ambiente de depósito de las mismas. (Informe Geológico, UNAM, 2004)

En la zona de Cuatrociénegas, las rocas presentan condiciones de talud (calizas arrecifales, arenosas y arcillosas). Las rocas más antiguas que afloran corresponden a las areniscas de la Formación San Marcos, sobre las que descansan calizas de la Formación Aurora, Kiamichi, Cupido, Acatita, La Peña, Grupo Washita en una zona indiferenciada y en otra, dividida en las Formaciones Georgetown, del Río y Buda; continuando con las formaciones Eagle Ford y Grupo Difunta. (Informe Geológico, UNAM, 2004).



Fig 2.1. Geología general del estado de Coahuila. INEGI, 2005

## **2.2 Estratigrafía**

Dentro de la zona de estudio afloran las Formaciones San Marcos, La Virgen, Cupido, La Peña, Aurora, Acatita, Kiamichi, Grupo Washita Indiferenciado, Georgetown, Del Río, Buda y Eagle Ford, todas ellas representantes del Cretácico. Hacia el valle se encuentran sedimentos aluviales del Cuaternario y esporádicas lavas basálticas, también del Cuaternario (Chávez Cabello, 2004).

### **Formación San Marcos**

La Formación San Marcos fue propuesta por William G. Kane (1940). La localidad tipo fue dada en el Cañón de San Marcos. La formación sobreyace a sedimentos arenosos marinos del Jurásico Superior y sobre ella descansan calizas y dolomías de la Formación Cupido.

La Formación San Marcos está constituida principalmente por sedimentos clásticos de ambiente mixto en el que predominan los conglomerados y areniscas conglomeráticas de color rojizo en la parte inferior, areniscas cuarcificadas de grano grueso a medio en la sección media y dolomías arenosas y areniscas de estratificación media con intercalaciones delgadas de lutitas de color gris en la parte superior. Tiene 237 m de espesor en el Cañón de La Mina. (Informe Geológico, UNAM, 2004)

### **Formación la Virgen**

El término fue dado por W. E. Humphrey (1956), para designar los yesos anhidritas y calizas del Cretácico Inferior que afloran en la parte central de Coahuila. Está limitada en su parte superior por la Formación Cupido y en la inferior por la Formación La Mula. Su localidad tipo es el Potrero de La Virgen.

La Formación La Virgen está constituida por grandes espesores de yesos que alternan con calizas oolíticas y algunas dolomías en estratos delgados a medios. Dentro de los cuerpos de yeso hay delgadas capas de limonitas de color gris.

Tiene un espesor de 304 m en el Potrero de La Mula.

### **Formación Cupido**

El término fue introducido por Imlay (1937) para definir una unidad de calizas de color gris y estratificación gruesa, delgada y media. La limita en su parte superior la Formación la Peña, en un contacto brusco y concordante; y Taraises en la parte inferior, en un contacto que varía de concordante a transicional.

### **Formación La Peña**

El término fue definido por Imlay (1936) para distinguir dos cuerpos con dos miembros. El miembro inferior compuesto por calizas y el superior por calizas y lutitas. Su localidad tipo se encuentra al sureste de la Hacienda La Peña, al sur del estado de Coahuila.

La Formación La Peña aflora en la Sierra de San Marcos y La Virgen. Está constituida por calizas delgadas impuras y margas rosas con intervalos de lutitas entre los planos de estratificación. Tiene 42 m de espesor en la Sierra de La Madera. Sus contactos inferior con la Formación Cupido y superior con la Formación Aurora son bruscos y concordantes. Se asigna al Aptiano Superior.

### **Formación Aurora**

El término fue usado por primera vez por Burrows (1956), para una secuencia dominante de estratos de calizas en el área del Cuchillo Parado al norte de Chihuahua. El nombre fue tomado de la Mina La Aurora de la Sierra del Cuchillo Parado, situada al noroeste del campamento del mismo nombre. La formación varía de espesor de 186 a 475 m, aumentando hacia el este.

La Formación Aurora está formada de capas gruesas a masivas, densas de color gris; presenta nódulos y bandas de pedernal gris claro y líneas estilolíticas paralelas a los planos de estratificación. Tiene un espesor de 534 m en el extremo oriental del anticlinal de La Madera.

La formación sobreyace a la Formación La Peña con un contacto brusco y concordante y subyace a la Formación Kiamichi. Se le asigna la edad de Albiano Inferior y Medio.

### **Formación Acatita**

La Formación Aurora aflora a la orilla de la Sierra de La Fragua. La formación sobreyace a la Formación La Peña con un contacto brusco y concordante y subyace a la Formación Kiamichi. Se le asigna la edad de Albiano. Se compone básicamente de material evaporítico.

### **Formación Kiamichi**

La localización tipo está en la planicie del Río Kiamichi, en Oklahoma. Aflora en las Sierras La Virgen, La Madera y La Purísima.

Consiste de una alternancia de calizas impuras con margas y lutitas de color crema. Se encuentran fósiles, por ejemplo, amonitas. Disminuye su espesor y sus características litológicas conforme se acerca a la Sierra de La Madera, hasta acuñarse contra la Formación Aurora.

Le sobreyace el Grupo Washita Indiferenciado en un contacto concordante y se define donde inician las calizas de estratificación delgada a media. Se le asigna la edad de Albiano Medio y Superior.

### **Grupo Washita Indiferenciado**

Fue un término empleado por Humphrey (1956) para designar las rocas del Albiano Superior. Consiste principalmente de una alternancia de clastos finos y rocas carbonatadas impuras.

El Grupo Washita Indiferenciado aflora en la Sierra de San Marcos, La Madera, La Fragua y Alamitos. Hacia el oriente de la Sierra de San Marcos, cambia de facies y se definen las tres formaciones de este grupo, que son: Georgetown, Del Río y Buda.

Consiste en calizas de estratos medios a gruesos, de alta energía, con algunas concentraciones de rudistas e intervalos de lutitas y margas grises. Su espesor es de 116 m y se sitúa en el Albiano Superior y Cenomaniano Inferior.

### **Formación Georgetown**

Aflora en las Sierras de Menchaca y Purísima. Se caracteriza por calizas delgadas y medias, con abundantes lentes de pedernal de color gris y negro. Sus contactos inferior y superior con las formaciones Kiamichi y Del Río, respectivamente, son concordantes y transicionales. Su edad esta en el Albiano Superior y el Cenomaniano Inferior.

### **Formación Del Río**

Aflora en las Sierras de Menchaca y La Purísima y consiste en la alternancia de calizas arcillosas delgadas y laminares, con una mayor concentración de lutitas en la base. Su espesor va de 15 a 31 m. Los contactos que la limitan, Georgetown (abajo) y Buda (arriba) son transicionales y concordantes. Se le asigna la edad del Cenomaniano Inferior.

### **Formación Buda**

El término fue usado por primera vez por Vaughan (1900). Tiene un espesor máximo de 23 m y consiste en lechos medianos de calizas impuras, nodulares de color amarillento.

Al igual que la Formación Del Río y Georgetown, aflora en las Sierras de Menchaca y Purísima. Está constituida por calizas que varían de delgadas a medias, con algunas alternancias con lutita, el color al fresco es gris claro. Su espesor es de 77 m, aunque por lo general no se expone su cima. Su contacto inferior con la Formación del Río es concordante y transicional, el superior con la formación Eagle Ford es brusco y discordante.

### **Formación Eagle Ford**

En 1892, Ferdinand Roemer la incluyó en las formaciones de la región de New Braunfels a las lutitas negras Eagle Ford con restos de peces. La localidad tipo está en Eagle Ford, condado de Dallas, allí la porción más superior está expuesta.

Se encuentran afloramientos en la Sierra de San Marcos. La formación está constituida por calizas altamente arcillosas, con estratificación angular y abundantes pelecípodos. Alternan con lutitas de color gris. Se le estima un espesor de 300 m, presenta su contacto inferior con la Formación Buda y es nítido y discordante, su contacto superior con la Formación Austin es transicional y concordante.

### **Grupo Difunta**

Este nombre fue aplicado por primera vez por R.W. Imlay para una sección ubicada en la Sierra de Parraras y fue dado por el Cerro Difunta.

Aflora al sur de la Sierra de La Madera. Litológicamente se compone de capas medianas de arenisca de color gris, de grano fino calcáreas, con alternancia de lutitas y limonitas, predominando éstas últimas. Por su posición estratigráfica, probablemente sólo representa una parte del grupo.

### **Material Aluvial**

Se encuentra relleno el bolsón del valle y está formado de materiales granulares, producto de la erosión y transporte de las sierras. En las orillas del valle, los clastos son gruesos, van desde grava y conforme se van acercando al centro del valle se van haciendo más finos hasta llegar a arcillas, donde se encuentran con sedimentos evaporíticos lacustres de lagunas intermitentes.

Finalmente se presenta una columna estratigráfica en donde se puede observar esquemáticamente la secuencia descrita anteriormente.

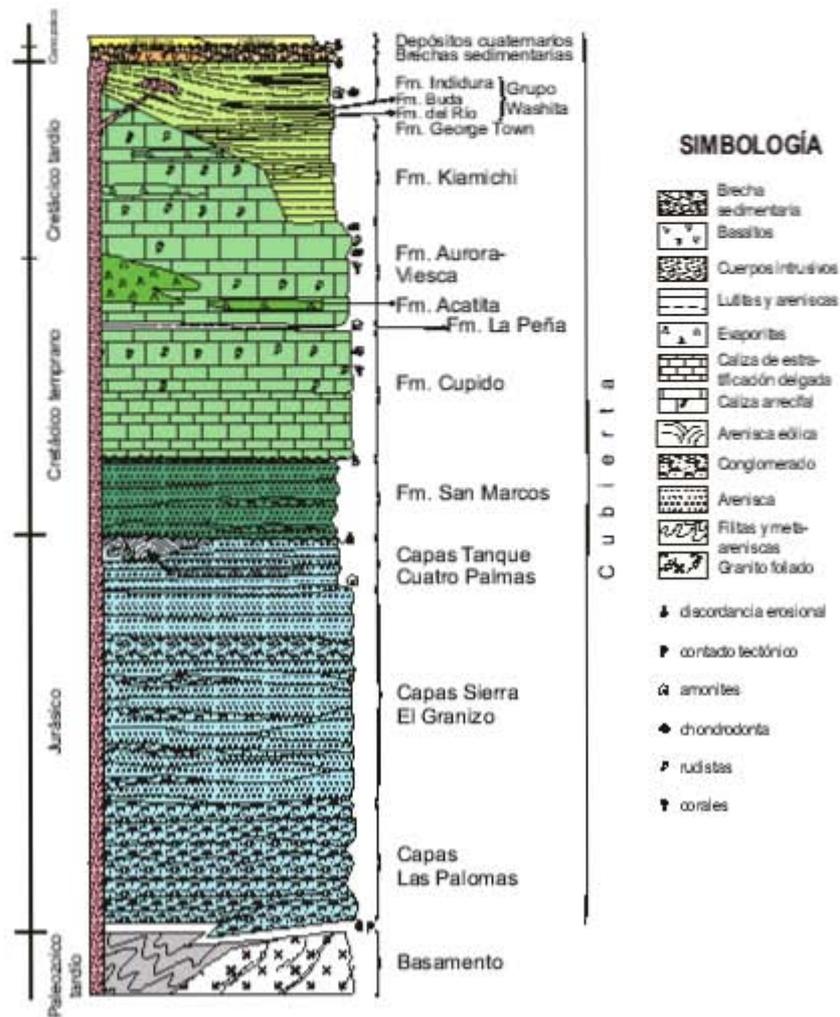


Fig. 2.2. Columna estratigráfica esquemática del área Cuatro Ciénegas-Valle El Hundido, en la que se muestra la litología y relaciones temporales de las principales unidades rocosas. (Informe Geológico, UNAM, 2004)

## 2.3 Paleogeografía

Las plataformas del Cupido y Coahuila forman parte de una plataforma carbonatada muy extensa, que rodeaba al Golfo de México durante el Barremiano hasta el Albiano.

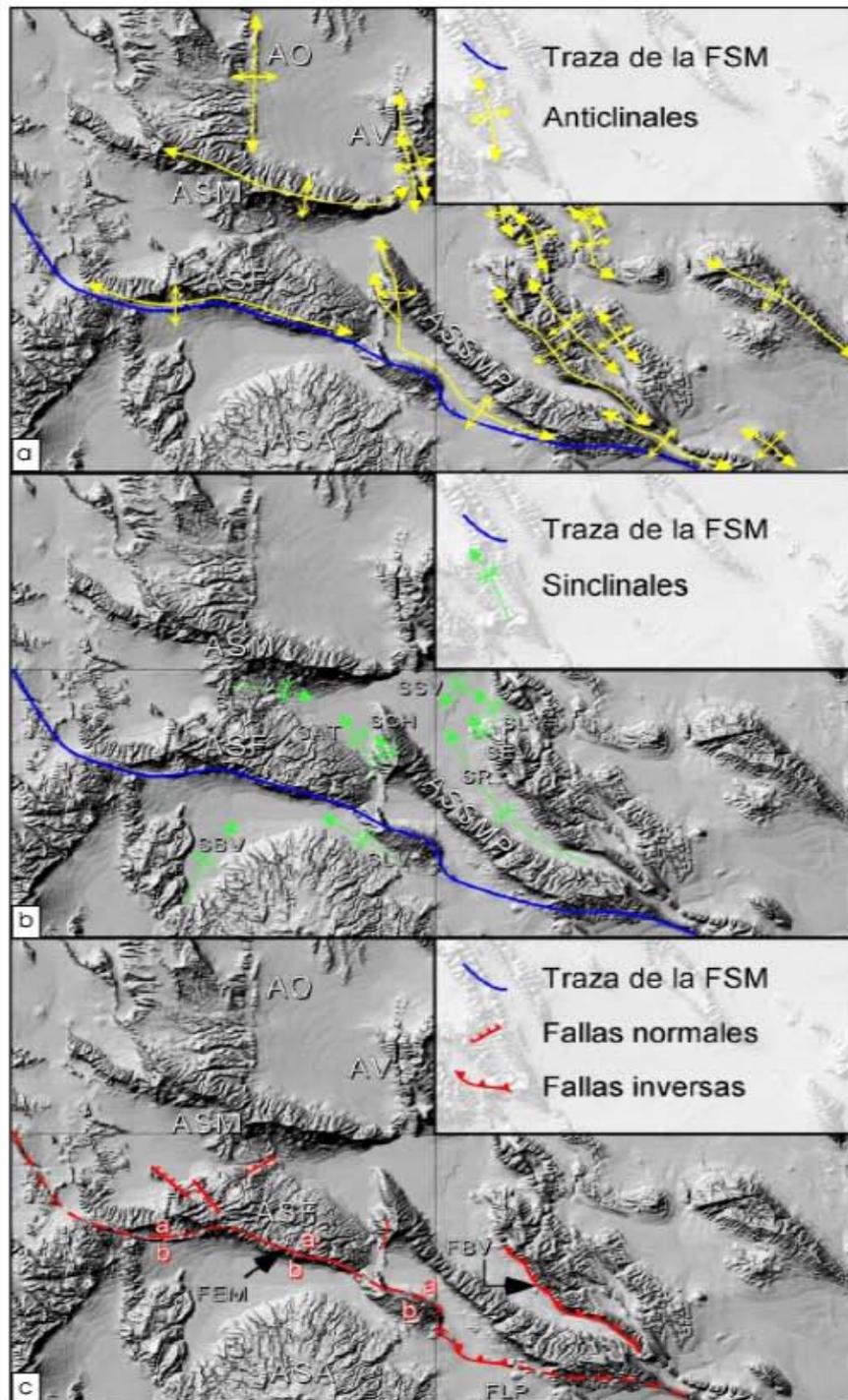
La orientación del margen de plataforma de Cupido estaba controlada por el bloque del basamento emergente de Coahuila. La margen sur está compuesta de caliza, mientras que el margen que apuntaba hacia el Golfo de México antiguo, está conformado por un arrecife de rudistas. Una amplia laguna de plataforma se desarrolló en las márgenes de Cupido. Durante el Aptiano Medio al Tardío, una fase de inundación provocó que la plataforma el Cupido retrocediera, cambiando así la sedimentación marina somera.

La plataforma Coahuila, consistía en una margen somero que separaba una laguna evaporítica de una zona de baja energía. Se acumularon una gran cantidad de carbonatos y evaporitas en esa laguna, aproximadamente 500m.

## **2.4 Geología Estructural**

En el área de estudio se observan diferentes estructuras, como pliegues y fallas, los pliegues son muy importantes por que controlan la geometría de los diferentes cuerpos litológicos tabulares (las formaciones sedimentarias mesozoicas), los cuales tienen una gran influencia en la topografía actual y son los que dieron origen a las cuencas estructurales de Valle El Hundido y Cuatro Ciénegas. Por otro lado, las fallas regional y localmente también han jugado un papel muy importante porque son superficies o zonas de discontinuidad litológica; y desde un punto de vista geológico-histórico, en el caso particular de la Falla de San Marcos, ha controlado la geometría de bloques de basamento, de facies sedimentarias, la geometría y cinemática de los pliegues del área y el emplazamiento de rocas intrusivas (Chávez Cabello, 2004).

Figura 2.3. Modelo digital de elevación del área en el que se indican las principales estructuras regionales del área: a, anticlinales; b, sinclinales; y c, fallas. ASSMP, anticlinal de la Sierra San Marcos y Pinos; ASF, anticlinal Sierra La Fragua; ASM, anticlinal Sierra La Madera; SCH, sinclinal Churince. (Informe Geológico, UNAM, 2004)



A continuación se mencionan las características geométrico-cinemáticas de las principales estructuras.

### **Anticlinal Sierra San Marcos**

Este pliegue se localiza en la parte centro-oriental del área, e incluye a la Sierra San Marcos y Pinos y a la Sierra El Granizo. Es un anticlinal de geometría compleja porque tiene un eje que en la parte oriental tiene un eje asimétrico con rumbo general NW-SE, que en la parte central del área (entrada del Valle de El Jabalí) cambia a un rumbo general NNW. En su porción oriental muestra una geometría asimétrica, con dirección de transporte general hacia el SW, con un flanco corto cortado por fallas inversas subverticales (Falla Las Palomas); mientras que en la parte central del área también tiene una geometría asimétrica, con dirección de transporte general hacia el W, cuyo flancocorto también tiene asociada una zona de falla de alta inclinación, con rumbo WNWSE, con desplazamiento inverso hacia el W (Falla El Jabalí).

El anticlinal de la Sierra San Marcos y Pinos está erosionado en el núcleo, el Valle del Jabalí, en el cual se exponen casi todas las unidades sedimentarias: Capas Las Palomas, Capas Sierra el Granizo, Capas Tanque Cuatro Palmas, Fm. San Marcos, Fm. Cupido, Fm. La Peña y la Fm. Aurora. En la ladera norte del Valle El Jabalí (Sur de la Sierra San Marcos y Pinos) aflora toda la secuencia en su posición estratigráfica original (Chávez Cabello, 2004).

### **Anticlinal Sierra La Fragua**

Este pliegue se localiza en la parte central del área de estudio, y se extiende hasta el extremo occidental del área, y controla la topografía de la Sierra. Este anticlinal tiene un eje con rumbo general WNW, de geometría asimétrica, con dirección de transporte general hacia el sur, con un flanco largo poco inclinado (6 a 12°) hacia el norte y un flanco corto que se inclina aproximadamente 70° hacia el sur (Figura 2.4) y puede llegar a ser hasta invertido.

En la Sección B-B' se observa una geometría compleja en esta estructura; por un

lado, se observan justo en el flanco corto del anticlinal pliegues por doblez de falla con dirección de transporte hacia el norte, los cuales son parte de un pliegue con dirección de transporte hacia el sur, lo cual hace difícil explicar el desarrollo de esta estructura en una sola fase de deformación.



Fig.2.4 Flanco sur del anticlinal de la Sierra La Fragua, entrada del Cañón el Mimbres.  
(Informe Geológico, UNAM, 2004)

### **Anticlinal Sierra La Madera**

Este pliegue aflora en la parte septentrional del área, y prácticamente configura la topografía de la Sierra La Madera. Este pliegue es un anticlinal con un eje curvo con rumbo general E-W, cerrado, asimétrico, convergencia general hacia el Sur, que localmente muestra inversión de capas en el flanco corto (Sección B-B' y mapa geológico). En el frente de la Sierra La Madera, se observa en esta estructura a caliza de la Fm. Aurora, así como a lutitas de la Fm. Indidura y/o Lutita Eagleford, cuyo contraste litológico generó pliegues disarmónicos de escala de decenas de metros.

### **Sinclinal Churince**

Se trata de un pliegue de segundo orden, que se encuentra en la parte noroeste del anticlinal de la Sierra San Marcos y Pinos, centro-norte del área de estudio

(Figura 2.5). Este sinclinal es un pliegue asimétrico, con un eje con rumbo general NNW-SSE, bufante hacia el norte, su flanco oriental es prácticamente vertical, mientras que el occidental se inclina aproximadamente 20° hacia el oeste. Esta estructura aloja en su núcleo a lutita y limonita calcárea de la Fm. Indidura, por lo que la superficie que lo configura parece corresponder justo a la interfaz Aurora/Indidura.



Fig.2.5 Fotografía panorámica del sinclinal Churince; este pliegue de segundo orden tiene geometría asimétrica, con dirección de transporte hacia el W, y se observa en el extremo Norte de la Sierra San Marcos y Pinos. (Informe Geológico, UNAM, 2004)

## **Falla San Marcos**

La Falla San Marcos (FSM) fue definida por Charleston (1981) y es la única falla de basamento en el NE de México para la que se han compilado en superficie evidencias estratigráficas y estructurales que documentan su existencia de forma convincente (Charleston, 1981; Padilla y Sánchez, 1982, 1986; McKee *et al.*, 1984, 1990). La traza de la FSM tiene una longitud mínima de 300 km y cruza con una orientación WNW al Estado de Coahuila dividiéndolo en dos (Fig. 2.6).



Fig. 2.6 Brecha de falla que se observa en el flanco occidental del anticlinal de la Sierra de San Marcos Pinos. (Informe Geológico, UNAM, 2004)

## **La Cuenca Estructural de Cuatro Ciénegas (CECC)**

Es una depresión con forma de moño, que implica una combinación más compleja de pliegues. Los márgenes de esta cuenca están representados por los anticlinales de las sierras La Fragua y San Marcos y Pinos, al sur; los anticlinales de las sierras La Madera, El Muerto y Menchaca, al norte; los anticlinales de Barril Viejo y Sierra Agua Chiquita, al oriente; y en el centro de

esta cuenca observamos la nariz del anticlinal de la Sierra San Marcos y Pinos separando las sub-cuencas oriental y occidental de la CECC.

La sub-cuenca oriental de Cuatro Ciénegas, está definida principalmente por el sinclinal de La Reforma que tiene un eje buzante hacia el NW. Se origina al sur de esta sub-cuenca entre los anticlinales de la Sierra San Marcos Pinos y Barril Viejo, además de la convergencia de otros sinclinales menores como el sinclinal de las Yeguas (localizado entre los anticlinales Barril Viejo y Agua Chiquita), el sinclinal El Venado, siendo el más pequeño y localizado entre el sinclinal de La Reforma y el de Las Yeguas y, finalmente el sinclinal de San Vicente, que tiene su origen en la esquina NE del área, el cual tiene un eje curvo con buzamiento general hacia el SW). La convergencia de estos ejes forma el centro estructural prácticamente en el punto intermedio entre el poblado de Cuatro Ciénegas y El Venado. Por otro lado, la subcuenca occidental de la cuenca estructural de Cuatro Ciénegas, está definida por la convergencia de los sinclinales Atalaya y Churince, cuyos ejes tienen un buzamiento general hacia el NNW, con el eje del sinclinal de La Virgen, el cual tiene su origen al occidente de esta subcuenca, y un eje buzante en dirección casi al oriente, quedando el centro estructural algunos kilómetros al poniente franco de la poza de La Becerra, al suroeste de Cuatro Ciénegas, Coahuila.

### **Secciones Estructurales**

A continuación se muestra el mapa geológico de la zona, junto con las secciones estructurales y una pequeña descripción de las mismas.

En la figura 2.8, vemos la sección C-C', la cual atraviesa a todo el Valle de Cuatro Ciénegas, desde la sierra La Fragua hasta la sierra La Purísima, atravesando la sierra de San Marcos y Pinos. Se pueden observar básicamente tres unidades, el basamento de caliza, relleno fluvial y material de abanico aluvial. El basamento que viene de la sierra La Fragua presenta un echado suave

Mapa Geológico del área comprendida entre los valles de El Hundido y Cuatro Ciénegas, centro de Coahuila

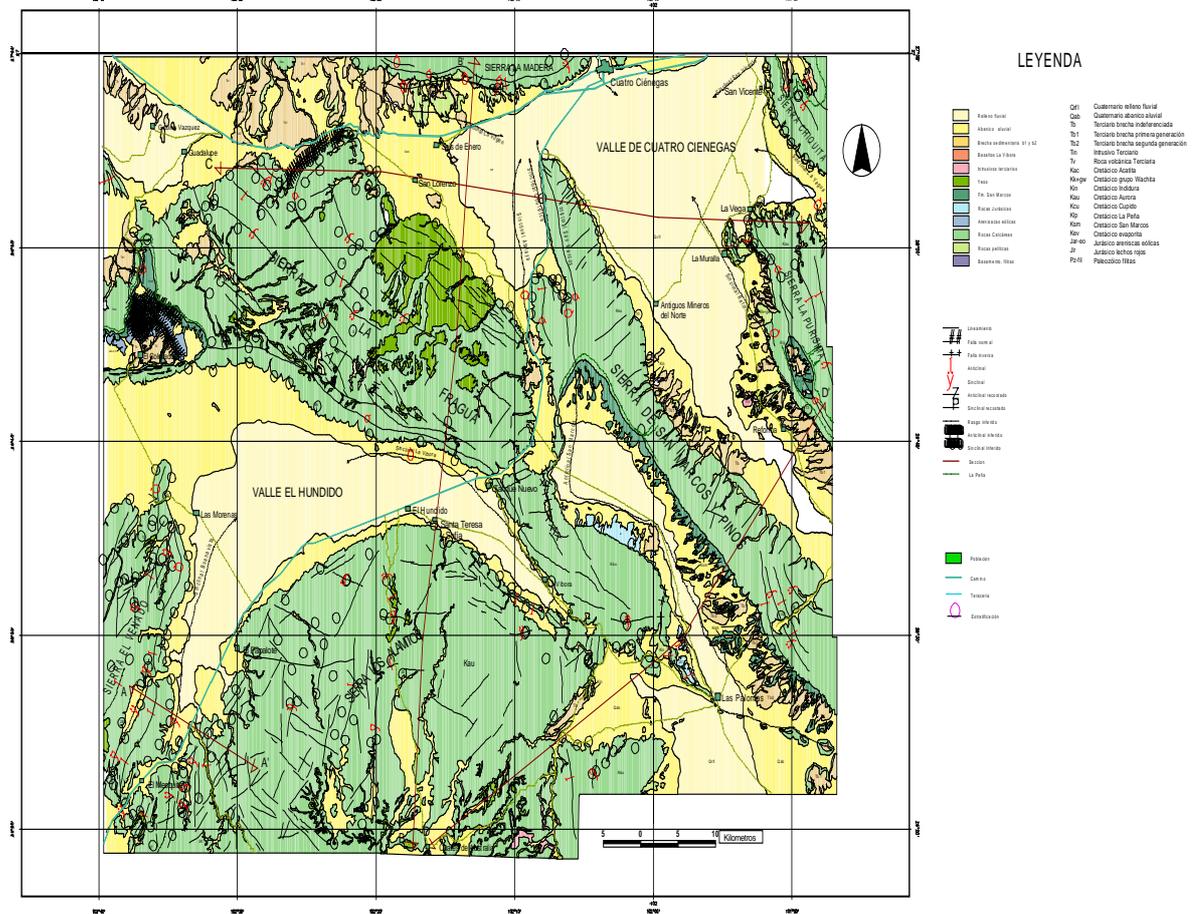
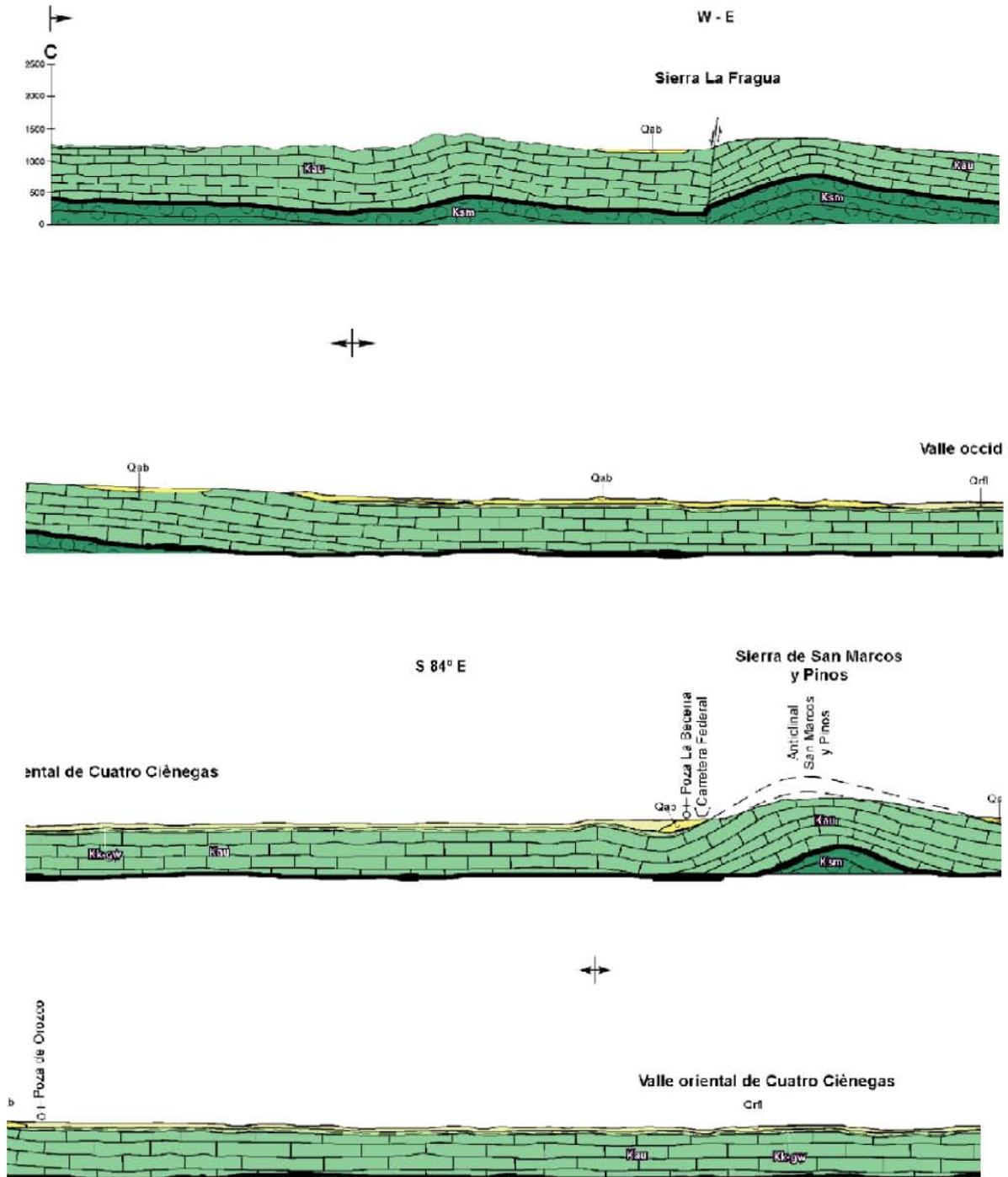


Figura 2.7. Mapa Geológico de los valles El Hundido y Cuatro Ciénegas. (Informe Geológico, UNAM, 2004)

el cual se mantiene durante casi toda la subcuenca occidental del valle, llegando a la sierra de San Marcos y Pinos hay un pequeño pliegue que provoca un echado de casi 60°. El relleno de ésta subcuenca puede dividirse en dos, en su lado izquierdo consta de material de abanico aluvial y del lado derecho de relleno fluvial.

En la subcuenca oriental, el echado de las calizas que se encuentran en la SSMP es aproximadamente de 45° y en las calizas de la SLP tienen un echado de 60°. El espesor del relleno es uniforme a lo largo de toda la sección, de aproximadamente 100 a 200m.



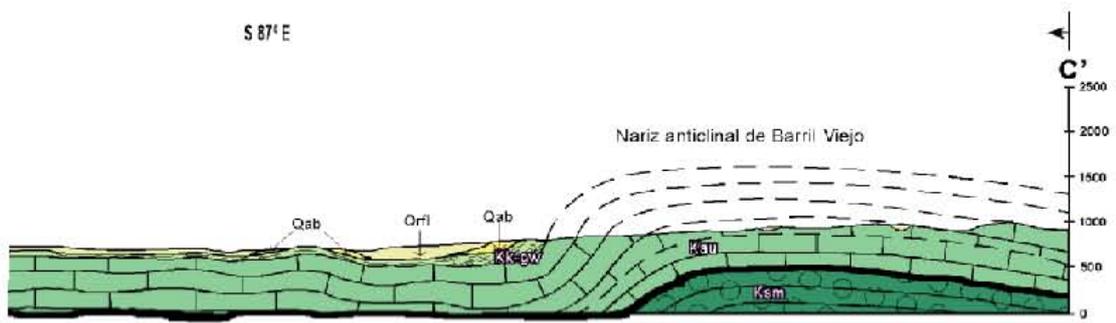


Figura 2.8. Sección C-C' (Informe Geológico, UNAM, 2004)

En la figura 2.9 se muestra la sección B-B', que va de la sierra La Fragua a la sierra La Madera, atravesando la subcuenca occidental del valle. En la sección se ve material de abanico aluvial con espesores de 100 a 200m, del lado de la sierra La Madera y subyaciendo al material aluvial encontramos material evaporítico con espesores de 200 a 300m.

La caliza de la sierra La Madera tiene un echado de aproximadamente 80°, debido al anticlinal que se encuentra en la sierra.

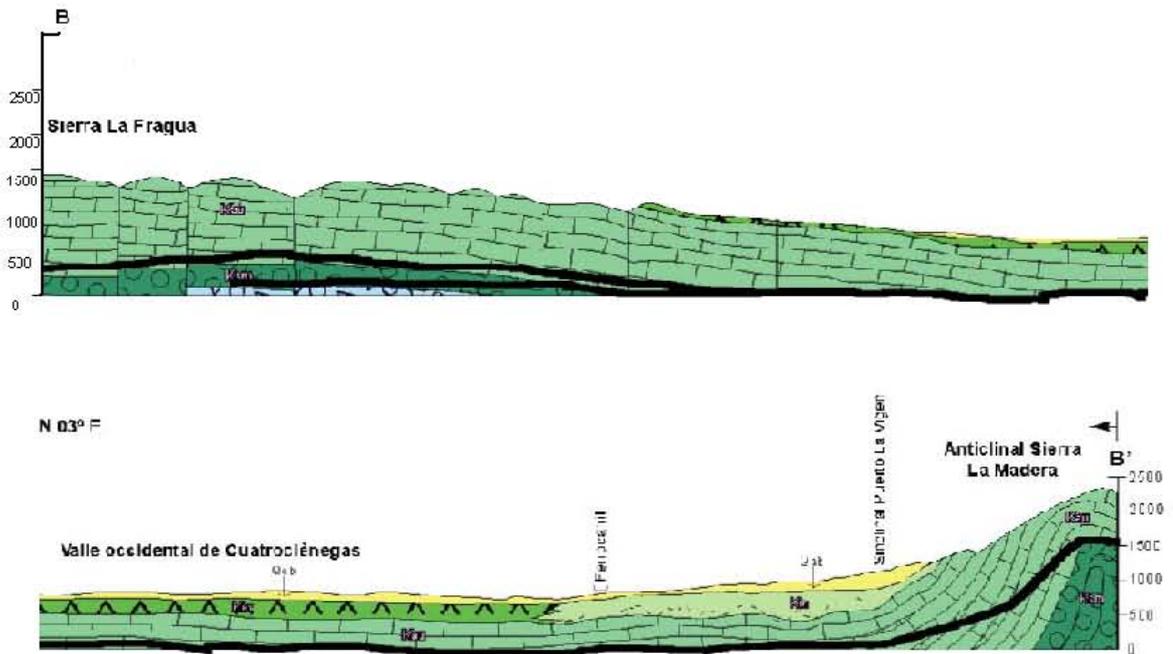


Figura 2.9. Sección B-B' (Informe Geológico, UNAM, 2004)

## 3. Fundamentos Teóricos.

### 3.1 Ecuaciones de Maxwell.

Todos los fenómenos electromagnéticos clásicos se pueden describir a partir de las ecuaciones de Maxwell:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot D(r, \omega) &= \rho(r, \omega) \\ \nabla \cdot B(r, \omega) &= 0 \\ \nabla \times E(r, \omega) + i\omega B(r, \omega) &= 0 \\ \nabla \times H(r, \omega) - i\omega D(r, \omega) &= j(r, \omega)\end{aligned}\tag{3.1}$$

donde  $\omega = 2\pi f$  es la frecuencia angular del campo

E: campo eléctrico (V/m),

D: campo de desplazamiento ( $C/m^2$ ),

H: campo magnético (A/m) y

B: campo de inducción magnética (T).

Estos campos conforman el campo electromagnético. Las dos últimas ecuaciones, Faraday y Maxwell-Ampère aseguran que hay una dependencia mutua entre campos eléctricos y magnéticos. Llamamos fuentes de campo a los sistemas físicos que crean campos en el espacio. En el caso electromagnético, cargas y corrientes eléctricas crean campo. En las ecuaciones de Maxwell las fuentes de campo son entonces:

- $\rho$ : la densidad de carga eléctrica ( $C/m^3$ ) y
- $j$ : la densidad de corriente ( $A/m^2$ ).

En la representación en el dominio de la frecuencia es posible establecer otras relaciones entre los campos que simplifican la resolución. Estas relaciones se denominan relaciones constitutivas y dependen del medio en el que se desarrollan los fenómenos y de la frecuencia:

$$\begin{aligned} D(r, \omega) &= \varepsilon E(r, \omega) \\ B(r, \omega) &= \mu H(r, \omega) \\ j(r, \omega) &= \sigma E(r, \omega) \end{aligned} \quad (3.2)$$

En el caso de la prospección electromagnética, las ondas se propagan por un medio homogéneo, cuasiestacionario e isótropo de acuerdo a las ecuaciones de onda (3.3). Las ondas se propagan en la dirección  $z$ , con un campo eléctrico con componente en la dirección  $x$  y un campo magnético en la componente  $y$ , ambos variando su amplitud de forma sinusoidal.

$$\begin{aligned} \nabla^2 E &= i\omega\mu\sigma E - \varepsilon\mu\omega^2 E \\ \nabla^2 H &= i\omega\mu\sigma H - \varepsilon\mu\omega^2 H \end{aligned} \quad (3.3)$$

asumiendo que los campos eléctrico y magnético varían con el tiempo así,

$$E(t) = E_0 e^{i\omega t} \quad (3.4)$$

Si se define  $k^2 = \mu\varepsilon\omega^2 - i\omega\mu\sigma$  , (3.5)

las ecuaciones 3.3 quedan  $\nabla^2 E + k^2 E = 0$  y  $\nabla^2 H + k^2 H = 0$  (3.6)

donde  $k$  es denominado como *número de onda*. La solución para estas ecuaciones tiene la forma:

$$\begin{aligned} E &= E_0 e^{i\alpha z} e^{-\beta z} \\ H &= H_0 e^{i\alpha z} e^{-\beta z} \end{aligned} \quad (3.7)$$

donde  $E_0$  y  $H_0$  representan el valor en la superficie y  $\alpha$  y  $\beta$  representan la parte real e imaginaria del número de onda  $k$  y donde

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (3.8)$$

que representan el factor de fase y el de atenuación de onda, por lo cual  $\beta$  decrece al propagarse la onda.

Es necesario introducir el concepto de *penetración nominal o skin depth*  $\delta$ , que se define como la distancia recorrida por la onda en la cual la amplitud de los campos se reduce a un factor 1/e. Se puede escribir como

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\rho\omega\mu_0}} \quad (3.9)$$

Si sustituimos  $\omega = 2\pi f$ , tenemos que

$$\delta \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (3.10)$$

donde  $\rho$  es la resistividad [ $\Omega\text{m}$ ],  $f$  es la frecuencia de la onda electromagnética [Hz] y  $\mu_0$  la permeabilidad magnética del vacío  $4\pi \times 10^{-7}$ .

## 3.2 El Campo Electromagnético de un Dipolo Magnético Vertical.

Las fórmulas para el campo eléctrico y magnético de un dipolo magnético vertical (Orellana, 1973), en coordenadas cilíndricas con su origen en el centro de la bobina y con el plano  $z = 0$  en coincidencia con la superficie, para la zona próxima son:

$$E_{\phi}(\omega) = -\frac{\rho m}{2\pi r^4} \left[ 3 - (3 - 3i\gamma r - \gamma^2 r^2) e^{i\gamma R} \right] \quad (3.11)$$

$$B_z(\omega) = -\frac{i\rho m}{2\pi r^5 \omega} \left[ 9 - (9 - 9i\gamma r - 4\gamma^2 r^2 + i\gamma^3 r^3) e^{i\gamma R} \right]$$

donde  $\gamma$  es la constante de propagación,  $\gamma = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$ . Para hacer la transformación de las fórmulas anteriores al dominio del tiempo se usa la transformada inversa de Fourier.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{i\omega t} dt \quad (3.12)$$

La representación del impulso de corriente se hace mediante un impulso en escalón  $H$ , en la cual se emplea la transformada inversa de Fourier que resulta

$$H(\omega) = -\frac{H_0}{i\omega} \quad (3.13)$$

Finalmente, la representación del campo eléctrico y magnético para un dipolo magnético vertical en el dominio del tiempo para un impulso escalón son:

$$\text{Si } \tau = (2\pi \cdot 10^7 \cdot \rho)^{1/2} \text{ y } u = 2\pi R / \tau$$

$$E_{\phi}(t) = -\frac{\rho m}{2\pi r^4} \left[ 3\Phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-u^2/2} (u^3 + 3u) \right]$$

(3.14)

$$B_z(t) = -\frac{\rho m}{2\pi r^5} \left[ 9\Phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-u^2/2} (u^5 + 3u^3 + 9u) \right]$$

En donde  $E_{\phi}$  se refiere al campo eléctrico inducido,  $B_z$  a la componente vertical del campo magnético,  $m$  el momento bipolar y  $\tau$  el parámetro transitorio.

En los momentos iniciales del fenómeno, las ondas de frecuencia más alta alcanzan su mayor amplitud relativa, pues no han tenido tiempo de sufrir atenuación importante. A medida que transcurre el tiempo, las ondas van alcanzando profundidades mayores, y las de mayor frecuencia van perdiendo importancia frente a las más largas. Las expresiones anteriores son válidas en el método TEM para tiempos grandes, ya que se toman las lecturas de la etapa tardía para la obtención del modelo es decir, las de frecuencias bajas. Por tal motivo, es posible hacer una analogía con la zona cercana, que es la que está representada por longitudes de onda mayores (Orellana, 1973).

Debido a que la componente vertical del campo magnético observado durante la etapa temprana decae con la distancia  $r$  más rápidamente, se puede considerar que, durante éste intervalo, el campo transitorio es semejante a una onda plana no uniforme que penetra hacia abajo en un medio conductor.

### 3.3 Concepto de resistividad aparente en TEM.

La resistividad transitoria  $\rho_t$  obtenida con un dispositivo determinado sobre un corte dado, está relacionada directamente con la resistividad en frecuencias  $\rho_\omega$  que se obtendría sobre el mismo corte y con el mismo dispositivo (elementos emisor y receptor) (Orellana, 1973).

Para la resistividad aparente en el dominio de las frecuencias se usa

$$\rho_\omega = K \frac{\Delta V(\omega)}{I(\omega)} \quad (3.15)$$

de la que se deduce

$$\Delta V(\omega) = \frac{\rho_\omega}{K} I(\omega) \quad (3.16)$$

Ahora,  $\Delta V(\omega)$  corresponde a  $\Delta V(t)$ , en el dominio del tiempo, por lo que usando la transformada de Fourier con el impulso escalón, se tiene

$$\Delta V(t) = \frac{I}{K} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_\omega \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} d\omega \quad (3.17)$$

$$\text{si } \rho_t = K \frac{\Delta V(t)}{I}$$

$$\rho_t(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_\omega \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} d\omega \quad (3.18)$$

### 3.4 Interpretación de TEM

El método consiste en una bobina, a la cual se le inyecta corriente directa; después de cierto tiempo la corriente directa (cd) se interrumpe abruptamente. De acuerdo a la ley de Faraday, el cambio rápido en el campo primario del transmisor genera corrientes inducidas en un conductor cercano, las cuales van a estar presentes inicialmente, en la superficie del conductor (corrientes de superficie), (Technical Notes, Geonics). La magnitud y la dirección de estas corrientes van a estar en función de la componente normal del campo magnético primario preexistente en la superficie S del conductor,

$$b_n(t) \Big|_{t=0} = b_{n0} \quad \text{en S} \quad (3.19)$$

donde  $b_{n0}$  es la componente normal del campo magnético primario. Lo que es que, en un tiempo  $t = 0$  el campo magnético dentro del conductor no va a cambiar y no va a haber flujo de corrientes inducidas en el interior. En cada punto del exterior el campo magnético va a cambiar abruptamente. A esto se le llama *early-time* o etapa temprana en el proceso transitorio.

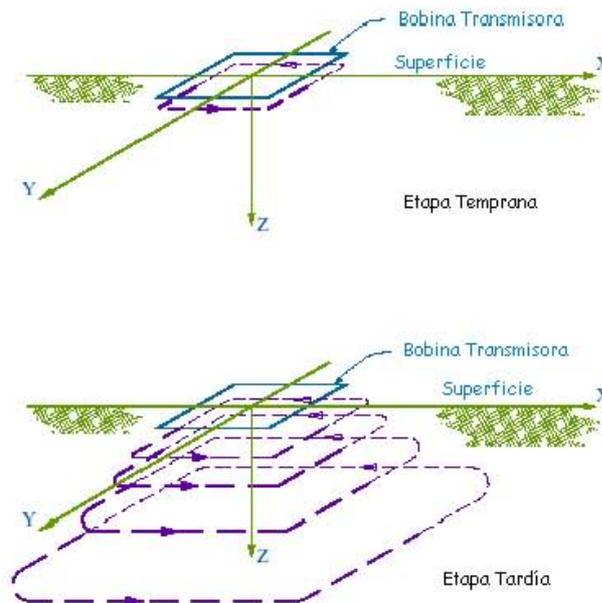


Fig. 3.1 Flujo de las corrientes de superficie. Geophysical Services, 2002

Después, la región que está inmediatamente dentro del conductor va a tener un decremento en el campo magnético y con eso las corrientes inducidas o *eddy* empezarán a fluir, esto se repite sucesivamente en cada punto del interior. A esta etapa del proceso transitorio se le llama etapa intermedia o *intermediate-time*.

Una vez que este proceso es completado, la configuración de la distribución de las corrientes inducidas es invariante en el tiempo. A esta etapa del proceso se le llama etapa tardía o *late-time* (Technical Notes, Geonics). Lo anterior se muestra en la figura 3.2.

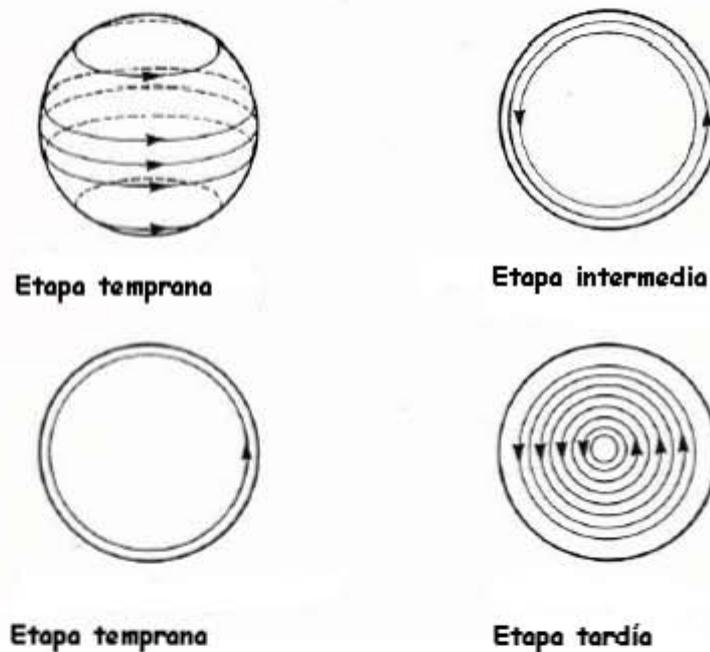


Fig. 3.2 Etapas del proceso transitorio. Technical Notes 7, Geonics

La amplitud de la corriente que fluye como función del tiempo es medida por una bobina receptora, midiendo el decaimiento del campo magnético. Si se mide el voltaje a tiempos sucesivos, se mide el flujo de corriente y con eso, la resistividad eléctrica del medio a distintas profundidades.

En la figura 3.3, se muestra el comportamiento del campo magnético primario generado por el transmisor, así como el del campo eléctrico primario. El impulso del campo primario (transitorio) crea corrientes inducidas inmediatamente

debajo de la bobina transmisora. Conforme decaen estas corrientes en la zona cercana a la superficie, ellas mismas inducen corrientes de *eddy* a profundidades mayores. En la figura, también se muestra el comportamiento del campo magnético secundario generado por la serie de corrientes inducidas.

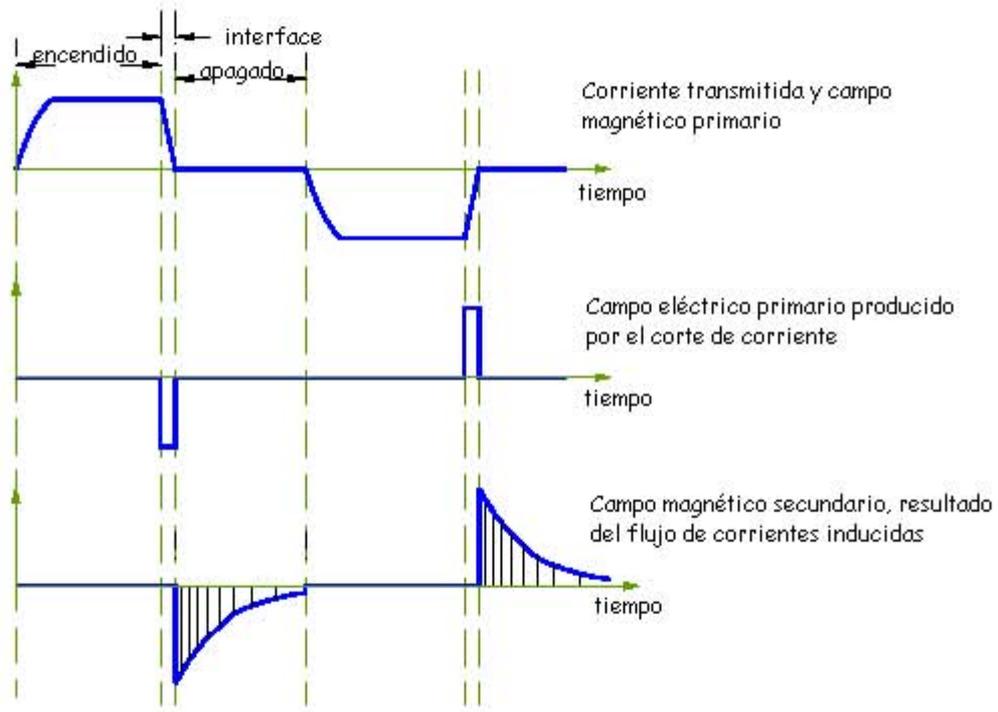


Fig. 3.3 Forma de onda tomada por el receptor. Geophysical Services, 2002

La razón de cambio de las corrientes y del campo magnético depende de la conductividad, el tamaño y la forma del conductor. Para el tiempo inicial  $t = 0$ , la distribución de las corrientes de superficie es independiente de la conductividad del cuerpo y sólo es función del tamaño y de la forma del conductor.

En la figura 3.4, se muestra que la respuesta del medio se puede dividir en un estado temprano (donde la respuesta es constante con el tiempo), un estado intermedio (donde la respuesta varía continuamente con el tiempo) y un estado tardío (en donde la respuesta es una línea recta).

El voltaje medido varía conforme  $\sigma^{3/2}$ , por lo que es sensible a las pequeñas variaciones de conductividad. Durante el estado tardío, el voltaje medido decae a razón de  $t^{-5/2}$ . Eventualmente la señal desaparece en un sistema de ruido y es imposible medirlo.

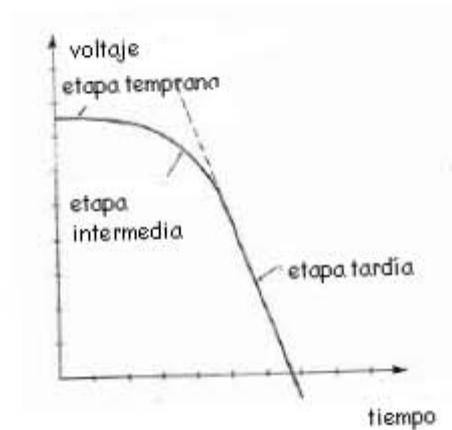


Fig. 3.4 Señal del receptor (voltaje vs. tiempo). Techinal Notes 27, Geonics

Conforme aumenta el tiempo, aumenta la profundidad alcanzada por la corriente, aunque la profundidad también depende de la resistividad.

Si suponemos que se trata de un semi-espacio uniforme con resistividad  $\rho_1$  y que el comportamiento de la curva  $\rho_t$  contra tiempo es el de la figura 3.5, podemos ver que en un tiempo tardío la resistividad aparente  $\rho_t$  es igual a  $\rho_1$  pero a poco tiempo  $\rho_t$  es mucho mayor que  $\rho_1$ . La razón es que la definición de resistividad aparente está basada en el comportamiento del tiempo del voltaje recibido a un tiempo tardío cuando decae  $t^{-5/2}$ . A un estado temprano e intermedio la figura 3.4 muestra que el voltaje recibido es muy bajo y la resistividad aparente será muy alta. Por lo cual siempre hay un descenso en la etapa temprana que es donde la

resistividad aparente es mayor que la del semi-espacio, (Technical Notes, Geonics).

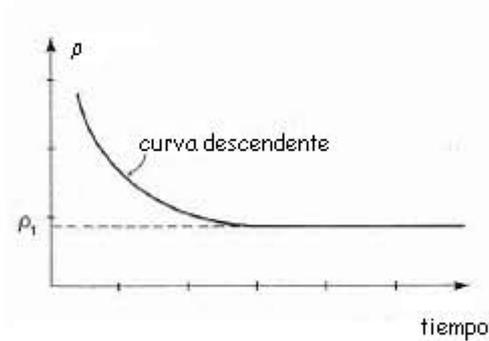


Fig.3.5 Resistividad aparente. Technical Notes 27, Geonics

### Configuración de TEM

Los arreglos dependen de las configuraciones de la bobina transmisora y la bobina receptora, las cuales son rectangulares, (Nabighian, 1996). Los arreglos son los siguientes:

- i) *One – loop*. Este arreglo solo utiliza una bobina que sirve como transmisora y receptora (fig. 3.6a). Cuando la corriente fluye en la bobina, ésta actúa como transmisora, una vez que la corriente se corta los extremos de la bobina son conectados al receptor y la señal transitoria puede ser medida. Las dimensiones de los lados de las bobinas son de 50m a 200m.
- ii) *Loop coincidente*. En este arreglo el transmisor y el receptor son bobinas distintas que coinciden en la posición del tendido, las cuales son conectadas al transmisor y al receptor, respectivamente. Las dimensiones de los lados de las bobinas son similares a las de *one – loop*.
- iii) *In – loop*. Este arreglo es una variante del *loop coincidente*, en el cual se usa un dipolo receptor localizado en el centro de la bobina transmisora (fig. 3.6b).

- iv) Bobinas separadas. En este arreglo la bobina transmisora y la receptora están separadas por una distancia fija. Las dimensiones de las bobinas son pequeñas, no superiores a los 50m (fig. 3.6c). Una variante de este arreglo consiste en un dipolo receptor ubicado a una distancia fija fuera de la bobina transmisora (fig. 3.6d).

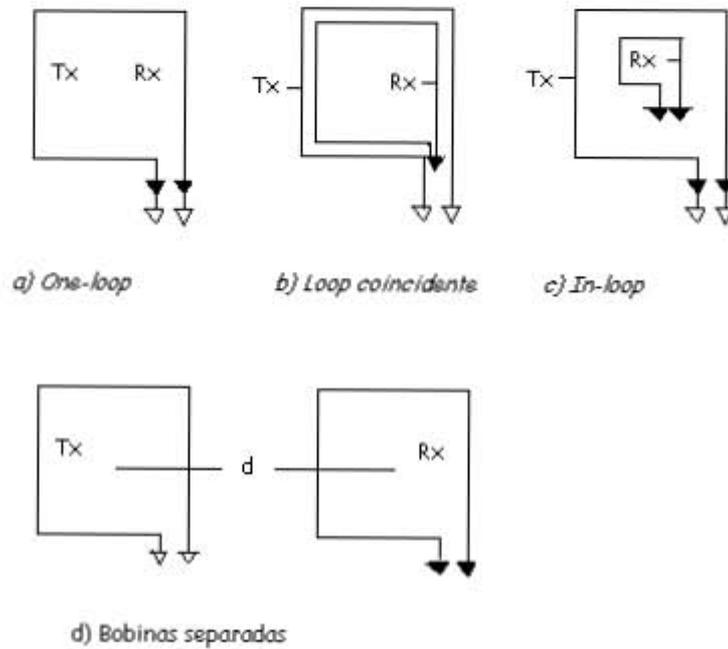


Fig. 3.6 Configuraciones de TEM's. Nabighian 1996

## **4. Metodología**

La técnica del TEM (sondeo transitorio electromagnético), consistió en utilizar una espira o bobina que está construida por un cable en forma de cuadro con dimensiones de 150m x 150m (área de la bobina 22,500 m<sup>2</sup>), con el arreglo denominado "*loop* coincidente", 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 una resistencia de 2.6 ohms en el circuito, para lo cual se utilizó un cable de fabricación canadiense de 110 hilos; con estas características del arreglo se logró una intensidad de corriente que variaba entre 8 y 9 amperes.

La localización de los sondeos se hizo pensando en cubrir la mayor parte del valle.

El estudio se realizó con el equipo Sirotem-S (Mark 3), con el cual se graban diversas ventanas de tiempo independientes que se traslapan y pueden aplicarse distintas ganancias.

### **4.1 Localización de los TEM's**

Los puntos para realizar los sondeos fueron determinados de acuerdo a los objetivos de cada uno de los proyectos, para este trabajo se usaron los sondeos ya existentes y de acuerdo a su posición se tomaron las líneas para trazar las secciones geoeléctricas.

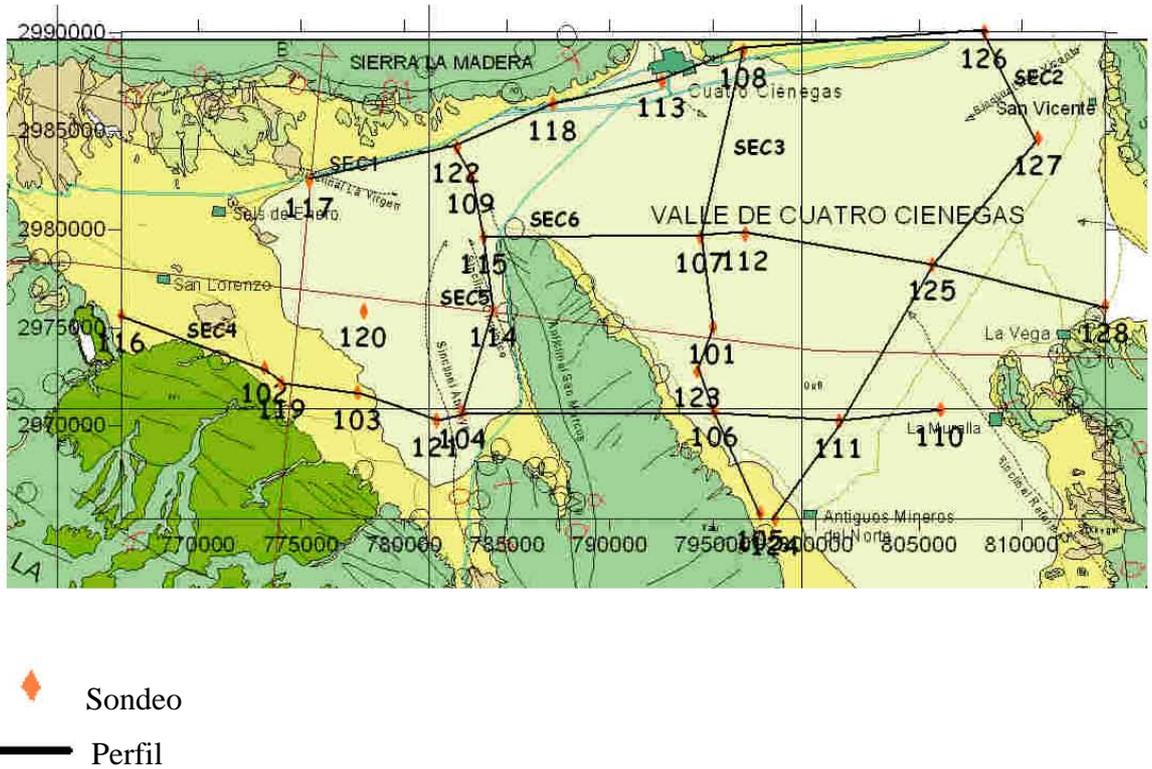


Fig. 4.1 Ubicación de los sondeos

## 4.2 Procesamiento de Datos

Cuando los registros son transferidos a la computadora, se les da una extensión .sir, una vez realizado esto se editan las curvas registradas con cada ganancia para obtener una curva final en nV/AMP en función del tiempo, que es la curva de decaimiento. La edición de las curvas fue realizada arbitrariamente, tratando de seguir una curva de tendencia para el decaimiento, cortando donde la dispersión de puntos era mayor.

Posteriormente, se realiza una conversión de la curva de decaimiento a una curva de resistividad aparente en función del tiempo tiempo; para así obtener un modelo estratificado. El modelo de estratificado encontrado, parte de la curva de resistividad aparente contra tiempo, proponiendo cierto número de capas dependiendo de las inflexiones de la curva de campo, del tiempo en que ocurren

estas inflexiones y de las pendientes de las curvas. En muchos de los sondeos no fue posible encontrar un ajuste parecido a la curva de campo en el primer modelo propuesto, por lo que tenía que ajustar los espesores y los valores de la resistividad. Una vez que se encuentra un ajuste apropiado, al modelo se le hace una regresión automática con algoritmos de aproximación llamados de Anderson, para así obtener el valor mínimo de error cuadrático medio y la mejor aproximación a la información geológica de la zona de estudio.

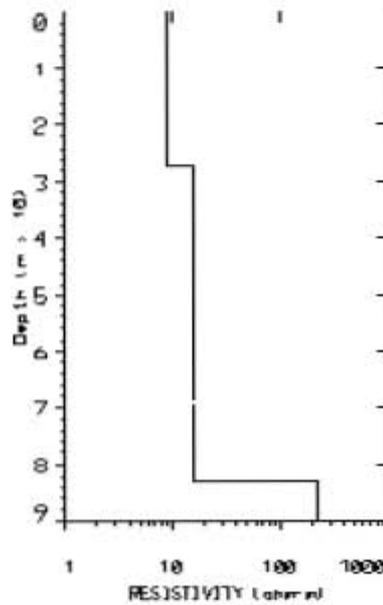


Figura 4.2. Modelo de capas planas obtenido para el sondeo 113 con TEMIX

Después de todo lo anterior, se calculó un modelo suavizado por medio de una regresión de tipo Occam, en la cual se propone una resistividad inicial y una final, basándose en los valores de campo. También se debe de poner un número de capas inicial y un valor máximo de iteraciones, que también dependen de los valores de campo y de la información geológica de la zona.

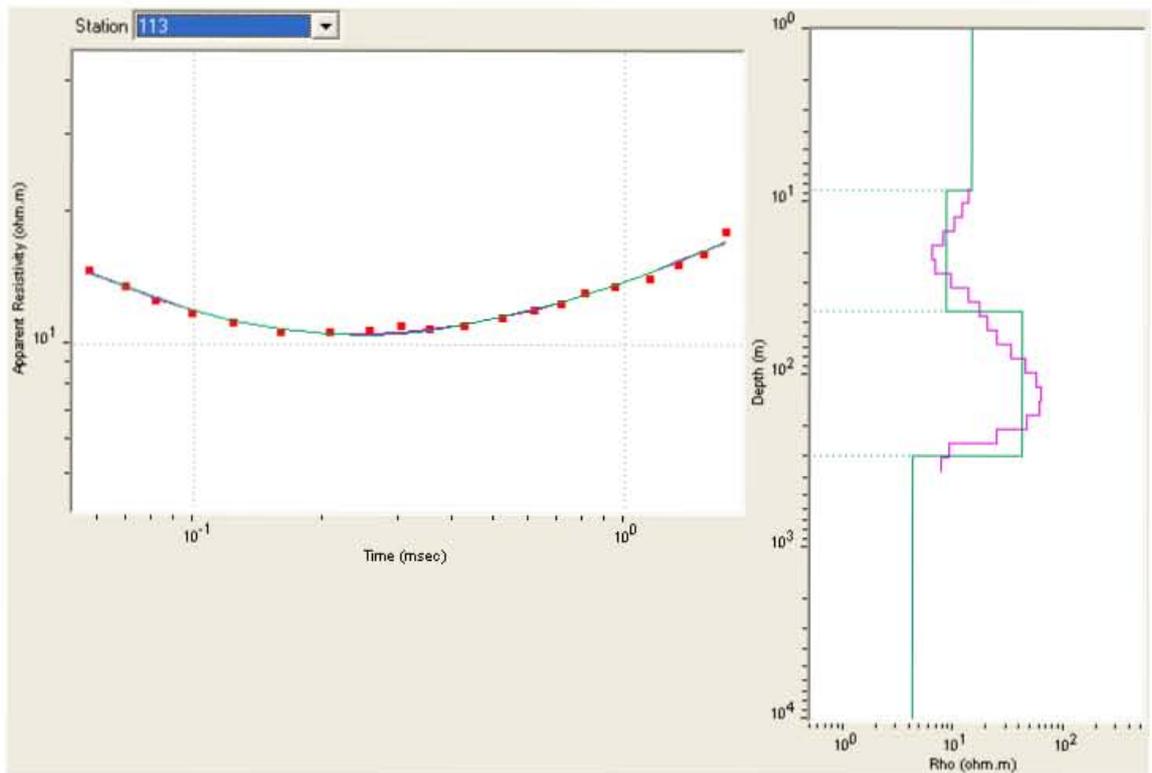


Figura 4.3. Modelo suavizado del sitio 113, obtenido con WinGLink

Cuando se hace una inversión en los datos electromagnéticos, no obtenemos una solución única, debemos elegir un modelo óptimo que represente e interprete nuestros datos, el modelo depende del número de capas usado o del modelo inicial elegido. Con la inversión de Occam se pueden solucionar los problemas anteriores mediante un modelo suavizado que se ajusta a los datos con una tolerancia predefinida.

La inversión de Occam se basa en la filosofía de William Occam “vale la pena hacer con más lo que se puede hacer con menos”. Lo que es que el perfil real debe ser por lo menos tan rico en estructura como el perfil encontrado, pero nunca menos complejo en estructura.

El método es parecido a un método de interpolación polinomial cúbica, es estable y generalmente converge en la quinta o sexta iteración.

## 5. Resultados y Conclusiones

En total fueron 28 sondeos, en la figura 5.1 se muestra la distribución de los perfiles, ésta distribución se eligió en función de los resultados de las curvas de resistividad calculadas.

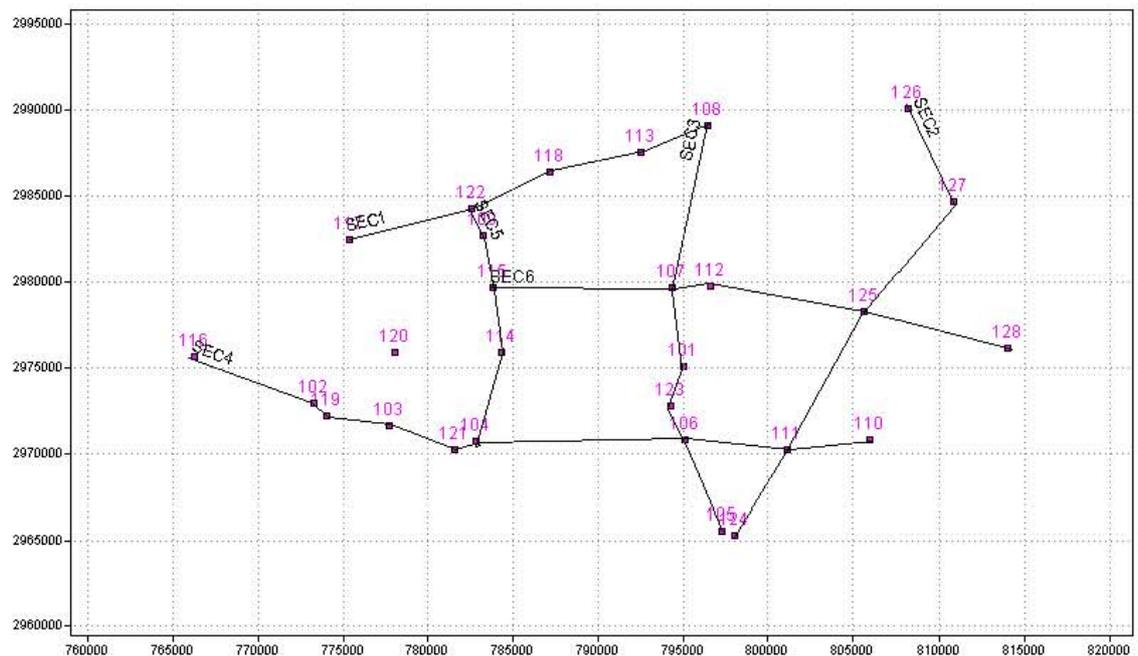


Fig. 5.1 Distribución de perfiles

Al analizar los perfiles se pudo realizar una imagen de la distribución de la resistividad en el subsuelo, basándose en valores de resistividades asociados a ciertos materiales y aguas.

De esta manera se zonificó el área ubicando una zona altamente resistiva, de la que resaltan 4 unidades fundamentales que son

Unidad	Intervalo resistivo (ohm·m)	Posible Correlación
U1	Menor a 4	Agua salada
U2	4 – 13	Material arcilloso (poco permeable)
U3a	14 – 40	Material arcillo arenoso (poco permeable)
U3b	40 - 250	Areniscas arcillosas
U5	Superior a 250	Calizas (basamento)

Tabla 5.1 Zonificación georresistiva

Se muestra la siguiente tabla para justificar la correlación presentada en la tabla anterior.

Aguas o Rocas	Resistividad	Aguas o Rocas	Resistividad
Agua de mar	0.2	Areniscas arcillosas	50-300
Agua de acuíferos aluviales	10-30	Areniscas cuarcitas	300-10 000
Agua de fuentes	50-100	Cineritas, tobas volcánicas	20-100
Arenas y gravas secas	1 000-10 000	Lavas	300-10 000
Arenas y gravas c/ agua dulce	50-500	Esquistos grafitosos	0.5-5
Arenas y gravas c/agua salada	0.5-5	Esquistos arcillosos o alterados	100-300
Arcillas	2-20	Esquistos sanos	300-3000
Margas	20-100	Gneis, Granito alterados	100-1 00
Calizas	300-10 000	Gneis, granito sanos	1 000-10 000

Tabla 5.2 Resistividad de aguas y rocas

## Perfiles Geoeléctricos

Los perfiles geoeléctricos mostraron muchos problemas, ya que los sondeos no alcanzaban la misma profundidad debido a que en la parte somera había zonas muy conductoras, lo que causaba gran dispersión en los puntos de la curva de decaimiento; por tal motivo al realizar los perfiles quedaron como se muestra en el anexo III.

Si se observan los perfiles se puede notar que, como se mencionó anteriormente, no todos los sondeos alcanzaron la misma profundidad; sin embargo, debido a la interpolación del software los perfiles llegan a más de 500m de profundidad, por lo que se considera que esa información no es confiable. Para solucionar dicho problema los perfiles fueron cortados dejando únicamente la parte que se consideró confiable, de acuerdo a un análisis de susceptibilidad de las curvas. Los perfiles quedaron finalmente como se muestra en las figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.8, 5.9 y 5.10

### Perfil Geoeléctrico 1

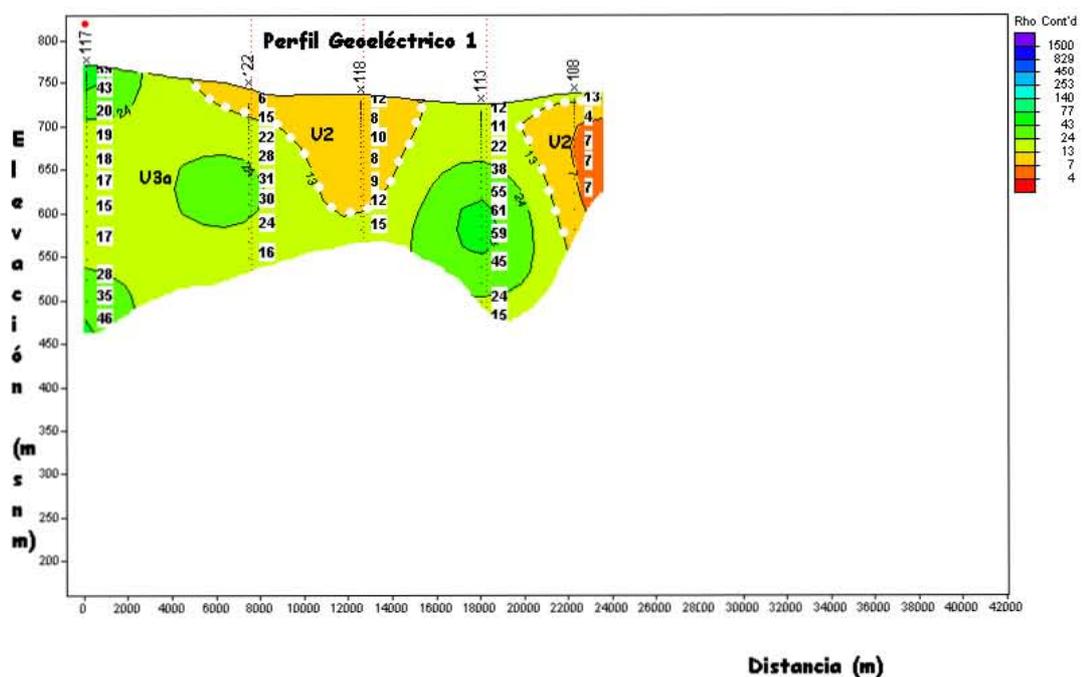


Fig.5.2 Perfil geoelectrico 1

En el perfil geoelectrico 1, podemos ver que se presenta un material altamente conductor en la zona más superficial, a pesar que se encuentra a un costado de la Sierra La Madera que está constituida principalmente por calizas, por lo que se esperaba que dicha roca estuviera somera. Debido esencialmente a las condiciones estructurales.

### Perfil Geoelectrico 2

Este perfil rodea al valle por su zona este. Se puede observar que hay un fuerte contraste lateral de resistividades, que va desde valores menores a 4 ohm·m hasta 150 ohm·m, lo cual es congruente a la información geológica de la zona pues puede asignarse que los valores de resistividad mayor están correlacionados con las calizas de las sierras y la zona central del valle, donde aparecen las resistividades menores, que es donde se piensa que el basamento esté a mayor profundidad.

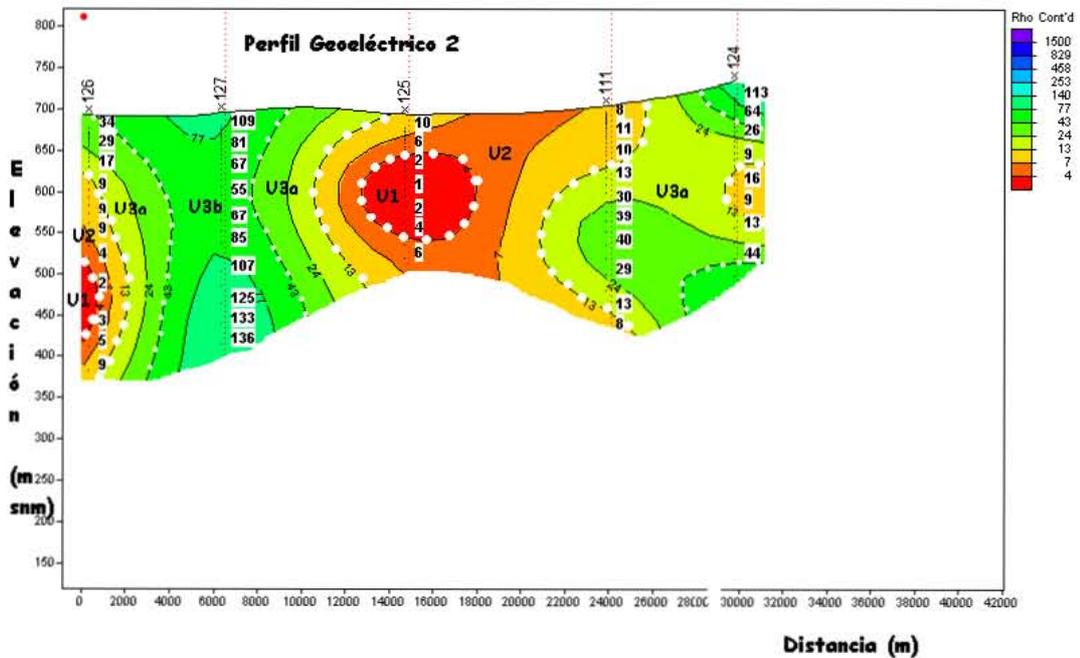


Fig.5.3 Perfil geoelectrico 2

### Perfil Geoelectrico 3

En el perfil 3 se observa una zona salada a la mitad del valle y alrededor de ésta una zona importante de material arcilloso y arcilloarenoso, lo que se relaciona con los valores de resistividad menor a 4 ohm-m y hasta 13 ohm-m y que corresponde al abanico aluvial y al relleno fluvial. El sondeo 105 se encuentra muy cercano a la Sierra de San Marcos y Pinos, que está formada por caliza, por lo cual corresponde a un material con mayor resistividad. La zona salada se identifica a simple vista, como se muestra en las imágenes 5.5 y 5.6

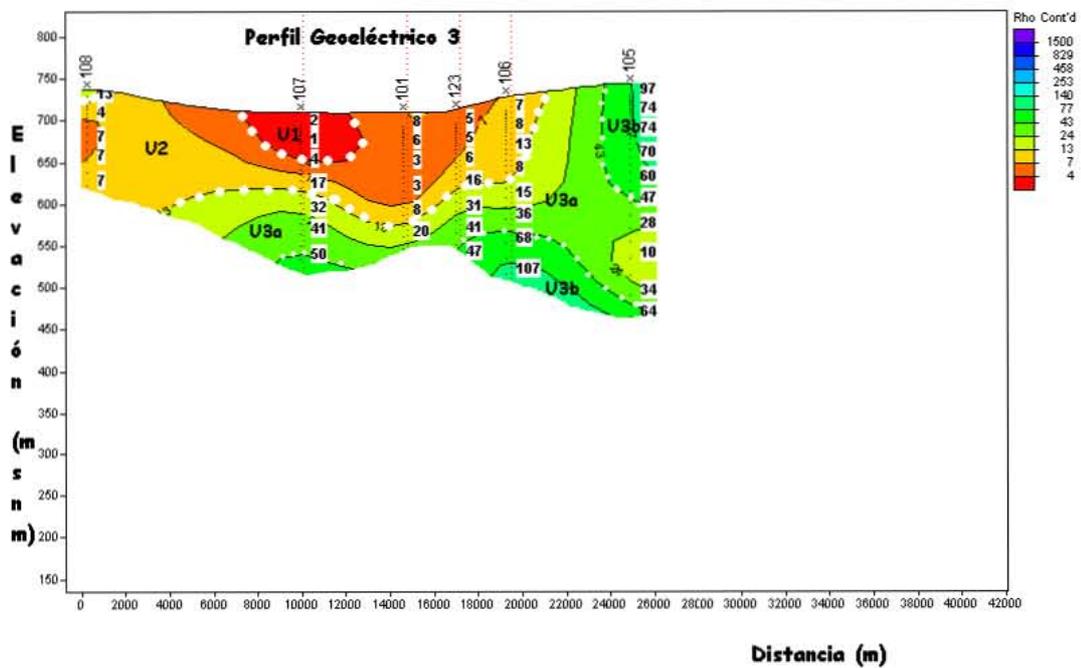


Fig.5.4 Perfil geoelectrico 3



Fig. 5.5 Lugar del sondeo 107



Fig. 5.6 Presencia de sal en el sondeo 107

#### **Perfil Geoeléctrico 4**

En este perfil podemos ver la presencia de caliza en los sondeos 116, 102 y 119, que se encuentran cercanos a la Sierra La Fragua, la cual tiene echados de aproximadamente  $30^\circ$ , por lo tanto la caliza en esa zona debe ser somera. En el resto de los sondeos el material es básicamente arcilloso y arcillo-arenoso, lo cual también corresponde a la geología por que en esa zona de la Sierra de San Marcos y Pinos los echados de la caliza son muy grandes (fig. 5.7) por lo que el basamento debe de estar muy profundo.

En la zona marcada por el signo de interrogación los resultados arrojados por el software no son reales, debido a que en esa zona es donde se encuentra la Sierra San Marcos, la cual está constituida por caliza. En los sondeos 106, 111 y 110 no es posible ver la caliza, ya que los echados de la Sierra de San Marcos son muy pronunciados.

El perfil geoelectrico 4 fue trazado en paralelo a la sección geológica C-C', de tal forma que se pueden comparar una con otra. Los resultados obtenidos fueron los esperados ya que los valores de resistividad obtenidos en el estudio corresponden al material que se encuentra en la zona.



Fig. 5.7 Vista de la Sierra de San Marcos y Pinos desde un punto cercano al sondeo 4

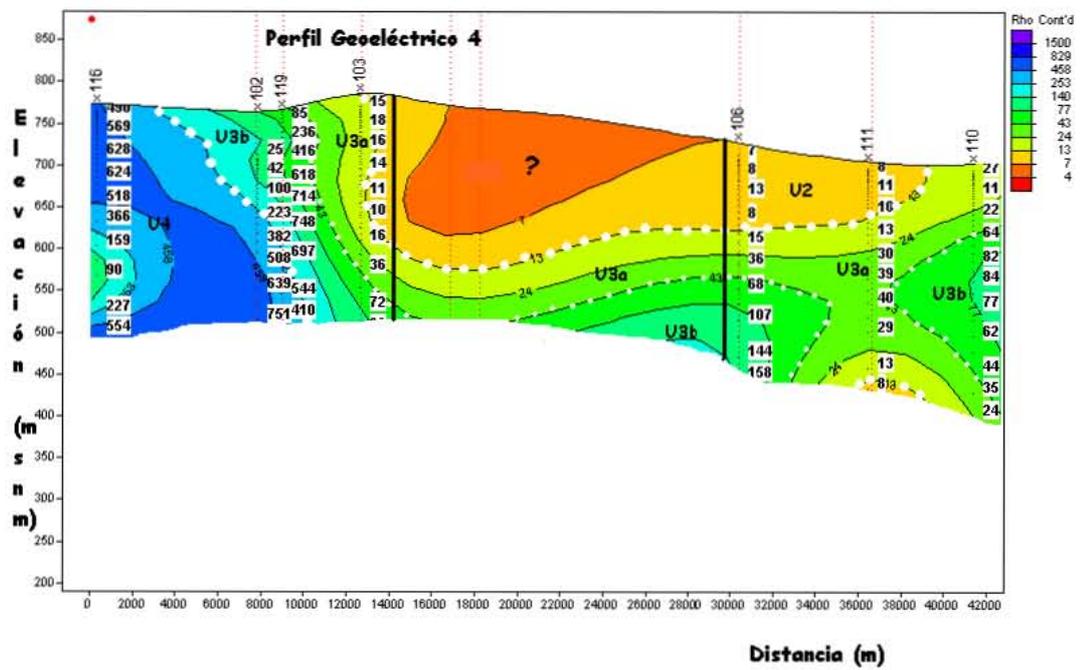


Fig.5.8 Perfil geoelectrico 4

**Perfil Geoelectrico 5**

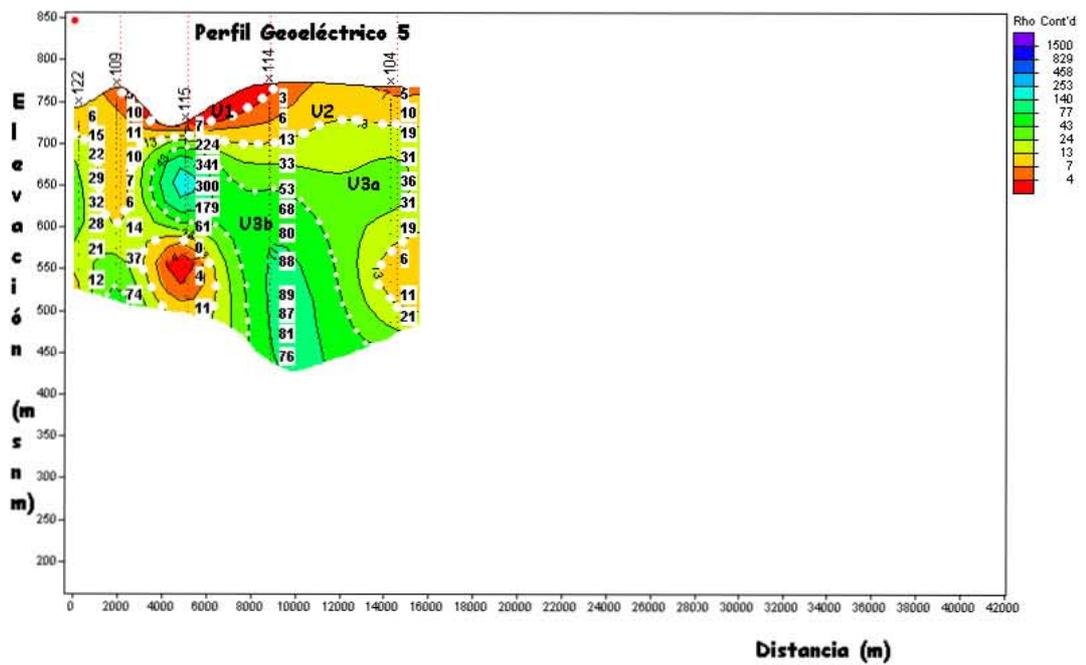


Fig.5.9 Perfil geoelectrico 5

En este perfil se puede ver que en la parte somera se encuentran las resistividades menores y posteriormente nuevamente resistividades altas (200 ohm·m, aproximadamente). Recordemos que a un costado de los sondeos 104, 114 y 115 se encuentra la Sierra de San Marcos y Pinos, y a un costado del sondeo 122 la Sierra de La Madera, que están constituidas por caliza. Con dicha información se puede pensar en una continuidad entre las dos sierras y recordando que cercana al sitio 122 hay una falla, por la cual no se aprecia la continuidad en esa zona.

### Perfil Geoeléctrico 6

En el perfil 6 se observa que la zona salada del sitio 107 se extiende al sitio 112 y al sitio 125 desde una profundidad de 50 m hasta casi 150 m. Además, corresponde la zona de menores resistividades al centro del valle y las zonas de más alta resistividad a los costados del valle, cerca de la zona montañosa.

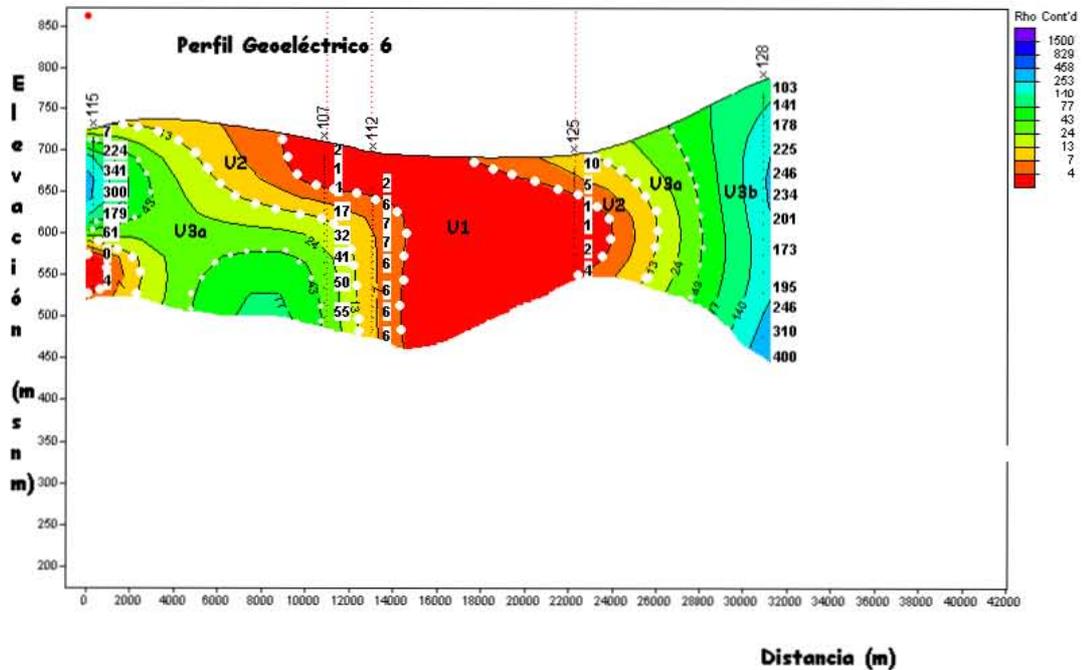


Fig.5.10 Perfil geoeléctrico 6

## **Conclusiones**

El método presenta algunas limitaciones de penetración debido a la presencia de bajas resistividades en la parte superficial, pues la corriente se dispersa lateralmente. En el caso del valle, que presenta gran cantidad de material arcilloso, arcillo arenoso y agua salada en la parte somera, la profundidad esperada de 600 m no fue alcanzada. Por lo tanto, no fue posible observar el basamento del valle, que se encuentra por debajo de los 400m de profundidad. En el caso del relleno, puede pensarse que tiene una profundidad de por lo menos 200m, ya que de haberse alcanzado la profundidad esperada, podría tener una mayor profundidad.

No se encontró ningún indicio geológico para explicar el descenso del nivel de las pozas. El motivo probable es simplemente un proceso de evaporación, ya que al visitar la zona de estudio pudo observarse el material evaporítico alrededor de las pozas ya desaparecidas. Para detallar más la distribución de resistividades en la zona más somera se recomienda realizar nuevos estudios con tamaños de loop más pequeños (20 m) puesto que en este trabajo se utilizaron tamaños de loop de 50m y 150m por lo que fue imposible caracterizar los primeros 30 m.

Es importante resaltar que la información geológica disponible en la zona fue de carácter vital para realizar la correlación de los perfiles geoelectricos con la misma.

Otro punto importante es la elección del método de interpolación, para lo cual se debe de tomar en cuenta la información geológica que se tiene y así, poder dar una interpretación plausible con el contexto geológico prevaleciente en la zona.

## **Bibliografía**

- J. D. Mc Neill; Principles and Application of Time Domain Electromagnetic Techniques for Resistivity Sounding, Technical Note TN-27; Geonics Limited; Julio, 1994
- J. D. Mc Neill; Applications of Transient Electromagnetic Techniques; Technical Notes TN-7; Geonics Limited; Octubre, 1980
- Juan C. Fernández; Apuntes de Electromagnetismo; Universidad de Buenos Aires; 2004
- Instituto de Geología; Informe Geológico del Área Comprendida entre los Valle de el Hundido y Cuatro Ciénegas, Coahuila; Instituto de Geología, UNAM; Octubre, 2004
- Gabriel Chávez Cabello; Tesis Doctoral: Deformación y Magmatismo Cenozoicos en el Sur de la Cuenca Salinas, Coahuila; UNAM; Marzo, 2005
- Estudio Hidrogeológico de los Acuíferos El Hundido y Cuatro Ciénegas, Coahuila; IMTA, 2004
- Estudio Geofísico en los Valles de Cuatro Ciénegas y El Hundido, Coahuila; CIGSA; Diciembre, 2004
- Fitterman, D.V. and Stewart, M.T. (1986); Transient electromagnetic sounding for groundwater.; *Geophysics* **51** (4)
- Ernesto Orellana, Prospección Geoeléctrica por cambios variables; Biblioteca Técnica Phillips; Madrid; 1974
- Constable S. C., Parker R. L. (1987); Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data; *Geophysics* **52** (3)
- Misac N. Nabighian, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics- Applications Part A and Part B, Society of Exploration Geophysics, 1996
- Geophysical Services; A discussion of geophysical techniques: Time-Domain Electromagnetic Exploitation; Northwest Geophysical Associates, Inc. 2002

## ANEXO I INSTRUMENTACIÓN

Los sondeos en el dominio del tiempo se realizaron con un equipo Sirotem-S (Mark 3) el sistema cuenta con la capacidad del acelerador Turn off rápido, y loop 300x300 m en la modalidad de loop coincidente.

### Sirotem

Receptor/transmisor.....	Sirotem-3S
Sistema de Registro .....	minimo 400 registros
No. de ventanas .....	53 en tres series de tiempo
	Inicio y Fin seleccionable
Rango de medición .....	50 microsecs a 2 secs
Señales a promediar.....	1-9999 apilamientos (seleccionable)
Retraso Inicial.....	0-9999 microsecs (seleccionable)
Filtros.....	50/60 Hz y pasivo de cuatro puntos anti-alias
Pantallas.....	ventanas con valores normalizados y resistividad aparente (en modo texto o grafico)
Peso.....	7Kg



## ANEXO II

### COORDENADAS

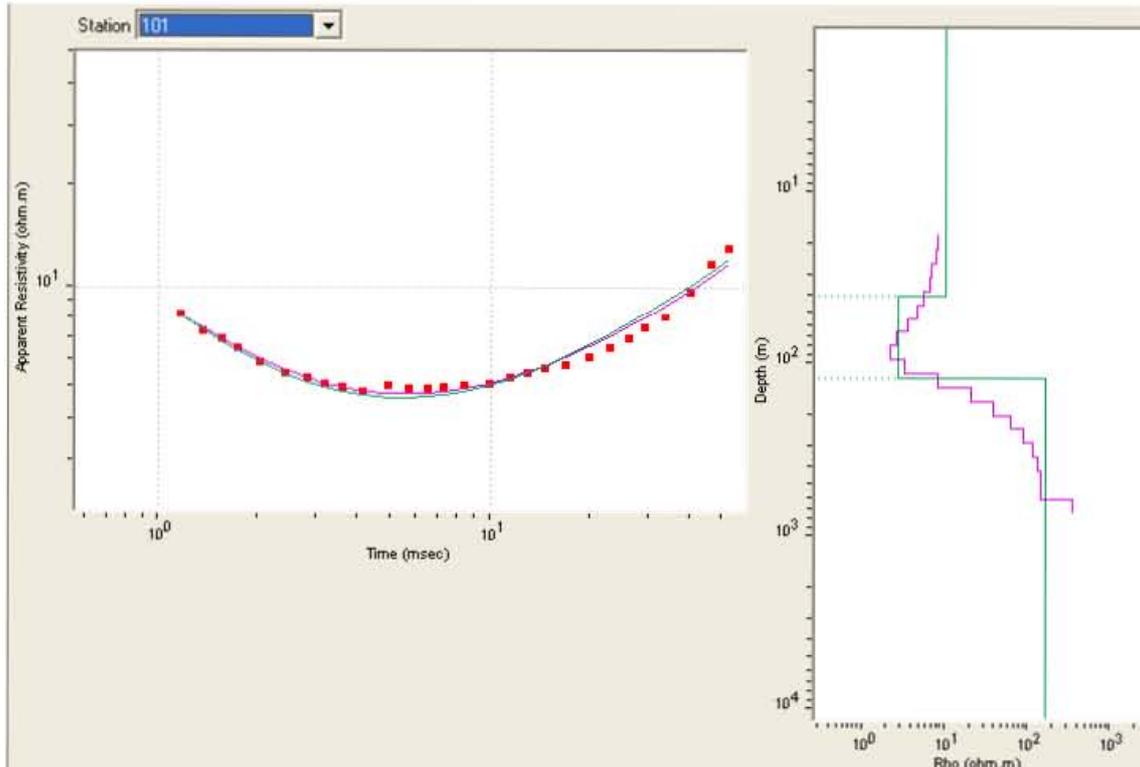
#### Coordenadas UTM y Geográficas de los TEM (Datum NAD27)

Sitio	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
101	795012	2975038	712
102	773244	2972965	730
103	777719	2971636	788
104	782822	2970682	770
105	797303	2965516	749
106	795092	2970760	730
107	794395	2979633	712
108	796465	2989055	740
109	783223	2982685	770
110	806017	2970792	704
111	801112	2970204	707
112	796578	2979756	699
113	792519	2987529	726
114	784325	2975916	775
115	783859	2979624	724
116	766227	2975621	775
117	775391	2982458	774
118	787200	2986370	738
119	774072	2972166	804
120	778019	2975881	774
121	781547	2970253	773
122	782537	2984212	744
123	794264	2972765	714
124	798001	2965253	733
125	805625	2978235	696
126	808170	2990046	695
127	810803	2984621	698
128	814043	2976098	788

### ANEXO III      GRAFICAS DE RESISTIVIDAD

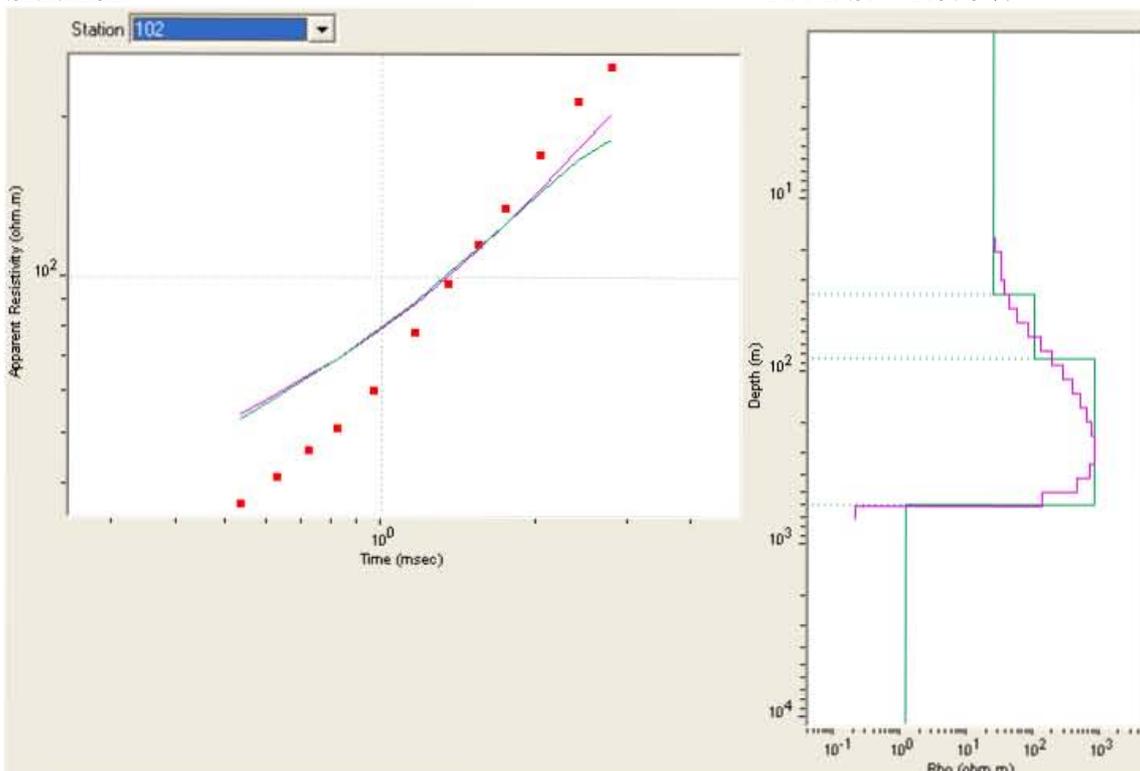
Sitio 101

R. M. S. = 0.393 %



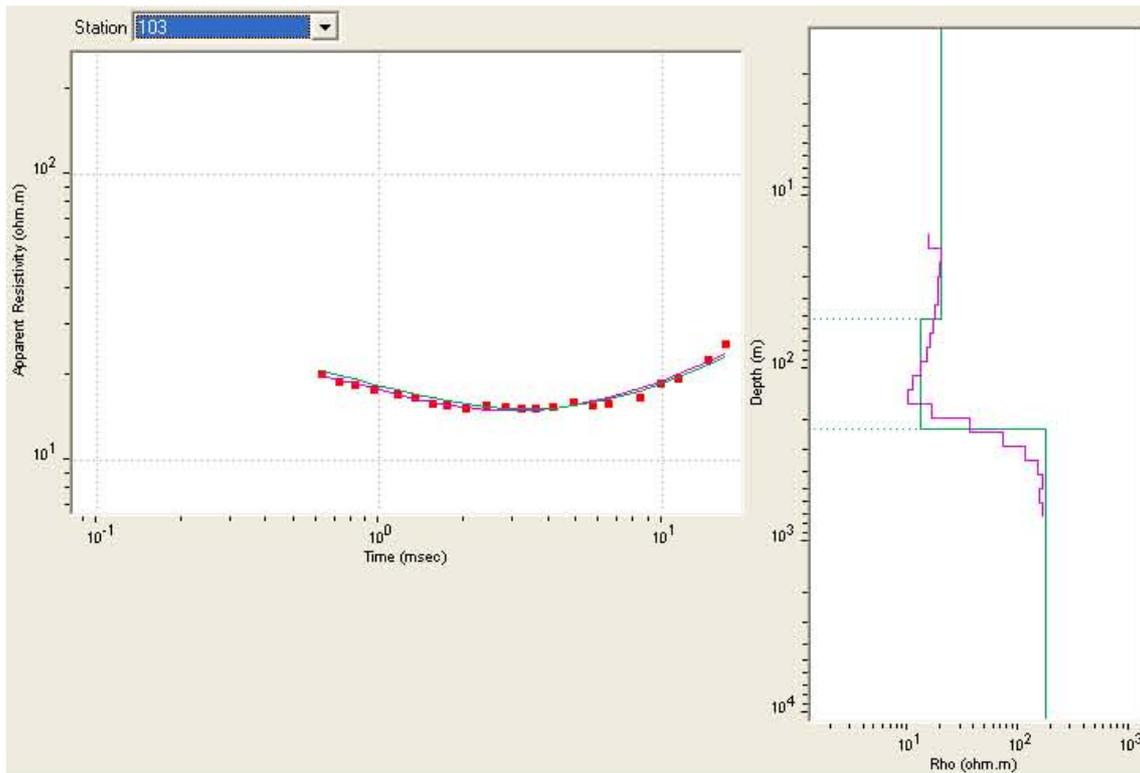
Sitio 102

R. M. S. = 1.076 %



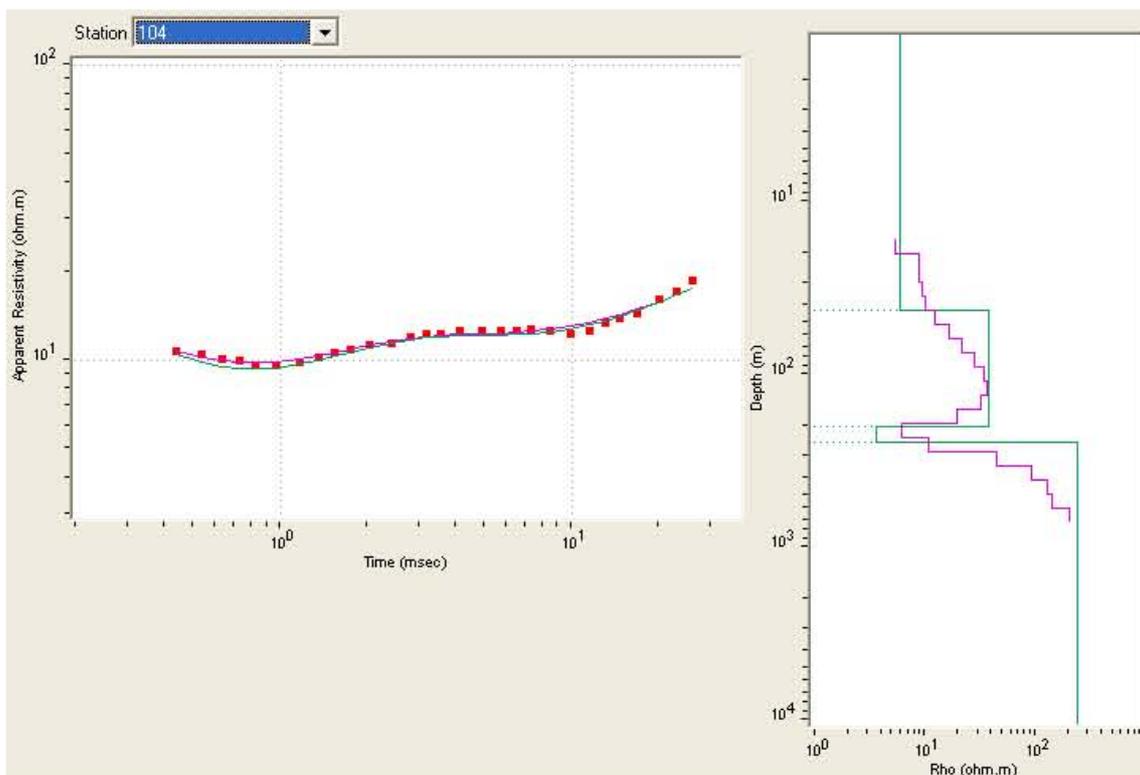
Sitio 103

R. M. S. = 0.216 %



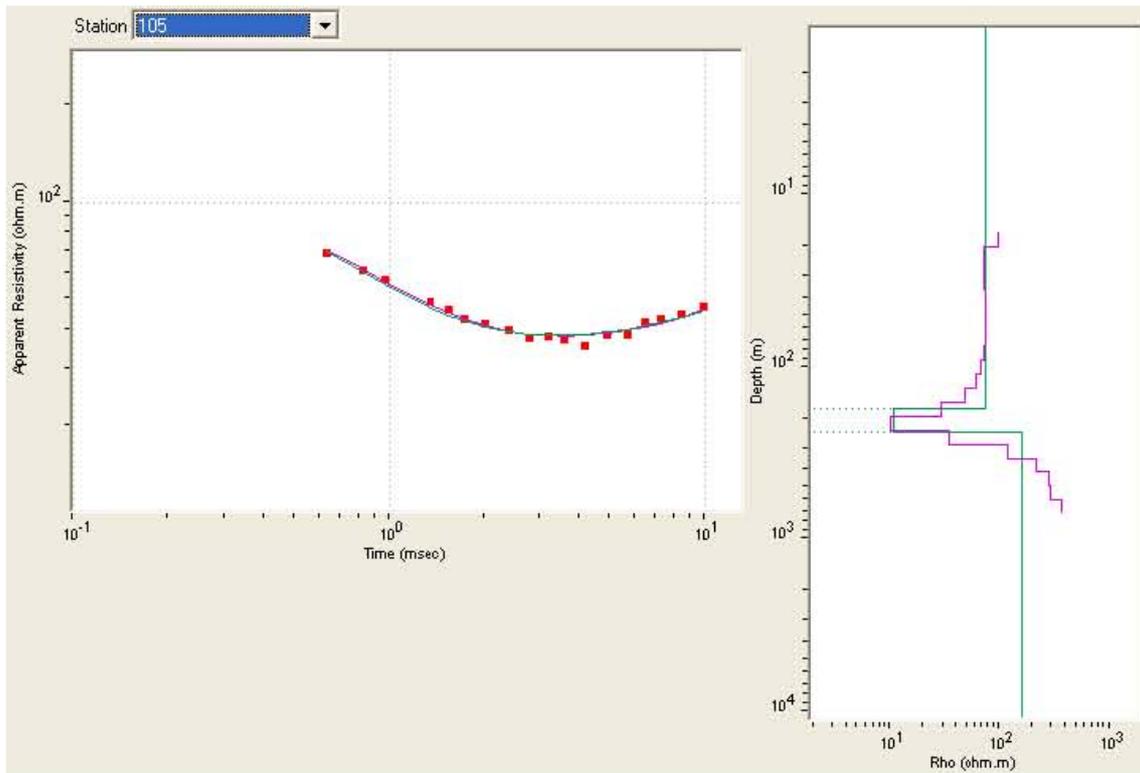
Sitio 104

R. M. S. = 0.176 %



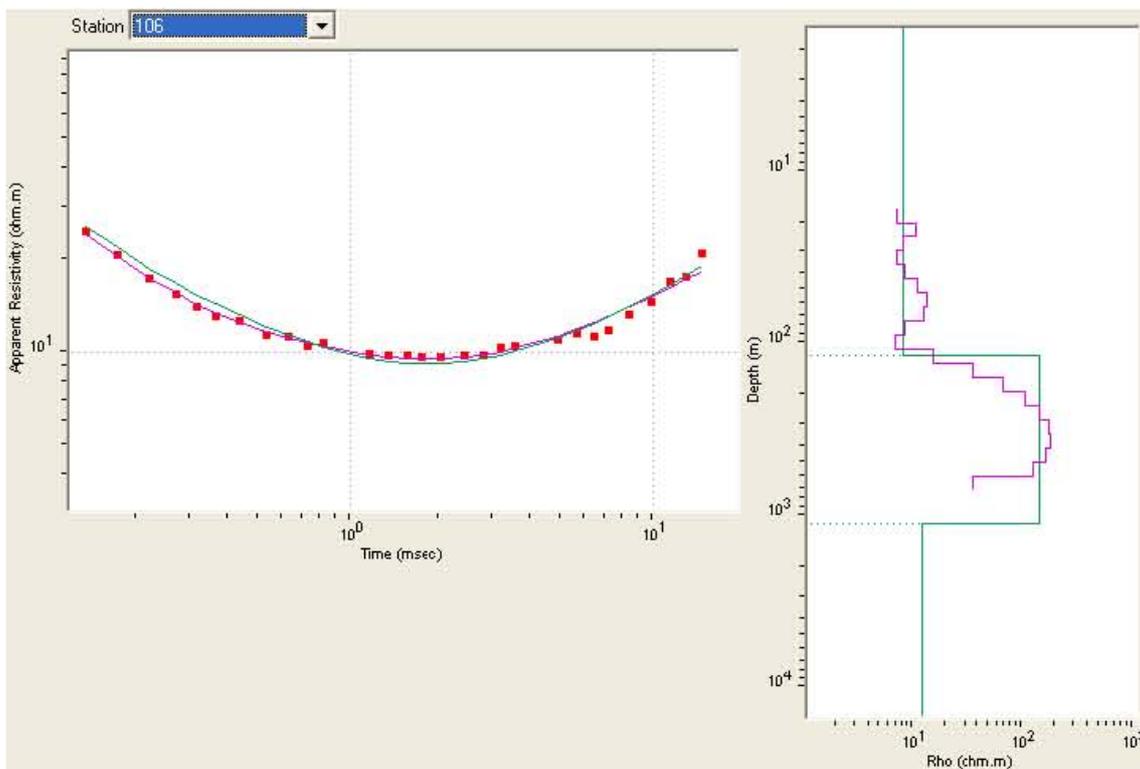
Sitio 105

R. M. S. = 0.19 %



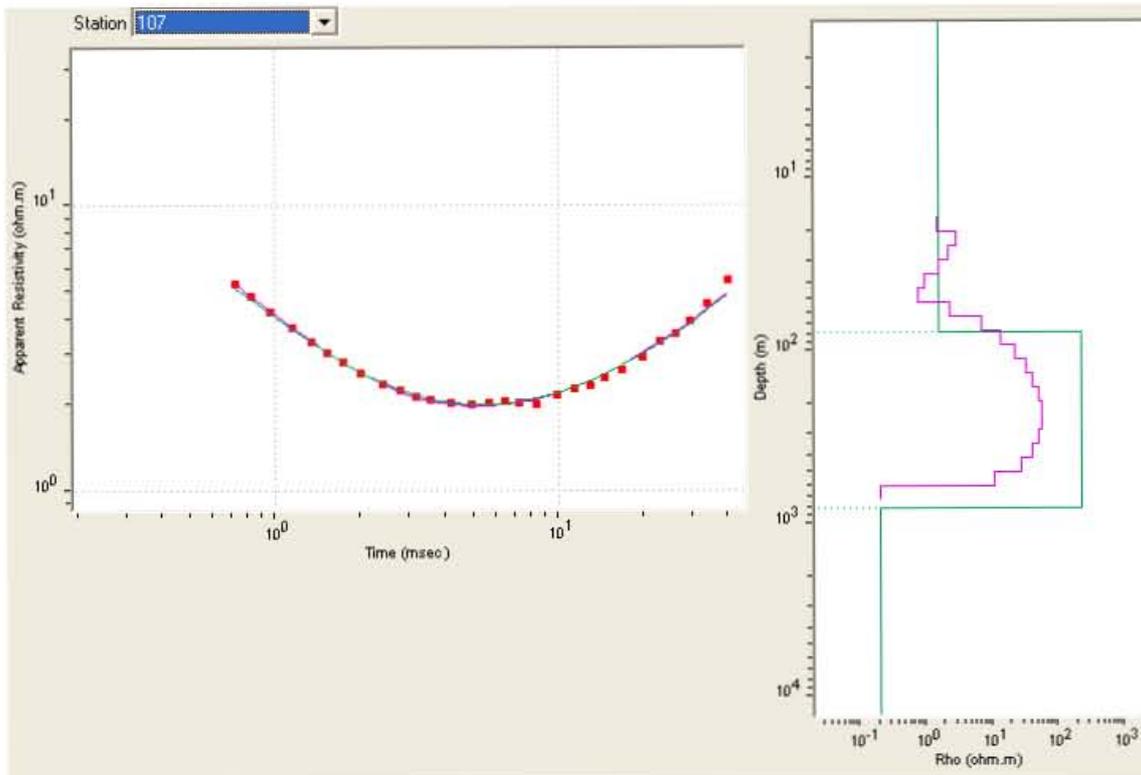
Sitio 106

R. M. S. = 0.318 %



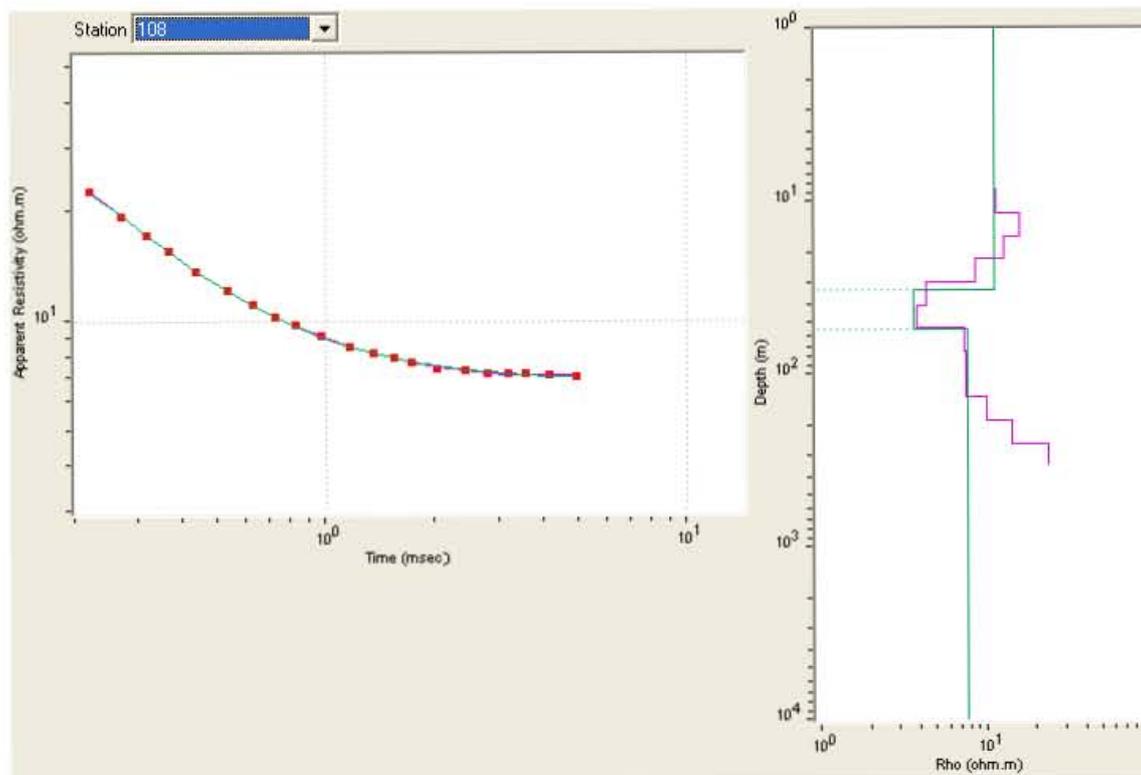
Sitio 107

R. M. S. = 0.301 %



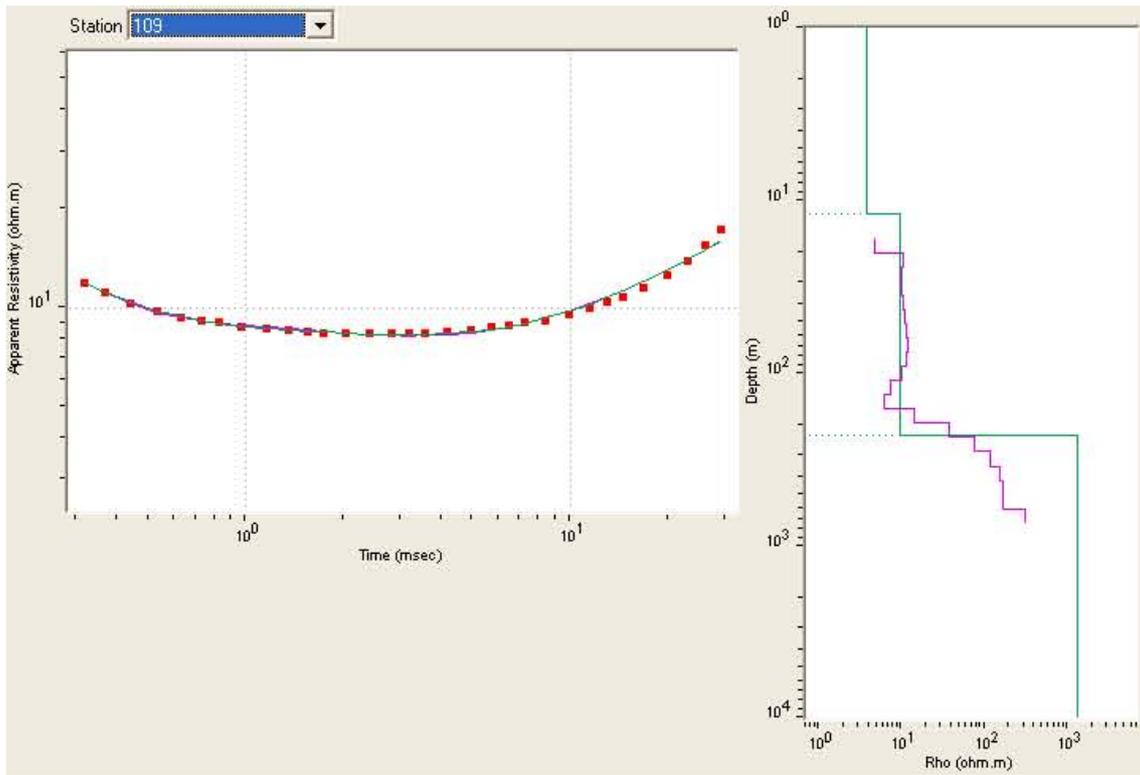
Sitio 108

R. M. S. = 0.058 %



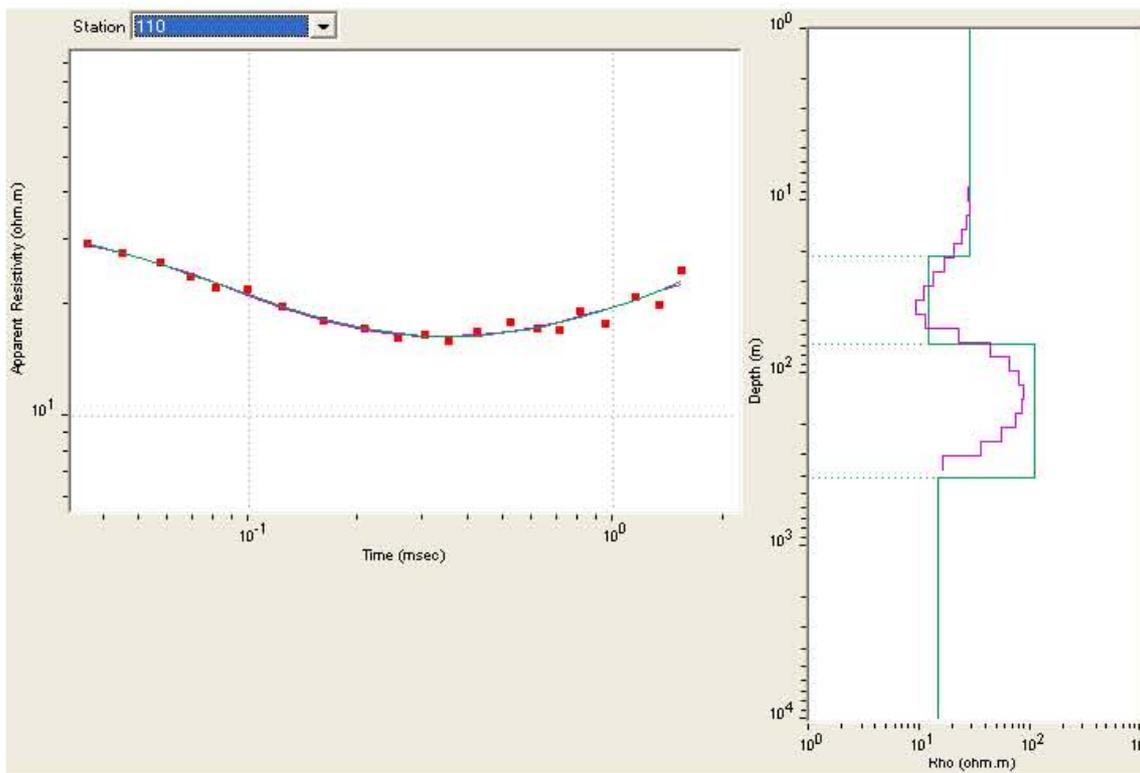
Sitio 109

R. M. S. = 0.163 %



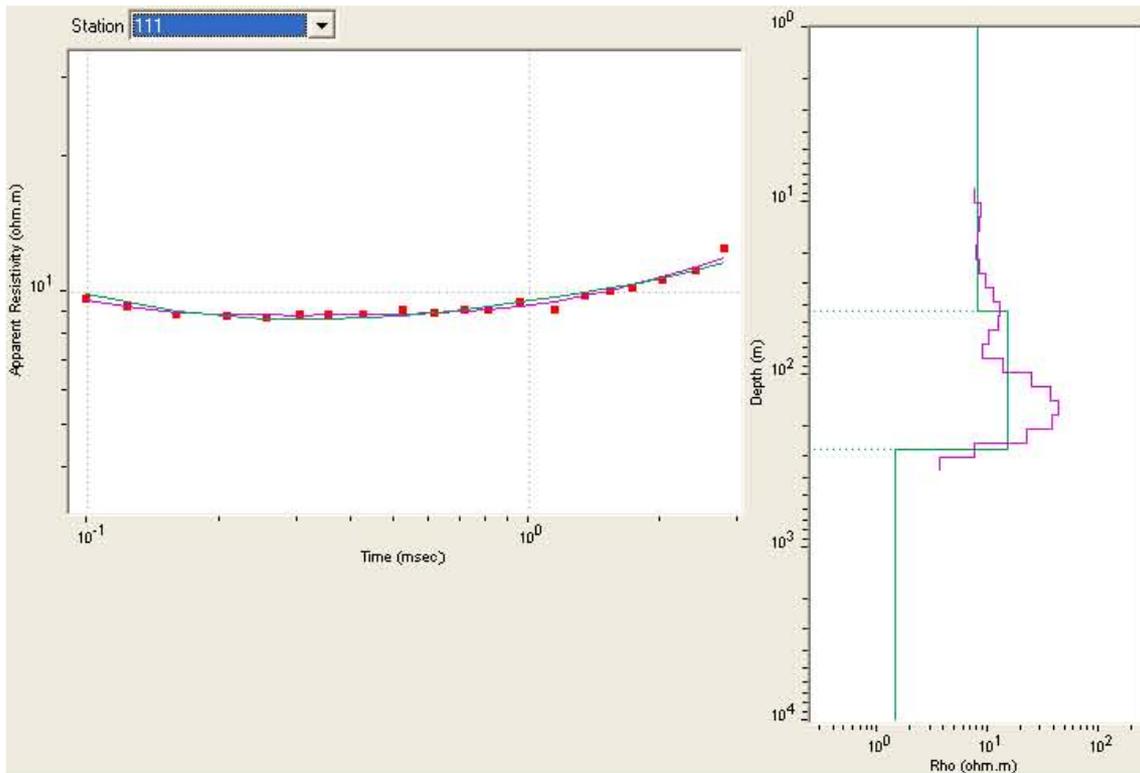
Sitio 110

R. M. S. = 0.273 %



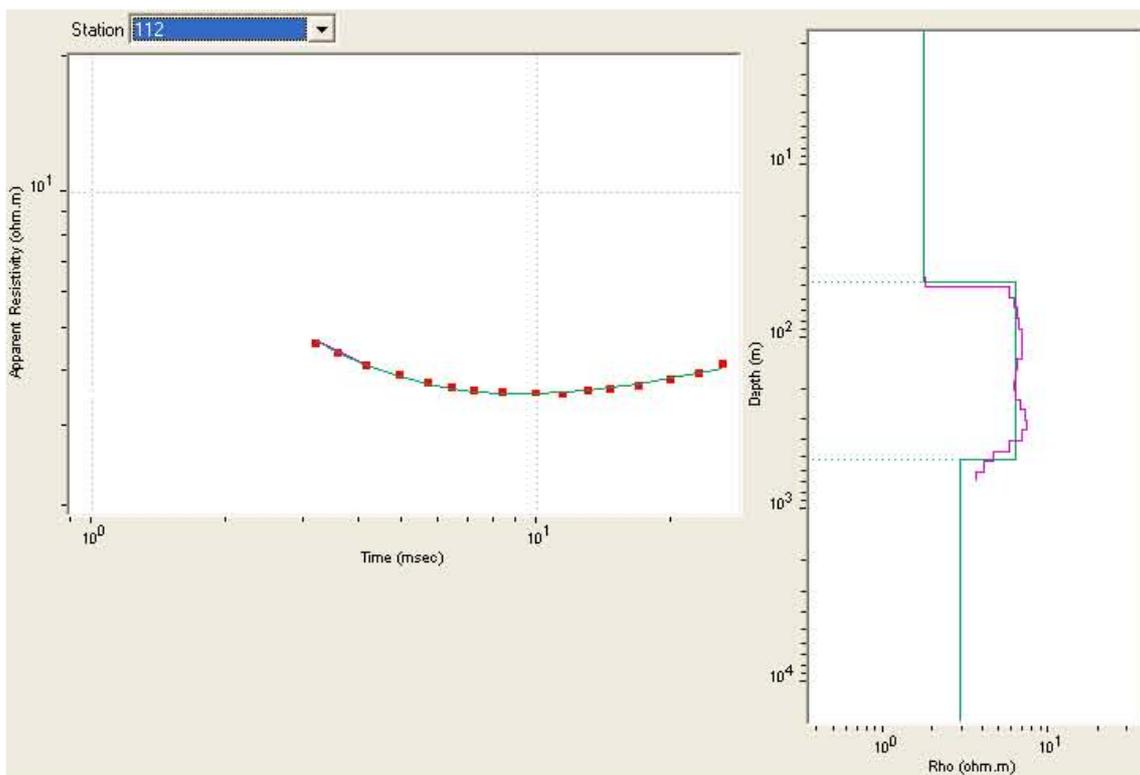
Sitio 111

R. M. S. = 0.128 %



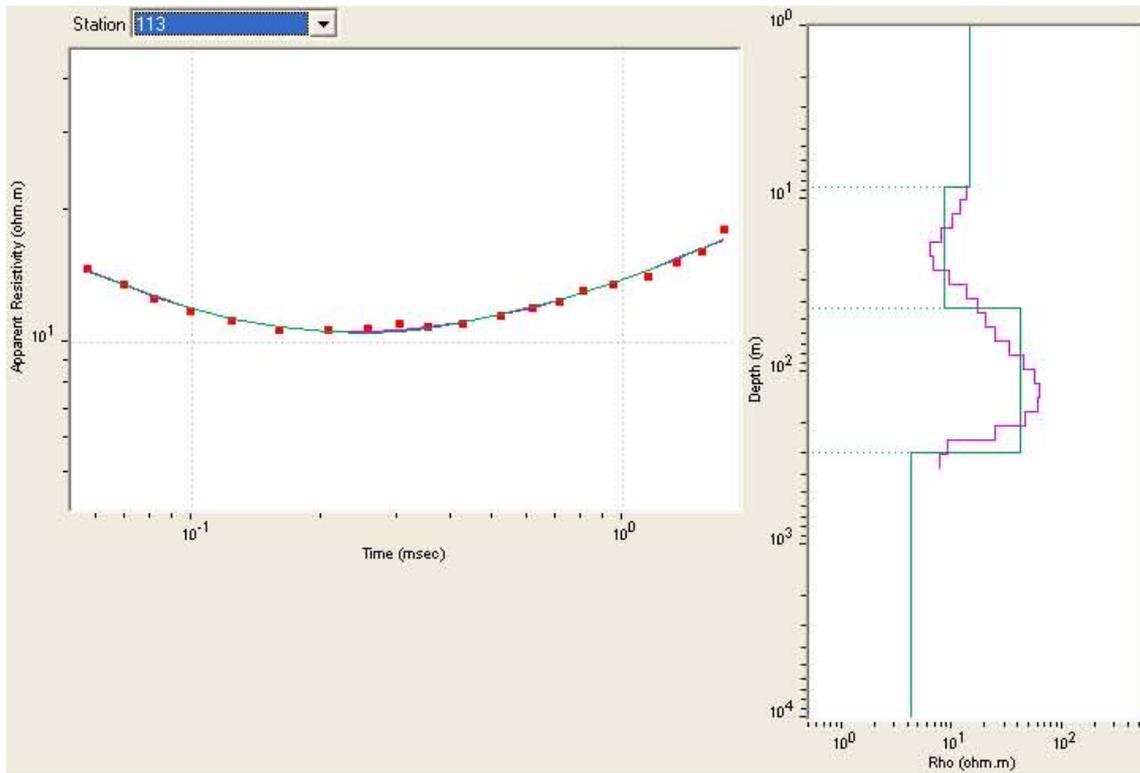
Sitio 112

R. M. S. = 0.052 %



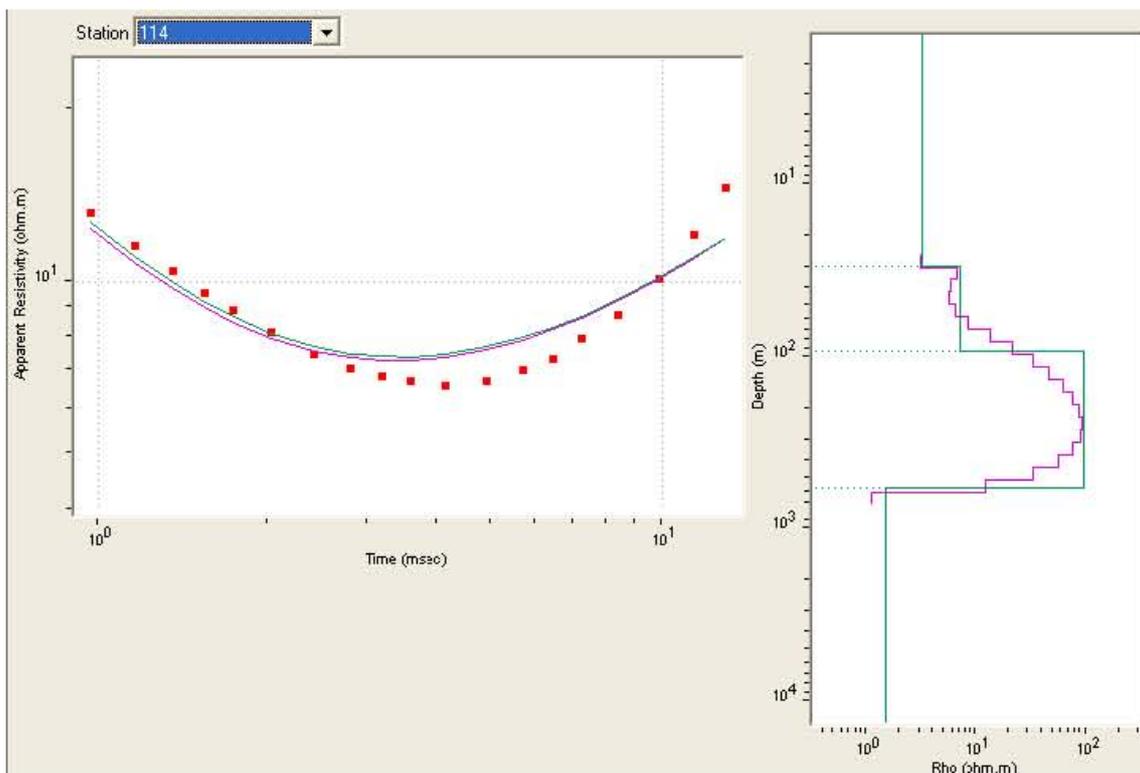
Sitio 113

R. M. S. = 0.173 %



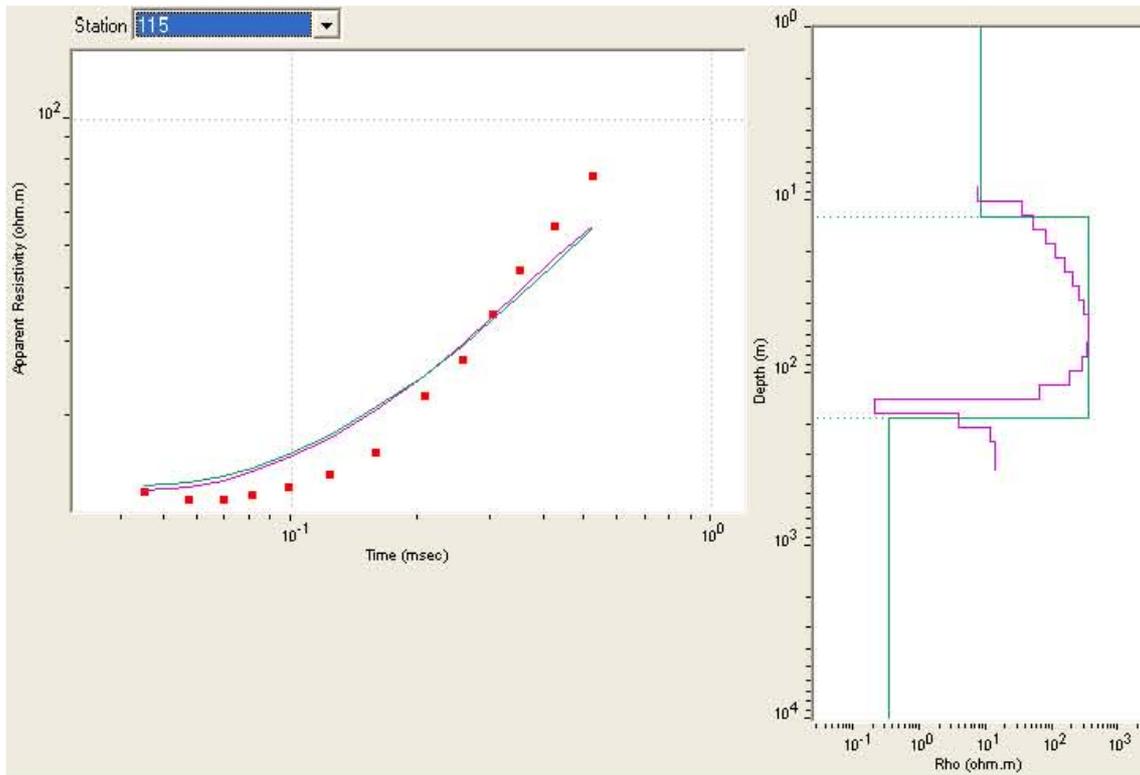
Sitio 114

R. M. S. = 0.645 %



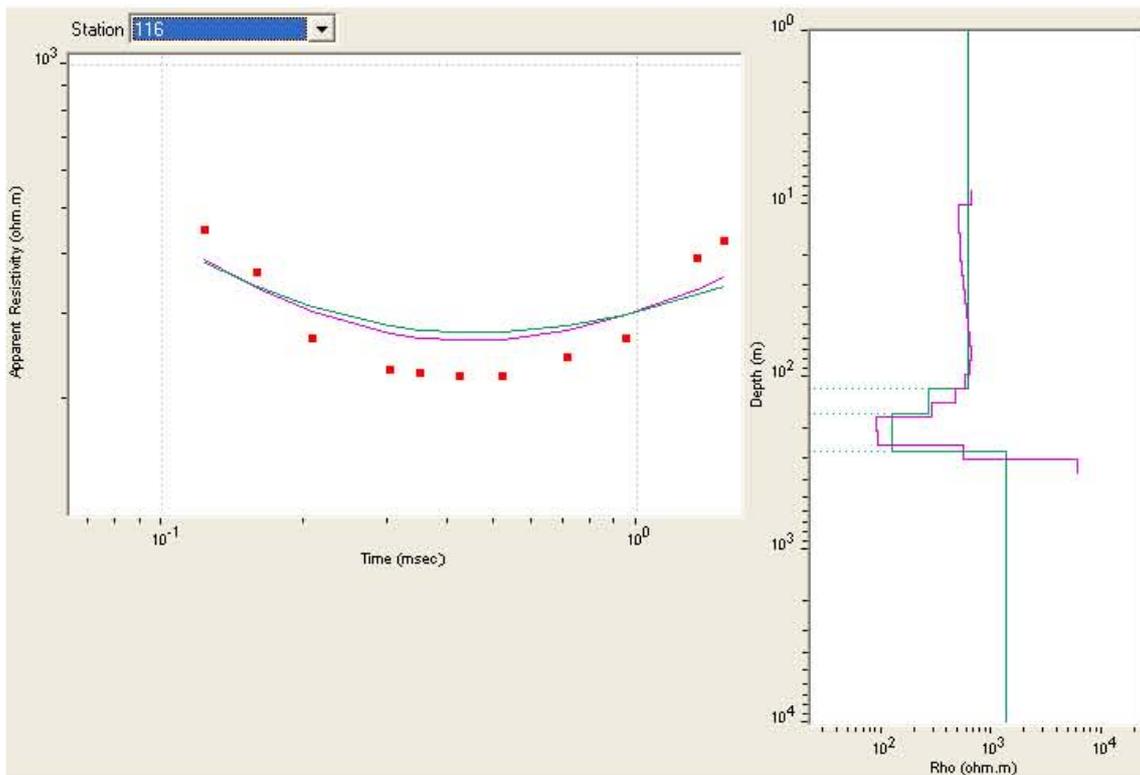
Sitio 115

R. M. S. = 0.713 %



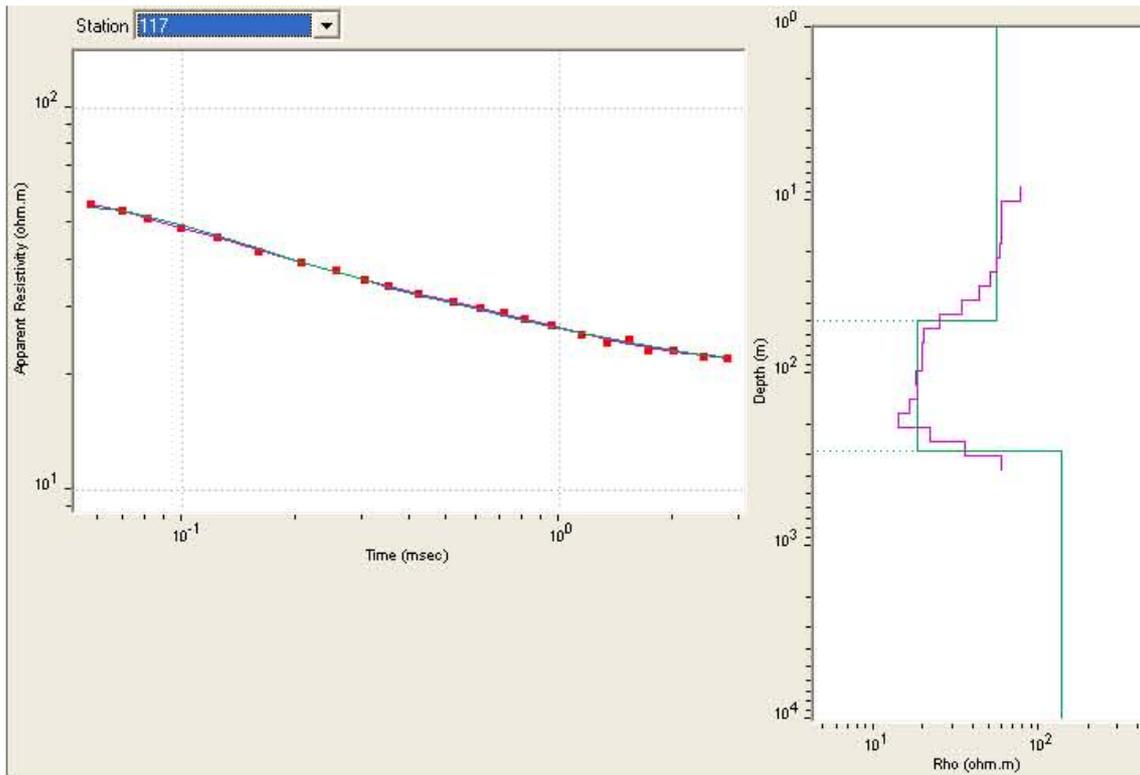
Sitio 116

R. M. S. = 0.815 %



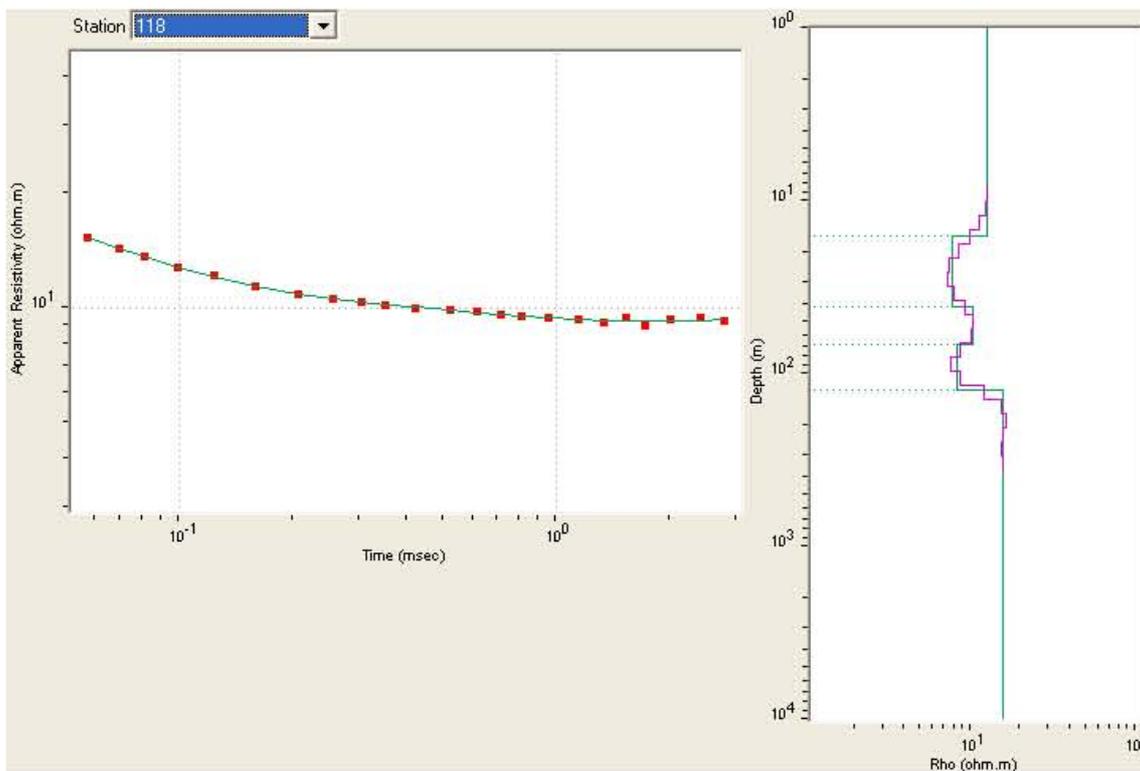
Sitio 117

R. M. S. = 0.069 %



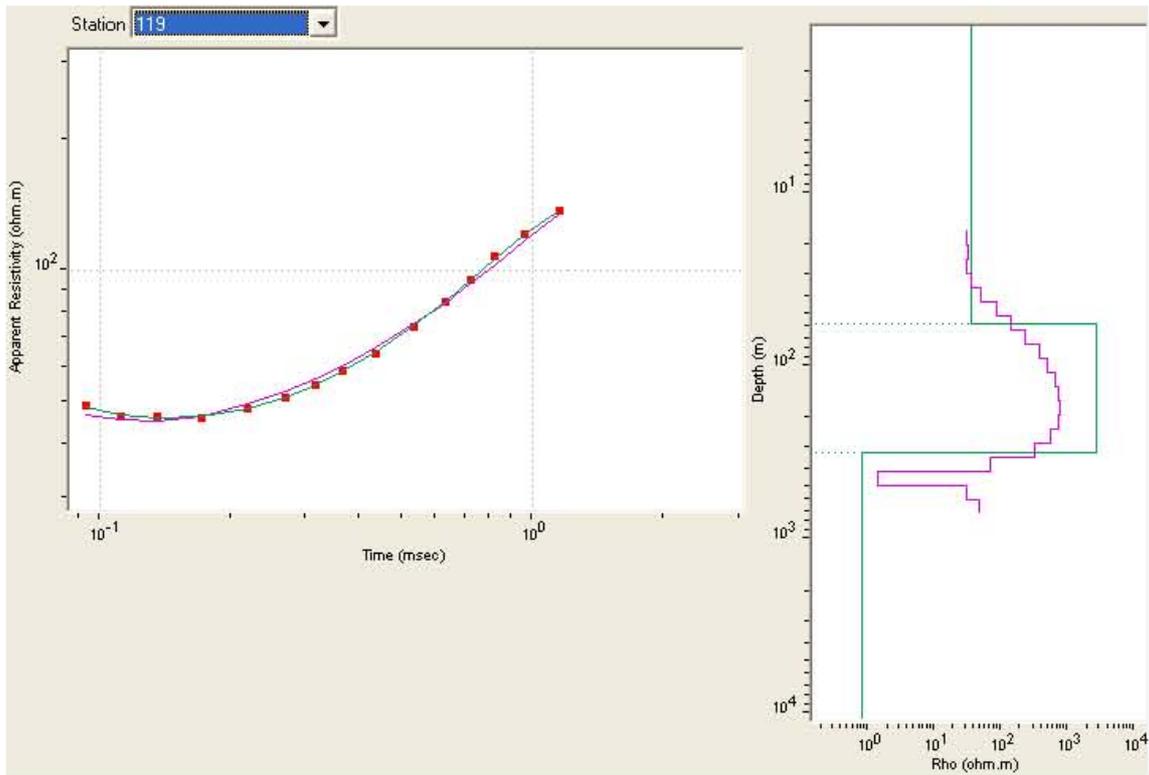
Sitio 118

R. M. S. = 0.058 %



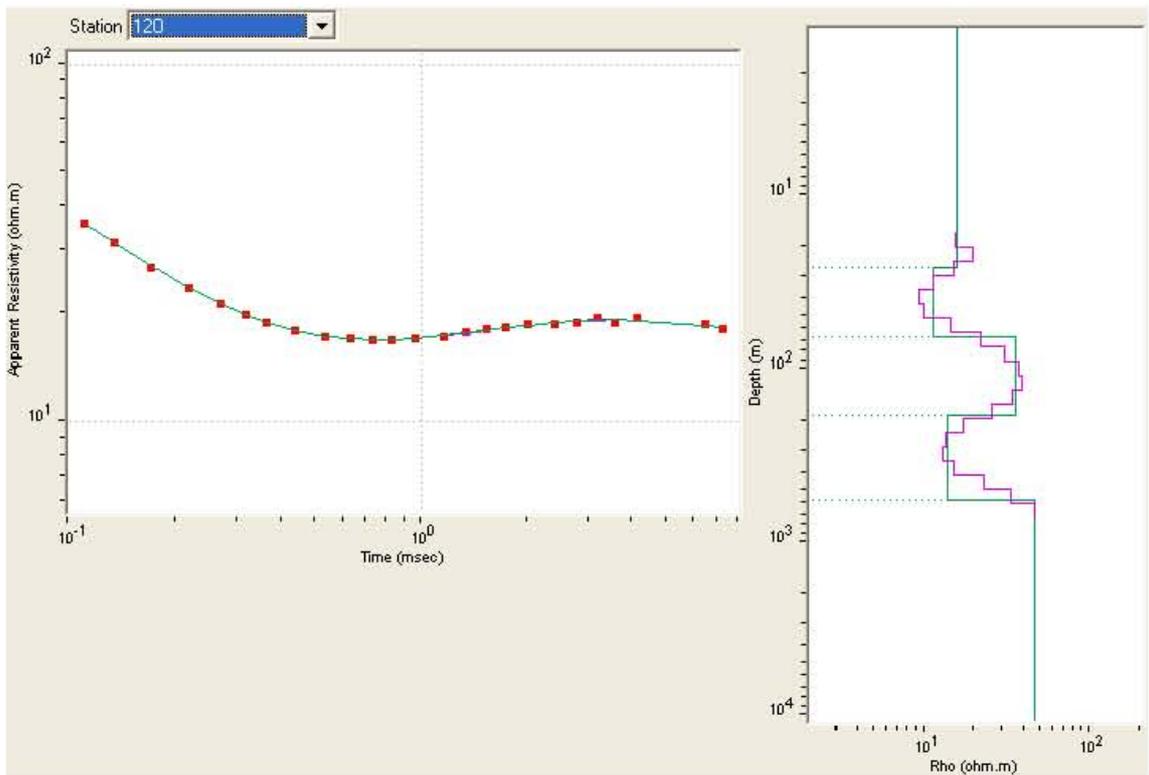
Sitio 119

R. M. S. = 0.283 %



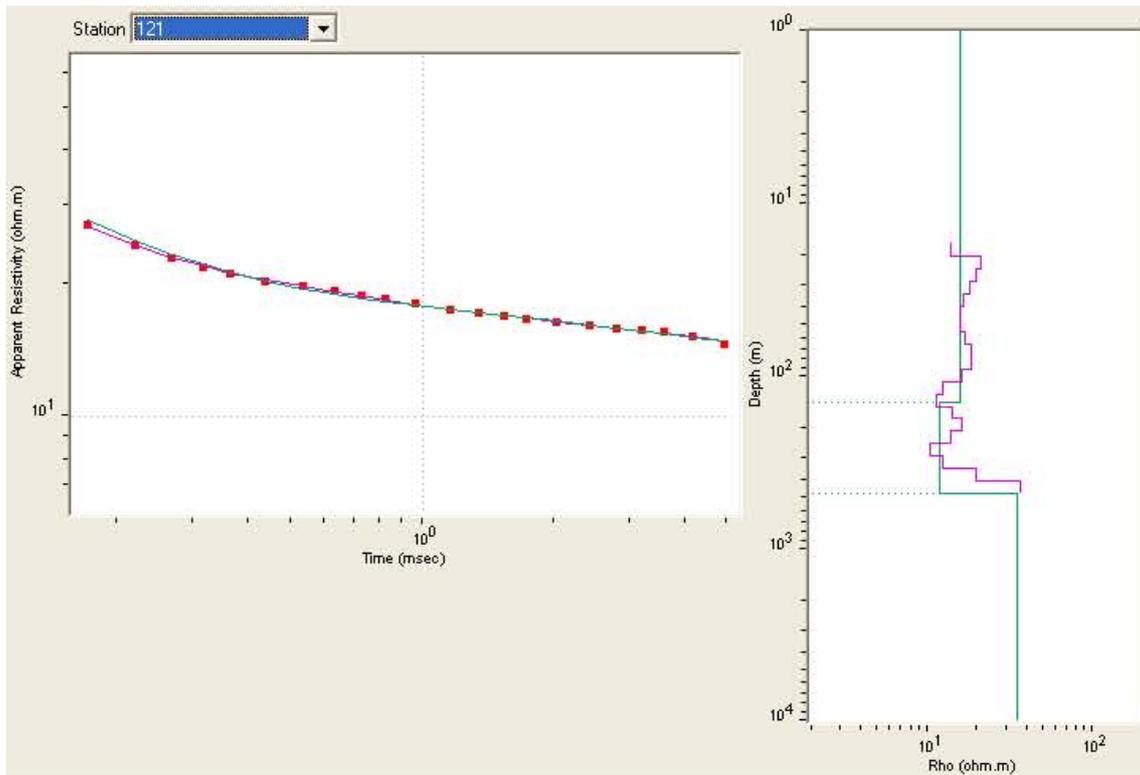
Sitio 120

R. M. S. = 0.053 %



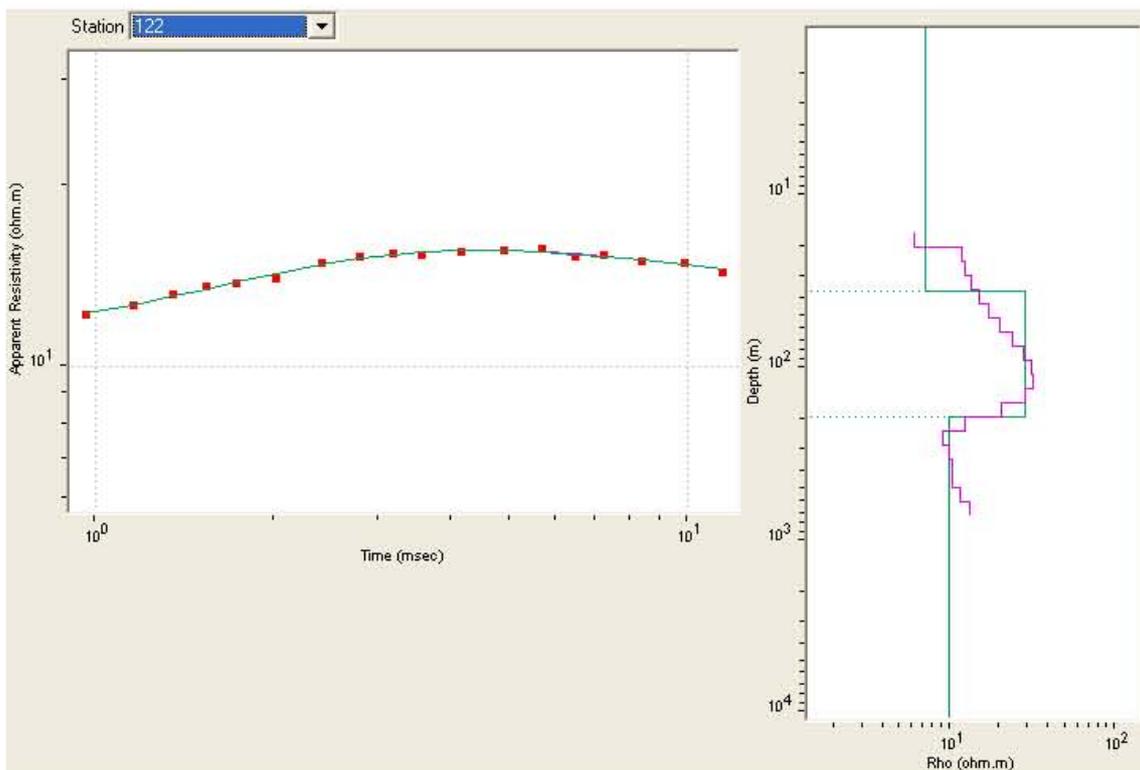
Sitio 121

R. M. S. = 0.051 %



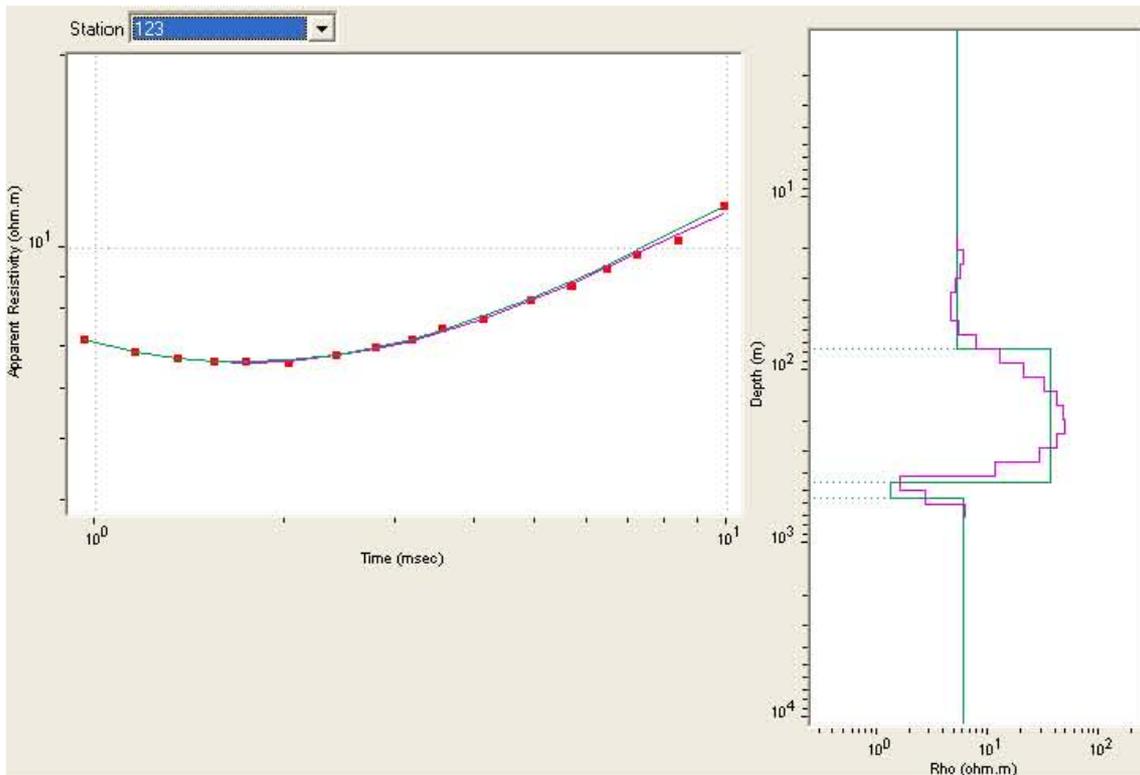
Sitio 122

R. M. S. = 0.057 %



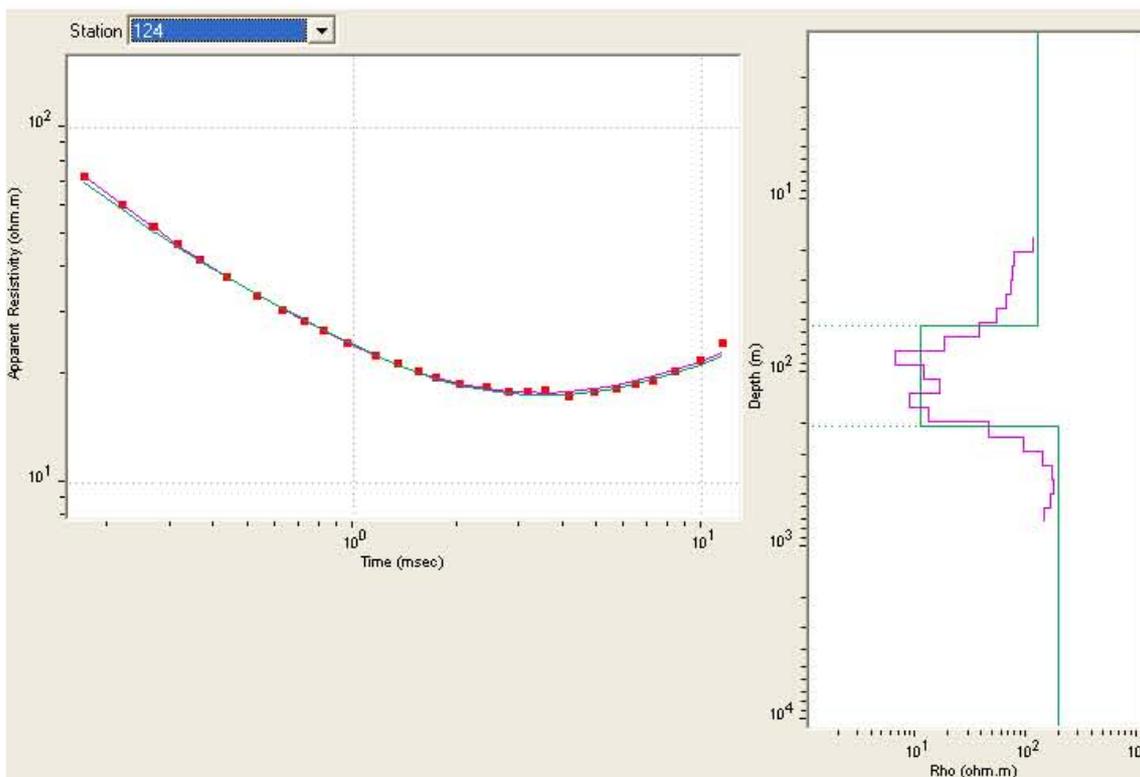
Sitio 123

R. M. S. = 0.064 %



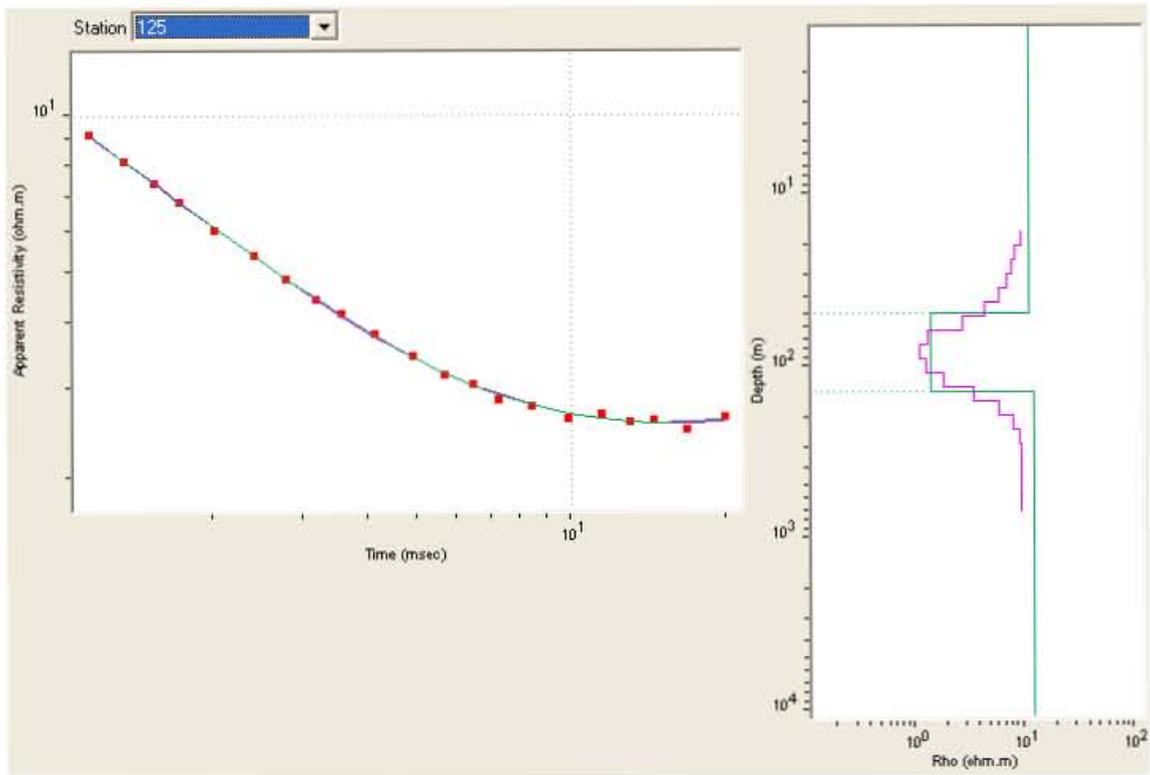
Sitio 124

R. M. S. = 0.179 %



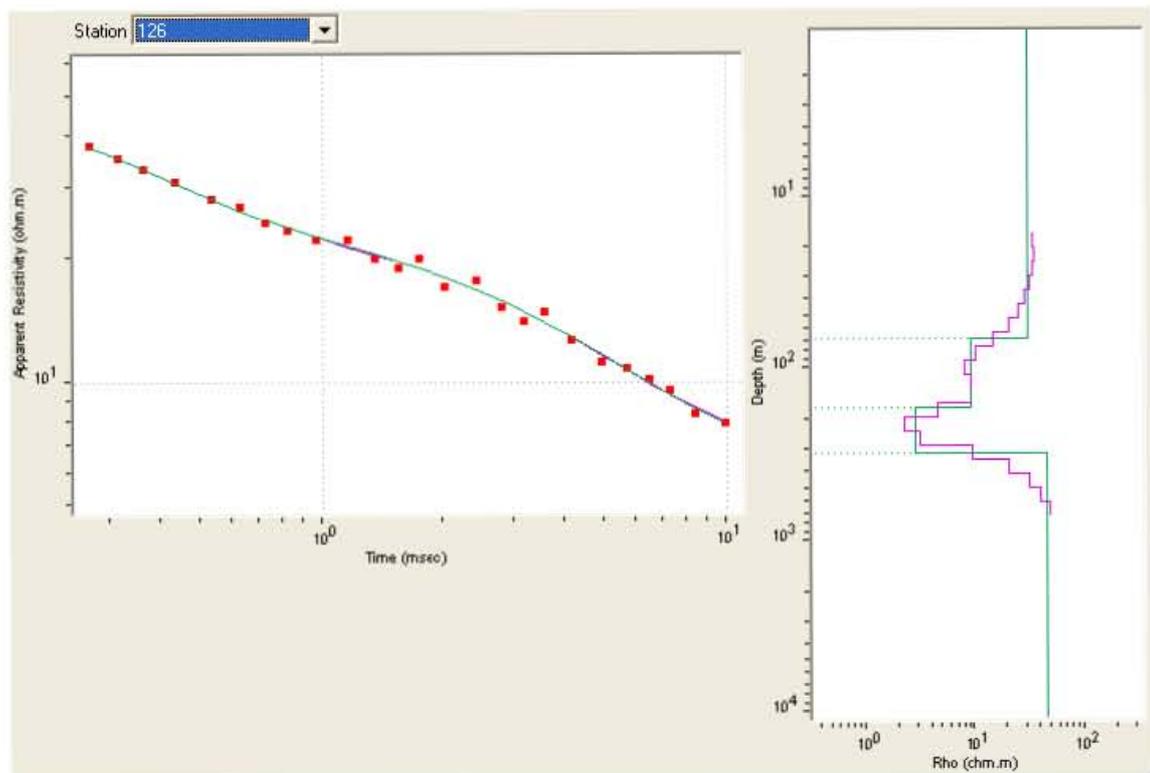
Sitio 125

R. M. S. = 0.087 %



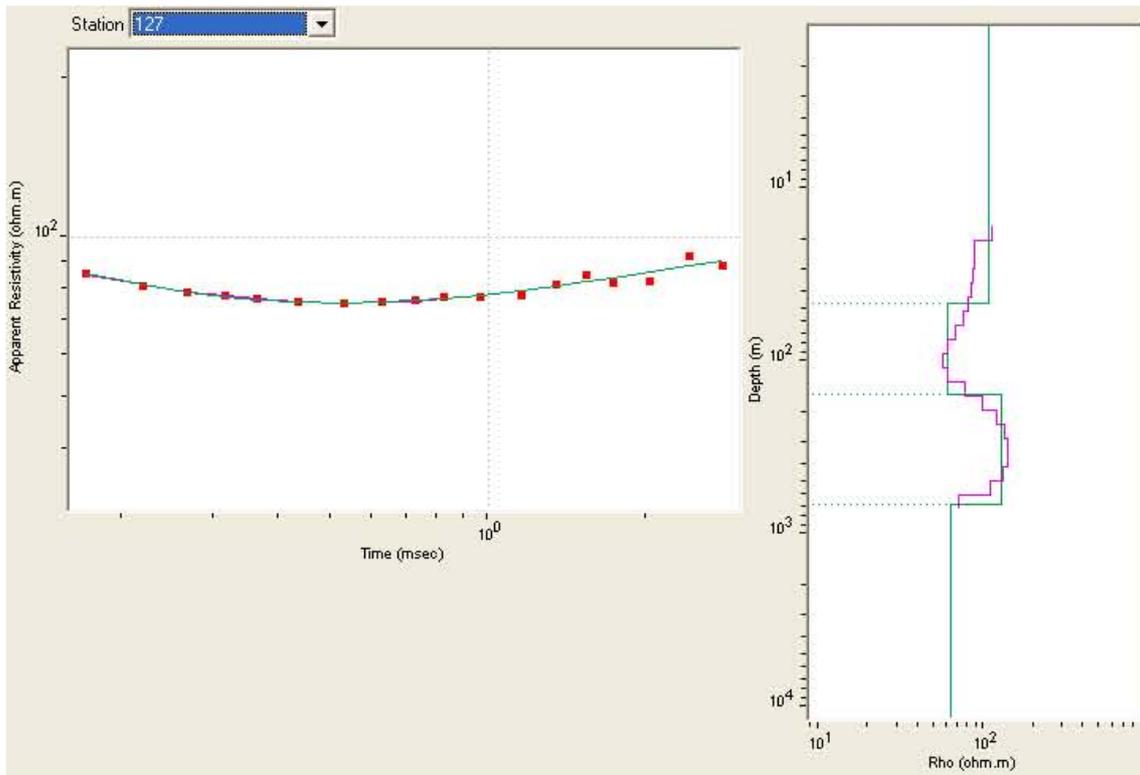
Sitio 126

R. M. S. = 0.241 %



Sitio 127

R. M. S. = 0.115 %



Sitio 128

R. M. S. = 0.158 %

