

CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL PARQUE NACIONAL DE TIMANFAYA MEDIANTE TÉCNICAS Y MÉTODOS GEODÉSICOS Y GEOFÍSICOS

JOSÉ ARNOSO¹, FUENSANTA G. MONTESINOS², DAVID GÓMEZ-ORTIZ³, TOMÁS MARTÍN-CRESPO⁴, ISABEL BLANCO-MONTENEGRO⁵, ANDREY GORBATIKOV⁶, TERESA BENAVENT⁷, EMILIO VÉLEZ⁸, MERCEDES SOLLA⁹, MANUEL CALVO-RATHERT¹⁰, HENRIQUE LORENZO¹¹, UMBERTO RICCARDI¹²

RESUMEN

En el marco del proyecto 360/2011 se han identificado y caracterizado estructuras volcánicas sub-superficiales en el Parque Nacional de Timanfaya (Lanzarote), mediante técnicas de prospección. A escala regional, aplicando los métodos gravimétrico, magnético y de microsísmica de sondeo, se han calculado modelos de inversión que identifican estructuras profundas de la corteza terrestre. Su análisis refleja una compleja heterogeneidad estructural. En la zona del parque nacional hay estructuras comunes en las anomalías gravimétricas y magnéticas, que se relacionan con el sistema que generó la erupción volcánica de 1730 a 1736. Por primera vez se ha obtenido una dirección distinta a la de la fisura principal de dicha erupción, que se interpreta como una característica volcánica reciente, no representativa de la dirección preferente en que se emplazan los magmas en Lanzarote. A escala local, la aplicación de las técnicas de georradar, inducción electromagnética y gravimétrica, y la integración conjunta de los resultados, demuestran un gran potencial para caracterizar estructuras volcánicas singulares sin perturbar el medio ambiente. Se ha determinado con buena exactitud la geometría de estructuras no localizadas hasta la fecha en el parque, como túneles volcánicos y diques no visibles en superficie. El análisis de las deformaciones del terreno y desplazamiento GPS, asociados

¹ Instituto de Geociencias (CSIC, UCM). Facultad de Matemáticas. Plaza de Ciencias, 3. 28040 Madrid. tlf. +34 913944589. jose.arnoso@csic.es

² Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Matemáticas. Plaza de Ciencias, 3. 28040 Madrid. fuensanta_gonzalez@mat.ucm.es

³ ESCET. Universidad Rey Juan Carlos. Calle Tulipán, s/n. 28933 Móstoles, Madrid. david.gomez@urjc.es

⁴ ESCET. Universidad Rey Juan Carlos. Calle Tulipán, s/n. 28933 Móstoles, Madrid. tomas.martin@urjc.es

⁵ Universidad de Burgos. Escuela Politécnica Superior. Avda. de Cantabria s/n, 09006 Burgos. iblanco@ubu.es

⁶ Joint Institute of Physics of the Earth (RAS). Russia, Moscow, 123810, Bolshaya Gruzinskaya 10. avgor70@mail.ru

⁷ Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Matemáticas. Plaza de Ciencias, 3. 28040 Madrid. maite_benavent@mat.ucm.es

⁸ Instituto de Geociencias (CSIC, UCM). Facultad de Matemáticas. Plaza de Ciencias, 3. 28040 Madrid. emilio.velez@csic.es

⁹ Centro Universitario de la Defensa (CUD-ENM). Escuela Naval Militar. Plaza de España, s/n. 36920 Marín, Pontevedra. merchisolla@cud.uvigo.es

¹⁰ Universidad de Burgos. Escuela Politécnica Superior. Avda. de Cantabria s/n, 09006 Burgos. mcalvo@ubu.es

¹¹ Universidad de Vigo. EUIT Forestal. Campus A Xunqueira s/n. 36005 Pontevedra. hlorenzo@uvigo.es

¹² University Federico II of Naples. Dpt. of Earth, Environmental and Resources. Corso Umberto I, 40. 80138 Napoli (Italia). umbricca@unina.it

a variaciones anómalas en la temperatura en una zona de sondeos geotérmicos del parque, ha permitido verificar el modelo de transmisión y propagación del calor residual remanente de la erupción de 1730-1736. Además, se ha estudiado mediante georradar la fuente de calor localizada en el Islote de Hilario, estableciendo la profundidad y geometría por primera vez mediante el análisis de la respuesta a las ondas electromagnéticas. Por último, todos los resultados de investigación están incluidos en una base de datos georreferenciada con la finalidad de integrarlos en el sistema de información geográfica del Parque Nacional de Timanfaya.

Palabras clave: Caracterización estructural; Técnicas geofísicas; Técnicas geodésicas; Problema inverso; Deformaciones del terreno; Timanfaya; Parques Nacionales.

STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF THE NATIONAL PARK OF TIMANFAYA THROUGH COMBINED USE OF GEODETIC AND GEOPHYSICAL TECHNIQUES AND METHODS

ABSTRACT

Project 360/2011 allowed us to use several exploration techniques for the identification and characterization of subsurface volcanic structures in the National Park of Timanfaya (Lanzarote, Canary Islands). We have characterized the Earth's crustal structure to a regional scale and at different depths through application of prospecting techniques based on the gravimetric, magnetic and microseismic sounding methods and calculating their respective inversion models. A heterogeneous crust can be inferred from the analysis of those models. Common structures to the gravimetric and magnetic anomalies were found at the National Park's area, all were related to the system that generated the volcanic eruption from 1730 to 1736. A different direction from the main eruptive fissure was obtained for the first time, being interpreted as a recent volcanic feature that is not representative of the preferred direction in which magmas are located in Lanzarote Island. To a local extent, applying of ground penetrating radar, gravimetric and electromagnetic induction techniques they show a great capability for characterizing unique volcanic structures, without damaging or disturbing the natural environment. Thus, volcanic tunnels and basaltic dykes, which are not visible on the surface, have been accurately located and determined their respective geometry. The analysis of ground deformation and GPS displacements associated to temperature variations around the geothermal wells at Camelleros area allow verifying of the heat transmission model and the circulation of the residual heat flow, still remaining from the 1730 to 1736 eruption. Additionally, and for the first time, the analysis of the response to electromagnetic waves of the heat source has established its depth and geometry in the Islote de Hilario. Finally, results are included in a geo-reference database to be integrated into the geographic information system of the National Park of Timanfaya.

Keywords: Structural characterization; Geophysical techniques; Geodetic techniques; Inverse problem; Ground deformation; Timanfaya; National Park.

INTRODUCCIÓN

El Parque Nacional de Timanfaya, con una extensión de 51,07 km², se encuentra al suroeste de Lanzarote, una isla volcánica oceánica al Este del Archipiélago Canario. Este parque, localizado entre los municipios de Yaiza y Tinajo, surge de las erupciones volcánicas transcurridas entre los años 1730 a 1736 y la que tuvo lugar en 1824. La primera de ellas fue la mayor erupción histórica en Canarias, cubrió un área de unos 200 km² y expulsó unos 3 km³ de lavas, originando numerosos conos volcánicos, hornitos, enormes coladas, tubos volcánicos, cavidades y otras estructuras subterráneas (CARRACEDO *et al.*, 1990; 1992; ARAÑA & ORTIZ, 1984).

Una gran fisura de 14,5 km de longitud alinea diversos conjuntos eruptivos en la dirección 70°E, paralela a la fisura eruptiva de 1824, siendo coincidentes con la mayoría de directrices tectono-volcánicas, de rumbos NE-SW, WSW-ENE, NW-SE y N-S, que se manifiestan como orientaciones preferentes en los distintos episodios eruptivos y en el sistema de fracturas corticales de Canarias (ARAÑA *et al.*, 1984; CARMONA *et al.*, 2009). El Parque Nacional de Timanfaya conforma, por tanto, un entorno ideal para estudiar fenómenos volcánicos y procesos eruptivos asociados.

En este trabajo presentamos algunos de los resultados más relevantes del proyecto de investigación, articulados en dos ejes principales. En el primero, se estudian estructuras volcánicas subsuperficiales, utilizando técnicas y métodos geodésicos y geofísicos de prospección (gravimetría, microsísmica de sondeo, geomagnetismo, georradar e inducción electromagnética). Los depósitos volcánicos y sus estructuras relacionadas se caracterizan por una gran variabilidad en su geometría y propiedades físicas, y suelen aparecer como unidades discontinuas con relaciones estratigráficas complejas. Por ello, su estudio se ha llevado a cabo utilizando dichas técnicas, conjugando buena resolución horizon-

tal y vertical. Su combinación ha contribuido a reducir tanto las limitaciones inherentes al uso de una única metodología, como la incertidumbre inherente a la inversión e interpretación de los modelos obtenidos.

En un segundo eje, se relacionan variaciones temporales de temperatura con medidas de deformación del suelo en zonas de anomalías térmicas remanentes de las últimas erupciones. Estas anomalías, asociadas a una red de fracturación, pueden alcanzar temperaturas de 600°C a profundidades de 12 m (ARAÑA *et al.* 1973; ARAÑA *et al.*, 1984; DÍEZ-GIL *et al.*, 1987). Se establecieron tres líneas específicas consistentes en investigar su relación con posibles procesos sismo-volcánicos, la evolución temporal de las anomalías térmicas y la existencia de posibles subsidencias del terreno. Este estudio tiene como base experimental el Laboratorio de Camelleros, situado en el Parque Nacional de Timanfaya, que pertenece al Laboratorio de Geodinámica de Lanzarote (IGEO-CSIC). En este laboratorio se realizan estudios de deformación y variaciones de gravedad desde hace más de 20 años, y dispone de registros de larga duración de parámetros atmosféricos y medidas de temperatura en sondeos localizados donde se manifiestan las anomalías térmicas (VIEIRA & VÉLEZ 2006; ARNOSO *et al.*, 2012).

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología aplicada en el proyecto se fundamenta en diversas técnicas geodésicas y geofísicas de prospección, junto con un estudio de deformaciones del terreno, cuyas características se describen a continuación.

Gravimetría

La gravimetría consigue modelar estructuras subsuperficiales de la corteza terrestre que ge-

neran las denominadas anomalías gravimétricas, mediante observaciones realizadas en la superficie de la Tierra. Estas estructuras, modelizadas mediante un proceso de inversión gravimétrica, se caracterizan por su contraste de densidad con respecto al entorno, identificando zonas de heterogeneidades relevantes en áreas volcánicas. En este caso, se ha seguido un proceso de inversión mediante algoritmo genético (MONTESINOS et al., 2005), con una malla 3D de 15800 prismas que se extiende desde la superficie hasta 3 km de profundidad. La distribución de contrastes de densidad obtenida identifica la localización y geometría de las fuentes del campo de anomalías gravimétricas.

El procedimiento de observación consiste en establecer una red homogénea de puntos-estación, sobre el terreno, donde se efectúan medi-

das con un gravímetro relativo, complementadas con parámetros meteorológicos y posicionamiento GPS. En este proyecto se ha empleado un gravímetro Scintrex CG5, en itinerarios cerrados, con 30 minutos de observación y repitiendo estacionamiento. En total se han llevado a cabo tres campañas gravimétricas, con 199 estaciones medidas. En algunos casos fue necesario realizar rutas de observación a pie (una atraviesa el Parque Nacional, desde el Islote de Hilario hasta la costa, y otra recorre su línea de costa) y también se seleccionaron perfiles específicos atravesando tubos volcánicos localizados con georradar. Con todas estas observaciones, más las disponibles anteriormente por el grupo investigador, se ha obtenido un mapa de anomalías gravimétricas Bouguer inédito para el Parque Nacional de Timanfaya, cubriendo zonas no observadas hasta la fecha (Figura 1).

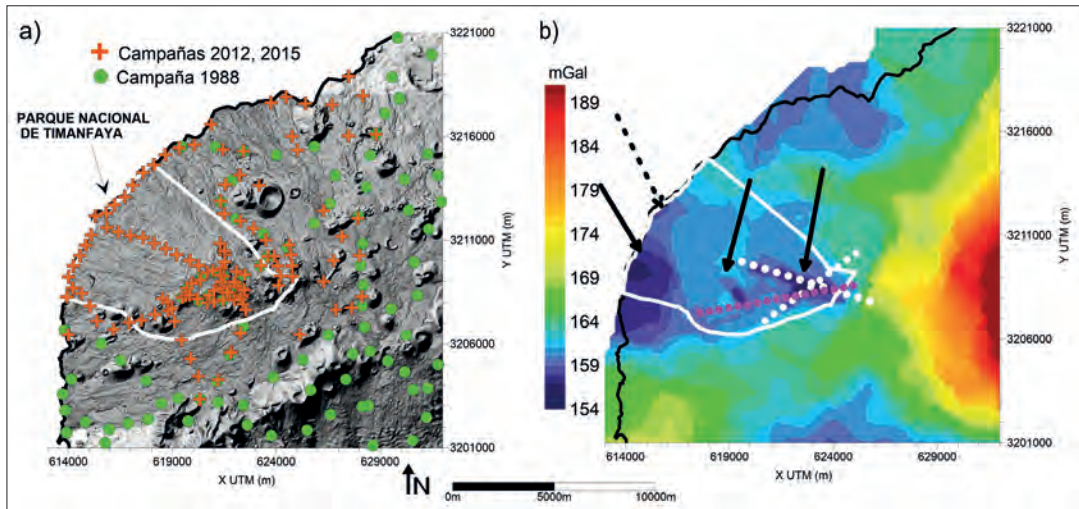


Fig. 1.

El ajuste de observaciones se realiza mediante el método de mínimos cuadrados, que permite calcular valores de gravedad con un error medio cuadrático individual de ~ 0.015 mGal ($1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$). Tras aplicar correcciones instrumentales y por efectos externos en las observaciones, se obtiene el mapa de anoma-

lías gravimétricas Bouguer (Figura 1). Éste se calcula reduciendo la gravedad observada por la gravedad teórica, por la altitud de la estación (corrección aire libre) y por la corrección de lámina Bouguer y topográfica (TORGE, 1989). El mapa obtenido muestra el efecto gravimétrico de los cuerpos subsuperficiales con contraste

de densidad respecto al entorno en el que se ubican, generando así la anomalía gravimétrica observada.

Las anomalías gravimétricas calculadas se analizan con técnicas de filtrado y gradientes, lo que proporciona información cualitativa sobre las fuentes corticales que las producen, como alineamientos de estructuras, fallas, cámaras magmáticas, tendencias estructurales regionales, etc. Para conseguir información completa de las estructuras subsuperficiales, se ha aplicado posteriormente un procedimiento de inversión gravimétrica, basado en un algoritmo genético, con modelización tridimensional de las fuentes del campo observado (MONTESINOS *et al.*, 2005, 2006).

En el caso particular de estudio de tubos volcánicos, la información de los perfiles gravimétricos observados se ha complementado con la obtenida mediante las técnicas de georradar e inducción electromagnética. La identificación de las estructuras mediante ambas técnicas se ha utilizado como modelo inicial en el programa Oasis Montaj (GEOSOFT INC., 2009) de modelización gravimétrica directa. Así, se consigue una representación de posibles tubos volcánicos y otras estructuras más precisa, justificada, además, por tres tipos de datos diferentes.

Microsísmica de Sondeo (MSM)

Los microsismos son pequeños temblores de la superficie terrestre causados por diversos fenómenos naturales (procesos atmosféricos, oceánicos, desplazamientos de la corteza terrestre, etc.) y representan un ruido sísmico con información sobre su propio origen y la estructura del interior de la Tierra a través de la cual se propagan. Los principales microsismos se manifiestan con baja frecuencia, con períodos entre 1 y 20 s. La microsísmica de sondeo es

un método pasivo de prospección basado en las perturbaciones medidas en el espectro de baja frecuencia que generan, en su entorno, las heterogeneidades de la corteza terrestre (GORBATIKOV & STEPANOVA, 2008). El MSM establece la distorsión del campo de amplitudes originado por la interacción de velocidades de las heterogeneidades subsuperficiales. La distribución de estas distorsiones en la superficie terrestre permite determinar la forma y profundidad de dichas heterogeneidades, que si corresponden a altas velocidades, las amplitudes espectrales de frecuencias definidas decrecen, mientras que si corresponden a bajas velocidades, las amplitudes se incrementan (GORBATIKOV & TSUKANOV, 2011).

La observación en campo consiste en registrar el espectro de potencia de la señal microsísmica durante 2-3 horas, en cada punto a lo largo de un perfil definido previamente (o una malla regular). Los sensores sísmicos empleados son de tipo banda ancha, modelo Guralp CMG-6T. Durante el proyecto se han realizado diversos perfiles (campañas en el 2012 y 2014), en 44 puntos diferentes. En cada punto se realiza un análisis espectral de las componentes del campo de microsísmica, muestreando la señal a 100 Hz en una banda entre 0.03 y 15 Hz. El algoritmo de análisis necesita referir cada medida a una estación base para eliminar la no estacionalidad de la señal microsísmica, empleándose la estación sísmica de banda ancha del IGN (<http://www.ign.es>) en Lanzarote. Inicialmente, se ha realizado una modelización directa con la que se determina una solución a priori del campo de amplitudes cercano a las heterogeneidades estructurales corticales en la zona, que interaccionan con las ondas sísmicas. Posteriormente, en un proceso de inversión sísmica, se obtienen los modelos estructurales para cada uno de los perfiles de medida (GORBATIKOV & TSUKANOV, 2011; GORBATIKOV *et al.*, 2013; STEPANOVA *et al.*, 2014).

Geomagnetismo

Los contrastes de magnetización entre los distintos cuerpos geológicos son fuente de anomalías magnéticas medibles en la superficie terrestre mediante magnetómetros. En áreas volcánicas, la concentración de minerales magnéticos en las rocas es elevada, provocando que las anomalías magnéticas sean intensas y fácilmente detectables. A través de su estudio es posible identificar la presencia de elementos no evidentes en la superficie, como intrusiones, sistemas de diques, alineaciones estructurales, etc. El campo magnético terrestre registrado en un punto sobre la superficie terrestre se compone de varios factores: un campo interno aproximadamente dipolar originado en el núcleo externo de la Tierra, un campo cortical debido a la presencia de minerales magnéticos en los primeros kilómetros de la corteza y un campo externo originado en la ionosfera y la magnetosfera debido a la actividad solar. El estudio de las anomalías magnéticas se centra en la segunda de estas contribuciones y requiere la medida del campo magnético total, del cual se hace necesario sustraer el campo nuclear y el de origen externo.

Los datos magnéticos utilizados en el proyecto son de dos tipos. Por un lado, se realizaron varios perfiles terrestres en el interior del Parque Nacional de Timanfaya, coincidentes con los de georradar y gravimetría. Se utilizó un magnetómetro de efecto Overhauser de GEM Systems, GSM-19, cedido por el IGME (oficina de Canarias) y, para el control de las variaciones de campo externo, un magnetómetro de protones en registro continuo, Geometrics G856, cedido por Vicente Soler (IPNA, CSIC). Estos datos terrestres se procesaron mediante el software Oasis Montaj (GEOSOFT INC., 2009) y la eliminación del campo principal se ha realizado utilizando el IGRF (International Geomagnetic Reference Field, 11th generation) (Figura 2).

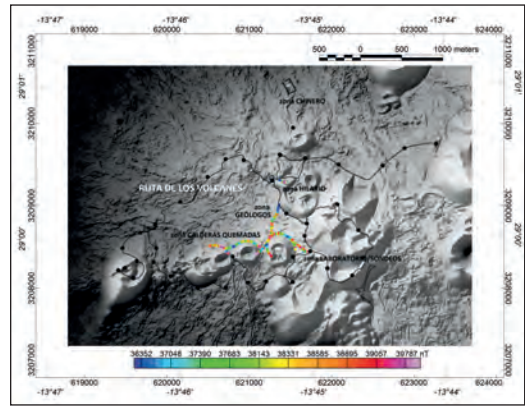


Fig. 2.

Por otro lado, se han utilizado los datos del vuelo aeromagnético de Canarias obtenido por el Instituto Geográfico (SOCÍAS & MÉZCUA, 1996) en 1993. En particular, el mapa de anomalías global a 3200 m sobre el nivel del mar y el original a la que fue sobrevolada la isla, 500 m. Este último, por su mayor proximidad a la superficie, contiene información más detallada sobre las estructuras corticales de la isla. Su análisis espectral y filtrado dio paso a una malla de datos de buena calidad para su posterior análisis y modelización. Con ello, el mapa de anomalías contiene longitudes de onda a partir de 7 km, y las estructuras detectables han de tener dimensiones mínimas de varios kilómetros. Se aplicó, además, la transformación conocida como reducción al polo, que elimina el carácter dipolar de las anomalías magnéticas y las centra sobre las fuentes. Posteriormente, se realizó un estudio de gradientes para estudiar los principales contactos magnéticos y correlacionarlos con los resultados de microsísmica y gravimetría (ver Figura 6).

Georradar (GPR)

El georradar o *ground-penetrating radar* (GPR) está orientado al estudio del subsuelo superficial. Se fundamenta en la capacidad de las on-

das de radar de baja frecuencia (10 MHz-2,5 GHz) para propagarse a través de medios poco conductivos (e.g. DAVIS & ANNAN, 1989; REYNOLDS, 1997; NEAL, 2004). El método observacional emplea una antena emisora para dirigir pulsos electromagnéticos de 1-20 ns de duración hacia el interior del terreno. El frente de ondas se refleja parcialmente al encontrar una discontinuidad o cambio de material en el subsuelo, pudiendo ser detectado en superficie mediante una antena receptora. Al desplazar el sistema sobre la superficie terrestre se registran las reflexiones detectadas en el subsuelo, obteniéndose los denominados «radargramas». Se utilizan antenas intercambiables seleccionadas en función de la profundidad y resolución en la prospección. Para altas penetraciones (10-30 m) se utilizan antenas de 50-200 MHz, y para estudios a 3-5 m del subsuelo se emplean de 400-600 MHz. En estudios de alta resolución se usan antenas de mayor frecuencia (800 MHz-1,5 GHz) que difícilmente penetran más allá de 1 m, pero permiten localizar elementos centimétricos. Hay muchos factores que limitan el desempeño del georradar como, por ejemplo, la atenuación de los impulsos emitidos, ruidos externos e instrumentales, etc. Por esto, antes de interpretar los datos de georradar, es necesario establecer un proceso de filtrado para mejorar la imagen, aumentar la resolución y la relación señal-ruido.

Inducción Electromagnética (EMI)

Esta metodología se basa en la medida de la resistividad aparente bajo la superficie terrestre. En este estudio se ha empleado un equipo Geonics EM34-3, con una bobina emisora y otra receptora, situadas a espaciamiento fijo (10, 20 y 40 m) para obtener información sobre la distribución de la resistividad a distintas profundidades. Se prospecta a mayor profundidad cuanto mayor sea la separación entre bobinas. Las dos bobinas se sitúan verticalmente sobre el suelo y

alineadas (dipolo horizontal, DH), o se disponen alineadas pero horizontales sobre el suelo (dipolo vertical, DV) (MCNEILL, 1980). Combinando las dos configuraciones en un mismo perfil, se obtiene un rango de medidas de resistividad entre 7.5 y 60 m como máxima profundidad. Las bobinas se desplazan sobre cada perfil, con un intervalo de medidas adecuado a la resolución deseada. Para detectar cavidades y estructuras de pequeño tamaño, el espaciado se estableció en 1 m, correspondiendo las medidas obtenidas a la resistividad aparente de los materiales infrayacentes. Para obtener un modelo de resistividades reales para cada perfil, es necesario un proceso de inversión realizado con el software EMIDFM (EMIDFM, 2000) que, mediante un proceso iterativo, proporciona un modelo 2D con emc mínimo y distribución realista de materiales con resistividades reales (FARQUHARSON *et al.*, 2003).

Estudio de deformaciones del terreno en zonas de anomalías térmicas

Las observaciones de deformación del terreno dentro del Parque Nacional de Timanfaya se han realizado utilizando la instrumentación instalada y mantenida por el equipo investigador en el Laboratorio de Camelleros (ver localización Figura 2). El laboratorio cuenta con más de 20 instrumentos: inclinómetros, extensómetros, gravímetro y sondas para gases y parámetros meteorológicos. Además, a unos 100 m en un área donde hace años se realizaron sondeos para el estudio del aprovechamiento energético de las anomalías térmicas presentes (DÍEZ-GIL, 1990), están instalados termómetros a diferentes profundidades para medir variaciones de temperatura. Durante el proyecto, la instrumentación del laboratorio se ha reforzado con una estación GNSS permanente (CAME), que aportará información sobre desplazamientos del terreno en caso de que la zona de sondeos geotérmicos esté inmersa en un proceso de

subsistencia, consecuencia del enfriamiento de la cámara magmática residual (GONZÁLEZ & FERNÁNDEZ, 2011).

El registro de los extensómetros e inclinómetros está afectado principalmente por variaciones en la temperatura ambiente, además de efectos atmosféricos y oceánicos. Para modelar y eliminar este efecto en la señal observada se aplica un modelo de regresión, de la forma: $S(t) = E(t) + P(t)$, $t = t_1, \dots, t_n$. La señal $S(t)$ tiene una componente de deformación inducida por la temperatura $E(t)$, que se expresa en función de un coeficiente de regresión, R , y un desfase temporal, Δt , siendo: $E(t) = R(T(t - \Delta t) - T_m)$. El polinomio $P(t)$ modela otros efectos geofísicos e instrumentales. La solución se calcula aplicando el método de mínimos cuadrados, considerando que el sistema no es linealmente dependiente de las incógnitas. Así, variando Δt y el grado del polinomio $P(t)$, se busca el mejor ajuste utilizando criterios de máxima verosimilitud (VENEDIKOV et al., 2006; ARNOSO et al., 2012). El modelo obtenido, en caso de deformación o inclinación, puede reflejar alteraciones que provoca la fuente térmica en superficie y, en consecuencia, verificar variaciones en el equilibrio geotérmico de esa zona del Parque Nacional de Timanfaya.

Otra técnica geodésica empleada para el estudio de deformaciones es mediante GPS. Este grupo dispone de dos estaciones de observación permanente en Lanzarote: La mencionada anteriormente, CAME, instalada en Mayo de 2014; y la estación, LACV, en Jameos del Agua, en el extremo norte de la isla, que cuenta con más de 10 años de registro continuo. Para este estudio, se suman las estaciones YAIZ, TIAS, HRIA y OLIV de la red GRAFCAN (<http://www.grafcan.es/>).

El procesado GPS se ha realizado utilizando datos adquiridos cada 30 segundos sometidos a control de calidad con el software TEQC

(<http://facility.unavco.org/software/teqc/teqc.html>). A continuación, se ha utilizado el software GAMIT/GLOBK v10.5 (HERRING et al., 2009; KING & BOCK, 1998) en dos etapas. La primera consiste en determinar la posición de las estaciones de la red libres de un marco de referencia, utilizando las medidas de tiempo y desfase de las ondas L1 y L2 y considerando parámetros de rotación de la Tierra, orbitales, de los relojes de los satélites y modelos de calibración absoluta del centro de fases de las antenas (REBISCHUNG et al., 2012). También se eliminan fuentes de error como el retardo troposférico (modelo GPT2; LAGLER et al., 2013), la marea terrestre y la carga oceánica. Las posiciones relativas diarias se calculan con un ajuste mínimos cuadrados que garantiza la convergencia de las soluciones. En la segunda etapa, se obtienen las soluciones finales diarias estabilizadas en el marco de referencia ITRF2008, utilizando 8 estaciones externas de las redes internacionales IGS y EUREF: 2 en Canarias (LPAL, MASI), 1 en Madeira (FUNC), 3 en la península Ibérica (PDEL, SFER, YEBE) y 2 en África (RABT, DAQR). Finalmente, estudiando la calidad y repetibilidad de las soluciones, se obtienen estimaciones promedio de coordenadas y velocidades de las estaciones.

Para reforzar esta investigación, en Octubre de 2014 y en colaboración con el Instituto Geográfico Nacional (IGN) se han realizado por primera vez medidas de gravedad absoluta en el Parque Nacional de Timanfaya. Una en el Laboratorio de Camelleros y otra en el centro de visitantes de Mancha Blanca. Los valores obtenidos, respectivamente $979326326.4 \pm 7.7 \mu\text{Gal}$ y $979355798.7 \pm 2.1 \mu\text{Gal}$, son de gran importancia para verificar si a lo largo del tiempo sufren alteraciones originadas por deformaciones del terreno, o por variaciones de densidad (cambio de masas en el subsuelo) en la zona de estudio, al ser ésta un área de volcanismo activo. Además, tomando como referencia estos valores, se ha obtenido una

distribución de estaciones gravimétricas con valores de gravedad absolutos que cubre to-

das las zonas accesibles del parque nacional (Figura 1).

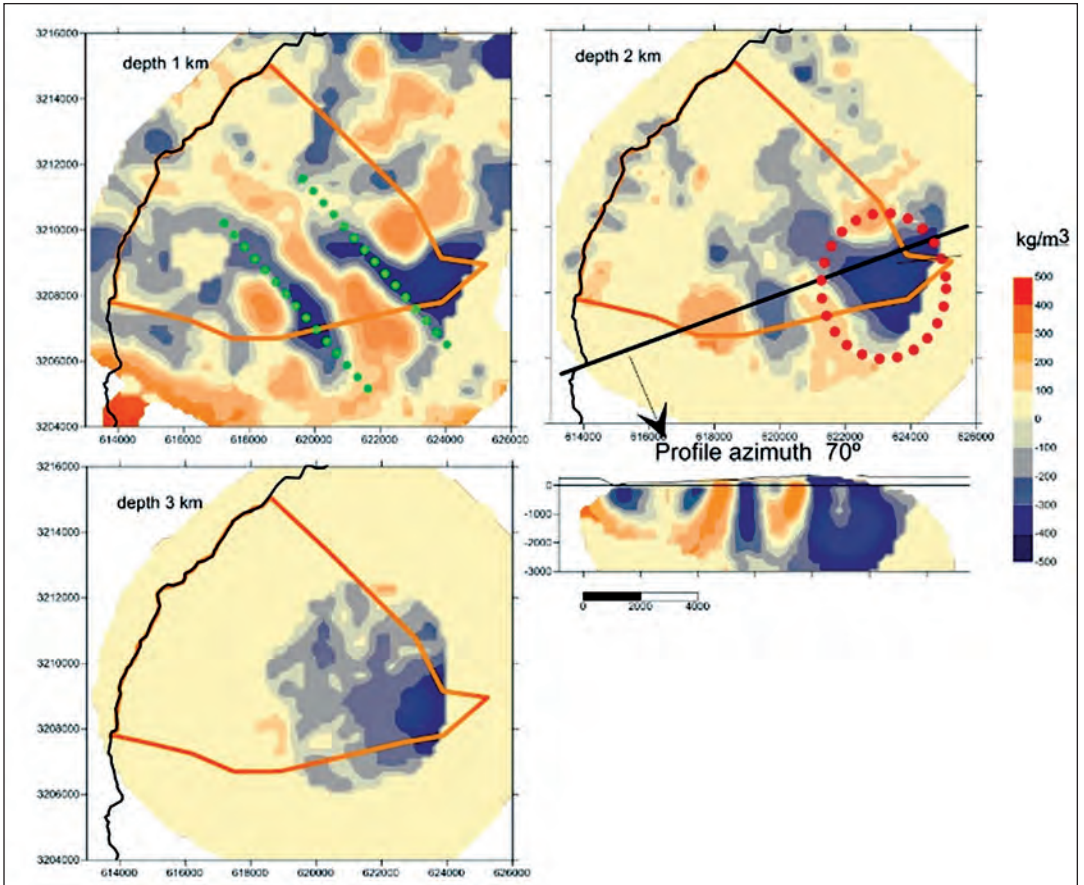


Fig. 3.

RESULTADOS

Resultados de Gravimetría

Modelización 3D de estructuras subsuperficiales

En el modelo gravimétrico obtenido, se identifican claramente diversos cuerpos de baja densidad: dos cuerpos lineales que aparecen desde las secciones más superficiales (1 km) (línea verde en la figura 3) y otro cuerpo más grande que continúa hasta secciones más profundas (línea roja en la figura 3).

Modelización de tubos volcánicos

En el estudio de tubos volcánicos mediante gravimetría, se muestra aquí el resultado correspondiente al perfil de la Senda de los Geólogos, con 42 estaciones equiespaciadas 1 m. Se ha realizado una modelización directa de la geometría y localización de secciones de tubos volcánicos, utilizando información previa proporcionada por las técnicas GPR y EMI. La combinación de estas tres técnicas prospectivas ha podido detectar varios tubos principales, dos de ellos aflorando en superficie (figura 4).

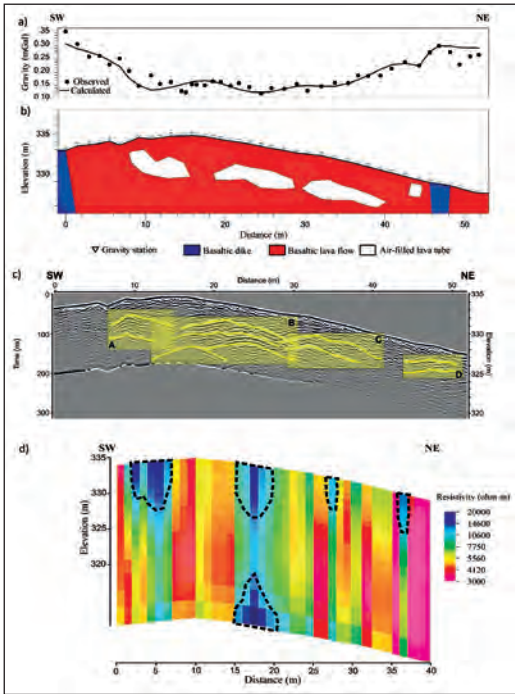


Fig. 4.

Resultados de Microsismica de Sondeo

Se ha establecido un modelo estructural de velocidades bastante completo y con una considerable resolución en profundidad. Los perfiles de medida se diseñaron atravesando diversas estructuras volcánicas, y haciendo contraste con estructuras corticales profundas. En este caso, el resultado obtenido (figura 5) se ha comparado con los modelos gravimétrico y geomagnético, considerando las limitaciones en profundidad de cada técnica prospectiva. Las zonas del modelo de baja velocidad (zona roja en la figura 5) son normalmente acordes con materiales blandos y/o rocas más fracturadas, mientras que las velocidades sísmicas más altas (zona azul en figura 5), corresponden a rocas más duras y a estructuras más consolidadas. Llama la atención la importante discontinuidad estructural claramente visible en el límite sur del Parque

Nacional de Timanfaya (línea blanca a trazos en la figura 6).

Resultados de Geomagnetismo

Los resultados de geomagnetismo para algunos perfiles observados en el Parque Nacional de Timanfaya no son de gran relevancia, ya que las anomalías magnéticas no parecen correlacionarse con las anomalías gravimétricas y de GRP, ni parecen mostrar la existencia de tubos de lava. Sin embargo, en los del Islote del Hilario y sondeos geotérmicos de Camelleros (Figura 2), sí se observa correlación entre las anomalías térmicas y el campo magnético observado, alcanzando mínimos relativos, aunque era esperable ya que las altas temperaturas disminuyen las propiedades magnéticas de las rocas.

Vuelo aeromagnético

En este caso, los resultados tras el análisis de los datos del vuelo a alta cota reflejan la presencia de una anomalía dipolar intensa relacionada con un gran cuerpo intrusivo (BLANCO-MONTENEGRO *et al.*, 2005), que tiene su equivalente en el mapa de anomalías de Bouguer de Lanzarote (CAMACHO *et al.*, 2001). El mapa aeromagnético a cota 500 m reducido al polo muestra la presencia de una anomalía positiva de geometría lineal en la zona de Timanfaya, probablemente relacionada con el sistema de alimentación magmática. Por otro lado, a través del estudio de gradientes del mapa de anomalías, se han localizado de forma aproximada los principales contactos magnéticos, que pueden interpretarse como los límites de las principales estructuras magnetizadas. Es importante destacar que la discontinuidad estructural identificada en el perfil de microsismica al sur de Timanfaya (Figura 5), podría estar relacionada con el contraste de magnetización en profundidad indicado en la Figura 6.

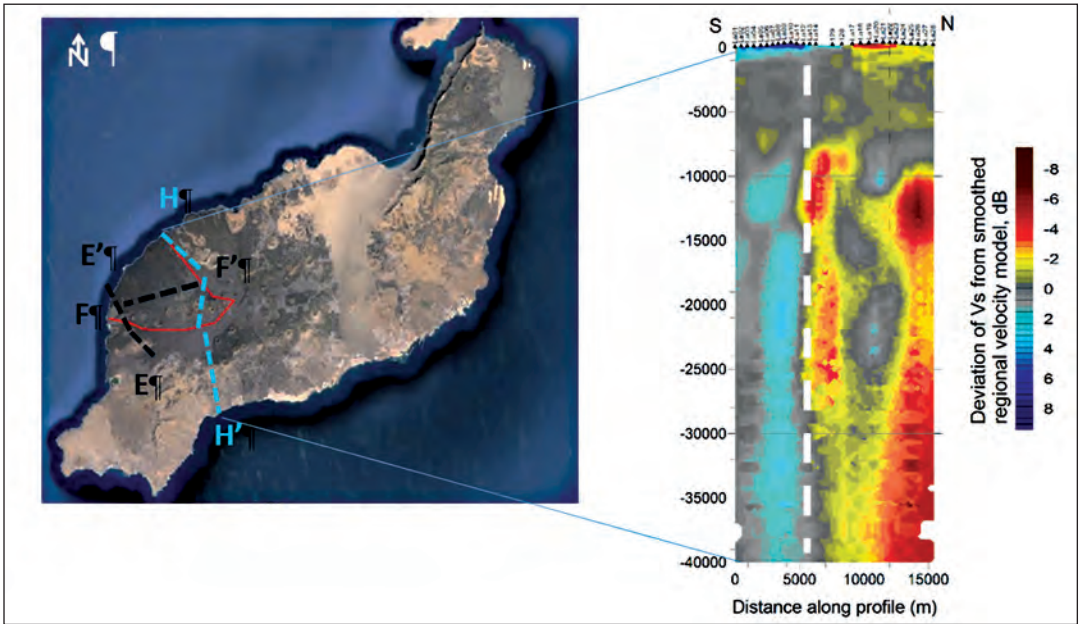


Fig. 5.

Resultados de GPR

En el estudio georradar se ha empleado un equipo RAMAC-GPR Malá Geoscience, con antenas de 100 Mhz y 200 Mhz. En total, se realizaron 24

perfiles en diferentes zonas del parque y, dependiendo del caso de estudio, las antenas seleccionadas y la adquisición de datos presentaron diferentes características y configuraciones (ver Tabla I).

Tabla I. Configuración del sistema GPR para los distintos estudios de aplicación llevados a cabo en el Parque Nacional del Timanfaya

	CONFIGURACIÓN DE ESTUDIOS		
	1	2	3
Frecuencia	100 MHz	200 MHz	200 MHz
Distancia entre trazas	50 cm	20 cm	—
Ventana de tiempos	460 ns	230 ns	230 ns
Separación entre dipolos	100 cm	60 cm	+20 cm
Método	CO	CO	CMP
Aplicación	Localización de tubos volcánicos	Detección de anomalías térmicas	Estudio de velocidades y caracterización de materiales

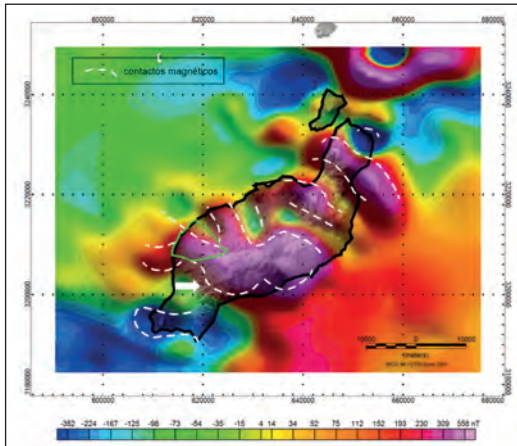


Fig. 6.

Perfiles sobre coladas de lava para localización de tubos volcánicos

Utilizando como referencia un tubo volcánico visible en la Senda de los Geólogos, se estudió la respuesta del tubo a la señal del georradar (Figura 7). Con las reflexiones obtenidas se ha determinado la posición del techo y base del tubo principal, así como de otros tubos más pequeños adyacentes no visibles en superficie, asociados a coladas en otras zonas del parque, como por ejemplo en las coladas del volcán del Chinero (Figura7).

Perfiles realizados sobre cenizas volcánicas en áreas de anomalías térmicas

En el Islote de Hilario (Figura 2) se ha realizado un estudio con varios perfiles georradar, ya que es una de las zonas del parque donde se localizan anomalías térmicas (ARAÑA et al., 1973). Los resultados muestran una mayor intensidad de las reflexiones de las ondas electromagnéticas, en buena correspondencia con las zonas de gradiente térmico más elevado. De esta forma, el GPR permite obtener una imagen en profundidad de dichas zonas, localizando la fuente tér-

mica y la geometría de su extensión superficial. Además, realizando observaciones periódicas en el mismo perfil se puede verificar su variación temporal (ver Figura 8), y estudiar posibles variaciones estacionales en el sistema hidrotermal.

Resultados de EMI

Se seleccionaron cuatro zonas con varias finalidades: estimación del espesor de materiales piroclásticos (2 perfiles), detección y caracterización de tubos volcánicos (2 perfiles) y análisis de zonas con anomalías térmicas (3 perfiles). Como ejemplo, se muestra el modelo de resistividades obtenido para el perfil de la Senda de los Geólogos, ya que se ha contrastado con resultados obtenidos con georradar y gravimetría. Utilizando como referencia los dos tubos volcánicos visibles para calibrar la respuesta a las ondas electromagnéticas, la inversión de las medidas de resistividad muestran cinco áreas con geometría triangular (Figura 4d), con valores de resistividad elevados ($>15.000 \text{ ohm}\cdot\text{m}$) para materiales volcánicos, que se asocian con los tubos de lava. Las dos primeras zonas de alta resistividad, centradas a 4 y 17 m en la parte más superficial del perfil, coinciden con la presencia de dos tubos de lava visibles en el campo, lo que corrobora los resultados. Las otras tres zonas, al presentar la misma respuesta electromagnética, corresponderían a tubos de lava similares no visibles en la superficie. La zona de alta resistividad, a más de 15 m bajo la superficie, indicaría la presencia de tubos de lava situados a distintos niveles de profundidad (GÓMEZ-ORTIZ et al., 2014).

Resultado del estudio de deformaciones del terreno en zonas de anomalías térmicas

En las zonas del Parque Nacional de Timanfaya donde existen anomalías térmicas residuales

de las últimas erupciones volcánicas, la transmisión de calor se produce, fundamentalmente, por el ascenso de fluidos hidrotermales a través de fracturas existentes en la corteza terrestre. Dichas anomalías se ajustan a un esquema de flujo hidrológico por el que el agua marina penetra en zonas permeables y, en las

proximidades de la fuente térmica, disuelve la sílice y asciende por las fracturas de la corteza terrestre (CARMONA *et al.*, 2009; GARCÍA *et al.*, 2009). Las alteraciones en el comportamiento de las fuentes de calor pueden generar variaciones en la manifestación de las anomalías en superficie.

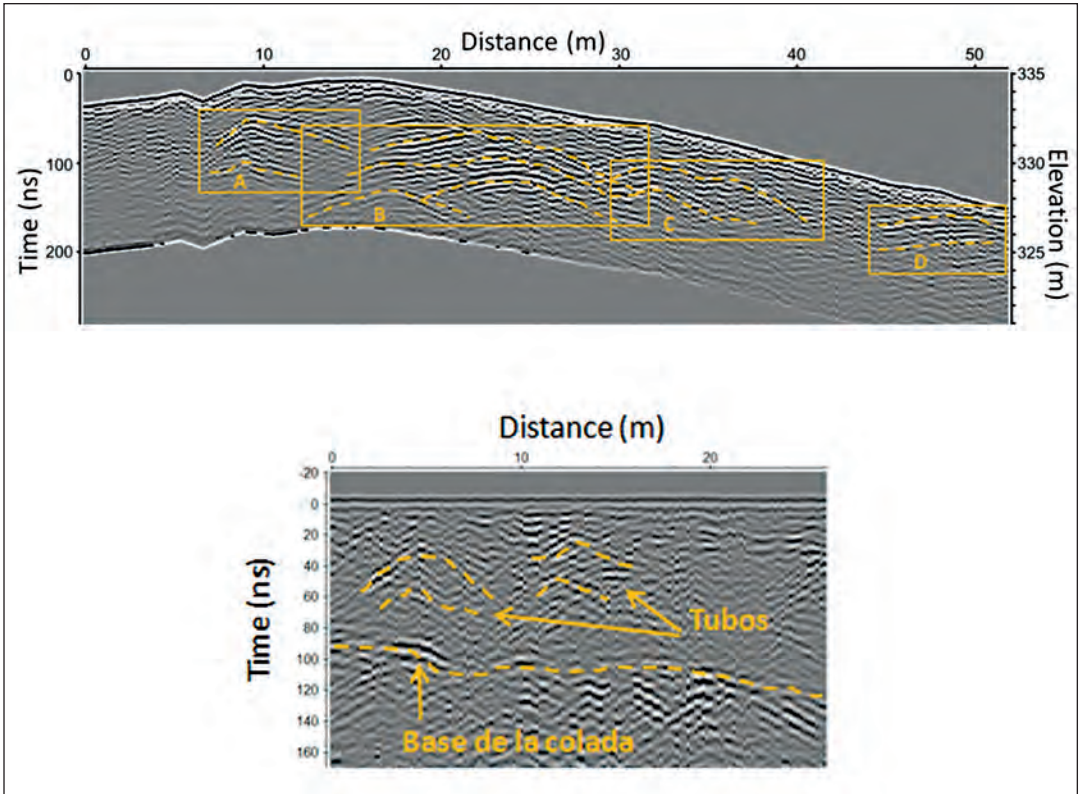


Fig. 7.

En el Laboratorio de Camelleros se ha detectado una importante variación de temperatura ambiente en los últimos años, probablemente relacionada con el comportamiento de las anomalías térmicas en superficie en esta zona, que ha ocasionado un aumento global de más de 20°C (Figura 9) desde el año 2004, llegando a superarse los 60°C en alguna época del año. Como consecuencia, se ha producido una deformación en el terreno medida con los exten-

sómetros e inclinómetros instalados en el laboratorio (ARNOSO *et al.* 2012). Como ejemplo, los valores calculados para el coeficiente de regresión R, considerando todo el periodo completo de observación, son de 15.0 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ para la deformación lineal en dirección EO frente a -11.3 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ en dirección NS. La Figura 9 muestra gráficamente el efecto de la deformación y su tasa de variación anual en diferentes periodos de tiempo.

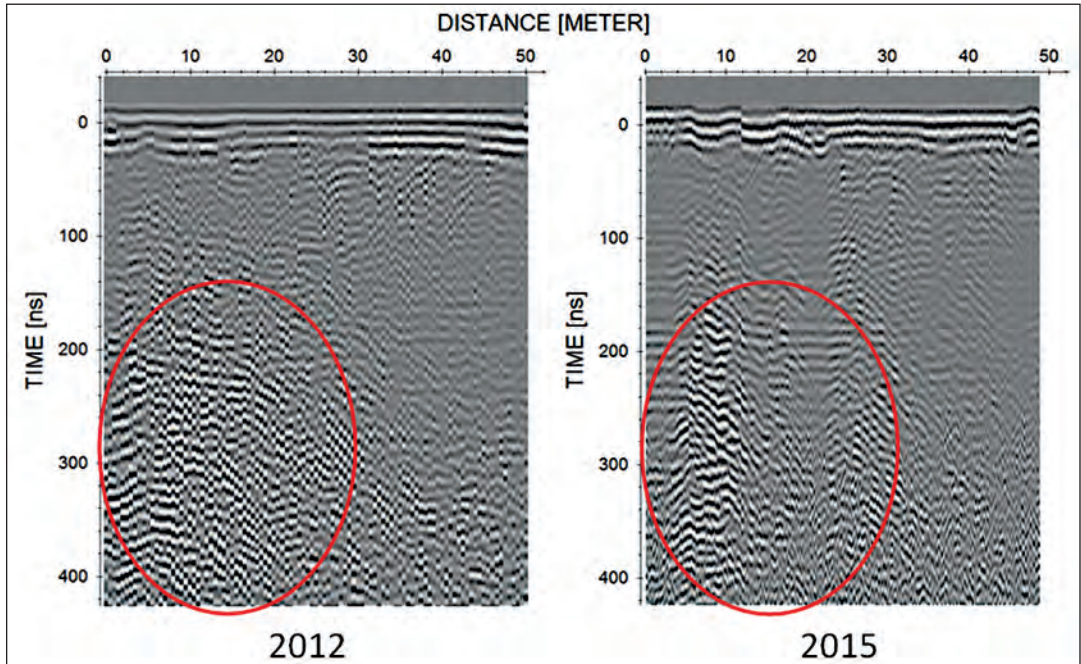


Fig. 8.

En este contexto, los desplazamientos GPS estudiados desde mayo 2014 a mayo 2016 en la estación CAME, próxima al Laboratorio de Camelleros, son relevantes. El análisis de la red GPS indica que CAME difiere significativamente del resto de estaciones (LACV, YAIZ, TIAS, HRIA, OLIV). Éstas muestran un patrón estable en el promedio de velocidad, mientras que CAME presenta un promedio de 13 mm/año y 18 mm/año en las direcciones N y E, respectivamente, con lo que las velocidades absolutas de la Figura 10 muestran una tendencia más acusada en el desplazamiento hacia el E. Las elipses de error son grandes debido a la corta longitud de las series temporales, lo que no permite establecer consideraciones geodinámicas. Asimismo, en CAME se observa un efecto que podría ser un episodio de deformación, en mayo-junio de 2014 (Figura 10). Aumentando la longitud de la serie temporal se podría obtener mayor información sobre el campo de velocidades y posibles deformaciones relacionadas con las anomalías térmicas.

DISCUSIÓN

Se ha establecido una metodología de observación y estrategia de análisis adecuada para caracterizar estructuras subsuperficiales, mediante técnicas geodésicas y geofísicas no destructivas ni contaminantes en entornos naturales de alta protección como el Parque Nacional de Timanfaya.

Por un lado, el análisis de estructuras corticales profundas refleja gran heterogeneidad en toda la zona de estudio, en relación directa con el *underplating* magmático bajo el edificio volcánico insular. Los modelos gravimétrico, magnético y microsísmico de sondeo, identifican claramente estructuras relacionadas con la actividad volcánica en la isla de Lanzarote. En el área de Timanfaya destaca el máximo magnético lineal, localizado también en el mapa de anomalías gravimétricas Bouguer. En el modelo gravimétrico, los mínimos muestran interesantes alineamientos asociados al

sistema de fracturas correspondiente a las tensiones estructurales de la zona y correlacionadas con el sistema de alimentación que generó la actividad volcánica correspondiente a la erupción de 1730-1736. La principal fisura eruptiva no aparece como significativa en el mapa de anomalías

magnéticas ni en el modelo gravimétrico, aunque otros alineamientos sí que están definidos, con orientación WNW-ESE, que se interpreta como una característica volcánica reciente, no representativa de la dirección preferente en que se emplazan los magmas en Lanzarote.

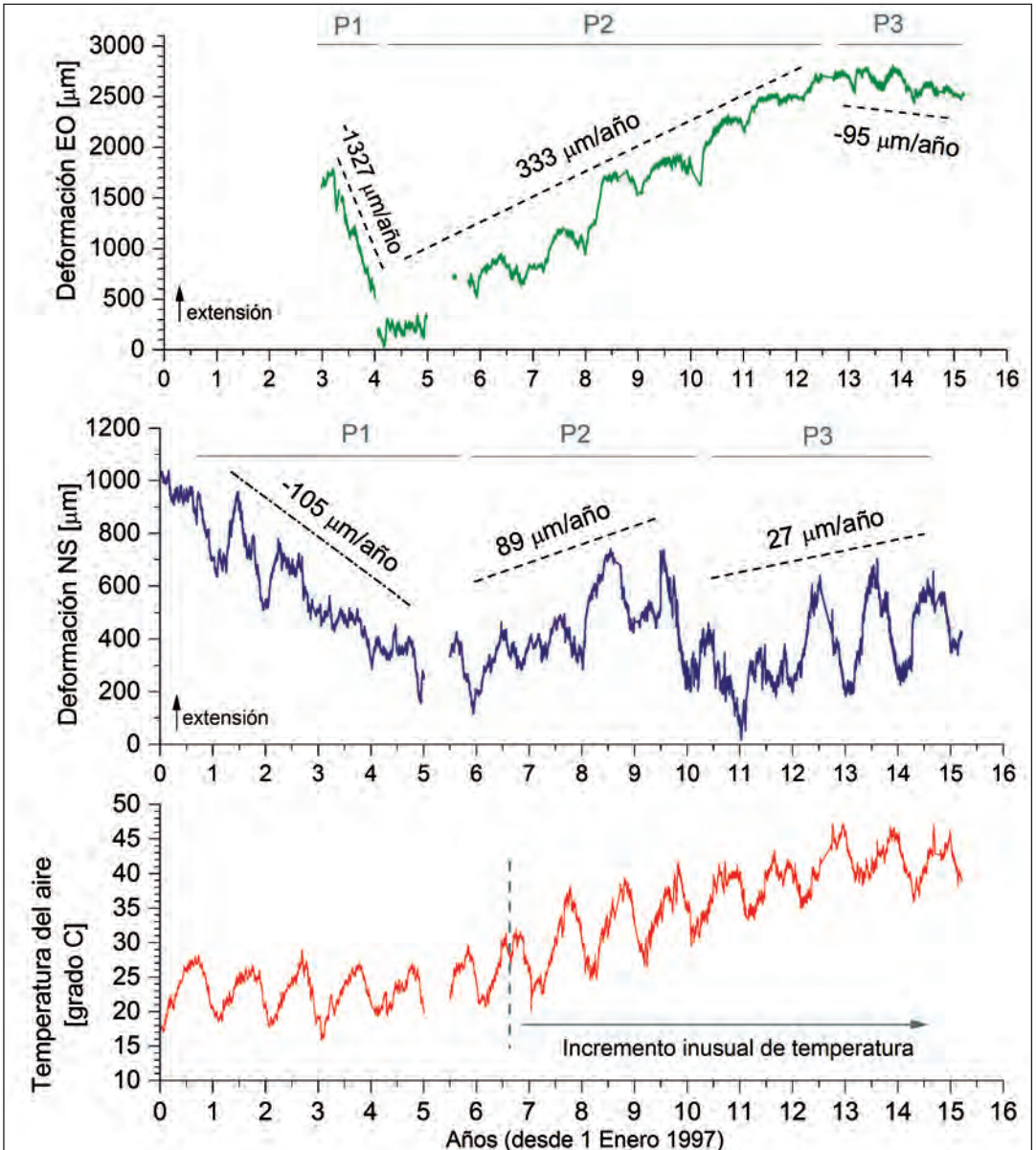


Fig. 9.

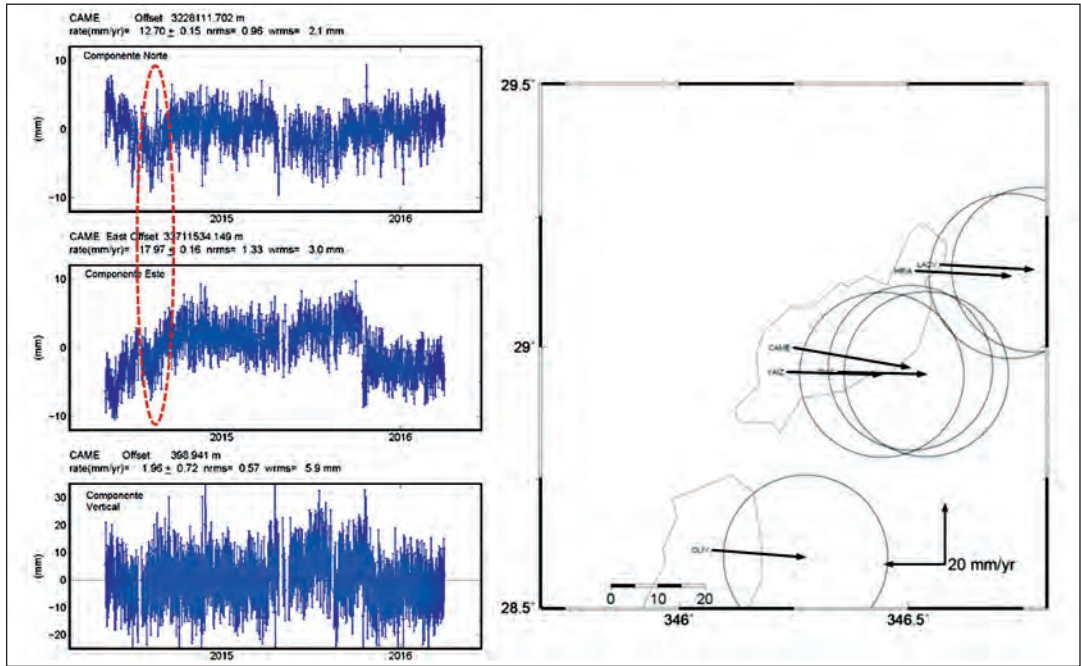


Fig. 10.

Por otro lado, la interpretación de los resultados proporcionados por el GPR y EMI ha permitido caracterizar la respuesta de diferentes materiales volcánicos, obteniendo así información acerca de su espesor y geometría de los límites entre ellos. Integrando los resultados GPR y EMI con la gravimetría se han localizado cavidades en tubos de lava de diferentes tamaños y profundidades, permitiendo detectar estructuras volcánicas singulares, como coladas de diversos materiales volcánicos, túneles de lava y diques. Esta investigación se ha aplicado también al estudio de fuentes de calor localizadas como en el Islote de Hilario, determinando su profundidad y geometría a partir de su respuesta a las ondas electromagnéticas. El Parque Nacional de Timanfaya forma parte de un importante complejo turístico de Lanzarote, con miles de visitantes al año, por lo que la detección, mediante estas técnicas, de cavidades subsuperficiales que no hayan sido detectadas a simple vista, es de gran interés para elaborar mapas de riesgo potencial provocado por inestabilidad, fracturación o colapso del terreno.

Finalmente, el análisis de deformaciones del terreno registradas en el Laboratorio de Camelleros y la zona de sondeos, permite verificar el modelo de transmisión de calor generado por las anomalías térmicas remanentes de la erupción 1730-1736. Las alteraciones en las fuentes térmicas localizadas en profundidad están generando desde 2004 variaciones anómalas en la temperatura ambiente y, consecuentemente, deformaciones locales en la superficie del terreno. Las medidas continuas de GPS, una vez transcurran 2.5 años desde el inicio de las medidas (abril de 2014), por un lado podrán emplearse para constreñir los efectos de inflación o deflación del terreno que se puedan detectar y, por otro lado, para estudiar el comportamiento anómalo detectado en la velocidad del desplazamiento horizontal de la estación CAME respecto a otras de su entorno próximo. Con todo ello, se ha configurado una red (gravimétrica y GPS) para control de deformaciones en la zona del Parque Nacional de Timanfaya, con sensi-

lidad suficiente para el estudio de eventos propios de zonas con volcanismo activo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias a la financiación del Organismo Autónomo de Parques

Nacionales (proyecto 320/2011) y a la colaboración inestimable de la dirección, guías y vigilantes del Parque Nacional de Timanfaya. Nuestro sincero agradecimiento a Jaime Arranz y Orlando Hernández, de la Casa de los Volcanes del Cabildo de Lanzarote, por su soporte técnico permanente y la ayuda prestada durante las campañas de observación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÑA, V.; ORTIZ R. y YUGUERO, J. (1973): Thermal anomalies in Lanzarote (Canary Islands). *Geothermics*, 2: 73-75.
- ARAÑA, V.; y ORTIZ, R. (1984): *Volcanología*. CSIC, Madrid, 510 pp.
- ARAÑA, V.; DÍEZ-GIL, J. L.; ORTIZ, R. y YUGUERO, J. (1984): Convection of geothermal fluids in the Timanfaya volcanic area (Lanzarote Canary Islans). *Bulletin of Volcanology* 47: 667- 677.
- ARNOSO, J.; VÉLEZ, E.; SOLER, V.; MONTESINOS, F. G. y BENAVENT, M. (2012): The Lanzarote Geodynamic Laboratory: new capabilities for monitoring of volcanic activity at Canary Islands. En: *European Geosciences Union General Assembly (EGU 2012)*.
- BLANCO-MONTENEGRO, I.; MONTESINOS, F. G.; GARCÍA, A.; VIEIRA, R. y VILLALAIN, J. J. (2005): Paleomagnetic determinations on Lanzarote from magnetic and gravity anomalies: implications for the early history of the Canary Islands. *Journal of Geophysical Research* 110, B12102, doi:10.1029/2005JB003668.
- CAMACHO, A. G.; MONTESINOS, F. G.; VIEIRA, R. y ARNOSO, J. (2001): Modelling of crustal anomalies of Lanzarote (Canary Islands) in light of gravity data. *Geophysical Journal International* 147: 403-414.
- CARMONA, J.; ROMERO, C.; DÓNIZ, J. y GARCÍA, A. (2009): Las alteraciones síliceas de las lavas de Montaña Señalo, erupción de Timanfaya (1730-36) (Lanzarote, Islas Canarias). *Estudios Geológicos* 65 (1). doi: 10.3989/egeol.09651.050
- CARRACEDO, J. C.; RODRÍGUEZ BADIOLA, E. y SOLER, V. (1990): Aspectos volcanológicos y estructurales, evolución petrológica e implicaciones en riesgo volcánico de la erupción de 1730 en Lanzarote, Islas Canarias. *Estudios Geológicos* 46: 25-55.
- CARRACEDO, J. C.; RODRIGUEZ BADIOLA, E. y Soler, V. (1992): The 1730-1736 eruption of Lanzarote, Canary Islands: a long, high-magnitude basaltic fissure eruption, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 53: 239-250.
- DAVIS, J. L. y ANNAN, A. (1989): Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting* 37: 531-551.
- DÍEZ-GIL, J. L.; ARAÑA, V.; ORTIZ, R. y YUGUERO, J. (1987): Stationary convection model for heat transport by means of geothermal fluids in post eruptive systems. *Geothermics*, 15: 77-87.
- DÍEZ-GIL J. L. (1990): Programa JOULE. Proyecto JOUG-004 ES (JR). Campo geotérmico superficial de roca caliente seca en Lanzarote (Islas Canarias). Evaluación de su potencial energético y test de extracción de calor. Directorate General XII for Science, Research and Development, 12 pp
- EM1DFM (2000): A Program Library for Forward Modelling and Inversion of Frequency Domain Electromagnetic Data over 1D Structures, Developed by the UBC-Geophysical Inversion Facility, Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia.
- FARQUHARSON, C. G.; OLDENBURG, D. y ROUGH, P. (2003): Simultaneous 1D inversion of loop-loop electromagnetic data for magnetic susceptibility and electrical conductivity, *Geophysics* 68: 1857-1869.
- GARCÍA, A.; ROMERO, C.; ORTIZ, R.; DÓNIZ, J.; CARMONA, J.; MARTÍNEZ-ARÉVALO, C. y GARCÍA-CACHO, L. (2009): «Investigación volcanológica en el Parque Nacional de Timanfaya (Lanzarote, I. Canarias)». Generación y tratamiento de bases de datos geofísicos y geomorfológicos para su integración en los programas de gestión. *Proyectos de investigación en Parques Nacionales: 2005-2008*. OAPN

- GONZÁLEZ, P.J. y FERNÁNDEZ, J. (2011): Error estimation in multitemporal InSar deformation time series, with application to Lanarote, Canary Islands. *Journal of Geophysical Research* 116, B10404
- GÓMEZ-ORTIZ, D.; MONTESINOS, F. G.; MARTÍN-CRESPO, T.; SOLLA, M.; ARNOSO, J. y VÉLEZ, E. (2014): Combination of geophysical prospecting techniques into areas of high protection value: identification of shallow volcanic structures. *Journal of Applied Geophysics* 109: 15-26.
- GORBATIKOV, A. V. y STEPANOVA, M. YU. (2008): Statistical Characteristics and Stationarity Properties of Low-Frequency Seismic Signals. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 44: 50-59.
- GORBATIKOV, A. V. y TSUKANOV, A. A. (2011): Simulation of the Rayleigh waves in the proximity of the scattering velocity heterogeneities. Exploring the capabilities of the microseismic sounding method. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 47(4): 354-370.
- GORBATIKOV, A. V.; MONTESINOS, F. G.; ARNOSO, J. y STEPANOVA, M. YU.; BENAVENT, M.; TSUKANOV, A. A. (2013): New features in the subsurface structure model of El Hierro Island (Canaries) from low-frequency microseismic sounding. An insight into the 2011 seismo-volcanic crisis. *Surveys in Geophysics*, 34: 463-489.
- HERRING, T.A.; KING, R.W. y McCLUSKY, S. C. (2009): Introduction to GAMIT/GLOBK Release 10.35, Mass. Inst. of Technol, Cambridge.
- KING, R.W. y BOCK, Y. (1998): Documentation for the MIT, GPS analysis software: GAMIT. Mass. Inst. of Technol., Cambridge.
- LAGLER, K.; SCHINDELEGGER, M.; BOHM, J.; KRASNA, H. y NILSSON, T. (2013): GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques, *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1002/grl50288.
- MONTESINOS, F. G.; ARNOSO, J. y VIEIRA, R. (2005): Using a genetic algorithm for 3-D inversion of gravity data in Fuerteventura (Canary Islands). *Int. J. Earth Sci.* 94, 301-315.
- MONTESINOS, F. G.; ARNOSO, J.; BENAVENT, M. y VIEIRA, R. (2006): The crustal structure of El Hierro (Canary Islands) from 3-d gravity inversion, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 150:283-299.
- NEAL, A. (2004): Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews* 66: 261-330.
- REBISCHUNG, P.; GRIFFITHS, J.; RAY, J.; SCHMID, R.; COLLILIEUX, X. y GARAYT, B. (2012): IGS08: the IGS realization of ITRF2008. *GPS Solutions* 16: 483-494. doi 10.1007/s10291-011-0248-2.
- REYNOLDS, J. M. (1997): *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley and Sons, 796 p.
- SOCÍAS, I. y MÉZCUA, J. (1996): Levantamiento aeromagnético del archipiélago canario, Instituto Geográfico Nacional, *Publicación Técnica* 35, 28 pp.
- STEPANOVA, M.; GORBATIKOV, A.; NIKOLAEV, A. V. (2014): Global Variations in a Low-Frequency Microseismic Field within Spatially Limited Zones of the Earth. *Doklady Earth Sciences* 459(1): 1475-1478.
- TORGE, W. (1989): *Gravimetry*, de Gruyter, Berlin-New York, 465pp.
- VENEDIKOV, A. P.; ARNOSO, J.; CAI WEIXIN; VIEIRA, R.; TAN SHILING y VÉLEZ, E. J. (2006): Separation of the long-term thermal effects from the strain measurements in the Geodynamics Laboratory of Lanzarote. *Journal of Geodynamics* 41: 213-220.
- VIEIRA, R. y VÉLEZ, E. (2006): *Guía del Laboratorio de Geodinámica de Lanzarote*. Publicaciones del Instituto de Astronomía y Geodesia 201, 60 pp.