

Aplicación del método de resistividades con SEV para la caracterización hidrogeológica de la cuenca de Dajla (Argelia)

Application of resistivity methods using VES for hydrogeologic characterization of Dakhla Basin (Algeria)

Sara Torres López ^(1,2), Alfonso Muñoz Martín ⁽¹⁾, Alberto Jiménez-Díaz ^(1,2), Baba Ahmed ^(1,2), Javier de Lorenzo ⁽²⁾, Cristina García López ^(1,2) y Antonio Olaiz Campos ^(1,2)

⁽¹⁾ Departamento de Geodinámica. Facultad de CC Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. C / José Antonio Novais, 28040 Madrid. amunoz@geo.ucm.es; ajimenezdiaz@geo.ucm.es

⁽²⁾ Asociación GeoSolidarios. Facultad de CC Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. C / José Antonio Novais, 28040 Madrid.

ABSTRACT

The aim of this study is the hydrogeological exploration and characterization using Geophysical surveying in the vicinity of Dakhla Basin (Algeria). To that end, it has been used the method of resistivities through Vertical Electric Sounding (VES) on a campaign carried out in April 2009. The work included 19 VES, which have been calibrated with existing wells and with field geological observations. The results have allowed the characterization of Tertiary deposits as well as Ordovician sandstones. With these data, it has been possible to identify the position and thickness of a shallow salty aquifer, and the roof of a deep freshwater aquifer developed on the Ordovician sandstones. The integration of the geometry of the aquifers with the resistivity values obtained in the Ordovician sandstones has allowed the location of a favorable area for the situation of a new well.

Key words: Geophysical surveying, hydrogeology, detrital deposits, vertical electric sounding, Dakhla (Algeria).

Geogaceta, 48 (2010), 223-226
ISSN: 0213-683X

Fecha de recepción: 15 de febrero de 2010
Fecha de revisión: 21 de abril de 2010
Fecha de aceptación: 28 de mayo de 2010

Introducción y objetivos

Los campamentos de refugiados Saharauis se encuentran en la parte más occidental de Argelia, están constituidos por cuatro núcleos poblacionales principales, Aaiun, Auserd, Smara muy cerca de la ciudad Argelina de Tindouf y 200 km más al Sureste, Dajla. La zona se caracteriza por tener una topografía plana con grandes llanuras llamadas Hamadas, sobre las que destacan relieves litológicos de mucha continuidad lateral. Estos relieves presentan direcciones ENE-WSW, y están constituidos por rocas Paleozoicas (Ordovícico-Devónico inferior) que delimitan una red hidrográfica bastante efímera. Estos asentamientos tienen fuertes problemas de abastecimiento de agua potable, por lo que en el marco del Proyecto de Cooperación al Desarrollo UCM, se planteó la posibilidad de realizar una campaña de investigación geológica-geofísica con el objetivo de caracterizar hidrogeológicamente el entorno y estudiar posibles ubicaciones para nuevos pozos de abastecimiento (Proyecto «Formación práctica avanzada de profesionales para la exploración de aguas subterráneas y mantenimiento de infraestructuras asocia-

das en los Campamentos de Refugiados Saharauis»). En este contexto los objetivos de este trabajo son: 1) caracterizar los posibles acuíferos de la zona de estudio. 2) estudiar las posibilidades de abastecimiento de Dajla, 3) proponer la ubicación de un nuevo pozo de abastecimiento.

Para alcanzar los objetivos planteados y dadas las dimensiones y características geológicas de la zona de trabajo, se planificó una campaña de investigación geofísica mediante la integración e interpretación conjunta de datos geológicos previos, ortoimágenes de satélite y modelos digitales del terreno.

Marco geológico e hidrogeológico

El área de estudio se encuentra en el flanco Sur de un gran monoclinial, llamado sinclinal de Tindouf, que se apoya de manera discordante sobre una formación precámbrica granítica. El monoclinial está formado por una serie Paleozoica que presenta buzamientos muy bajos (2°-8°) hacia el Noroeste (Ron Martín, 2006). Sobre esta serie Paleozoica, y de manera discordante, se encuentran depósitos detríticos Terciarios y Cuaternarios que forman peque-

ñas cuencas sedimentarias orientadas NE-SO. Éste es el caso de la cuenca de Dajla, que se encuentra discordante sobre el contacto entre las formaciones Ordovícicas y Silúricas. Esta estructura se puede observar a lo largo de un corte NO-SE (Fig. 1). La serie estratigráfica en el área está constituida por las siguientes unidades (Fig. 1): a) Precámbrico: granitos calcoalcalinos (facies Ain Bentili), b) la serie Paleozoica discordante sobre el granito está constituida por: Areniscas (Ordovícico), Pizarras y Calizas azules con ortoceras (Silúrico Medio-Superior) y las Areniscas de Ratmia (Devónico Inferior, Hernández-Pacheco *et al.*, 1949). C) Por último, se encuentran las series detríticas Terciarias, también llamadas formaciones Hamadienses, que rellenan la cuenca Terciaria de Dajla.

En Dajla hay inventariados más de 400 pozos, la mayoría de ellos artesanales que no superan los 5 metros de profundidad. Existen dos pozos de bombeo (Fig. 1): el pozo OBL-1 situado más al norte, es un pozo de agua salada utilizada para el riego del huerto de Dajla de 10 metros de profundidad, y el pozo OBL-2 para el abastecimiento de la población con 42 m (Do Campo, 2006).

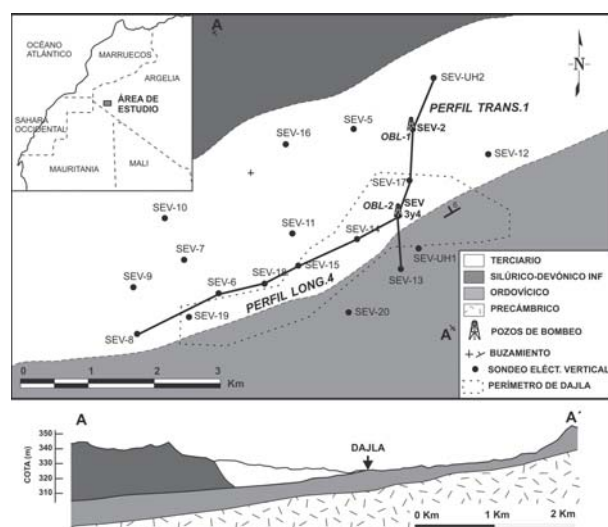


Fig. 1.- Situación geográfica, mapa geológico y corte geológico general. En la figura se muestra la posición de: los SEV realizados en la campaña, del pozo salado OBL-1 y del pozo de abastecimiento OBL-2, situación del perfil transversal 1 y perfil longitudinal 2. En punteado se muestra la extensión del campamento de Dajla.

Fig. 1.- Location, geological map and general cross section. Position of the VES carried out in the campaign. Location of OBL-1 salt water well and fresh water OBL-2 well. Location of transversal profile 1 and longitudinal profile 2. Dotted it is shown the extent of the Dakhla camp.

Metodología

Desde el punto de vista geofísico los métodos más utilizados para la investigación hidrogeológica son los eléctricos (medición de resistividades con sondeos eléctricos verticales o tomografía eléctrica) y electromagnéticos de inducción (EM), bien en dominio de tiempos (TDEM) o de frecuencias (FDEM). En ambos casos el parámetro utilizado es la resistividad eléctrica (o su inversa la conductividad), cuyo valor está fuertemente controlado por la presencia de agua, y la litología, debido a que la conducción eléctrica en medios rocosos (exceptuando las arcillas y materiales metálicos) es, fundamentalmente electrolítica (Olaiz *et al.*, 2009).

En el estudio de series detríticas permeables (excluidas las arcillas) el factor que más controla la resistividad es la porosidad, de manera que a mayor porosidad menor valor de resistividad. La elección del método de resistividades mediante SEV se debe a que los materiales presentan buenos contrastes de resistividad y a que es adecuado para los estudios hidrogeológicos en series detríticas. Por otra parte, se desechó la posibilidad de otros métodos (tomografía eléctrica) por limitaciones logísticas y porque la Unidad de Hidráulica de la República Árabe Saharaui Democrática sólo dispone de un resistímetro para SEV.

Para la prospección geoelectrica hemos utilizado un resistímetro con lectura digital y control automático de la polaridad DATARES de la casa Ambrogeo. La sensibilidad del equipo de resistividades es de 0,05 mV y 0,05 mA. Se ha utilizado una fuente de alimentación de corriente continua, que proporciona hasta 350 V con 160 mA. El dispositivo electródico utilizado en todos los sondeos eléctricos ha sido el Schlumberger, y la apertura de AB/2 máxima ha sido de 300 m, suficiente para obtener la geometría de las unidades en la cuenca de Dajla y el techo de las areniscas Ordovícicas. Los datos de resistividades aparentes frente a semi-apertura electródica (AB/2) obtenidos han sido invertidos mediante un sistema de inversión automática basado en el algoritmo de Constable *et al.* (1987), para obtener las resistividades y espesores reales de cada unidad geológica. Finalmente se ha realizado un análisis de equivalencia de los resultados de cada sondeo para tener cuantificada la incertidumbre de cada uno de los parámetros calculados. También se utilizó un resistímetro PASI, perteneciente a la unidad de Hidráulica de la República Árabe Saharaui Democrática.

Trabajos realizados

Durante la campaña de campo se realizó un total de 20 SEV, con una apertura

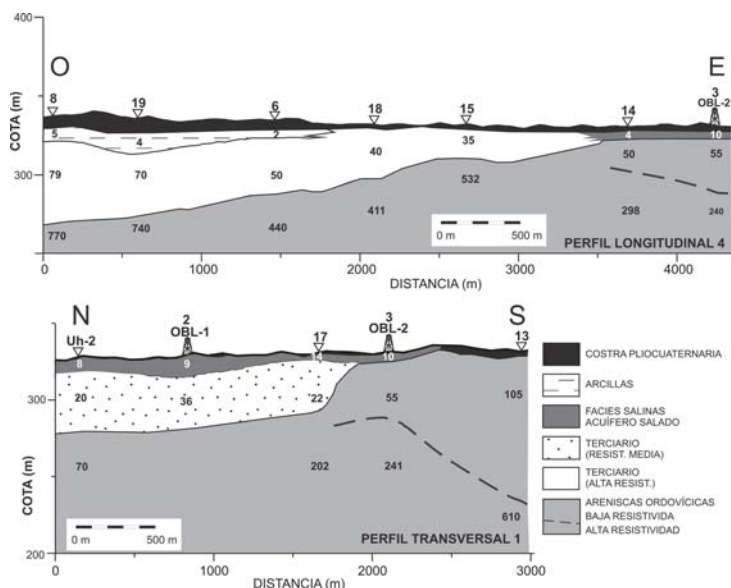


Fig. 2.- Estructura general de la cuenca de Dajla deducido del perfil longitudinal 4 y perfil transversal 1. Se muestra dentro del perfil los valores de resistividades (Ohm·m) calculados en los diferentes SEV. Ver figura 1 para la posición de los SEVs y cortes.

Fig. 2.- Overall structure of the Dakhla Basin, inferred from longitudinal profile 4 and transversal profile 1. Resistivity values (Ohm·m) calculated on each VES are also shown in the profile. See figure 1 for the VES positions and cross-sections.

de alas de entre 200 y 300 metros siempre paralelos a la dirección de la serie paleozoica (ENE-OSO) y una profundidad máxima de exploración de 150 metros. Para poder entender la distribución espacial y estructura del terreno, se realizan 9 perfiles, cinco de ellos longitudinales y paralelos a la dirección de la serie paleozoica y 4 de ellos transversales.

Posteriormente, y con el objeto de caracterizar la geometría en 3-D de las principales unidades, se han realizado una serie de mapas de las superficies de interés hidrogeológico, así como de los espesores de un nivel de acuífero salado. Por último, y para seleccionar áreas favorables para la ubicación de un nuevo pozo, se realizó un mapa de iso-resistividades reales del techo de las areniscas ordovícicas. Todos los mapas se han realizado mediante la interpolación de los datos de los sondeos, y de las condiciones geológicas de contorno a una malla regular de 100 m de lado mediante «Kriging» con variograma lineal. Las condiciones de contorno incluyen puntos digitalizados donde existía un control geológico en superficie (ej. Cartografía del Techo del Ordovícico), o bien extraídos de los cortes geológicos realizados. Finalmente la malla regular se ha suavizado y blanqueado en aquellas zonas donde no existían datos de las unidades para evitar una sobreinterpolación alejada de la realidad.

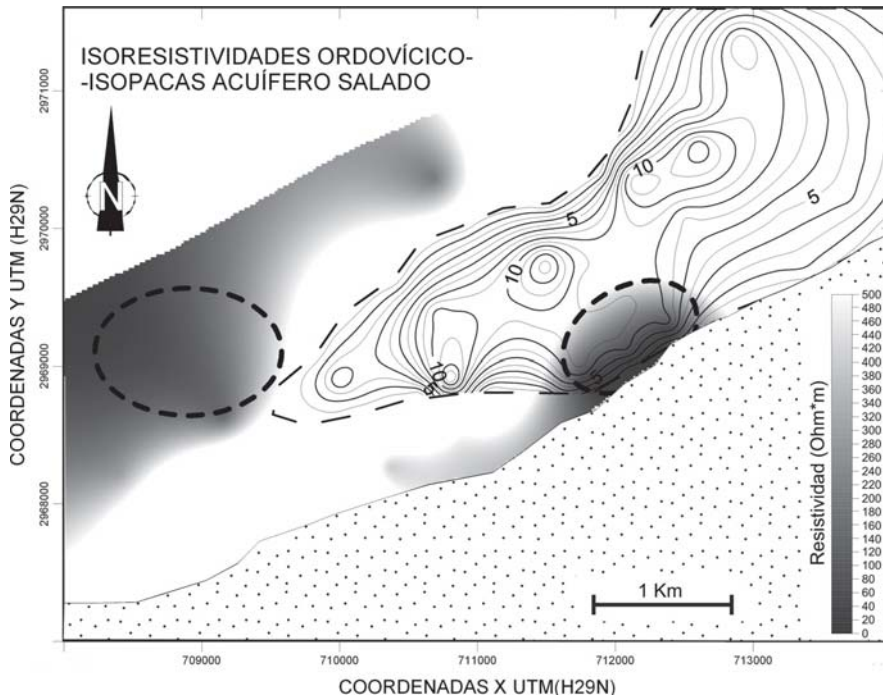


Fig. 3.- Mapa de Iso-resistividades de las areniscas del Ordovícico por debajo de la cuenca de Dajla, y mapa de isopacas del acuífero salado. Las elipses muestran dos áreas favorables para la ubicación de nuevos pozos. En la parte inferior derecha se muestra en punteado las areniscas Ordovícicas aflorantes.

Fig. 3.- Ordovician sandstones iso-resistivity map below the Dakhla Basin, and the isopach map of the salty aquifer. The white ellipses show two favorable areas for the location of the new wells. At the bottom right is shown in dots the Ordovician sandstone outcropping.

Resultados

La integración de los resultados de los Sondeos Eléctricos Verticales calibrados en los pozos existentes, con los afloramientos geológicos, ha permitido establecer una correlación entre niveles de resistividades y litología, separando a éstas en 7 grupos (Tabla I). A continuación se describen estas unidades:

En los perfiles observamos en superficie una unidad de alta resistividades que denominamos costra plio-cuaternaria, es una unidad irregular y discontinua que presenta espesores medios entre 2 y 4 metros pero que en algunos puntos como en los SEV 8 y 19 llega a alcanzar espesores de hasta 8-9 metros (Fig. 2).

Dentro de los materiales terciarios se distinguen cuatro unidades con contactos transicionales entre ellas: a) una unidad de muy baja resistividad que aparece en forma de lentejones formada por arcillas, b) una unidad de mayor espesor y de baja resistividad (perfil longitudinal 2, (Fig. 2) y c) otra unidad de gran espesor y de alta resistividad que se observa en el longitudinal 4 (Fig. 2). A techo de estas unidades de mayor espesor se observa en el sector central y al NE de la cuenca, la disposición de un nivel de muy baja resistividad (< 15 Ohm·m) que hemos inter-

pretado como «unidad de acuífero salado», por calibración con los sondeos presentes en la zona. Este acuífero salado alcanza su máximo espesor en los SEVs 2 y 11 (entre 12 y 14 m), y su disposición se observa en los cortes (Fig. 2) y en el mapa de espesor del mismo (Fig. 3). El mapa de isopacas muestra como este nivel se acuña hacia el SW y abre su extensión hacia el NE, destacando un fuerte gradiente del espesor en la zona de contacto con las areniscas ordovícicas (Fig. 3).

Con respecto a las areniscas ordovícicas, los cortes y mapas muestran el techo con una geometría irregular con un hundimiento generalizado del techo hacia el N y con variaciones laterales, lo que constituye un paleo-relieve (Fig. 2). Destaca un umbral más superficial de orientación N-S y dos zonas al NO y NE donde el techo del Ordovícico se encuentra más deprimido (Fig. 4). Dentro de las areniscas ordovícicas se distinguen dos unidades en función de su resistividades: una unidad de baja resistividad (alta porosidad) asociada a la presencia de agua dulce, estimando una potencia mínima de acuífero dulce en la posición del SEV 3 (pozo de abastecimiento) en aproximadamente 35 metros de espesor, y una unidad de alta resistividad, que en tres de los sondeos (3, 13 y 14) se dispone por debajo del nivel de menor resistividad (Fig. 2).

Conclusiones

Los datos obtenidos durante la campaña de campo realizada en Dajla del 28 de marzo al 10 de abril de 2009 y la interpretación de los mismos ha permitido la caracterización geoelectrica del techo del Ordovícico y de la estructura de la cuenca terciaria, con tres unidades, en la zona de estudio.

Los cortes y mapas realizados integrando la información geofísica y los datos geológicos de campo, han permitido delimitar las superficies del Techo del Ordovícico, así como definir la posición y espesor del acuífero salado presente en la zona.

El nivel de acuífero más favorable en la zona son las areniscas del Ordovícico, y la selección de las zonas

UNIDADES INTERPRETADAS	RESISTIVIDAD (Ohm·m)
COSTRA PLIO-CUATERNARIA	> 200
ACUIFERO SALADO	2 - 13
ARCILLAS TERCIARIAS	< 10
TERCIARIO (RESIST. MEDIAS)	20 - 50
TERCIARIO (RESIST. ALTAS)	50 - 90
ORDOVÍCO (RESIST. BAJA)	50-120
ORDOVÍCO (RESIST. ALTA)	> 120

Tabla I.- Unidades geológicas diferenciadas y valores de resistividades asignados.

Table I.- Characterized geological units and assigned resistivity values.

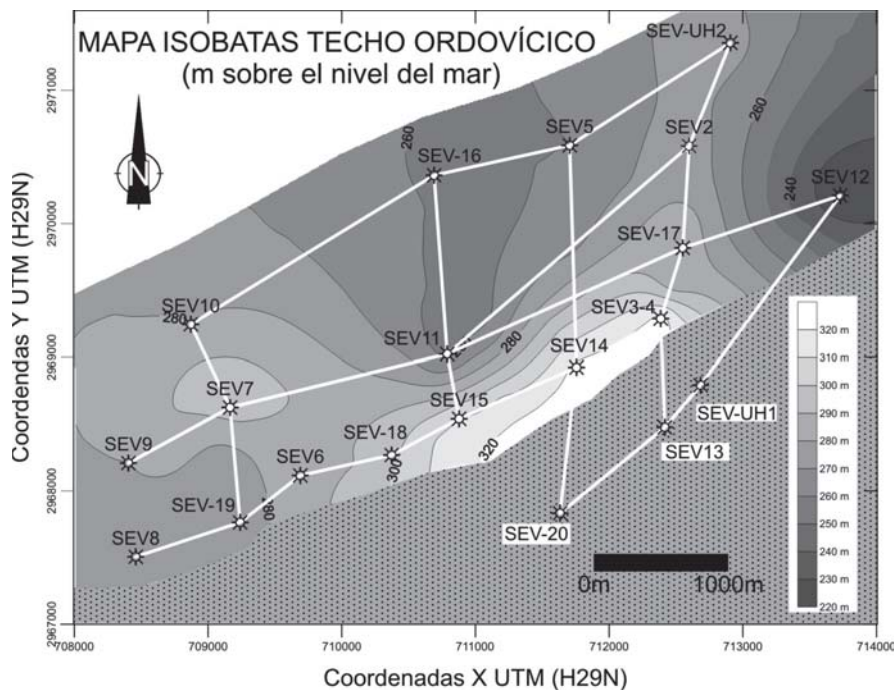


Fig. 4.- Mapa de Isobatas del techo de las areniscas del Ordovícico por debajo de la cuenca de Dajla. Las líneas blancas corresponden a la posición de los 9 perfiles interpretados. En la parte inferior derecha se muestra en gris punteado las areniscas Ordovícicas aflorantes.

Fig. 4.- Isobaths map of the top of the Ordovician sandstones below the Dakhla Basin. The white lines correspond to the position of the 9 interpreted profiles. At the bottom right is shown in dotted gray the Ordovician sandstone outcropping.

favorables para la ubicación de un nuevo pozo de abastecimiento se ha realizado teniendo en cuenta tres factores principales, 1) existencia de todo el espesor de areniscas ordovícicas (máxima transmisividad y recarga), 2) resistividades mínimas (altas porosidades) y 3) viabilidad logística, evitando un sobrecoste por perforación del terciario y cercanía a las infraestructuras existentes en Dajla.

Dado el mapa de iso-resistividades de las areniscas Ordovícicas, las zonas

más favorables (resistividades $< 300 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) se sitúan en torno al pozo actual OBL-2 y también en el extremo O del mapa (Fig. 4). Además en dicho mapa se muestra superpuesto el mapa de isopacas del acuífero salado con el fin de poder obtener el espesor del mismo en el punto de ubicación del pozo de abastecimiento.

Teniendo en cuenta los factores principales ya citados y el mapa de iso-resistividades, la zona más favorable es la que está situada más al Este (Fig. 4).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto de Cooperación al Desarrollo UCM «Formación práctica avanzada de profesionales para la exploración de aguas subterráneas y mantenimiento de infraestructuras asociadas en los campamentos de Refugiados Saharauis» y es parte del proyecto de fin de máster del primer autor. El trabajo ha sido llevado a cabo gracias a la colaboración de la asociación Geosolidarios y del grupo de Tectonofísica de la facultad de C.C. Geológicas de la Universidad Complutense, que ha cedido los equipos geofísicos. Los autores agradecen al revisor sus observaciones, que han mejorado el manuscrito original.

Referencias

- Constable, S.C., Parker, R.L. y Constable, C.G. (1987). *Geophysics*, 52, 289-300.
- Docampo, E. (2006). *Proyecto Fin de Carrera Universidad de Santiago de Compostela*, 169 p.
- Docampo, E. y Molinero, J. (2006). *Informe interno Ingeniería sin Fronteras-Galicia*, 20 p.
- Hernández-Pacheco, E., Hernández-Pacheco, F., Alía-Medina, M., Vidal-Box, C. y Guinea-López, E. (1949). CSIC, Instituto de Estudios Africanos, Madrid.
- Olaiz, A., Muñoz-Martín, A., Villarroya, F., De Lorenzo, J., Castanedo, C. y Padín A. (2009). *Geogaceta*, 46, p. 43-46.
- Ron Martín, M. (2006). *Informe interno Ingeniería sin Fronteras-Asturias*, 61 p.