

MODELADO GEOELECTRICO UNIDIMENSIONAL EN LA DETECCION DE AGUA SUBTERRANEA

M SAINATO¹, G GALINDO², H MALLEVILLE¹, S RATTO³

¹Cátedra de Física. Depto de Materias Básicas. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453 (1417). Buenos Aires. Argentina. ²Cátedra de Hidrogeología. Depto de Geología. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Ciudad Universitaria. Pab.II. Buenos Aires. Argentina. ³Cátedra de Edafología. Depto de Suelos. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453 (1417). Buenos Aires. Argentina.

GROELECTRICAL MODELING FOR THE DETECTION OF GROUNDWATER

The evaluation of the potentiality of underground aquifers which are used for complementary irrigation, primarily involves the geophysical exploration which makes a description of their dimensions, location and inference of water quality. The geoelectrical prospecting is most widely used for this purpose and the precision in the interpretation of the results is of great importance. Geoelectrical soundings were carried out at San Fernando (Bs. As. Province, Argentina), applying one-dimensional modeling of the electrical resistivity of the subsoil in order to adjust the interpretation, for groundwater detection, with previous geological and hydrogeological information, and soil observations. The phreatic level was detected at two m depth to the west and it was almost superficial towards the Reconquista bed. The bottom of this saturated stratum deepens towards the east, and there is an evidence of salinity increment in this direction.

Key words: Groundwater-Vertical electrical soundings-Geoelectrical modeling-Water quality

INTRODUCCION

El estudio de los recursos hídricos subterráneos, ya sea con fines de riego o consumo humano implica varias etapas las cuales conforman un estudio multidisciplinario. Un primer paso lo configura la recopilación de información hidrogeológica en la zona a estudiar: censo de pozos, estudio de mapas topográficos, geológicos y cartas de suelos, así como también datos meteorológicos para la resolución de balances hídricos. La segunda etapa implica la prospección de los acuíferos, es decir la descripción de las dimensiones y ubicación de los mismos así como la inferencia de su calidad salina. Los métodos eléctricos y electromagnéticos de prospección juegan un papel importante en el estudio de agua subterránea dada la similitud en el modo en que el flujo de corriente eléctrica y de fluido dependen de la conectividad y geometría de los poros en suelos y rocas. Estos métodos están afectados por la presencia de fluidos conductores en los poros del suelo. Además la respuesta geofísica de los mismos ha permitido estimar la presencia de intrusiones salinas o sustancias contaminantes (Stewart 1982).

Entre los métodos geofísicos de prospección, el sondeo eléctrico vertical (SEV) (Orellana 1972) resulta ser uno de los más utilizados en este tipo de estudio con probada eficacia. En la Argentina, la prospección geoelectrónica para estudios hidrogeológicos ha sido utilizada con anterioridad en forma exitosa, pudiendo citarse los trabajos de Díaz *et al.* (1987), y Santa Cruz (1987).

La observación de las características edafológicas del área de estudio permite un diagnóstico final más preciso de los primeros metros del subsuelo. El objetivo del presente trabajo fue el desarrollo de modelos unidimensionales de resistividad eléctrica del subuelo enfocados a la detección de agua subterránea, mediante la aplicación de estudios geoelectrónicos, sumado a observaciones edafológicas y geológicas para una mejor interpretación de la información recopilada.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio

El área de estudio se encuentra aproximadamente a 34° 05' de latitud y 58° 38' de longitud, carta topográfica San Fernando (Pcia de Bs. As., Argentina) (Figura 1). Esta zona se ubica, desde el punto de vista morfológico, en lo que se conoce como Pampa Ondulada. Las condiciones climáticas se pueden definir como templado-húmedo, con estación seca, con una disminución de las precipitaciones durante el invierno. La temperatura media anual es de aproximadamente 16 °C y la precipitación media anual es de 1021 mm.

Los sedimentos aflorantes en el área corresponden a lo que se denomina Pampeano y Post-Pampeano. El Pampeano loésico aflora en las partes más altas del relieve de la llanura, en tanto que el sector de la llanura más baja, y correspondiente a la llanura de inundación del actual sistema pluvial del Paraná, está integrado por sedimentos arcillosos y limos arcillosos, color gris verdoso de ingresiones post-pampeanas. La ubicación de las perforaciones que sirvieron de base para la interpretación de los sondeos geoelectrónicos están ubicadas en la llanura alta e intermedia (Santa Cruz 1994).

En la zona de estudio se observó que el paisaje corresponde a un proceso fluvial con formas erosivas y deposiciona-

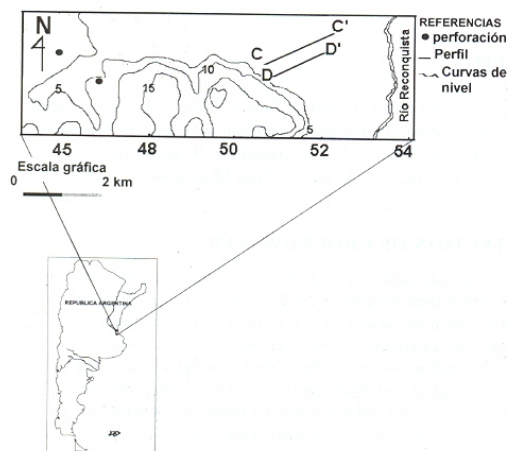


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio con las curvas topográficas, la ubicación de los perfiles o transectas que incluyen los sitios de sondeos y la localización de las perforaciones preexistentes más cercanas.

les. Coexisten varios ambientes en la superficie considerada (200 ha), dando origen a complejos de suelos. Se describieron varias unidades fisiográficas en base a la vegetación predominante que normalmente se halla en correspondencia con variaciones de suelo y/o topografía. El área estudiada se encuentra separada en dos por un albardón en dirección Norte-Sur definido por la cota del terreno más elevada y por vegetación dominante de tala (*Celtis tala*) acompañado de otras especies arbóreas de la subfamilia *Mimosoideas* y *Populus sp.*

Se procedió a la recopilación de información geológica preexistente correspondiente a la descripción de perfiles litológicos obtenidos de perforaciones cercanas efectuadas por Obras Sanitarias de la Nación en el año 1970 (Registros de la Dirección Nacional de Geología y Minería) (ver ubicación en Figura 1). Los primeros metros, con profundidades que oscilan entre cuatro y 12 m, corresponden a aportes de material sedimentario de épocas recientes, llegando los aportes del Cuaternario hasta una profundidad entre 20 y 42 m. En general se observan arenas con contenidos variables de arcillas hasta los diez metros, a partir de allí comienza a manifestarse la presencia de material calcáreo en forma de tosquilla, aunque en algunas perforaciones este material se encuentra desde un metro de profundidad. La napa freática aparece entre los cuatro y los 12 m de profundidad.

En la zona de estudio se hicieron observaciones edafológicas de sitio describiendo hasta los dos metros de profundidad variaciones texturales y presencia de calcáreo.

Método geoelectrico

Se realizaron diez sondeos geoelectricos, con una potencia máxima de 1,5 kW, con el arreglo Schlumberger (Zhdanov y Keller 1994), cubriendo dos perfiles o transectas (C-C' y D-D') teniendo en cuenta las cotas topográficas correspondientes (Figura 1). Se efectuaron mediciones con distancias entre electro-

dos AB desde seis metros hasta 200 m. En cada sitio de sondeo se graficaron las curvas de resistividad aparente experimentales en función de la semidistancia entre electrodos de corriente y se obtuvieron modelos unidimensionales (1D), mediante un programa de inversión (Vozoff 1972, Jupp y Vozoff 1975), donde se supone que la resistividad eléctrica de la tierra depende sólo de la profundidad bajo el sitio de sondeo, es decir modelos de estratificación horizontal (a cada capa le corresponde un espesor y un valor de resistividad eléctrica). El programa resuelve el problema inverso, es decir, dados los valores experimentales de resistividad aparente obtenidos a campo, y un modelo inicial propuesto modifica iterativamente éste último hasta encontrar el modelo final de resistividad eléctrica debajo del sitio de sondeo cuya respuesta de resistividad aparente ajusta los valores experimentales en el sentido de los cuadrados mínimos generalizados (método de Gauss). Es decir se encuentran los parámetros del modelo (resistividades y espesores) de tal forma que su respuesta de resistividad aparente ajuste los datos minimizando el error cuadrático medio entre esta respuesta y los datos experimentales.

Este método resulta más preciso que los métodos cualitativos gráficos que en alguna bibliografía actual todavía se utilizan, estabilizando la iteración y obteniéndose una solución final robusta. En el problema directo de hallar la respuesta de un modelo, pequeños cambios en éste pueden producir grandes cambios en la respuesta de resistividad aparente. Entonces, cabe destacar la naturaleza "no-única" de la solución de un problema de inversión geofísico. Es decir, en la inversión, pequeñas variaciones en los datos experimentales pueden llevar a grandes cambios tanto en la solución como en el proceso iterativo que se realiza para encontrar la solución final. El programa utilizado asegura la estabilidad de la respuesta respecto a cambios en el modelo (solución robusta) y la iteración. Cabe destacar que la mayor componente del error la constituye la falta de unicidad del modelo, el cual no es de naturaleza estadística. Estos modelos se correlacionan con la litología de perforaciones cercanas, las observaciones edafológicas y la información hidrogeológica preexistente para interpretar la secuencia sedimentaria y detectar la presencia de agua.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 2 se observan las curvas de resistividad aparente experimental en función de la semidistancia entre electrodos AB y el ajuste realizado en la inversión, es decir, la respuesta teórica ajustada correspondiente al modelo de capas obtenido para cada sitio de sondeo. Los ajustes son buenos con desviaciones cuadráticas medias entre la respuesta teórica y los datos experimentales que en algunos casos son del siete por ciento, llegando como máximo a valores del 40 %. Con los modelos finales de resistividad eléctrica en función de la profundidad (modelos de capas) obtenidos para cada SEV se construyeron las pseudosecciones de los perfiles C-C' (Figura 3) y D-D' (Figura 4) mostrando las resistividades eléctricas de los distintos estratos y la profundidad de las mismas respecto de la superficie.

Se puede observar que existen diferentes comportamientos de la litología estudiada, que también se manifiestan en forma concordante con la vegetación y suelo, al oeste y al este del monte de tala. Estos comportamientos se reflejan en los resultados geofísicos. Hacia el oeste

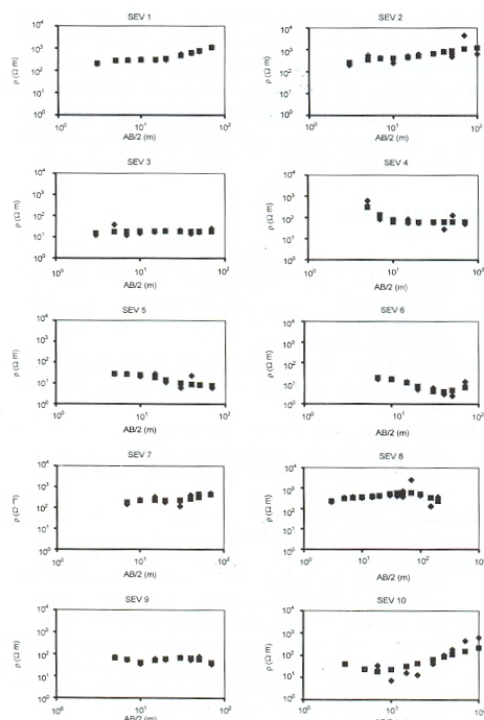


Figura 2. Curvas de resistividad aparente (ρ) experimentales $\blacklozenge$ en función de la semidistancia entre electrodos de corriente AB/2 junto con la respuesta teórica ajustada $\blacksquare$ correspondiente al modelo de capas por debajo de cada sitio de sondeo eléctrico vertical (SEV).

del monte de tala (SEV 1,2,7,8) se presenta una primera capa medianamente conductora asociada probablemente con material arcillo-arenoso hasta los 0,70 m, luego una capa resistiva hasta los dos metros asociada con arena con débil presencia de calcáreo en la masa. Por debajo continúa una capa conductora, probablemente arenas saturadas con agua hasta una profundidad que varía entre seis y diez metros, correspondiendo al nivel freático. A partir de esta profundidad aparece una capa muy resistiva que podría corresponder a material arcillo-arenoso con presencia de calcáreo que si bien puede contener agua la conectividad de los poros no sería suficiente como para tener una buena conductividad eléctrica.

Del lado este del monte de tala (SEV 5,6) no se distinguen los contrastes en las capas superficiales (se observa un capa medianamente conductora probablemente con sedimentos húmedos). A una profundidad que varía entre los seis y diez metros aparece el techo de

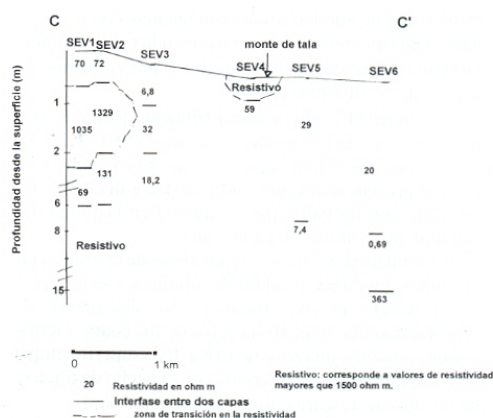


Figura 3. Pseudosección eléctrica correspondiente al perfil C-C': se muestra la topografía y por debajo de cada sitio de sondeo eléctrico vertical (SEV), el modelo de capas de ajuste. Los números corresponden a las resistividades eléctricas de cada capa.

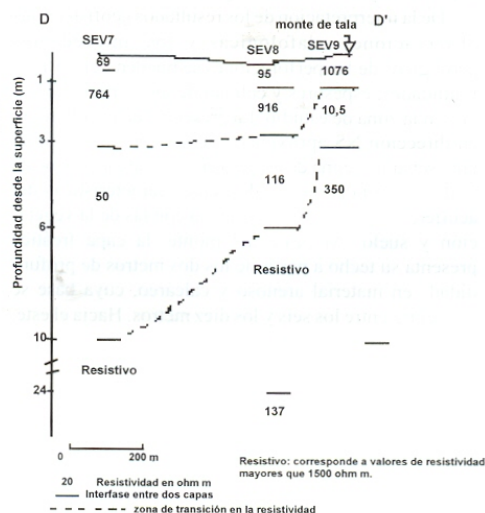


Figura 4. Pseudosección eléctrica correspondiente al perfil D-D': se muestra la topografía y por debajo de cada sitio de sondeo eléctrico vertical (SEV), el modelo de capas de ajuste. Los números corresponden a las resistividades eléctricas de cada capa.

una capa muy conductora probablemente de arenas y abundante material calcáreo saturada en agua hasta los 15 m aproximadamente. Se observa que esta capa se profundiza coincidentemente con la topografía. Las variaciones de resistividad eléctrica con la profundidad en

estos sitios de sondeo están relacionadas con la abundancia de calcáreo y/o la variación en la conductividad eléctrica del agua que llena los poros por contenido de sales (Mc Neill 1990).

El sondeo SEV 3 tiene una distribución de resistividad diferente a la de los sondeos cercanos (SEV 1,2,7,8). Los valores de resistividad son más bajos, indicando posible presencia de agua. Es de destacar que este sitio coincide con un bajo, que se aprecia en la fotografía satelital, atribuible a un paleocauce.

El sondeo SEV 10 se encuentra lejos de las transectas definidas, en dirección al río Reconquista y su interpretación señala un nivel freático a los dos metros de profundidad que llega hasta cerca de los cuatro metros donde comienza una zona resistiva. Esta superficialidad de la capa freática es coherente con el hecho de tratarse de un sitio de descarga, topográficamente bajo.

Los sondeos SEV 4 y 9 poseen una alta resistividad eléctrica desde la superficie hasta los 0,4 m y un metro de profundidad, respectivamente, coincidente con el monte de tala. Este valor tan alto de resistividad coincidió con la observación de suelo muy seco, probablemente por la mayor absorción vegetal.

De la interpretación de los resultados geofísicos, las observaciones edafológicas y los antecedentes geológicos de las perforaciones se pueden definir profundidades, espesores y calidad de los estratos saturados en la zona de estudio. La presencia de un albardón, en dirección NS aproximadamente, con un monte de tala, separa la zona de estudio en dos subzonas al oeste y al este, donde existen diferentes características del acuífero freático en concordancia con las de la vegetación y suelo. Al oeste del monte, la capa freática presenta su techo a partir de los dos metros de profundidad en material arenoso y calcáreo, cuya base se encuentra entre los seis y los diez metros. Hacia el este,

el techo de los estratos saturados en agua se eleva hasta casi la superficie del suelo, mientras que su base se profundiza hasta cerca de los 15 m en la dirección del río Reconquista. En esta misma dirección los valores de resistividad eléctrica muy bajos reflejan una variación en la calidad del agua con incremento del contenido salino (Mc Neill 1990).

REFERENCIAS

- Díaz E. L., Savoy H. M., Ponti N. A. 1987. Prospección geoelectrica para la determinación de las condiciones hidrogeológicas en el valle del río Senguerr, Colonia Sarmiento, Pcia del Chubut. X Congreso Geológico Argentino, Actas III:215-218.
- Jupp, D.L.B., Vozoff, K. 1975. Stable iterative methods for the inversion of geophysical data. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 42: 957-976.
- Mc Neill J. D. 1990. Use of electromagnetic methods for groundwater studies. En *Geotechnical and Environmental Geophysics*. Ed. S.H. Ward. Review and Tutorial, Society of Exploration Geophysicists: 191-218.
- Orellana E. 1972. Prospección geoelectrica en corriente continua. Ed. Paraninfo. Madrid. pp 101-136.
- Santa Cruz J. 1987. Caracterización del recurso hídrico subterráneo con miras al riego suplementario en la región NNE maicera típica de la Pcia. de Buenos Aires. Informe Técnico del Estudio N° 3. Convenio SAGYP, IICA. 161 pp.
- Santa Cruz J. 1994. Aspecto hidrogeológico e interpretación de una nueva característica fonnacional de subyacencia del acuífero Puelches- Pcia de Bs. As.- Argentina. Seminario de Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Editores Emilia Bocanegra y Alicia Rapaccini. UNMDP y CFI.
- Stewart M. T. 1982. Evaluation of electromagnetic methods for rapid mapping of salt-water interfaces in coastal aquifers, *Ground Water*, 20: 538-545.
- Vozoff K. 1972. The MT method in the exploration of sedimentary basins: *Geophysics*, 37: 98-141.
- Zhdanov M. S., Keller G. V. 1994. The geoelectric method in geophysical exploration. Elsevier. pp 165-260.