

Exploración de recursos geotérmicos en la zona central del Golfo de California mediante un estudio magnetotelúrico marino (resultados preliminares)

Aideliz Marimar Álvarez¹, José Manuel Romo Jones¹ y Steve Constable²

¹CICESE, Ciencias de la Tierra, Ensenada, BC. ²Scripps Institution of Oceanography-Universidad de California San Diego. Correo: aideliz@cicese.edu.mx.

RESUMEN

Los recursos geotérmicos hidrotermales están asociados a las fronteras entre placas tectónicas, entre las que están las zonas de dorsales oceánicas y de fallas transcurrentes. En particular, algunos estudios realizados en el Golfo de California han confirmado zonas de anomalías térmicas que indican la presencia de recursos geotérmicos potenciales. Como parte de un proyecto del CeMIE-Geo, recientemente se llevó a cabo un estudio magnetotelúrico marino en la parte central del Golfo de California, donde se reportó la presencia de edificios volcánicos relacionados a la actividad tectónica de la zona. El objetivo fue determinar si existen anomalías de resistividad que puedan asociarse a la presencia de recursos geotérmicos. En este trabajo se muestran resultados del procesamiento de los datos adquiridos y los modelos preliminares de la resistividad del subsuelo.

Palabras clave: Geofísica, exploración geotérmica, ventanas hidrotermales, geotermia submarina.

Exploration of geothermal resources in the central part of the Gulf of California through marine magnetotellurics – preliminary results

ABSTRACT

Hydrothermal geothermal resources are found at the boundaries between tectonic plates, including mid-ocean ridges and transform faults. In particular, some studies in the Gulf of California have confirmed areas with thermal anomalies that indicate the presence of geothermal resources. As part of a CeMIE-Geo's project, a marine magnetotelluric study was carried out recently in the central part of the Gulf of California, where the presence of volcanic forms related to the tectonic activity of the zone was reported. The objective was determine if there are resistivity anomalies that can be associated to the presence of potential geothermal resources. The results of the processing of the acquired data and preliminary resistivity models of the subsurface are shown in this paper.

Keywords: Geophysics, geothermal exploration, hydrothermal vents, submarine geothermal sources.

Introducción

La energía geotérmica se ha convertido en un objetivo de investigación y explotación en todo el mundo durante las últimas décadas, ante la inminente necesidad de más energía, pero también debido a la declinación de las reservas de hidrocarburos y a la necesidad de cuidar al medio ambiente. Actualmente hay una capacidad instalada de 12.6 GW en el mundo (Bertani, 2016), en plantas de generación de electricidad a partir de energía geotérmica, todas ellas explotando recursos terrestres.

En los años 60, Degens y Ross (1969) descubrieron por primera vez actividad hidrotermal en el fondo oceánico. Actualmente se sabe que existe un alto potencial térmico asociado a las zonas de dorsales oceánicas y fallas de transformación. Aunque toda la explotación de energía geotérmica actual se

lleva a cabo únicamente en tierra, ya se han realizado estudios de flujo de calor en distintas partes del mundo que indican un alto potencial geotérmico asociado a actividad hidrotermal submarina.

En particular, algunos estudios realizados en el Golfo de California han confirmado zonas de anomalías térmicas que indican la presencia de recursos geotérmicos potenciales, con temperaturas de hasta 300°C a profundidades relativamente someras (Hiriart, 2009).

México tiene una capacidad geotermoeléctrica instalada aproximada de 1 GW, ocupando así el quinto lugar a nivel mundial. Algunos autores (Hiriart, 2009) calculan que el potencial total del país es, al menos, 10 veces la capacidad instalada actual, considerando el potencial presente en las dorsales oceánicas.

A lo largo del Golfo de California se presenta una zona de fallamiento y dorsales que forma parte de la de la frontera entre las placas del Pacífico y Norteamericana. Se han realizados estudios de flujo de calor en las cuencas Wagner y Consag donde se han detectado anomalías con una estimación de flujo de calor de hasta 15 veces el valor medio mundial en la corteza continental (González, 2015; Prol-Ledezma et al., 2013).

Fabriol et al. (1999) reportaron una serie de edificios volcánicos en la parte central del Golfo de California, entre Isla Tortuga y la región de la Caldera de la Reforma - Santa Rosalía, para los cuales sugieren un origen vulcano-tectónico. Hay dos principales estructuras. La primera es la Dorsal Volcánica Tortuga, de 40 km de longitud, que está dentro de la corteza oceánica de la cuenca de Guaymas y es casi perpendicular a su centro de dispersión. La segunda es la Dorsal Volcánica Rosalía que está sobre corteza continental, alineada de manera casi paralela a la línea de costa.

A la misma latitud de nuestra zona de estudio, pero tierra adentro, se encuentra el Campo Geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS, que opera la Comisión Federal de Electricidad con una capacidad de 10 MW. Por ello se consideró conveniente realizar un estudio magnetotelúrico marino en esa zona, cuyo objetivo es realizar una evaluación preliminar de potencial geotérmico y, en caso de haberlo, determinar si existe asociación con la actividad de los complejos volcánicos de las calderas de la Reforma y El Aguajito y del de Las Tres Vírgenes.

El estudio consistió en un levantamiento de datos marinos magnetotelúricos (MT) y de fuente controlada (CSEM), con 20 estaciones a lo largo de tres perfiles en el fondo oceánico, los cuales midieron durante tres semanas el campo electromagnético natural a una frecuencia de 125 Hz. A continuación se dan a conocer resultados preliminares del procesamiento e inversión de los datos magnetotelúricos realizados con el código MARE2DEM (Constable et al., 1987), los cuales aportan información sobre el comportamiento de la conductividad eléctrica del subsuelo de la zona.

Adquisición e Instrumentación

En el mundo, pocas instituciones están realizando investigación en esta área del conocimiento. Este estudio y uno realizado el año anterior en la cuenca de Consag (también en el Golfo de California), son los primeros estudios en los que los métodos MT y CSEM marinos se implementan en México con fines de exploración geotérmica.

El estudio se realizó en mayo de 2016, cubriendo la zona de intersección de dorsales mencionada anteriormente. Se utilizaron 20 instrumentos de medición que se dispusieron en tres perfiles (Figura 1). El diseño se realizó de esta forma para que los perfiles a obtener corten casi perpendicularmente a las dorsales identificadas en la literatura.

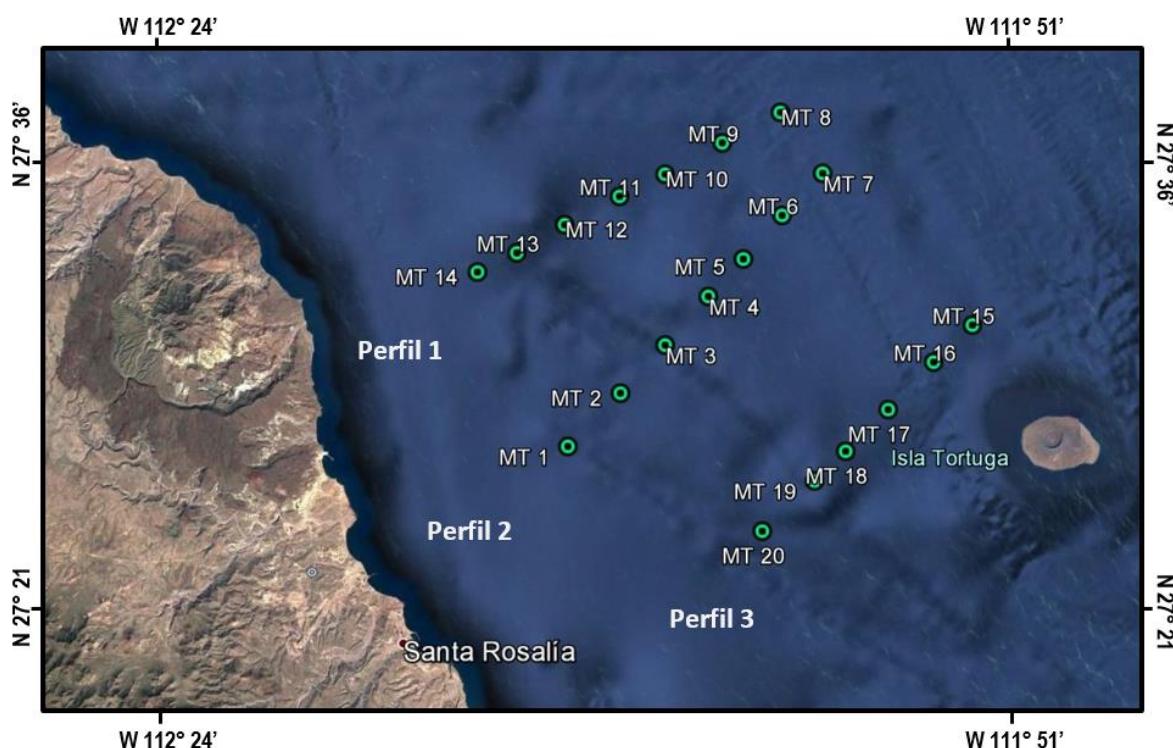


Figura 1. Ubicación de los instrumentos.

Algunos detalles técnicos sobre el arreglo son los siguientes:

- El espaciamiento entre cada estación fue variable entre 2 y 4 km.
- La adquisición de datos se realizó durante 18 días.
- El registro se realizó a una frecuencia de 125 Hz.
- Las profundidades registradas por los instrumentos fueron entre 600 y 1400 m.

El estudio se realizó a bordo del Buque Oceanográfico Alpha Helix del CICESE. Los instrumentos utilizados son llamados OBEM, por sus siglas en inglés: *Ocean Bottom Electromagnetic receiver* (Figura 2). Son receptores formados por dos magnetómetros que miden las componentes horizontales del campo magnético y dos dipolos eléctricos ortogonales de 10 metros cada uno, para medir las componentes horizontales del campo eléctrico.

El registrador contiene la parte electrónica donde se programan las instrucciones para dar inicio y fin al registro. Además, el instrumento tiene una brújula electrónica que registra la orientación en el piso oceánico, un sistema de boyas y un GPS que permiten una rápida recuperación del equipo al finalizar la campaña. El sistema de medición es compacto para reducir el movimiento ocasionado por las corrientes oceánicas de fondo y para facilitar las operaciones en barco (Ueda et al., 2014).

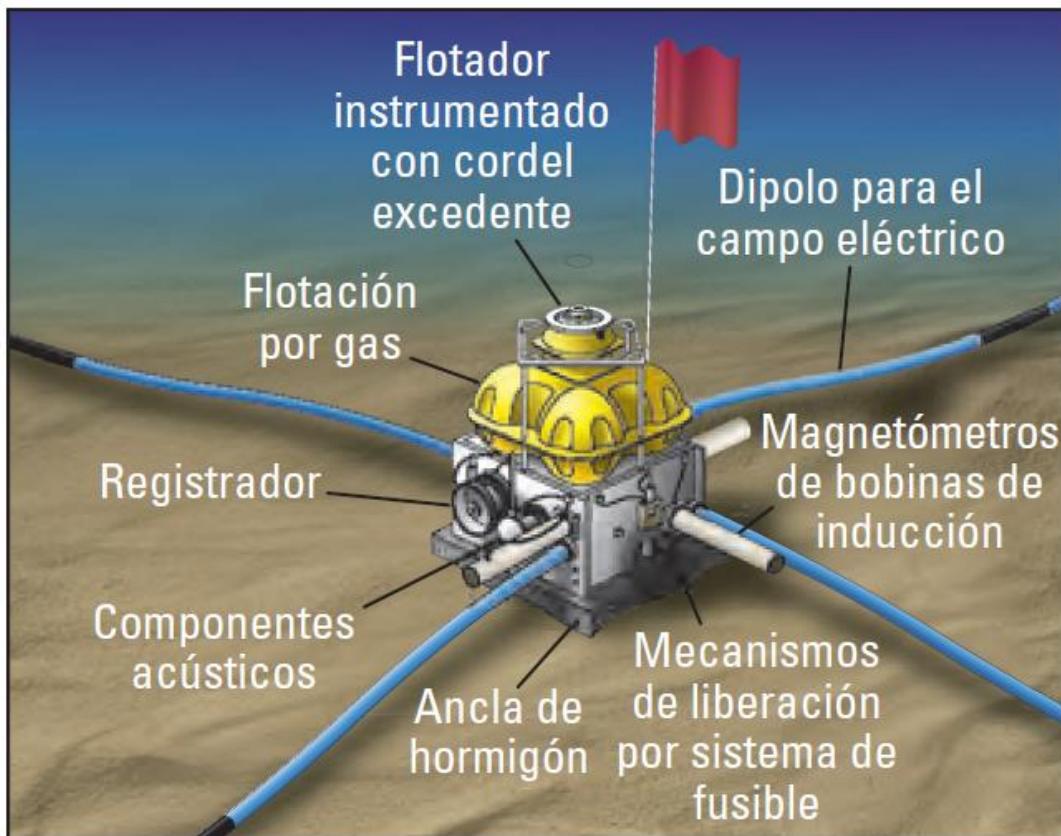


Figura 2. Instrumentos de medición OBEMs (Brady et al., 2009)

Procesamiento e Inversión

Se empleó el software MARE2DEM, desarrollado con el apoyo de *Scripps Seafloor Electromagnetic Methods Consortium*, que cuenta con códigos en lenguajes MATLAB, FORTRAN y C para el procesamiento e inversión de los datos.

Los pasos necesarios para el procesamiento son:

1. Obtener espectrogramas a partir de los datos crudos, lo que permite visualizar zonas ruidosas así como observar efectos periódicos tales como mareas. Por lo general los canales correspondientes al campo magnético son más ruidosos debido a que el equipo es más sensible al movimiento.
2. Obtener coeficientes de Fourier, lo cual permite detectar mejor el ruido o saturación de la señal (cuando se hace CSEM), ya que en el espectro se espera que se concentren las frecuencias bajas. Se pueden editar estos coeficientes para remover las áreas ruidosas antes de continuar con el procesamiento.
3. Limpiar las señales con ayuda del código de multi-estación (Egbert, 1998), con lo que se busca señal coherente entre los instrumentos ruidosos y otras estaciones cercanas para eliminar ruido. En el mismo código se calculan los valores de impedancia.

Si se cumple la calidad deseada, se crea el modelo directo que se ingresa con los datos al código de Occam (Constable, 1987) para realizar la inversión 1D y 2D de los datos y obtener los modelos de conductividad del medio.

Resultados Preliminares

Hasta el momento se han obtenido modelos preliminares de resistividad, ya que se está realizando el análisis de distintos parámetros. En la Figura 3 se muestran las respuestas para cada estación y el modelo resultante de la inversión 2D de los datos crudos correspondientes al perfil 1 (indicado en la Figura 1).

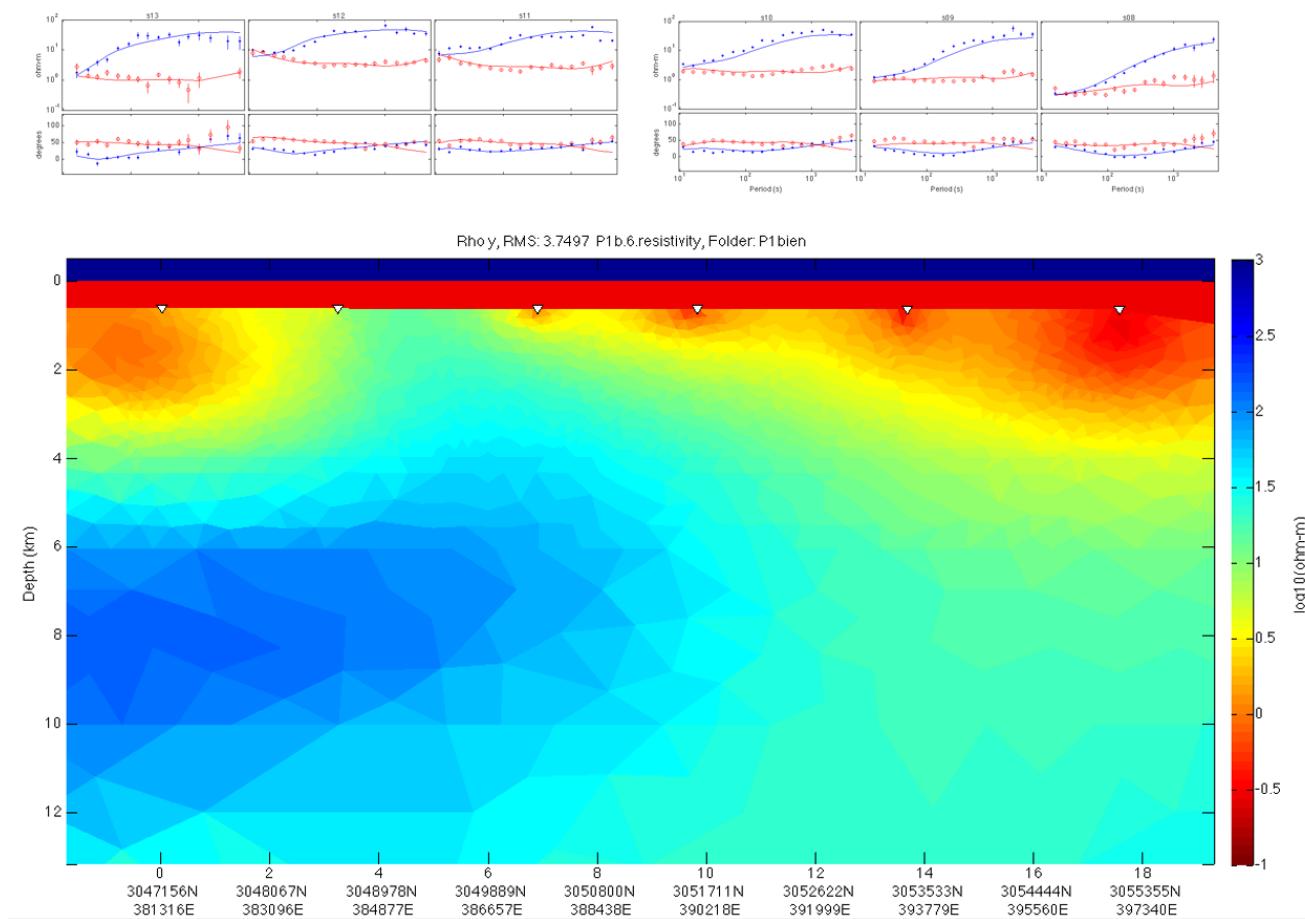


Figura 3. Arriba: respuestas de cada instrumento (datos y ajuste). Abajo: Modelo de resistividad del perfil 1.

En el panel superior se muestran las curvas de resistividad aparente y fase observadas para cada sitio, en función de la frecuencia. Como es sabido, las altas frecuencias son sensibles a la parte somera del suelo marino mientras que las bajas frecuencias presentan efectos de regiones cada vez más profundas de la corteza.

En las curvas de respuesta de la Figura 3 se puede observar que la resistividad aparente para las altas frecuencias toma distintos valores en cada sitio de observación, variando desde 0.3 Ohm-m en

el sitio 08 en el extremo este del perfil, hasta alrededor de 10 Ohm-m en los sitios 11 y 12 hacia la parte occidental del perfil. Cabe mencionar que en los tres perfiles se observaron efectos similares.

Es de esperarse que, siendo el piso oceánico homogéneo en su parte más somera, la resistividad aparente en altas frecuencias deba también tener valores similares, generalmente entre 1 y 2 Ohm-m debido a la saturación de agua salada.

En la Figura 4, correspondiente al perfil 3, se puede observar que tres de las curvas inician en valores cercanos a 1 Ohm-m mientras que otras tres inician con valores más pequeños, alrededor de 0.3 Ohm-m. En el modelo, esto produce valores de resistividad muy bajos, incluso más bajos que el valor correspondiente al agua de mar, lo cual es poco probable que ocurra en la realidad. Este efecto puede deberse a la influencia de heterogeneidades someras que distorsionan el campo eléctrico y hacen que las curvas de resistividad aparente se desplacen verticalmente o incluso por una topografía pronunciada.

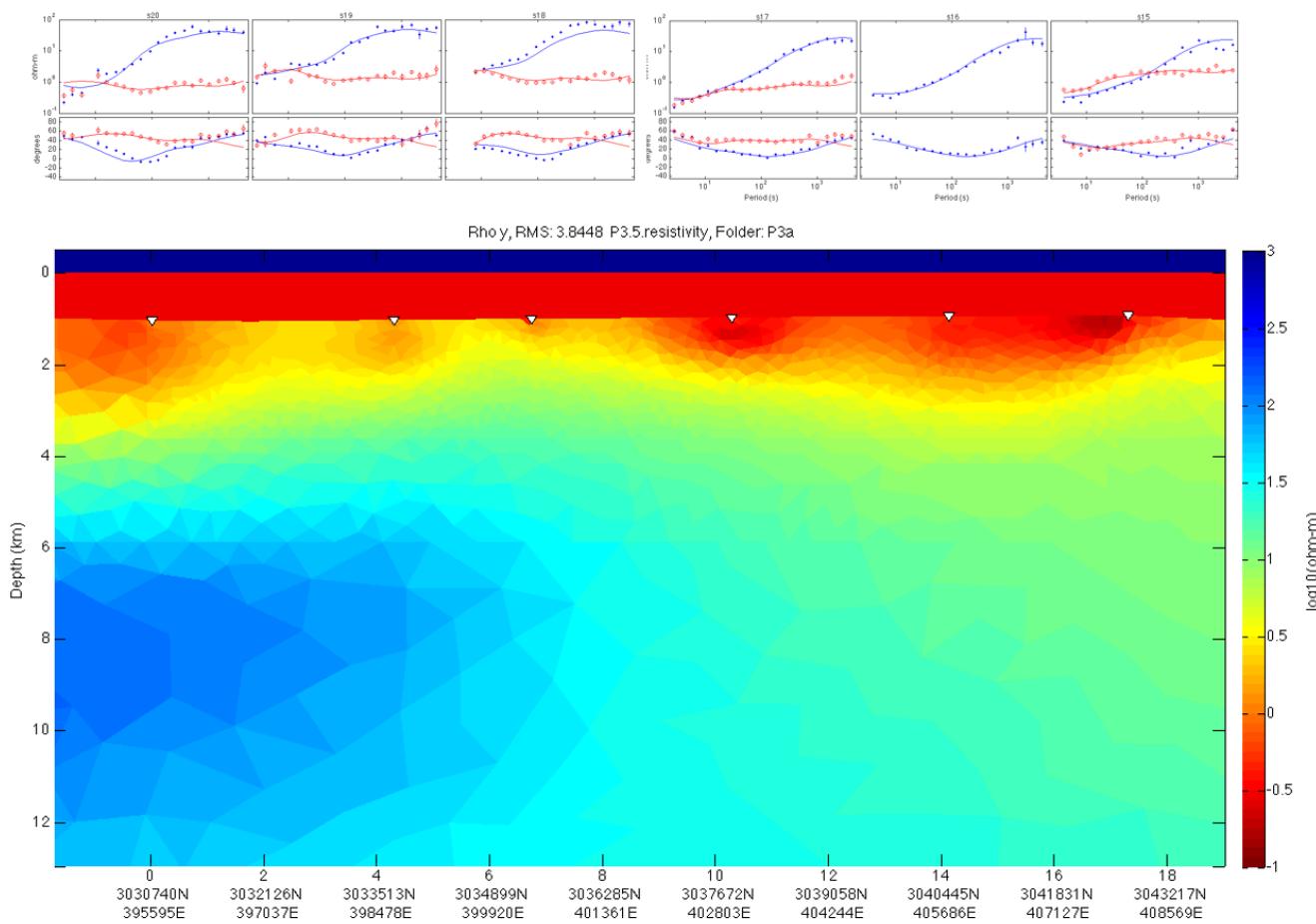


Figura 4. Arriba: Curvas de datos y ajustes para cada estación del perfil 3. Abajo: Modelo 2D de resistividades correspondiente al perfil 3.

En el instrumento del sitio 16 falló uno de los canales de medición del campo eléctrico, por lo que sólo se tiene la resistividad aparente de uno de los modos de polarización, como puede

verse en la respuesta de ese sitio (Fig. 4). Tomando en cuenta este fenómeno y considerando que el piso oceánico debe ser homogéneo en su parte más somera, las curvas con valores bajos se multiplicaron por un factor para llevar las curvas al mismo rango de resistividad aparente que presentan las tres primeras estaciones. El resultado obtenido se muestra en la Figura 5.

Como se observa en la Figura 5, los modelos varían al realizar la modificación, pues lo que parecía un cuerpo resistivo en la zona oeste del perfil en el primer modelo (Fig. 4), ahora cambia a lo que parece una capa más resistiva con un cuerpo ligeramente más conductor en la parte central. Se observa el mismo comportamiento en los tres perfiles.

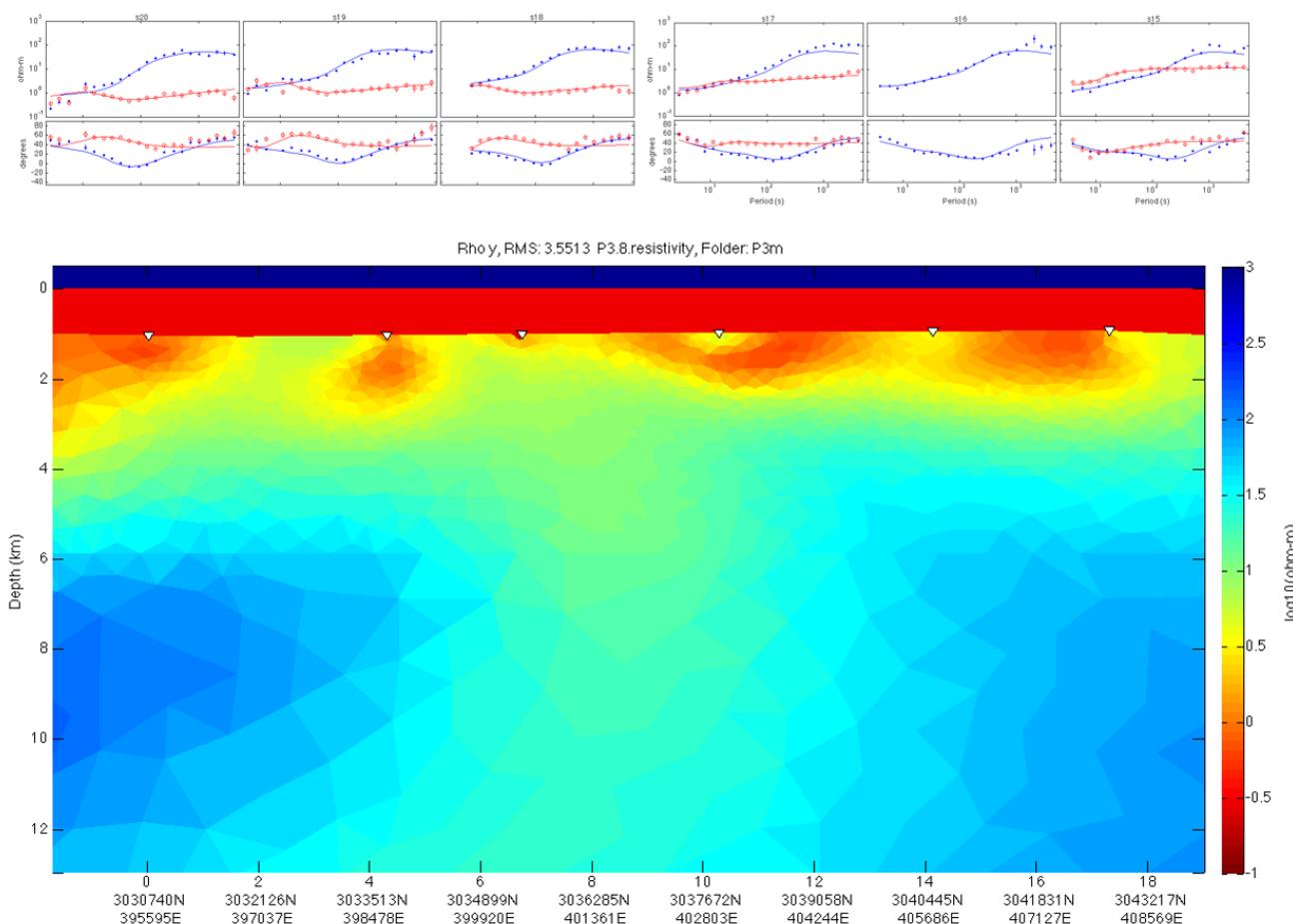


Figura 5. Arriba: Respuestas para cada sitio del perfil 3 con los valores modificados para tres estaciones. Abajo: modelo 2D de resistividades obtenido de los datos modificados.

Discusión

Es importante evaluar los recursos geotérmicos marinos potenciales que existen en México, a fin de que el país esté preparado para aprovecharlos en cuanto se superen las barreras de conocimiento y desarrollo tecnológico que actualmente lo impiden.

Este estudio es de importancia para el país ya que es la segunda vez que se implementa el método magnetotelúrico marino con fines de exploración geotérmica en México y es la primera exploración realizada en esta zona del Golfo de California.

Los modelos presentados son resultados preliminares e ilustran el cuidado que debe tenerse en la fase de interpretación, dado que algunos efectos espurios en las curvas de resistividad aparente pueden llevar a modelos muy diferentes y derivar en interpretaciones geológicas erróneas.

Deben hacerse todas las consideraciones necesarias para la construcción de modelos, y no quedarse con el primer resultado que se obtenga ya que hay muchos factores que influyen en los datos observados que no dependen de la resistividad del subsuelo y que llevan a modelos equivocados.

Continúa el análisis de los modelos resultantes y el trabajo con los datos, con el fin de obtener el modelo de resistividades que más y mejor información proporcione y que permita realizar una evaluación acertada de la zona de estudio.

Referencias

- Brady, J., et al. (2009). Electromagnetic Sounding for Hydrocarbons. *Oilfield Review Spring 2009*, Vol. 21, No. 1, pp. 4-19.
- Constable, S., et al. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, Vol. 52, Mo.3, pp. 289-300.
- Constable, S. (2013). Review paper: Instrumentation for marine magnetotelluric and controlled source electromagnetic sounding. *Geophysical Prospecting* 61 (Suppl. 1), pp. 505–532.
- Degens, E.T., and Ross, D.A. (1969). *Hot Brines and heavy metal deposits in the Red Sea; a geochemical and geophysical account*. Springer-Verlag, New York.
- Egbert, G. (1998). *MULTMTRN: A Program for Multiple Station Analysis of Magnetotelluric Data*. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Oregon State University.
- Fabriol et al. (1999) Backscattering and geophysical features of volcanic ridges offshore Santa Rosalía, Baja California Sur, Gulf of California, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 93, pp. 75-92.
- Hiriart Le Bert, G. (2009). Potencial energético del Alto Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 61, No. 1, pp. 143-146.
- Prol-Ledezma, R.M., y Canet, C. (2014). Evaluación y explotación de los recursos geotérmicos del océano. *En la frontera final: el océano profundo*, pp. 11-30)
- Ueda, T., et al. (2014). A new marine magnetotelluric measurement system in a shallow-water environment for hydrogeological study. *Journal of Applied Geophysics*, 100, pp. 23-31.