

ISBN: 978-84-938046-4-0

ENSAYO DE CORRELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS GEOFÍSICOS E HIDROGEOLOGÍCOS DE LOS DEPÓSITOS VOLCÁNICOS DE LA CALDERA DE BANDAMA (GRAN CANARIA)

Mahjoub HIMI¹, Esmeralda ESTÉVEZ², Raúl LOVERA¹, Alex SENDRÓS¹, María del Pino PALACIOS-DIAZ³, Josefina C. TAPIAS⁴, María del Carmen CABRERA², Albert CASAS¹

¹ Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Universidad de Barcelona. 08028-Barcelona. himi@ub.edu; rlovera@ub.edu; alex.sendros@ub.edu; albert.casas@ub.edu

² Departamento de Física (GEOVOL), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017-Las Palmas de Gran Canaria, España. eestevez@proyinv.es; mcarmen.cabrera@ulpgc.es

³ Departamento de Patología Animal, Producción Animal, Bromatología y Tecnología de los Alimentos (GEOVOL). mpalacios@dpat.ulpgc.es

⁴ Departamento de Productos Naturales, Biología Vegetal y Edafología. Universidad de Barcelona. 08028-Barcelona. jtapias@ub.edu

RESUMEN

La geometría y la conductividad hidráulica de la zona no saturada es difícil de estudiar a partir de las técnicas tradicionales, como la toma de muestras en catas que aportan datos superficiales o los sondeos mecánicos, que son caros y proporcionan información puntual. Los métodos geofísicos no destructivos, y entre ellos la tomografía de resistividad eléctrica pueden ser de aplicación para la caracterización de la zona no saturada en áreas volcánicas. Las coladas de lava y los depósitos piroclásticos presentan un amplio rango de valores de resistividad en función del grado de fracturación y meteorización de las lavas, y de la porosidad y textura de los piroclastos. Con el objetivo de caracterizar la geología del subsuelo bajo el campo de Golf de Bandama (Gran Canaria) se ha realizado una campaña de prospección geofísica mediante tomografía de resistividad eléctrica. Esta técnica ha permitido delimitar la geometría de las formaciones geológicas existentes gracias al elevado contraste de resistividad eléctrica que presentan. Posteriormente, en afloramientos representativos se ha medido simultáneamente el valor de resistividad eléctrica de cada una de las litologías presentes y se han tomado muestras inalteradas para la medida en el laboratorio de la conductividad hidráulica. Finalmente, se ha establecido una correlación estadística entre ambas variables y se ha elaborado un modelo 3D de valores de conductividad hidráulica para evaluar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación en las distintas zonas del campo de golf.

Palabras clave: *Depósitos volcánicos, resistividad eléctrica, conductividad hidráulica, zona no saturada, Gran Canaria*

ABSTRACT

The geometry and the hydraulic conductivity of the unsaturated zone is difficult to study from traditional techniques, like samples from trenches that normally provide surficial data or boreholes, that are expensive and provide local information. Non-destructive geophysical

techniques and among them the electrical resistivity tomography method can be applicable in volcanic areas, where the lava flows and pyroclastic deposits have a wide range of values depending on the degree of fracturing and weathering of lava flows, and porosity and texture of the pyroclastic deposits. In order to characterize the subsurface geology below the golf course of Bandama (Gran Canaria) has conducted a campaign of electrical resistivity tomography profiles. This technique allowed to define the geometry of the existing geological formations by their high electrical resistivity contrast. Subsequently, in representative outcrops has been simultaneously measured the value of resistivity of each of these lithologies and undisturbed samples for measurement taken in the laboratory of hydraulic conductivity. Finally a statistical correlation between the two variables has been established and a 3D model of values of hydraulic conductivity has been built in order to evaluate the aquifer vulnerability to groundwater pollution at different zones of the golf course.

Key words: *volcanic deposits, electrical resistivity, hydraulic conductivity, unsaturated zone, Gran Canaria*

INTRODUCCIÓN

El uso de aguas regeneradas para el riego es una práctica cada vez más utilizada y en Gran Canaria se ha llevado a cabo desde hace más de treinta años. Según el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, en la actualidad supone más del 8% del total de recursos hídricos de la isla, con un destino casi exclusivo para riego. Sin embargo, se desconoce en gran medida los efectos que puede tener esta práctica en el medioambiente. Por ello, se ha seleccionado el campo de golf de Bandama donde se ha llevado a cabo un estudio detallado conducente a evaluar la vulnerabilidad a la contaminación a las aguas subterráneas como consecuencia del riego que se lleva a cabo en el Campo de Golf de Bandama desde 1976 con aguas regeneradas procedentes de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Las Palmas de Gran Canaria (Estévez et al, 2010).

En este trabajo se presentan los resultados del estudio geofísico llevado a cabo para caracterizar la parte superficial de la zona no saturada con el objetivo de evaluar la dinámica del drenaje subsuperficial del agua que se infiltra desde la superficie del terreno, tanto si se trata de agua de lluvia como de excedentes de riego.

El campo de golf está situado en la cuenca del barranco de Las Goteras, al NE de Gran Canaria (Figura 1). Los materiales que afloran en la zona son lavas y piroclastos (de caída y de flujos tipo surge) de naturaleza básica, muy poco alterados y que han sido datados por C-14 en 1970 ± 70 años BP (Hansen y Moreno, 2008).. Estos materiales fueron emitidos en las erupciones que dieron lugar al Pico y la Caldera de Bandama y los depósitos piroclásticos cubrieron más de 50 km^2 de superficie (Hansen y Moreno, 2008). La Caldera de Bandama, de origen freatomagmático, tiene 900 m de diámetro y 250 m de profundidad y el campo de golf se localiza en su sector occidental. Por tanto, la ladera E de la caldera representa un corte natural que permite la observación directa de la zona no saturada, conformada por una capa superficial de piroclastos originados en la erupción de la propia caldera que cubren brechas volcánicas (in situ y deslizadas) Pliocenas pertenecientes al Grupo Roque Nublo, que a su vez están situados sobre materiales fonolíticos miocenos, entre los que se intercalan conglomerados aluviales pertenecientes a la Formación Detrítica de Las Palmas.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la isla se considera un acuífero único con una superficie piezométrica en forma de domo que alcanza máximos en el centro de la isla. El acuífero subyacente al campo de golf está formado por materiales volcánicos y el flujo del agua subterránea sigue el esquema general para la isla de cumbre a costa. El nivel

piezométrico general se sitúa a más de 250 m de profundidad y a 100 m por debajo del fondo de la caldera. El establecimiento de una red de control de puntos de agua a lo largo del barranco de las Goteras ha permitido caracterizar la calidad de las aguas subterráneas del sistema acuífero que explota fundamentalmente materiales fonolíticos por medio de pozos de diferentes profundidades (Cabrera et al, 2009) y también la presencia de contaminantes emergentes y sustancias prioritarias (Estévez et al, 2012).

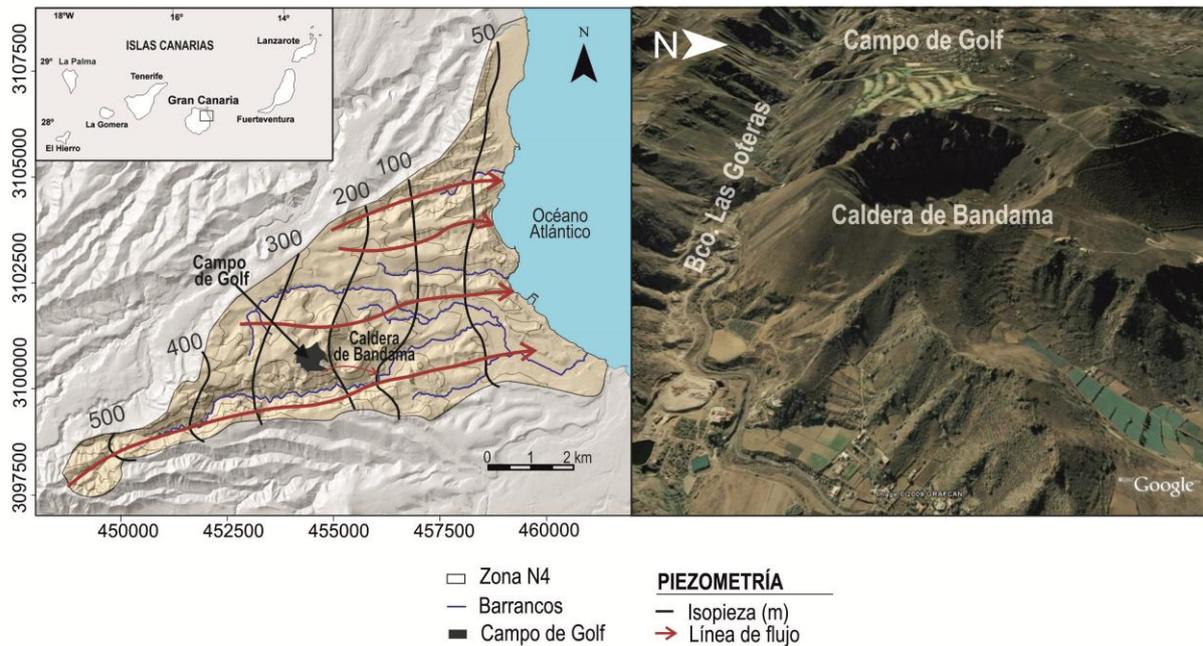


Figura 1. Situación del campo de golf de Bandama con indicación de la piezometría de la zona (Cabrera et al., 2009). La imagen derecha muestra una perspectiva de la Caldera de Bandama y del Campo de golf desde el Este en la que se observa el corte natural de la sección de zona no saturada debajo del campo de golf (Google Maps).

METODOLOGÍA

Para la consecución de los objetivos planteados se han aplicado dos metodologías complementarias, por un lado la tomografía de resistividad eléctrica para caracterizar la geometría y heterogeneidad del subsuelo y por otro la medida de la conductividad hidráulica en muestras representativas de los materiales volcánicos con la finalidad de poder establecer una correlación entre ambas variables.

Tomografía eléctrica

El método geofísico utilizado para caracterizar el subsuelo del campo de golf de Bandama ha sido la tomografía de resistividad eléctrica (Griffiths y Barker, 1993). Para conseguir el objetivo propuesto de determinar las variaciones laterales y verticales de los materiales situados bajo el campo de golf se han efectuado 18 perfiles cubriendo lo más homogéneamente posible la totalidad del campo. Cada perfil tiene 94 m de longitud y alcanza aproximadamente 20 m de profundidad, suficiente para los objetivos del estudio (Figura 2).

Las secciones de tomografía eléctrica se adquirieron con un resistímetro SYSCAL PRO de 48 electrodos con un dispositivo Wenner-Schlumberger y 2 metros de separación entre

los electrodos. Las coordenadas UTM del centro, inicio, final y de cada perfil se midieron con un navegador GPS Garmin que en las condiciones óptimas de trabajo del campo de golf proporcionaron una precisión de ± 5 m.

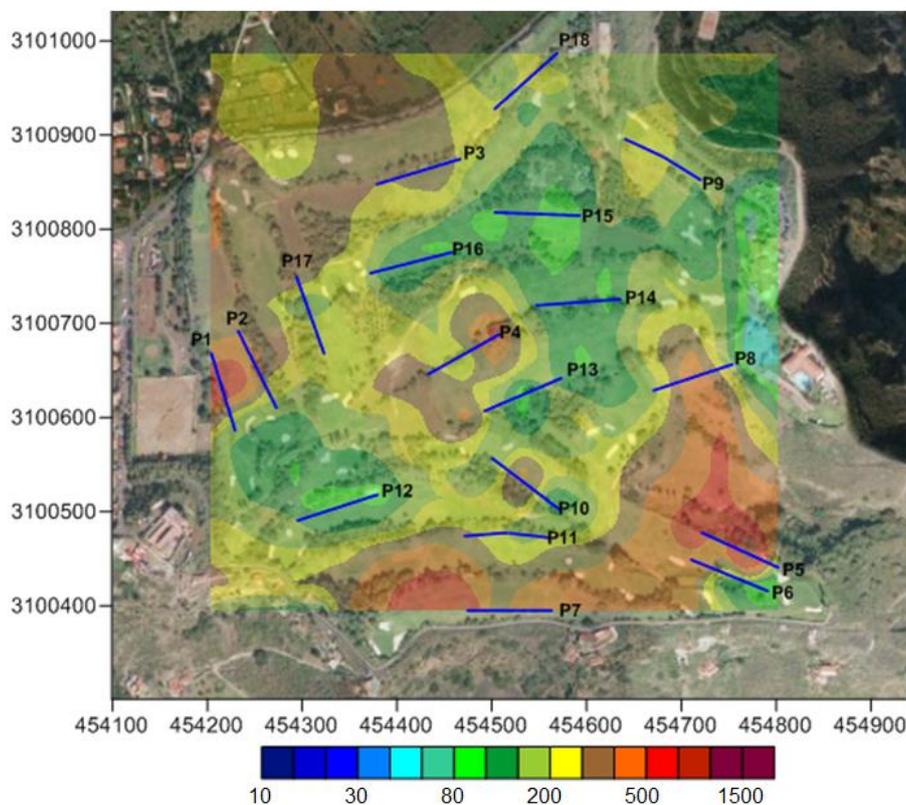


Figura 2. Distribución de los valores de resistividad eléctrica interpolada a partir de las medidas de los perfiles de tomografía eléctrica.

Para invertir los valores de resistividad aparente medidos y obtener la sección que se aproxime a la distribución de resistividades reales del subsuelo se utilizó el programa RES2DINV (Loke, 2004). En este método, el modelo de subsuelo se divide en celdas de dimensiones determinadas cuyos valores de resistividad eléctrica se modifican de forma iterativa hasta conseguir un ajuste aceptable entre los datos experimentales y la respuesta teórica del modelo, siguiendo un proceso de optimización no-lineal de ajustes por mínimos cuadrados (Loke y Barker, 1996).

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica saturada se ha medido a partir de muestras inalteradas de suelos y depósitos volcánicos tomadas con precaución directamente de los afloramientos seleccionados en cilindros estandarizados de 250cm^3 de volumen. Una vez en el laboratorio, los cilindros de suelo previamente preparados fueron humedecidos desde la parte inferior hasta alcanzar la saturación y posteriormente insertados en la cápsula de medida del equipo formado por un permeámetro UMS Ksat cuya metodología se basa en la inversión de la ley de Darcy.

Una característica del equipo es que permite determinar la conductividad hidráulica de dos formas distintas: a carga constante (constant head) y a carga variable (falling head) de acuerdo con las normas DIN ISO 19683-9 y DIN ISO 18130-1 respectivamente. Otra ventaja

de este sistema es que las medidas se obtienen de forma digital y totalmente automatizada mediante una conexión USB del equipo a un ordenador. Los resultados obtenidos se han procesado con el software de adquisición y análisis de datos KSAT VIEW1.0©, que permite visualizar los datos y calcular de forma inmediata la conductividad hidráulica saturada.

RESULTADOS OBTENIDOS

Tomografía eléctrica

Las secciones de tomografía eléctrica obtenidas muestran un elevado contraste de resistividad, con valores que oscilan entre menos de 30 ohm·m a más de 3000 ohm·m. Los resultados obtenidos después del proceso de inversión han permitido delimitar tres unidades bien definidas por sus valores de resistividad eléctrica. Una capa superficial de suelo que presenta unos niveles medios de resistividad, con mayor potencia en las áreas con suelo transportado, un segundo nivel de piroclastos porosos de alta resistividad eléctrica, que disminuye su grosor al aumentar la distancia al centro de emisión (Pico y Caldera de Bandama) y una capa profunda de baja resistividad eléctrica, atribuida a las brechas volcánicas del Grupo Roque Nublo.

Las variaciones de grosor y propiedades de estas tres electrofacies características pueden apreciarse claramente a partir de la comparación entre las secciones de los perfiles 1 y 3 (Figura3), adquiridas respectivamente al oeste y centro del campo en dirección a la caldera de Bandama (ver figura 2), donde el grosor de los piroclastos aumenta, así como la profundidad a que se sitúa la capa de brechas volcánicas Roque Nublo.

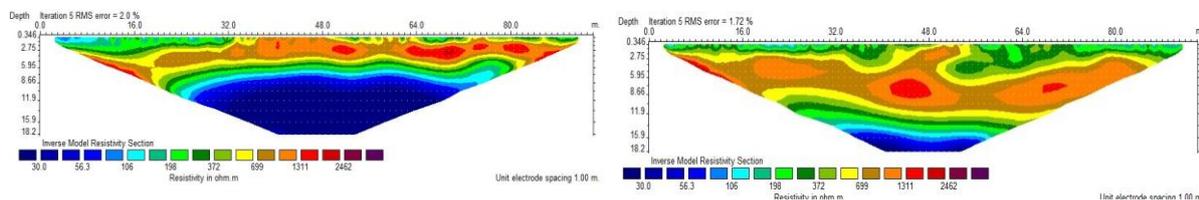


Figura 3. Secciones de resistividad eléctrica del perfil 1 (izquierda), donde el nivel de piroclastos es delgado y la profundidad del sustrato ignimbrítico de baja resistividad (> 30 ohm·m) aparece a unos 5 m de profundidad y del perfil 3 (derecha), donde se observa que la capa de piroclastos es bastante más gruesa y que la profundidad del sustrato ignimbrítico de baja resistividad se encuentra a más de 15 m de profundidad. La situación espacial de los perfiles se muestra en la Figura 2.

Con el conjunto de los más de 18000 valores de resistividad eléctrica obtenidos después del proceso de inversión (más de mil medidas en cada una de las 18 secciones de tomografía eléctrica) se ha elaborado un modelo 3D de distribución de resistividad eléctrica, del cual puede derivarse una primera interpretación cualitativa a cerca de las litologías predominantes en el subsuelo del campo de golf. La distribución de los valores de resistividad eléctrica sobreimpuesto a la situación de los perfiles de tomografía eléctrica (ver figura 2) permite apreciar una notable variabilidad de este parámetro.

Conductividad hidráulica

Las medidas de conductividad hidráulica han variado desde valores mínimos inferiores a 500 cm/día para los piroclastos de flujo muy compactos (surges) hasta valores máximos superiores al límite de medida del instrumento, que es de 20000 cm/día para los piroclastos de caída de grano grueso (de bombas a lapilli). Por otra parte, los valores de conductividad

hidráulica saturada medida por los dos métodos, carga constante y carga variable, han sido muy congruentes, aunque no iguales, como se muestra en la Figura 4.

En promedio, los valores obtenidos por el método de carga constante son entre un 8 y un 30% más elevados que por el método de carga variable. Según Klute y Dirksen (1986) el método de carga constante es más exacto en el rango de conductividad hidráulica entre 10^{-3} a 10^{-7} cm/s, mientras que el permeámetro de carga variable es mejor para suelos con conductividad hidráulica en el rango desde mayor de 1 cm/s a 10^{-5} cm/s. Como las muestras de la Caldera de Bandama abarcan ambos grupos, se ha considerado más representativo asignar a cada muestra la media aritmética del valor obtenido por cada uno de los métodos. Los valores de conductividad hidráulica saturada se han comparado con las medidas de resistividad eléctrica medidas en el propio campo de golf a partir de los perfiles de tomografía eléctrica, o bien mediante sondeos paramétricos utilizando un dispositivo Wenner ($a=20$ cm) sobre los mismos afloramientos.

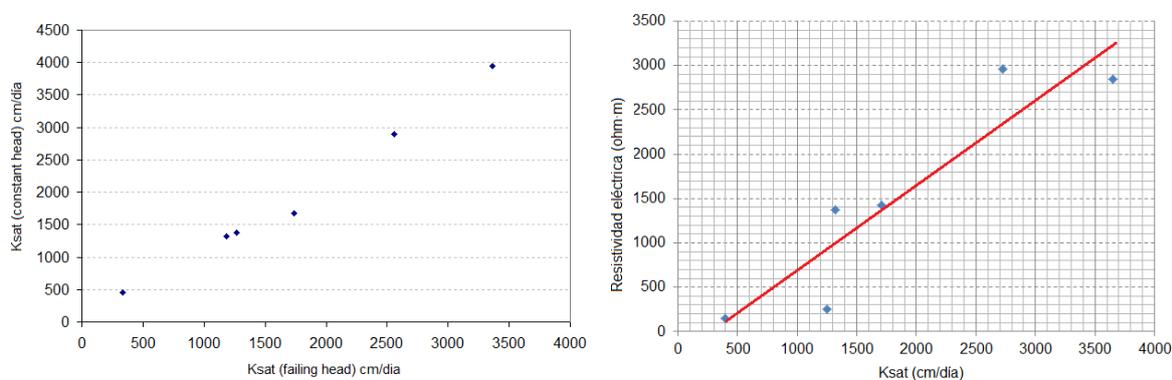


Figura 4. Relación entre las medidas de conductividad hidráulica a carga constante y carga variable (izquierda) y correlación entre los valores promedio de conductividad hidráulica saturada y resistividad eléctrica (derecha) de las muestras.

DISCUSIÓN

La contaminación de las aguas subterráneas por diferentes mecanismos, entre los que pueden incluirse el riego de campos de golf con agua regenerada, es uno de los principales obstáculos a los que se enfrentan la mayor parte de las administraciones de los estados miembros de la Unión Europea para lograr los objetivos de las directivas Marco del Agua (Voigt, et al., 2004). Para ello es necesario evaluar la vulnerabilidad a la contaminación y extremar las precauciones en las zonas vulnerables a partir de un mejor conocimiento de la infiltración y la migración de los contaminantes a través de la zona no saturada, que depende del grosor y características texturales de la zona vadosa.

La conductividad hidráulica de las formaciones volcánicas (piroclastos e ignimbritas) es un parámetro difícil de medir que presenta una amplia variabilidad, pero que puede estimarse de forma indirecta a partir de los valores de resistividad eléctrica. Sin embargo, esta correlación debe efectuarse a partir de ensayos locales y con reservas, ya que la resistividad eléctrica es también función del grado de saturación y de la conductividad eléctrica del agua del suelo. En los campos de golf, si las medidas de resistividad eléctrica se efectúan por la mañana después del riego, se puede considerar que el subsuelo tiene una humedad próxima a la capacidad de campo. En estas condiciones, los valores de resistividad eléctrica tienden asintóticamente al valor de saturación (Di Maio y Piegari, 2011), como puede verse en la Figura 5.

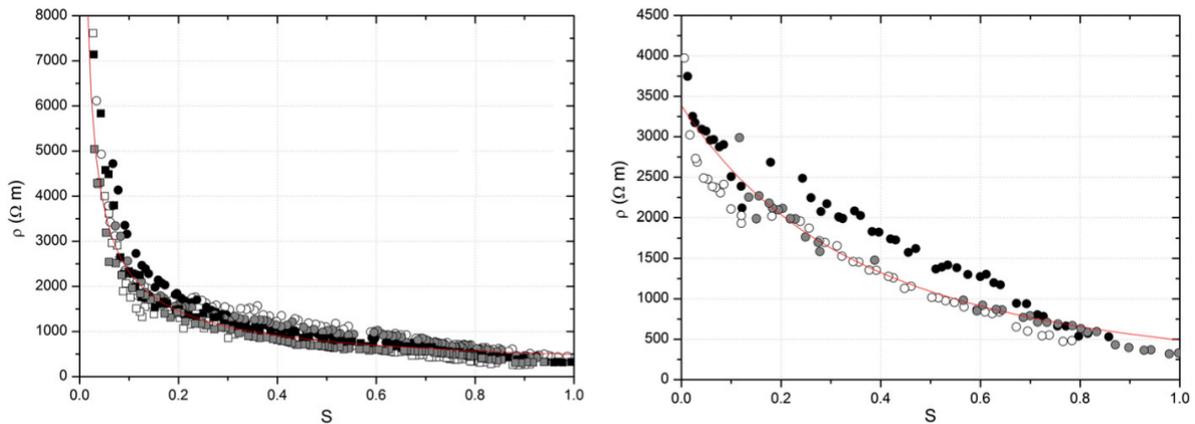


Figura 5. Correlación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación de distintos suelos volcánicos, desde piroclastos (izquierda) a ignimbritas (derecha), según Di Maio y Piegari (2011).

Una vez establecida la correspondiente correlación puede evaluarse la vulnerabilidad a la contaminación por el método AVI (Acuífer Vulnerability Index) desarrollado en Canadá por Van Stempvoort et al. (1992). Este método consiste en determinar la resistencia hidráulica o tiempo necesario para que los contaminantes crucen las distintas capas situadas entre la superficie del terreno y el acuífero. La resistencia hidráulica (c) se determina a partir de la suma de los cocientes entre el grosor (h) y la conductividad hidráulica vertical (k) de cada capa de la zona no saturada:

$$c = \sum_{i=1}^n \frac{h}{k}$$

dónde c indica el tiempo aproximado que necesita un flujo vertical por unidad de gradiente de carga para atravesar desde la superficie las diferentes capas de sedimentos situadas sobre el acuífero. Ambas variables, grosor (h) y conductividad hidráulica vertical (k) de cada capa de la zona no saturada pueden determinarse a partir de las secciones de tomografía de resistividad eléctrica. En el caso de la zona de estudio, los datos aportados en este trabajo, convenientemente cruzados con datos geológicos de la pared de la Caldera, permitirán su cálculo para ser incluidos en futuros modelos de transporte de contaminantes por la zona no saturada

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación muestran que la tomografía de resistividad eléctrica es una técnica muy útil para investigar de forma rápida y no destructiva la geometría y características litológicas del subsuelo para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas existentes bajo los campos de golf, incluso en medios geológicos complejos, como en el caso del campo de Golf de Bandama situado en el borde de la caldera volcánica del mismo nombre.

Los valores de resistividad eléctrica han permitido identificar cada una de las unidades litológicas que constituyen el subsuelo del campo de golf proporcionando un modelo general que concuerda con las observaciones edafológicas efectuadas a partir de catas y del conocimiento geológico de la estructura volcánica donde se asienta el campo. El modelo obtenido proporciona información detallada sobre la variabilidad lateral y vertical de cada una de las capas y a partir de una correlación empírica entre los valores de resistividad eléctrica y permeabilidad hidráulica permite delimitar las zonas preferentes de drenaje

subterráneo que pueden significar un mayor riesgo a la vulnerabilidad del acuífero subyacente.

El método AVI es un método cuantitativo que permite determinar la vulnerabilidad en términos del tiempo de tránsito del contaminante a través de la zona no saturada que puede estimarse con buena aproximación por métodos indirectos, a partir de la información proporcionada por la tomografía de resistividad eléctrica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado a través de los proyectos CGL2009-07025, CGL2009-12910 y C03-02SD2006-00044 del Programa CONSOLIDER. Los autores expresan también su gratitud al Club de Golf de Bandama, y en particular al “greenkeeper” del campo Pelayo Guerra por facilitarnos la toma de datos experimentales. Los autores agradecen la asistencia de Anetty Benavides, Tatiana Cruz, Pilar Hernández, Vanessa Mendoza y Gema Naranjo durante la campaña de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cabrera, M.C.; Palacios, M.P.; Estévez, E.; Cruz, T., Hernández-Moreno, J.M. y Fernández-Vera J.R. (2009) *La reutilización de aguas regeneradas para riego de un campo de golf: evolución geoquímica y probable afección a un acuífero volcánico (Islas Canarias)*. Boletín Geológico y Minero, 120(4): 543-552.
- Di Maio, R. y Piegari, E. (2011) *Water storage mapping of pyroclastic covers through electrical resistivity measurements*. Journal of Applied Geophysics, 75: 196–202.
- Estévez, E.; Cabrera, M.C.; Fernández, J.R.; Hernández-Moreno, J.M.; Mendoza-Grimón, V. y Palacios, M.P. (2010) *25 years using reclaimed water to irrigate a golf course in Gran Canaria*. Spanish Journal of Agricultural Research, 8(S2): 95-101.
- Estévez, E.; Cabrera, MC.; Molina-Díaz, A.; Robles-Molina, J. y Palacios-Díaz, MP. (2012) *Screening of emerging contaminants and priority substances (2008/105/EC) in reclaimed water for irrigation and groundwater in a volcanic aquifer (Gran Canaria, Canary Islands, Spain)*. Science of The Total Environment, 433: 538-546.
- Griffiths, D.H. y Barker, R.D. (1993) *Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology*. Journal of Applied Geophysics, 29: 211-226.
- Hansen, A. y Moreno, C. (2008) *El Gran Volcán. La Caldera y el Pico de Bandama*. Ediciones Consejería de Medio Ambiente y Aguas del Cabildo de Gran Canaria, Gran Canaria, 310 pp.
- Klute A. y Dirksen C. (1986) *Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods*. En: Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd ed. Klute A. Ed. Agron. Monogr. 9. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI. 687 pp.
- Loke, M.H. (2004) RES2DINV. *Rapid 2D Resistivity and IP inversion using the least squares method (version 3)*. User Manual. Geotomo Software. 133 pp.
- Loke M.H. y Barker R.D. (1996) *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method*. Geophysical Prospecting, 44: 131-152.
- Van Stempvoort D., Ewert L. y Wassenaar L. (1992) *Aquifer vulnerability index. A GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping*. Canadian Water Resources Journal, 18(1): 25-37.
- Voigt H.J., Heinkle T., Jahnke C. y Wolter R. (2004) *Characterization of groundwater vulnerability to fulfill requirements of the water framework directive of the European Union*. Geofísica Internacional, 43(4): 567-574.