

Investigación geofísica en la fosa de Santa Lucía, Uruguay

Jorge Eduardo de los Santos Gregoraschuk¹
Julián Andrés Ramos Cavallo²
Fernando Corbo Camargo³
Manuel Araneda Cabrera⁴
Álvaro Araneda Avenaño⁵
Alfonso Nicolás Flaquer Barrios⁶

Recibido el 17 de abril de 2019; aceptado el 31 de mayo de 2019

Resumen

En este trabajo se investiga el sector sudeste de la fosa tectónica del río Santa Lucía, ubicada al sur de Uruguay, mediante el empleo de métodos geofísicos de exploración. En particular, gravimetría, sondeos magnetoteléuticos y eléctricos (SEV y Tomografía eléctrica). El interés de explorar dicha fosa radica en determinar su geometría, reconocer la posible existencia de acuíferos profundos, su desarrollo y la factibilidad de termalismo debido al gradiente geotérmico (3°C cada 100 m de profundidad). Se adquirieron, procesaron e invirtieron 121 estaciones gravimétricas dispuestas en cuatro perfiles y diez sondeos magnetoteléuticos (MT). Los resultados indican que la fosa se profundiza hacia el SE, alcanzando espesores sedimentarios que superan los 800 m. Por lo tanto, a partir de nuestros resultados se podría extraer agua entre los 800-900 m de profundidad en dicha zona (SE). Los episodios arenosos o fracturados en profundidad podrían albergar aguas termales, cuya temperatura sería de aproximadamente 36 to 40°C a partir del gradiente geotérmico del país.

Palabras clave: *Fosa Santa Lucía, exploración geofísica, gravimetría, sondeos.*

.....
¹ Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay. Correo electrónico: jedls@fing.edu.uy

² Departamento del Agua, Centro Universitario Regional (Cenur) Litoral Norte, Udelar, Uruguay. Correo electrónico: jramos@unorte.edu.uy

³ Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México. Correo electrónico: fercorbo@geociencias.unam.mx

⁴ Servicios Geofísicos en Minería e Ingeniería (SEGMI), Santiago, Chile. Correo electrónico: segmi@netexpress.cl

⁵ Servicios Geofísicos en Minería e Ingeniería (SEGMI), Santiago, Chile. Correo electrónico: aaraneda@segmi.cl

⁶ Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay. Correo electrónico: aflaquer@fing.edu.uy

Abstract

In this work, the southeast sector of the tectonic fossa of the Santa Lucía River, located in southern Uruguay, is investigated through the use of geophysical methods of exploration. In particular, gravimetry, magnetotelluric and electrical soundings. The interest of exploring this graben lies in determining its geometry, recognizing the possible existence of deep aquifers, its development and the feasibility of thermalism due to the geothermal gradient (3 °C every 100 m deep). 121 gravimetric stations arranged in four profiles and ten magnetotellurics (MT) soundings, were acquired, processed, and inverted. The results indicate that the graben deepens towards the SE, reaching sedimentary thicknesses that exceed 800 m. Therefore, from our results, water could be extracted between 800-900 m deep in that area (SE). The sandy or deeply fractured episodes could harbor hot springs, whose temperature would be approximately 36 to 40 °C from the geothermal gradient of the country.

Key words: *Santa Lucia graben, geophysical exploration, gravimetry, magnetotelluric soundings.*

Introducción

La cuenca del río Santa Lucía está contenida en seis departamentos de Uruguay (Florida, San José, Canelones, Montevideo, Lavalleja y Maldonado). Tiene 12 000 km², y el río principal alcanza una longitud de 248 km (Rosello *et al.*, 2017). En el interior de la cuenca se encuentra la fosa tectónica de este estudio (fosa de Santa Lucía), ocupando parte de los cuatro departamentos centrales citados. Está limitada por dos fallas principales de rumbo N 60-70 E y en su borde oriental por fallas en gradería en dirección N-S. Se desarrolla en 120 km de largo por 45 km de ancho, componiendo un complejo estructural con dos grabens y un horst (Figura 1). Esta investigación se centra en el sur de dicha fosa, al SE del departamento San José, en su límite con los departamentos Montevideo y Canelones con una extensión de 533 km².

Se tiene referencia de una importante y variable profundidad de la fosa en ese sector (Bossi, J. & Navarro, R., 1988; Veroslavsky *et al.*, 2004; Rosello *et al.*, 2017), donde la mayoría de estos trabajos se refieren al estudio del sistema acuífero Raigón, el cual es un valioso recurso hídrico para Uruguay. Por lo tanto, la profundidad de investigación es somera y se desconoce el perfil sedimentario más allá de la Fm. Fray Bentos, piso del SAR (De los Santos *et al.*, 1998).

Se conoce que el graben de estudio, en su sector SE, posee un paquete sedimentario de cientos de metros debido a la información de dos perforaciones (Libertad y Rincón de la Bolsa) que se ubican dentro del área de estudio (Figura 3A). La perforación Libertad posee un paquete sedimentario de 142 m de origen Cenozoico subyaciendo el basamento cristalino (De los Santos, J. *et al.*, 1998;

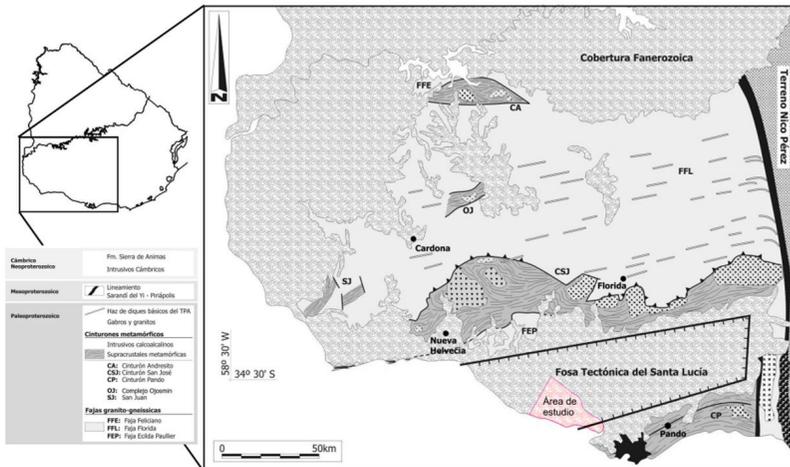


Figura 1. Ubicación del área de estudio en la fosa tectónica del río Santa Lucía (Modificada de Maldonado et al., 2003).

De los Santos, J. *et al.*, 1999). La perforación Rincón de la Bolsa, posee un paquete sedimentario de 801 m, sin encontrar las rocas cristalinas del fondo de la fosa. La descripción litológica de dicho pozo puede resumirse en: 0m-6m, Fm Villa Soriano y limo arenoso verde; 6 m-95 m Fm. Fray Bentos; 95 m-801 m, Fm. Migueles (sedimentos cretácicos) (Bossi, J. & Navarro, R., 1988). Por lo tanto, para esta investigación se tiene la premisa que el graben de estudio se profundiza hacia el SE.

Métodos geofísicos empleados

Con base en afloramientos de la roca cristalina del basamento y la información de las perforaciones Libertad y Rincón de la Bolsa (De los Santos, J. *et al.*, 1998; De los Santos, J. *et al.*, 1999; Bossi, J. & Navarro, R., 1988), que indican un espesor de cientos de metros (> 800 m) se decidió utilizar mediciones gravimétricas y magnetotelélicas para generar modelos geofísicos profundos del graben.

A partir de la gravimetría, se mide la aceleración de gravedad sobre un terreno con el fin de detectar las variaciones de densidades en las unidades geológicas presentes en el subsuelo. El procedimiento es hacer las mediciones en superficie en distintos puntos distribuyéndolos en toda el área de estudio. Con ello se pretende identificar la profundidad del basamento, que siendo de origen ígneo metamórfico (Veroslavsky *et al.*, 2004) posee una densidad mayor al medio sedimentario que lo sobryace.

El método magnetotelúrico (MT) se creó para el estudio y modelación de cuencas profundas (Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953; Vozoff, 1972). Esta característica se debe a que es un método pasivo de exploración, donde el equipo mide los campos eléctricos y magnéticos que fluyen naturalmente en el subsuelo a diferente profundidad con un mismo arreglo geométrico de sus sensores (Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953; Vozoff, 1972). A partir de este método, se puede obtener información desde la superficie hasta cientos de kilómetros de profundidad, la cual es función de su frecuencia de muestreo donde a altas frecuencias se traduce en información más somera respecto a bajas frecuencias. El resultado final de las mediciones MT son curvas de resistividad y fase en función de la frecuencia, a partir de las cuales se invertirán para obtener las variaciones la resistividad eléctrica del subsuelo en función de la profundidad. La resistividad eléctrica de un basamento (Orellana, 1972) es mucho mayor que la resistividad eléctrica en un medio sedimentario, por lo que es posible distinguir el contacto entre ambos medios geológicos. El agua subterránea, por las sales disueltas que contiene, se comporta como un electrolito que permite a las corrientes eléctricas fluir en el subsuelo por lo que al medir la resistividad del subsuelo se tiene posibilidad de identificar la presencia de acuíferos (El-Qady, 2006, citado por Meli'i, Njandjock y Gouet, 2011). Se debe tener presente que, el hecho de que el agua contenida en las rocas sea un factor decisivo en su resistividad no implica que se esté detectando el agua directamente. Lo que se busca con esta propiedad son estructuras y capas acuíferas, y la diferenciación entre materiales permeables e impermeables. En cada prospección con fines hidrogeológicos, se requiere que los objetivos sean claramente fijados en términos de resistividades (Orellana, 1972).

Mediciones, resultados y discusión

Los datos gravimétricos fueron obtenidos con un gravímetro LaCoste y Romberg, Modelo G y N° de serie 463. La precisión de este instrumento es de la centésima de un miligal, (10^{-3} miligales) y una deriva instrumental aproximada de 1 [mgal/mes].

Para la calibración y cierres parciales de la gravedad se utilizó la estación gravimétrica ubicada en la Fortaleza del Cerro de Montevideo (Figura 2).

Las mediciones comenzaron en octubre de 2015, donde en dicho mes se midieron 111 estaciones gravimétricas distribuidas en 4 perfiles, con una separación entre ellas de 1 000, 500 y 300 m dependiendo del caso y diez estaciones de control (Figura 3B). La zona investigada, se caracteriza por tener una topografía suave, con pocos cambios de elevación por su cercanía a la costa. Para determinar las elevaciones en cada estación, se utilizó la información del Modelo Digital del Terreno (MDT) de la Dirección General de Recursos Naturales del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP, 2016) del Uruguay (Figura 3B). Complementariamente, un grupo de estaciones fueron medidas



Figura 2. Estación gravimétrica Fortaleza (inicio del trabajo).

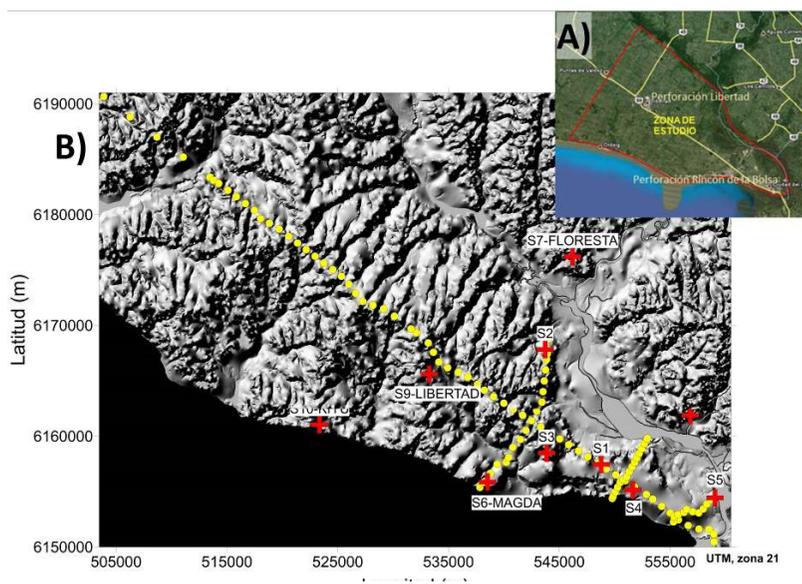


Figura 3. A) Ubicación de la zona de estudio; B) Estaciones gravimétricas en color amarillo y estaciones MT en color rojo. La topografía corresponde al MDT (MGAP, 2016).

con un sistema de posicionamiento global (GPS) diferencial. Las diferencias en elevación comparadas con las correspondientes al MDT no superaron los 4 m. Se realizó un análisis de sensibilidad en los modelos invertidos y estas diferencias en cuanto a la altura es de menor a 2 mgal, por lo que puede despreciarse. Con el fin de determinar el efecto regional gravimétrico se propuso el perfil principal de manera tal que ambos extremos alcancen los afloramientos observados. Las profundidades fueron calculadas con un contraste de densidades de $0.67 \text{ (g/cm}^3\text{)}$, considerando que las rocas del basamento existentes en el área tienen una densidad de $2.67 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ y que la densidad del relleno sedimentario es de $2.0 \text{ (g/cm}^3\text{)}$. Cabe destacar que, para los cálculos, se forzó el modelo a pasar por los dos pozos que son puntos de referencia (Libertad, con basamento a 142 m y Rincón de la Bolsa, con basamento que supera los 801 m).

Del análisis de la anomalía de Bouguer se calculó un modelo de profundidades del basamento con el programa Oasis Montage (Geosoft). El mapa isobático se presenta en la Figura 4, en el cual se aprecia que las profundidades mayores del basamento rocoso se ubican al sudeste del área de estudio, con profundidades que superan los 800 m.

Los datos magnetotelúricos fueron adquiridos con un equipo modelo MTU-5A (Phoenix Geophysics) con una distancia de los dipolos eléctricos de 50 m. Las componentes magnéticas de alta frecuencia se midieron con bobinas modelo AMTC30, mientras que las de baja frecuencia se midieron con bobinas MTC-50. Se adquirió un total de 10 estaciones (Figura 4) cuyas coordenadas (UTM 21S) se presentan en la Tabla 1.

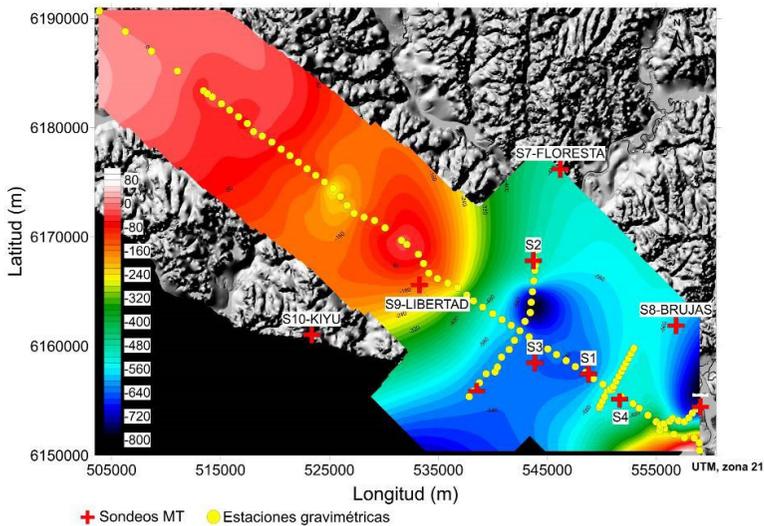


Figura 4. Mapa isobático. Cruces rojas estaciones MT, círculos amarillos estaciones gravimétricas.

Tabla 1
Ubicación de los sitios relevados mediante sondeos Magnetotelúricos

Sondeo	Tipo	Coordenadas UTM [m]		Elevación [m]
		X	Y	
S1	Exploratorio	548.791,05	6.157.459,00	20
S2	Exploratorio	543.720,43	6.167.834,59	20
S3	Exploratorio	543.857,64	6.158.484,33	29
S4	Exploratorio	551.644,54	6.155.160,81	24
S5	Exploratorio	559.057,82	6.154.444,67	8
S6	Exploratorio	538.533,76	6.155.868,86	37
S7	Exploratorio	546.197,98	6.176.213,44	32
S8	Paramétrico	556.824,01	6.161.895,03	11
S9	Exploratorio	533.264,48	6.165.607,94	34
S10	Exploratorio	523.366,11	6.161.039,39	33

Para el procesamiento de los datos se utilizaron los programas SSMT2000 v0.6.0.69 y MTeditor v0.99.2.106, provistos por el fabricante del equipo. La inversión de los datos magnetotelúricos ejecutados se realizó con el programa WINGLINK v.2.2.01.

Se trabajó con más de una hipótesis a efectos de estudiar el peso de las primeras capas resistivas y de las capas resistivas más profundas, dando preeminencia a unas u otras, consecutivamente. Según el criterio considerado, se asoció a la roca masiva cuando las resistividades son superiores a 200 ohm-m, considerando que en algunos casos se tratara de rocas con alteraciones o saturadas de agua; en casos de rocas tenaces, la resistividad debería superar los 500 ohm-m. La Figura 5, presenta la inversión 1D del sondeo S1 y el ajuste obtenido de las curvas de resistividad y fase en función de la frecuencia.

El modelo se ajusta con un comportamiento característico de rocas sedimentarias hasta los 700 m de profundidad. A partir de dicha profundidad se observa que el valor de la resistividad tiene un comportamiento creciente con la profundidad hasta cotas inferiores a los 1 000 m. Este comportamiento puede interpretarse como la transición de la roca no masiva a masiva. En la Figura 6, se muestran únicamente los modelos 1D obtenidos para los sondeos restantes.

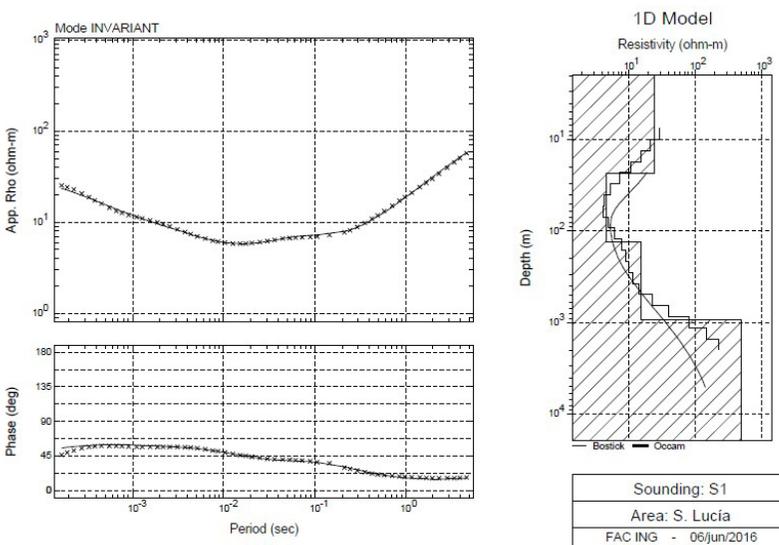


Figura 5. Modelo 1D ajustado del sondeo S1.

El Sondeo S2 tuvo un comportamiento muy distinto a todos. Las curvas de resistividad aparente se separan a frecuencias de 100 Hz aproximadamente (alrededor de 100 m de profundidad, skin depth, Vozoff, 1972), indicando que el medio tiene un comportamiento bidimensional o tridimensional, por lo que el punto escogido para la medición debe encontrarse en el borde de la fosa y por lo tanto su inversión 1D no traería información certera de la profundidad del basamento. El sondeo S3 presentó un medio con una resistividad mayor del resto de los sondeos desde la superficie, 350 ohm-m, manifestando la profundidad del basamento a 170 m. El Sondeo S4 tiene un comportamiento similar al resto de los sondeos, un medio sedimentario desde la superficie y la profundidad de la roca del basamento supera los 350 m de profundidad. El Sondeo S5 presentó a 130 m de profundidad un ascenso de resistividad y a los 550 m la presencia de la roca del basamento. El Sondeo S6 distingue la presencia de arenas hasta los 40 m de profundidad y sedimentos arcillosos hasta 200 m de profundidad, a partir de la cual la roca se hace evidente. El Sondeo S7 presenta un comportamiento predominantemente arcilloso hasta los 800 m de profundidad. El Sondeo S9, cercano al pozo Libertad, muestra un sedimento arcilloso hasta los 140 m de profundidad, subyaciendo se observa un escalón que aumenta la resistividad que insinúa la presencia de roca a los 400 m. El escalón mencionado entre los 140 m y 400 m de profundidad genera incertidumbre en cuanto a la profundidad de la roca. Según el mapa isobático calculado por la gravimetría,

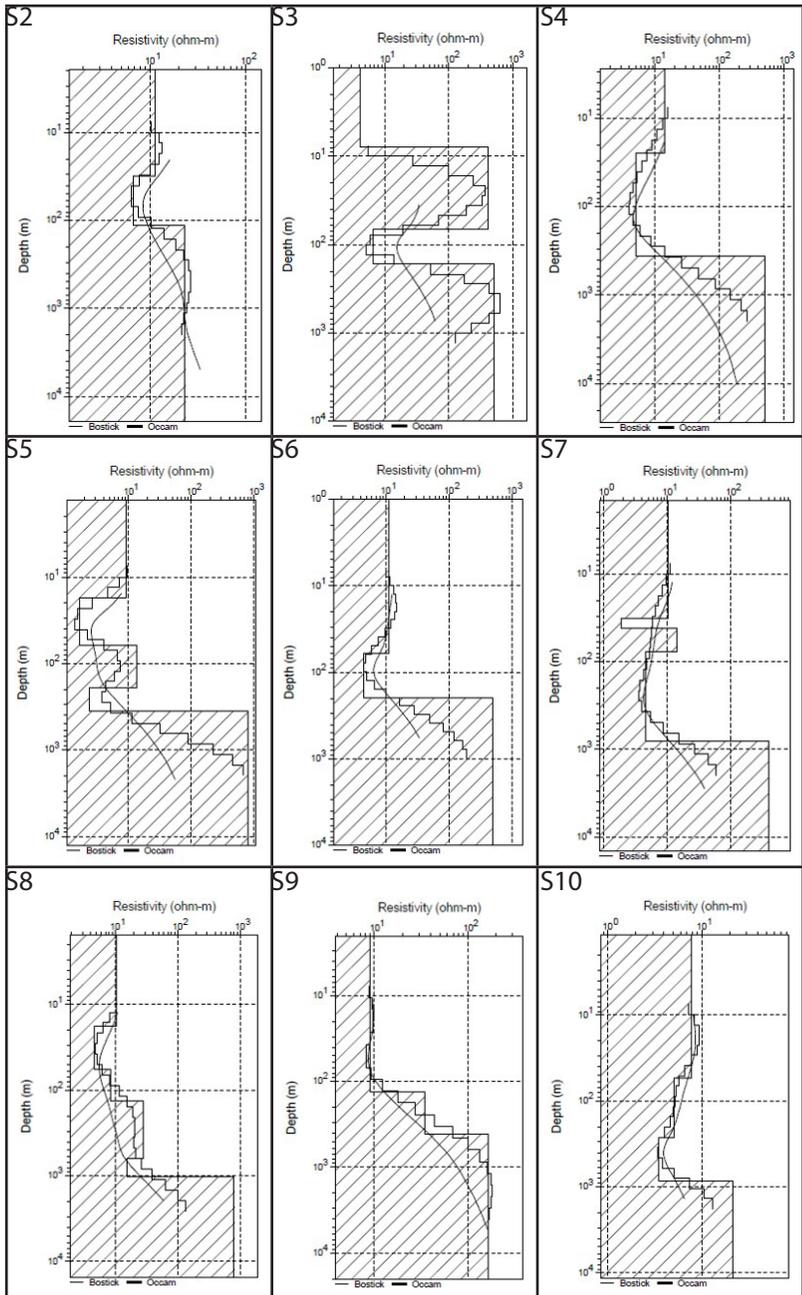


Figura 6. Modelos 1D de los sondes MT.

la profundidad del basamento se encontraría a los 140 m de profundidad y si eso fuera correcto la resistividad del mismo estaría en torno a los 50 ohm-m, cosa que difiere de la hipótesis original que considera el basamento con resistividades mayores a los 200 ohm-m en el caso de rocas alteradas y saturadas en agua. El sondeo S10, realizado en las cercanías de Kiyú, se distingue un perfil arcilloso que supera los 800 m de profundidad, por debajo se podría estimar la presencia de roca.

Posteriormente a las inversiones 1D, se generó una inversión 2D con las estaciones S9, S3, S1, S4 y S5. Dichas estaciones forman un perfil prácticamente superpuesto al perfil 1 gravimétrico. Para dicha inversión se consideraron los sondeos según su adquisición; es decir a 0° (TE hacia el norte) y se utilizó el algoritmo de gradientes conjugados no lineales (NLGC, Rodi Mackie, 2001). Para generar una buena inversión es importante el diseño de una malla adecuada a efectos de alcanzar resultados numéricos más precisos. Para evitar inestabilidades de cálculo, los elementos de la malla presentan un refinamiento mayor en zonas de interés. El modelado se realizó por ensayo y error, partiendo como modelo inicial un mallado homogéneo con una resistividad de 100 ohm-m. Posteriormente, se fue variando el espesor de la malla para aumentar el número de celdas y obtener un mayor detalle en zonas someras y en la cima del basamento, que en este caso es el objetivo principal de estudio. Se invirtieron conjuntamente ambos modos de polarización, TM y TE. A los efectos de obtener el mayor ajuste de los datos, no se utilizaron las curvas suavizadas y se incluyeron los errores en los datos. Se invirtió ajustando simultáneamente las curvas de resistividad y fases, usando un error del 10% para resistividad y 5% para las fases. Cuando no se obtuvo un ajuste ideal en las curvas de resistividad, se efectuó una nueva inversión a partir del modelo más reciente, procurando tener la mejor precisión de los resultados numéricos con la malla y verificando la convergencia de las soluciones numéricas. El modelo final se presenta en la Figura 7 con un error RMS de 1.3.

El modelo de la inversión 2D ilustra la existencia del graben, con un horst en la zona de Libertad y la roca del basamento más profunda (>800 m) hacia Rincón de la Bolsa y el río Santa Lucía. También, se distingue que el basamento desciende entre los sondeos S3 y S1, evidenciando la complejidad dimensional de dichos sondeos.

El análisis conjunto de resultados de ambas metodologías aplicadas (gravimétrica y magnetotelúrica), permite definir zonas donde el basamento cristalino tiene una cota segura y lugares donde debería investigarse con mayor detalle su profundidad.

En el mapa isobático se distingue que en el sector SE la roca alcanzaría poco más de 800 m, con una relativa coincidencia con los sondeos magnetotelúricos cercanos, aunque hay detalles y pequeñas diferencias en cuanto a la profundidad en algunos, especialmente en los sondeos S3 y S6, que se ubican en una zona donde el mapa isobático gravimétrico indica profundidades que superan los

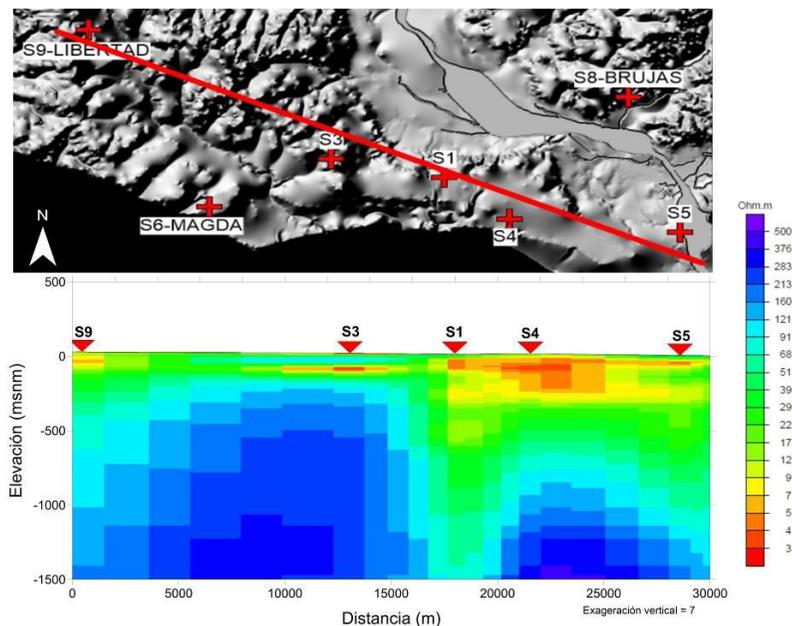


Figura 7. Inversión 2D de 5 sondeos MT.

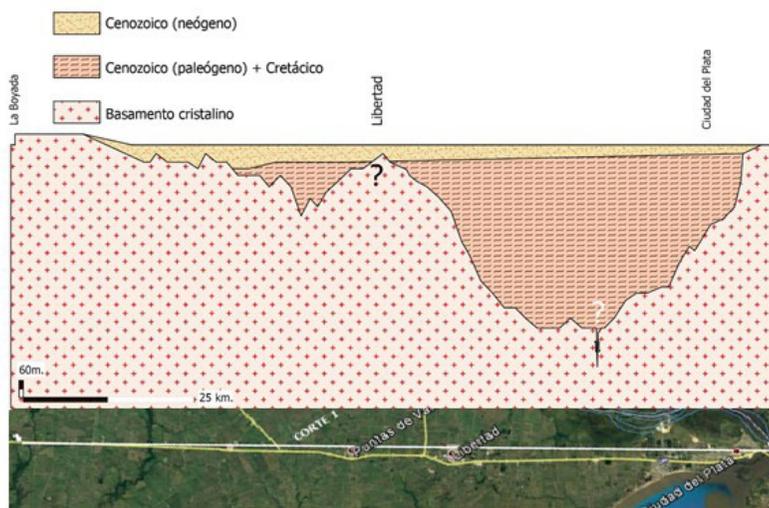


Figura 8. Corte litológico longitudinal, paralelo a la Ruta 1.

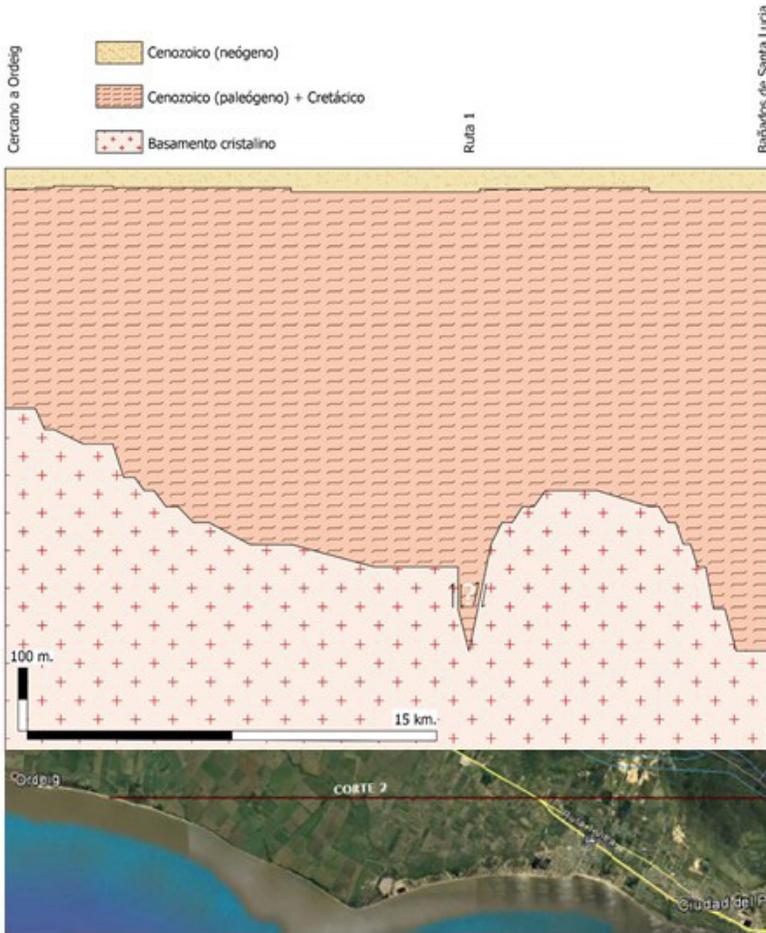


Figura 9. Corte litológico oblicuo a la Ruta 1.

500 m. Sin embargo, las profundidades del basamento encontradas por los métodos de resistividad rondan los 200 m; en la zona del sondeo S3 el basamento se encontró a 170 m, y para el sondeo S6 a 200 m con el equipo MT. Otras diferencias se encuentran en los sondeos S7 y S9, donde para el primer caso (S7) el mapa isobático muestra una extrapolación de la información gravimétrica, por lo que parecería más sustentable la profundidad del basamento brindada por el sondeo MT, y en el segundo caso (S9), la curva de resistividad del sondeo MT presenta un escalón con una resistividad intermedia que genera incertidumbre en cuanto a la profundidad del basamento.

El corolario de los resultados correspondiente al análisis conjunto de las metodologías aplicadas parece ser definitivo: la dirección NE-SO es el sector más profundo de la porción de cuenca analizada. Los demás sectores presentan la roca encima de 450 m.

Los trabajos realizados fueron ejecutados con el mayor cuidado posible, repitiendo incluso medidas de MT en dos casos. Aún así, se mantuvo la incertidumbre sobre los datos adquiridos en las cercanías de Libertad, donde se asumió que la roca se encontraba a 142 m de profundidad. El sondeo MT, que se realizara en un sitio próximo a esta ciudad, no acusaba presencia de roca antes de los 350 m.

A modo de resumen, las Figuras 8 y 9 proponen dos cortes, uno a lo largo de la Ruta 1 y otro oblicuo a ella en el sector SE de la cuenca estudiada, respectivamente.

Con signos de interrogación se muestran las dudas que permanecen tras este análisis, con el propósito de que sean retomadas y estudiadas para su aclaración.

Conclusiones

El sector comprendido entre los ríos San José, Santa Lucía y de la Plata, pertenecientes a la fosa tectónica del río Santa Lucía, presenta profundidades promedio de 200 m y más hasta alcanzar el basamento cristalino en torno a la localidad de Libertad.

Hacia ciudad del Plata (Rincón de la Bolsa) esas profundidades van desde 250 m hasta 800 m y más, existiendo una cuña de poca profundidad y afloramiento en el sector del puente que une los departamentos San José y Montevideo. Fuera del sector estudiado, parece tener un incremento en profundidad hacia el centro-norte, en la zona inmediata al río San José.

El presente estudio permitió reconocer una pequeña área de esta cuenca y, distinguir el espesor sedimentario y el piso rocoso en forma aproximada. Queda una incógnita importante sobre la profundidad real a la que los sondeos MT de mayor penetración alcanzan el basamento cristalino. Debido a la baja resistividad de las rocas presentes, no se puede confirmar si se trata de basamento fisurado o rocas de baja resistividad.

Dentro del espesor sedimentario, solamente se puede distinguir, entre los 40 m y hasta los 70 m en promedio los sedimentos correspondientes a la Fm. Raigón y a la Fm. Camacho, apoyados en forma continua sobre las formaciones Fray Bentos y Migueles, sin observarse mayores diferencias en la resistividad de estas últimas.

El Sondeo S2 dejó una zona de incertidumbre. Es conveniente en estudios posteriores, realizar un perfil con dirección normal a la posible falla, insinuada por las resistividades contrapuestas en ambas direcciones.

Será necesario realizar la adquisición con sondeos MT utilizando un rango menor de frecuencias de muestreo para alcanzar mayores profundidades y tener

mayor certidumbre de la profundidad del basamento en zonas donde las bajas resistividades encontradas propiciaron una baja profundidad de exploración.

Por último, el *horst* que la bibliografía refiere en la ciudad de Libertad debería revisarse con mayor detalle, realizando mediciones geofísicas más cercanas, ello debido a que el arreglo empleado en esta investigación con las dos metodologías geofísicas no lo identifican a profundidad somera.

Los episodios arenosos o fracturados en profundidad podrían albergar aguas termales, cuya temperatura se correspondería con el gradiente geotérmico del país (+3°C cada 100 m). La profundidad máxima de extracción alcanzaría los 800 m-900 m en el este-sudeste del área estudiada, y, posiblemente, en cercanía del sondeo S1, donde se observa un incremento de resistividad en el gradiente vertical a partir de los 700 m.

Referencias

- Bobachev, C. (2002). IPI2Win: A windows software for an automatic interpretation of resistivity sounding data. Moscow State University, 320.
- Bossi, J. & Navarro, R. (1988). *Geología del Uruguay*, tomo 2, Departamento de Publicaciones, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Cagniard, L. (1953). "Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical Prospecting", *Geophysics*, 18: 605-645.
- De los Santos, J. et al. (1998). "Modelación numérica del acuífero Raigón, sector sudeste", Facultad de Ingeniería, proyecto CONICYT-BID, Informe final.
- , (1999). Carta de vulnerabilidad del acuífero Raigón. Facultad de Ingeniería-DINAMA, Informe final.
- Loke, M.H. & Lane Jr., J.W. (2004). "Inversion of data from electrical resistivity imaging surveys in water-covered areas", *Exploration Geophysics*, 35(4): 266-271.
- Orellana, E. (1972). *Prospección geoeléctrica en corriente continua*.
- Meli'l, J., P. Njandjock & D. Gouet (2011). "Magnetotelluric method for groundwater exploration in crystalline basement complex, Cameroon", *Journal of Environmental Hydrology*, 19.
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/direccion-general-de-recursos-naturales/tramites-y-servicios/biblioteca-digital/modelo-digital-del-terreno>, consultado en 2017.
- Rodi, W. & Mackie, R.L. (2001). "Non linear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion", *Geophysics*, 66: 174-187.
DOI: <https://www.doi.org/10.1190/1.1444893>.
- Rossello, E.A.; Veroslavsky, G., de Santa Ana, H. & Rodríguez, P. (2017). *Depocentros mesozoicos y rasgos tectónicos del basamento cristalino del Río de la Plata (Argentina y Uruguay)*.
- Tikhonov, A.N. (1950). "The determination of the electrical properties of deep layers of the Earth's crust", *Dokl. Acad. Nauk. SSR*, 73: 295-297.

- Veroslavsky, G.; de Santa Ana, H. y Rossello, E.A. (2004). "Origen y evolución tectosedimentaria de los depósitos juróico-cretácicos de la región meridional del Uruguay: su vinculación con el Lineamiento Santa Lucía-Aiguá-Merín", en Veroslavsky, G., M. Ubillay & S. Martínez (eds.), *Cuencas sedimentarias de Uruguay: Geología, paleontología y recursos minerales. Mesozoico*, DIRAC, Universidad de la República de Uruguay, Montevideo, pp. 117-142.
- Vozoff, K. (1972). "The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins", *Geophysics*, 37: 98-141.