


## Estudio Geofísico e Hidrogeológico con método electromagnético en el Municipio de Valverde del Fresno, España

 Arturo Zevallos <sup>\*1</sup>, Jean Córdova <sup>1</sup>, Elvis Candia <sup>1</sup> y Pedro Carrasco <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Grupo de investigación CTCLIMA, Lima, Perú

<sup>2</sup> Escuela Politécnica Superior de Ávila, Área de Prospección e Investigación Minera, Ávila, España

Recibido 16 Feb 2022 – Aceptado 23 Abr 2022 – Publicado 30 Abr 2022

### Resumen

Se realizó una investigación geofísica e hidrogeológica, para determinar la litología y morfología de los materiales que conforman la zona del término municipal de Valverde del Fresno, España. Con el fin de caracterizar las unidades geoelectricas existentes en la zona de estudio y de determinar si existe alguna zona adecuada para la extracción de recurso hídrico. Para proceder con el estudio de esta área, compuesta por fracturas y diques, se ha utilizado el Método Electromagnético Very Low Frequency, con el cual se han efectuado 6 perfiles mediante el instrumento ABEM WADI. A partir de estos perfiles se lograron identificar tres zonas con posibilidades hidrogeológicas para emplazar sondeos de captación de aguas subterráneas.

**Palabras clave:** Método Electromagnético VLF, Geofísica, Hidrogeología.

### Geophysical-Hydrogeological study using Electromagnetic Methods in the municipality of Valverde del Fresno, Spain

#### Abstract

A geophysical and hydrogeological investigation was carried out to determine the lithology and morphology of the materials that make up the area of the municipality of Valverde del Fresno, Spain. To characterize the existing geoelectric units in the study area and to determine if there is any suitable area for the extraction of water resource. To proceed with the study of this area, composed of fractures and dykes, the Very Low Frequency Electromagnetic Method has been used, with which 6 profiles have been made using the ABEM WADI instrument. Based on these profiles, it was possible to identify three areas with hydrogeological potential, for the emplacement of groundwater catchment soundings.

**Keywords:** VLF Electromagnetic Method, Geophysics, Hydrogeology.

## 1. Introducción

La técnica de prospección geofísica, que se utilizó para evaluar el municipio de Valverde del Fresno, es el Método Electromagnético Very Low Frequency (VLF). Este método es útil para detectar conductores eléctricos largos y rectos, como fallas o sistemas fracturados, llenos de agua o arcilla [1]. Consiste en la recepción del campo magnético generado por transmisores militares de alta potencia (15 - 30 kHz), por los materiales conductores en el sub-

suelo generando en estas corrientes inducidas de Eddy, las cuales generan un campo magnético secundario. Para lograr obtener información de esta interacción entre campos magnéticos, se utilizará el instrumento geofísico conocido como WADI, producto de la empresa ABEM, comúnmente conocido como ABEM WADI [2]. A partir del cual con la resistividad o conductividad del material se puede conocer qué tipo de minerales se encuentran en el subsuelo.

\* arturo.zevallos@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



### 1.1. Ubicación y geología del área de estudio

El municipio Valverde del Fresno, ubicado en la provincia de Cáceres, al extremo noroeste de Extremadura, España (Figura 1). Cuenta con un área total de 138 ha, la cual está compuesta geológicamente por grauwacas y pizarras atravesadas por fracturas y diques [3]. Asimismo, como antecedente hidrogeológico se tiene que una parte del área de estudio se cruzada por un aluvial; además, en distintas zonas se encuentran distribuidas 3 calicatas, un pozo y una fuente (Figura 2). Por lo tanto, existe la posibilidad de que se pueda encontrar agua subterránea.

Para generar los perfiles se seleccionaron 6 espacios distribuidos en el área de estudio (Figura 13), entre los cuales cada 10 m se realizó la toma de datos para cada perfil.

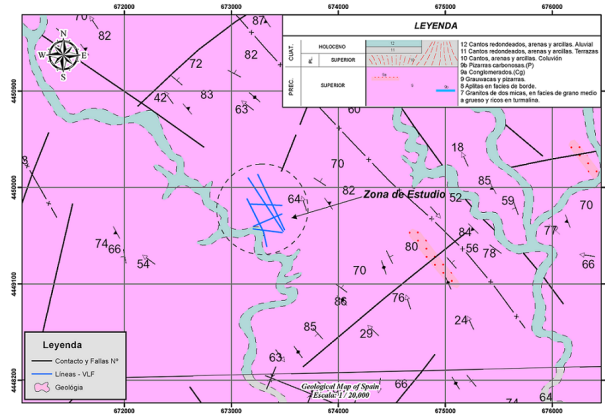


Figura 1. Plano y leyenda geológica de la zona de estudio. Modificado de [3]

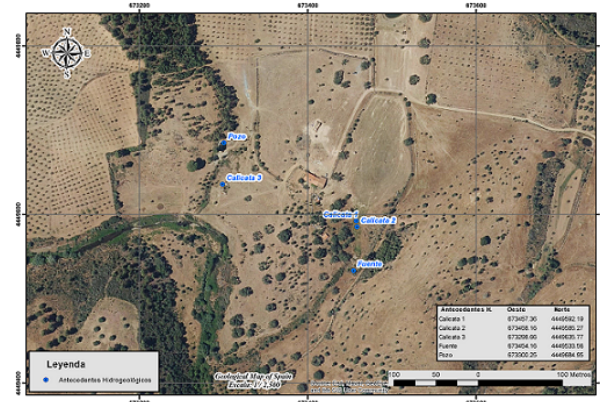


Figura 2. Ubicación de las zonas con agua previa al estudio.

## 2. Material y método

El ABEM WADI (Figura 3) es un instrumento portátil que mide las propiedades eléctricas del subsuelo,

usando inducción electromagnética; este instrumento es utilizado para la prospección de agua y minerales [4]. Asimismo, se caracteriza por su precisión en la toma de datos, debido a que opera bajo el método VLF (very low frequency). Con el ABEM WADI se puede localizar agua subterránea, la cual está atrapa en cavidades, fracturas en las rocas y en el subsuelo [5]. Además, puede encontrar distintos tipos de anomalías, como yacimientos con alta conductividad, residuos enterrados, tuberías metálicas y sumideros.

Se aplicó el filtro de Karous - Hjelt, el cual genera una relación entre la densidad de corriente y la profundidad del suelo [6], para identificar la ubicación (lateral) de las zonas resistivas y conductoras [7]. El procesamiento de datos se realizó mediante el software Ramag v2.2 [2].

El ABEM WADI procesó los perfiles mostrados en las Figuras 5 - 10 que describen las anomalías y pseudo secciones de densidad de corriente (medidas respecto a una profundidad máxima de 100 m), donde se encontraron distintas variaciones de intensidad de corriente respecto a la profundidad y dependiendo del material.



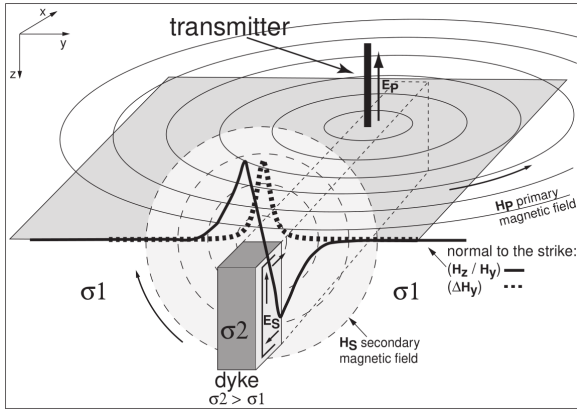
Figura 3. Instrumento ABEM WADI del año 1989 usado en la prospección geofísica.

### 2.1. Principios físicos del VLF

Esta técnica geofísica pasiva [8] requiere de antenas transmisoras comerciales o militares que se encuentran en varios lugares del mundo, se emplean en la prospección de estructuras conductoras cercanas al subsuelo [9]. Estas antenas emiten señales de alta potencia de 300 - 1000 kW, que parten de una altura de 200 - 300 m. Estas señales generan un campo primario, el cual interactúa con la conductividad de las rocas en el subsuelo, produciendo un sistema de corriente de Foucault (Eddy), el cual induce un campo magnético secundario en sentido contrario del primero. Este método usa frecuencias de 15 - 30 kHz [10]; en base a la teoría electromagnética, a

grandes distancias de la fuente la longitud de una onda se aproxima a una onda plana [1].

El método electromagnético o prospección VLF está basado fundamentalmente en la impedancia de la Onda Electromagnética (la relación entre Campo eléctrico y el Campo magnético  $E/H$ ) [11]. Las ecuaciones de Maxwell en forma fasorial describen la geometría mostrada en la Figura 4, se tiene al campo secundario en dirección al eje  $z$  y al campo primario en dirección al eje  $x$ .



**Figura 4.** Modelo geométrico de los campos magnético y eléctrico, a partir de un transmisor y un dique vetical. Fuente [12].

Considerando las relaciones entre la inducción magnética, la intensidad del campo magnético, la densidad de corriente y los campos eléctricos para las estructuras en 2 dimensiones. Se tiene lo siguiente:

$$\nabla \times E = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -j\omega\mu_0 H \quad (3)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + j\omega\epsilon_0 E \quad (4)$$

Donde:

- Campo Eléctrico:  $E$  (Volts por metro,  $V/m$ )
- Excitación magnética:  $H$  (Ampere por metros,  $A/m$ )
- Campo Magnético:  $B$  (Tesla,  $T$ )
- Permeabilidad magnética:  $\mu_0$  (adimensional)
- Tiempo:  $t$  (segundos,  $s$ )
- Conductividad eléctrica:  $\sigma$  (Siemens por metro,  $S/m$ )

Las ecuaciones del (1) al (4) con las condiciones de contorno adecuadas describen completamente los fenómenos de inducción electromagnética. Aquellas condiciones de contorno requieren de componentes tangenciales de los campos magnético y eléctrico los cuales son continuos en todo el espacio [13]. Siendo estas ecuaciones diferenciales acopladas, su solución para obtener correctamente comportamientos de campos reales, tanto espaciales como temporales, se resuelven mediante un proceso de análisis numérico. Y en relación con las ecuaciones (3) y (4) se tiene que en un medio dado  $\sigma \gg \omega\epsilon$  por tanto se puede descartar el segundo termino en (4) y se obtiene la siguiente ecuación:

$$\nabla \times H = J = \sigma E \quad (5)$$

## 2.2. El efecto Skin

Consiste en la disminución de la amplitud y el cambio de fase de un campo electromagnético mientras penetra un medio conductor. Como se trabaja en un medio no uniforme se requiere la resistividad aparente, para identificar los materiales en el subsuelo. En la figura anterior se tienen el campo eléctrico  $E_x$  y el campo magnético  $H_y$  que se requieren para calcular la resistividad aparente  $\rho_a [\Omega m]$  en el método VLF-EM, ecuación (6) [14].

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (6)$$

Donde:

Resistividad aparente:  $\rho_a (\Omega m)$

Frecuencia angular:  $\omega = 2\pi f (rad/s)$

Permeabilidad magnética:  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} (Vs/Am)$

En un suelo no uniforme la fase o fase aparente es independiente de la resistividad de la tierra; sin embargo, sobre un terreno uniforme siempre es igual 45 grados [15]. Esto produce un cambio en la fase del campo eléctrico; por lo tanto, las ecuaciones para el campo eléctrico y magnético dependientes del tiempo (que varían respecto al efecto Skin), se reescribirán de la siguiente forma:

$$H = H_0 e^{z/\delta} \cos(\omega t + z/\delta) \quad (7)$$

$$E = \left( \frac{\omega\mu_0}{\sigma} \right)^{1/2} H_0 e^{z/\delta} \cos(\omega t + z/\delta + \pi/4) \quad (8)$$

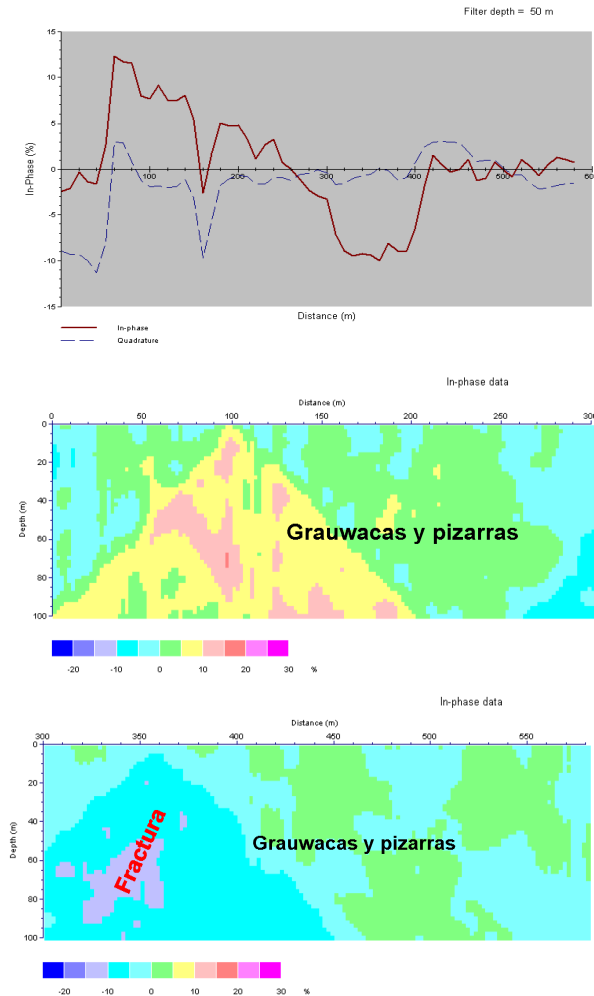
Donde:

$$\delta = \left( \frac{2}{\omega\mu\sigma} \right)^{1/2} \quad (9)$$

Para el efecto Skin no se considera el magnetismo de la tierra, por lo tanto su permeabilidad será igual que la permeabilidad del vacío. La profundidad de Skin es la distancia debajo de la superficie de un conductor donde la densidad de corriente ha disminuido a  $1/e$  de su valor en la superficie [16]. Al reemplazar  $\sigma = 1/\rho$  y  $\omega = 2\pi f$ , se obtiene que la profundidad de Skin puede ser representado de la siguiente manera:

$$\delta = 503.3\sqrt{\rho/f} \quad (10)$$

Unidades de la profundidad de Skin:  $\delta(m)$



**Figura 5.** Gráfica del VLF-1 de la componente real vs imaginaria. Gráfica de pseudo-secciones de densidad de corriente aparente.

### 3. Resultados y discusión

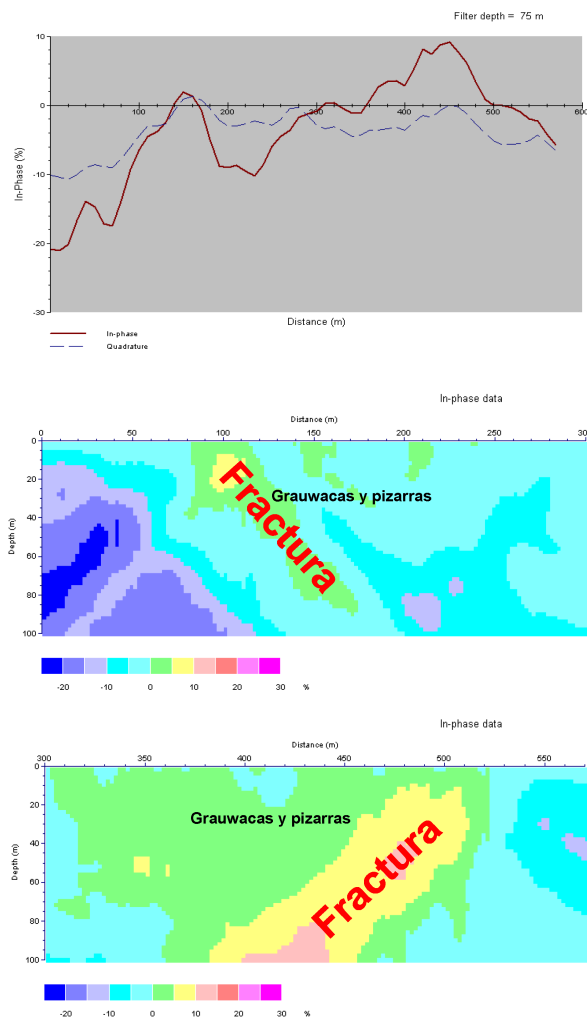
Al hacer uso del ABEM WADI se ha conseguido realizar 6 perfiles utilizando el filtro de Karous - Hjelt [6]. Con este filtro se han obtenido gráficas de pseudo-secciones, las cuales se pueden interpretar a partir de las componentes en cuadratura (imaginaria) y las componentes en fase (real) o a partir de los datos en fase (pseudo-sección de densidad de corriente aparente) contra la distancia [17]. A partir de la interpretación de los perfiles se puede localizar en que áreas se encuentran grauwacas, pizarras, fracturas o recursos hídricos.

#### 3.1. Pseudo-secciones del perfil VLF-1

En el perfil de la Figura 5, con una longitud de 573 m, se puede visualizar que de 0 - 260 m la componente en fase (real) se superpone a la componente en cuadratura (imaginaria), donde se concluye que el suelo presenta una alta conductividad eléctrica por la presencia de grauwacas y pizarras. Por el contrario, desde los 260 m hasta 400 m la componente imaginaria se superpone a la componente de la fase real, que representa que hay una baja conductividad y se puede visualizar una fractura; donde existe una alta probabilidad de encontrar recurso hídrico. Finalmente se invierten las componentes hasta los 573 m y se observa la presencia de grauwacas y pizarras.

#### 3.2. Pseudo-secciones del perfil VLF-2

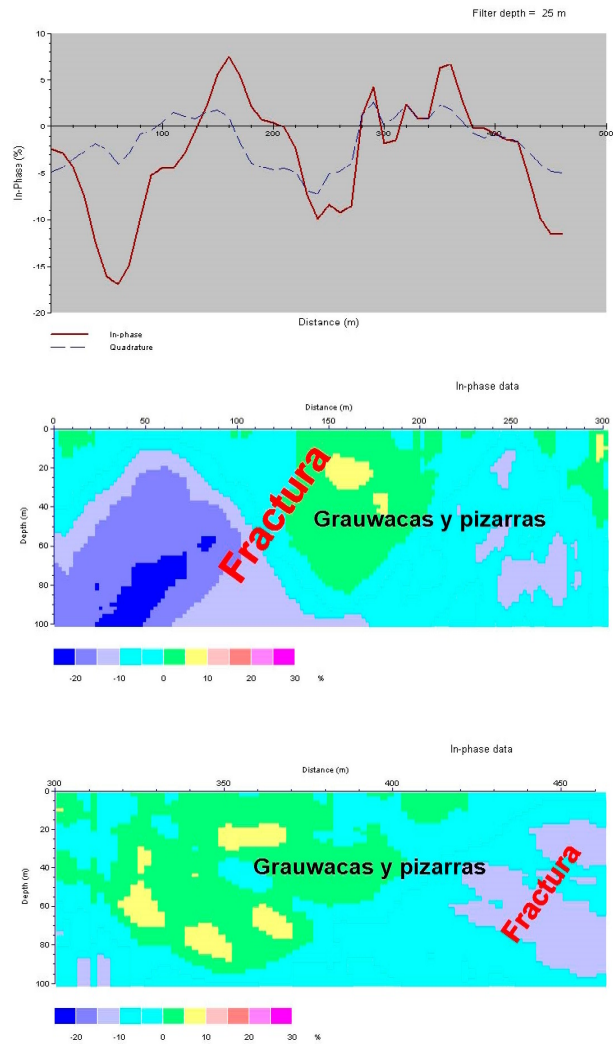
En la Figura 6 se muestra un perfil con una longitud de 597 m. En la que se observa un bajo porcentaje de densidad de corriente para los primeros 100 m, el cual indica que existe un material con una alta resistividad. En los siguientes 100 m se encuentran zonas con un porcentaje de densidad de corriente entre 0 - 10 %, asimismo se logró ubicar una fractura en esa zona. Posteriormente, 100 m después, se encontraron zonas con baja conductividad; sin embargo, entre los 300 y 520 m siguientes, se localizaron nuevamente áreas con alto porcentaje de densidad de corriente 0 - 15 % y otra fractura. En los 77 m restantes se volvieron a encontrar materiales resistivos. Las fracturas o zonas de contacto encontradas en el perfil no tienen posibilidades como recurso hídrico, debido a que por la alta conductividad de las grauwacas y pizarras es probable que se encuentre agua salina.



**Figura 6.** Gráfica del VLF-2 de la componente real vs imaginaria. Gráfica de pseudo-secciones de densidad de corriente aparente.

### 3.3. Pseudo-secciones del perfil VLF-3

Este perfil presenta una longitud de 484 m (Figura 7). Se observa que entre 0 y 125 m, la componente en cuadratura se superpone a la componente en fase; por lo tanto, esta área presenta baja conductividad eléctrica y así, una alta probabilidad de conseguir recurso hídrico encapsulado en la fractura. Desde los 125 m hasta los 450 m la componente en real se sobrepone a la imaginaria; por ende, la zona presenta una alta conductividad eléctrica, debido a la presencia de grauwacas y pizarras. En la parte restante se puede observar una baja conductividad, ya que la componente en cuadratura está por encima de la componente en fase; debido a esto, es posible que se encuentre agua dulce en la fractura.



**Figura 7.** Gráfica del VLF-3 de la componente real vs imaginaria. Gráfica de pseudo-secciones de densidad de corriente aparente.

### 3.4. Pseudo-secciones del perfil VLF-4

Este perfil fue realizado para una longitud de 297 m (Figura 8), muestra una alta resistividad en los primeros 160 m, la cual a medida que aumenta en desplazamiento aumenta en conductividad; además, se encuentra una fractura. En los 127 m restantes se visualizan zonas con un porcentaje de densidad de corriente entre 0 - 10 %, donde se encuentran grauwacas y pizarras. Es posible que en la fractura localizada se encuentre un depósito con agua subterránea.

### 3.5. Pseudo-secciones del perfil VLF-5

El perfil de la Figura 9 muestra una longitud de 286 m. En este perfil se puede observar que la componente en fase está por encima de la componente de cuadratura hasta los 60 m; mostrando así, una zona con alta conductividad eléctrica por la presencia de grauwacas y pizarras. Desde los 60 m a 220 m la componente de cuadratura imaginaria se superpone a la real, por tanto presenta baja conductividad eléctrica; por ende, se tiene una alta probabilidad de encontrar agua dulce en la fractura. Por último, en el tramo restante, la fase real se superpone a la imaginaria, solo se encuentra grauwacas y pizarras.

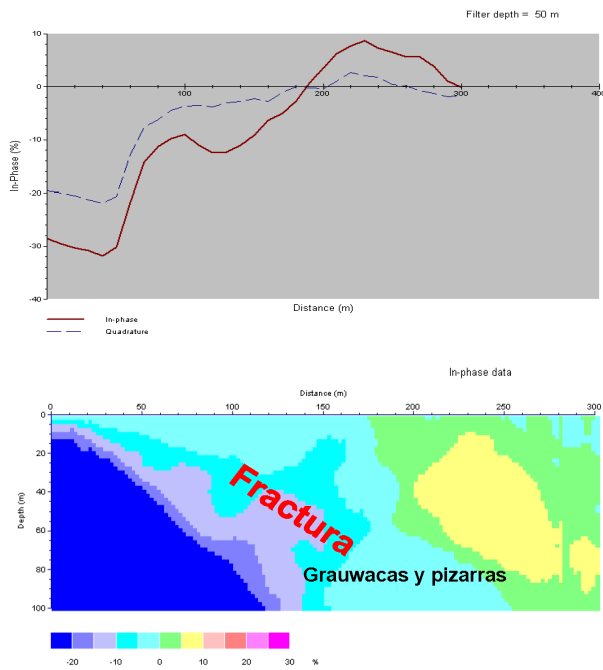


Figura 8. Gráfica del VLF-4 de la componente real vs imaginaria. Gráfica de pseudo-secciones de densidad de corriente aparente.

### 3.6. Pseudo-secciones del perfil VLF-6

La Figura 10 muestra un perfil evaluado para una longitud de 272 m. De 0 a 50 m presenta una baja conductividad; en los siguientes 100 m se pueden encontrar áreas con un porcentaje de densidad de corriente de 0 - 5 %, compuesto por grauwacas y pizarras. En los 150 m finales se encuentran zonas de alta resistividad y se localiza una fractura. Esta fractura como está compuesta por materiales con baja conductividad, tiene posibilidades de contener agua fresca.

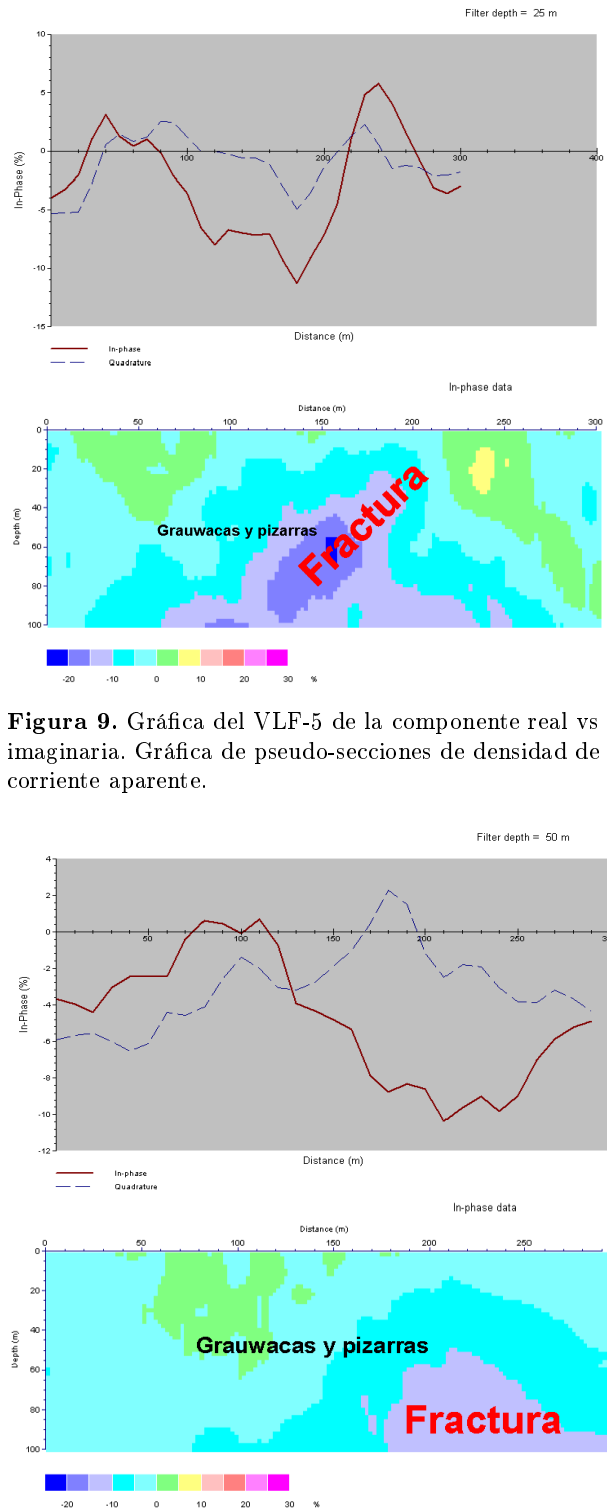


Figura 9. Gráfica del VLF-5 de la componente real vs imaginaria. Gráfica de pseudo-secciones de densidad de corriente aparente.

Figura 10. Gráfica del VLF-6 de la componente real vs imaginaria. Gráfica de pseudo-secciones de densidad de corriente aparente.

Al analizar los perfiles y ubicar las fracturas en sus pseudo-secciones, tanto para las que presentaban una alta conductividad como para las de una alta resistividad, se logró realizar una proyección de las fracturas existentes (Figura 11); las cuales se cruzan en ubicaciones cercanas a los antecedentes hidrogeológicos.

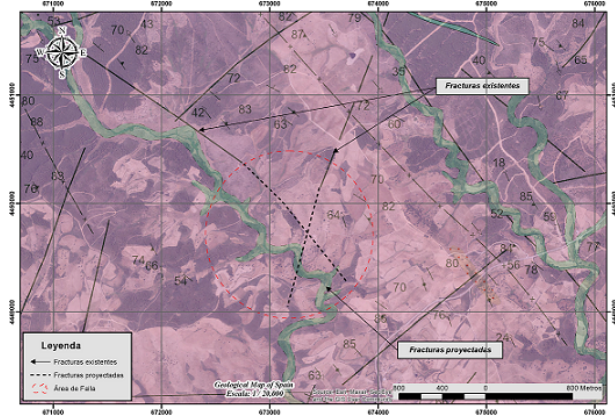


Figura 11. Proyección de las fracturas existentes a partir de la información de los perfiles VLF.

#### 4. Conclusiones

En base al uso del instrumento geofísico ABEM WADI con el método electromagnético VLF para realizar el estudio geofísico e hidrogeológico, nos permite concluir ciertos factores para generar un posible emplazamiento para la captación de agua en el Municipio de Valverde del Fresno.

Al analizar las pseudo-secciones de los perfiles VLF-1, VLF-3, VLF-4, VLF-5 y VLF-6 se encontraron distintas zonas con fracturas y con alta resistividad (Figura 5, 7, 8, 9 y 10), de lo cual se puede concluir que en estas áreas existen posibilidades de encontrar agua subterránea. Sin embargo, para la zona del perfil VLF-2 solo se encontraron grauwacas y pizarras (Figura 6), las cuales no tienen posibilidades hidrogeológicas.

Utilizando las fracturas encontradas en los perfiles se proyectaron las fracturas existentes (Figura 11). Como ambas proyecciones se cruzan en zonas próximas a los antecedentes hidrogeológicos, se considerarán como principales puntos de excavación a las zonas cercanas a estos y que a su vez se encuentren próximos a los perfiles. Por lo tanto, se recomiendan realizar sondeos de captación de

agua, en un rango de 40 a 100 m de profundidad, para las tres zonas mostradas en la Figura 12, que involucran a los perfiles VLF-1 y VLF-5.

#### 5. Agradecimientos

Agradecemos al Área de Prospección e Investigación Minera de la Escuela Politécnica de Ávila (Universidad de Salamanca) y a la empresa Técnicas Geofísicas S.L. por la información y el tratamiento de datos.

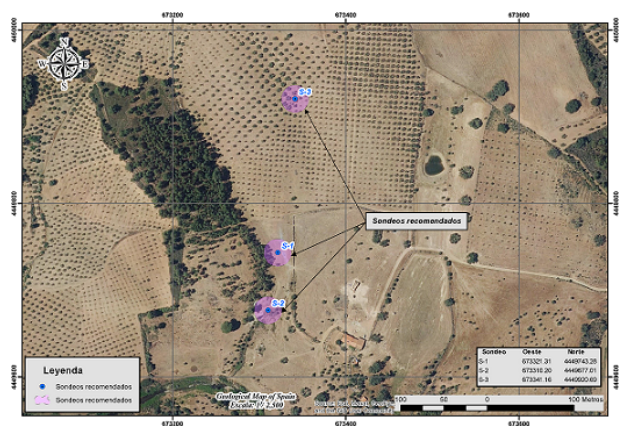


Figura 12. Sondeos recomendados para emplazar obras de captación de agua subterránea.

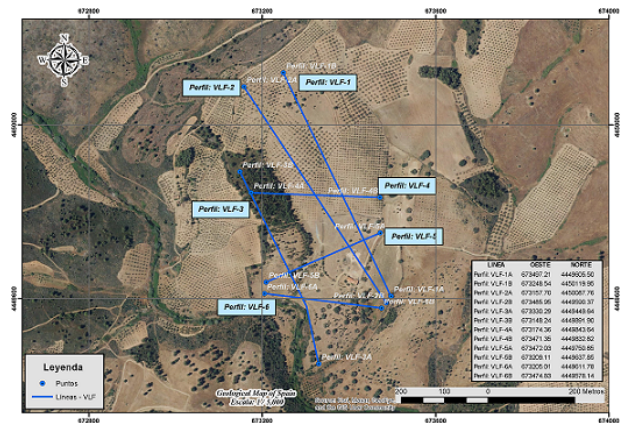


Figura 13. Ubicación de los perfiles en el área de estudio.

#### Referencias

[1] J. Zlotnicki, G. Vargemezis, A. Mille, F. Bruère, F. y G. Hammouya. State of the hydrothermal acti-

vity of Soufrière of Guadeloupe volcano inferred by VLF surveys. Journal of Applied Geophysics, 58(4), 265–279. (2006). Doi: <https://doi.org/10.1016/>

- [j.jappgeo.2005.05.004](#).
- [2] ABEM. Interpretation Guide-ABEM WADI VLF Instruments. Theory, practice and case stories for WADI operators. (1989). Recuperado: <https://www.guidelinegeo.com/wp-content/uploads/2016/03/WADI-Interpretation-guide.pdf>.
- [3] L. García, D. Martín y L. Bascones. MapasIGME - Portal de cartografía del IGME: MAGNA 50 - Hoja 572 (Valverde del Fresno). Instituto Geológico y Minero de España. (2021). Recuperado el 25 de Enero del 2021, de <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50Hoja.aspx?language=es&id=572>
- [4] J. Sunday, A. Usman, O. Ologe y T. Lawal. Detection of Fracture Zones for Groundwater Investigation from Interpretation of VLF-EM Anomalies of Kwara State Polytechnic Ilorin and its Environs. Global Journal Of Human-Social Science Research. (2019). Recuperado de <https://socialscienceresearch.org/index.php/GJHSS/article/view/2836>
- [5] A. George. Fracture zone detection using very low frequency (VLF) electromagnetic method in parts of Oban Massif, southeastern Nigeria. (2013).
- [6] M. Karous y S. Hjelt. Linear Filtering of VLF dip-angle measurements. Geophysical Prospecting, 31(5), 782–794 (1983). Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1983.tb01085.x>.
- [7] Sungkono, A. Bahri, D. Warnana, F. Monteiro Santos y B. Santosa. Fast, simultaneous and robust VLF-EM data denoising and reconstruction via multivariate empirical mode decomposition. Computers & Geosciences, 67, 125–138 (2014). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.007>
- [8] P. Gnaneshwar, A. Shivaji, Y. Srinivas, P. Jettaiah y N. Sundararajan. Very-low-frequency electromagnetic (VLF-EM) measurements in the Schirmacher oasen area, East Antarctica. Polar Science, 5(1), 11-19 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2010.09.001>.
- [9] A. Adelusi, M. Ayuk, y J. Kayode. VLF-EM and VES: an application to groundwater exploration in a Precambrian basement terrain SW Nigeria. Annals of Geophysics, 57(1) (2014). Doi: <https://doi.org/10.4401/ag-6291>.
- [10] A. Tabbagh, Y. Benderitter, P. Andrieux, J. Decriaud, y R. Guerin. VLF Resistivity Mapping and Verticalization of the Electric Field. Geophysical Prospecting, 39(8), 1083–1097 (1991). Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1991.tb00360.x>.
- [11] A. Basokur y M. Candansayar. Enhancing VLF data for qualitative interpretation: An example of massive chalcopryite exploration. The Leading Edge, 22(6), 568–570 (2003). Doi: <https://doi.org/10.1190/1.1587680>.
- [12] F. Bosch y I. Müller. Continuous gradient VLF measurements: a new possibility for high resolution mapping of karst structures. First Break, 19(6), 343–350 (2001a). Doi: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2397.2001.00173.x>.
- [13] J. Wright. VLF Interpretation Manual. Scintrex, Toronto. (1988).
- [14] L. Cagniard. Basic Theory of the Magneto-Telluric Method of Geophysical Prospecting. Geophysics, 18(3), 605–635 (1953). Doi: <https://doi.org/10.1190/1.1437915>.
- [15] M. Bayrak. Exploration of chrome ore in South-western Turkey by VLF-EM. Journal of the Balkan Geophysical Society, 5, 35–46 (2002).
- [16] M. Van Valkenburg y W. Middleton. Reference Data for Engineers: Radio, Electronics, Computers and Communications (9th ed.). Newnes. (2002).
- [17] N. Jamal y N. Singh. Identification of fracture zones for groundwater exploration using very low frequency electromagnetic (VLF-EM) and electrical resistivity (ER) methods in hard rock area of Sangod Block, Kota District, Rajasthan, India. Groundwater for Sustainable Development, 7, 195–203 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.05.003>.