

RESUMEN

Fueron ejecutados 15 sondeos de Audio y Magnetotelúrica a lo largo de la Provincia de Misiones. Los mismos tienen como objetivo tratar de conocer las condiciones del subsuelo profundo provincial a los efectos de poder determinar ciertas discontinuidades petrográficas de vital importancia, que permitirán, dentro de lo posible, definir la ubicación relativa de los niveles sedimentarios como probables reservorios de agua.

El método consiste en medir los campos naturales eléctricos y magnéticos inducidos en el subsuelo por la actividad de la radiación solar y su interferencia con la ionosfera y también por tormentas eléctricas, en un amplio rango de frecuencias, de acuerdo a la profundidad de investigación a que se quiera llegar.

Los modelos 1D logrados han permitido obtener una interpretación global de cómo varía la profundidad del basamento cristalino, el espesor de los sedimentos infrabasálticos que alojarían al acuífero y el espesor de las coladas basálticas.

Se puede observar de los modelos que en todos los sondeos la secuencia es la misma, una capa superficial de resistividad alrededor de 100 ohm-m, de espesor variable, atribuible a las coladas basálticas. Por debajo una capa conductora de espesor variable de resistividad menor a 10 ohm m. que se ha interpretado como sedimentos infrabasálticos que podrían alojar el Acuífero Guaraní. Por último se destaca una capa más resistiva a diferentes profundidades que se relaciona con el basamento donde se apoyaría la columna sedimentaria.

1.- Introducción

Este informe contempla la descripción de los siguientes ítems del Plan de Tareas:

- 1.- Recopilación de antecedentes
- 2.- Planificación de los 15 lugares a realizar los sondeos de AMT/MT
- 3.- Ejecución de los sondeos
- 4 - Interpretación e informe

La **comisión de campo** estuvo integrada por:

- Dra Cristina Pomposiello
- Dra Alicia Favetto
- Ing Ana Curcio
- Topog Federico Funes
- Ayudante Román Szewczuk
- Ing Ruggiero Curcio

Tratamiento de datos, calculo e interpretación: Dra Cristina Pomposiello - Dra Alicia Favetto

Informe Dra Cristina Pomposiello - Dra Alicia Favetto – Ing Ana Curcio – Ing Ruggiero Curcio

Los 15 sondeos de AMT y MT previstos se ejecutaron durante la segunda mitad de Junio del 2008.

2.- Descripción de los ítems

Item 1:

La información recopilada se relaciona, por un lado, con las características topográficas de la provincia de Misiones, para lo cual se adquirieron planos a escala 1:250.000 con curvas de nivel elaboradas por el SAG que cubren toda la región a investigar, Ellas son:

SAG233_CATARATAS

SAG234_GUARANIACU

SAG249_ELDORADO

SAG250_BERNARDO

SAG264_POSADAS

SAG265_OBERA

SAG266_BERNARDO

SAG280_SANTO_TOME

SAG281_SANTO_ANGELO

También se contó con hojas de rutas y de caminos secundarios e información obtenida de Internet sobre la logística de cada zona donde había que realizar los sondeos magnetoteléuticos.

El otro aspecto a cubrir fue el de la información geológica. En este sentido se tuvo en cuenta el denominado *Estudio relacionado con el Sistema Acuífero Guaraní en la Provincia de Misiones (CFI-2007)* elaborado por el Lic. Longarzo y otros estudios geológicos, que se están llevando a cabo actualmente, en etapa de procesamiento, realizados por el mismo autor.

Item 2:

A los fines de la investigación hidrogeológica nuestra prospección debe tener el sentido de ayudar a dilucidar ciertos interrogantes que presenta la misma, por lo cual se contó con la colaboración del Lic Roberto Longarzo y el Lic Fenelón Avila para ubicar los sondeos en los sitios de mayor interés desde el punto de vista geológico que ayudaran a interpretar las características del subsuelo en particular y también que nuestra adquisición de datos no se viera muy afectada, por fuertes ruidos o perturbaciones a los campos eléctricos y magnéticos, con la finalidad de obtener resultados geofísicos interpretables.

Fueron ejecutados 15 sondeos que cubrieron toda la Provincia de Misiones, como se aprecia en la Figura 1. Los mismos tienen como objetivo conocer las condiciones del subsuelo profundo provincial a los efectos de poder determinar ciertas discontinuidades petrográficas de vital importancia, que permitirán, dentro de lo posible, definir la ubicación relativa de niveles sedimentarios como probables reservorios de agua. Esto además, intenta posibilitar que los futuros emprendimientos en curso en distintos lugares de la provincia tengan acotados los costos esperados.

Para ello se consideró conveniente aplicar dos criterios, diferentes pero complementarios, que permitan utilizar y aprovechar los datos geofísicos en esta primer campaña en toda su dimensión y si resultaran de utilidad prever la posibilidad de ampliar la aplicación del método a zonas donde se requiera mayor detalle complementados con mediciones geoeléctricas (SEV) u otras.

El primero de ellos debe servir para poder asegurar que las sedimentitas aflorantes en la zona sur de la Provincia de Misiones se corresponden geológicamente con la denominada Formación Misiones, reservorio del Sistema Acuífero Guaraní, y no con otros niveles sedimentarios. Además se pretende correlacionarlas a efectos de poder inferir la superficie que abarcan por debajo de las rocas volcánicas básicas para, eventualmente, determinar las zonas de recarga y/o descarga, si las hubiere, lo que significaría que por debajo de la arenisca ya no estarían presentes las coladas de basalto.

Las mediciones MT-1 a MT-6, fueron ubicadas en zonas de coladas volcánicas, con ese criterio.

El segundo criterio pretende inferir el espesor de las mencionadas coladas volcánicas, en los sectores de mayor potencia, como corresponde al centro y norte de la provincia, donde se reconocen profundidades superiores a los 1.000 metros en varios lugares, tal los casos de Oberá y Eldorado.

Las mediciones MT-7 a MT-14, se ubicaron de forma tal que sirvieran para poder esbozar transectas a lo largo y ancho del territorio provincial, teniendo en cuenta que la necesidad de agua en el interior provincial es de enorme importancia, tanto que las autoridades municipales requieren asesoramientos, para la definición de perforaciones profundas con posibilidades razonables, por los altísimos costos de esos proyectos.

Por último, el criterio empleado para la medición MT-15 se basa en la necesidad de conocer a ciencia cierta si las sedimentitas aflorantes en el área Corpus – San Ignacio, pertenecen definitivamente a la Formación Misiones o Botucatú, por lo tanto pertenecientes al Sistema Acuífero Guaraní.



Figura 1

Item 3:

Una vez definidos los lugares para realizar los sondeos audio y magnetoteléuticos (AMT y MT) y con la finalidad de llegar a los mismos se obtuvieron las coordenadas elipsoidicas de las cartas topográficas y se dibujaron esos sitios en una base digital cartográfica que contenía ciudades, rutas y caminos, ver Figura 2. Mediante navegador satelital se aproximó al lugar planificado. En algunos sitios donde había fuentes de ruido para nuestro sistema de medición se buscó otro, lo más próximo posible, a fin de que se atenuaran los mismos.

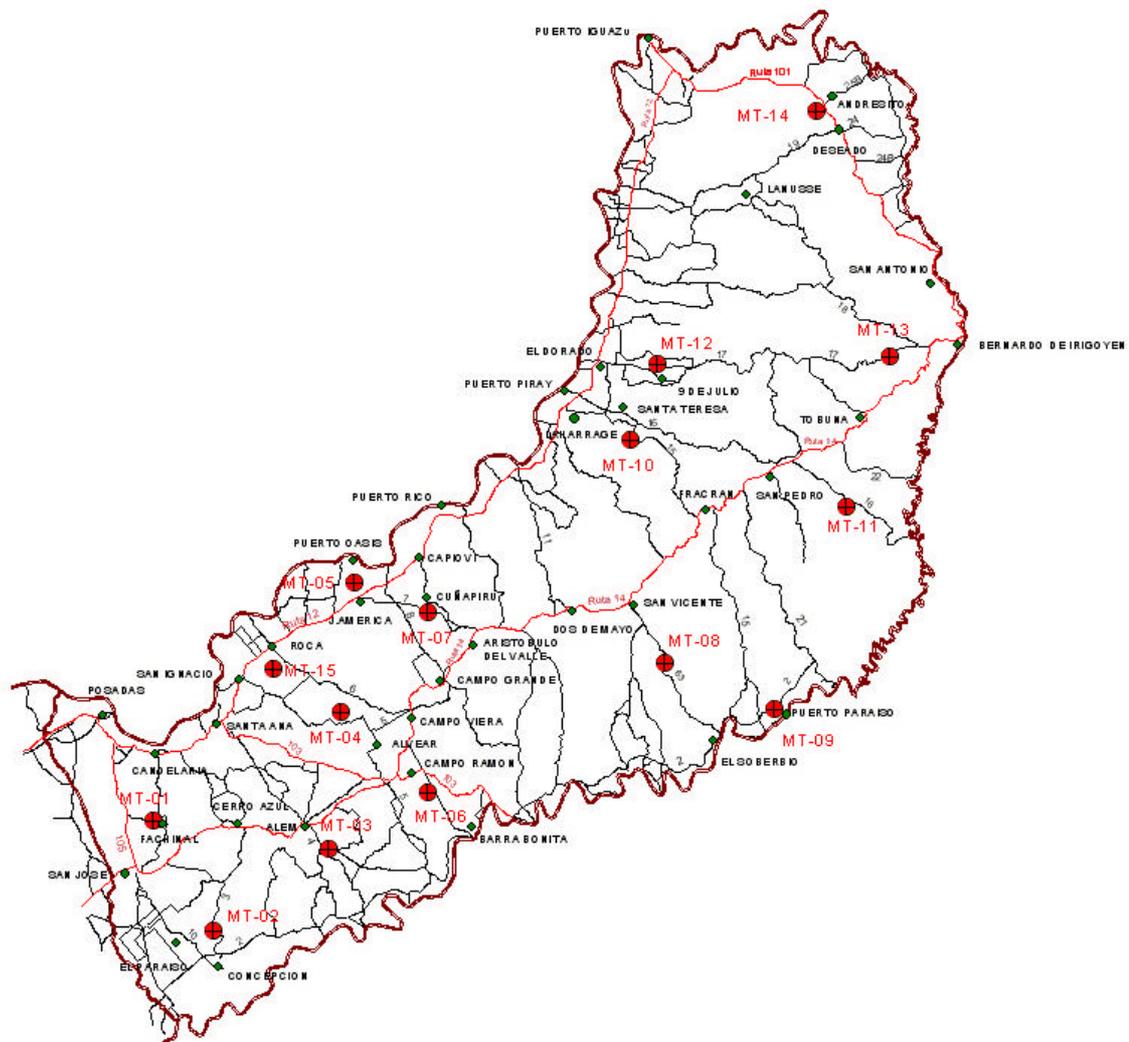
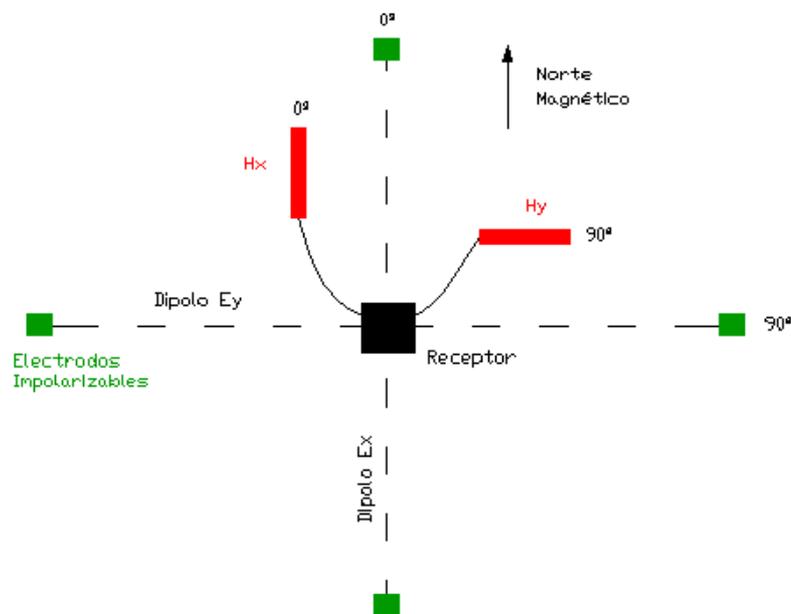


Figura 2

La metodología general del trabajo de campo se puede resumir de la siguiente manera:

- Al llegar a los lugares se eligieron chacras de la zona, con la finalidad de poder dejar en forma segura el equipo midiendo toda la noche, pues es donde se obtienen señales de mayor amplitud, se solicitaba a su propietario o poblador el permiso para la ubicación allí de las estaciones MT.
- Luego de conseguir su autorización se procedía a Instalar las estaciones MT
- La instalación de la estación se realiza según el esquema mostrado en el siguiente croquis, donde Hx y Hy son los sensores magnéticos y Ex e Ey los dipolos para medir el campo eléctrico.



- La longitud de los dipolos entre electrodos impolarizables varió entre 60 m a 100 m, dependiendo esta distancia de las posibilidades del terreno. El norte magnético fue determinado mediante una brújula Wild montada sobre trípode, centrada en el origen del sistema donde se ubica el Receptor marca EMI modelo MT24-LF fabricado por Schlumberger EMI Technology Center. Una vez replanteado el norte magnético se quitaba la brújula del trípode y sin mover el mismo se instalaba una Estación Total Electrónica marca Topcon

- modelo GTS213 con la cual se replanteaban las posiciones de los electrodos impolarizables.
- Se utilizaron dos tipos de magnetómetros para la medición del campo magnético horizontal: para AMT el sensor BF-6 (que registran entre 1 Hz a 100 kHz) y para MT el sensor BF-4 (entre 0.0001 Hz a 1000 Hz), lo que permite realizar una exploración completa a partir de proximidades de la superficie.
- En general se registró alrededor de media hora con los sensores BF-6 y más de 15 horas con las BF-4, salvo en el sondeo MT-12.
- Se controlaron los datos registrados in-situ, para lo cual se copiaban los mismos a una notebook y se realizaba un procesado rápido en el campo para ver su calidad. Un sondeo realizado en proximidades de Leandro N. Alem fue desechado por tener todas las bandas ruidos que impiden realizar una interpretación confiable.



Sensor BF-6



Instalación para medición

Las señales recibidas son amplificadas, filtradas, digitalizadas y guardadas en una tarjeta de memoria del receptor MT24LF. El tiempo en el receptor esta controlado mediante un sistema GPS.

El dispositivo de campo es similar para ambas técnicas (AMT y MT) y solo difiere en el rango de las frecuencias medidas.



Receptor Sistema MT24

Para medir el campo eléctrico, se utilizan 2 líneas cuyos extremos están en contacto con el medio mediante electrodos impolarizables, con solución sobresaturada de cloruro de plomo, enterrados de manera adecuada, formando dos líneas eléctricas ortogonales, una de las cuales se orienta hacia el norte o también haciéndola perpendicular al rumbo predominante de las estructuras principales.

Electrodos impolarizables



Medición del campo eléctrico. Electrodos.

Los sensores van enterrados a fin de evitar perturbaciones debidas a factores climáticos, tal como viento, pues son tan sensibles que cualquier pequeño campo electromagnético generado por el movimiento de las bobinas es medido constituyendo un “ruido, por eso también se deben tomar precauciones para su instalación en lugares alejados del transito vehicular y peatonal y también de Líneas de Alta Tensión y Estaciones Transformadoras.

Se utilizaron los siguientes programas para el trabajo de campo:

- Xacq19 (para programar la adquisición de datos)
- Mmt (para bajar los datos a una notebook)
- Acq24 (procesado de datos)

En el gabinete:

Para el procesamiento de datos se utilizaron los siguientes programas:

- Acq24
- Egbert
- Rhoplus

Para la inversión de datos

- WinGLink
- Occam

Item 4:

4.1- El método Magnetotelúrico (MT)

4.1.1- Consideraciones generales

La exploración geofísica permite determinar la morfología de los acuíferos (profundidades, espesores y resistividad eléctrica de las Formaciones que contienen agua). Existe una gran variedad de métodos para el reconocimiento hidrogeológico del subsuelo teniendo como objetivo determinar contrastes de alguna propiedad física de la tierra que permita inferir su estructura o morfología.

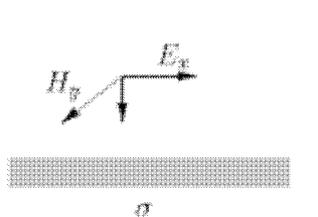
En el caso de los métodos eléctricos o electromagnéticos la propiedad a determinar es la resistividad eléctrica (o su inversa: la conductividad). El conocimiento de la distribución de la resistividad eléctrica de la tierra es el pilar fundamental en la exploración de agua subterránea, dado que tanto el flujo de corriente eléctrica como el del fluido dependen de la conectividad y geometría de los poros en suelos y rocas, estableciéndose la correlación con la presencia de fluidos de distinta conductividad. Estos factores están relacionados al aumento o disminución del valor de la conductividad eléctrica, por ejemplo el aumento de la porosidad, temperatura y contenido de sales o arcilla produce también un incremento en la conductividad eléctrica. El método magnetotelúrico, ha resultado eficiente en la exploración de agua subterránea sobre todo cuando se necesita alcanzar profundidades de varios kilómetros. A continuación se presentará una síntesis de este método utilizado en el presente estudio.

4.1.2- Descripción del método

El método MT emplea la difusión en el interior de la tierra de las ondas electromagnéticas naturales de baja frecuencia para encontrar un modelo de la resistividad eléctrica del suelo en profundidad. Las fuentes naturales de los campos electromagnéticos son esencialmente originadas en la ionósfera y magnetósfera, y solamente para las frecuencias más altas hay un efecto atmosférico relacionado con las tormentas eléctricas. Los mismos pueden ser considerados en superficie como

ondas planas. La mayor parte de la energía es reflejada y una pequeña porción se propaga en el interior de la Tierra. Los campos EM que se generan en respuesta a las ondas primarias incidentes proveen información indirecta de las propiedades eléctricas de la Tierra a profundidades desde decenas de metros hasta cientos de kilómetros, dependiendo de la conductividad del suelo y del rango de frecuencias en el que se registra la señal.

Distintas consideraciones pueden ser asumidas para evaluar la respuesta del subsuelo, la aproximación más simple que podemos analizar es la interacción de estos campos naturales con una Tierra perfectamente homogénea. La base de este método es esencialmente la observación de cómo se propaga una onda plana en un medio de conductividad (σ) uniforme. Para este caso la ecuación de propagación es obtenida de las ecuaciones de Maxwell:



$$\nabla_x \bar{E} = i\omega \mu_0 \bar{H} \quad y$$

$$\nabla^2 \bar{E} + i\omega \mu_0 \bar{E} = 0 \quad \text{donde no aparece el término de la corriente de desplazamiento}$$

porque se desprecia debido a que se satisface que $\epsilon \omega^2 \ll \omega \sigma$

Y la solución para este caso es

$$E_x = A e^{-ikz}$$

E_x : es la componente del campo eléctrico en la dirección x

$$H_y = A \frac{k}{\omega \mu} e^{-ikz}$$

H_y : es la componente del campo magnético en la dirección y

siendo x e y direcciones horizontales perpendiculares entre sí (indistinguibles para este caso) y

$$k = (-i\omega \mu \sigma)^{\frac{1}{2}} = \frac{1-i}{d}$$

La velocidad de fase está dada por:

$$V = \omega d \quad \text{con} \quad d = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

Donde ω es la frecuencia en hertz, ϵ es la constante dieléctrica en F/m, σ es la conductividad en S/m, μ es la permeabilidad magnética en H/m y d es la longitud de penetración de la onda en metros que disminuye al aumentar la conductividad del medio y la frecuencia de la onda incidente, esta profundidad de penetración (“*skin depth*”) es la que se utiliza para estimar una penetración promedio de la señal, de tal manera que para obtener información más profunda se necesita procesar periodos más largos y mayor tiempo de medición por sitio.

Dado que los campos medidos en superficie contienen la contribución del campo incidente y aprovechando la simplificación que brinda la hipótesis de onda plana, se define la impedancia Z (o tensor de impedancia magnetotelúrico), que depende de las características del subsuelo.

Para evitar la dependencia con la amplitud del campo incidente se define la impedancia como el tensor que resulta del cociente entre los campos eléctrico y magnético de forma tal que

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = (1-i)\sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \quad \text{y} \quad Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} = (1-i)\sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \quad (1)$$

Siendo $Z_{xy} = Z_{yx}$ para el caso homogéneo. O equivalentemente definimos la resistividad aparente como

$$\mathbf{r}_{XY} = \frac{Z_{xy} Z_{xy}^*}{\omega \mu} \quad \text{y} \quad \mathbf{r}_{YX} = \frac{Z_{yx} Z_{yx}^*}{\omega \mu} \quad (2)$$

Donde el * indica que se ha tomado el complejo conjugado y en el caso homogéneo es simplemente $\mathbf{r} = 1/\sigma$

Es una práctica usual referirse a resistividad aparente (ρ) y fase (ϕ) en lugar de la impedancia. La fase de la impedancia es la diferencia de fase entre E y H. Se utilizan ρ_{xy} y ρ_{yx} , para dos ejes horizontales perpendiculares (x,y) orientando los

sensores de E y H en lo posible en las direcciones geomagnéticas NS y EO. En el caso que el subsuelo puede ser considerado como homogéneo f será igual a $\rho/4$ y los valores de ρ_{xy} y ρ_{yx} serán coincidentes y las respectivas fases tendrán una diferencia de ρ .

Si el subsuelo se interpreta como un conjunto de capas horizontales de diferente conductividad y espesor se tendrá una interpretación 1D de tal manera que la resistividad aparente y fase variarán con la frecuencia de acuerdo a los valores de resistividad y espesor de las sucesivas capas. La componente vertical del campo magnético es cero y la capacidad de inferir las propiedades de cada capa, más allá de la no unicidad de los modelos, es muy dependiente de los contrastes de conductividad y del espesor de las mismas.

Cuando existe variación lateral de la resistividad y una dirección de simetría de la estructura, el subsuelo se considerará 2D y el tensor de impedancia se rota de manera tal que una componente del campo E sea paralela a esta dirección y otra perpendicular. En el caso 2D, también se mide otra función transferencia, entre las componentes vertical y horizontal de H, a la que usualmente se refiere como vector de inducción.

La onda incidente en la superficie de la Tierra lo hace con un ángulo de 90° (incidencia normal), a partir de un cálculo simple utilizando la ley de Snell se puede inferir que la onda transmitida será también aproximadamente normal a la superficie.

Resumiendo, el método consiste en medir los campos naturales eléctricos y magnéticos inducidos en el subsuelo por la actividad de la radiación solar y su interferencia con la ionosfera y también por tormentas eléctricas, en un amplio rango de frecuencias, de acuerdo a la profundidad de investigación que se quiera lograr. Esta profundidad está relacionada con las frecuencias más bajas a detectar y por ende el tiempo de observación será mayor cuanto menor sea la frecuencia a medir.

4.1.3.- Procesamiento

4.1.3.1.- Análisis de las Series Temporales de los campos E y H y determinación del tensor de impedancia

Hay un gran número de técnicas para el procesamiento de los datos de MT, donde se pretende transformar las series temporales en información espectral en el dominio de la frecuencia. Si bien el resultado de todos los métodos converge en dar las componentes de Fourier del registro, en la práctica hay diferencias importantes que se deben considerar debido a la característica de la de la señal y la naturaleza de los datos.

Los campos eléctricos y magnéticos naturales entre 10^{-4} y 10^3 Hz son procesos estocásticos. Los registros son series temporales de los cuales se toman muestras (segmentos de la serie). En general, para representar el registro temporal en el dominio de la frecuencia se utiliza el análisis armónico de Fourier. La hipótesis fundamental es que para una serie de longitud T_0 se supone que la señal es periódica de periodo fundamental T_0 lo cual impone una restricción sobre el espaciamiento entre armónicos y presupone una buena representación utilizando un número finito de los mismos.

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} X_k e^{-ikw_0 t} \quad \text{con} \quad w_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

Donde X_k está dado por:

$$X_k = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) e^{-ikw_0 t} dt$$

Donde se obtiene la amplitud de las distintas frecuencias a través de los coeficientes X_k , dado que el rango de frecuencias estará determinado por el largo de la serie N y el intervalo de muestreo Δt , de tal forma que el intervalo de frecuencias estará comprendido en $\left[\frac{1}{N\Delta t}, \frac{1}{2\Delta t} \right]$ y el máximo armónico será $k_{MAX} = (N-1)/2$

Dado que en los registros hay ruido con la señal lo que debemos hacer es tomar muchos segmentos para establecer un comportamiento promedio que reduzca el

efecto del mismo. Las series tienen un comportamiento estocástico y por lo tanto su promedio irá hacia cero, por lo tanto se prefiere el uso del espectro de potencia

donde los coeficientes se multiplican por el conjugado $\overline{X_{ij} X_{ij}^*} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M X_{ij} X_{ij}^*$

En la Figura 1 se presentan las 4 series temporales de 512 datos (Hx, Ex, Hy y Ey) correspondientes a la estación MT9.

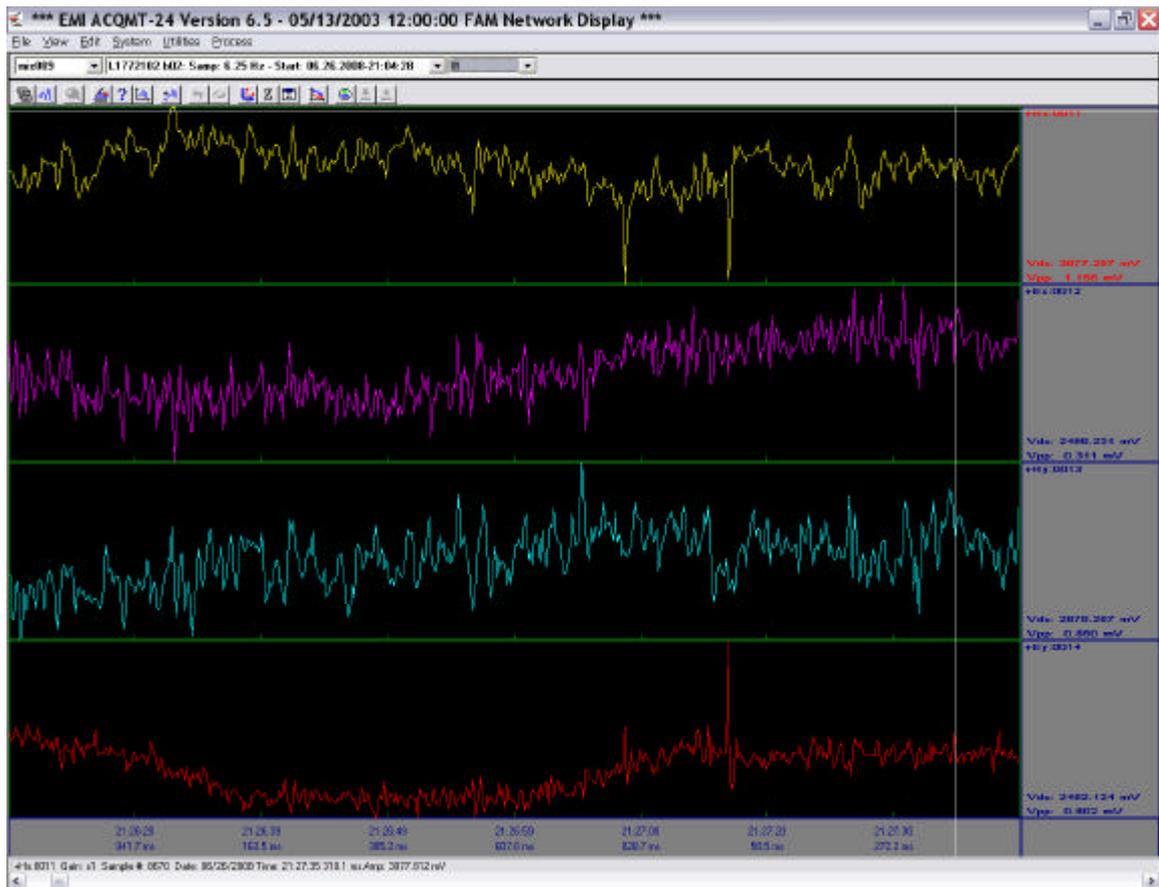


Figura 1 Series temporales de 512 datos de los campos: Hx, Ex, Hy y Ey de la estación MT9.

4.1.3.2.- Dinámica del procesado:

Como primer paso, es muy importante el preparado de las series, cada segmento deberá ser observado y su longitud determinada dependiendo de la banda.

Cada segmento de los campos eléctrico y magnético es convertidos al dominio de la frecuencia utilizando algún método que utiliza FFT (Transformada de Fourier, en general decimación en cascada, es la técnica más usada) y se obtienen preferentemente unos 6-10 periodos por década en intervalos equiespaciados en escala logarítmica y (N-1)/2 frecuencias como máximo, la frecuencia mínima depende de la longitud de la serie elegida y la frecuencia máxima depende del intervalo de muestreo. El espectro final es esencialmente suavizado promediando con los vecinos con la función de Parzen, los espectros de potencia de cada segmento se almacenan. El espectro de potencia no da información de la fase pero si podemos hallar la expresión del modulo de Z y la resistividad aparente

$$|Z|^2 = \frac{EE^*}{HH^*} \quad \text{y} \quad r_a = \frac{1}{\omega m} \left| \frac{E}{H} \right|^2$$

También debemos recordar que cada serie tiene ruido de tal forma que

$$Et = E + he \quad \text{y} \quad Ht = H + hh \quad , \text{ donde los errores son independientes entre si.}$$

Donde Et y Ht son los campos medidos, E y H los campos reales; e y h ruidos asociados respectivamente. El espectro de potencia cruzado será entonces:

$$\overline{EtH^*t} = \overline{(E + he)(H + hh)^*} = \overline{EH^*} + \overline{Ehh^*} + \overline{heH^*} + \overline{hehh^*} \quad \text{por lo tanto}$$

$\overline{EtH^*t} = \overline{EH^*}$, donde la barra significa promedio. Dado que casi siempre se satisface que los ruidos no son correlacionados entre si, pero la potencia cruzada tiene una diferencia de fase.

La normalización de esta cantidad lleva a la definición de coherencia

$$COH(E, H) = \frac{\overline{EH^*}}{\sqrt{\overline{EE^*} \overline{HH^*}}} \quad (3)$$

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de la estación MT9 de la coherencia entre E_x y H_y y en la Figura 3 la coherencia entre E_y y H_x (ambas en función del período).

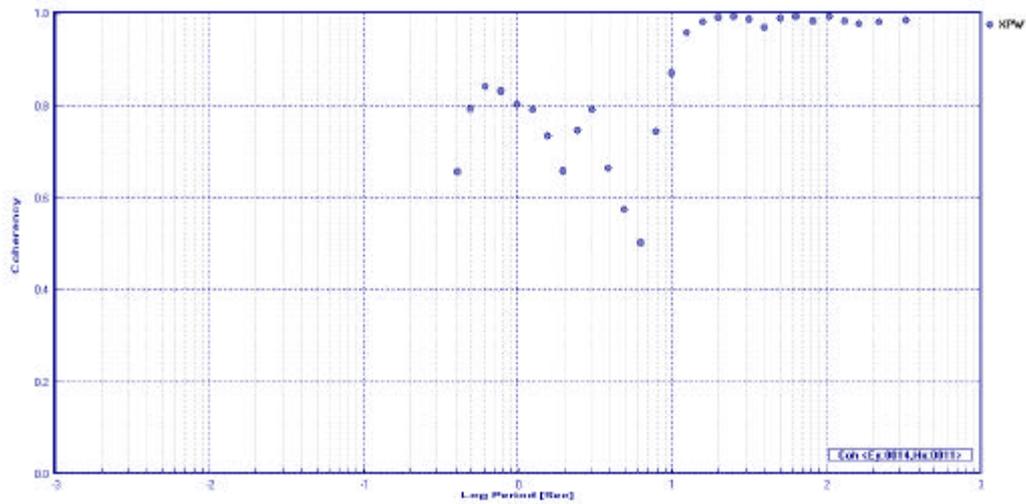


Figura 2 Coherencia entre Ex y Hy para la estación MT9.

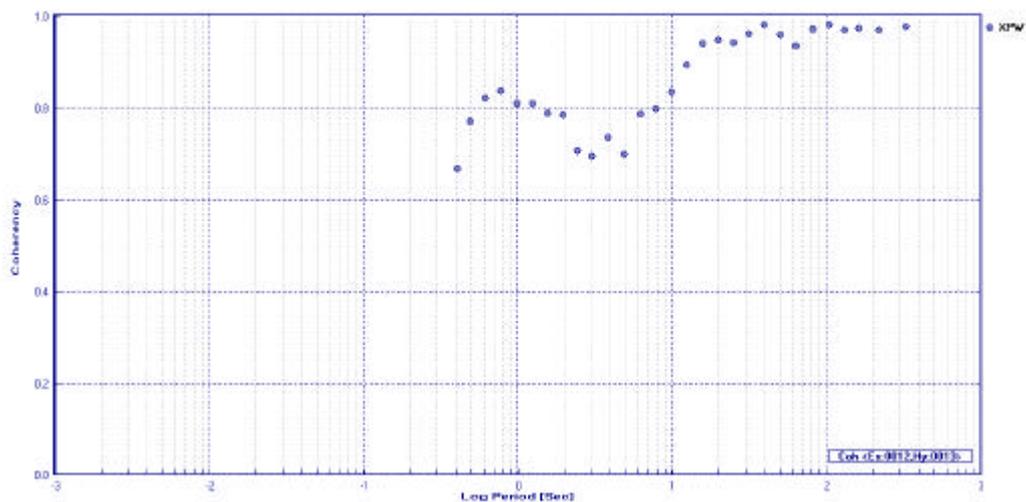


Figura 3 Coherencia entre Ey y Hx para la estación MT9.

La coherencia si no hay ruido es estrictamente 1. En la estación MT 9 (Figuras 2 y 3) se observa coherencia cercana a 1 para períodos mayores a 10 segundos.

Entonces recalculamos el valor de Z de tal manera que

$$Z = \frac{\overline{EH^*}}{\overline{HH^*}}$$

El sistema de ecuaciones a resolver resulta ser:

$$E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y \quad (4)$$

$$E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y$$

La solución de este sistema requiere al menos 2 segmentos independientes de observaciones para determinar las componentes de las funciones MT. Sin embargo para mejorar la relación señal ruido es necesario tener más segmentos. Después de multiplicar las ecuaciones (4) por los conjugados de los campos magnéticos horizontales se obtienen 6 ecuaciones.

Una manera elegante de escribir las componentes del tensor es en función de las coherencias (Swift, 1967)

$$\begin{aligned} Z_{xx} &= \frac{|E_x|}{|H_x|} \left[\frac{\text{coh}E_x H_x - \text{coh}E_x H_y \text{coh}H_y H_x}{1 - |\text{coh}H_x H_y|^2} \right] \\ Z_{xy} &= \frac{|E_x|}{|H_y|} \left[\frac{\text{coh}E_x H_y - \text{coh}E_x H_x \text{coh}H_x H_y}{1 - |\text{coh}H_x H_y|^2} \right] \\ Z_{yx} &= \frac{|E_y|}{|H_x|} \left[\frac{\text{coh}E_y H_x - \text{coh}E_y H_y \text{coh}H_y H_x}{1 - |\text{coh}H_x H_y|^2} \right] \\ Z_{yy} &= \frac{|E_y|}{|H_y|} \left[\frac{\text{coh}E_y H_y - \text{coh}E_y H_x \text{coh}H_x H_y}{1 - |\text{coh}H_x H_y|^2} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

La coherencia entre H_x y H_y debe ser baja para lograr una buena estimación.

La resolución de este sistema nos permite obtener la parte real e imaginaria de las cuatro componentes del tensor impedancia. Este sistema, que está sobreestimado, ya que para cada segmento se satisfacen estas ecuaciones, se puede resolver por mínimos cuadrados. En este caso, la influencia de los errores se hace más notable cuando la estadística es menor.

Se debe incluir un análisis robusto con peso basado en los errores, y la introducción de una “función de pérdida” la cual reduce el efecto de “outliers” (puntos ajenos al problema de estudio) (Egbert & Booker,1986). El análisis robusto mejora significativamente la determinación del tensor de impedancia en casi todos los casos.

Una de las cosas fundamentales para un buen resultado en el procesamiento tiene que ver con la presencia de ruido de diferente origen, para lo cual se deben tener en cuenta los siguientes pasos:

- Primeramente el editado de la serie temporal, remover los segmentos contaminados por el ruido. Muchos problemas son ocasionados por determinado tipo de ruido que es fácil de detectar a simple vista. Por lo tanto se puede limpiar la serie de estas zonas donde se sospecha contaminación.
- En segundo lugar el “stacking”, donde el espectro de potencia para segmentos de datos independientes son en general obtenidos con FFT (Algoritmo de Transformadas de Fourier rápida) generalmente de 512-4096 puntos por muestra son sumados o “stacked” para mejorar la relación señal-ruido. Un procedimiento común es adicionar varios cientos de segmentos para altas frecuencias.
- Por último, si hay una referencia remota, que utiliza datos adquiridos de manera simultánea en dos sitios que pueden estar separados varios kilómetros. Los campos de un sitio se procesan utilizando el campo magnético del otro sitio como referencia remota. Evita el “bias” debido al ruido.

4.1.3.3.- Calculo de la resistividad aparente y fase

Una vez procesadas las series temporales se determina el tensor de impedancia. A partir de este último se calculan las resistividades aparentes (ρ_{xy} y ρ_{yx}) y las fases (f_{xy} y f_{yx}), para dos ejes horizontales perpendiculares (x,y) orientando los sensores de E y H en lo posible en las direcciones geomagnéticas NS y EO. En la Figuras 4 y 5 se presentan la resistividad aparente y fase para la estación MT9.

Se prueba la compatibilidad entre ellas (resistividad aparente y fase) lo cual permite corregir problemas derivados de la calibración de los instrumentos. El equipo de trabajo ha aplicado este método para resolver los resultados sesgados (bias) en los datos MT cuando no se dispone de la posibilidad de contar con dos estaciones para registrar simultáneamente (referencia remota) (Pomposiello *et al.*, 2008).

En la Figura 6 se presenta un ejemplo de la aplicación del algoritmo “rhoplus” de Parker y Broker (1996).

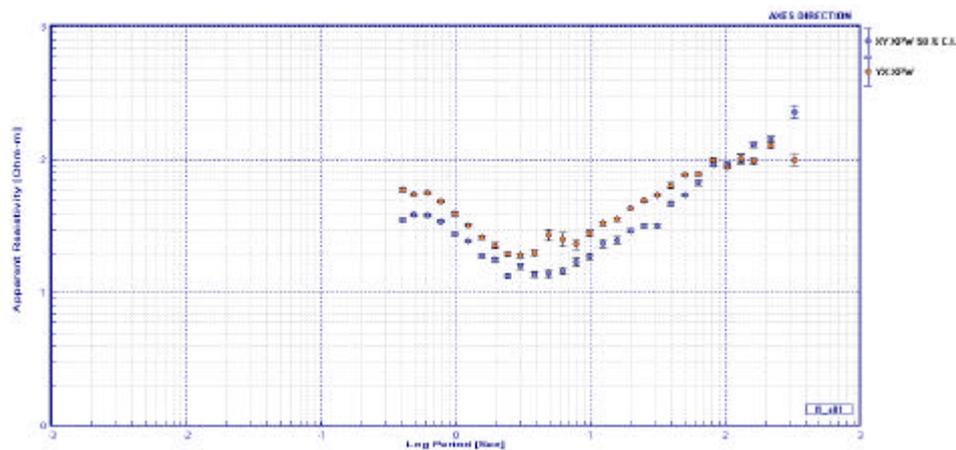


Figura 4 Resistividad aparente en función del período para la estación MT9.

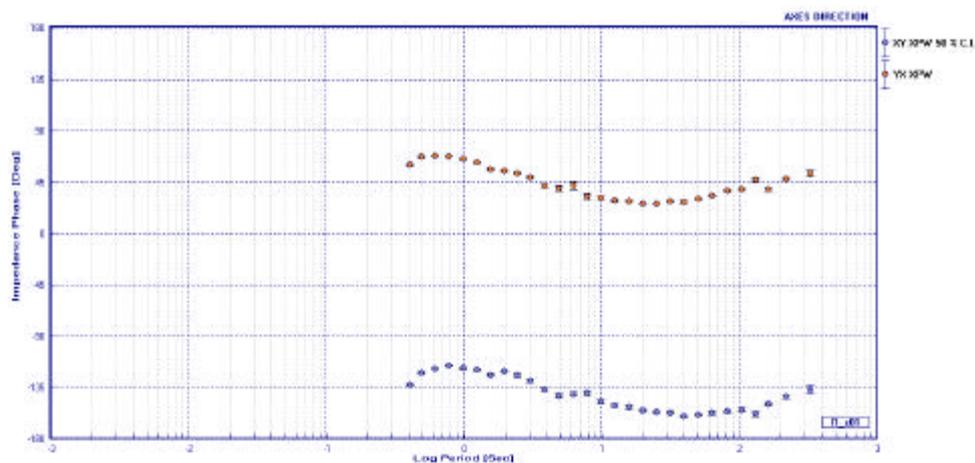


Figura 5 Fase en función del período para la estación MT9

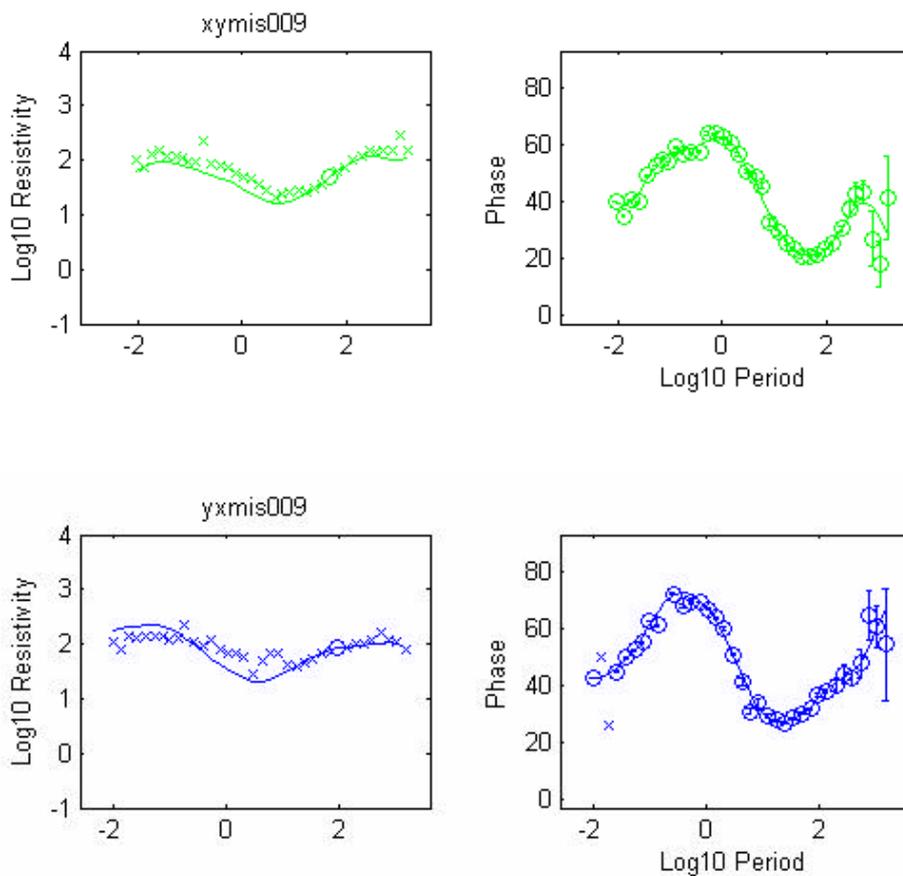


Figura 6 Ajustes de “Rhoplus” para la resistividad aparente y fase en la dirección NS (verde) y para EO (azul). Se tomo un solo valor de resistividad (circulo) y la mayoría de valores de fase. Las cruces son valores no considerados en el ajuste.

4.1.3.4.- Detección de estructuras de diferente conductividad eléctrica

El método MT permite hallar modelos donde la conductividad del suelo presenta contrastes. Es más sensible a la detección de conductores que aislantes y la resolución dependerá de la resistividad eléctrica y la profundidad de investigación.

En general se puede probar en el laboratorio que hay un rango de resistividades asociado a cada tipo de rocas pero en la realidad el sistema es mucho más complejo y estas resistividades pueden ser incrementadas por el contenido de agua con contenido de sales. Un ejemplo de la variación de las resistividades se observa a continuación en la Figura. 7.

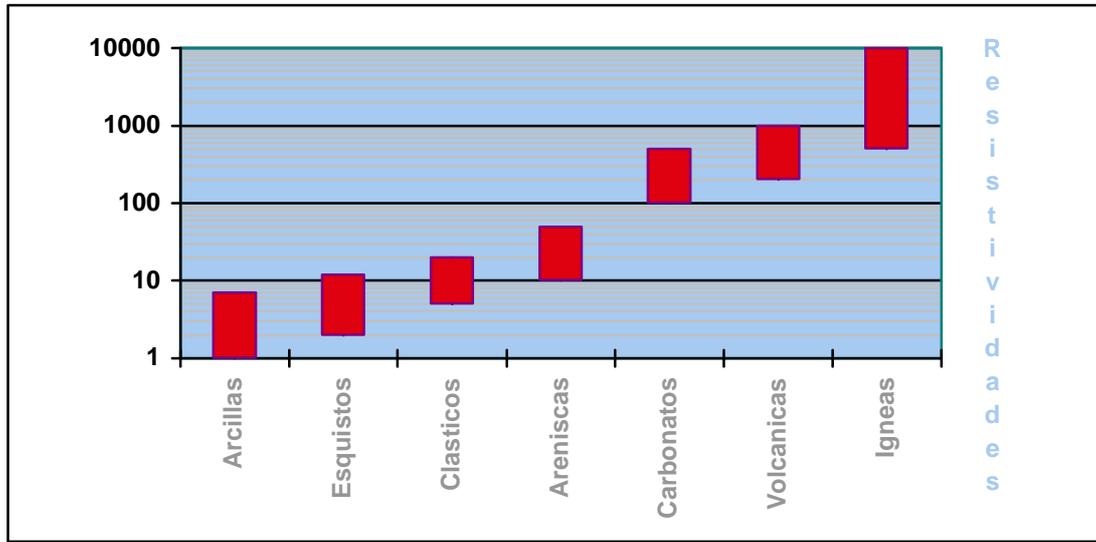


Figura 7. Ejemplo de resistividades asociadas a los tipos de roca.

4.1.3.5. Profundidad de Investigación

- La profundidad de investigación alcanzada depende de la resistividad eléctrica y período de la onda.
- Se observa que a mayor período se alcanza mayor profundidad
- También cuando la resistividad es mayor la penetración de la señal también es mayor.
- “Skin depth” (de las ondas en un medio homogéneo) da una estimación aproximada de la profundidad alcanzable promedio. El cual se expresa en función de la resistividad (?) y el periodo(?) a través de la relación:

$$d = 500\sqrt{r.T}$$

Significa que los tiempos de registro deben ser adecuados para que la estadística sea razonable en función al error de los mismos. Además si se necesita investigar a profundidades grandes deberá contemplarse la resistividad característica de la zona.

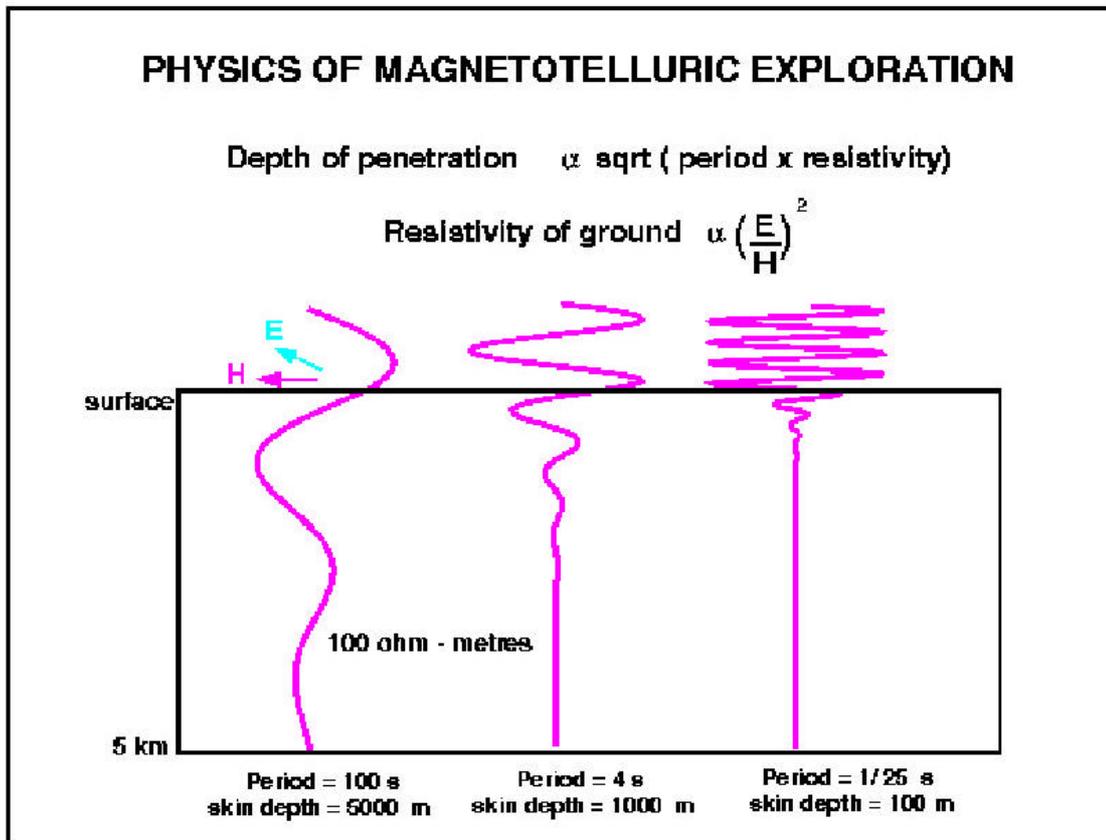


Figura 8 Profundidad de penetración para un medio de 100 ohm m para los períodos de 100, 4 y 1/25 segundos.

4.1.3.6.-Inversión de datos MT

Debido que la energía electromagnética se propaga difusivamente los sondeos MT resuelven gradientes de conductividad más que bordes afilados o finas capas. En este trabajo se ha utilizado un programa WinGLink que permite obtener modelos 1D para cada estación.

4.1.3.6.1.-Inversión 1D

Se interpreta la distribución de resistividades del suelo como capas de distinta resistividad o sea la resistividad depende de la profundidad z , $r(z)$. En este caso,

los elementos diagonales del tensor de impedancia son cero y los no diagonales son iguales y de signo opuesto. Por lo tanto,

$$\mathbf{r}_{XY}(z, \mathbf{w}) = \mathbf{r}_{YX}(z, \mathbf{w}), \mathbf{j}_{XY}(\mathbf{w}) = \mathbf{j}_{YX}(\mathbf{w}) - \mathbf{p}.$$

Si bien los modelos no son únicos en ningún caso, en el caso 1D tiene mayores inconvenientes, ya que si se encuentra una capa de resistividad eléctrica mucho menor esta apantalla la estructura que está por debajo. En tal caso, si bien la estructura por debajo contribuye a la respuesta, la sensibilidad a ella es muy baja e imposible la descripción de la estructura de profundidades mayores (Parker, 1983).

Cuando se invierte con un modelo de capas horizontales es recomendable que el modelo sea lo más simple y suave como sea posible para reproducir los datos medidos sin interpretarlos más allá de un nivel confiable. Se utilizó el algoritmo OCCAM (Constable et al., 1987, Geophysics 52,3,289) que es muy útil para describir modelos suaves. Este método es el mejor en el sentido que previene la aparición de capas con resistividades eléctricas extremas que pueden no ser verdaderas y superan las limitaciones del método experimental. La estrategia donde se consigue la suavidad al aumentar el número de capas, conduce a este tipo de inversión que es esencialmente estable y rápida y permite definir las capas principales correspondientes a un conjunto de datos.

4.1.3.6.2.- Inversión 2D – No se realiza en este estudio debido a la gran separación entre sondeos. Lo aconsejable es que, en general, no se superen los 2 km, dependiendo esto de la geología del área.

La interpretación 2D corresponde a un modelo de tierra donde la resistividad es constante en una dirección horizontal mientras varía en la otra y verticalmente. La dirección a lo largo de la cual la resistividad es constante se llama *strike*. Si la dirección del strike (rumbo principal de las estructuras predominantes) es por ejemplo, paralela al eje x, de manera que las variaciones en la resistividad serán a lo largo de z e y entonces se tiene $\mathbf{r}(y, z)$. En estos casos hay un campo vertical

inducido y las ecuaciones de Maxwell pueden ser desacopladas en 2 modos, cada uno relacionando tres componentes de los campos.

4.2.- Resultados e Interpretación

Se midió en 15 estaciones en todo el territorio de la Provincia de Misiones. Se utilizaron dos tipos de sensores magnéticos BF-6 y BF-4. Para los sensores BF-6 se utilizó la frecuencia de muestreo de 500 Hz y se registró alrededor de 20 minutos. Cuando se utilizó a los sensores BF-4 se registró a 500, 50 y 6,25 Hz. Para 500 Hz se midió alrededor de 20 minutos y para 50 y 6,25 más de 15 horas. De esta manera se obtuvo información entre 0,001 a 1000 segundos.

A continuación se detallan las estaciones.

MT1: Ubicado en la latitud $27^{\circ} 38' 05''$ Sur y longitud $55^{\circ} 44' 11''$ Oeste. En esta estación se midió más de 20 horas. Se observó, del total de bandas medidas, que para una de ellas entre los periodos de 1 a 10 segundos se presentan resultados con ruidos.

MT2: Ubicado en la latitud $27^{\circ} 53' 40''$ Sur y longitud $55^{\circ} 32' 44''$ Oeste. En esta estación se midió durante más de 15 horas. Nuevamente se encuentra una banda entre 1 a 10 segundos con ruidos.

MT3: Ubicado en la latitud $27^{\circ} 39' 58''$ Sur y longitud $55^{\circ} 14' 37''$ Oeste. Se midió durante mas de 15 horas. Se observa alrededor del periodo de 1 segundo una banda de datos ruidosos.

MT4: Ubicado en la latitud $27^{\circ} 19' 36''$ Sur y longitud $55^{\circ} 14' 38''$ Oeste. Se midió durante mas de 20 horas. Se observa alrededor del periodo de 1 segundo una banda con datos ruidosos.

MT5: Ubicado en la latitud $27^{\circ} 00' 06''$ Sur y longitud $55^{\circ} 14' 18''$ Oeste. Se midió durante más de 16 horas, hay señales ruidosas, especialmente en las componentes del campo eléctrico.

MT6: Ubicado en la latitud $27^{\circ} 30' 18''$ Sur y longitud $54^{\circ} 59' 13''$ Oeste. Se midió durante más de 16 horas. Una de las componentes es muy ruidosa a partir de 1 segundo. La otra sin ruidos tiene buena coherencia en todo el rango de períodos.

MT7: Ubicado en la latitud $27^{\circ} 03' 41''$ Sur y longitud $55^{\circ} 01' 57''$ Oeste. Se midió durante mas de 15 horas. Los datos no presentan ninguna zona ruidosa.

MT8: Ubicado en la latitud $27^{\circ} 07' 57''$ Sur y longitud $54^{\circ} 22' 16''$ Oeste. Se midió durante mas de 22 horas. Hay datos ruidosos, aunque se observa una zona de buena coherencia para períodos mayores a 10 segundos que se corresponden con las mayores profundidades.

MT9: Ubicado en la latitud $27^{\circ} 13' 22''$ Sur y longitud $54^{\circ} 03' 22''$ Oeste. Se midió durante mas de 16 horas. Muy buenos datos en todo el rango de frecuencias.

MT10: Ubicado en la latitud $26^{\circ} 35' 23''$ Sur y longitud $54^{\circ} 31' 08''$ Oeste. Se midió durante mas de 18 horas. Muy buenos datos en todo el rango de frecuencias.

MT11: Ubicado en la latitud $26^{\circ} 42' 26''$ Sur y longitud $53^{\circ} 54' 55''$ Oeste. Se midió durante más de 18 horas. Se observó que una de las componentes es ruidosa. La otra presenta muy buenos datos.

MT12: Ubicado en la latitud $26^{\circ} 23' 51''$ Sur y longitud $54^{\circ} 27' 59''$ Oeste. Se midió durante mas de 8 horas. Se observa que por debajo del periodo de 1 segundo los datos son muy buenos, pero a partir de ese valor hay datos ruidosos.

MT13: Ubicado en la latitud $26^{\circ} 19' 30''$ Sur y longitud $53^{\circ} 50' 15''$ Oeste. Se midió durante más de 16 horas. Una de las componentes a partir de los 10 segundos es un poco ruidosa.

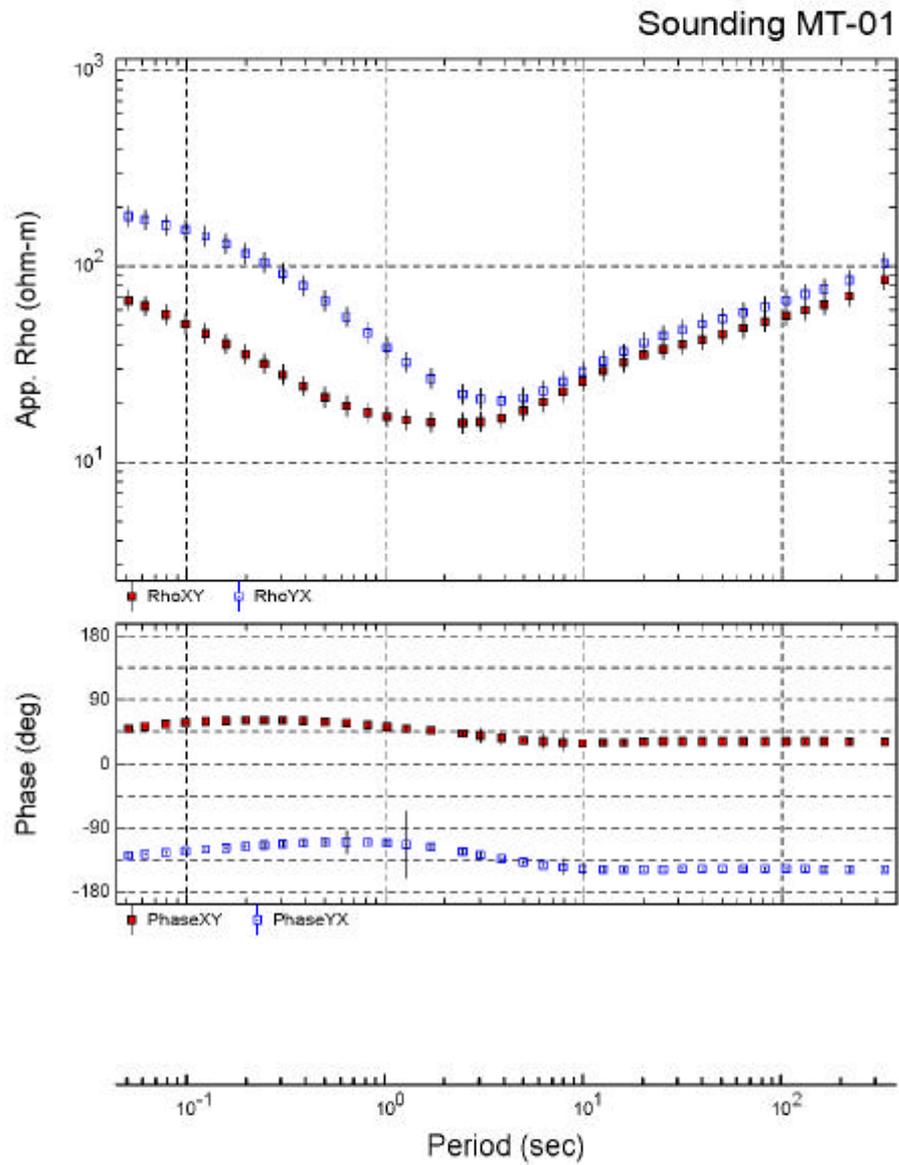
MT14: Ubicado en la latitud $25^{\circ} 44' 19''$ Sur y longitud $54^{\circ} 05' 48''$ Oeste. Se midió durante más de 16 horas. Se observa una zona entre 1 a 10 segundos ruidosa. Para períodos grandes mayores a 10 segundos, datos profundos, son muy buenos.

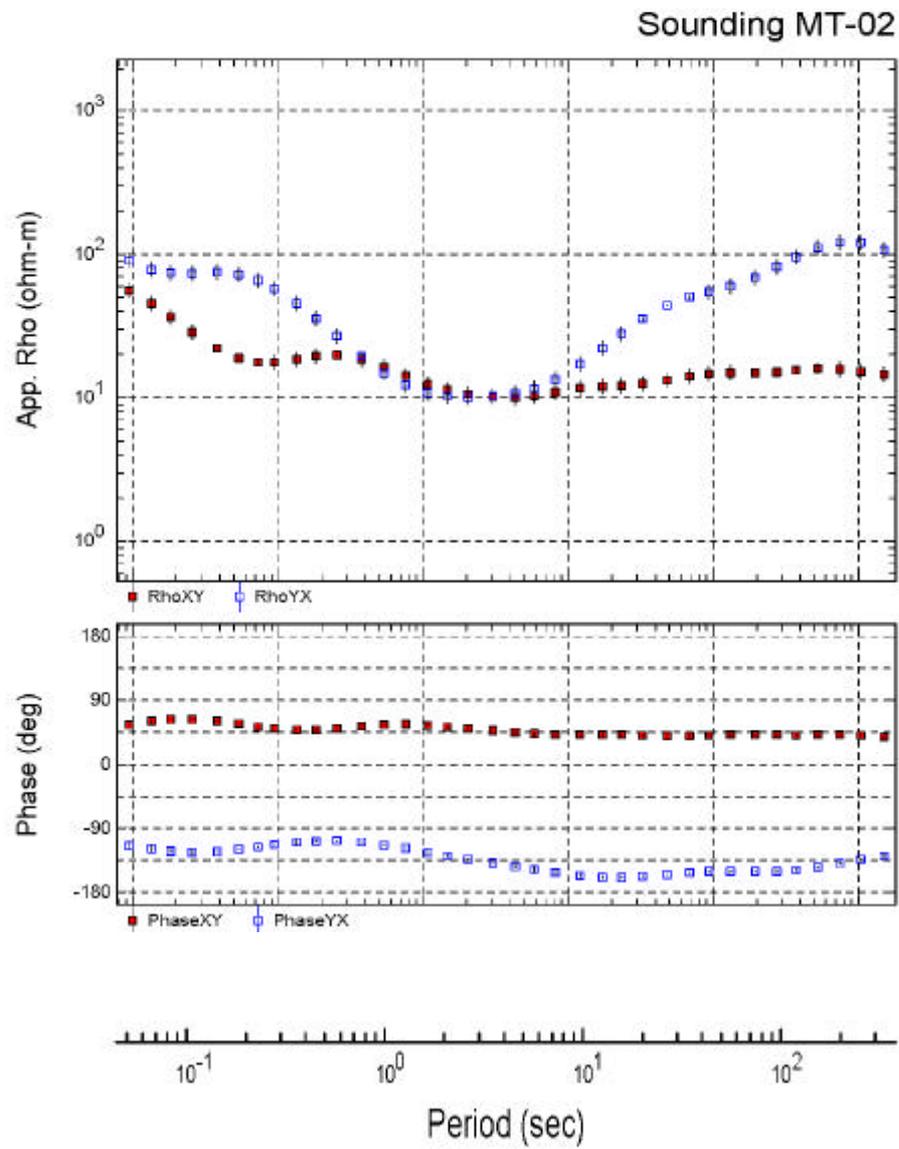
MT15: Ubicado en la latitud $27^{\circ} 13' 59''$ Sur y longitud $55^{\circ} 26' 26''$ Oeste. Se midió durante mas de 16 horas se observó una componente ruidosa alrededor de 10 segundos.

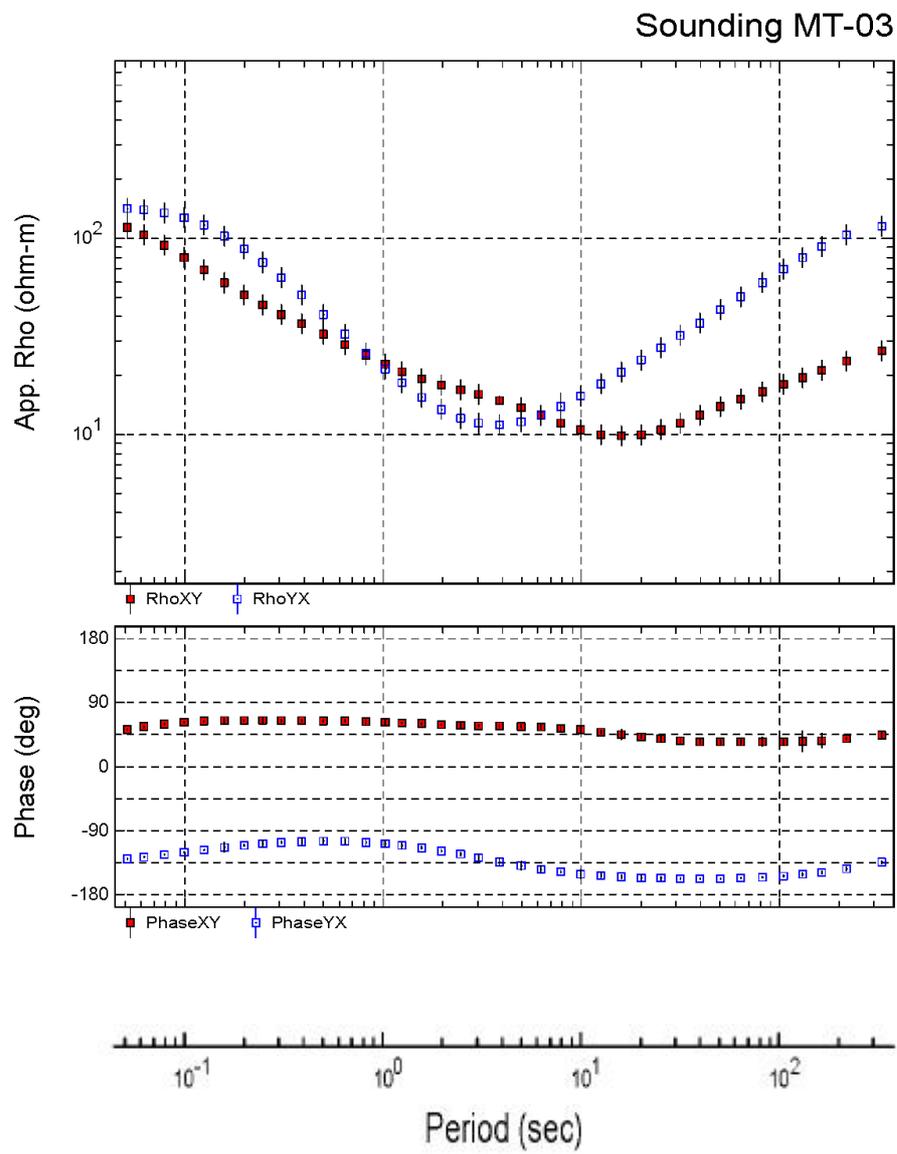
4.2.1 Resultados del procesamiento

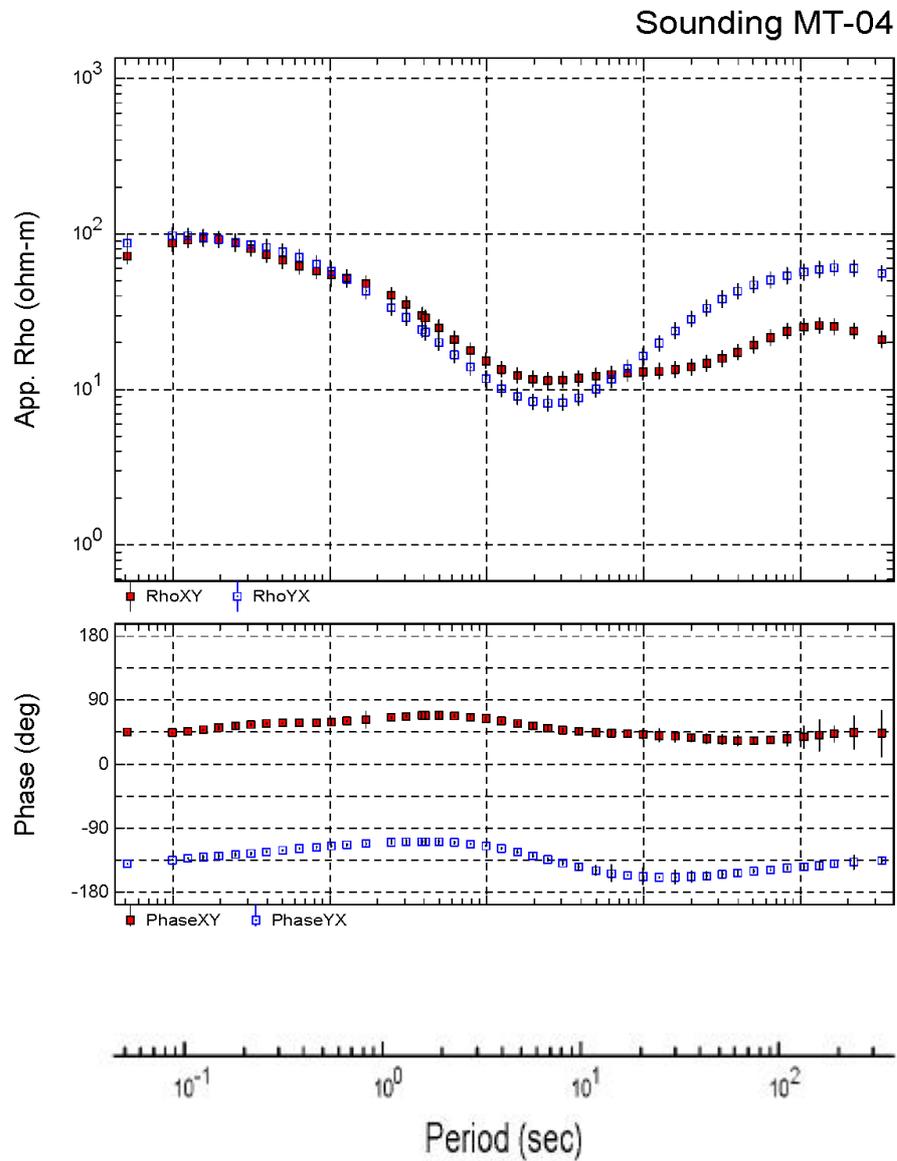
Para cada sondeo se procesaron los datos usando el programa mencionado Acq24. Se obtuvieron las resistividades aparentes y las fases. Se estudiaron las coherencias entre E_x y H_y y entre E_y y H_x . Se descartaron muchos de los datos de las estaciones MT5 y MT12 por ser muy ruidosos. Lo mismo ocurrió con la componente (xy, NS) de las estaciones MT6 y MT8 y la componente (yx, EO) de la estación MT11.

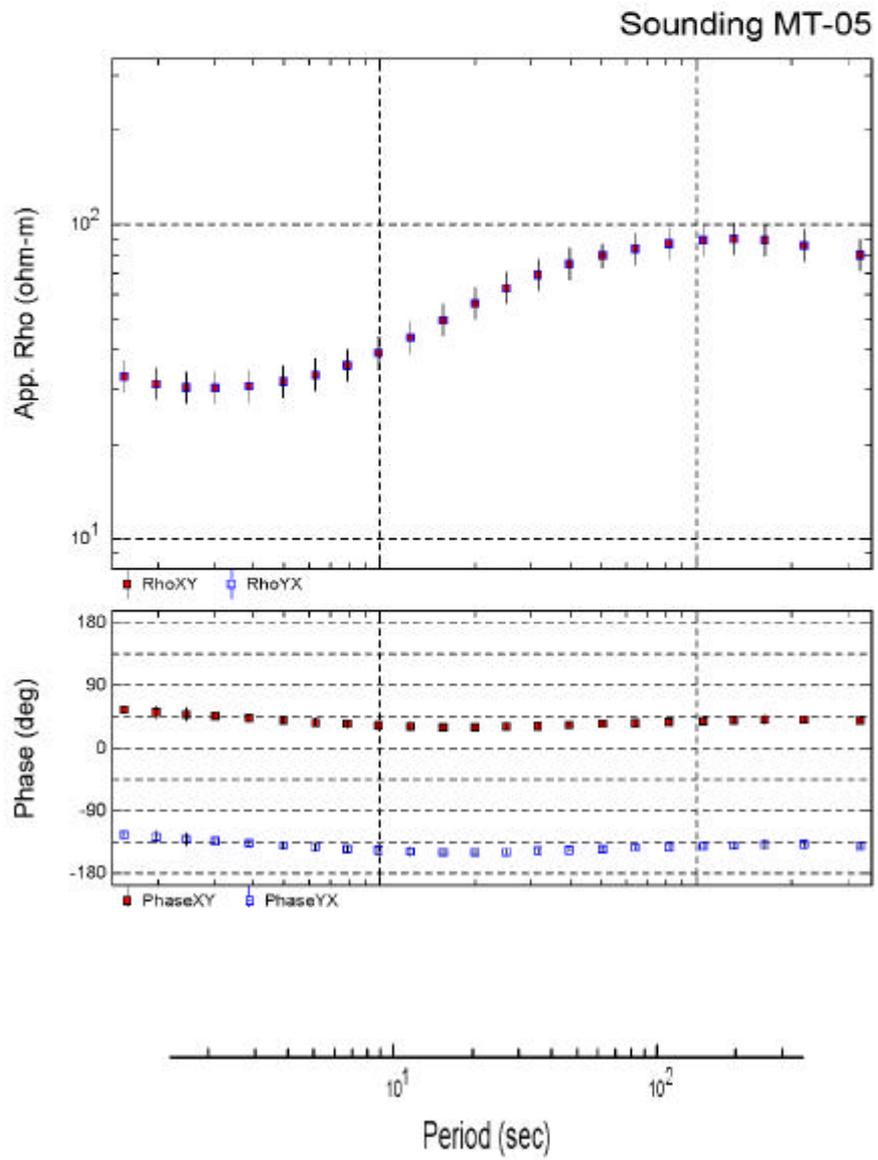
A continuación se presentan los datos suavizados mediante el programa "rhoplus" de resistividad aparente y fase de las estaciones que se utilizaron para obtener los modelos de capas 1D.

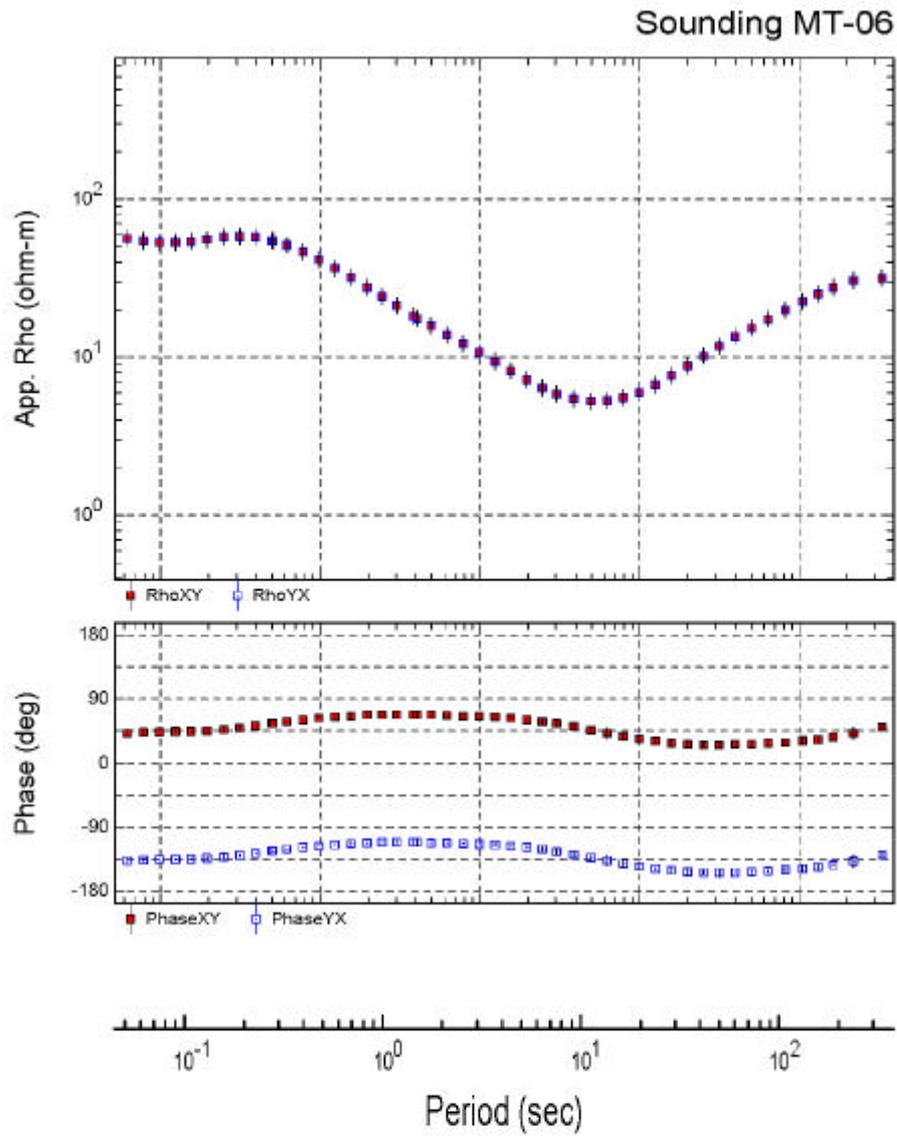


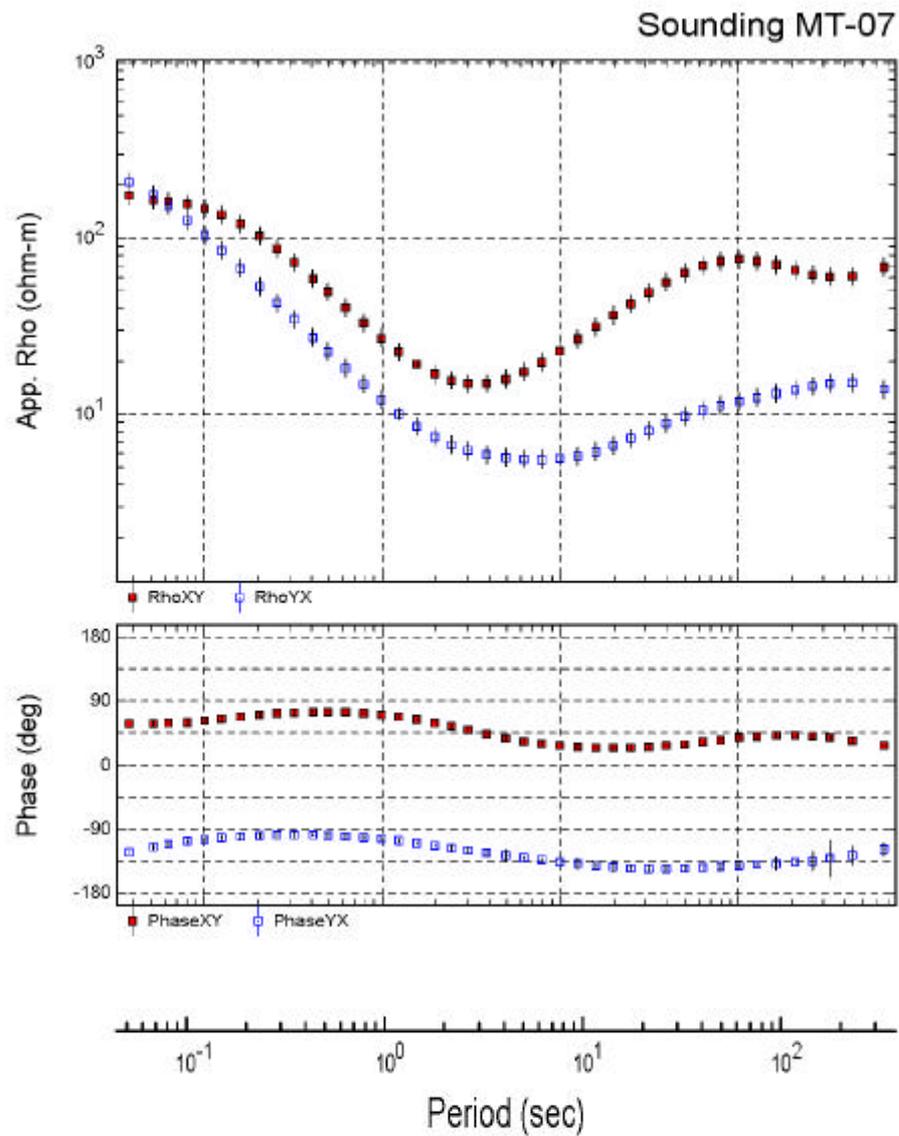


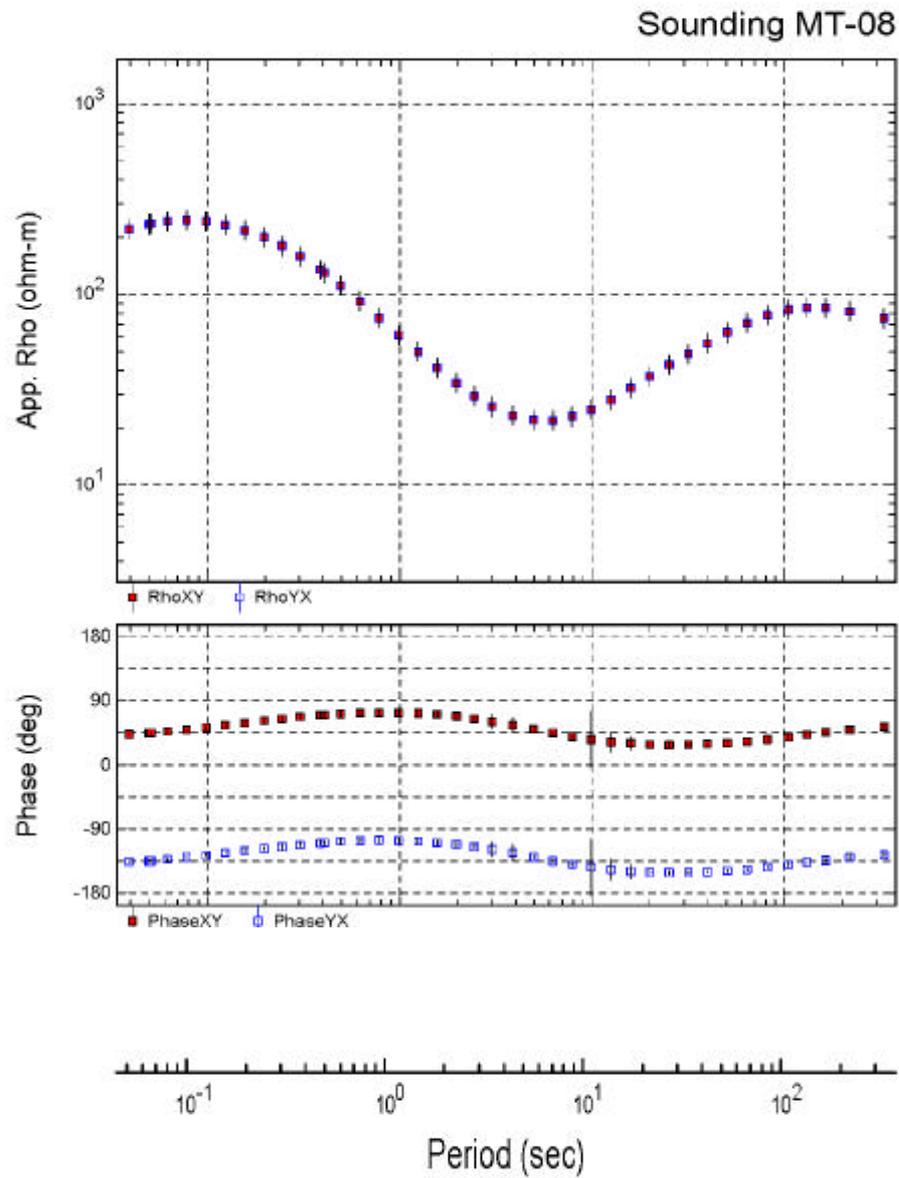


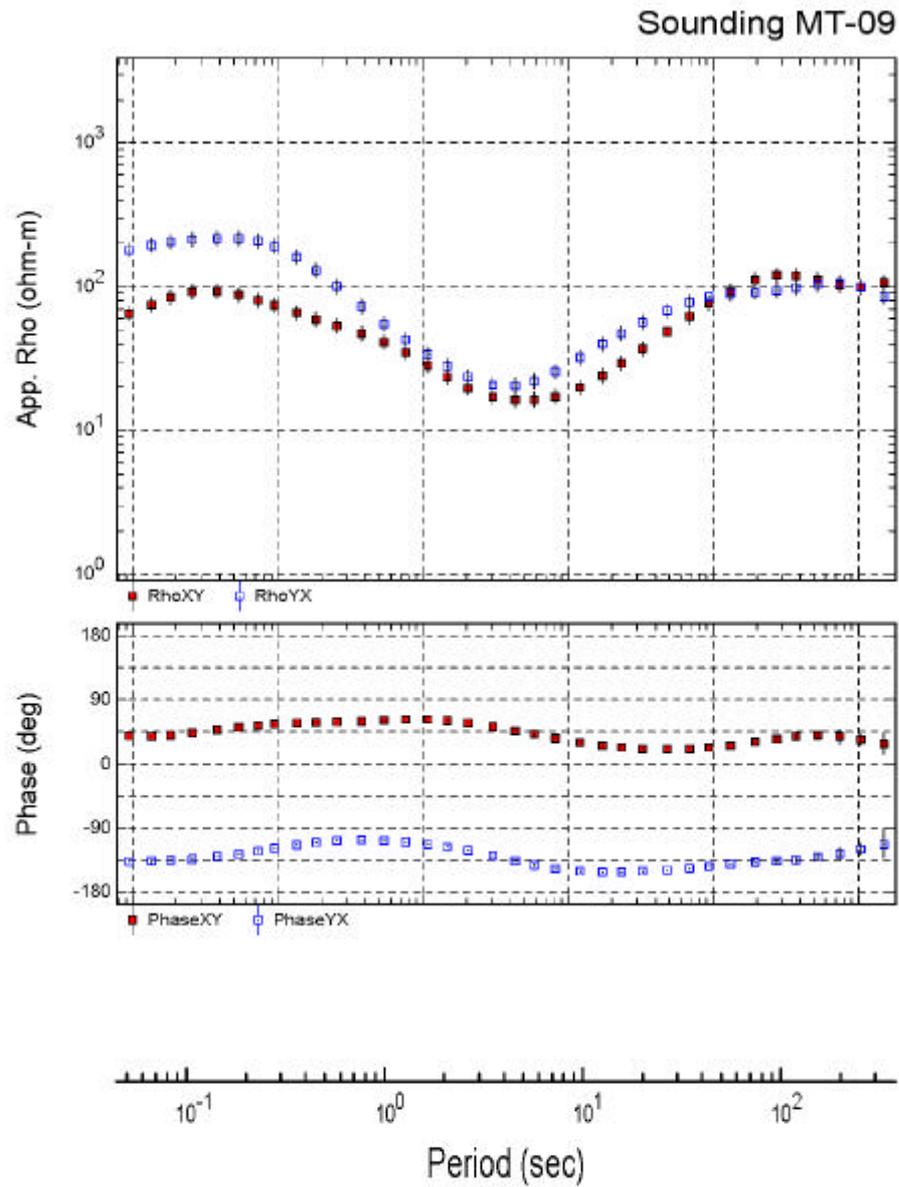


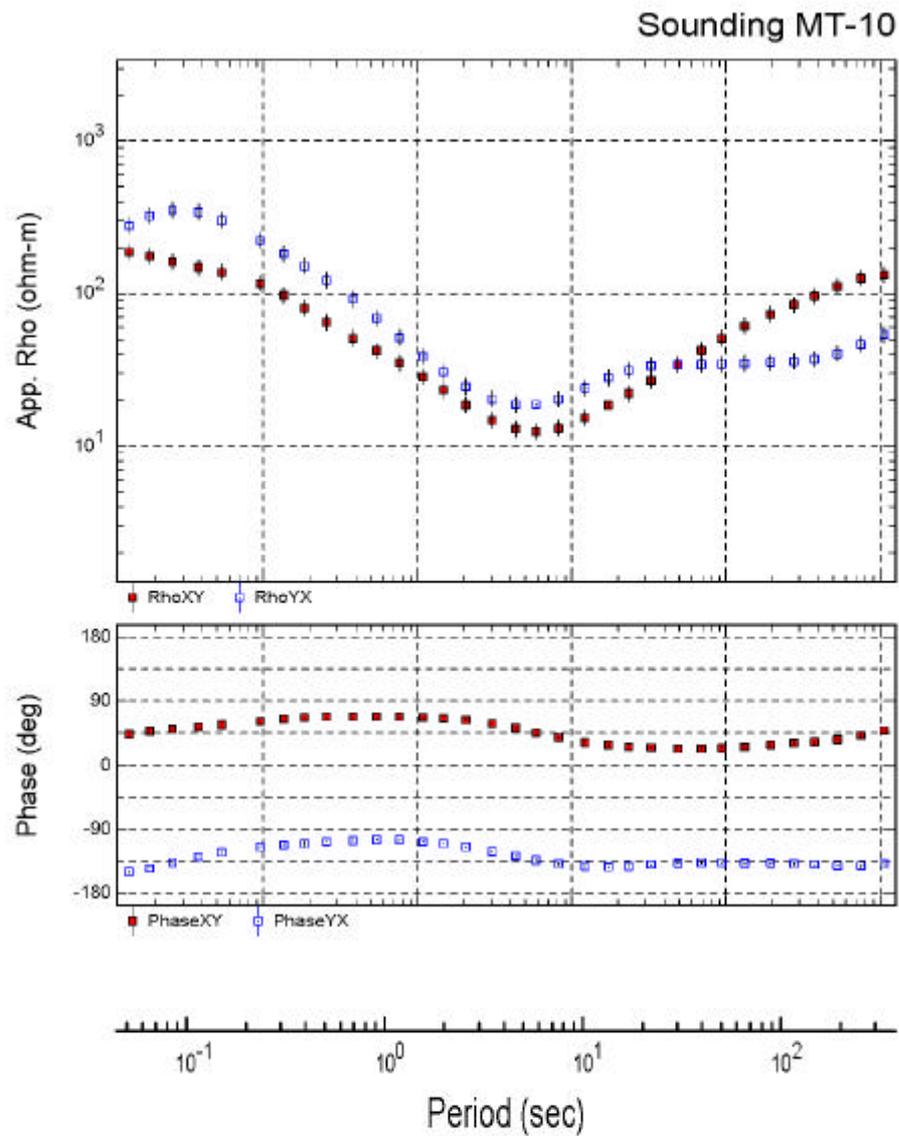


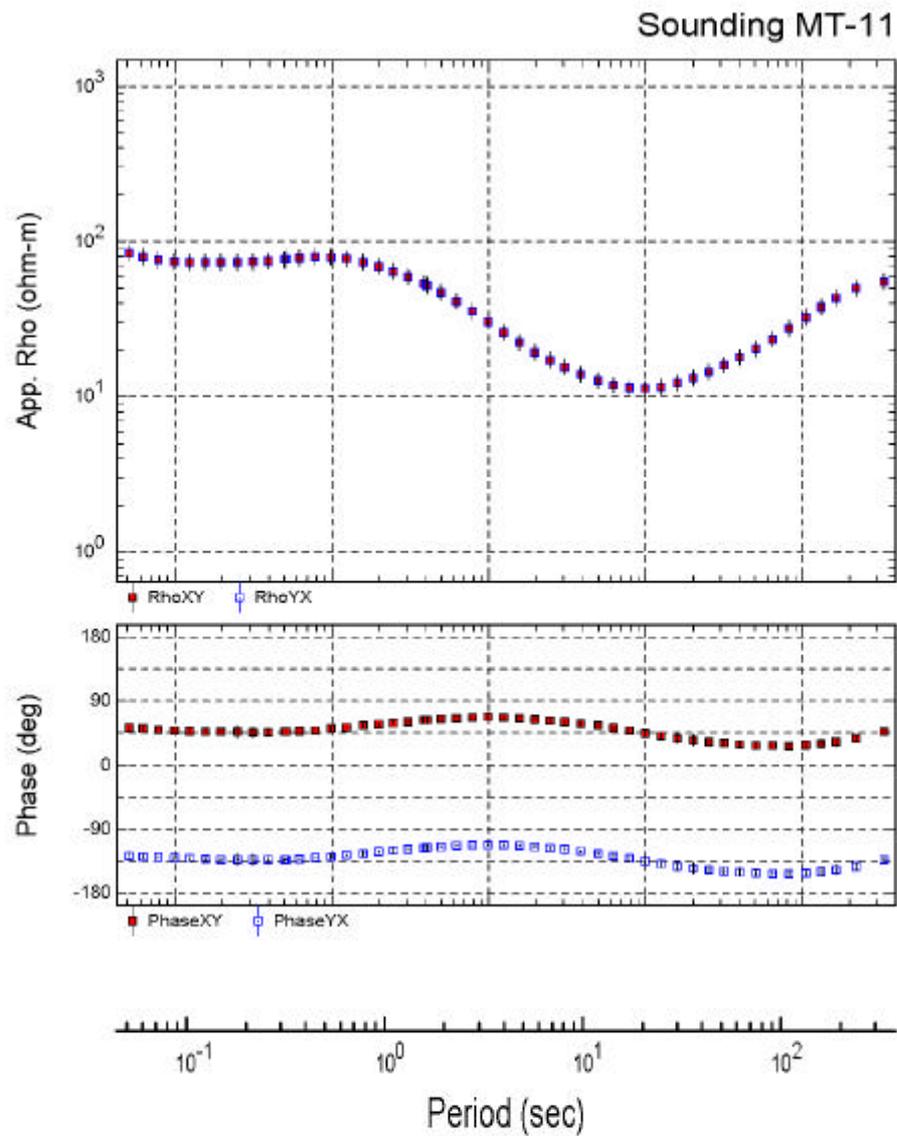


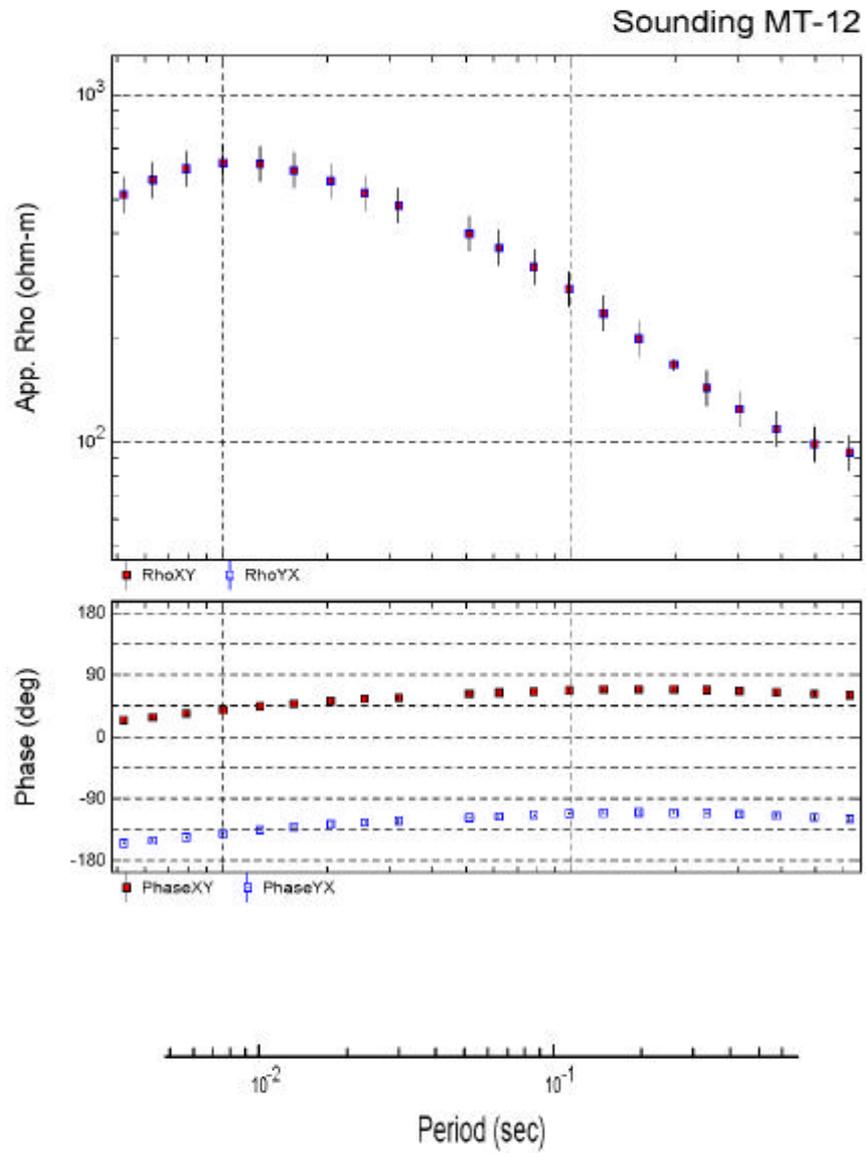


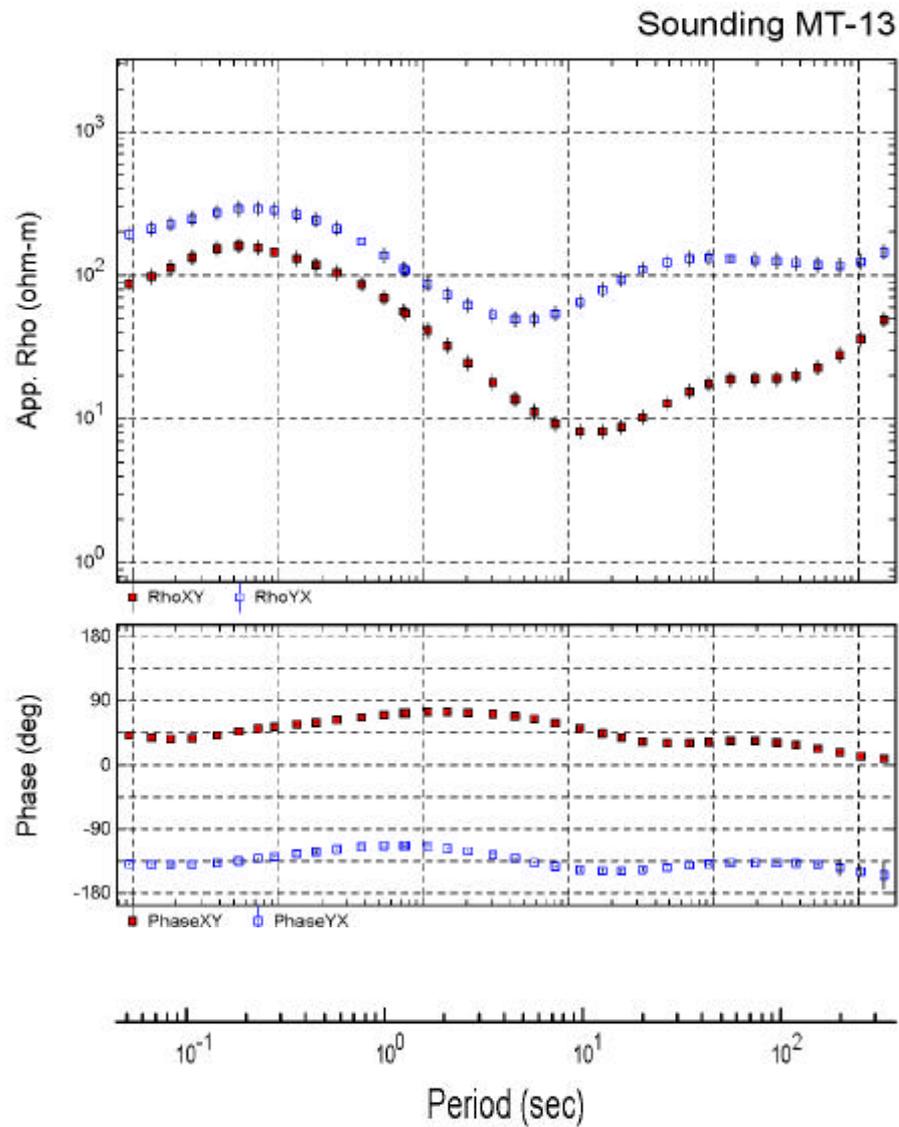


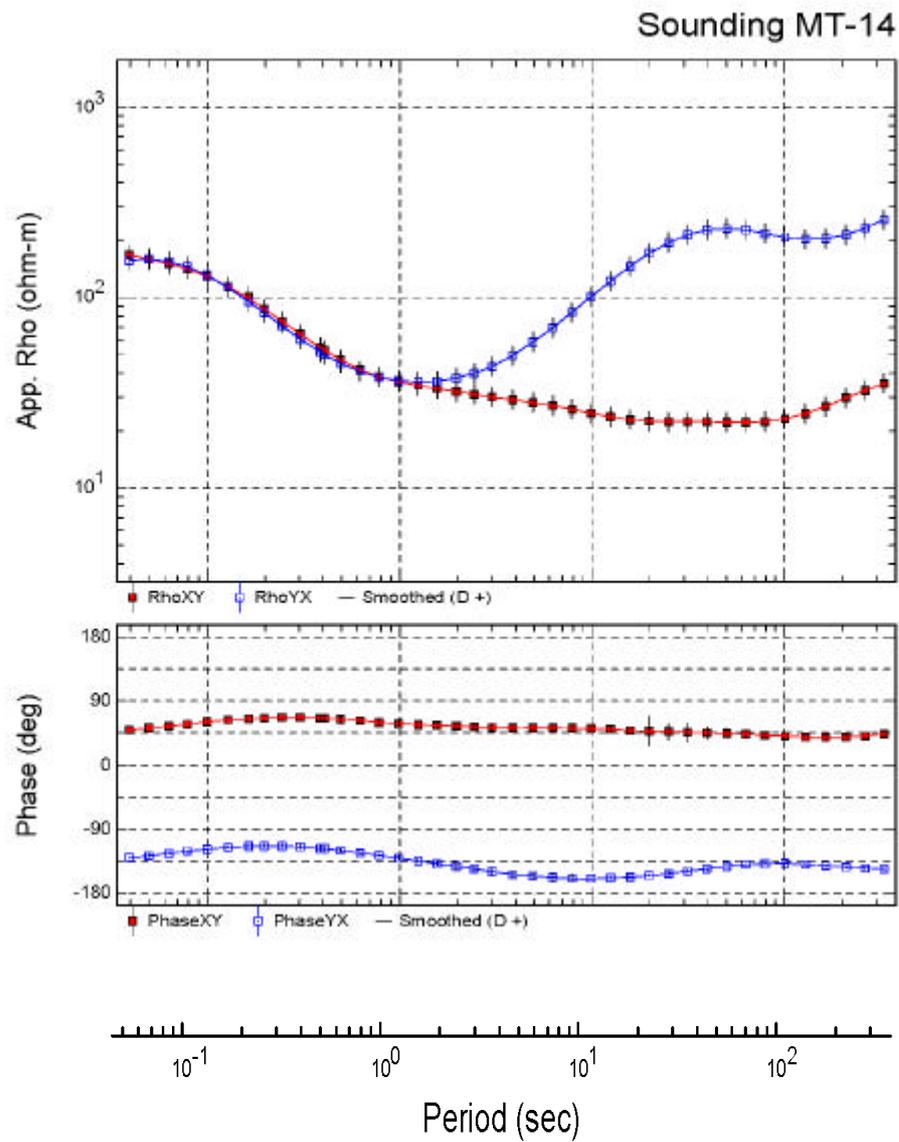


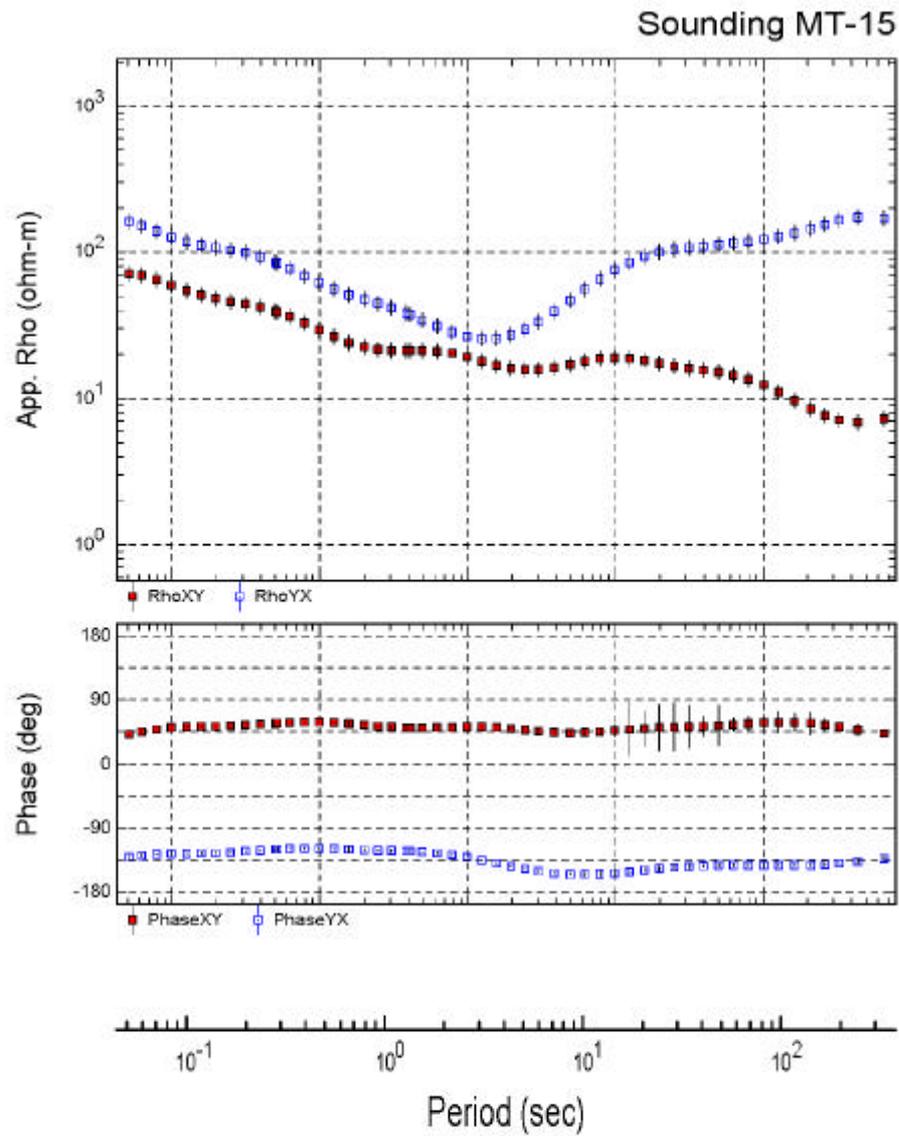






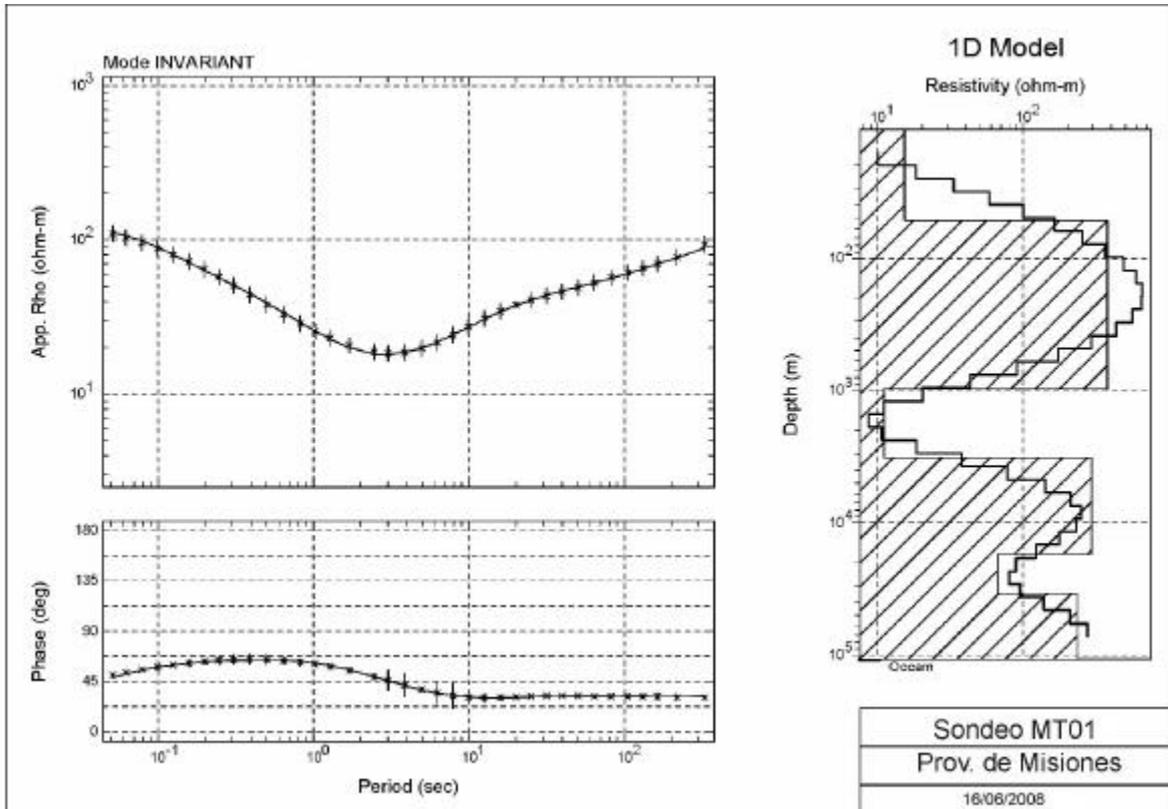




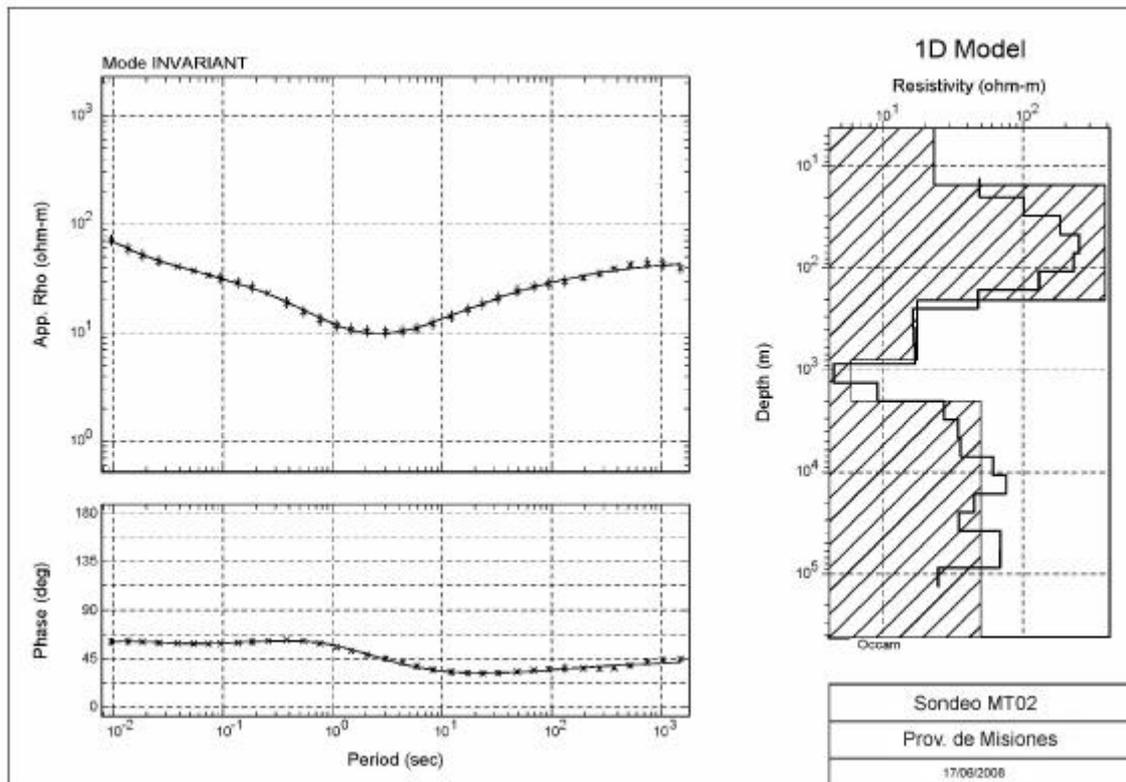


4.2.2- Modelos 1D

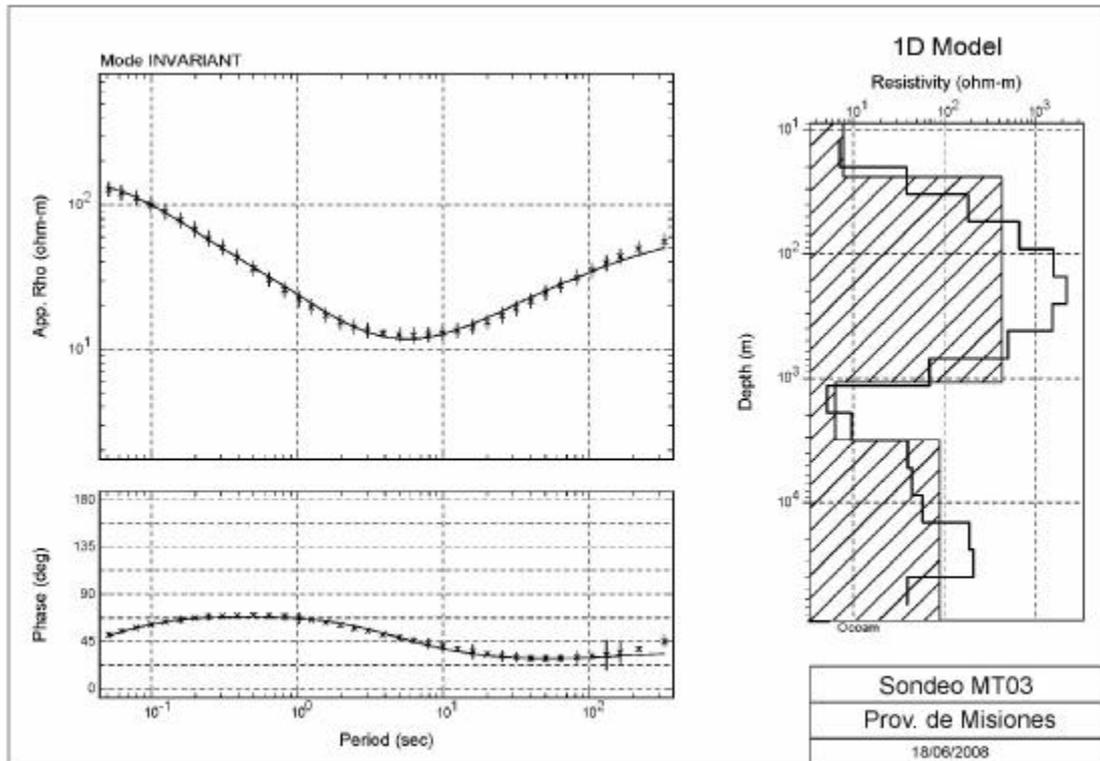
Si bien los modelos mostrados en esta sección son los más representativos del modelado en capas, la estructura que se está interpretando es probablemente 2D localmente y 3D regionalmente. Por lo tanto, los datos medidos tienen las dos componentes, que en caso de tener una dirección preferencial y utilizar un modelo 2D, necesitaríamos determinar esa dirección de simetría de la estructura para determinar los modos TE (transverso eléctrico: campo eléctrico paralelo a la dirección de simetría) y TM (transverso magnético: campo magnético paralelo a la dirección de simetría) y efectuar las rotaciones pertinentes. Cuando solamente se realiza una inversión 1D lo más usual es hacer un promedio especial de las dos componentes. Se calcula a partir de las 2 componentes de la siguiente forma: la resistividad aparente es la media geométrica de la resistividad de las componentes xy e yx y la fase es la media aritmética entre las fases de las componentes xy e yx . A continuación se muestran la resistividad aparente y la fase así obtenidos y se presenta el modelo suavizado con el método de Occam y el modelo (rayado) de pocas capas que tienen el mismo ajuste. Además, para su mejor visualización, se adjunta una planilla, junto al mismo gráfico, con la cantidad de capas obtenidas con el método Occam, la profundidad del techo de cada una de ellas, su espesor y el valor de la resistividad eléctrica.



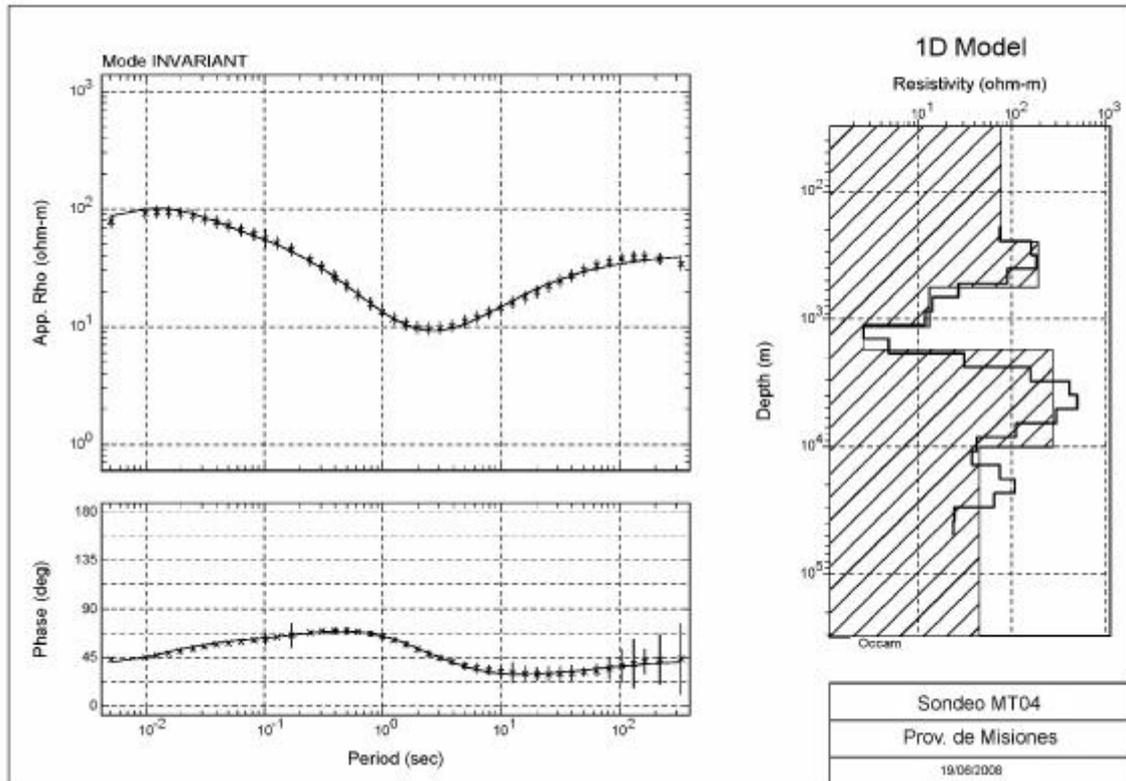
MT 01			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	52	0	15
2	922	52	376
3	2226	974	11
4		3200	293



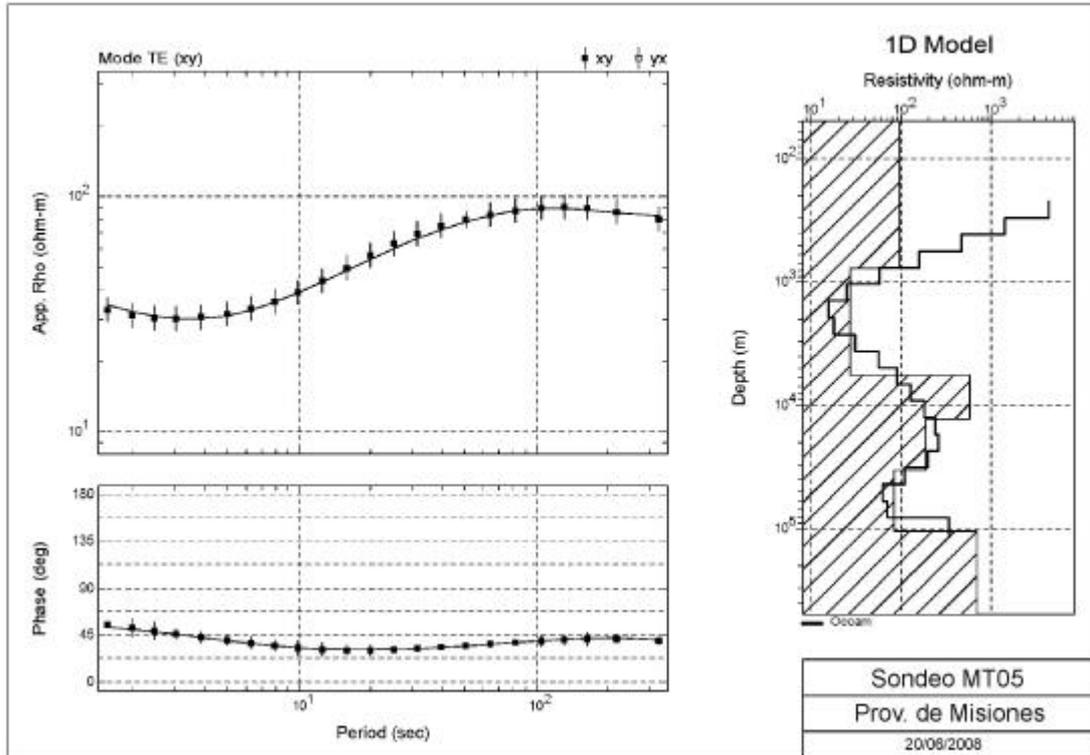
MT 02			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	5	0	40
2	187	5	176
3	570	192	18
4	1300	762	6
5		2062	50



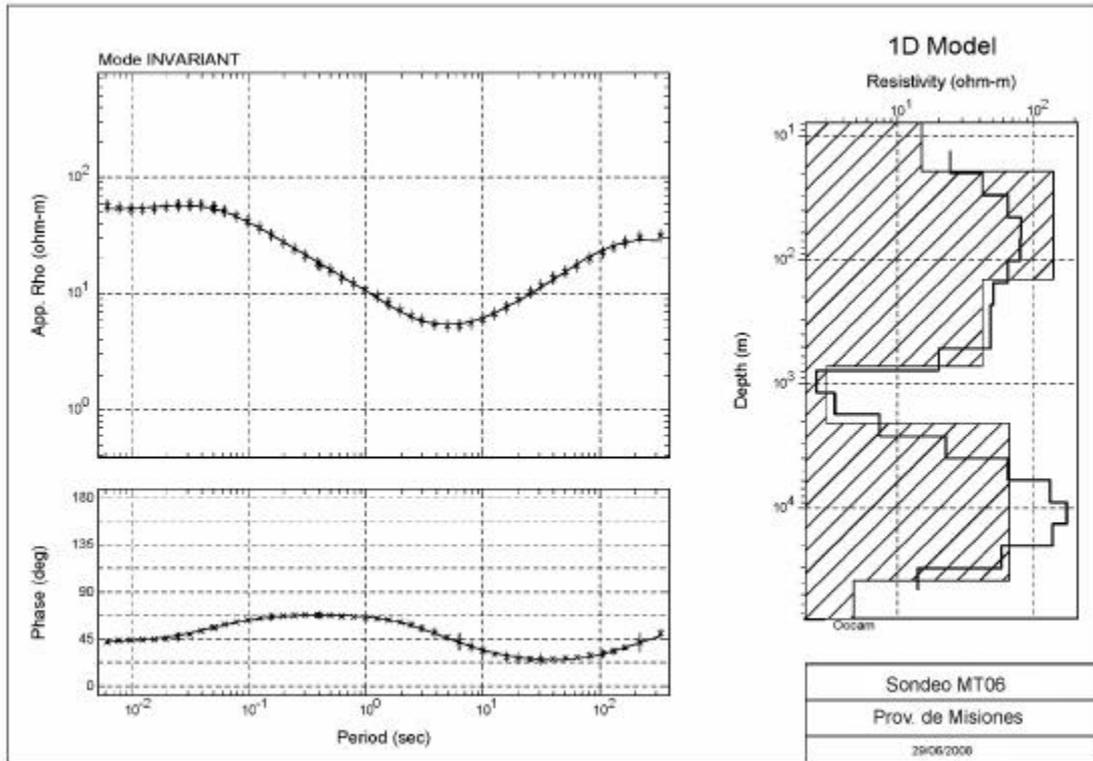
MT 03			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	22	0	8
2	1018	22	637
3	2125	1040	7
4		3165	90



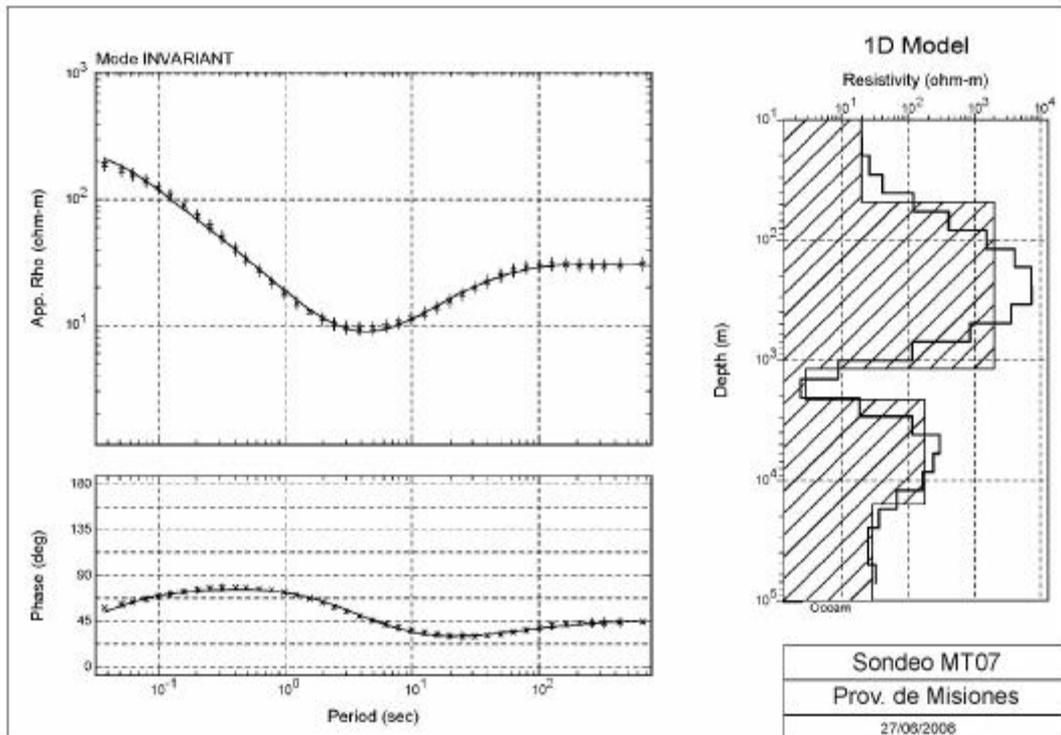
MT 04			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	250	0	77
2	315	250	193
3	609	565	13
4	573	1174	2.5
5		1747	274



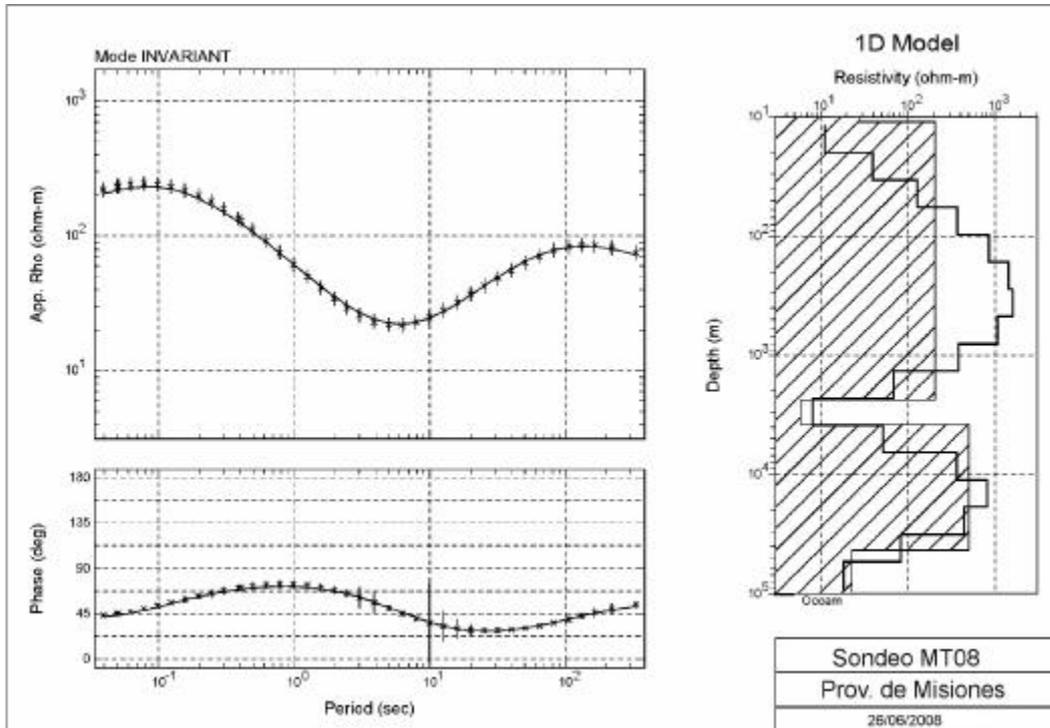
MT 05			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	770	0	96
2	4830	770	27
3		5600	576



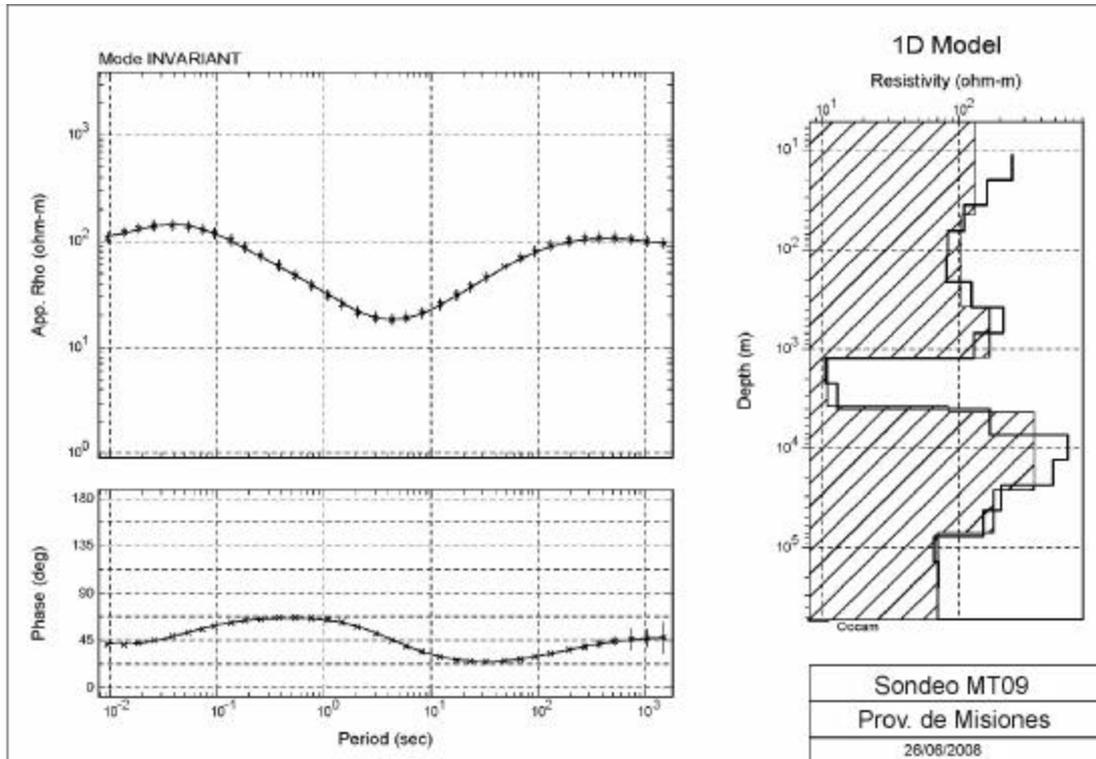
MT 06			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	20	0	15
2	124	20	140
3	583	144	42
4	1350	727	3
5		2077	67



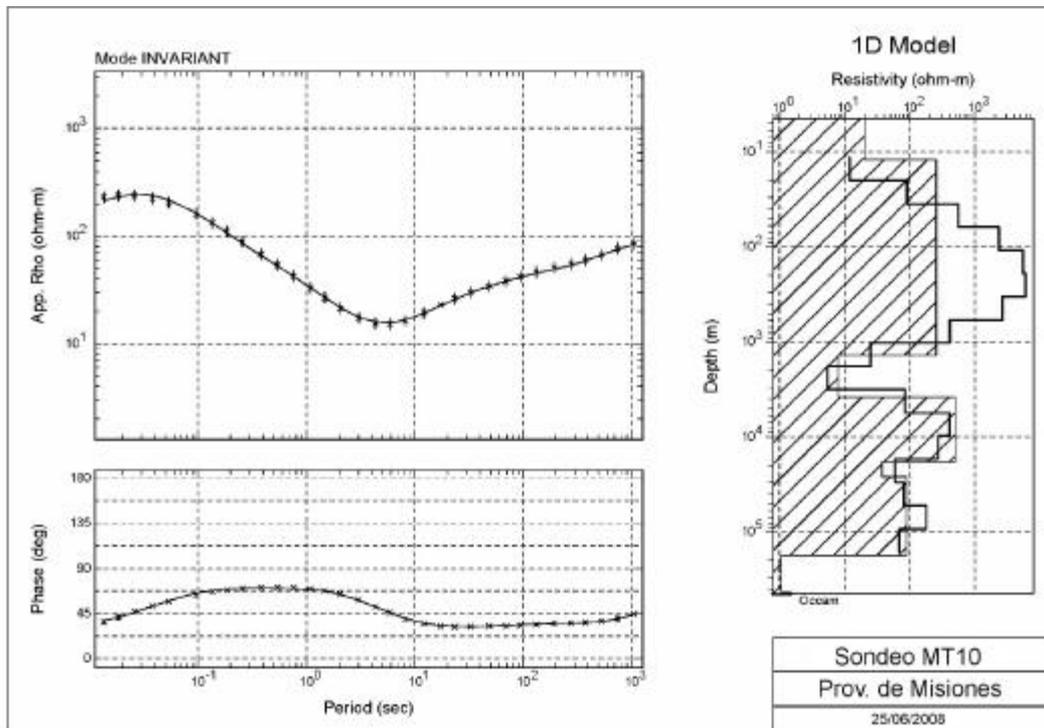
MT 07			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	49	0	20
2	1127	49	2000
3	860	1176	2.75
4		2036	176



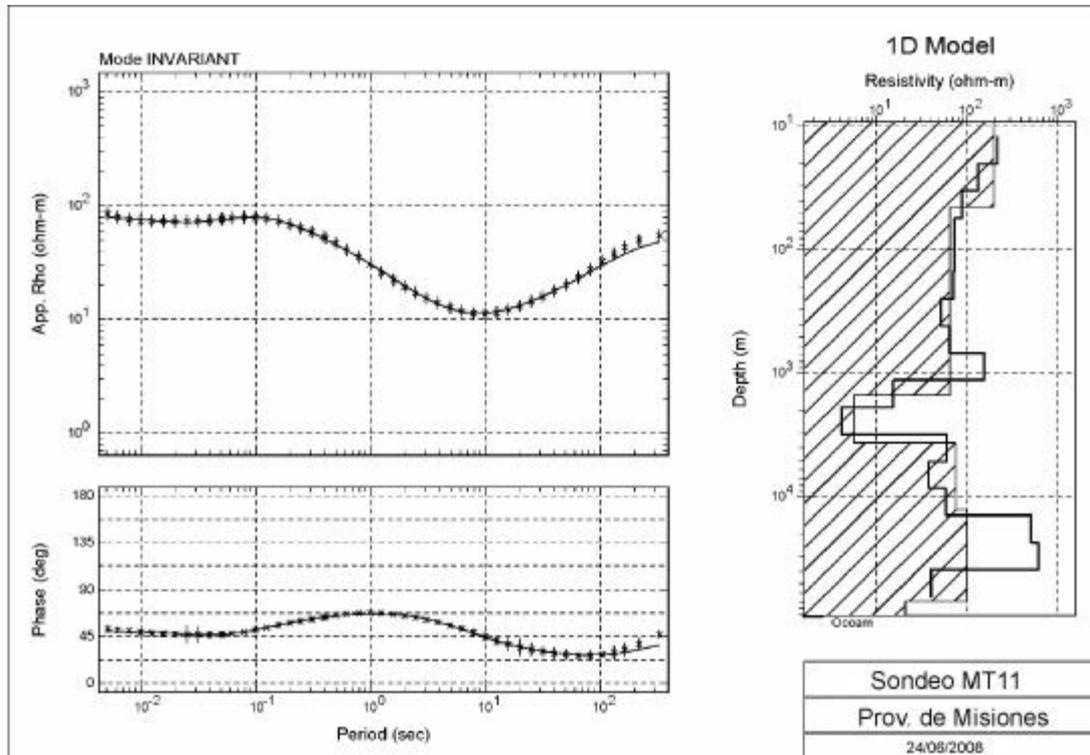
MT 08			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	11	0	28
2	2364	11	206
3	1440	2375	6
4		3815	500



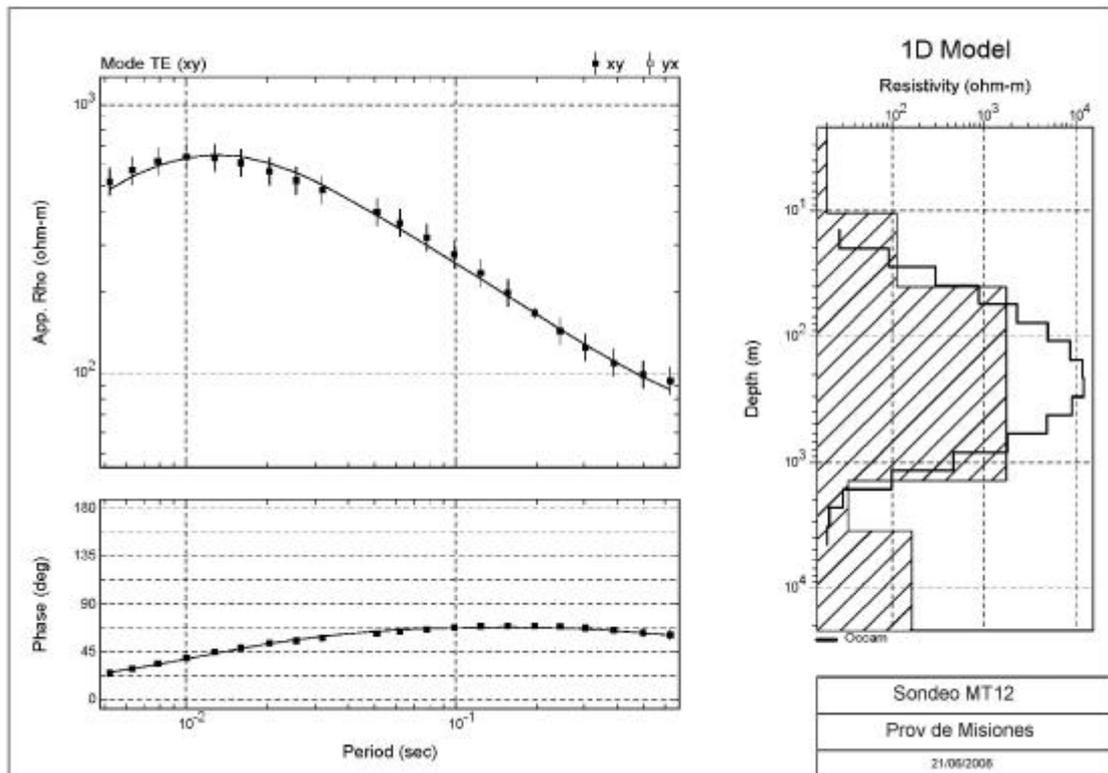
MT 09			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	45	0	131
2	330	45	103
3	851	375	166
4	2534	1226	11
5	505	3760	89
6		4265	354



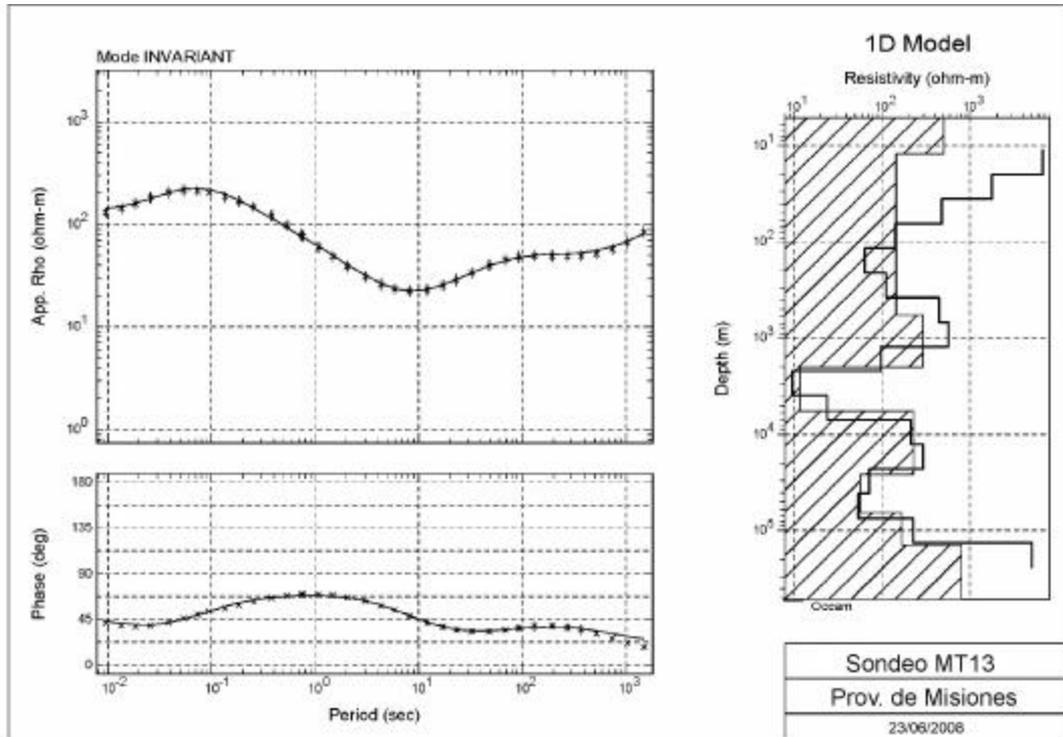
MT 10			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	12	0	20
2	1367	12	251
3	2434	1379	8
4		3813	480



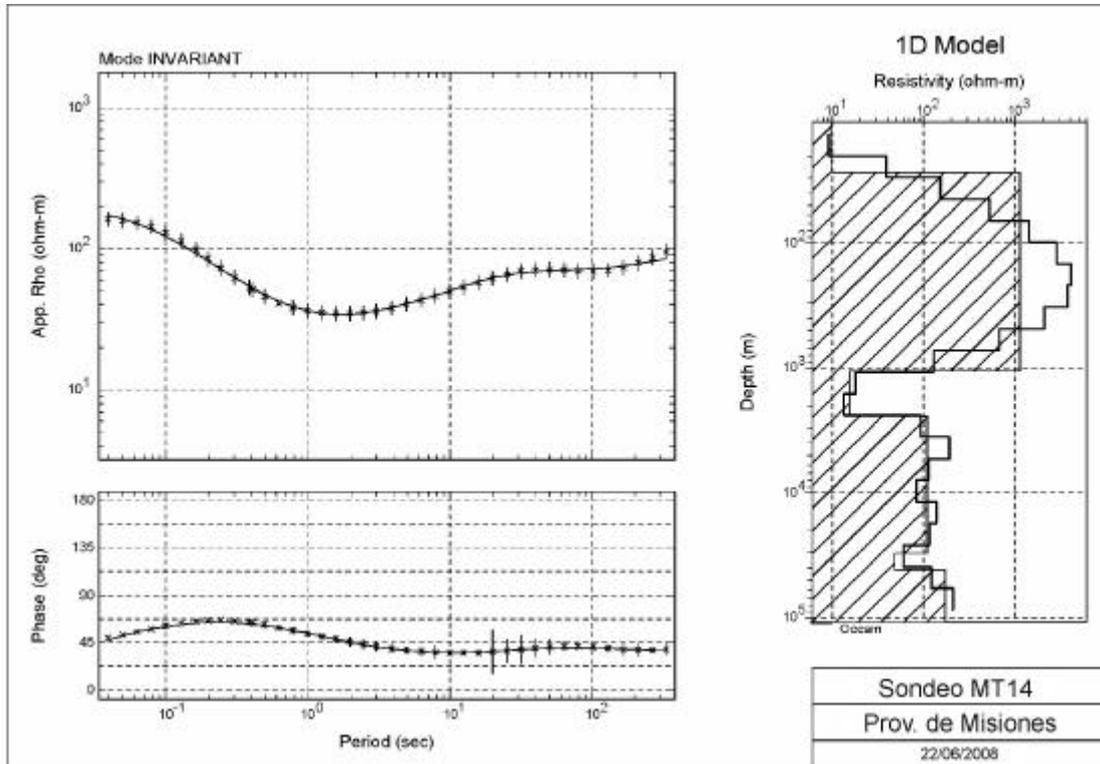
MT 11			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	45	0	200
2	1455	45	65
3	2140	1500	6
4		3640	75



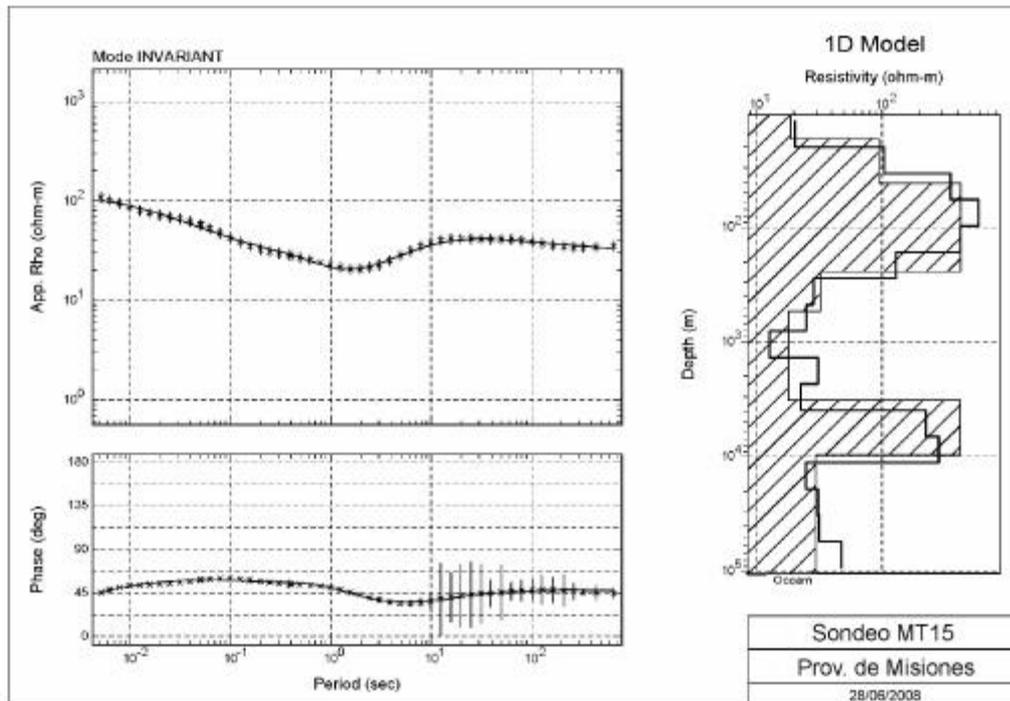
MT 12			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	10	0	20
2	30	10	115
3	1365	40	1700
4	2105	1405	33
5		3510	165



MT 13			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	12	0	502
2	563	12	146
3	1450	575	300
4	3630	2025	12
5		5655	220



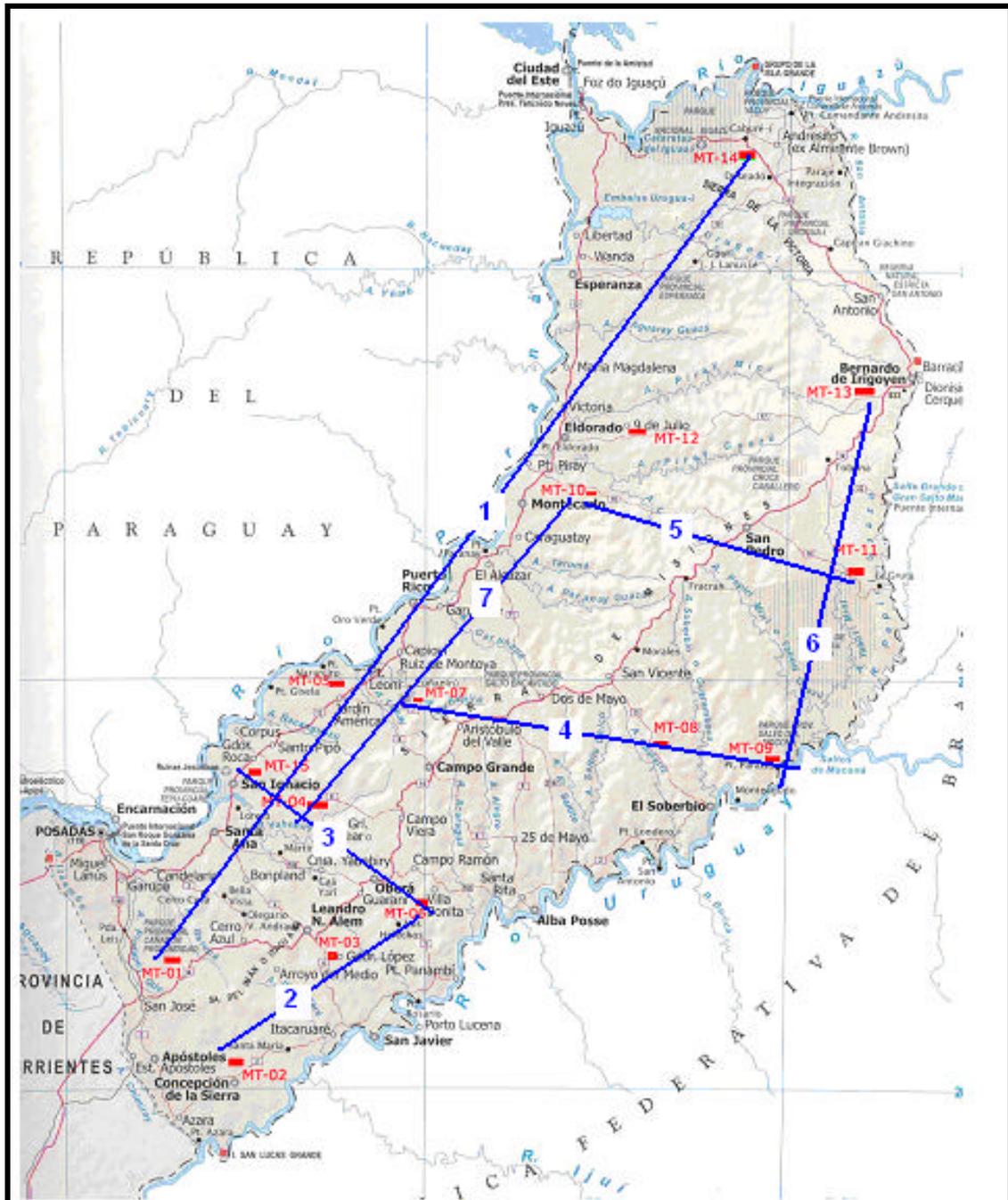
MT 14			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	27	0	10
2	1038	27	1120
3	1865	1065	15
4		2930	108



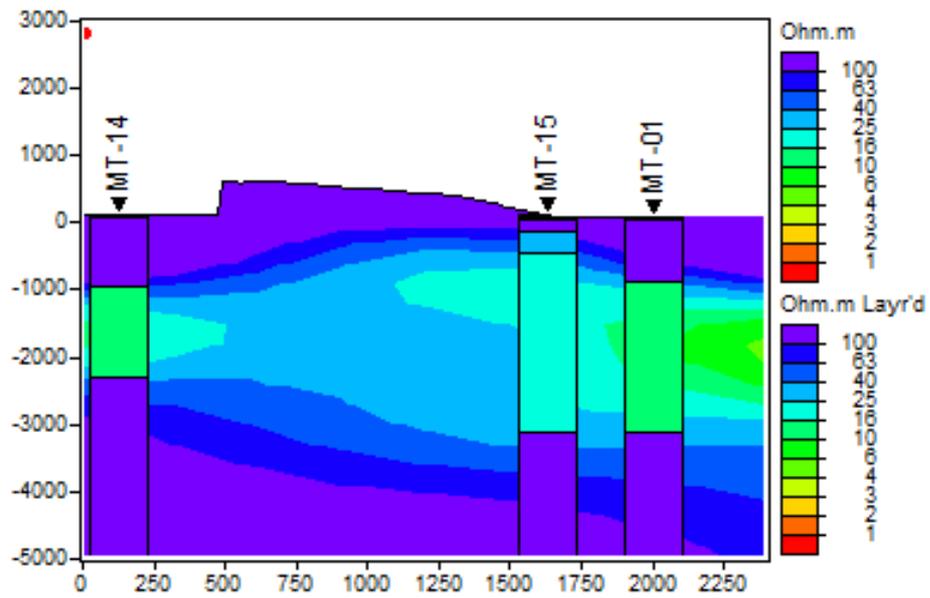
MT 15			
Nº de Capa	Espesor (m)	Profundidad (m)	rap (w-m)
1	17	0	19
2	24	17	94
3	201	41	419
4	300	242	32
5	2646	542	18
6		3188	416

4.2.3.- Modelos por interpolación

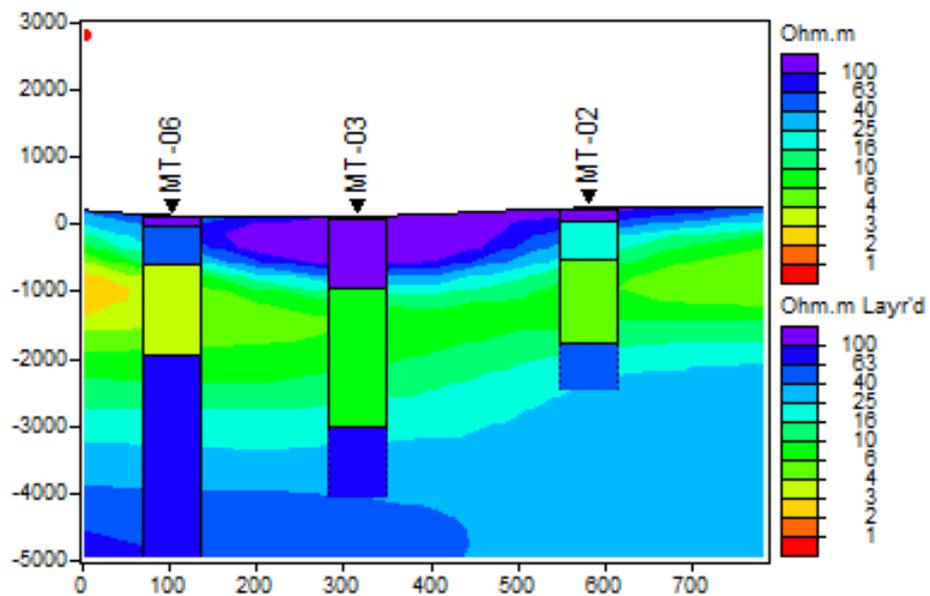
A continuación se presentan los modelos 1D interpolados a lo largo de perfiles que contienen varias estaciones teniendo en cuenta la altura del terreno.



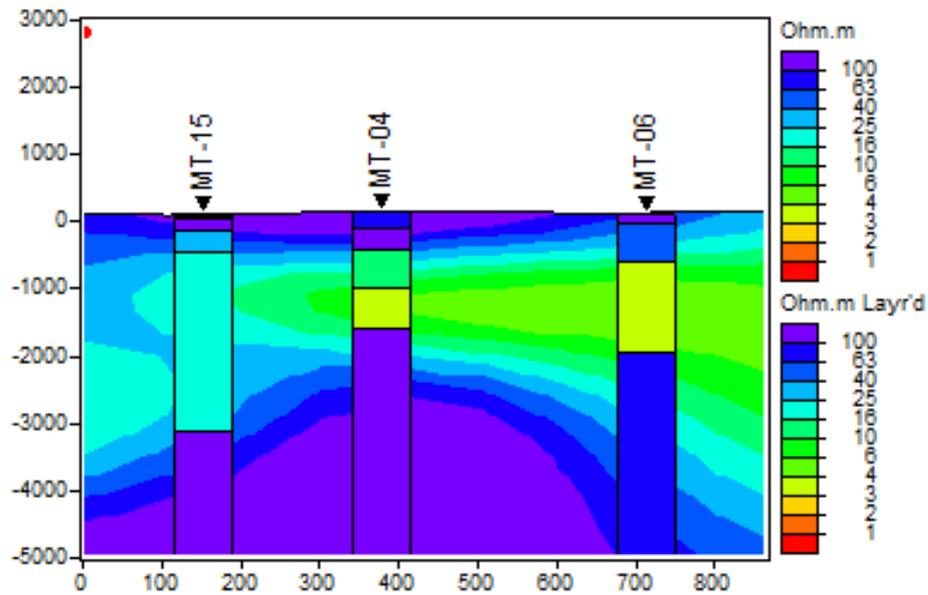
Mapa de Misiones mostrando las estaciones MT y los perfiles interpolados



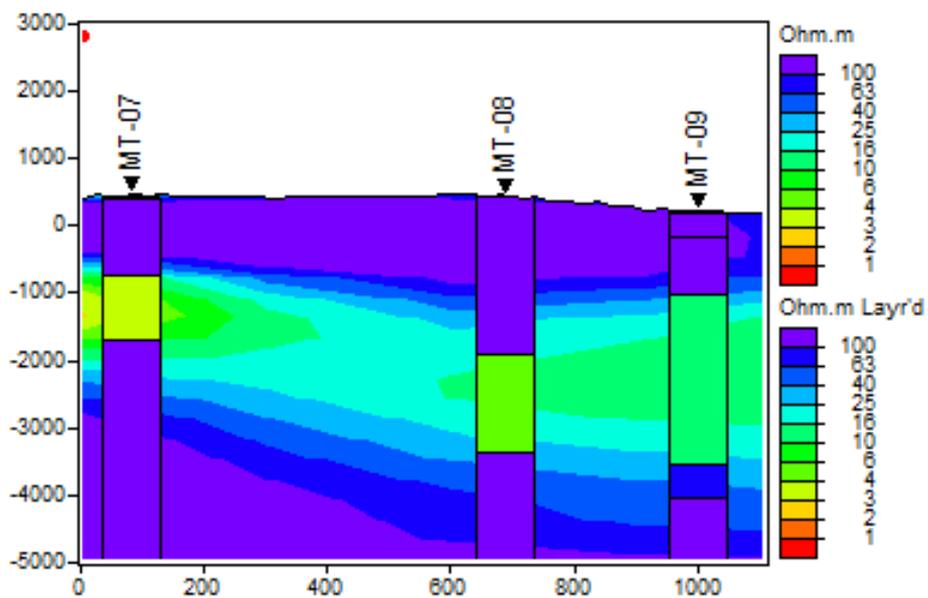
Perfil 1 Estaciones MT14, MT15 y MT01



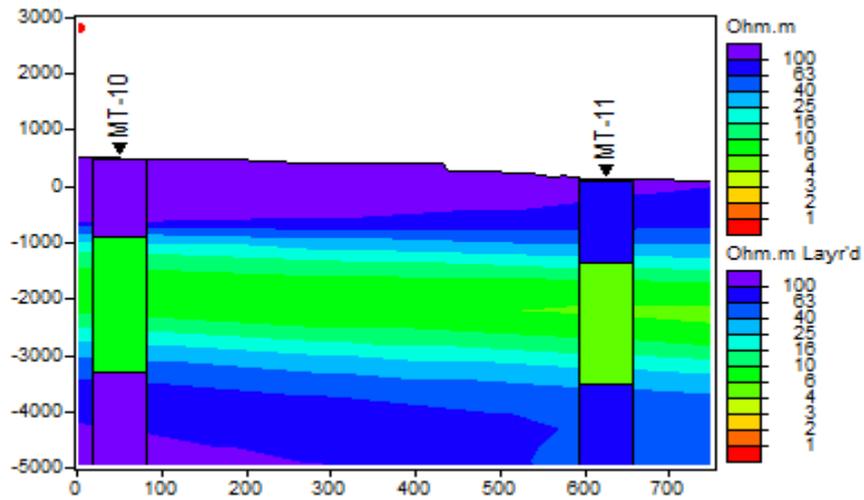
Perfil 2 Estaciones MT06, MT03 y MT02



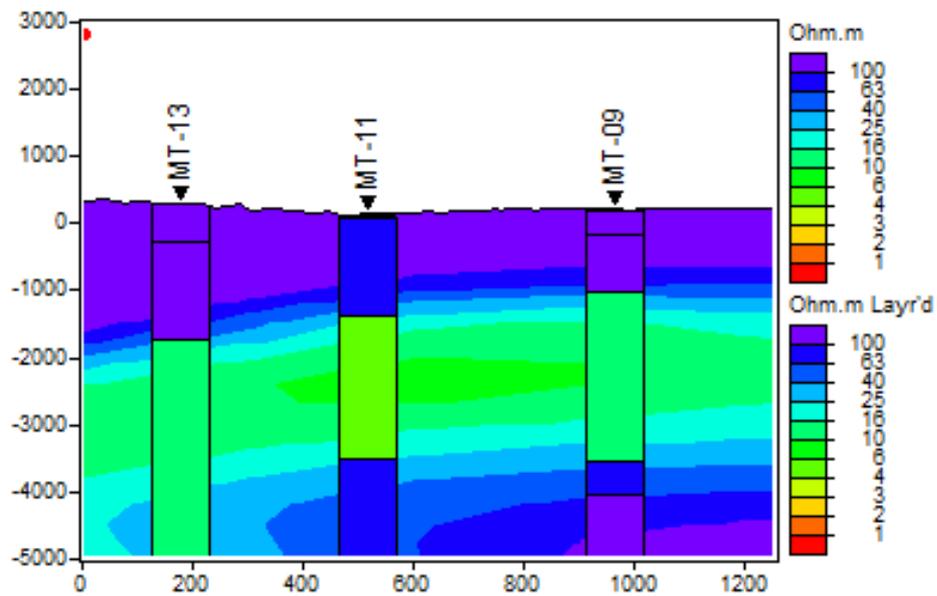
Perfil 3 Estaciones MT15, MT04 y MT06



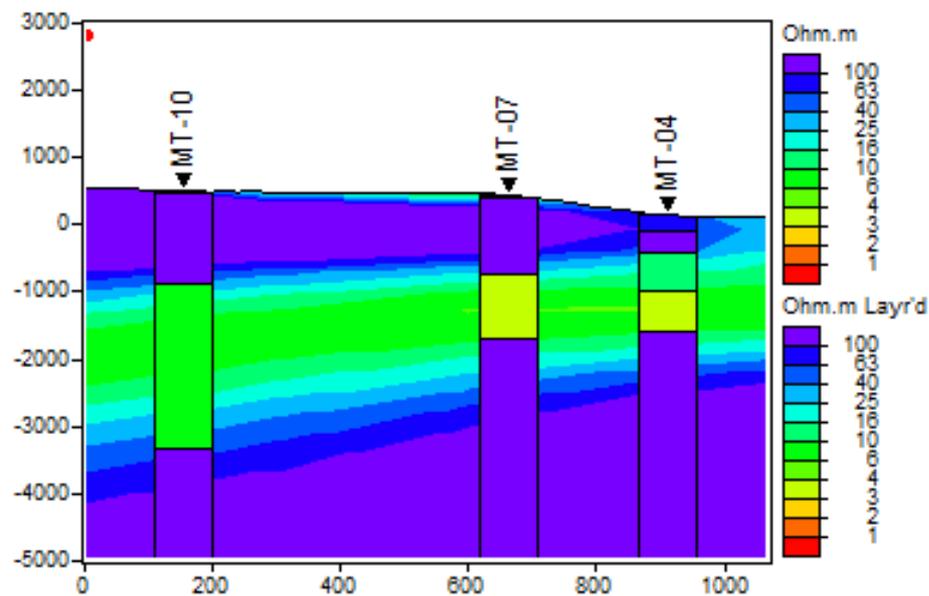
Perfil 4 Estaciones MT07, MT08 y MT09



Perfil 5 Estaciones MT10 y MT11



Perfil 6 Estaciones MT13, MT11 y MT09



Perfil 7 Estaciones MT10, MT07 y MT04

4.2.4.- Conclusiones

Se puede observar de los modelos que en todos los sondeos la secuencia es la misma, una capa superficial de resistividad alrededor de 100 ohm-m, de espesor variable, atribuible a las coladas basálticas. Por debajo una capa conductora de espesor variable de resistividad menor a 10 ohm m. que se ha interpretado como sedimentos infrabasálticos que podrían alojar el Acuífero Guaraní. Por último se destaca una capa más resistiva a diferentes profundidades que se relaciona con el basamento donde se apoyaría la columna sedimentaria.

No se tomaron en cuenta para la confección de estas interpolaciones los resultados de los sondeos MT05 y MT12 por ser de menor densidad de datos que el resto pues debido a los "ruidos" presentes en el área hubo que eliminar muchos datos muy ruidosos y los que quedaron tienen mayor nivel de ruido que el resto de los sondeos.

El resultado de estos dos sondeos MT05 y MT12 lo consideramos bueno pues tiene la curva la misma morfología que las del resto del área aunque entendemos que las determinaciones de profundidades y valores de resistividades eléctricas tienen mayor indeterminación que en el resto de los sondeos.

4.3.- Recomendaciones

En este trabajo se realizó una interpretación magnetoteléfrica 1D debido a que las estaciones estaban muy separadas. Estos modelos no son tan precisos como los obtenidos a partir de interpretaciones 2D donde las estaciones se ubican en perfiles con estaciones a menor distancia de acuerdo al interés que se persiga.