

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS METODOS GEOFÍSICOS (SEV, MT) APLICADOS EN LA ZONA TERMAL DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANI EN ARGENTINA Y URUGUAY

Fernando Corbo Camargo

IMFIA, Fac. de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay. fcorbo@fing.edu.uy
Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México. fcorbo@geociencias.unam.mx

Alejandro Oleaga Bazterrica

IMFIA, Fac. de Ingeniería, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay. aoleaga@fing.edu.uy

Jorge Arzate Flores

Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México. arzatej@geociencias.unam.mx

INTRODUCCIÓN

El Sistema Acuífero Guarani (SAG), totalmente en la cuenca Chaco-Paranense, es uno de los acuíferos más grandes del mundo, sumando 1,200,000 km² en: Argentina (19%), Brasil (71%), Paraguay (6%) y Uruguay (4%). Es fuente de agua para abasto público, riego, uso industrial y turístico termal. En la frontera Uruguay-Argentina se ha generado un gran polo turístico, donde se explotan pozos surgentes que aportan hasta 500 m³/h de agua (de 37 a 50°C). En algunos casos, para ajustar el proyecto y el costo de las perforaciones (aprox. 500.000 U\$S), previamente se han realizado sondeos eléctricos verticales (SEV). Esta técnica ha sido usada desde los años 50 en prospección de agua subterránea, mayormente somera (<500 m). La economía de equipamiento, simplicidad operativa e interpretación hacen que sea de las más utilizadas. Sin embargo, los arreglos utilizados frecuentemente requieren hasta 5 km de cable (AB/2) para alcanzar las profundidades requeridas. Los métodos electromagnéticos (en particular los métodos Audio-magnetotélurico y Magnetotélurico o AMT y MT respectivamente), usados marginalmente en agua subterránea en ésta región, son una alternativa para la exploración del SAG no solo por la versatilidad y robustez en la interpretación, sino por las profundidades de penetración que alcanzan sin el desplante de kilómetros de cables y fuentes de energía gigantescas.

OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es analizar las limitaciones, resolución, precisión y ventajas relativas de dos técnicas de sondeos geofísicos (SEV y AMT) utilizadas para la prospección profunda (>500m). El artículo se basa en el análisis de registros de pozos y de sondeos paramétricos en perforaciones del área con descripción litológica.

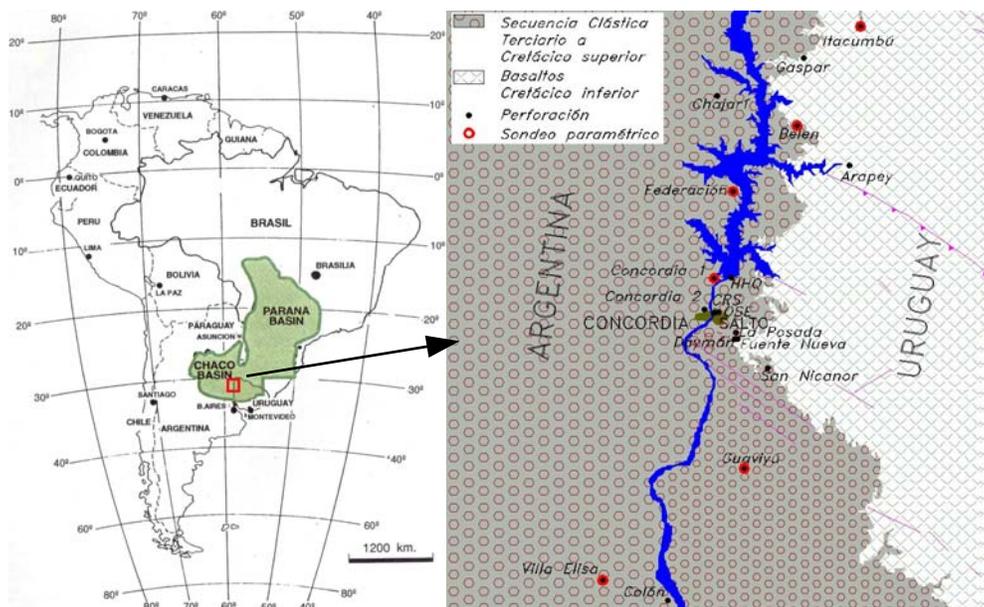


Figura 1.- Izq.- Mapa de ubicación. Der.- Mapa geológico del área de estudio

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El SAG se encuentra en el centro-este de América del Sur, entre los 12° y 35° de latitud sur y los 47° y 65° de longitud oeste (Figura 1). La zona de estudio abarca la parte este de la provincia Entre Ríos (Argentina) y el noroeste de Uruguay. Totalmente incluida en la cuenca Chaco-Paranense, el área elegida contiene sectores donde no se han detectado rocas asociables a dicho acuífero. La base de la cuenca (granitos Precámbricos) se encuentra a una profundidades de hasta 2300 m, sobre la cual se emplazaron depósitos clásticos Devónico a Pérmicos (hasta 700 m). Sobre éstos se encuentran areniscas eolo-fluvio-lacustres Triásico-Jurásicas de mas 500 m de espesor, confinadas por basaltos del Cretácico inferior cuyo espesor supera los 1000 m (Salto). Una nueva etapa sedimentaria con un espesor menor (0 a 200 m) cubre la mayor parte del área de estudio (Figura 1). La extracción de agua de las areniscas Triásico-Jurásicas que conforman al SAG ha crecido considerablemente (actualmente más de 2.500 m³/h), existiendo 13 pozos termales en uso, cinco en Argentina y ocho en Uruguay.

METODOLOGÍA

Los SEV se basan en la medición en superficie del potencial eléctrico generado por inyección de energía eléctrica, mientras que los sondeos MT se basan en mediciones de los campos eléctrico y magnético generados por corrientes que circulan naturalmente por el subsuelo. La interpretación cuantitativa de los SEV que a continuación se presentan se realizó con el programa IPI2win (Shevnin y Modin, 2003), con el cual se ajustó semi-automáticamente, imponiendo en todo caso valores resistivos dentro de los rangos de resistividad conocidos para cada litología y se condicionó a que el error de ajuste fuera menor a 5%. La interpretación de los sondeos AMT se llevó a cabo con los paquetes de software *Geotools* y *WinGlink* (algoritmo de inversión: Occam, Constable et al., 1987), suponiendo un medio unidimensional estratificado.

INFORMACIÓN UTILIZADA

La comparación entre ambos métodos se realizó utilizando SEV y sondeos MT y las descripciones litológicas y registros eléctricos de pozos profundos (>500m) existentes en la zona termal Uruguayo-Argentina. En la década de los 90, se realizaron SEVs de hasta 10 Km de apertura (Ej. Ainchil et al., 1998; Ponti y Pastore, 1993 y 1995; Ponti et al., 1997) con el fin de estimar la profundidad del agua termal. Basados en algunos de estos trabajos se realizaron perforaciones termales dentro del área de estudio. Recientemente se llevó a cabo un estudio hidrogeológico en el norte de Uruguay (Oleaga, 2002) que comprendió, entre otros, la realización de 34 sondeos AMT y MT, siete paramétricos en pozos profundos, cuatro de ellos en el área de estudio (Figura 1). En la Tablas 1 se muestran los pozos analizados así como el tipo de sondeo paramétricos disponible.

Tabla 1- Pozos con sondeos paramétricos

Perforación	País	Descripción litológica	Perfilaje	Sondeo Paramétrico
Federación	Argentina	X	X	SEV
Villa Elisa	Argentina	X		SEV
Concordia 1	Argentina	X	X	SEV
Quebracho (Guaviyú)	Uruguay	X	X	AMT-MT
Belén	Uruguay	X	X	AMT-MT
Itacumbú	Uruguay	X	X	AMT-MT

Tabla 2- Rangos de resistividad eléctrica para cada litología perforada (a partir de perfilajes)

Litología	Período	Resistividad eléctrica (Ohm-m)	
		Intervalo	Valor
Sedimentos o rocas	Terciario al presente	4 a 90	
R. sedim (areniscas arc.)	Cretácico Superior	11 a 15	12
Basalto	Cretácico Inferior	50 a 650	200
Rocas sedimentarias	Jurásico-Triásico	17 a 70	30
Diabasas	Triásico ó Cretácico	450 a 600	500
Rocas sedimentarias	Devónico-Pérmico	3 a 14	9
Basamento	Precámbrico	480 a 520	500

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los registros de los pozos se obtuvo un rango de valores de resistividad eléctrica para cada litología perforada. Los intervalos de resistividad eléctrica y los valores medios para cada litología identificada se muestran en la Tabla 2. La cubierta superior de sedimentos y Terciarios presenta variabilidad vertical en cuanto a los valores de resistividad eléctrica, dado que se pueden encontrar estratos con importante diferenciación litológica localmente. En cambio, las rocas sedimentarias Cretácicas presentan mayor homogeneidad y se caracterizan por su baja resistividad, básicamente por su contenido de agua y de arcilla. El estrato de basalto que le subyace, también presenta un amplio rango de valores de resistividad, principalmente debido a la existencia de zonas alteradas dentro de ésta unidad. En éstas últimas se observan valores de 50 Ohm-m, mientras que en la parte sin alteración alcanza hasta 650 Ohm-m. Las sedimentitas Jurásico-Triásicas presentan relativa poca variación en los valores de resistividad, cuyo valor medio de 30 Ohm-m es típico de areniscas saturadas con agua no mineralizada. El paquete subyacente de rocas sedimentarias Devónico-Pérmicas presenta alta conductividad eléctrica, con un valor de resistividad media de apenas 9 Ohm-m. Las intrusiones de diabasa en cambio presentan una resistividad eléctrica alta y bastante uniformidad cuyo valor medio es de 500 Ohm-m, próximo al valor del basalto no alterado. Finalmente, el basamento presenta poca variación de punto a punto en los valores observados de resistividad que oscila alrededor de los 500 Ohm-m.

A partir de los valores medios de la Tabla 2, se generaron SEV sintéticos para determinar aperturas mínimas necesarias para detectar el basamento y para verificar si el registro eléctrico del pozo es solución del sondeo. Asimismo, se interpretaron los SEV paramétricos, obteniendo en cada caso las soluciones posibles que cumplieran la condición de ajustar la curva de campo con un error inferior al 5% y que los valores de resistividad se adecuaran a la información indicada en la Tabla 2. Esto permitió obtener un rango de espesores y resistividad para cada sondeo asociada a cada litología. La perforación Villa Elisa (Silva Busso, 1999) muestra 350 m de sedimentos, 630 m de basaltos y debajo de éstos areniscas permeables. Analizando en conjunto la descripción litológica con los valores de resistividad indicados por Ainchil et al. (1998) en su interpretación del SEV paramétrico, se observa que el conjunto espesor-resistividad genera una curva diferente a la de campo. Después de realizar varios ajustes, todos con error inferior al 3%, usando valores de resistividad correspondientes a la litología del área, los resultados obtenidos muestran que un sondeo SEV con 3200 m de AB/2, no alcanza la base del basalto y el techo del mismo puede ser detectado a una profundidad de entre 240 y 470 m, debido a la gran correlación entre la resistividad y espesor de los paquetes litológicos superiores (Golstman y Porohova, en Shevnin y Modin, 2003). La incertidumbre en espesores, disminuye al conocer más precisamente la resistividad de las rocas del subsuelo. En éste caso se determinó que dicho SEV no aporta suficiente información para detectar el techo del SAG (base del basalto) y menos aún para definir la resistividad del basamento. En función de la litología perforada, dicho SEV debería haber tenido al menos 6 km de semiapertura (AB/2) para detectar el SAG y alrededor de 10 km para detectar el basamento.

El SEV paramétrico a la perforación Federación (Ponti y Pastore, 1993, en Silva, 1999) es el que presenta mayor apertura entre electrodos de emisión (16 Km), detectando un importante cuerpo resistivo, otro conductivo y la influencia de un cuerpo más profundo altamente resistivo. Se detectó la base del basalto a una profundidad de entre 680 a 1150 m y el basamento cristalino desde 1250 hasta 1800 m. El pozo mostró 50 m de rocas sedimentarias sobre el basalto. Cercano a la base de éste, se intercalan estratos de algunos metros de areniscas hasta los 810m a partir de lo cual continúan únicamente las areniscas. La perforación Concordia mostró 60 m de sedimentos, 710 m de basalto, casi 200 m de intercalaciones de areniscas y basalto, y areniscas desde los 965 hasta los 1160 m. El modelo de resistividad propuesto para éste sitio (Proyecto La Paz, 1996, en Silva, 1999) muestra un pequeño estrato (2.4 m) de alta resistividad (380 Ohm.m) y una capa conductiva de 140 m que condicionan fuertemente el ajuste obtenido, sin encontrarse justificación litológica en el pozo. No obstante, la profundidad indicada de la base del basalto concuerda muy bien con los resultados del pozo. En los ajustes realizados, la información del SEV permite estimar la base del basalto a una profundidad de hasta 1250 m.

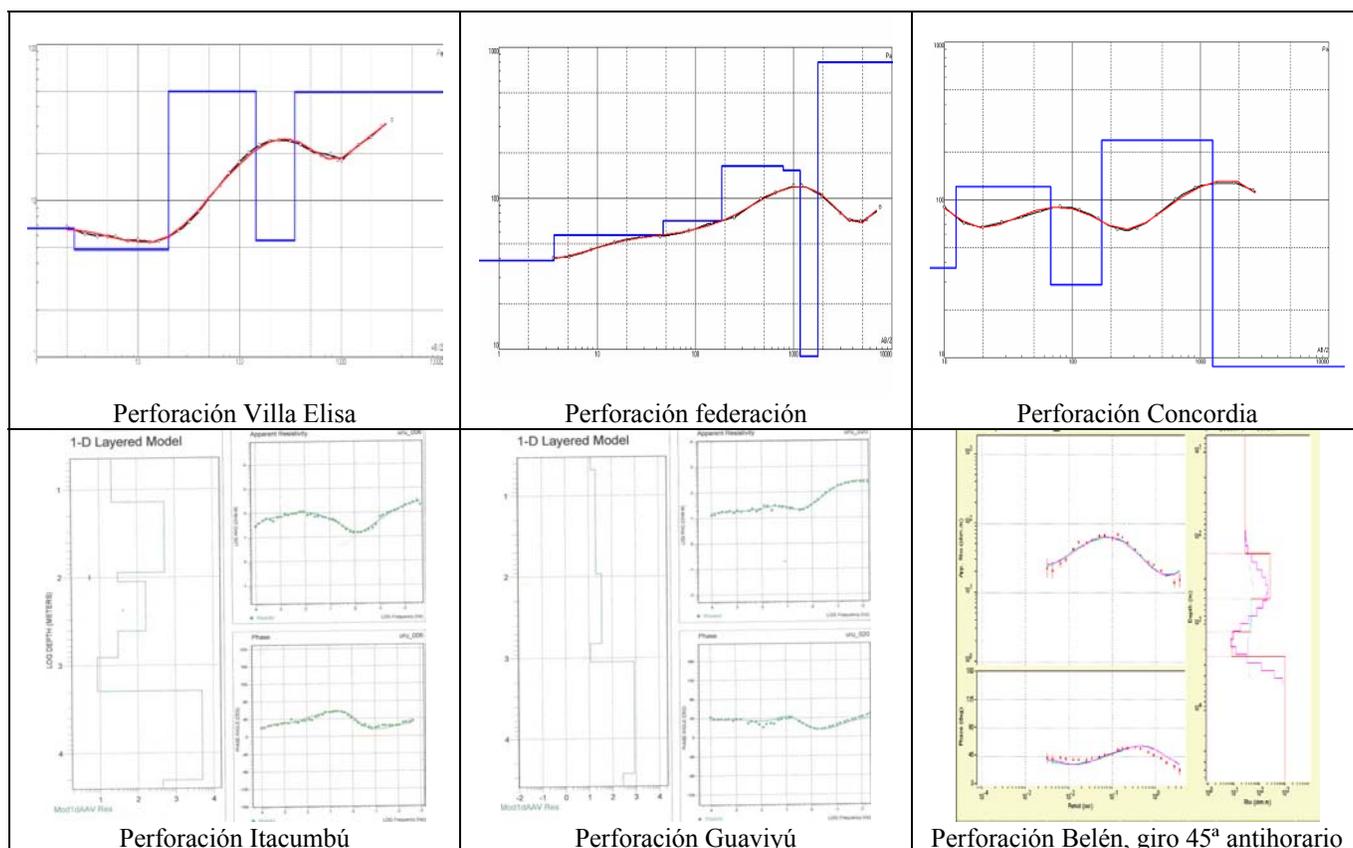


Figura 2. Interpretación de sondeos paramétricos (parte superior SEV, inferior AMT-MT)

El error en la estimación de espesores (normalmente 30%) puede ser reducido al realizar sondeos cercanos y/o en cruz, y ajustándolos simultáneamente. Asimismo, con datos de pozos muy cercanos se puede reducir aún más la incertidumbre, pero no fue posible disminuirla más allá de entre 15 a 20%. A partir de datos de pozos en Uruguay se realizaron SEVs sintéticos que indican que para detectar el techo del SAG se requieren aperturas de 2.5 a más de 5 km, mientras que para la base de la cuenca se precisa de más de 14 km. Se mencionan aperturas mínimas, dado que sectores alterados o estratos sedimentarios saturados (usualmente en el área), generan la necesidad de mayores aperturas.

La interpretación de sondeos AMT y MT paramétricos realizados por Oleaga (2002) en el sector Uruguayo del SAG arrojó los resultados mostrados en la Tabla 3. En teoría, la ausencia de un principio de equivalencia, como en los SEV's, así como la adquisición de dos parámetros (resistividad y fase) con carácter vectorial, a diferencia del carácter escalar de la resistividad de los SEV's, produce soluciones más robustas y por lo tanto más cercanas a la realidad con los sondeos AMT o MT. Los espesores calculados en los sitios de los pozos se aproximan a los observados en los registros, inclusive en el pozo Belén. Los resultados del pozo Belén muestran discrepancia con la litología perforada. Esto se debe a que el sondeo se realizó cerca de una falla, siendo por lo tanto inconsistente con la hipótesis de interpretación de medio estratificado. Por ello, se giraron los ejes de medición, uno en dirección de la estructura principal (N45W) y otro perpendicular a ésta. La interpretación del sondeo paralelo a la falla, representativa del sector norte, donde se realizó el pozo, detecta al SAG a los 493 m y el basamento a los 2315 m. Esto muestra parte del potencial de la técnica AMT, al poder realizarse en sitios donde la presencia de una estructura geológica distorsiona necesariamente un sondeo VES sin posibilidad de corrección como en el caso del sondeo AMT. Los resultados de la interpretación indican que la base del basalto se detecta con un error medio del 7%, mayormente influido por los resultados del pozo Yacaré, sin el cual sería inferior al 5%. El basamento se detecta con un error medio aún menor, 2.7%, inclusive en donde se ubica a más de 2300 m de profundidad. Se observa que la profundidad de todos los contactos litológicos de interés fueron detectados con un error medio inferior al 5%, el cual incluye la variación geológica existente entre el sitio de prospección y el pozo, usualmente 500 m, debido a la necesidad de disminuir interferencia electromagnética del tubo del pozo.

Tabla 3 – Resultados de sondeos AMT-MT paramétricos a pozos con descripción litológica.

Estrato	Período	Profundidad a la base (m)									
		Belén		Itacumbú		Yacaré		Guaviyú		Almirón	
		Litolo. Pozo	AMT-MT	Litolo. Pozo	AMT-MT	Litolo. Pozo	AMT-MT	Litolo. Pozo	AMT-MT	Litolo. Pozo	AMT-MT
Sedimentos y R. Sedim.	Cretácico Sup.							100	87	55	82
Basalto	Cretácico Inf.	480	815 (493)	395-420	405	420	490	680	620	505	470
R. Sedimentarias	Juro-Devónico	2330	3300 (2315)	2040	2000	2330	2415	1105	1120	925	980

CONCLUSIONES

De la comparación realizada se observa para los sondeos AMT-MT un bajo error medio (menor al 5%) en la estimación de la profundidad al contactos entre las rocas sedimentarias y los basaltos o del basamento de la cuenca, los cuales se ubicaron entre 400 a 1100 m y hasta más de 2000 m de profundidad respectivamente. A diferencia de los SEV, el espacio requerido para realizar un sondeo es de apenas unos 50 x 50 m. La abertura de un SEV para explorar dichas profundidades es de alrededor de 8 km, lo cual conlleva dificultades operativas y de cumplimiento de las hipótesis base del método (semiespacio estratificado en capas planas paralelas). Empero, el mayor problema de los SEV's radica en el principio de equivalencia, el cual permite obtener soluciones que ajustan adecuadamente la curva de campo pero con amplios márgenes de error en la estimación de dichos espesores. En los casos estudiados éste oscila alrededor del 30% y en ocasiones supera el 100%, a pesar de considerar valores de resistividad típicos de las litologías conocidas. Este porcentaje se puede disminuir a 15-20% realizando sondeos cercanos o en cruz y contar con información de pozos cercana. Para sondeos AMT-MT se observa que para detectar el piso de basalto a una profundidad superior a 500m, es necesario medir en el rango MT, al menos hasta frecuencias de 1 Hz.

La presencia de fallas geológicas en la zona es un factor que frecuentemente impide interpretaciones 1D, comunes para ambos métodos. La rotación de sondeos MT en dirección de éstas estructuras permite estimar los espesores con precisión inclusive a poca distancia de una estructura, la cual inclusive puede ser detectada a partir del sondeo en caso de que ésta esté cubierta por sedimentos. Por lo anterior, en prospecciones someras la técnica de SEV es comparativamente igualmente útil que un sondeo AMT, aunque probablemente más económica. Sin embargo, en cuencas profundas como la del SAG, la combinación de sondeos AMT-MT muestran mayor precisión en la estimación de profundidades, además de que reducen las complicaciones logísticas, por lo cual resultan más económicos. Estos aspectos son relevantes para el proyecto de un pozo termal, dado que un error bajo en la estimación de la profundidad al acuífero brinda certidumbre en los costos de inversión.

REFERENCIAS

- Ainchil, J., M.Guiusso, E. Krusse, J. San Cristobal.** (1998). “*Criterios de Interpretación en los estudios geoelectricos del Acuífero Hidrotermal Profundo en la Mesopotamia Argentina*”. 4° Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Actas III, pag:1305-1314, Montevideo, Uruguay.
- Constable S.C., Parker R.L., y Constable C.G.,** (1987). “*Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data.*” *Geophysics*, 52, 3, 289-300.
- Custodio, E., Llamas, M.** (1996). *Hidrología Subterránea (Segunda Edición)*. Tomo I. Omega. España
- Oleaga Bazterrica Alejandro,** (2002). “*Contribución a la hidrogeología del acuífero Guaraní en el sector Uruguay. Un enfoque integral*”. Tesis de maestría, pp. 119. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ponti, N. Y C. Pastore,** (1993). “*Informe de la Prospección Geoelectrica en la Ciudad de Federación, Entre Ríos*”. INGEP, San Juan, Argentina.
- Ponti, N Y C. Pastore,** (1995). “*Informe de la Prospección Geoelectrica en la Ciudad de Concepción del Uruguay, Entre Ríos*”. Ponti y Asoc., San Juan, Argentina.
- Ponti, N., J. Santa Cruz Y A.,** (1997). “*Informe de la Prospección Geoelectrica en el área del Río Guayquiraró, Entre Ríos-Corrientes*”. Ponti y Asoc., San Juan, Argentina.
- Sánchez San Roman, F. Javier.** “*Prospección Geofísica: Sondeos Eléctricos Verticales*”. Departamento Geología Universidad de Salamanca España.
- Shevnin V.A., Modin I.N.** (2003). IPI2win Version 3.0.1- 1D. Moscow State University, Geological Faculty, Department of Geophysics, Russia.
- Silva Busso, A.** (1999). “*Contribución al Conocimiento Geológico e Hidrogeológico del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental Argentina*”. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires, Argentina.