

RESEARCH ARTICLE

Comparative study of saltwater intrusion in coastal aquifers: application to the aquifer of Oued Laou (Morocco)

Estudio comparativo de diferentes técnicas geofísicas para el control de la intrusión salina en acuíferos costeros: Aplicación al acuífero de Oued Laou (Marruecos)

Mahjoub Himi¹, Gian Piero Deidda², Adil Salhi³, Jamal Eddin Stitou-El Messari⁴, Alex Sendrós¹, Lluís Rivero¹, Raúl Lovera¹, Albert Casas-Ponsatí¹

¹ Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada. Universitat de Barcelona

² Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura. Università di Cagliari (Italia)

³ Département de Géographie. Université Abdelmalek Essaadi. Tetouan (Marroc)

⁴ Département de Géologie. Université Abdelmalek Essaadi. Tetouan (Marroc)

Corresponding author: himi06@gmail.com (Mahjoub Himi)

ABSTRACT

Key points

Important sectors of the aquifer may be affected by saltwater intrusion, and cause the abandonment of the wells

Geophysical methods are a very effective complement to provide indirect information on groundwater salinity in areas of the aquifer

Comparative analysis of the results obtained by each method has made it possible to assess the coherence and complementarity of each method

Groundwater is a fundamental and strategic resource for water supply of coastal areas, especially in the Mediterranean basin where the irregularity of precipitation, both seasonally and year-on-year, put at risk the availability of surface water in the rivers, which go from being dry for long periods to causing torrential discharges. In particular, if the exploitation of coastal aquifers is not properly managed and the quality of groundwater is not monitored regularly, important sectors of the aquifer may be affected by saltwater intrusion, and cause the abandonment of the wells. Geophysical methods are a very effective complement to provide indirect information on groundwater salinity in areas of the aquifer where wells or piezometers are not available for sampling. This study presents the results obtained from the application of different geophysical methods in the coastal aquifer of Oued Laou (Morocco) as a complement to hydrochemical data. Four geophysical methods, two electrical: vertical electrical sounding and electrical resistivity tomography, and two electromagnetic: frequency domain EM and time domain EM sounding. The comparative analysis of the results obtained by each method has made it possible to assess the coherence and complementarity of each method, as well as their corresponding advantages and limitations in terms of resolution and cost-effectiveness.

Keywords: Coastal aquifers; Saltwater intrusion; Hydrogeophysics; VES; FDEM; TDEM; ERT.

Article History:

Received: 10/07/2020

Accepted: 10/01/2021

RESUMEN

Puntos clave

Sectores importantes del acuífero pueden verse afectados por el fenómeno de intrusión salina

Los métodos geofísicos son complementos muy efectivos para obtener información indirecta sobre salinidad de agua subterránea en acuífero

El análisis comparativo de resultados obtenidos por cada método hace posible evaluar la coherencia y complementariedad de cada método

Las aguas subterráneas constituyen un recurso fundamental y estratégico para el abastecimiento de las zonas costeras donde se concentra la mayor parte de la demanda. Esta situación es muy común en una buena parte de la cuenca mediterránea donde, además, la irregularidad de las precipitaciones, tanto a nivel estacional como interanual, compromete la disponibilidad de agua superficial en los cauces, que pasan de estar secos durante largos periodos a originar descargas torrenciales. Si la explotación de los acuíferos costeros no se gestiona correctamente y no se dispone de una red eficiente control periódico, sectores importantes del acuífero pueden verse afectados por el fenómeno de intrusión salina, y provocar el abandono de los pozos afectados. Los métodos geofísicos constituyen un complemento muy eficaz para proporcionar información indirecta sobre la salinidad del agua subterránea en zonas del acuífero donde no se disponga de pozos o piezómetros para su muestreo. En este estudio se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de diferentes métodos geofísicos en el acuífero costero de Oued Laou (Marruecos) como complemento de la información hidroquímica. En este estudio se han utilizado cuatro métodos geofísicos, dos eléctricos: sondeo eléctrico vertical y tomografía de resistividad eléctrica, y dos electromagnéticos: sondeos electromagnéticos en el dominio de tiempos y en el dominio de frecuencias. El análisis comparativo de los resultados obtenidos por cada método ha permitido establecer la coherencia y complementariedad de cada método, así como sus respectivas ventajas y limitaciones, tanto en términos de resolución y como de rendimiento.

Palabras clave: Acuíferos costeros; Intrusión salina; Hidrogeofísica; SEV; FDEM; TDEM; ERT.

Historial del artículo:

Recibido: 10/07/2020

Aceptado: 10/01/2021

1. Introducción

La preservación de la calidad de las aguas subterráneas sigue siendo un problema general en muchas regiones de todo el mundo. A menudo estos recursos hídricos se ven afectados por contaminantes de origen antropogénicos relacionados con la industria, la agricultura y en general con el progresivo desarrollo demográfico, unidos a una mala gestión tanto en su explotación como posteriormente en su saneamiento. De forma particular, los acuíferos costeros, en contacto directo con el mar, son aún más vulnerables al deterioro del agua subterránea que almacenan, ya que además son susceptibles de ser afectados por la intrusión marina, ya sea natural o inducida.

El bombeo excesivo de las aguas subterráneas para el abastecimiento de las necesidades de las poblaciones, así como la disminución significativa de la recarga efectiva de los acuíferos debido a la disminución de la regularidad de las precipitaciones, han agravado en gran medida

ese fenómeno. Los problemas de la intrusión marina son muy comunes en los acuíferos costeros de los países mediterráneos y han dado lugar a numerosos estudios metodológicos, involucrando observaciones hidrogeológicas, geoquímicas y geofísicas, así como el desarrollo de modelos matemáticos para mejorar los sistemas de control y garantizar una mejor gestión de la explotación de dichos acuíferos (Pulido-Leboeuf *et al.*, 2003; Elgettafi *et al.*, 2013; Himi *et al.*, 2017; Telahiguea *et al.*, 2020). En consecuencia, para una mejor caracterización del proceso de intrusión marina y también para disponer de un control de vigilancia operativo, es esencial el desarrollo de un conocimiento multidisciplinar.

Los estudios hidrogeológicos y la caracterización geoquímica de las aguas subterráneas son muy importantes para el control de la intrusión marina en los acuíferos costeros. Sin embargo, en las zonas donde no existan suficientes pozos o piezómetros, la aplicación de métodos geofísi-

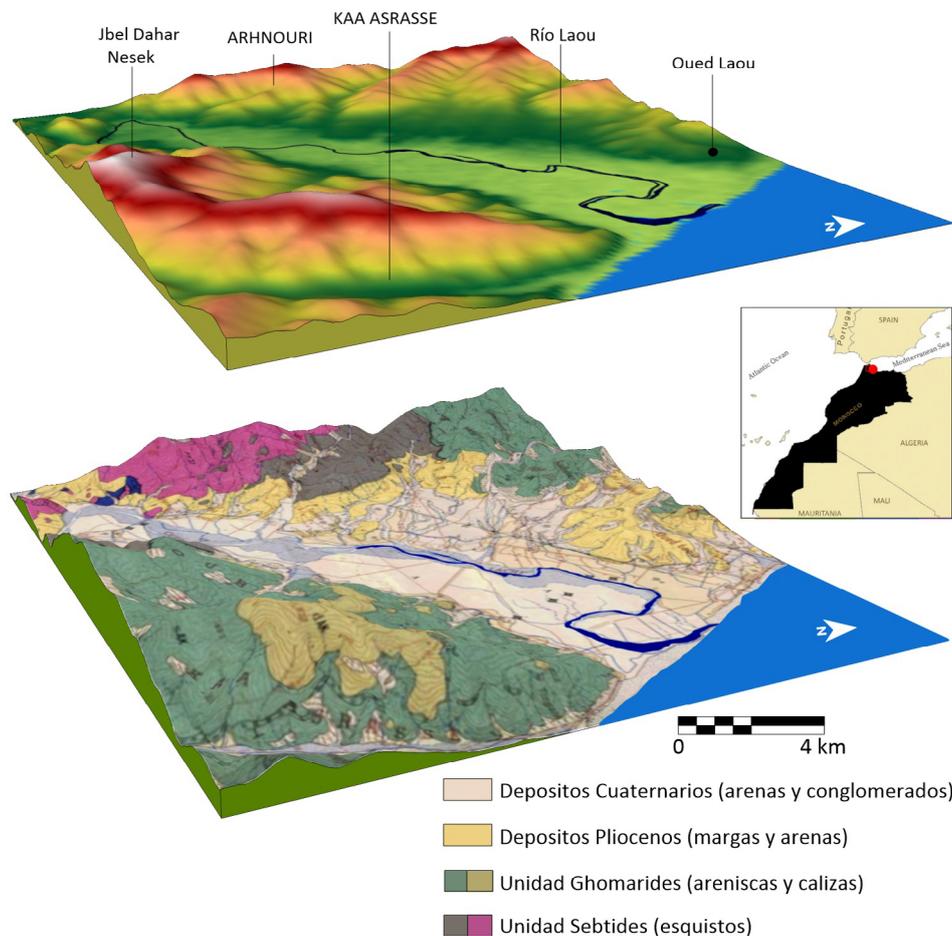


Figura 1. Localización de la zona de estudio con el mapa geológico de Oued Laou.

Figure 1. Location of the study area of Oued Laou in a geological map.

cos puede proporcionar información indirecta muy valiosa a un costo razonable, en comparación con el elevado costo de perforación de nuevos pozos y la instalación de piezómetros para la toma de muestras de aguas necesarias para los análisis químicos.

Debido a su diferente densidad, el límite teórico entre el agua dulce y el agua salada habría de ser una interfaz, tal como viene definida por la relación de Ghyben-Herzberg. Sin embargo, suele ser una zona de transición como resultado de la dispersión hidrodinámica de las sales disueltas (Wu *et al.*, 1993) y su extensión hacia el interior puede variar, estando fuertemente influenciada por las propiedades del acuífero (Bear and Cheng, 2010). Por tanto, la explotación de los acuíferos costeros puede dar lugar a alteraciones importantes de las condiciones de descarga del agua subterránea al mar, y por lo tanto de las relaciones entre el agua dulce y el agua salada, y el desarrollo de la zona de mezcla. Se produce un desplazamiento lateral de la cuña de intrusión marina y en general un aumento de la anchura de la zona de mezcla, además de la formación de conos salinos ascensionales.

El elevado contraste de resistividad eléctrica entre una formación geológica saturada con agua salada y una saturada con agua dulce ha sido utilizado por muchos investigadores para estudiar la intrusión de agua salada en las zonas costeras (Zohdy *et al.*, 1993; Frohlich *et al.*, 1994). Por ese motivo, los métodos geofísicos en general, y particularmente los eléctricos y electromagnéticos, pueden aportar información de gran interés, ya que permiten realizar un reconocimiento detallado de la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo que es función tanto de las variaciones de composición del acuífero como de la salinidad del agua que almacenan. La relación coste/beneficio de los diferentes métodos geofísicos aplicables al estudio de los acuíferos costeros para delimitar la extensión de la intrusión salina no es suficientemente conocida y valorada, a pesar de su notable interés práctico. Por otro lado, cada método geofísico presenta características distintas de rendimiento y coste, requisitos de espacio y condiciones ambientales para poder ser aplicado y también cada método proporciona diferente tipo de información, con mayor o menor resolución a escala vertical y horizontal.

Este estudio plantea evaluar el potencial y las limitaciones de diferentes métodos eléctricos y

electromagnéticos para la delimitación de la intrusión marina en acuíferos costeros, tomando como ejemplo el acuífero de la llanura del río Oued Laou (Norte de Marruecos) que ha sido objeto de diferentes campañas geofísicas y por su geometría y características hidrogeológicas puede considerarse un excelente laboratorio experimental.

2. Características hidrogeológicas

El acuífero costero de Oued-Laou se encuentra al NW de Marruecos, entre el extremo sudooriental de la provincia de Tetuán y el extremo noroccidental de la provincia de Chefchaouen. El límite entre las dos provincias está marcado por la presencia del río Laou, que desemboca en la costa mediterránea. Este acuífero costero aluvial cubre una superficie de unos 18 km², mientras que su cuenca hidrográfica total es de unos 930 km². Se trata de un acuífero constituido por alternancias de arenas y gravas con limos y arcillas. El límite superior del acuífero coincide generalmente con la topografía de la llanura, excepto en algunas zonas donde afloran arcillas y limos. El grosor de las formaciones acuíferas puede superar 110 metros cerca de la desembocadura. Aguas arriba, en el extremo opuesto a la costa, y en la zona central del acuífero, los grosores varían entre 30 y 50 metros (Rkiouak *et al.*, 1997; Salhi *et al.*, 2007).

Esta variabilidad se relaciona con el hecho que la llanura está situada justo al pie de la cadena montañosa, lo que no permitió una buena clasificación de los aportes a la cuenca durante su sedimentación. Según Stitou-El Mesari (1995), esta variabilidad también es debida a la sedimentación diferencial de sucesivos episodios torrenciales durante los cuales el río modificó varias veces su trayectoria. En consecuencia, el sistema acuífero de Oued Laou se considera como un sistema monocapa heterogéneo, con presencia de materiales impermeables en forma de capas discontinuas y lentejones.

La transmisividad del acuífero, calculada a partir de ensayos de bombeo, varía entre 4000 m²/día en la parte central y 500 m²/día en los bordes, mientras que los valores de permeabilidad oscilan entre 11 y 55 m/día (Rkiouak *et al.*, 1997). La recarga del acuífero se produce mediante la infiltración directa del agua de lluvia, la infiltración por el río, las entradas laterales del acuífero y el retorno del agua de riego, mientras que la descarga del acuífero se desarrolla mediante el

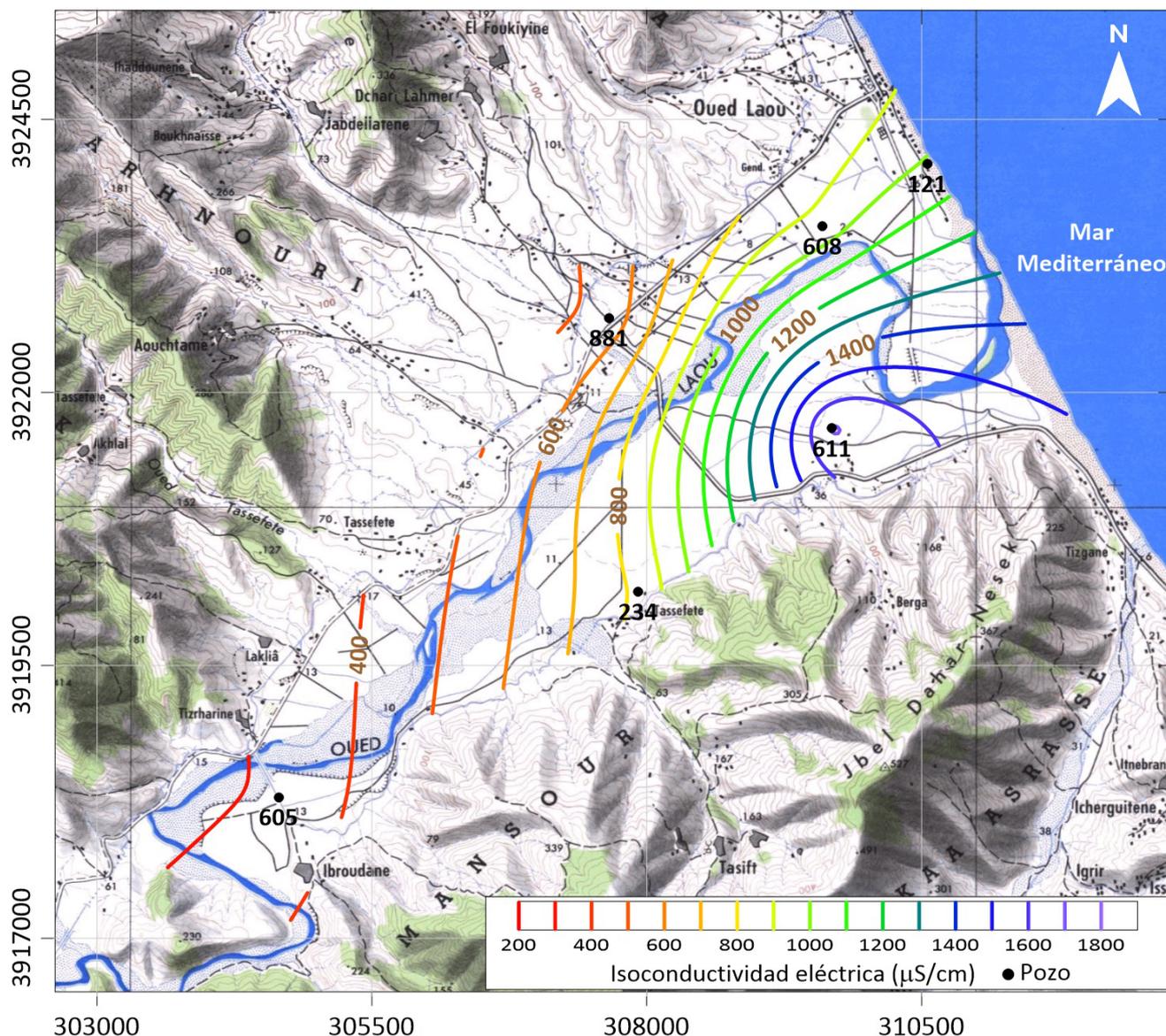


Figura 2. Mapas de isoconductividad eléctrica de las aguas subterráneas del acuífero de Oued Laou.

Figure 2. Electrical isoconductivity maps of the groundwater of the Oued Laou aquifer.

bombeo desde los pozos, la recarga al río Laou y la salida directa hacia el mar Mediterráneo.

El acuífero de Oued Laou está considerado como uno de los más importantes del litoral mediterráneo marroquí debido sobre todo a la buena calidad de sus aguas subterráneas en la mayor parte del acuífero. Desde hace décadas se utiliza para el abastecimiento de agua potable a la población a través de varios pozos de bombeo. Sin embargo, en los últimos años se ha observado un aumento de la salinidad en algunos pozos cercanos a la costa, con valores de conductividad eléctrica que superan los 1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el extremo sudeste, en correlación con valores máximos de la concentración en ion cloruro (Figura 2).

3. Metodología

En este estudio se han utilizado los resultados obtenidos por varios métodos geofísicos para comparar el rendimiento y la resolución que proporcionan cada uno de ellos para caracterizar la intrusión salina en un mismo acuífero, en este caso el acuífero de Oued Laou. Los métodos aplicados son, dos métodos eléctricos: sondeo eléctrico vertical (SEV) y tomografía de resistividad eléctrica (ERT, de sus siglas en inglés *Electrical Resistivity Tomography*), y dos métodos electromagnéticos: en el dominio de frecuencias (FDEM, de sus siglas en inglés *Frequency Domain EM*) y en el dominio de tiempos (TDEM, de sus siglas en inglés *Time Domain EM*).

3.1. Sondeos Eléctricos Verticales

Los métodos eléctricos en corriente continua, y en particular, la técnica denominada sondeo eléctrico vertical (SEV), han sido ampliamente utilizado debido al alto contraste de conductividad eléctrica (Orellana, 1982; Barker, 1990; Cimino *et al.*, 2008; McInnis *et al.*, 2013). La técnica consiste en inyectar una corriente eléctrica en el terreno a través de dos electrodos (electrodos de corriente) y medir la diferencia de potencial a través de otros dos electrodos (electrodos de potencial). Existen diferentes configuraciones geométricas para implantar los electrodos en el terreno que han dado lugar a diferentes dispositivos de medida. Los más conocidos son los dispositivos Schlumberger, Wenner y Dipolo-Dipolo.

El objetivo del SEV es determinar las variaciones de resistividad eléctricas del subsuelo bajo la vertical de un punto a partir de medidas efectuadas con una separación creciente entre los electrodos de inyección de corriente. El resultado de la interpretación de la curva del SEV es un modelo de capas del subsuelo con valores de resistividad real y espesor de cada capa. Estos modelos pueden proporcionar información sobre la litología del subsuelo y la salinidad de las aguas subterráneas.

La principal limitación del método es que proporciona información 1D y supone que el subsuelo está compuesto por capas planas, homogéneas de extensión lateral infinita. Esta hipótesis raramente puede cumplirse en los casos de estudio del proceso de intrusión salina en los acuíferos costeros.

La resolución de los modelos obtenidos por un SEV disminuye con la profundidad, las capas delgadas no pueden ser detectadas y los contrastes de baja resistividad, por ejemplo, entre las aguas subterráneas dulces y salobres, no pueden ser detectados. Otra limitación de los modelos de SEV es el problema de equivalencia o ambigüedad en la resolución del problema inverso. Esto significa que distintos modelos pueden ser una solución correcta de las observaciones experimentales de un SEV desde el punto de vista físico-matemático.

Para el caso de este estudio se han reinterpretado 51 SEV de una campaña realizada por Geotlas S.A. en 1990 por encargo de la Direction Générale d'Hydraulique de Marruecos y distribuidos homogéneamente sobre la cuenca (Fi-

gura 3). Todos los sondeos se realizaron utilizando el dispositivo Schlumberger, con un espaciado máximo entre los electrodos de corriente (AB) hasta 2 km.

3.2. Tomografía de Resistividad Eléctrica

La técnica de tomografía de resistividad eléctrica (ERT), permite visualizar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo mediante secciones bidimensionales. Para ello se emplean una serie de electrodos que permanecen fijos, y con los cuales es posible obtener un número elevado de medidas combinadas de pares de electrodos que sirven para inyectar una cierta intensidad de corriente, y otros pares de electrodos que sirven para la medida del potencial eléctrico generado. De este modo se puede medir la resistividad aparente en puntos de atribución que varían su posición tanto lateralmente como en profundidad. El proceso de activación y desactivación sucesiva de los pares de electrodos de emisión y recepción se controla automáticamente mediante un microprocesador o consola que lleva incorporado el resistivímetro (Griffiths and Barker, 1993).

Para identificar con mayor resolución la geometría de la interfase agua dulce-agua salada se han realizado 5 perfiles de tomografía de resistividad eléctrica distribuidos en la franja más próxima a la costa (Figura 3). Las medidas se han efectuado con un resistivímetro Syscal Pro de Iris Instrument, con un total de 48 electrodos. El dispositivo seleccionado ha sido del tipo Wenner-Schlumberger (Abdul-Nassir *et al.*, 2000) con una separación entre electrodos de 10 m.

3.3. Métodos electromagnéticos

Las técnicas electromagnéticas han sido ampliamente utilizadas para las investigaciones hidrogeológicas debido a la relación entre las propiedades eléctricas e hidráulicas de los materiales geológicos saturados. (Stewart, 1982; Fitterman and Stewart, 1986; Plata *et al.*, 1987, Duque *et al.*, 2008).

3.3.1. Sondeos electromagnéticos en el dominio de frecuencias

En el caso de los métodos electromagnéticos en dominio de frecuencias, una bobina transmisora Tx está alimentada con una corriente alter-

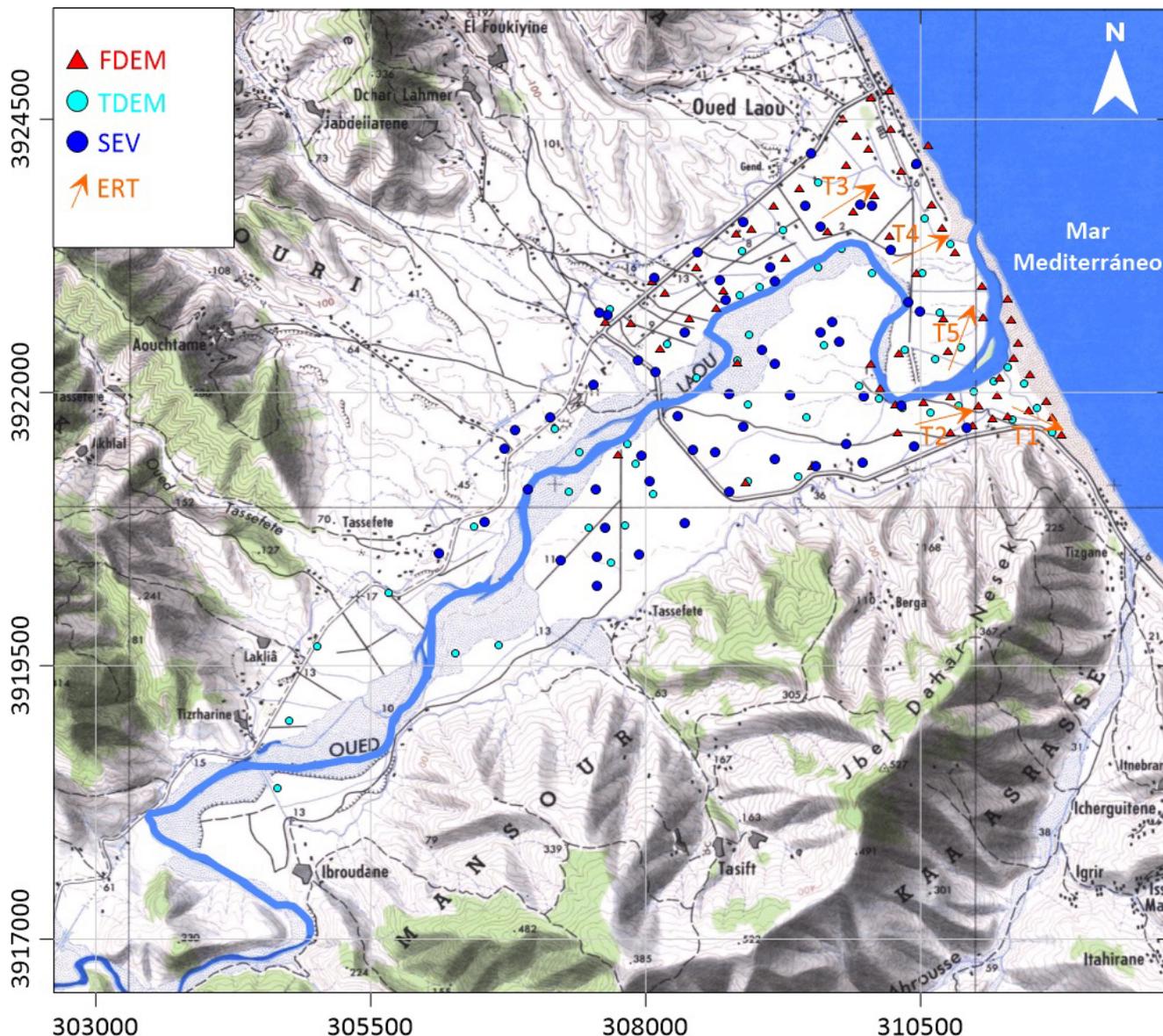


Figura 3. Mapa de localización de los puntos de medida de los diferentes métodos geofísicos.

Figure 3. Location of the measurement points of the different geophysical methods in a map.

na de frecuencia f (Hertz), mientras otra bobina receptora Rx está localizada a una distancia S de la primera. La corriente producida por el transmisor genera un campo magnético primario H_p que se propaga libremente bajo y sobre la superficie de un terreno. En presencia de un cuerpo conductor, la componente magnética de la onda inducida produce corrientes parásitas que a su vez generan también un campo magnético secundario H_s que se detecta en el receptor.

Una característica de esta técnica es que opera bajo la condición denominada “*low induction number*” que implica el cociente entre la separación de las bobinas y la profundidad a la que la amplitud de campo electromagnético disminu-

ye a $1/3$ o “*skin depth*”, es muy pequeña (McNeil, 1980). En estas condiciones, el instrumento proporciona directamente el valor de conductividad aparente expresada en mS/m.

La Figura 3 muestra la posición de las 67 estaciones de medida con el método FDEM. En el caso de este estudio, se ha utilizado el conductímetro Geonics EM34-3 que opera con tres frecuencias 6.4, 1.6 y 0.4 kHz, según que el espaciado entre las bobinas sea de 10, 20 y 40 m respectivamente.

3.3.2. Sondeos EM en el dominio de tiempos

El sondeo electromagnético en el dominio de tiempos (TDEM) consiste en inducir mediante

una bobina transmisora (en forma de un bucle) un campo magnético primario constante en el tiempo. Posteriormente se interrumpe de forma instantánea el flujo de corriente a través de la bobina y por lo tanto desaparece el campo magnético primario. Esta variación temporal induce, según la ley de Faraday, una fuerza electromotriz en el subsuelo. Como consecuencia se crean unas corrientes inducidas, cuya intensidad y profundidad, en un determinado instante, serán función de la resistividad eléctrica del terreno. Estas corrientes inducidas generan, a su vez, un campo magnético secundario que inducen un voltaje en la bobina receptora. El modo en que disminuye el voltaje registrado en superficie proporciona información sobre las propiedades eléctricas del subsuelo. Las primeras medidas de tensión serán más sensibles a la resistividad de las capas superiores. A medida que transcurre el tiempo, la intensidad de corriente alcanza profundidades mayores y la tensión medida está más influida por dicha profundidad.

En este estudio el instrumento utilizado fue el TEMFAST 48. La adquisición se llevó a cabo con una sola bobina de forma cuadrada y 100 metros de lado dispuesta directamente sobre el terreno, que se utilizó alternativamente como emisora y receptora. La intensidad de corriente aplicada fue de 3 amperios y los parámetros de tiempo de adquisición se seleccionaron para alcanzar una profundidad de investigación de aproximadamente 150 m.

La lectura del voltaje en la bobina receptora se realizó en una ventana de tiempo de 8192 ms dividida en 7 ó 9 intervalos. En la Figura 3 se presenta también la distribución de las estaciones TDEM en la llanura de Oued Laou.

4. Interpretación de los resultados

4.1. Sondeos Eléctricos Verticales

La interpretación cualitativa de los sondeos eléctricos verticales (SEV's), se ha realizado a partir de su clasificación según la morfología de las curvas de campo. La mayoría de los sondeos (62%) tienen un comportamiento de tipo KH ($r_1 < r_2 > r_3 < r_4$). Respecto al tramo final de las curvas, se ha observado que el 89.6% de las curvas terminan con un tramo ascendente que implica la detección de un nivel resistivo en profundidad que puede interpretarse como el sustrato paleozoico.

Los datos de campo se han interpretado utilizando el software comercial RESIX PLUS (Interpex) que permite la resolución de los problemas directo e inverso y la generación de cortes geoelectricos equivalentes. Para asegurar una correcta interpretación de los SEV es necesario contar con información "a priori" a partir de la información litológica e hidrogeológica obtenida de los pozos próximos (Edet and Okereke, 2002). En este caso, se ha utilizado la información sobre la geología local y las columnas litológicas disponibles de los pozos y de piezómetros de control para restringir los grosores de las capas geoelectricas y limitar la ambigüedad de interpretación en el proceso de inversión.

El análisis de los resultados nos ha permitido diferenciar en los diferentes sondeos eléctricos una secuencia de capas geoelectricas que se correlacionan con las distintas litologías perforadas por los sondeos mecánicos próximos. Así, por ejemplo, para el SEV D-1, debido a su proximidad con el sondeo mecánico 894 se ha podido establecer la siguiente correlación:

- Una primera capa de baja resistividad (<15 ohm.m) con un grosor de unos 6 m y que se correlaciona con las margas.
- Una serie de formaciones resistivas que se puede considerar como una sola capa de resistividad media de unos (50 ohm.m) y de espesor de unos 85 m y que corresponde a las arenas, gravas y gravas arcillosas.
- Una tercera capa conductora (< 10 ohm.m) y de notable potencia (< 100 m) que se atribuyen al nivel de margas azules.
- Una última capa resistiva (> 100 ohm.m) y corresponde al sustrato Paleozoico.

Como ejemplo de este proceso en la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos de la interpretación de los SEVs D-1 y E-6.

En base de los sondeos mecánicos presente en la zona y con el apoyo de los resultados de los sondeos eléctricos verticales, Rkiouak *et al.* (1997) realizó una serie de cortes geológicos donde se pone en evidencia que se trata de un acuífero bicapa, aunque localmente la capa impermeable intermedia desaparece poniendo en contacto directo los dos niveles acuíferos, que pasa a ser un acuífero libre monocapa (Figura 5).

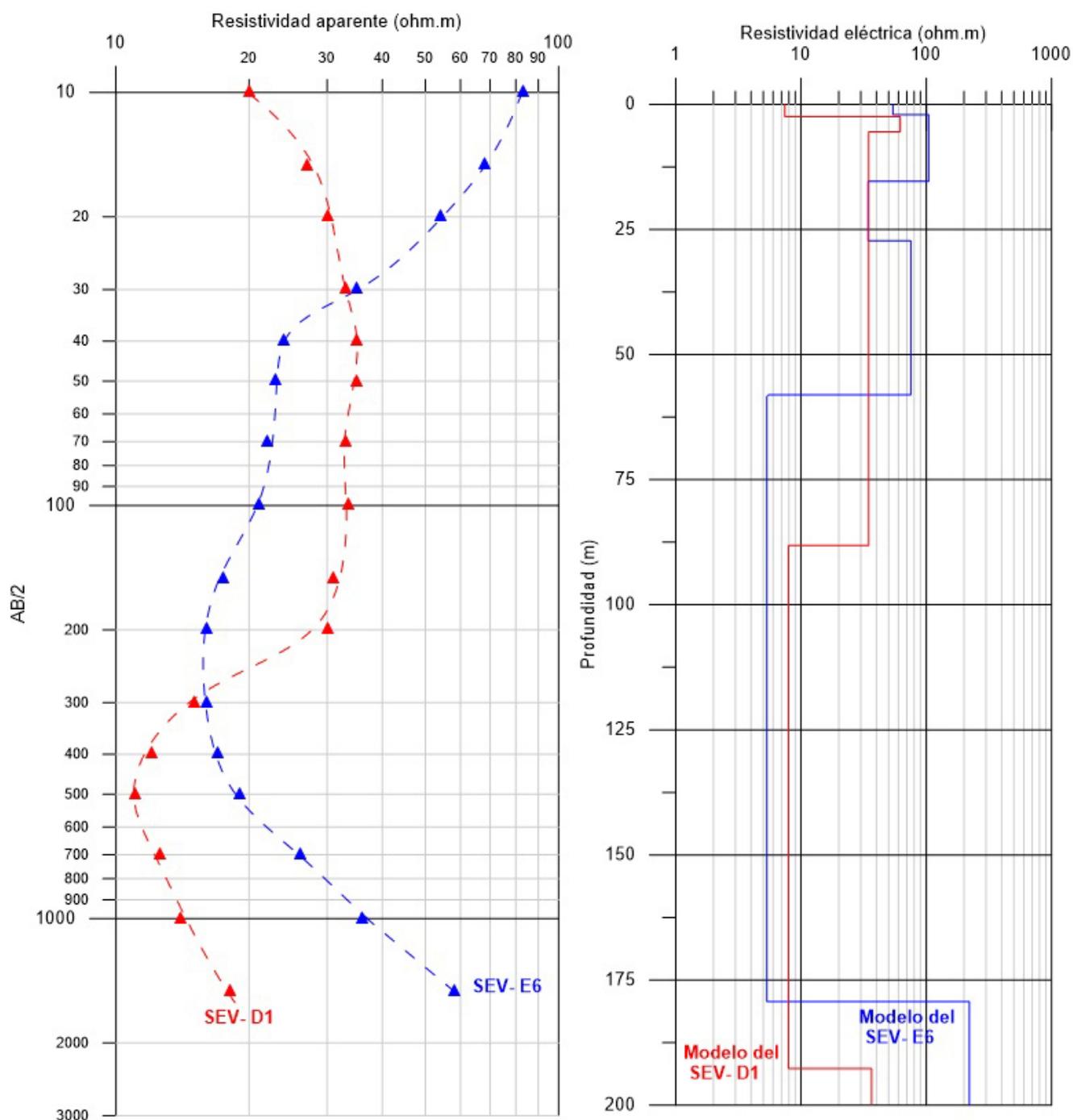


Figura 4. Curvas experimentales de los SEVs D1 y E6 (izquierda) y sus correspondientes modelos obtenidos a partir del proceso de inversión (derecha).

Figure 4. Example of VES apparent resistivity curves of SEV'S D1 and E6 (left) with the best-fit layer models (right).

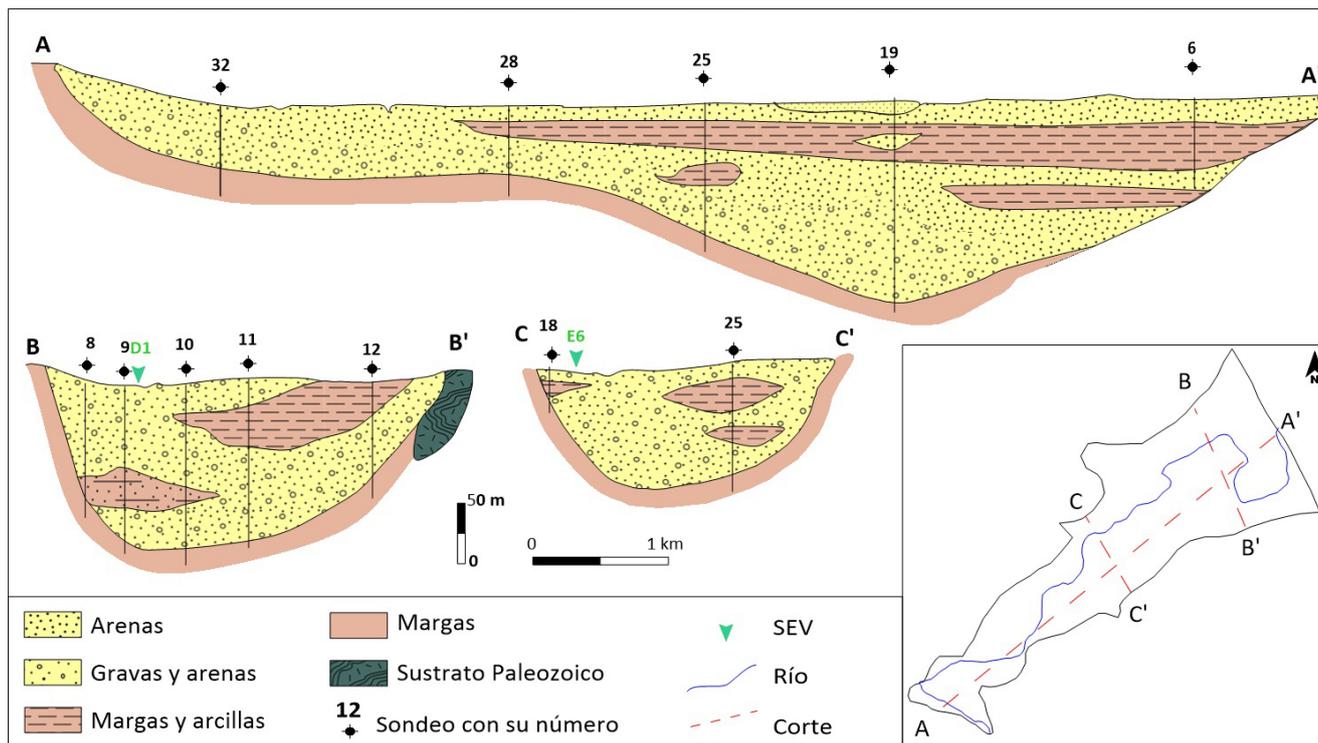


Figura 5. Cortes hidrogeológicos del acuífero de Oued Laou (modificado de Rkiouak *et al.*, 1997).

Figure 5. Hydrogeological cross-sections of the Oued Laou aquifer (modified from Rkiouak *et al.*, 1997).

4.2. Sondeos EM en el Dominio de Frecuencias

Los métodos en dominio de frecuencias (FDEM) han sido utilizados en combinación con datos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos para definir la geometría del acuífero y evaluar la extensión de la intrusión salina. La interpretación cuantitativa directa de la conductividad eléctrica aparente no es fácil porque está influenciada por varios factores como la porosidad, la temperatura, el contenido en arcillas de alta capacidad de intercambio catiónico y la concentración de los electrolitos disueltos (McNeill, 1980). Afortunadamente, los valores de conductividad eléctrica que resultan de la intrusión de agua salada son muy altas y la influencia de otros efectos suele minimizarse.

Con el propósito de delimitar de forma más precisa el posible avance de la intrusión marina detectada en algunos pozos mediante los análisis hidroquímicos se llevó a cabo una campaña de prospección electromagnética en el dominio de frecuencias. En cada una de las estaciones se midieron los valores de conductividad eléctrica aparente con tres separaciones entre las bobinas (10, 20 y 40 m) y con las dos orientaciones

de los dipolos: horizontal (HD) y vertical (VD). Así en cada estación hemos obtenido las 6 lecturas y con las 4 profundidades (7.5, 15, 30 y 60 m).

Los resultados muestran un aumento de la conductividad eléctrica aparente a medida que nos acercamos a la línea de costa, con una clara zona de valores muy altos (superan a los 150 mS/m) alrededor de la desembocadura del río. Por otro lado, se observa un aumento de los valores de conductividad eléctrica con la profundidad (Figura 6).

4.3. Tomografía de Resistividad Eléctrica

Las pseudosecciones de resistividad aparente han sido interpretadas con el programa RES-2DINV (Loke, 2002) para obtener los correspondientes modelos de resistividad de cada perfil y que se basa en el proceso de inversión por ajustes sucesivos desarrollado por Loke and Barker (1996). Los errores de ajuste entre los valores experimentales de resistividad aparente medidos sobre el terreno y los valores teóricos calculados a partir de los modelos 2D obtenidos a partir de la inversión han sido en todos los casos inferiores al 5% después de un máximo de cinco iteraciones.

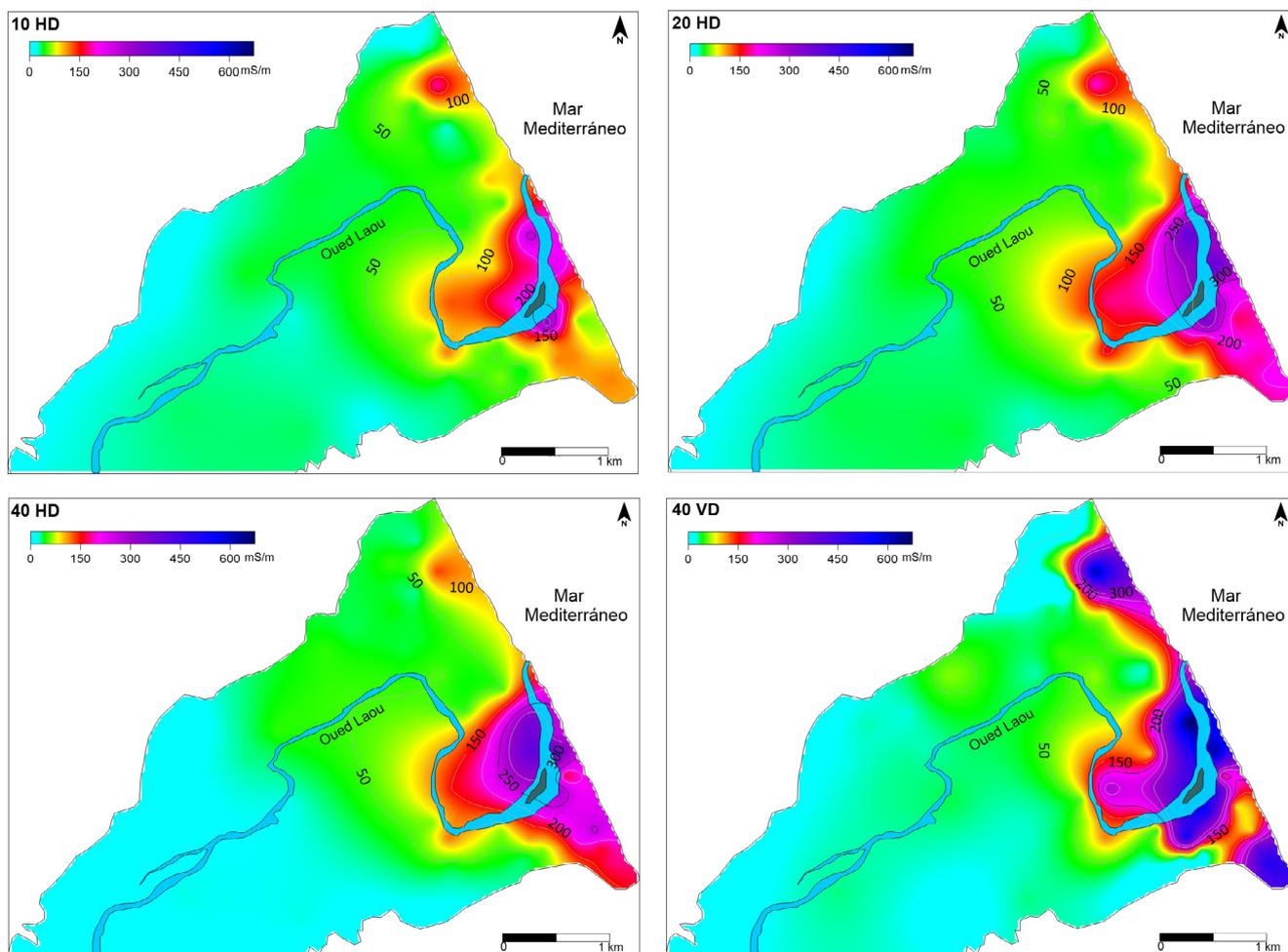


Figura 6. Mapas de conductividad aparente obtenida a partir de las configuraciones entre bobinas 10 HD, 20 HD y 40 VD.
Figure 6. Electrical resistivity cross-sections from different configuration between coils of 10 HD, 20 HD and 40 VD.

La Figura 7 muestra un ejemplo de las secciones de resistividades correspondientes a los perfiles de tomografía 1 y 4 con sus respectivas interpretaciones. Las secciones de tomografía eléctrica permiten claramente discriminar la geometría de la interfase agua dulce – agua salada a partir del contraste de resistividad eléctrica existente.

En el perfil 1, situado al noreste del área de estudio, diferenciamos 3 niveles: Una primera capa superficial con resistividades del orden de 30 ohm.m y un espesor variable (2 a 15 m), una segunda capa con un aspecto horizontal y continuo y con valores de resistividad superiores a 100 ohm.m y un espesor de 40 m, y finalmente la capa más profunda con valores de resistividad inferiores a 10 ohm.m (Figura 7).

La correlación de los valores de resistividad eléctrica con la información geológica obtenida a partir de la columna litológica del sondeo F-608/4 nos permite atribuir el nivel conductor superficial

a las arcillas y arcillas arenosas, el nivel intermedio resistivo corresponde a las gravas del acuífero y finalmente el nivel de alta conductividad eléctrica profundo a las arcillas y arenas saturadas de agua salada.

En el caso del perfil 4 situado cerca de la línea de costa, se detecta un nivel superficial resistivo con valores superiores a los 60 ohm.m, mientras que el segundo nivel presenta valores de resistividad por debajo de los 10 ohm.m. La localización de este perfil cerca de la línea de costa de un lado, y de otra por los resultados de la prospección electromagnética en dominio de frecuencia, nos permite atribuir el nivel superior resistivo a arenas saturadas con agua dulce y arenas arcillosas, mientras que el nivel profundo conductor a arcillas arenosas o a gravas saturadas con agua salada. En este caso, el origen de la salinidad está directamente relacionado con la entrada de agua de mar, ya que una buena parte del perfil está a la misma cota del nivel del mar.

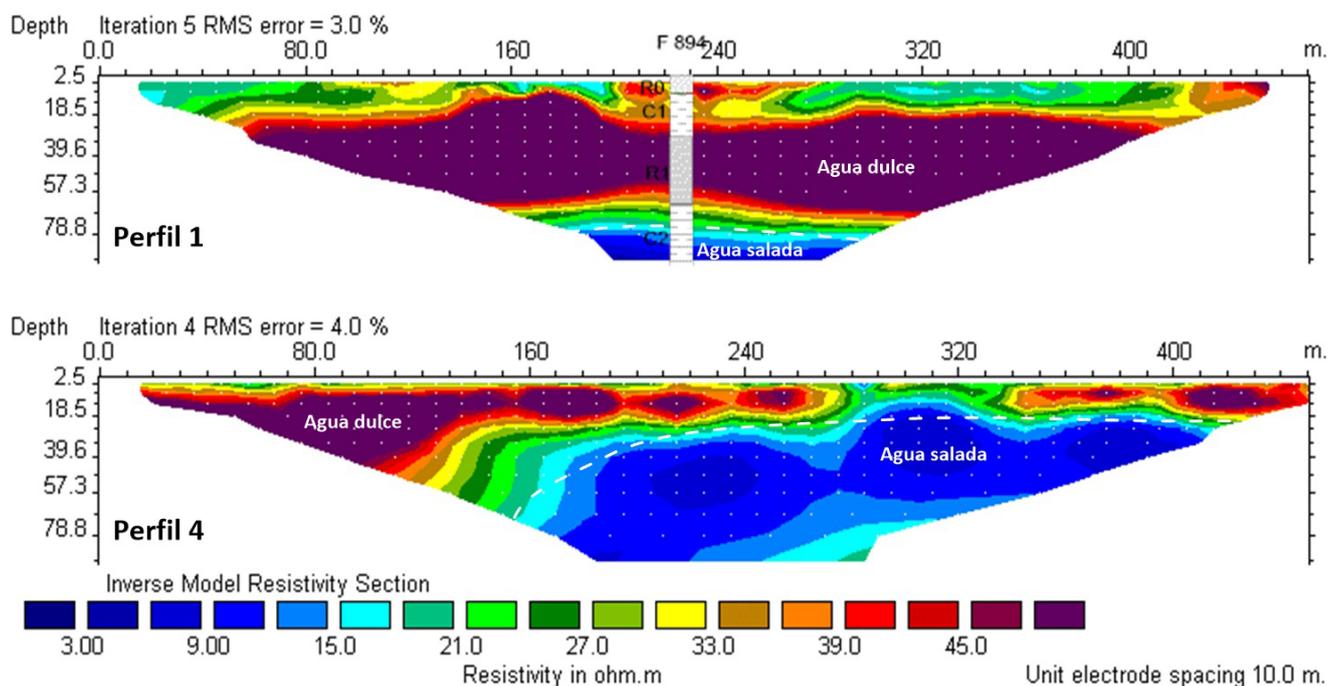


Figura 7. Secciones de resistividad eléctrica obtenida para los perfiles 1 y 4.

Figure 7. Apparent conductivity maps obtained the T1 and T4 profiles.

4.4. Sondeos EM en el Dominio de Tiempos

Cada una de las 54 curvas de resistividad aparente adquiridas durante las dos campañas de campo fueron invertidas para obtener los modelos geoelectricos del terreno en términos de grosores y resistividades de cada capa (Figura 8). Esta operación se llevó a cabo utilizando el software de inversión TEM-RES que requiere una estimación de un modelo inicial de grosores y resistividades de las capas. Como modelo inicial en la inversión de cada curva de sondeo TDEM, se han considerado los registros litológicos disponibles del sondeo mecánico más próximo.

Después de realizar el proceso de inversión el error de ajuste entre los valores calculados por el modelo y los datos experimentales ha sido en general menor de 4%. Los modelos de resistividad obtenidos han permitido identificar en cada sondeo TDEM 3, 4 ó 5 litofacies o unidades geoelectricas y que se describen a continuación:

Unidad I: Esta litofacies se detecta casi en todos los sondeos, con valores de resistividad inferiores a 15 ohm.m, y que pueden disminuir hasta menos de 5 ohm.m cerca de la línea de costa. El grosor de esta unidad es bastante variable (entre 5 m y 30 m). Esta unidad ha sido interpretada como constituida por arenas con alto contenido en materiales finos como arcillas, limos o margas.

Unidad II: detectada en todos los sondeos y se caracteriza por su relativa alta resistividad (entre 50 y 200 ohm.m) su espesor varía entre los 20 y los 60 m. Por los valores de resistividad, se puede correlacionar con depósitos no consolidados principalmente las arcillas, gravas saturadas con agua dulce y que forma el acuífero superior.

Unidad III: Esta unidad también se identifica en casi en todos los sondeos con grosores que varían entre 20 y 80 m, su resistividad es por debajo de los 12 ohm.m. Esta unidad puede ser relacionada con depósitos saturados con alto contenido en sales. Pero debido a que se ha registrado en algunos puntos muy lejos de la línea de costa, se ha interpretado como esta unidad a las margas azules del Plioceno registradas en varios sondeos mecánicos.

Unidad IV: Esta litofacies se ha detectado en una tercera parte de los sondeos efectuados. Su grosor es variable con 9 metros de promedio y su resistividad eléctrica oscila entre 20 a 25 ohm.m. Esta unidad se podría correlacionar con los materiales finos o arcillosos o con arenas saturadas con agua salada. El hecho de que aparece en algunos sondeos y desaparece en otros nos hace pensar de que se trata de una acumulación de arcillas en forma de lentejones frecuentemente presentes en esta zona.

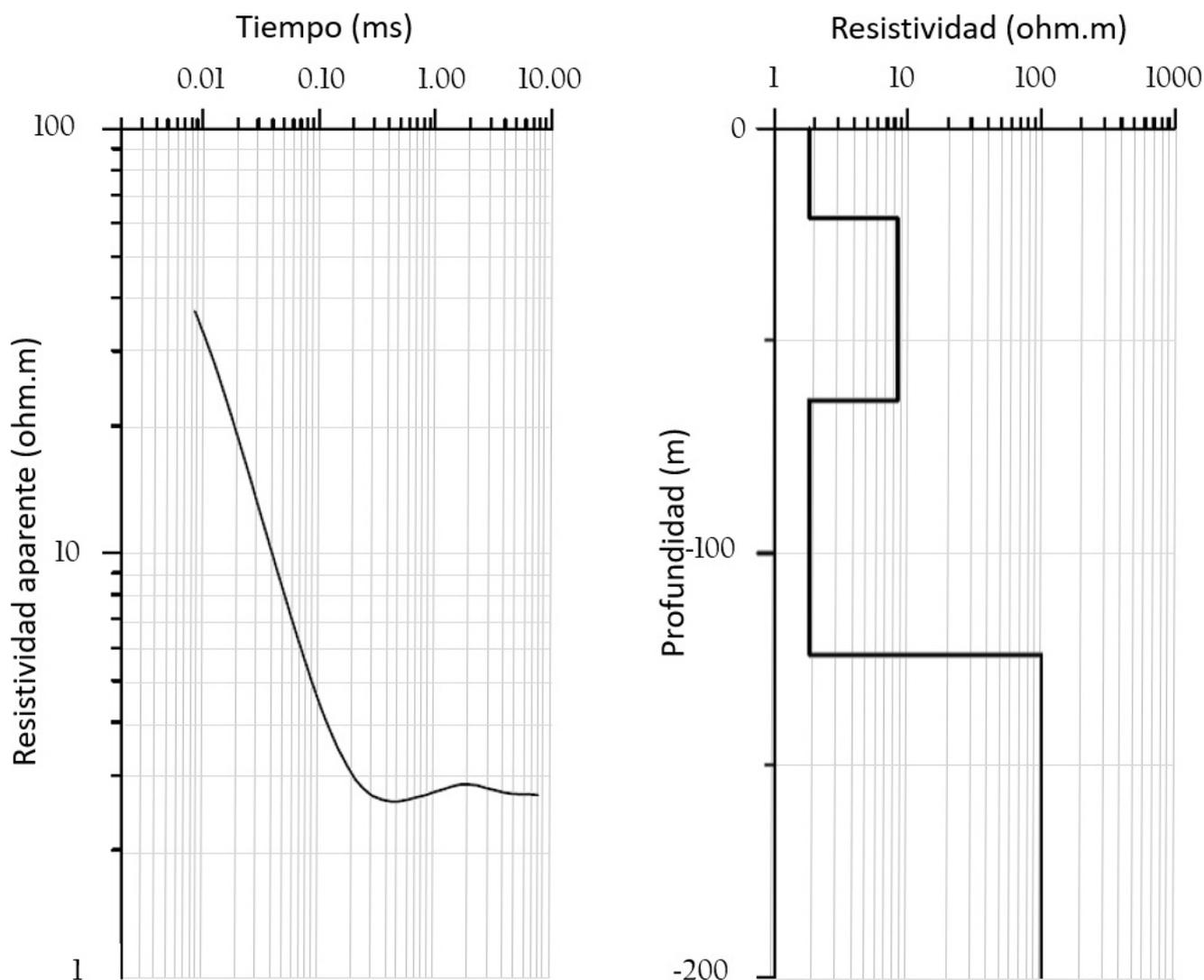


Figura 8. Ejemplo de curva experimental característica de resistividad aparente obtenida por el método TDEM (izquierda) con su correspondiente modelo de resistividades obtenido después del proceso de inversión (derecha).

Figure 8. Example of characteristic apparent resistivity curve resulting from the TDEM method (left) with its corresponding resistivity model after the inversion process (right).

Unidad V: Esta litofacies tampoco se detecta en todos los sondeos, solo se ha registrado cuando la unidad III tiene un grosor reducidos. Su resistividad es elevada y se ha atribuye a los esquistos que forman el sustrato paleozoico de la cuenca.

La Figura 9 representa el mapa de distribución de los valores de resistividad eléctrica del subsuelo interpolada a una profundidad media de 30 m. Como se puede apreciar, cerca de la línea de costa, especialmente en el sector sudeste, los valores de resistividad eléctrica son muy bajos, inferiores a 6 ohm.m. Estos bajos valores de resistividad eléctrica pueden interpretarse relacionados con la presencia de la intrusión marina, mientras que los valores de resistividad

eléctrica más elevados, (superiores a los 24 ohm.m) han sido registrados en las partes superiores de la llanura y son indicativos de la presencia de agua dulce en el acuífero.

5. Discusión y análisis comparativo

La aplicación de diferentes métodos geofísicos para caracterizar el acuífero costero de Oued-Laou, ha permitido complementar la información geológica sobre la geometría del acuífero y también delimitar la importancia y el origen de la salinización. En relación a la geometría del acuífero se ha complementado la información acerca del grosor del acuífero y la heterogeneidad del relleno aluvial con la inter-

calación de lentejones de gravas y arcillas. Respecto al proceso de salinización, se ha podido poner de manifiesto que es consecuencia de intrusión marina y no es el resultado del fenómeno de “up-coning” por exceso de bombeo en un pozo.

La comparación entre los resultados obtenidos por los diferentes métodos geofísicos nos muestra que los resultados son coherentes y complementarios. Los sondeos eléctricos verticales y los sondeos EM en el dominio de tiempos permiten obtener información más profunda y se correlacionan bien con la información geológica proporcionada por los sondeos mecánicos. Sin embargo, aunque ambos métodos son 1D, los sondeos EM en el Dominio de Tiempos focalizan mucho mejor las propiedades geoelectricas del subsuelo y, por tanto, son más adecuados que

los SEV para delimitar el proceso de intrusión marina.

Los sondeos EM en el Dominio de Frecuencias tienen una profundidad limitada y escasa resolución vertical, ya que proporcionan información a solamente 4 profundidades, sin embargo, destaca por su rendimiento y su facilidad de adquisición, sin la necesidad de extender largos dispositivos electrónicos o bobinas sobre la superficie del terreno.

Finalmente, la tomografía de resistividad eléctrica permite caracterizar el subsuelo con la mayor resolución, tanto en profundidad como lateralmente, pero también requiere de espacio suficiente para extender los dispositivos electrónicos de medida y el rendimiento es relativamente bajo para caracterizar grandes superficies. Por tanto, ningún método puede considerarse priori-

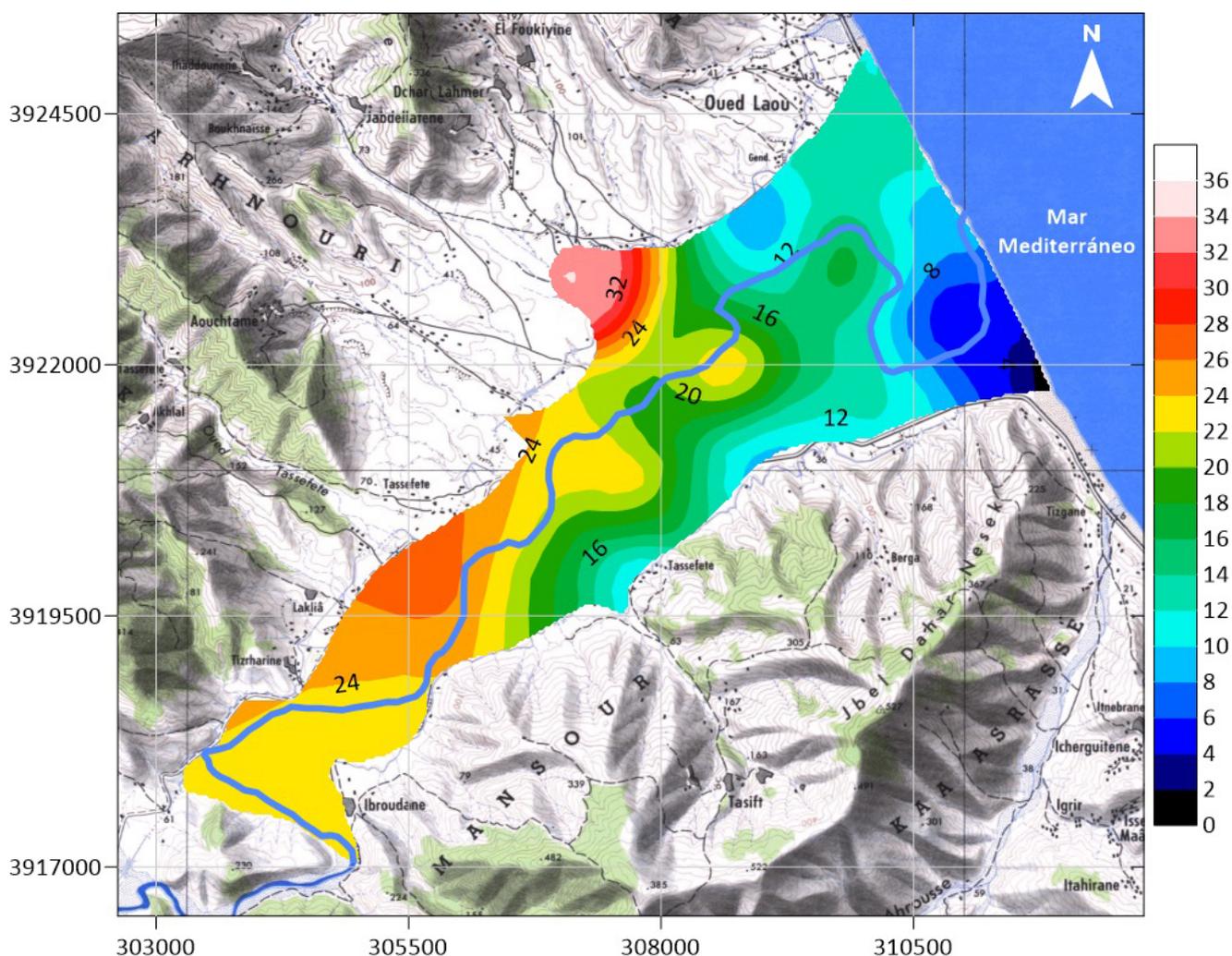


Figura 9. Mapa de distribución de los valores de resistividad eléctrica (ohm.m) para una profundidad de 30 m a partir de los datos de los sondeos TDEM.

Figure 9. Distribution map of electrical resistivity values (ohm.m) for a depth of 30 m from TDEM sounding data.

tario para el estudio de acuíferos costeros, ya que es recomendable la utilización de métodos geofísicos combinados que permitan pasar de la escala regional a la local en función del problema a resolver, y siempre apoyados con la información hidrogeológica e hidroquímica necesaria para su correcta interpretación.

6. Conclusiones

En el acuífero costero de Oued Laou los análisis de las aguas subterráneas en la red de control detectan elevados valores de salinidad en algunos pozos situados a poca distancia de la línea de costa. Sin embargo, la ausencia de puntos de control más próximos al mar no permite identificar si la salinización está producida por un efecto directo de intrusión marina o bien por el fenómeno de ascenso de agua salada profunda por bombeo denominado “*up-coning*”.

Con el objetivo de mejorar el conocimiento hidrogeológico del acuífero, establecer el proceso que provoca la salinización y la distribución de las zonas más afectadas, se han realizado diferentes campañas geofísicas que involucran dos métodos eléctricos en corriente continua: sondeo eléctrico vertical y tomografía de resistividad eléctrica, y dos métodos electromagnéticos: sondeos en el dominio de tiempos y en el dominio de frecuencias.

La aplicación de los diferentes métodos geofísicos ha permitido, por un lado, caracterizar la geometría del acuífero y la distribución de las distintas litologías que constituyen el relleno aluvial y, por otro lado, se ha detectado la existencia de valores de alta conductividad eléctrica en sectores próximos a la costa que pueden relacionarse con la presencia de aguas de elevada salinidad en el acuífero.

La información proporcionada por cada uno de los métodos geofísicos es coherente y complementaria, de forma que cada uno de ellos presenta sus ventajas y limitaciones. Desde el punto de vista metodológico, los dos métodos electromagnéticos se muestran como los más efectivos para delimitar las zonas afectadas en mayor o menor grado por el proceso de intrusión salina, aunque existen notables diferencias de rendimiento y características de la investigación. En relación al rendimiento, el método FDEM presenta como principal ventaja su rapidez de adquisición y como inconveniente la escasa resolución vertical (solo 4 profundidades) y limitada penetración.

Referencias

- Abdul-Nassir, S. S., Loke, M. H., Lee, C. Y., and Nawawi, M. N. M. (2000). Salt-water intrusion mapping by geoelectrical imaging surveys. *Geophysical Prospecting*, 48, 647-661.
- Barker, R. (1990). Investigation of groundwater salinity by geophysical methods. In: Ward, S.H. (Ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics*, 2. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, pp. 201-211.
- Bear, J., and Cheng, A. H-D. (2010). *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*, 834 pp. Ed. Springer. Heidelberg.
- Cimino, A., Cosentino, P. L., Oieni, A., and Tranchita, L. (2008). A geophysical and geochemical approach for seawater intrusion assessment in the Acquadolci coastal aquifer Northern Sicily. *Environmental Geology*, 55, 1473-1482.
- Duque, C., Calvache, M. L., Pedrera, A., Rosales, W. M., and Chicano, M. L. (2008). Combined time domain electromagnetic soundings and gravimetry to determine marine intrusion in a detrital coastal aquifer (Southern Spain). *Journal of Hydrology*, 348(3), 536-547.
- Edet, A. E., and Oandereke, C. S. (2002). Delineation of shallow groundwater aquifers in the coastal plain sands of Calabar area (Southern Nigeria) using surface resistivity and hydrogeological data. *Journal of African Earth Sciences*, 35(3), 433-443.
- Elgettafi, M., Elmandour, A., Himi, M., and Casas-Ponsatí, A. (2013). The use of environmental markers to identify groundwater salinization sources in a Neogene basin, Kert aquifer case, NE Morocco. *International Journal of Science and Technology*, 10, 719-728.
- Fitterman, D. V., and Stewart, M. T. (1986). Transient electromagnetic sounding for groundwater. *Geophysics*, 51(4), 995-1005.
- Frohlich, R. K., Urish, D. W., Fullrand, J., and Reilly, M. O. (1994). Use of geoelectrical method in groundwater pollution surveys in a coastal environment. *Journal of Applied Geophysics*, 32, 139-154.
- Griffiths, D. H., and Barker, R. D. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29(3-4), 211-226.
- Himi, M. (2000). Delimitación de la intrusión marina en los acuíferos costeros por métodos geofísicos. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona.
- Himi, M., Tapias, J., Benabdelouahab, S., Salhi, A., Rivero, L., Elgettafi, M., Elmandour, A., Stitou-El Mesari, J., and Casas-Ponsatí, A. (2017). Geophysical characterization of saltwater intrusion in a coastal aquifer: the case of Martil-Alila plain (North Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 126, 136-147.

- Loke, M. H., and Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasiNewton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Loke, M. H. (2002). RES2DINV ver. 3.50. Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least square method. Geotomo Software.
- McInnis, D., Silliman, S., Boukari, M., Yalo, N., Orou-Pete, S., Fertenbaugh, C., Sarre, K., and Fayomi, H. (2013). Combined application of electrical resistivity and shallow groundwater sampling to assess salinity in a shallow coastal aquifer in Benin, West Africa. *Journal of Hydrology*, 505, 335-345.
- McNeil, J. D. (1980). Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction number. *Geonics Technical Note*, 6.
- Orellana, E. (1982). *Prospección Eléctrica en Corriente Continua*. Paraninfo, 578 pp.
- Plata, J., Granda, A., and Pérez-Terenes, A. (1987). Los sondeos electromagnéticos en el dominio de tiempos (SEDT). Aspectos más significativos y primeras experiencias en España. *Boletín Geológico y Minero*, 98(3), 392-403.
- Pulido-Leboeuf, P., Pulido-Bosch, A., Calvache, M. L., Vallejos, Á., and Andreu, J. M. (2003). Strontium, SO_4^{2-}/Cl^- and Mg^{2+}/Ca^{2+} ratios as tracers for the evolution of seawater into coastal aquifers: the example of Castell de Ferro aquifer (SE Spain). *Comptes Rendus Geoscience*, 335(14), 1039-1048.
- Rkiouak, S., Pulido-Bosch, A., and Gaiz, A. (1997). Hydrogeological potentialities of a Moroccan littoral plain (Oued Laou, Tetouan-Chefchaouen), *Hydrological Sciences Journal*, 42(1), 101-117.
- Salhi, A., Himi, M., Casas-Ponsatí, A., Pulido-Bosch, A., Cerón, J. C., Stitou-EI Mesari, J., and Draoui, M. (2007). Aplicación del método DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de Oued Laou (Marruecos). *Geogaceta*, 41, 191-194.
- Stewart, M. T. (1982). Evaluation of electromagnetic methods for rapid mapping of salt-water interfaces in coastal waters. *Ground Water*, 20(5), 538-545.
- Stitou-EI Messari, J. (1995). Contribution à la connaissance hydrogéochimique des aquifères côtiers de Martil Alila, Oued Laou et Smir. Thèse de 3^{ème} cycle Université Abdelmalek Essaasi de Tétouan.
- Telahiguea, F., Mejria, H., Mansouria, B., Souida, F., Agoubia, B., Chahlaouib, A., and Kharroubia, A. (2020). Assessing seawater intrusion in arid and semi-arid Mediterranean coastal aquifers using geochemical approaches. *Physics and Chemistry of the Earth*, 115, 102811.
- Wu, J. C., Xue, Y. Q., Liu, P. M., Wang, J. J., Jiang, Q. B., and Shi, H. W. (1993). Sea-water intrusion in the coastal area of LaiZhou Bay, China. 2. Sea-water intrusion monitoring. *Ground Water*, 31, 740-745.
- Zohdy, A. A. R., Martin, P., and Bisdorf, R. J. (1993). A study of seawater intrusion using direct-current soundings in the southeastern part of the Oxnard Plain, California. Open-File Report 93-524. U.S. Geological Survey, 139 pp.