

EVALUACIÓN GEOFÍSICA DEL ACUÍFERO GUARANI EN LA ARGENTINA

Emilse Zunino¹, Jerónimo Ainchil¹

Resumen - En los últimos años ha adquirido importancia la exploración y explotación del acuífero hidrotermal profundo en la región de la Mesopotamia de la República Argentina. Esta zona, que constituye el borde sud oeste de la cuenca del Paraná, también es, aparentemente, el límite sur de la extensión del acuífero hidrotermal profundo.

En las recientes perforaciones realizadas en la zona se han verificado cambios importantes en las condiciones de yacencia del acuífero, en distancias relativamente cortas, si se considera la importante extensión areal del mismo. Se debe destacar las variaciones en la profundidad del techo del basalto y su espesor total. También resulta llamativo las variaciones en la calidad química del agua.

El presente trabajo pretende ser un aporte para quienes deben realizar tareas de evaluación del recurso, o para quienes deben planear una captación profunda. Para ello se muestran curvas obtenidas mediante la técnica del sondeo eléctrico vertical, reprocesadas a la luz de la información obtenida en las perforaciones. De esta forma se pueden considerar curvas paramétricas, y obtener información para la planificación de un relevamiento, o para el procesamiento de curvas medidas.

Finalmente se presenta un perfil eléctrico, que resalta las importantes variaciones antes señaladas.

Palabras clave - acuífero guaraní, geoeléctrica

INTRODUCCIÓN

La cuenca del Paraná y Chaco Paraná es una gran planicie que se extiende en parte de Brasil, Paraguay, Uruguay y Argentina.

¹ ¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas –UNLP, Paseo del Bosque s/n CP 1900 La Plata Rca Argentina, Tel: 0054 221 4236593/4 ext 162 Fax: 0054 221 4236591, e-mail: jero@fcaglp.edu.ar



Cuenca del Paraná y Chaco-paraná (Albuquerque Rocha, G., 1996)

Debajo de esta superficie se desarrolla, a profundidad variable, una formación de características acuíferas. El espesor de este acuífero también varía, y alcanza potencias de hasta 800 metros (Araujo, L. M. et al, 1995). En gran parte de su extensión se encuentra confinado por derrames basálticos.

Recientemente se ha propuesto el nombre de Acuífero Guaraní (Albuquerque Rocha, G., 1996) para designar al Sistema Estratigráfico Mesozoico, que constituye el mencionado reservorio. Este sistema está formado por secuencias clásticas continentales, reconocido en la literatura como uno de los mayores ejemplos de registros paleo desérticos (Fernandez Garrasino, Cesar A., 1995)

Las dimensiones del reservorio, la calidad de agua, y la renovabilidad del recurso lo convierte en una de las reservas hídricas más importantes del planeta.

OBJETIVO DEL TRABAJO

El objetivo del presente trabajo es mostrar que la prospección geoelectrica es una herramienta útil en la exploración del Acuífero Guaraní. La posición del acuífero en estudio, que se presenta en gran medida confinado por basaltos, hace que las condiciones para la aplicación del método sean excelentes debido al contraste de resistividad que se observa.

CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS DE LA FORMACIÓN DE INTERÉS

Las formaciones geológicas que integran el sistema acuífero, son conocidas en Brasil, Uruguay, Paraguay y en Argentina, bajo varias denominaciones, pero más difundidas como Basaltos de Serra Geral o Lavas de Arapey , Areniscas de Botucatu o de Tacuarembó y Formación Buena Vista.

La consistencia de las Areniscas de Tacuarembó y Buena Vista va de friable a bien litificada, hecho que tiene gran importancia en lo referente a la admisión y transmisión del agua. En efecto, las areniscas friables tienen porosidad y permeabilidad primarias, por lo que se constituyen en buenos reservorios para el almacenamiento y la producción de agua subterránea. Como contraparte, las que están litificadas, sólo pueden almacenar agua en grietas, fisuras, diaclasas y estratificación, lo que deriva en acuíferos discontinuos, heterogéneos y anisótropos y en baja capacidad de almacenamiento y productividad.

Estas areniscas suelen presentar esta última característica cuando se interdigitan con los Basaltos de Geral, o en la vecindad del contacto entre ambos, debido al endurecimiento por termometamorfismo.

El mayor espesor se registra en Tostado (Prov. de Santa Fe) con 840 metros, mientras que se produce una rápida disminución de su potencia hacia el norte, con sólo 172 metros en Gancedo (Prov. de Chaco).

Esta formación aflora en la Provincia de Misiones, entre Corpus y Santa Ana. San Ignacio, localidad ubicada entre las dos anteriores, se abastece de agua potable mediante 3 pozos de 60 a 70 metros de profundidad que terminan en las Areniscas de Tacuarembó (llamada Formación Misiones en dicha provincia). Se producen alrededor de 10 m³/h por cada pozo y una salinidad total de 200mg/l.

ESTUDIO GEOFÍSICO DEL ACUÍFERO

INTRODUCCIÓN

En la exploración del acuífero se ha empleado uno de los métodos eléctricos de prospección.

El objetivo de la prospección eléctrica es obtener una distribución de resistividades en profundidad a partir de mediciones efectuadas en superficie.

METODOLOGÍA EMPLEADA

ORIGEN DE LOS DATOS

El hecho de disponer de información geológica provista por actuales perforaciones permitió reprocesar las curvas de campo medidas por la Cátedra de Métodos Eléctricos de Prospección de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata, en Villa Elisa, y mejorar su interpretación.

Las curvas de Guaviyú y Guaviraví, también relevadas por la Cátedra, se eligieron por su cercanía a pozos ya existentes lo que permitió considerarlas paramétricas.

Las curvas de Federación, medidas por el personal de Agua y Energía Eléctrica, se consideraron para su contraste con el pozo ubicado en las proximidades.

La ubicación de las mediciones permite mostrar el comportamiento de horizontes eléctricos profundos a lo largo de un perfil. Este perfil tiene su extremo SW en la localidad de Villa Elisa y encuentra su extremo NE en la localidad de Guaviraví.

RELEVAMIENTO DE CAMPO

Se utilizó el método de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), mediante el cual se materializa en el terreno un dispositivo tetraelectrónico, lineal y simétrico respecto de un origen. De los electrodos disponibles dos son de potencial o recepción MN y dos de corriente o emisión AB. Los electrodos A y B se encuentran interconectados a través de una fuente y un miliamperímetro y conforman el circuito de emisión, mientras que los de potencial, conectados a un milivoltímetro, constituyen el circuito de recepción.

Un SEV consiste en una serie de determinaciones de resistividad aparente a partir de hacer circular una corriente I por el circuito de emisión y medir la diferencia de potencial ΔV que se genera entre los electrodos de recepción. Hablamos de resistividad aparente ya que el subsuelo es heterogéneo y la resistividad medida será función de las resistividades reales existentes debajo de cada electrodo. La resistividad aparente no puede considerarse como promedio de las resistividades presentes pues puede ser menor o mayor que todas ellas.

La modalidad empleada es la denominada Schlumberger, en la que la separación MN se considera nula frente a la AB, y de esa forma sólo influye una distancia. En la práctica se utiliza $MN \leq AB/5$.

La resistividad aparente se calcula mediante la expresión:

$$\rho_a = k \Delta V / I$$

donde k es una constante que depende de la configuración geométrica del dispositivo, y para este caso toma la siguiente forma:

$$k = \Pi (AB^2 - MN^2) / 4 MN$$

donde ΔV es la diferencia de potencial medida entre los electrodos MN cuando por el circuito de emisión circula una corriente I . La unidad de resistividad en el Sistema Internacional de Medidas es el OhmioMetro.

Los valores de resistividad aparente calculados se representan en un gráfico bilogárptico con la distancia $AB/2$ en abscisas, obteniéndose una Curva de Resistividad Aparente (CRA).

SECUENCIA GENERAL DEL PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN

Para obtener un Corte de Resistividad Verdadera (CRV) a partir de una CRA es necesario aplicar a la curva de campo un conjunto de operaciones numéricas.

La secuencia implementada comienza con el algoritmo de Zohdy, A.R. (1989), para obtener un modelo a priori. Este método no requiere el conocimiento del número de capas, sus espesores o resistividades. La idea es que de la curva de campo se genere una "CRV" a partir de la cual, por convolución, se halle una CRA que ajuste lo mejor posible a la curva medida. Como la "CRV" obtenida tiene el mismo número de capas que puntos muestreados, conviene reducir la cantidad de ellas de acuerdo a la información geológica a disposición y usando modelos equivalentes. El concepto de equivalencia será tratado también en el citado apéndice.

Resolver el problema directo implica calcular la Función Característica para modelos de más de dos capas a través del algoritmo de Sunde. Para el cálculo de la resistividad aparente, se usa el filtro inverso de O'Neill de 20 coeficientes que trabaja con un muestreo de la Transformada de Resistividad de 6 puntos por década logarítmica.

Una vez hallado el modelo preliminar, se obtuvo por prueba y error, la solución al problema directo que minimizó el error medio cuadrático entre la resistividad aparente observada y calculada.

Por último, el ajuste fino con la información de las perforaciones se hizo por equivalencia.

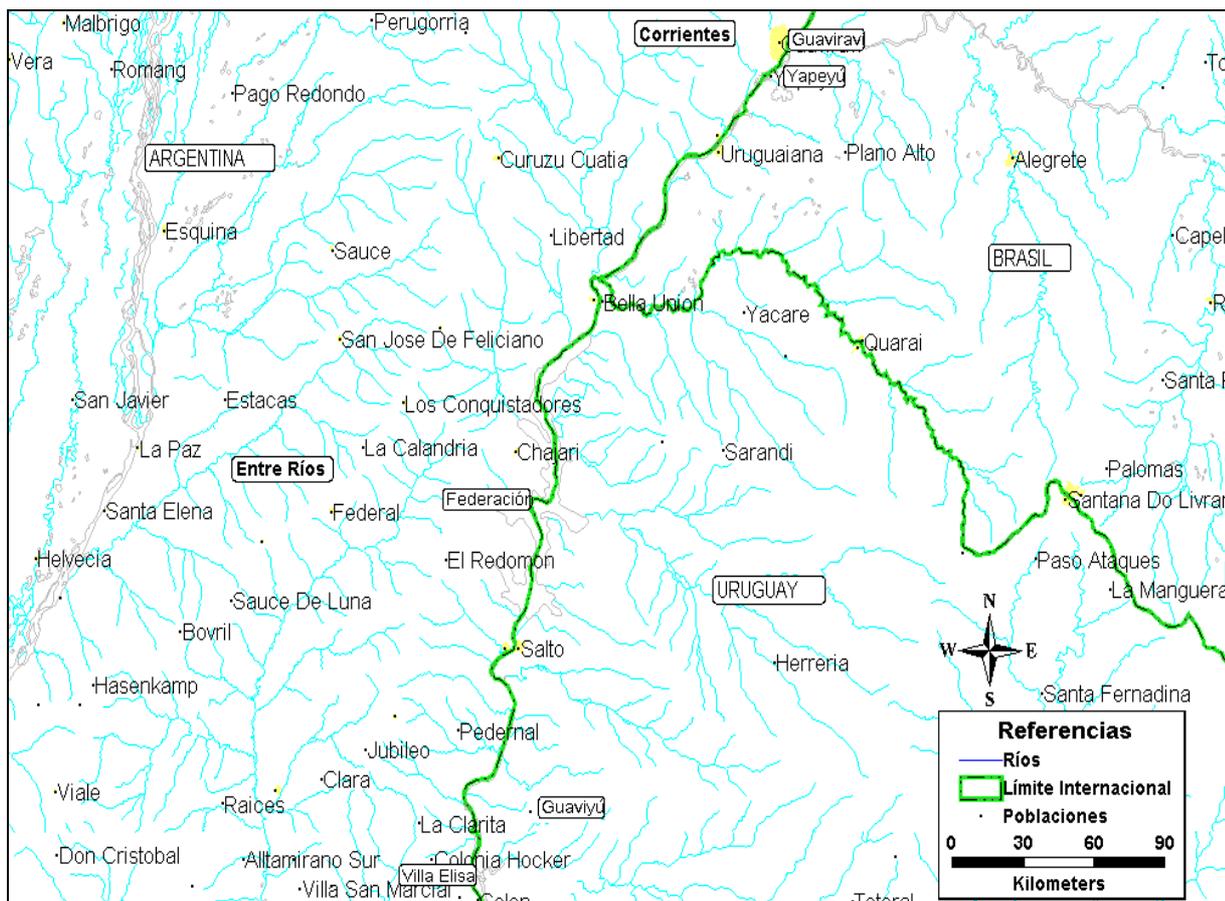
Se empleó también, un método de inversión desarrollado por Pous (1987) que se basa en el tratamiento probabilístico de las observaciones y de la información a priori: parámetros del modelo y sus restricciones.

Finalmente, las curvas calculada y observada fueron nuevamente confrontadas por medio de un programa que evalúa el error medio cuadrático entre ambas y en todos los casos se obtuvo un ajuste con un valor menor al 3%.

UBICACIÓN DE LOS SONDEOS

Hemos analizado curvas medidas en las localidades de Villa Elisa (Prov. de Entre Ríos), Guaviyú (Rep. Oriental del Uruguay), Federación (Prov. de Entre Ríos) y Guaviraví (Prov. de Corrientes).

En el siguiente mapa se muestra la ubicación de las localidades en las cuales hemos realizados los sondeos.



LAS CURVAS DE CAMPO

Como el objetivo geoelectrico es muy profundo, se puso énfasis en el análisis del último tramo de los sondeos.

Al analizar la morfología de las curvas de campo en la zona de interés, se puede observar que todas ellas responden cualitativamente a un patrón similar. Para AB/2 grandes se presenta un máximo que responde a las capas más resistivas que indicarían la presencia de los basaltos que suprayacen al acuífero. Este máximo se aprecia bien en todos los sondeos analizados. En todos los casos, asociado a este máximo y siempre en el sentido de AB/2 mayores, se aprecia una disminución en los valores de la resistividad aparente que señala la presencia de una capa de menor resistividad que representa el objetivo de este trabajo e indicaría la presencia del acuífero. Este mínimo se observa mejor en las curvas de Federación y Guaviraví, mientras que en los sondeos de Guaviyú y Villa Elisa su presencia es menos evidente. En las curvas pertenecientes a las localidades de Guaviyú, Villa Elisa y Guaviraví las curvas finalizan con una pendiente positiva, lo que permite suponer que esos valores de resistividad están asociados a la formación infrayacente a la de interés (basamento). Los sondeos de Federación, por el contrario, finalizan con un decrecimiento de la curva, indicando que no se ha atravesado la capa de baja resistividad.

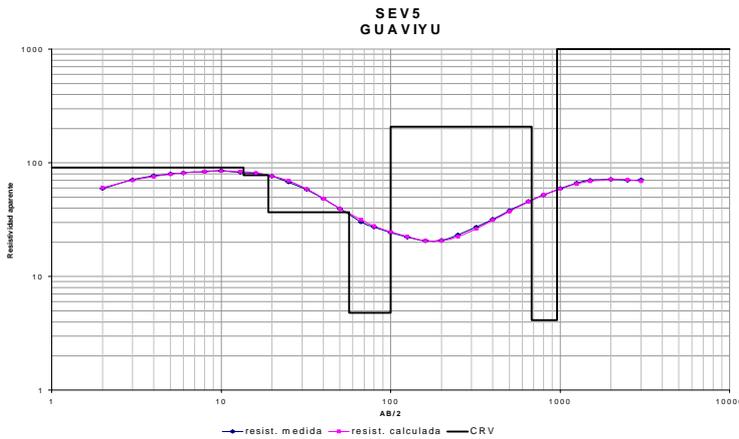
MEDICIÓN PARAMÉTRICA EN GUAVIYÚ

El hecho de realizar un SEV en Guaviyú, localidad uruguaya próxima a Villa Elisa, se fundamentó por la existencia de una perforación que permitía tomarlo como paramétrico (Ainchil et al,1996).

Como la curva medida "ve" todas las capas halladas en el pozo, se pudo determinar con bastante precisión la incógnita más importante: la resistividad del acuífero.

Los apartamientos encontrados respecto de la columna litológica descrita se encuentran dentro de los errores admisibles del método.

Según el modelo, la resistividad de la capa de interés toma un valor de 4,15 Ω .m cuando el espesor se fija (por ajuste al pozo) en 280 metros. Debemos tener presente, para posteriores comparaciones, que ese valor de resistividad esta asociado a un agua de baja salinidad.



Resistividad	Profundidad
31,6	0,5
91,3	14,0
78,0	18,0
2,1	19,5
36,6	57,5
4,8	100,0
207,9	680,0
4,1	960,0
1000	∞

El modelo propuesto ajusta con un error medio cuadrático menor al 2%.

ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES EN VILLA ELISA

La perforación realizada en Villa Elisa evidencia la presencia del acuífero Guaraní, cuyo techo se encuentra a 940 metros de profundidad y su piso no alcanza a ser determinado (Ainchil y Giusso, 1997) .

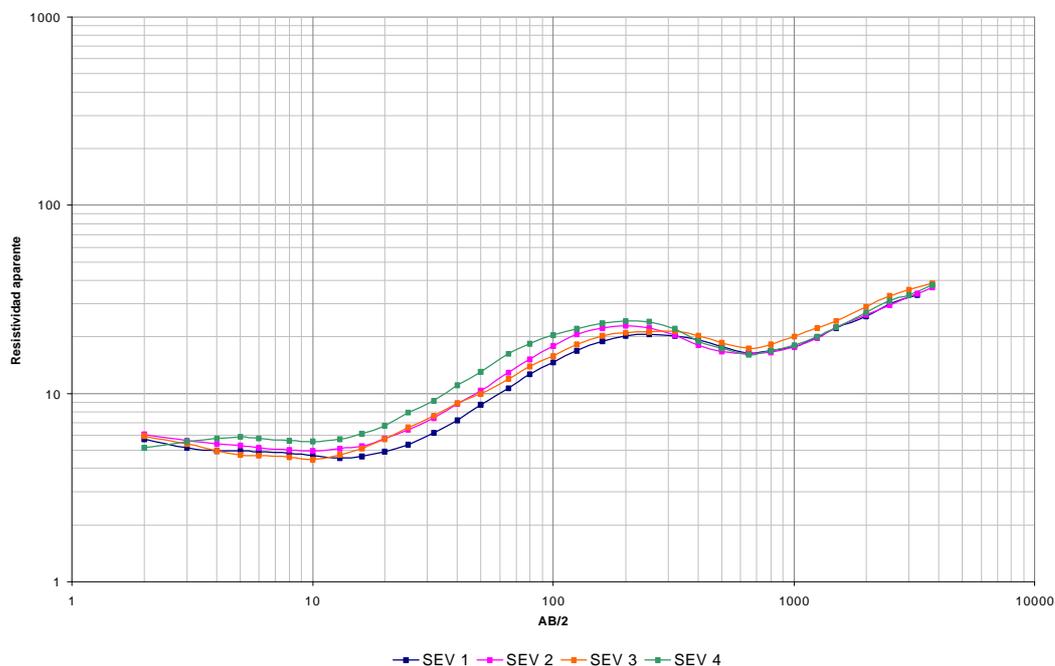
A partir de la morfología de las curvas medidas se podría inferir la presencia de tal intercalación conductora entre el paquete basáltico y el basamento resistivo. Pero esta situación no es lo suficientemente clara y por tal motivo decidimos llevar a cabo un procesamiento no tan convencional.

Si se hubiera pretendido hallar una curva de campo que atravesara un horizonte tan conductor como el objetivo, se tendría que haber aumentado aún mucho más la longitud del sondeo.

Para reducir o estimar el efecto de posibles anisotropías laterales, y no hacer especulaciones sobre puntos que puedan ser interesantes como objetivo geoelectrico, se densificó la toma del dato, llevando a cabo cuatro sondeos extremadamente próximos unos de otros.

En todos ellos se observó un valor anómalo de resistividad en el último punto tomado, que estaría de acuerdo con la presencia del acuífero.

CURVAS DE RESISTIVIDAD APARENTE VILLA ELISA



A partir de los datos del pozo se construyeron cortes de resistividad verdadera (CRV) que al utilizarlos como modelo de entrada en el método directo ajustaron a las curvas con un porcentaje de error pequeño.

En todos los casos se pudo identificar al basalto suprayacente al acuífero.

A partir de lo manifestado en la perforación se hizo el ajuste fino de los espesores modelados utilizando el concepto de equivalencia Dar Zarrouk.

Para estimar el espesor máximo de acuífero, se supuso que la resistividad de la capa de interés podía tener a lo sumo un valor de 4,14 Ω .m. que corresponde a la resistividad de la capa conductora en Guaviyú.

El hecho de que la salinidad del agua encontrada en Villa Elisa sea significativamente mayor que la hallada en Guaviyú, permite tomar ese valor de resistividad como cota superior, lo cual proporciona el espesor productivo más generoso que se podría esperar. Haciendo un promedio de estos espesores para los cuatro sondeos, se puede decir que a lo sumo el acuífero tiene 340 metros de espesor en Villa Elisa.

Para estimar el mínimo valor de resistividad admisible de la formación de interés, se trabajó con el SEV1 al que se le impuso la existencia del basamento resistivo. Para ello se adicionó al final del sondeo, con una pendiente de 45°, puntos para valores de AB/2 igual a 3750 m., 4000 m. y 4500 m.

Como el final de la perforación se halló a 92 metros por debajo del techo del acuífero, se fijó en el modelo ese valor como espesor total productivo. En consecuencia, el único grado de libertad que tiene el modelo es la resistividad del acuífero que además sirve de cota inferior para todo el rango de resistividades admisibles.

Se utilizó el algoritmo de inversión de Pous, para encontrar un modelo que satisfaga a la nueva curva. Como la aplicación de este algoritmo requiere que las CRA estén digitalizadas a 6 puntos por década logarítmica, fue necesario implementar computacionalmente un método numérico de interpolación. Se utilizó la interpolación de Lagrange en la cual el polinomio interpolador (de grado n) toma exactamente el valor de resistividad en los puntos de medida ($n+1$ puntos).

Se encontró que para el espesor de 92 metros, la resistividad es de 1,5 Ω .m.

El error medio cuadrático en el ajuste, en los cuatro SEVs considerados, fue menor al 2%.

ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES EN FEDERACIÓN

Para estimar el modelo hidrogeológico en Federación, Provincia de Entre Ríos, fueron utilizados sondeos realizados, en el año 1986, por personal de Agua y Energía Eléctrica.

Como sólo se disponía de la representación gráfica de las curvas de campo, éstas se digitalizaron gráficamente, hecho que debemos tener en cuenta al considerar el grado de precisión de los sondeos y por ende de los modelos propuestos.

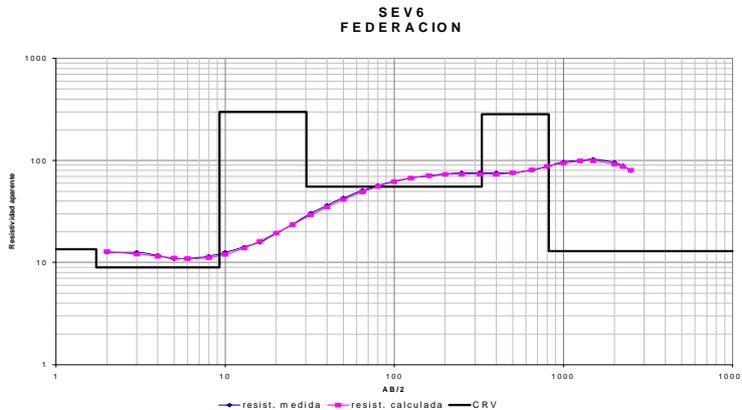
De los sondeos analizados, el de mayor longitud es el que denominamos SEV6 alcanzando 2500 metros de ala.

Para hallar las CRV se consideró datos expuestos por un pozo realizado en Federación en el año 1994 y que llegó a una profundidad de 1260 metros. En dicho pozo se evidencia un espesor de basalto de aproximadamente 900 metros que subyace a la cubierta sedimentaria, y por debajo de dichos basaltos aparecen las areniscas que pertenecerían al acuífero Guaraní.

Los modelos propuestos manifiestan, por debajo de la cubierta sedimentaria, la existencia de la capa de basaltos (810 metros promedio entre los dos sondeos) con intercalaciones de areniscas.

En ambos modelos se obtuvo una última capa de resistividad marcadamente menor que las suprayacentes, entre 13 y 34 ohm-metro. De la interpretación surgió que no se tratarían de las areniscas de la Formación Tacuarembó sino de una nueva intercalación

de baja resistividad dentro del paquete de basalto, es decir que si el sondeo hubiera sido más largo se habría esperado una nueva aparición de basalto a mayor profundidad.



Resistividad	Profundidad
13,5	1,7
9,0	9,2
300,0	30,3
55,8	329,6
284,0	817,6
13,0	∞

Se concluye que los sondeos resultan cortos para el estudio de un objetivo tan profundo y que la tendencia decreciente al final de las curvas se debe a una capa productiva más superficial inmersa en el horizonte resistivo. Los ajustes se lograron con un error menor al 2%.

ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES EN GUAVIRAVÍ

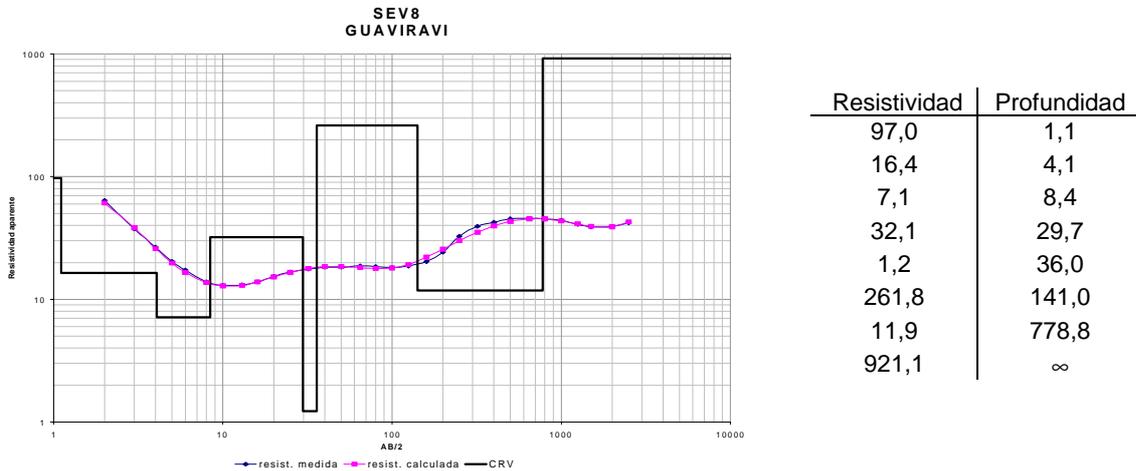
De los sondeos realizados en la zona, se eligió el SEV8 por su proximidad al pozo Guaviraví N°1 de la Dirección Nacional de Minería, terminado en el año 1950. En dicha perforación aparece una capa de basalto que va de los 36 metros de profundidad hasta los 140 aproximadamente y desde allí hasta el final de la perforación, 713 metros, sólo se hallaron areniscas. Debe remarcarse que la perforación no indica un cambio formacional en el piso de la misma. Los sedimentos infrabasálticos atravesados podrían referirse estratigráficamente como areniscas de las formaciones Tacuarembó y Buena Vista. (Padula, E.,1972). Se tomaron muestras de agua para determinar su aptitud hasta una profundidad de 147 metros, resultando en todos los casos apta para el consumo humano.

Del análisis, aparece a los 36 metros de profundidad, una capa de alta resistividad asignable a los basaltos reportados en la perforación cuyo espesor dio 105 metros.

Hacia el final del SEV8 se manifiesta el objetivo infrabasáltico y la presencia de un sustrato resistivo subyacente al paquete conductor.

De acuerdo a los datos aportados por la perforación sobre la calidad del agua, se asignó a la capa de interés un valor de resistividad acorde a las formaciones saturadas con agua potable.

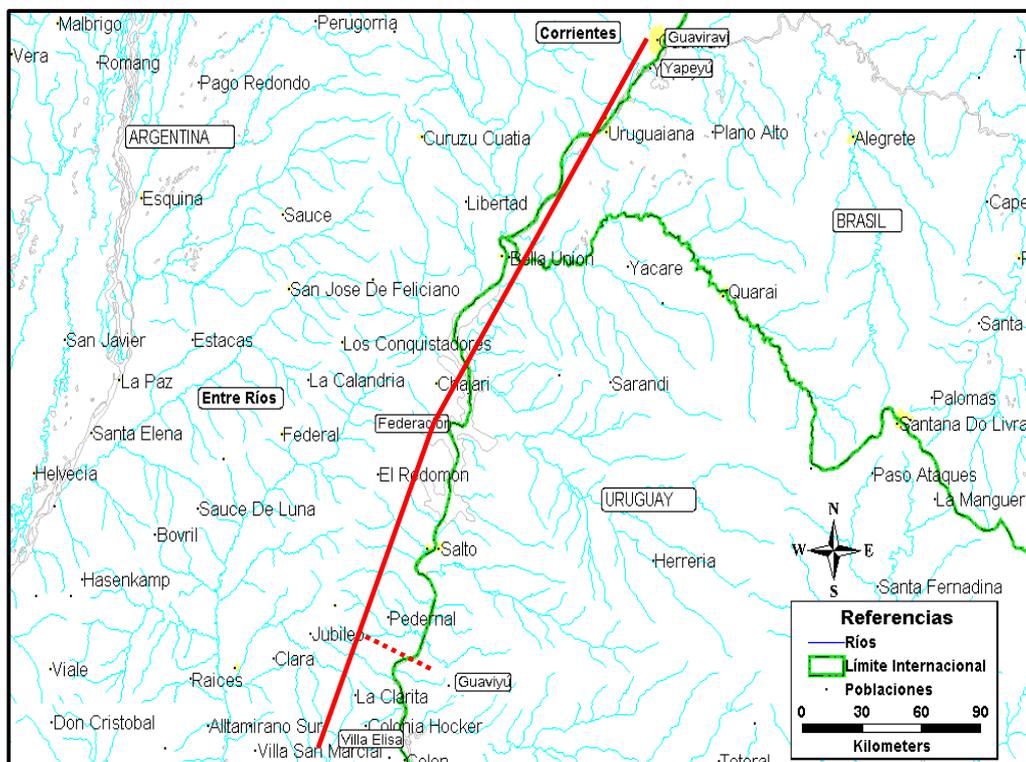
Suponiendo el techo del acuífero a los 141 metros de profundidad, para una resistividad de 11 ohm.metro (agua de baja salinidad), su piso estaría a 779 metros. Por debajo de éste existiría el basamento resistivo, suposición que aseguraría el espesor mínimo del objetivo para ese valor de resistividad.



En este caso el ajuste se hizo con un error medio cuadrático menor al 3%.

PERFIL GEOELÉCTRICO

Se representa el perfil geoelectrico originado de los análisis realizados en este



trabajo.

El perfil presenta su extremo SW sobre la localidad de Villa Elisa y su extremo NE sobre Guaviraví, y tiene una longitud total aproximada de 400 km.

El pozo de Guaviyú no cae sobre el perfil, pero por su proximidad se ha considerado su proyección sobre éste.

En el perfil se representan las distintas litologías descritas por las perforaciones y sobre ellas se muestra la interpretación geoeléctrica.

Se ha exagerado la escala vertical con el fin de una mejor visualización del mismo.

A modo comparativo, en el siguiente cuadro, se extractó de los modelos geoeléctricos los valores de resistividad y espesor del acuífero y la formación confinante.

Tipo de roca	Corte geoeléctrico	Villa Elisa	Guaviyú	Federación	Guaviraví
Basaltos	Espesor	588 m.	580 m.	810 m.	105 m.
	Resistividad	123 ζ .m	208 ζ .m	240 ζ .m	262 ζ .m
Areniscas	Espesor	Mínimo 92 m. Máximo 340 m.	280 m.	-----	680 m.
	Resistividad	Mínimo 1.5 ζ .m Máximo 4.15 ζ .m	4.15 ζ .m	-----	11.9 ζ .m

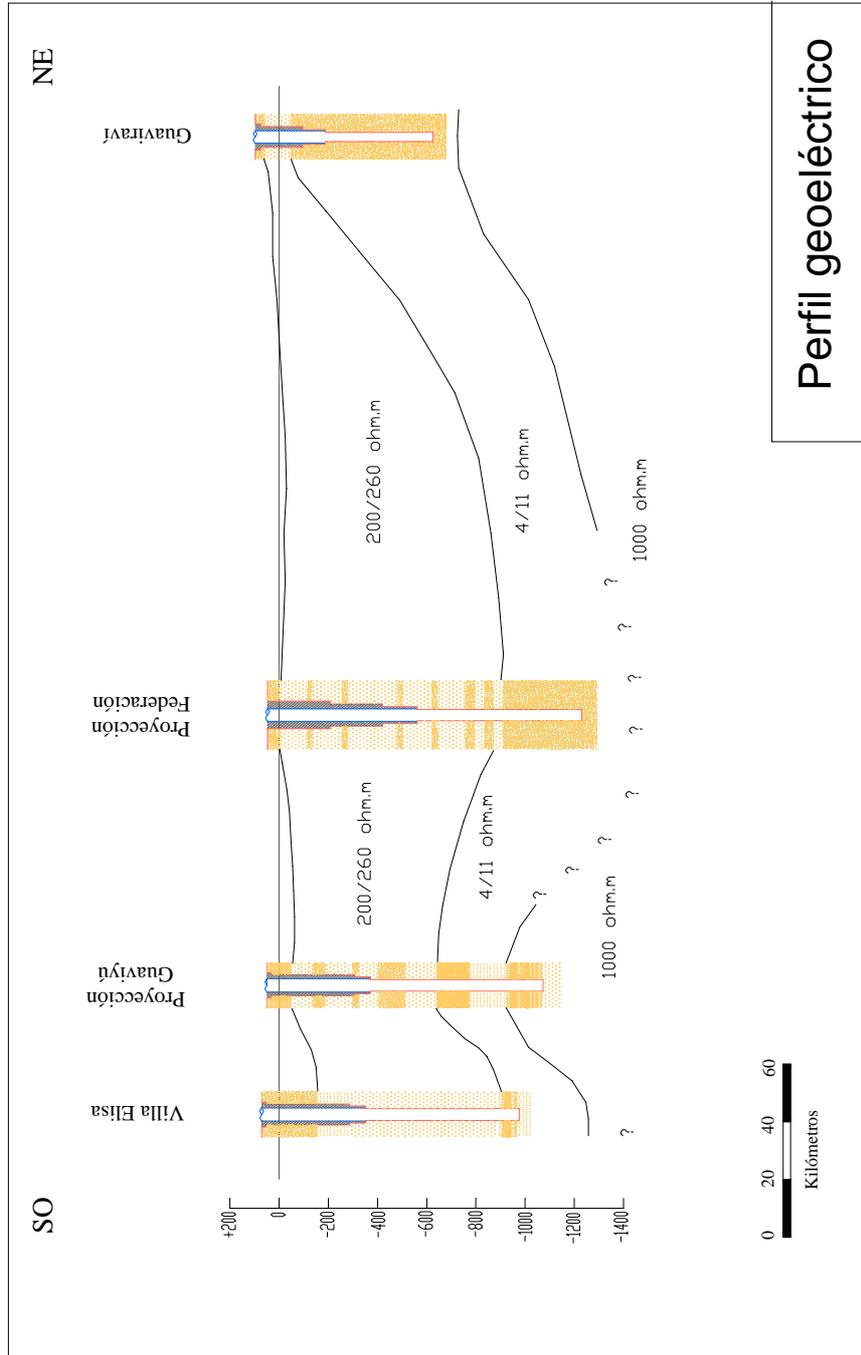
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las condiciones para la aplicación del método son óptimas debido al gran contraste de resistividad entre la zona de interés y la inmediatamente superior. Estas condiciones hacen que el método eléctrico presente ventajas comparativas respecto de otros métodos. Por ejemplo, para la sísmica la presencia de los basaltos por encima de un objetivo de menor velocidad es un inconveniente.

Desde el punto de vista económico, el costo total de las perforaciones de explotación depende fundamentalmente de la profundidad total a alcanzar y de los espesores de

basalto a atravesar. Una buena estimación de estos parámetros, que permita definir el monto de la inversión, puede obtenerse con los métodos eléctricos.

La marcada variabilidad en cota y espesor de los basaltos que suprayacen a la formación de interés, hacen que, aunque se presenten modelos regionales o areales, sea necesario validarlos localmente. Es decir, es conveniente, al menos hasta que exista mayor densificación de información, llevar a cabo la prospección en la zona de interés.



BIBLIOGRAFÍA

- Ainchil, J. E., E. M. Giusso, A. Perez y E. da Rosa. (1996) APLICACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS EN LA PROSPECCIÓN DEL ACUÍFERO BOTUCATÚ-TACUAREMBÓ EN ARGENTINA. Actas del IX Congreso Brasileiro de Aguas Subterráneas, pp 17 y ss.
- Ainchil, J. E., E. M. Giusso (1997) PERFORACIÓN HIDROTHERMAL PROFUNDA EN VILLA ELISA (E.R.). EL AJUSTE DE LA FACTIBILIDAD GEOELÉCTRICA Y LOS CRITERIOS INTERPRETATIVOS. 1^{er} Congreso Nacional de Hidrogeología. pp.97 a 103. Bahía Blanca, Argentina.
- Albuquerque Rocha, G. (1996) MEGA RESERVORIO DE AGUA SUBTERRÁNEA DO CONE SUL: BASES PARA UMA POLITICA DE DESENVOLVIMENTO E GESTAO. CONTRIBUCAO AO SEMINARIO INTERNACIONAL "AQUIFERO GIGANTE DO MERCOSUL" 23/24 de Maio de 1996. Univ. Nal. Do Paraná, Curitiba.
- Araujo, L. M. , A. B. Franca y P. E. Potter (1995) ACUÍFERO GIGANTE DEL MERCOSUR (BRASIL, ARGENTINA, URUGUAY Y PARAGUAY) MAPAS HIDROGEOLÓGICOS DE LAS FORMACIONES BOTUCATÚ, PIRAMBÓIA, ROSARIO DO SUL, BUENA VISTA, MISIONES Y TACUAREMBÓ.
- Fernández Garrasino, César A. (1995) EL PALEODESIERTO DE BOTUCATÚ-SOLARI , Boletines de Informaciones Petroleras. pp 88-119.
- O'Neill, D. J. and N. P. Merrick (1984) A DIGITAL LINEAR FILTER FOR RESISTIVITY SOUNDING WITH A GENERALIZED ELECTRODE ARRAY, Geophysical Prospecting 32.p/105-123
- Padula, E. (1972) SUBSUELO DE LA MESOPOTAMIA Y REGIONES ADYACENTES. Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba.
- Padula, E. y Mingramm (1972) ESTRATIGRAFÍA, DISTRIBUCIÓN Y CUADRO GEOTECTÓNICO-SEDIMENTARIO DEL "TRIÁSICO" EN EL SUBSUELO DE LA LLANURA CHACO-PARANENSE. Geología Regional Argentina.
- Pous, J., A. Marcuello and P. Queralt (1987) RESISTIVITY INVERSION WITH A PRIORI INFORMATION. Geophysical Prospecting 35. P/590-603
- Zohdy, A. R. (1989) A NEW METHOD FOR THE AUTOMATIC INTERPRETATION OF SCHLUMBERGER AND WENNER SOUNDINGS CURVES. Geophysics Vol. 54 Nro 2 p/245-254