

Prospección de recursos hídricos subterráneos en el área de Zug (Tiris, Sahara Occidental)

B. Ahmed⁽¹⁾, F. Villarroya⁽¹⁾, L. F. Rebollo⁽²⁾, A. Olaiz⁽³⁾ y J. López⁽⁴⁾

- (1) Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. C/ José Antonio Novais nº 12, 28040 Madrid. britosbritos2005@gmail.com. ferminv@geo.ucm.es.
(2) Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Universidad de Alcalá. luis.rebollo@uah.es.
(3) Repsol Exploración S.A. antoniojose.olaiz@repsol.com
(4) Instituto de Geociencias (CSIC-UCM). jlopez@geo.ucm.es

RESUMEN

El área de Zug se localiza en el extremo suroccidental de la dorsal de Tiris, en el Sahara Occidental. La zona se caracteriza por el afloramiento de materiales de edad arcaica, fundamentalmente gneises y rocas graníticas fracturadas; en el sector más meridional se encuentran cubiertos por mantos de arena eólica. Se ha hecho un reconocimiento hidrogeológico de los terrenos a partir de la realización de un inventario de puntos de agua y el estudio geológico de los materiales aflorantes, llegando a diferenciar dos dominios hidrogeológicos: Zug y Azzefal. En lo referente al dominio de Zug, que es el de interés en este estudio, a partir de análisis de imágenes de satélite, trabajo de campo, realización de perfiles geofísicos, inventario de puntos de agua y análisis químicos, se han identificado tres zonas preferentes para el emplazamiento de futuras captaciones orientadas al abastecimiento en puntos clave de la población autóctona de hábitat nómada y sus rebaños: 1) abanicos aluviales, ubicados preferentemente en las laderas de los diques que recorren la dorsal de Tiris; 2) *sabkhas*, como lugares de concentración de escorrentías efímeras y de infiltración al subsuelo del agua acumulada; 3) zonas graníticas intensamente fracturadas. A alguno de estos tres casos obedecen los pozos existentes en esta zona. Los trabajos de geofísica han detectado que, en localizaciones concretas, la resistividad eléctrica disminuye hasta profundidades superiores a los 50 metros, abriendo una puerta a la posibilidad de encontrar agua en cantidad suficiente para cubrir las necesidades antes aludidas. La calidad del agua no es la conveniente para el abastecimiento humano, pero con el tratamiento adecuado puede potabilizarse. Queda por delante un amplio campo de investigación cuando se den las condiciones políticas estables que permitan una investigación con mayor detalle.

Palabras clave: aguas subterráneas, *sabkhas*, Sahara Occidental, Zug.

Groundwater resources exploration in the Zug area (Tiris, Western Sahara)

ABSTRACT

*The area of Zug is located in the southwestern corner of the Tiris dorsal, in the Western Sahara. The area is characterized by outcrops of materials, mainly gneisses of archaic age and fractured granitic rocks, which in the southern sector are covered by aeolian sand sheets. A hydrogeological survey of the territory has been carried out, and boreholes and dug wells have been located and analyzed and this information integrated with the sparse outcrops. Based on this study, two hydrogeological domains have been established: Zug and Azzefal. From the analysis of satellite images, field work, geophysical profiles, a well inventory and chemical analysis, three priority areas for the location of future water supply wells have been identified: 1) alluvial fans, preferably located on the slopes of the dikes that cross the Tiris dorsal; 2) *sabkhas* (salt flats) as places of concentration of ephemeral runoff and subsurface infiltration of accumulated water; 3) highly fractured granitic areas. Some of these three cases coincide with existing wells in this area. Electrical tomography shows how, in specific locations, low resistivity values reach 50 metres, opening up the possibility of finding sufficient water to meet the aforementioned needs. The water quality is not suitable for human supply directly from the*

well without chemical treatment. The area is still full of opportunities for future research, but only when a more stable political situation exists.

Key words: groundwater, sabkhas, Western Sahara, Zug.

ABRIDGED VERSION

Introduction and methods

The main aim of this paper is to locate suitable geological formations for storing enough high quality groundwater to enable new Saharan settlements to be established in the Tiris area (Western Sahara). The study area (Fig.1) presents predominantly gneiss materials and fractured granite with Quaternary sediments represented by large sandbanks, deposited on the *sabkhas* and alluvial fans (Fig. 1; Tables 1 and 3). Two geological survey campaigns were carried out in the area to facilitate this study. An inventory of water points (Table 2) was also drawn up and samples were taken for later physico-chemical analysis. Eighteen wells had been inventoried (Figs. 8 and 9). The geophysical campaign carried out (Figs. 2 and 3) obtained 8 electric tomography profiles which were interpreted by inversion, using code RES2DINV. The data recorded at the Zouerat and Atar meteorological stations (Fig.4) shows significant differences in the distribution throughout the year, but not in the annual total. The mean temperature is slightly below 25°C in the winter months and above 30°C in the summer months (Figs. 5 and 6).

The hydrographic network can be classified into three main groups (Fig. 7) 1: a network of well-defined channels; this network is mainly related to ancient river zones from the Neolithic, when these areas were covered with vegetation and perennial water drainage occurred through the river channels. Nowadays, it is in these dry channels where most sediment load transport occurs, swept along by the water during precipitation events. 2: networks linked to alluvial fans; this network is formed by small channels carved out by the water during rainfall episodes. They characteristically present low development and their configuration is modified with each rainfall period. 3: *Sabkhas*: these are well developed throughout the study area. They normally are surface discharge points during rainfall episodes since much of the water transported by the surface runoff ends up in them. Many of the dug wells are found in the *sabkha* zones. The *sabkhas* may be possible aquifer recharge points.

Results and discussion

At the Tiris dorsal, aquifers formed by consolidated materials cover most of the terrain, and can be separated into two hydrogeological domains (Fig. 9). The consolidated materials present a widespread distribution of granite and gneiss. These present high-level fracturing due to the intense weathering processes, mainly conditioned by the abrupt temperature changes between day and night. This has led to the formation of weathered mantles (regolith), which cover the crystalline substratum.

The results obtained from chemical analyses of the water show that the groundwater can be grouped into three families (Fig. 10), calcium sulphate and chloride; sodium chloride; calcium bicarbonate.

Profile 1 of the electrical tomography (Fig. 11) shows that there is a significant decrease in resistivity values at a 100 m (horizontal axis), especially near the surface coinciding with the main Atui channel. The decrease in resistivity leads us to suspect the presence of a fault zone with possible water content, as also occurs in Profile 2. Profiles 4 and 5 show that the zone has been altered as a result of intense erosion processes. The recorded resistivity values present a similar behaviour to Profiles 1 – 3, with a considerable difference in depth, especially in Profile 4 where the resistivity values decrease to depths of over 50 m, which indicates the presence of a water accumulation zone. In the case of Profile 5, it can be seen that at depths over 40 m the resistivity values increase drastically, probably due to the presence of fresh granite. In contrast to the above, Profile 6 shows that very high resistivity values are recorded near the surface. An explanation for this may be the gabbro dike outcrops present in the area. Decreased resistivity values can also be observed along a possible fault plane. In Profiles 7 and 8 the resistivity values recorded first show a decrease to a depth of 17 – 20 m, and then show a gradual increase. This is thought to be due to the proximity of granite materials not exposed to weathering processes.

Summary description of the hydrogeological functioning of the Zug region

The above mentioned, stratigraphic, sedimentological and hydrogeological studies together with the geophysical survey, the observations and the analyses carried out during the campaigns in Zug, have been used to define the preliminary hydrogeological functioning of this region (Fig. 12).

This scheme shows three main locations for water catchment: i) the alluvial fans with groundwater at shallow depths in the detrital materials of these deposits commonly found at the bases of the great elevations such as the Zug dike; ii) the groundwater linked to the *sabkhas*, which are the preferred sites to receive ephemeral runoff and its later infiltration to the subsoil; iii) thirdly, the identification of locations where intense fracturing has occurred as indicated by the geophysical survey, enabling groundwater storage and flow. Water quality suitable for human consumption cannot be guaranteed in any of these three sites, either because of excessively high dissolved salt content or because of the presence of nitrates requiring chemical treatment.

The main conclusions are as follows:

- The scarce precipitation recorded in the region, with a mean value of 125 mm/year, the high evapotranspiration and the very low permeability of the materials (except in the alluvial fans) determine that in most years an extremely low or non-existent recharge, confirming that the groundwater resources in the region do not guarantee sufficient supply to satisfy the needs of possible settlements or significant population nuclei. Nevertheless, it seems that at specific sites these resources could be used to alleviate the water supply requirements of the nomadic population and their herds.
- The hydrogeological survey of the study area reveals there are two predominant types of materials suitable for groundwater flow and storage: crystalline rocks (hardrocks) which have suffered high-level fracturing and/or weathering, and detrital deposits associated with the fluvial dynamics and alluvial fans, or with aeolian activity. Of these, the most suitable structures for water accumulation during rainfall episodes are the *sabkhas*, the areas with intense fracturing, and the sand deposits found in sites with a topographic slope change.
- The results obtained from the analysis and interpretation of eight geophysical profiles show very low resistivity values at depths greater than those estimated in the scientific literature, suggesting that there are chances of finding water there.
- Based on the work undertaken, a model of water resources prospecting in the area is presented, proposing the alluvial fans, the *sabkhas* and deep boreholes at points on the valley subjected to fracturing as the best sites to find groundwater.
- Test boreholes and piezometric measurements are recommended, as well as pumping tests and the installation of pluviometers. These will provide a more precise understanding of the hydrogeological parameters and will facilitate the quantification of the effective recharge of the aquifer formations, enabling a more precise assessment of the available groundwater reserves and resources.

Introducción y objetivo

En la región argelina de Tinduf, desde 1975, se encuentran viviendo en campamentos de refugiados alrededor de 200.000 saharauis. El gobierno de la República Árabe Saharaui pretende trasladar población a los territorios del Sahara, para lo cual es prioritario encontrar fuentes de suministro de agua potable. Por esta razón se ha planteado la prospección de recursos hídricos en la región de Zug, que se localiza en el sector sureste del Sahara Occidental (Fig. 1). Este trabajo se ha llevado a cabo entre 2010 y 2014 como parte del proyecto de tesis doctoral del primer firmante. Se trata de un trabajo hidrogeológico de notable dificultad, puesto que ni el clima de la región ni los tipos de materiales que afloran son los más apropiados para encontrar recursos hídricos en cantidad y calidad adecuadas para satisfacer las necesidades detectadas, a lo que se une la inestabilidad política que dificulta extraordinariamente la realización de investigaciones en la zona. Por otra parte, los escasos antecedentes bibliográficos tan solo muestran estudios llevados a cabo casi exclusivamente por geólo-

gos españoles en las zonas costeras; mientras que en la zona de estudio solo existe un trabajo llevado a cabo por Quiroga (1886), durante la época en la que el territorio formaba parte de España. Los trabajos han consistido en el reconocimiento sobre el terreno y posterior análisis en laboratorio de los materiales geológicos más representativos de la región y en la realización de un inventario de puntos de agua. Durante el inventario se procedió a la toma de muestras de agua y a la determinación in situ de parámetros físico-químicos inestables. Se completó el reconocimiento de campo con la elaboración de ocho perfiles geofísicos de tomografía eléctrica (2D). Todo ello ha llevado a la presentación de un primer esquema de presencia de reservorios de aguas subterráneas que es necesario analizar con mayor detalle en futuras etapas de investigación.

El objetivo principal de este trabajo es la localización de emplazamientos geológicos favorables para el almacenamiento de agua subterránea en cantidad y calidad suficiente para la instalación de nuevos asentamientos saharauis en la zona. Esto se ha llevado a cabo en gran medida merced a la aplicación de

la tomografía eléctrica en zonas de fractura previamente cartografiadas en superficie a través de imágenes de satélite (Muñoz Martín *et al.*, 2007).

Marco geológico

El área de estudio se encuentra en el extremo suroccidental de la Dorsal de Tiris (más conocida en la bibliografía científica como Dorsal de Regueibat). Dicha estructura constituye la avanzada occidental del gran escudo africano que limita al sureste con la cuenca de Taoudenni, mientras que por el noroeste lo hace con la cuenca de Tinduf (Fig. 1). La dorsal está constituida principalmente por materiales de edad Arcaico y Paleoproterozoico (Menchikoff, 1949). La parte suroccidental de la Dorsal de Tiris, donde se encuentra nuestra zona de estudio, se caracteriza principalmente por el predominio de materiales arcaicos (Quiroga, 1886; Sougy, 1954). Los trabajos realizados por Quiroga (1886), Blanchot (1953), Dillon y Sougy (1974) y Bessoles (1977) distinguen dos grandes grupos geológicos que presentan una marcada diferencia litológica, los cuales se encuentran separados por una zona de cizalla (Tabla1): 1) Grupo de Rag-Chum, 2) Grupo Tasiast-Tijirit.

El área donde se llevó a cabo el presente trabajo pertenece al grupo de Tasiast-Tijirit, que se caracteriza por la presencia de gneises migmatíticos y cinturones de rocas verdes que no están presentes en Rag-Chum, así como una amplia presencia de granodioritas cuya edad está comprendida entre 2,34 y 2,84 Ga (Bonnici y Giraudon, 1963; Rocci *et al.*, 1991). Dentro de este grupo se describen siete tipos

de litologías: Diques de Gabro, Cinturones de rocas verdes, Granitoides, Gneises y Anfibolitas, Granitos, Metagabros, Rocas metamórficas (Blanchot, 1953; Bronner, 1992; Potrel, 1994; Pitfield *et al.*, 2005). En general en la zona estudiada existe un predominio de materiales gneísicos y granitos fracturados junto con sedimentos cuaternarios representados por grandes bancos de arena, depósitos en las *sabkhas* y abanicos aluviales (Fig. 1).

Metodología

Para la realización de este trabajo se han llevado a cabo dos campañas de reconocimiento geológico de los terrenos y la toma de muestras (cuyos resultados se recogen en Ahmed *et al.*, 2014). Igualmente se realizó el inventario de puntos de agua y la toma de

| GRUPO | ARCAICO | EDAD | LITOLOGÍA |
|----------------|---------|-------------|--|
| | | 2.9 Ga | DIQUE DE GABRO CINTURÓN DE ROCAS VERDES GRANITOIDES GNEISES Y ANFIBOLITAS |
| GRUPO RAG-CHUM | ARCAICO | EDAD | LITOLOGÍA |
| | | 3.5-3.45 Ga | GRANITOS METAGABROS ROCAS METAMÓRFICAS GNEISES Y ANFIBOLITAS |

Tabla 1. Unidades litológicas y edades de los diferentes materiales geológicos en el área de estudio.

Table 1. Lithological description and age of the units present in the study area.

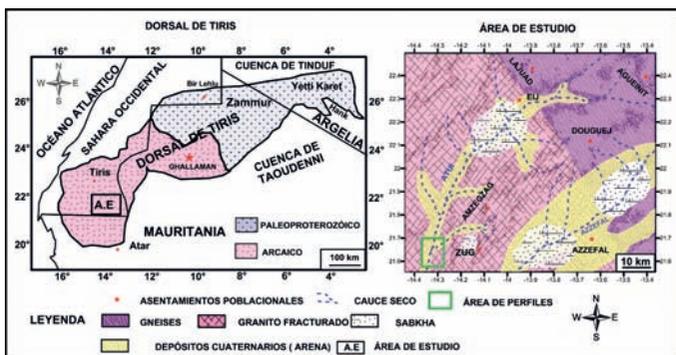


Figura 1. Localización geográfica y mapa geológico tanto de la dorsal de Tiris como Zug, con indicación de la zona de emplazamiento de los perfiles geofísicos realizados.

Figure 1. Geographical location and geological map of both the Tiris dorsal as Zug, including the location of the geophysical profiles.



Figura 2. Localización de la zona donde fueron emplazados los perfiles. A, B, C, representan las áreas de fractura donde se llevaron a cabo los trabajos geofísicos.

Figure 2. Location of the geophysical profiles. A, B, C represent the fractured areas where geophysical investigation was carried out.

muestras de agua para realizar un posterior análisis físico-químico. Se han inventariado 18 captaciones en las que se han medido parámetros físico-químicos mediante una sonda multiparamétrica modelo GPS AQUAREAD (AP 600). Durante la campaña se recogieron 18 muestras de 200 ml de agua que fueron posteriormente analizadas en el Centro de Espectrometría Atómica (CEA) de la Universidad Complutense de Madrid.

Las imágenes Landsat interpretadas han sido de valiosa ayuda a la hora de elegir los emplazamientos más adecuados para la campaña de prospección geofísica (realizada en el mes de abril de 2011). Se ha empleado, la tomografía eléctrica como método más idóneo para la exploración de aguas subterráneas en zonas remotas o de muy difícil acceso, como es nuestro caso; esto se debe principalmente a la versatilidad y al gran número de datos que se obtienen en cada lectura, en comparación con otros métodos como el sondeo eléctrico vertical (SEV). El método consiste fundamentalmente en analizar la variación de resistividad a lo largo del perfil geoelectrico, el contraste se debe a diferentes factores, entre ellos la posible presencia de agua en el subsuelo que da lugar a un aumento sustancial en los valores de la conductividad eléctrica, produciendo un descenso de resistividad; todo ello en contraste con valores de resistividad muy altos, especialmente cuando se trata de granitos frescos. Las mediciones fueron realizadas con un georresistivímetro Syscal R1 Switch 48 (Iris), que puede conectarse a una configuración lineal de 48

electrodos, con espaciado de 5 m, potencia de 200 watts, intensidad de 2,5 amperios y una tensión de 600 voltios. El resistivímetro puede realizar de forma automática un conjunto predeterminado de mediciones de acuerdo con el tipo de configuración elegido; en nuestro caso la configuración elegida fue la Wenner-Schlumberger. Con arreglo a este esquema, se ha llevado a cabo una serie de 8 perfiles (Figs. 2 y 3), la longitud cubierta por el perfil geoelectrico fue de unos 220 m en cada caso, con medidas realizadas hasta profundidades de 50 metros, debido principalmente al predominio de materiales de naturaleza granítica y a que las fracturas suelen cerrarse a esas profundidades.

Todas las secciones de tomografía eléctrica fueron interpretadas mediante inversión, utilizando el código RES2DINV (Griffiths y Barker, 1993; Loke y Barker, 1996; Loke, 2004; Dahlin y Zhou, 2004).

Climatología

La principal dificultad para abordar el análisis del clima tanto en el área de estudio como en el resto del territorio saharauí es la falta de datos, ya que no existen estaciones meteorológicas. Las más cercanas se localizan en territorio mauritano, particularmente en los enclaves de Zouerat y Atar; la primera a unos 80 km y la segunda a unos 100 km de la zona de estudio (Fig. 4). Estas estaciones están administradas por la Sociedad de Aeropuertos de Mauritania (SAM), a través de la cual se ha podido obtener buena parte de la información que se emplea en el desarrollo de este trabajo. Los datos de temperatura (máxima y mínima), presión atmosférica, velocidad de los vientos y precipitaciones recopilados para este trabajo en las dos estaciones mencionadas corresponden a la serie de 20 años comprendidos entre 1990 y 2009; se tratan aquí los datos facilitados por la SAM referidos a las medias mensuales de temperatura (Fig. 5) y los valores mensuales de precipitación (Fig. 6) que cubren ese periodo.

En concreto, los registros de temperatura en la estación de Zouerat (Fig. 5) durante los meses de septiembre a marzo presentan una media inferior a 25°C a lo largo de los veinte años de registro, mientras que los meses que van desde abril hasta agosto presentan una media comprendida entre 25°C y 34°C. La estación de Atar (Fig. 5), se comporta de manera similar.

La zona de estudio se localiza entre estas dos estaciones mauritanas, por lo que cabe suponer, como primera aproximación, que tenga una temperatura similar. No obstante, conviene destacar que nuestra zona de estudio está más cerca del Océano Atlántico lo que



Figura 3. Aspecto del terreno donde se proyectaron los perfiles durante la campaña de geofísica de 2011.

Figure 3. Aspect of the land during the geophysical research in 2011.

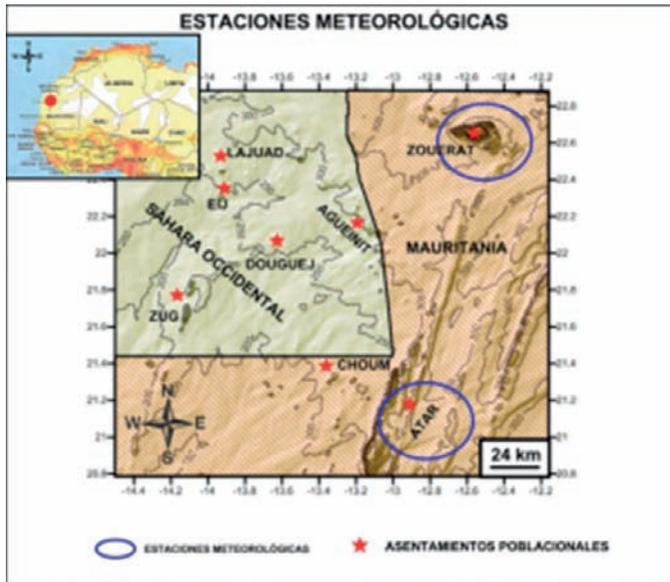


Figura 4. Mapa topográfico con la representación del área de estudio y las estaciones meteorológicas.

Figure 4. Topographic map of the study area and locations of meteorological stations.

probablemente supondrá una cierta suavización de los valores debido especialmente a la influencia de las corrientes de aire que provienen del océano.

En el Sahara las precipitaciones suelen ser ocasionales y pueden ocurrir en cualquier época del año, pero preferentemente en la época de verano. Presentan con frecuencia un carácter torrencial muy intenso y pueden cambiar el paisaje del desierto inun-

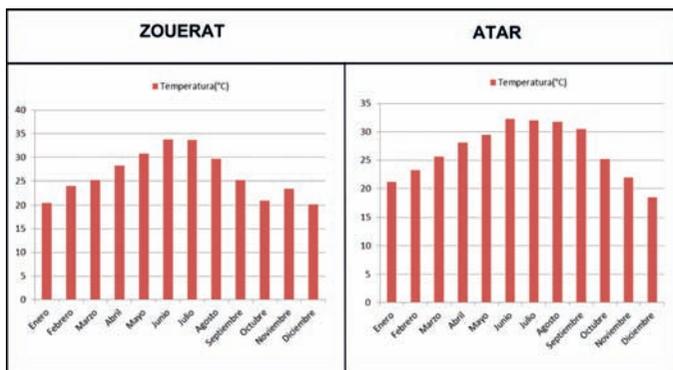


Figura 5. Temperaturas medias mensuales para el periodo 1990-2009 en las estaciones de Zouerat y Atar. (Elaboración propia a partir de datos de la Sociedad de Aeropuertos de Mauritania).

Figure 5. Average monthly temperatures for the period 1990-2009 at Zouerat and Atar. (Own elaboration from the Society of Airports in Mauritania Development).

dando extensas áreas en un lapso de tiempo muy reducido.

Los datos registrados en las estaciones meteorológicas de Zouerat y de Atar para el periodo comprendido entre 1990 y 2009 presentan una marcada diferencia en su distribución a lo largo del año (Fig.6), no así en su cuantía anual que resulta ser de 133 mm/año en Zouerat y de 121 mm/año en Atar.

Hidrología superficial

El área de estudio se caracteriza, al igual que todo el territorio saharauí, por presentar una precaria red de drenaje debido a que las lluvias, aunque escasas, en muchas ocasiones son intensas y a que los suelos están pobremente protegidos por la vegetación (Yair y Lavee, 1985). Esta precariedad no siempre ha reinado en el territorio, en épocas del Neolítico existía un clima más húmedo que se caracterizaba por la presencia de episodios de lluvia más frecuentes y un desarrollo más amplio de la red fluvial. La red de drenaje presente en el área se puede clasificar en tres grandes tipos:

- *Red de cauces bien definidos:* Relacionada en su mayoría con ríos antiguos que existieron en el Neolítico, cuando estas áreas estaban cubiertas por vegetación y existía un drenaje de agua por los cauces de forma perenne. La existencia de ríos está contrastada en el estudio paleoambiental realizado por Gasse (1999) en zonas tropicales y subtropicales de África. Este autor llegó a la conclusión de que hace alrededor de 10.000-4.000 años la región presentaba un amplio desarrollo de vegetación condicionado por la existencia de periodos de lluvia más frecuentes. El mismo autor demuestra también que los periodos de alternancia climática

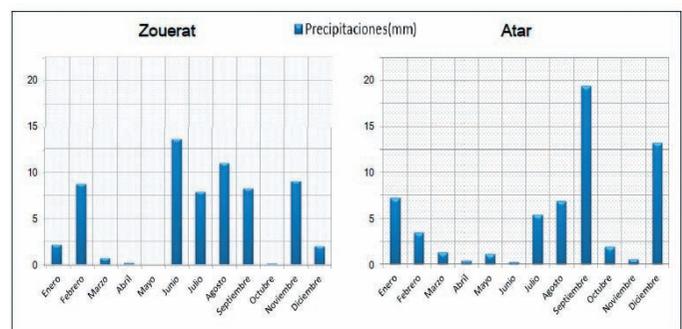


Figura 6. Precipitaciones medias para el periodo de 1990-2009 en las estaciones de Zouerat y Atar.

Figure 6. Average rainfall for the period 1990-2009 at the Zouerat and Atar stations.

que dieron lugar al actual desierto, y por ende al precario desarrollo de la red hidrográfica, tuvieron lugar durante el Holoceno. En la actualidad estos cauces secos constituyen, durante los aguaceros, el lugar por donde transita la mayor carga de sedimentos que es arrastrada por las aguas; también constituyen los lugares donde se concentra la vegetación más desarrollada (acacias).

- **Red asociada a abanicos aluviales:** Con amplia presencia en el área de estudio, especialmente en el dique de Zug, se trata de una red formada por pequeños cauces que son labrados por las aguas durante los episodios de lluvia. Se caracteriza por presentar un pobre desarrollo, y cambiar su configuración con cada periodo de lluvia; en ella se da también una cierta concentración de vegetación, especialmente de acacias.
- **Sabkhas:** Con un amplio desarrollo en toda el área de estudio, se caracterizan por ser puntos de concentración del agua superficial durante los episodios de lluvia, ya que una gran parte del agua transportada por la escorrentía superficial termina en ellas. La mayoría de las captaciones del agua que se emplea para el consumo animal se localizan en las zonas de sabkha. Pueden constituir posibles puntos de recarga de los acuíferos. En el área de estudio las aguas de lluvia pasan por los tres tipos mencionados (Fig. 7): el agua caída durante las precipitaciones circula inicialmente por los abanicos aluviales, después forma la escorrentía canalizada en los arroyos y ríos, y finalmente es descargada en las sabkhas, donde parte del agua se infiltra y el resto sufre procesos de evaporación.

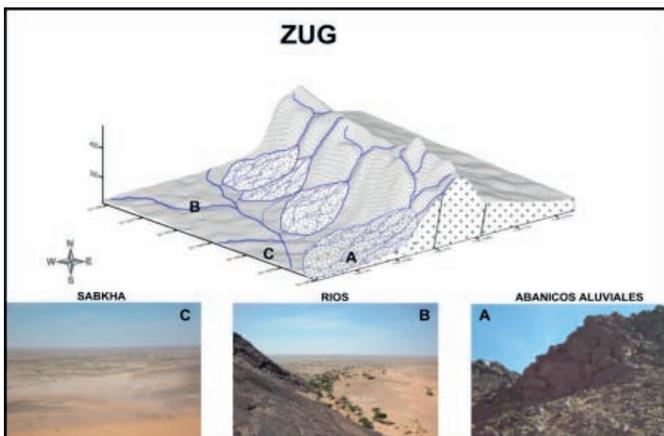


Figura 7. Representación esquemática de los diferentes tipos de drenaje que intervienen en la hidrología superficial en Zug.
Figure 7. Schematic representation of the different drainage types involved in the surface hydrology in Zug.

Inventario de puntos de agua

La naturaleza de los puntos de agua en el territorio saharauí corresponde a captaciones someras de muy poca profundidad, que en su mayoría se localizan en el lecho de los cauces secos o cerca de zonas de *sabkha*; unas y otras representan casi la totalidad de los pozos existentes en el territorio estudiado. Un segundo grupo corresponde a las captaciones de mayor profundidad, fundamentalmente sondeos o pozos perforados. Se ha realizado un inventario de puntos de agua de carácter general, y a la vez representativo de todo el territorio (Fig. 8), con el objetivo de caracterizar las captaciones existentes y, en la medida de lo posible, extraer algunas conclusiones sobre el comportamiento hidrogeológico de la región. Se dividió el trabajo en dos fases:

- En una primera etapa se procedió a la selección de los puntos de agua más significativos en todo el territorio (Tabla 2). Se tomaron datos sobre las características generales de las captaciones (profundidad y diámetro de la obra, profundidad del nivel estático del agua, etc.) y del uso que actualmente se hace del agua captada. Se seleccionaron 18 captaciones que reunían las características necesarias para ser estudiadas en detalle.
- En la segunda fase se procedió al análisis in situ de las propiedades físico-químicas del agua, la recogida de muestras para las posteriores determinaciones analíticas en laboratorio.

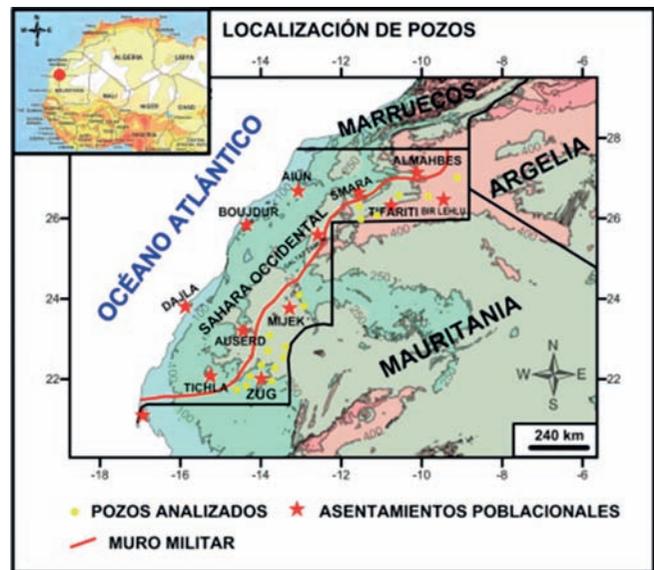


Figura 8. Localización de las diferentes captaciones muestreadas durante la campaña de campo en el territorio saharauí.
Figure 8. Location of the different catchments sampled during the field campaign in the Saharan territory.

| NOMBRE DEL POZO | CÓDIGO | Latitud | Longitud | Altitud (msnm) |
|---------------------------|--------|--------------|-------------|----------------|
| LIGAZA | 4 | N 2947029.36 | E 505044.02 | 435 |
| BIR LEHLU (POTABLE) | 6 | N 2914464.96 | E 443032.77 | 485 |
| BUEIR KANAM | 8 | N 2916524.93 | E 429757.56 | 483 |
| SONDEO BUEIR TIKISIT | 9 | N 2879287.67 | E 351554.68 | 497 |
| POZO ARTESANAL (TIKISIT) | 10 | N 2880245.30 | E 350223.79 | 506 |
| SONDEO TIFARITI (OFICIAL) | 11 | N 2894058.68 | E 343874.06 | 499 |
| SONDEO NUEVO (TIFARITI) | 12 | N 2894998.15 | E 344288.68 | 497 |
| SONDEO TIFARITI (ÓSMOSIS) | 13 | N 2894639.76 | E 343746.88 | 506 |
| POZO ARTESANAL (AMHERIZ) | 14 | N 2893647.50 | E 294139.03 | 383 |
| POZO ASFEIA | 15 | N 2897177.87 | E 270545.89 | 351 |
| ARTESANAL (MIJEK,MINURSO) | 16 | N 2596852.66 | E 729928.85 | 282 |
| POZO EIJ | 18 | N 2467667.33 | E 609042.50 | 274 |
| ARTESANAL (ZUG,POTABLE) | 19 | N 2390207.43 | E 588171.83 | 223 |
| POZO AGLAT (ZUG) | 20 | N 2388861.49 | E 588022.20 | 221 |
| POZO MABRUK (ARTESANAL) | 22 | N 2454209.04 | E 698154.73 | 329 |
| AGUEINIT OFICIAL | 24 | N 2454110.13 | E 691394.18 | 320 |
| AGUEINIT OESTE | 26 | N 2454072.64 | E 691005.40 | 320 |
| SONDEO AGUEINIT | 28 | N 2454112.10 | E 691392.96 | 344 |

Tabla 2. Lista de captaciones muestreadas durante la campaña de campo 2011.
Table 2. List of wells sampled during the 2011 field campaign.

Características de los acuíferos en la región

Los acuíferos existentes en el área de estudio se pueden dividir en dos grandes grupos, tal y como puede verse en la Tabla 3: acuíferos formados por materiales detríticos sueltos y acuíferos fracturados de las rocas ígneas y metamórficas (*hard rocks*).

En Tiris los acuíferos constituidos por materiales consolidados, granitos y gneises cubren la mayor parte del territorio, y están representados en los dos dominios hidrogeológicos predominantes en el área (Fig. 9). Los materiales presentan un alto grado de diaclasamiento como consecuencia de los bruscos cambios de temperatura entre el día y la noche. Ello ha dado lugar a la formación de mantos de alteración (regolitos), que cubren el substrato cristalino.

Los regolitos juegan un papel importante en la hidrogeología de la zona de Tiris, especialmente si se tiene en cuenta que en el área no existe una red de drenaje muy bien definida, y que durante los episodios de lluvia gran parte del agua se almacena en los mantos de alteración, merced a su estructura porosa intergranular. Además los regolitos existentes en el área actúan también como posibles puntos de recarga de acuíferos profundos que están vinculados a grandes sistemas de fracturas, como parece ocurrir en el entorno del del sondeo de Agueinit, de 140 m de profundidad.

Caracterización química de las aguas

Se han procesado los datos de los análisis químicos efectuados a las diferentes muestras. El diagrama de Piper correspondiente a la zona de estudio, se obtuvo

| SÍNTESIS ESTRATIGRÁFICA DE LA DORSAL DE TIRIS | EDAD | SERIE ESTRATIGRÁFICA | LITOLOGÍA | OBSERVACIONES |
|---|-------------|----------------------|--|---|
| | CUATERNARIO | | | ARENA DE ORIGEN EÓLICO |
| | | | MATERIAL DETRÍTICO (GRAVA Y ARENA) | ACUÍFERO LIBRE |
| | | | ROCAS EVAPORÍTICAS Y MATERIAL CARBONATADO (SABKHA) | ACUÍFERO LIBRE |
| | | | DISCORDANCIA | |
| ARCÁICO | | | GNESIS | MATERIALES CONSOLIDADOS ACUÍFERO LIBRE |
| | | | GRANITOS MUY FRACTURADOS | |

Tabla 3. Síntesis estratigráfica de los diferentes materiales constituyentes de las unidades hidrogeológicas definidas en la región de Tiris (elaboración propia).
Table 3. Stratigraphic synthesis of different materials of the hydrogeological units in the region of Tiris (own elaboration).

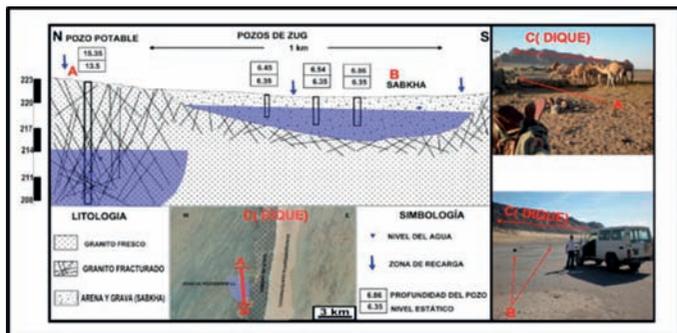


Figura 9. Características hidrogeológicas de los acuíferos de materiales consolidados y no consolidados en la región de Zug (Elaboración propia).

Figure 9. Hydrogeological characteristics of consolidated and non-consolidated aquifers in the region of Zug (own elaboration).

a partir del procesamiento de los análisis de las 18 muestras de campo con AquaChem 4.0, un programa informático diseñado por Waterloo Hydrogeologic, y con Diagrammes, programa de uso libre creado por la Universidad de Avignon. El procesamiento de la información en estos dos programas da como resultado representaciones gráficas y numéricas, además de que permite interpretar los datos de calidad del agua (Postma, 2005). El agua analizada se agrupa básicamente en tres familias (Fig. 10):

- Aguas cloruradas-sulfatadas cálcicas
- Aguas cloruradas sódicas
- Aguas bicarbonatadas cálcicas

La mayoría de las muestras se agrupan dentro de la familia de aguas cloruradas-sulfatadas cálcicas, otras pocas son aguas cloruradas sódicas, y sólo una captación corresponde al rango de las aguas bicarbonatadas cálcicas. El predominio de las aguas cloruradas en el área de estudio se debe a los procesos de evaporación a los que se encuentra sometida el agua en un clima desértico. Estas tipologías se sitúan tanto en las *sabkhas* como en los granitos fracturados.

En el caso de la familia de aguas bicarbonatadas cálcica, sólo una corresponde a esta tipología y se trata de un pozo artesanal en la región de Amheiriz emplazado en una zona donde los materiales predominantes son arenas cuaternarias depositadas durante periodos de crecidas de los arroyos efímeros existentes en la zona.

Resultados de la prospección geofísica

Los ocho perfiles geofísicos elaborados se han obtenido con datos de campo que cuentan con un pequeño margen de error (inferior al 3%) lo cual les confie-

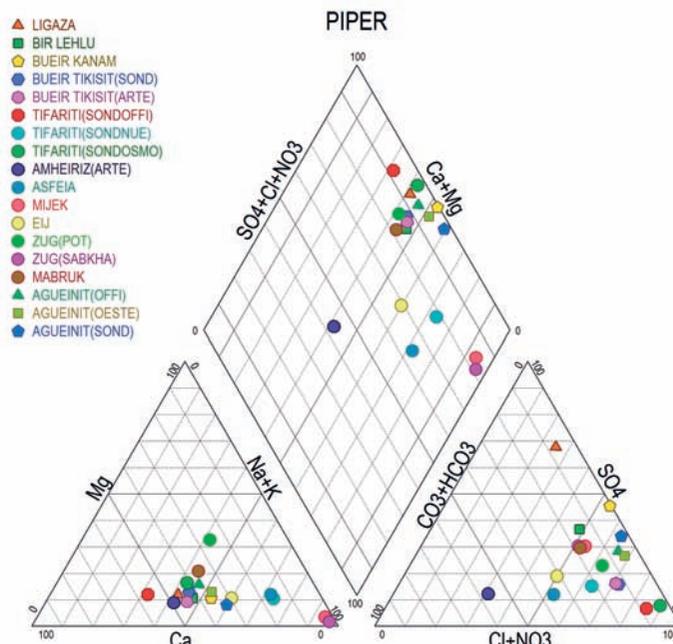


Figura 10. Representación de las características químicas de las captaciones analizadas, mediante el diagrama de Piper-Hill-Langelier.

Figure 10. Representation of the groundwater chemical characteristics analyzed by the Piper-Langelier-Hill diagram.

re un coeficiente de fiabilidad muy alto (del 97%) y, por consiguiente, una calidad muy notable.

Los perfiles 1, 2 y 3 (Fig. 11) se localizan en un cauce seco por donde circulan las aguas tan solo durante episodios de lluvia. El cauce está atravesado por una falla que actúa como una barrera que facilita el que las aguas provenientes de la lluvia se infiltren en el subsuelo. En el perfil 1 se puede observar que en la zona central (a unos 100 m del SW) hay una disminución acentuada de los valores de resistividad, principalmente cerca de la superficie coincidiendo con el cauce principal de Atui. La explicación puede estar en el precario desarrollo de la red fluvial, lo cual da lugar a que durante los periodos de lluvias torrenciales el agua se acumule en los cauces secos. Parte de estas aguas se infiltraría en suelo y el resto quedaría sometida a evaporación.

Los perfiles 2 y 3 se ubican igualmente en el centro de un cauce seco. Los valores de resistividad presentan una variación en la vertical, experimentando un descenso a lo largo del eje de fractura incluso a profundidades superiores a los 40 metros.

Los perfiles 4 y 5 se localizan a más de un kilómetro de los perfiles anteriores, emplazados en el centro del cauce atravesado por un dique cortado por fracturas; además, la zona se encuentra además muy

alterada. Los valores de resistividad registrados presentan un comportamiento similar a los perfiles del 1 al 3 pero con una marcada diferencia en profundidad, especialmente en el perfil 4 donde los valores de resistividad descienden incluso a profundidades superiores a los 50 metros, lo cual podría indicar la posible existencia de una zona donde se acumula agua. La disminución de la resistividad coincide con el plano de falla (Fig. 4). En el caso del perfil 5 se puede apreciar que a profundidades superiores a los 40 metros los valores de resistividad aumentan de forma drástica, probablemente debido a la presencia de granito fresco. El perfil 6 se localiza a más de 900

metros al NW de los perfiles 4 y 5. En él, a diferencia de los anteriores, se puede apreciar cómo hay registros de resistividad muy altos cerca de la superficie. La explicación pudiera estar en la existencia de algunos diques de gabro que afloran en el área. También se aprecia un descenso de resistividad a lo largo del plano de falla. Los perfiles 7 y 8, con una orientación SW-NE, se localizan a unos 700 metros al SE de los perfiles 4, 5 y 6. Los registros de resistividad experimentan un descenso hasta los 17-20 metros de profundidad, para aumentar después de forma gradual supuestamente debido a la cercanía de materiales de naturaleza granítica que no han estado sometidos a procesos de alteración.

Interpretación geológica de los perfiles

Los perfiles geofísicos realizados, presentan características similares debido a su cercanía y por estar emplazados en terrenos geológicos del mismo dominio. En los tres primeros perfiles se puede observar cómo en los primeros metros los valores de resistividad tienden a decrecer con la profundidad, lo cual puede interpretarse por la presencia de pequeñas costras de sal que se forman a raíz de la acumulación de agua durante los periodos de lluvia, que posteriormente son sometidas a procesos de evaporación intensos. A profundidades superiores se puede observar cómo los valores de resistividad aumentan probablemente debido a la acumulación de materiales areno-arcillosos procedentes de la infiltración de las aguas a lo largo del plano de falla. A ambos lados del plano de falla se encuentran materiales graníticos alterados producto del contacto con el agua proveniente del lavado superficial de los suelos. A profundidades superiores a 30 metros los valores de resistividad aumentan de forma significativa, probablemente por encontrarse con granitos poco alterados.

En el perfil 4 se puede observar que los primeros 20 metros de profundidad presentan valores bajos de resistividad lo que se puede interpretar como presencia de agua empapando los materiales detríticos. El perfil 4 muestra una probable zona de debilidad entorno a una falla y con presencia de agua a juzgar por la baja resistividad.

El perfil 5 a diferencia del anterior, no acusa la presencia de una zona de falla y además señala la presencia de materiales graníticos sin alterar a escasos metros de profundidad. En su zona central se puede observar un pequeño vaso de inundación, en cuyo fondo yacen materiales graníticos alterados y sin alterar.

Los perfiles 6, 7 y 8 muestran un comportamiento

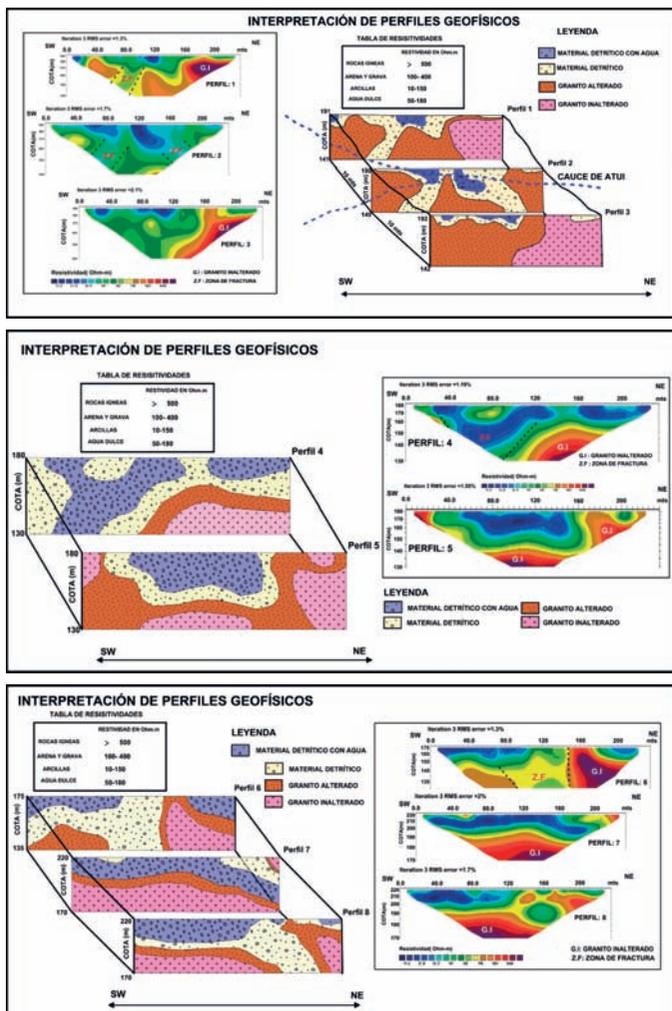


Figura 11. Resultados de los modelos de inversión de resistividades en los ocho perfiles de tomografía eléctrica, con la correlación entre las diferentes zonas de fractura. (Ver localización de los perfiles en Fig. 2).

Figure 11. Results of resistivity inversion models for the eight profiles of electrical tomography, and the correlation between the different fracture zones. (See location of the profiles in Fig. 2).

similar a los anteriores salvo que en estos últimos los bajos valores de resistividad se limitan a los primeros metros donde se acumulan las aguas durante la lluvia y hay presencia de materiales detríticos. Por debajo de éstos yacen materiales graníticos alterados y más en profundidad, se encuentran granitos sin alterar.

Esquema de funcionamiento hidrogeológico de la región de Zug

Los mencionados trabajos estratigráfico, sedimentológico e hidrogeológico, junto a la prospección geofísica antes reseñada y las observaciones y análisis llevados a cabo durante las diferentes campañas realizadas en Zug, han permitido plantear un esquema preliminar de funcionamiento hidrogeológico para la región (Fig. 12).

Hay tres emplazamientos preferentes a la hora de ubicar las captaciones de agua. Los abanicos aluviales constituyen una primera opción; se trata de aguas subterráneas poco profundas que se alojan en los materiales detríticos de estos depósitos comunes al pie de las grandes elevaciones, como lo es el dique de Zug. En segundo lugar está el agua subterránea vinculada a las *Sabkhas* que se constituyen como lugares preferentes de recepción de las escorrentías efímeras (Ahmed *et al.*, 2014) y posterior infiltración hacia el subsuelo. Finalmente, tal y como la prospección geofísica parece indicar, cabe localizar emplazamientos preferentes donde se ha producido una fracturación intensa, lo que permite el almacenamiento y la circulación del agua subterránea.

En los tres casos la calidad del agua para su consumo humano no está garantizada (Ahmed *et al.*, 2014), bien por excesivo contenido en sales disueltas, bien por presencia de nitratos, requiriendo un tratamiento químico para su potabilización.

Conclusiones

Las escasas precipitaciones registradas en la región, de unos 125 mm/año en valor medio, la alta evapotranspiración y la muy baja permeabilidad de los materiales (salvo en los abanicos aluviales) determinan una recarga ínfima o inexistente en la mayor parte de los años, lo que confirma que los recursos hídricos subterráneos de la región no garantizan la satisfacción de las necesidades de agua de posibles asentamientos o concentraciones importantes de población, ni en términos de cantidad ni de calidad bajo los requerimientos de los estándares internacionales. Sin embargo, sí parece que de forma puntual

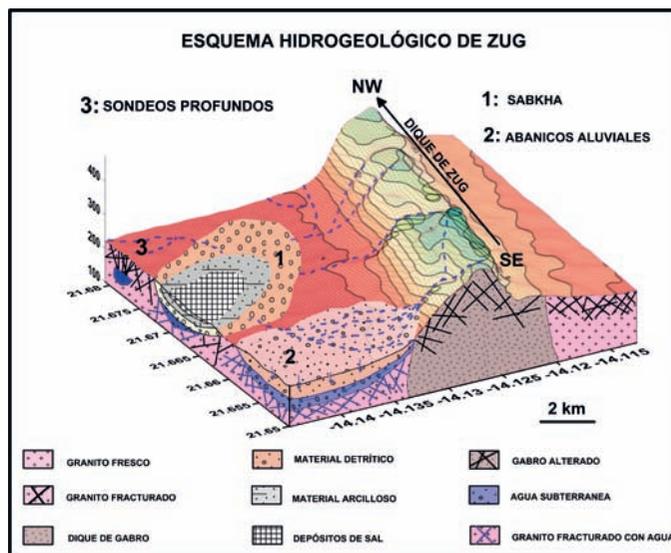


Figura 12. Esquema preliminar de funcionamiento hidrogeológico de la región de Zug

Figure 12. Preliminary hydrogeological scheme of the region of Zug.

podrían paliar las necesidades de abastecimiento de agua para la población nómada y sus rebaños.

El reconocimiento hidrogeológico del territorio estudiado revela el predominio de dos tipos de materiales propicios para el almacenamiento y la circulación del agua subterránea: las rocas cristalinas (*hard rocks*) que presentan un alto grado de fracturación, y los depósitos detríticos asociados a los flujos superficiales o de abanicos aluviales, o bien a la actividad eólica. De todos ellos, las zonas más favorables para la acumulación de agua durante los episodios de lluvia son las *sabkhas*, las áreas intensamente fracturadas y los depósitos de arena localizados en las zonas de cambio de pendiente topográfica.

La información recopilada como resultado de los trabajos llevados a cabo durante la campaña de campo y el posterior análisis e interpretación de los datos de tomografía eléctrica ha permitido tener una idea sobre el comportamiento de las aguas en una zona desértica donde predominan los materiales de naturaleza granítica. A través del análisis e interpretación de ocho perfiles geofísicos se ha podido determinar que a profundidades superiores a las habitualmente estimadas en la bibliografía científica existen valores de resistividad muy bajos, lo cual sugiere la posibilidad de encontrar agua.

A partir de los trabajos efectuados, se plantea un modelo de prospección de recursos hídricos en la zona, proponiendo los abanicos aluviales, las *sabkhas* y sondeos profundos en fondos de valle someti-

dos a fracturación como zonas preferentes para localizar aguas subterráneas en el área de estudio.

La infiltración del agua procedente de la escorrentía superficial en las áreas formadas por materiales sedimentarios de naturaleza detrítica probablemente constituye la forma más eficiente de recarga en la región.

Se recomienda la realización de sondeos de investigación y piezómetros, al igual que la instalación de pluviómetros. De esta forma se podrá acceder a un conocimiento de los parámetros hidrogeológicos que permitan cuantificar la recarga eficaz de las formaciones acuíferas, con objeto de evaluar con mayor precisión las reservas y recursos hídricos subterráneos disponibles.

Agradecimientos

El presente trabajo forma parte de la tesis doctoral de Baba Ahmed sobre la prospección de recursos hídricos en el Sahara Occidental. Ha sido financiada gracias a una beca de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). Se ha contado con la ayuda de las ONGs *Geosolidarios e Ingeniería Sin Fronteras* y de los Departamentos de Geodinámica y Estratigrafía de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid, la Universidad de Alcalá y el Instituto de Geociencias (CSIC-UCM). Los autores expresan su agradecimiento a los dos revisores anónimos que con sus sugerencias han contribuido notablemente a mejorar el texto original.

Referencias

- Ahmed, B., López, J., Rebollo, L.F. and Villarroja, F. 2014. *Características sedimentológicas, petrológicas y estratigráficas del sector de Zug (Sahara Occidental)* (En preparación).
- Appelo, C.A.J. and Postma, D. 2005. *Geochemistry, groundwater, and pollution*. Balkema, Amsterdam, 635 p.
- Bessoles, B. 1977. *Géologie de l'Afrique. Le craton Ouest Africain*. Mémoires du BRGM, BLANCHOT, A. (1953). Le Précambrien de Mauritanie occidentale (esquisse géologique). Dakar, 17. 310 pp.
- Bonnici, J.P. and Giraudon, R. 1963. Le groupe du Tasiast, nouvelle unité lithostratigraphique du socle antécambrien de la Mauritanie occidentale. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 5: 1118-1123.
- Bronner, G. 1992. Structure et evolution d'un craton archéen. La dorsale Réguibat occidentale (Mauritanie). Tectonique et métallogénie des quartzites ferrugineux. *Document du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 201.
- Dahlin, T. and Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospect*, 52: 37.
- Dillon, W.P. and Sougy, J. 1974. *Geology of West Africa and Cape Verde Islands*. En: Nairn, A.E.M. and Stehl, F.G. (Eds.). The ocean basins and margins. Vol. 2: 315-390. The North Atlantic, Plenum, London.
- Gasse, F. 1980. Late Quaternary changes in lake-levels and diatom assemblages on the southeastern margin of the Sahara. *Paleoecology of Africa* 12: 333-350.
- Griffiths, D.H. and Barker, R.D. 1993. 2-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29: 211- 226.
- Loke, M.H., 2004. *Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys*. Geotomo Software. 122 pp. En: www.geoelectrical.com.
- Loke, M.H. and Barker, R.D. 1969. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44: 131-152.
- Menchikoff, N. 1949. Quelques traits de l'histoire géologique du Sahara occidental. Livre jubilaire Charles Jacob, *Annales Hébat et Haug*, 7: 303-325.
- Pitfield, P.E.J., Key, R.M., Waters, C.N., Hawkins, M.P.H., Schofield, D.I., Loughlin, S.C. and Barnes, R.P. 2005. *Notice explicative des cartes géologiques et litologiques à 1:200 000 et 1:500 000 du Sud de la Mauritanie*. DMG, Ministère des Mines et de l'Industrie, Nouakchott, Mauritania.
- Potrel, A. 1994. Evolution tectono-métamorphique d'un segment de croûte continentale archéenne. Exemple de l'Amsaga (R.I. Mauritanie), Dorsale Réguibat (Craton Ouest Africain). *Mémoire de Géosciences Rennes*, 56.
- Quiroga, F. 1886. Geología del Sahara occidental. Rev. Geog. Com. Madrid.
- Rocci, G., Bronner, G. and Deschamps, M. 1991. Crystalline Basement of the West African Craton. En: Dallmeyer R.D. y Lécorché, J.P. (Eds.). *The West African Orogens and Circum-Atlantic Correlatives*. Springer Verlag, Berlin: 31-61.
- Sougy, J. 1954. *Rapport de fin de campagne 1953-1954 (Feuilles El Mzereb, Chegga, Tindouf)*. Rapport inédit de la Direction Fédérale de Mines et de la Géologie. AOF, Dakar.
- Yair, A. and Lavee, H. 1985. Runoff generation in arid and semi-arid zones. En Anderson y Burt, T.P. (Eds.): *Hydrological Forecasting*, 183-220.

Recibido: enero 2015
Revisado: marzo 2015
Aceptado: junio 2015
Publicado: diciembre 2015