

# 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

ALICIA GARCÍA<sup>1</sup>, CARMEN ROMERO<sup>2</sup>, RAMÓN ORTIZ<sup>1</sup>, JAVIER DÓNIZ<sup>2</sup>,  
JAVIER CARMONA<sup>1</sup>, CARMEN MARTÍNEZ-ARÉVALO<sup>1</sup> Y LUIS GARCÍA-CACHO<sup>1</sup>

## RESUMEN

La actividad propuesta contempla dos objetivos científicos claramente diferenciados en relación a la disciplina que contienen: Sismicidad Volcánica y Geomorfología Volcánica, sin embargo, plantean contenidos comunes: generación y tratamiento de bases de datos que permitan obtener una información válida, asequible y útil para su uso en posteriores investigaciones y futuros planes de gestión del Parque Nacional de Timanfaya. De acuerdo con estos objetivos, se ha realizado la revisión, discriminación y clasificación de los datos sísmicos configurando un catálogo con los diferentes histogramas anuales y por tipos de eventos. Aprovechando resultados de proyectos previos, se ha elaborado un modelo de la circulación superficial de fluidos geotérmicos en la zona, teniendo en cuenta la actividad sísmica, las anomalías de potencial espontáneo originadas por la circulación de fluidos, y su correlación con las variaciones de temperatura. Los experimentos han puesto de manifiesto que existe un campo eléctrico en la zona de anomalías térmicas de Timanfaya. Se ha establecido un modelo doble del sistema hidrológico. Este sistema se origina en profundidad y asciende a la superficie donde se uniría al sistema superficial generando en conjunto un sistema geotérmico responsable de las anomalías observadas en superficie, de los depósitos hidrotermales y, posiblemente, de las mineralizaciones de sulfuros en profundidad. En relación con la investigación geomorfológica, se ha realizado una base de datos y catálogo digitalizado de las principales unidades de relieve del Parque Nacional de Timanfaya con un estudio de detalle de las lavas de la erupción de 1730-36. En este estudio se ha diferenciado, por primera vez, una serie de alteraciones de naturaleza silíceas reconocidas en los basaltos, asociadas a la circulación en profundidad de fluidos hidrotermales, capaces de disolver y transportar grandes cantidades de sílice en forma coloidal hasta la superficie. Por último, se ha adecuado esta información para su integración en el sistema de información geográfica del Parque Nacional de Timanfaya.

**Palabras clave:** Sismicidad, Geomorfología, hidrotermal, lavas, alteraciones silíceas, SIG.

---

<sup>1</sup>Departamento de Volcanología, Museo Nacional de Ciencias Naturales. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.

<sup>2</sup>Departamento de Geomorfología. Facultad de Geografía e Historia. Universidad de La Laguna, Tenerife.

## SUMMARY

The proposed activity contemplates two scientific aims clearly differenced and related to the Volcanic seismicity and the Volcanic Geomorphology, nevertheless common issues are considered: data bases generation and treatment for obtaining a valid, achievable and useful information for future research and management plans in the National Park of Timanfaya. According to these goals, a revision, discrimination and classification of seismic data have been carried out, creating a catalogue with the different annual histograms and type of events. Using the previous projects results, a superficial geothermal fluid circulation model have been proposed considering the seismic activity, the shelf potential anomalies caused by fluid circulation and their correlation with temperature variations. The experiments point out the presence of an electric field in the areas showing thermal anomalies in Timanfaya. A double hydrological system has been proposed. This system is generated at high depths, rising towards the surface where the superficial one is added, generating a geothermal system responsible of the observed superficial anomalies, the hydrothermal deposits and likely the sulphur mineralization in depth. Considering the geomorphologic research, data base and catalogue digitalizations of the main relieve units of the Timanfaya National Park has been carried out, with special attention of lavas from 1730-36 eruptions. In this study a hydrothermal origin for some silica nature alterations recognized within the basalts has been described for first time. Great quantities of dissolved silica are transported such as colloids towards de surface by deep hot fluid circulation explaining the hydrothermal origin for these alterations. Finally all this information has been integrated to the geographical information system of the National Park of Timanfaya.

**Key words:** Seismicity, Geomorphology, hydrothermal, lavas, silica alterations, GIS.

## INTRODUCCIÓN

En Lanzarote sólo se han producido dos episodios eruptivos en época histórica: el desarrollado entre 1730 y 1736, y el ocurrido entre el 31 de julio y el 24 de octubre de 1824; ambos constituyen, sin embargo, manifestaciones volcánicas múltiples y corresponden a los eventos de mayor envergadura y magnitud de los ocurridos en las Canarias en período histórico. Las erupciones se asocian en esta isla a cadenas volcánicas y sus centros eruptivos se disponen en torno a directrices tectonovolcánicas de rumbo ENE-WSW. Los conjuntos eruptivos de Lanzarote han sido analizados por FERNÁNDEZ NAVARRO 1919; FÚSTER *et al.* 1968; RUMEU & ARAÑA 1982; GARCÍA-CACHO & ROMERO 2000; ORTIZ *et al.* 1986; CARRACEDO & BADIOLA 1991y 1993; ROMERO *et al.* 1981; ROMERO 1987, 1991 a y b, 1997.

La distribución espacial del volcanismo de este período parece ser consecuencia directa de la particular disposición del sistema de fracturas corti-

cales características del archipiélago Canario; así al menos parece ponerlo de manifiesto su orientación preferente en torno a rumbos de componente NE-SW y ENE- WSW y su orientación secundaria en torno a directrices de rumbo NW-SE y N-S. Insertos siempre en las estructuras volcánicas canarias más jóvenes, estos episodios no hacen sino prolongar en el tiempo los caracteres tectonovolcánicos que definen a las mismas (ROMERO 1987).

El escaso número de erupciones históricas desarrolladas en esta isla podría haber impedido el establecimiento de los rasgos temporales de la actividad volcánica histórica. Sin embargo, los marcados contrastes existentes entre los dos episodios ocurridos en Lanzarote permiten afirmar que el siglo XVIII constituye el período de máxima eruptividad, ya que durante el mismo se desarrolló no sólo el evento volcánico de mayor envergadura de la isla (con más de un centenar de bocas eruptivas), duración (2055 días) y área ocupada (172 km<sup>2</sup>), sino también de todo el ar-

chipiélago Canario y del conjunto de archipiélagos que componen la Macaronesia (Canarias, Azores y Cabo Verde) (MITCHEL THOMÉ 1981).

Timanfaya (28° 50' N, 13° 40' W) es el conjunto volcánico nacido durante las erupciones de 1730-36 ocurridas en el oeste de la isla de Lanzarote (ROMERO 1991b). Fue una erupción basáltica de considerable magnitud, con un volumen de lavas del orden del kilómetro cúbico que cubrieron una superficie de 200 km<sup>2</sup> (ORTIZ *et al.* 1986). La actividad se desarrolló a lo largo de una serie de fracturas SW-NE de pocos kilómetros de longitud. En 1824 se desarrolla otra erupción de mucha menor envergadura, con tres centros de emisión siguiendo una fractura de 10 km, paralela a las fracturas de 1730 (RUMEU & ARAÑA 1982). La parte central del territorio afectado por estas erupciones constituye hoy el Parque Nacional de Timanfaya.

Durante los 2.055 días que duró el proceso eruptivo de Timanfaya se construyó uno de los sistemas volcánicos recientes más complejos de toda la isla de Lanzarote, incluso de todo el archipiélago Canario. Este sistema volcánico está constituido por más de un centenar de bocas eruptivas y más de una veintena de conos volcánicos, de mayor o menor entidad y complejidad interna (ROMERO 1991 a y b). Como corresponde a los conjuntos volcánicos inscritos en la banda estructural central de la isla, la dirección dominante de todo el sistema de conos y cráteres de esta erupción dibuja una línea de rumbo ENE-WSW. De este modo, a lo largo de una franja de unos 14,5 km de longitud se alinean diversos conjuntos eruptivos. En el tramo central de esta larga fractura, los conos y los cráteres configuran edificios volcánicos complejos, constituyendo un grupo de construcciones imbricadas y yuxtapuestas.

El particular modo de asociación y de agrupamiento de los cráteres y conos que componen el sistema eruptivo de Timanfaya, así como los rasgos que definen a los edificios, permiten establecer tres categorías morfológicas diferentes que, de mayor a menor complejidad volcanomorfológica, son: las aglomeraciones, las alineaciones cerradas y las alineaciones abiertas.

Las aglomeraciones del Macizo del Fuego y de Pico Partido/Montaña del Señalo configuran el escenario principal y representan los puntos neurálgicos de la erupción de Timanfaya; es decir, los sectores más activos de toda la fractura. La existencia de un mayor número de fracturas y sus cruces es lo que permite que en estos lugares se concentre la mayor cantidad de focos volcánicos por km<sup>2</sup> de toda la erupción.

Las alineaciones volcánicas originadas durante la erupción del S. XVIII corresponden a estructuras volcánicas formadas a partir de la agrupación de varios edificios en torno a fracturas de marcado carácter lineal. La organización espacial de todos los conjuntos eruptivos del sistema volcánico expresa claramente parte de la historia eruptiva de Timanfaya, evidenciando los lugares de máxima actividad. La mayor importancia de las aglomeraciones del Macizo del Fuego y de Pico Partido/Montaña del Señalo, tanto desde un punto de vista topográfico, como estructural, dinámico y morfológico permite considerarlas como los auténticos núcleos de la erupción de Timanfaya. Su especial significado queda reflejado, además, en la pervivencia en estos lugares de anomalías térmicas superficiales, donde se alcanzan temperaturas de unos 250°C en superficie y en torno a los 600°C en profundidad (ARAÑA *et al.* 1973 y 1984; DÍEZ-GIL *et al.* 1987). A partir de ellas, los conjuntos volcánicos se disponen siguiendo una geometría precisa que marca áreas con potencialidades eruptivas diferenciadas.

La variada morfología de los conjuntos eruptivos desarrollados a lo largo de la erupción del S. XVIII es resultado de la compleja evolución espacio temporal y volcanomorfológica operada a lo largo del período activo. Existen, sin embargo, pocos trabajos en los que se aborde el estudio de las secuencias temporales y espaciales de la erupción (ROMERO 1991b y c; CARRACEDO & BADIOLA 1991; CARRACEDO *et al.* 1992).

Las referencias que proporcionan las fuentes históricas acerca de la sucesión temporal y espacial de las fases eruptivas que caracterizaron a la erupción del S. XVIII son escasas e imprecisas, lo que determina que sea difícil establecer no sólo el orden de

formación de los distintos conjuntos volcánicos formados a lo largo de dicha erupción sino también determinar cuáles de esos edificios fueron generados durante la misma y cuáles, en realidad, pertenecen a fases eruptivas previas. La información de detalle, recogida en la base de datos de este proyecto, la utilización de técnicas geológicas, morfométricas y geomorfológicas y su cotejo con la información documental permite un acercamiento más preciso acerca de la evolución espacio temporal operada a lo largo de todo el período activo.

El paisaje de Timanfaya no es, sin embargo, un paisaje muerto y estático. Desde la finalización de los procesos eruptivos, toda el área de Timanfaya se ha visto sometida a procesos de desmantelamiento con distinto grado de incidencia en la morfología del sistema eruptivo. La diversidad de factores que intervienen en la erosión hace que el grado de transformación post-eruptiva de los edificios volcánicos varíe ampliamente de unos conjuntos volcánicos a otros, aún perteneciendo a la misma erupción.

Las particulares condiciones climáticas de la isla –escasez e irregularidad anual e interanual de precipitaciones, temperaturas cálidas...– determinan que la actuación de los procesos erosivos progrese a ritmos relativamente lentos. No obstante, sobre los dorsos de los conjuntos eruptivos históricos, en el interior de los cráteres, sobre las acumulaciones de piroclastos e incluso sobre las superficies lávicas empiezan a ser perceptibles formas de modelado de detalle (ripples, dunas de lapilli, barranqueras, taludes detríticos, guirnaldas, playas y cantiles...) que ponen de manifiesto los principales procesos que en la actualidad afectan a todos estos sistemas volcánicos. Todas estas formas de modelado son consecuencia de la eolización sobre los materiales piroclastos menos groseros, de esorrentías –no siempre concentradas–, de la actuación de la gravedad y de la acción, en el litoral, del oleaje marino. La mayor parte de estas formas de modelado poseen aún escasa incidencia en el paisaje del Parque pero, evidentemente, constituyen el germen de las futuras morfologías que caracterizarán el paisaje geomorfológico del Parque Nacional, y que tienen una enorme importancia de cara al establecimiento y recolonización de la vegetación.

En la base de Timanfaya se encuentra el Laboratorio del Parque Nacional de Timanfaya (dependiente del Excmo. Cabildo de Lanzarote) que sirve de base para los distintos trabajos de investigación que se desarrollan normalmente en el Parque. En el laboratorio, con carácter permanente, existen instrumentos pertenecientes a distintos grupos de investigación dedicados al seguimiento de la actividad sísmica, deformación y temperaturas. El Dpto. de Volcanología del MNCN –CSIC es el responsable del seguimiento de la actividad sísmica. Desde 1980 se han emplazado diversos equipos, de diseño propio, que se han ido actualizando de acuerdo al desarrollo tecnológico y financiación recibida. Hay que mencionar, que la instrumentación desarrollada y evaluada en el Laboratorio de Timanfaya ha sido y es referencia en la vigilancia volcánica y que forma parte de las redes de seguimiento en varias zonas volcánicas activas (Chile, México, Ecuador, Azores) (ORTIZ *et al.* 2001; TÁRRAGA *et al.* 2001; ORTIZ *et al.* 2003).

La actividad sísmica en Timanfaya es muy constante y hasta el momento sólo se han realizado estudios cualitativos que han permitido describir las generalidades de las señales detectadas. Se trata de pequeños eventos, localizados todos en el entorno de Timanfaya y con profundidades del orden de 1 km. Estos eventos se presentan en pequeños enjambres y en muchas ocasiones están acompañados por un período de tremor (señal sísmica de origen volcánico) continuo. Como ejemplo de la actividad detectada en los últimos años podemos decir que corresponden a una media de tres eventos por día. Todos los eventos registrados presentan características comunes: una duración media de 30 segundos con elevado contenido en altas frecuencias, no apreciándose fases de tipo S y con magnitudes inferiores a 2.

## OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

### Sismicidad Volcánica

*Revisión, discriminación y clasificación de los datos sísmicos*

- Realización de una base de datos de los eventos sísmicos para disponer de un catálogo de rápido y fácil acceso para su estudio.
- Identificación y discriminación de los diferentes tipos de eventos sísmicos que se registran en el Parque Nacional de Timanfaya para evaluar la actividad volcánica presente en la isla de Lanzarote y deducir qué procesos físicos y geológicos tienen lugar. Esta información es vital cuando quiere tratarse el estudio del riesgo volcánico (FELPETO *et al.* 2001).

*Utilización de la información meteorológica para correlacionar la entrada de agua en el sistema con la actividad sísmica*

En el Parque Nacional de Timanfaya existen importantes anomalías geotérmicas con temperaturas de 600 °C a 12 m de profundidad. Estas anomalías están relacionadas con los restos del sistema de alimentación de la erupción de 1730-36 que todavía deben encontrarse a temperaturas superiores a los 800 °C (ARAÑA *et al.* 1973 y 1984; GARCÍA, 1985; ORTIZ *et al.* 1986; DíEZ-GIL *et al.* 1987). La emisión de gases procedente de estos restos más las filtraciones de agua de mar o meteórica que ascienden por fracturas, constituyen el mecanismo de transferencia de calor responsable de las anomalías térmicas en superficie. Este proceso no es estacionario, sino que presenta importantes modulaciones debidas seguramente a la intervención del agua meteórica y de la carga oceánica. Además, las alteraciones hidrotermales de los materiales superficiales provocan fenómenos de sellado de los conductos, dificultando o impidiendo la salida del vapor. Cuando el vapor supera una determinada presión abre el sello produciendo un pequeño evento sísmico escapándose el vapor y variando la distribución de temperaturas en la zona. Sin embargo, esta hipótesis no ha sido confirmada, ya que sólo se dispone de una base de datos sísmicos desde 1980 con registro continuo digital desde 1995. También se dispone de datos de temperatura en alguno de los sondeos, con los que se realizó en 1995 una experiencia que puso de manifiesto una aparente correlación entre las fluctuaciones de temperatura y la actividad sísmica, pero todavía no pudieron

aplicarse técnicas indirectas que permitieran poner de manifiesto las emisiones gaseosas de baja intensidad (VAN RUYMBEKE *et al.* 1997).

### **Geomorfología Volcánica**

*Base de datos y catálogo digitalizado de las principales unidades de relieve del P. N. de Timanfaya*

Este objetivo propone la elaboración de una base de datos y el establecimiento de un catálogo digitalizado, en el que se recoja toda la información actualizada sobre las formas de relieve existentes en el Parque Nacional de Timanfaya. Esta información debe poder manejarse de forma homogénea e incluir, además de los datos sobre procesos morfogenéticos, todos aquéllos de carácter histórico, e incluso artísticos, que se consideren pertinentes. Esta base de datos debe ser útil de cara a la gestión del Parque Nacional de Timanfaya. Debe ser sencilla de usar y de fácil actualización. Se concibe que partiendo de una cartografía completa de cada una de las formas volcánicas presentes en el Parque y seleccionando cualquiera de los elementos del mapa topográfico, se recupere de forma inmediata el detalle geológico, morfológico, histórico, de procesos de transformación eruptiva, erosiva o antrópica, etc. Junto a esta información deberá facilitarse el acceso inmediato a otros apartados que incluyan datos ya publicados y de muy diversa naturaleza. Se contempla, además, la vinculación entre el fenómeno volcánico como inductor y/o inspirador de vertientes artísticas desarrolladas en el entorno social del área volcánica (artesanía, fotografía, grabados, dibujos, pinturas, tarjetas postales, etc.)

Información que se integrará en la base de datos

- Topónimo (nombre del volcán)
- Localización: (latitud y longitud del punto culminante del edificio)
- Rasgos topográficos.
  - Datos morfométricos de conos y cráteres

Este apartado tiene como objetivo la clasificación cuantitativa de las formas volcánicas, con el fin de poder llevar a cabo comparaciones entre unos

conjuntos eruptivos y otros de la propia erupción, entre edificios volcánicos de Timanfaya y de Lanzarote y entre éstos y los del resto de las islas del archipiélago Canario.

- Rasgos geológicos:
  - Petrología y geoquímica.
  - Tipología de productos volcánicos.
  - Disposición estratigráfica.
  - Cronología.

En este apartado, el objetivo es el establecimiento de las unidades geológicas principales del Parque.

- Rasgos morfológicos:
  - Descripción morfológica.
  - Formas estructurales.
  - Formas post-eruptivas.

En este apartado el objetivo es el establecimiento de las unidades geomorfológicas principales del Parque.

- Rasgos volcanológicos
  - Tipo y carácter de la erupción.
  - Caracteres del comportamiento eruptivo.
  - Dinámica eruptiva (fases de actividad). Secuencias eruptivas.
  - Manifestaciones asociadas
- Otros datos:
  - Datos históricos, artísticos y todos aquellos que complementen la información anterior (gerias, cultivos, ).
- Valoración:
  - Grado de conservación de los rasgos naturales (muy alterado, medio, bajo, ...).
  - Grado de antropización (señales de intervención humana, acumulación de basuras, instalación de edificios, impactos visibles, etc.)
  - Sectores problemáticos (por ejemplo, en relación con los lindes del Parque Nacional)

Por último, toda la información recogida e integrada debe complementarse con los aspectos referidos al grado de conservación natural de las formas y con el grado de antropización sufrido por las mismas, con el fin de llevar a cabo una valoración general de cada uno de los elementos tratados. La incorporación de todos estos datos resulta de inestimable valor de cara a la gestión del Parque

De acuerdo con las actividades descritas, se puede concluir que todos los objetivos van encaminados a la elaboración de bases de datos, identificación de elementos singulares y estudios prospectivos y descriptivos del P.N. Timanfaya.

## METODOLOGÍA

La estructura del proyecto se basa, pues, en la elaboración de un catálogo digital de datos sísmicos y geomorfológicos. Se pretende realizar un sistema ágil que permita consulta y gestión eficaces. La abundante y dispersa información científica obtenida mediante las sucesivas investigaciones desarrolladas hace que sea necesario acometer un proceso de recopilación de resultados. Este sistema formará un marco de referencia para futuros estudios científicos que se llevaran a cabo en la zona y además se adaptaría a las recomendaciones de proyección de datos empleadas por las asociaciones internacionales (IAVCEI, IASPEI, etc.). Se usará un soporte comercial de uso extenso.

*Sismicidad:* La investigación se apoya en una serie de técnicas necesarias para el tratamiento de los datos sísmicos. La actividad sísmica presente en un volcán activo es difícil de clasificar y depende de cada escuela. En general, esta actividad, incluso en periodos de reposo, puede ser muy intensa, con una gran cantidad de eventos de poca magnitud (<2) y que suelen presentarse en enjambres. El aumento de la actividad del volcán lleva asociado también un incremento de la actividad sísmica, además de la ocurrencia simultánea de varios tipos de eventos. Incluso durante las fases más activas, los eventos suelen ser de moderada magnitud, aunque en la zona puedan darse eventos de magnitud considerable asocia-

dos a otros procesos geodinámicos. La razón de la pequeña magnitud de los eventos asociados directamente con el volcanismo, hay que buscarla en la escasa fracción de la energía disponible que puede liberarse como energía sísmica. Hay que tener también en cuenta que la capacidad de expansión de los gases disminuye con la presión. Ello implica que todos los eventos en los que intervenga la fase gaseosa deben ser superficiales y generalmente sólo registrados por estaciones muy próximas.

La vigilancia sísmica de los volcanes parte por identificar claramente las pautas de la actividad sísmica durante la fase de reposo (línea de base) y controlar cuando esta actividad se va alejando de la línea de base, variando la distribución de los distintos tipos de eventos o la aparición de nuevas familias, así como la relación con otros fenómenos. Las técnicas tradicionales para el análisis de la sismicidad volcánica son la localización de los eventos, la energía liberada o RSAM (ENDO & MURRAY, 1991), el análisis espectral y la estadística del número de eventos.

Discriminación y clasificación de eventos:

- Las técnicas de clasificación más extendidas parten del análisis espectral en su forma simple y del espectrograma (evolución temporal del espectro). Los algoritmos de transformada rápida de Fourier (FFT) y de transformada localizada de Fourier (STFT) son la alternativa clásica cuando se busca la evolución temporal de un espectro de frecuencias. En estos métodos, se aplican y solapan ventanas temporales con el objeto de localizar las frecuencias en el tiempo.

*Geomorfología:* De acuerdo con los objetivos generales y parciales reseñados, la metodología a seguir ha sido la siguiente.

- Desarrollo de la base metodológica y adquisición de toda la información previa. Organización y estructuración de la información mediante tratamientos digitales. Preparación de los sistemas digitales a utilizar.

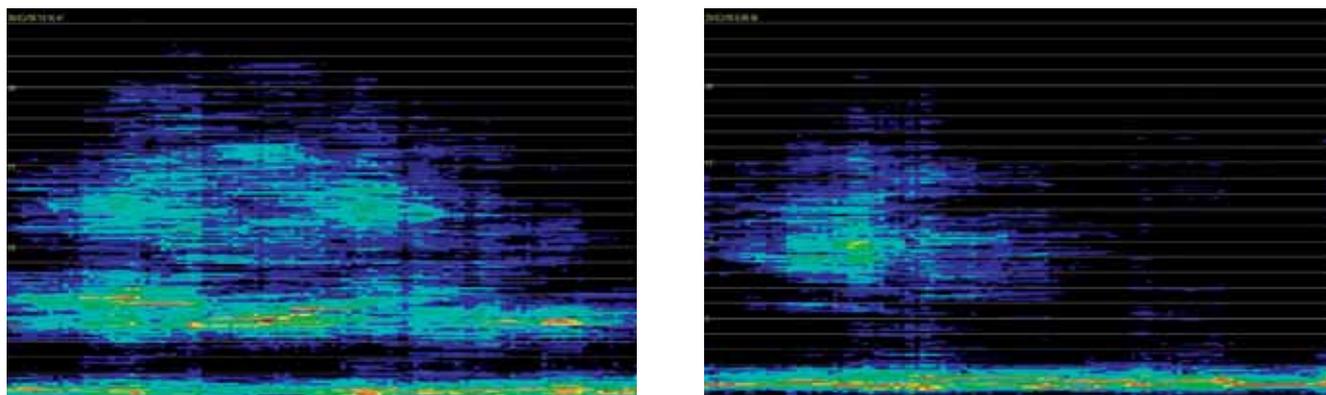
- Selección de las áreas de análisis mediante el establecimiento de las grandes unidades geomorfológicas existentes en el Parque.
- Realización cartográfica de detalle (análisis fotogramétricos y campañas de campo).
- Recopilación de los datos morfométricos.
- Realización de cartografías temáticas a diversas escalas.
- Digitalización final: temática, morfológica, morfométrica, geológica y de valoración.

## ACTIVIDADES REALIZADAS

Se ha realizado la revisión, discriminación y clasificación de los datos sísmicos registrados desde la actualidad hacia atrás por considerar los datos más recientes de mejor calidad. Se ha configurado un catálogo con los diferentes histogramas anuales y por tipos de eventos

La inspección de los sismogramas ha proporcionado por primera vez información sobre las características de las señales sismovolcánicas presentes en el sistema volcánico de Timanfaya. La sismicidad se ha agrupado en diferentes categorías: tremor volcánico (TR), y cuatro tipos de eventos (Ev1, Ev2, Ev3, Ev4). Principalmente, la actividad sísmica de este volcán está representada por el tremor volcánico y por los eventos tipo 1 con una duración menor de 13 segundos. Eventualmente, se presenta la ocurrencia de eventos tipo 2 (Ev2), así como tremores asociados a estos eventos. Conviene también destacar la presencia discontinua de una energía de fondo en diferentes bandas de frecuencia. (Figura 1).

Mediante la correlación de la actividad sísmica con la meteorología del área del P.N. de Timanfaya, se ha establecido un modelo de la circulación superficial de fluidos geotérmicos. Para ello, se ha tenido en cuenta, además de la actividad sísmica presente en la zona, las anomalías de potencial espontáneo originadas por la circulación de fluidos y su correlación con las variaciones de tempera-



**Figura 1.** Los eventos de tremor observados presentan sus máximos de energía tanto a frecuencias bajas como a altas. La clasificación de estos eventos en función de la banda de frecuencia donde se localiza la energía máxima, ha permitido conocer que ésta varía a lo largo del tiempo encontrándose períodos (septiembre de 2004) en los que la energía máxima se localiza entre 10 y 15 Hz, mientras que en otros (marzo y abril de 2005) se sitúa a frecuencias menores de 8 Hz. Se observan diferencias en la distribución de la energía apareciendo tremor con energía muy concentrada en bandas de frecuencias bajas con ruido a frecuencias más altas (figura 1a), mientras que en otros casos, presenta un aspecto más difuminado (Figura 1b).

**Figure 1.** The tremor signals show the energy maximums at both high and low frequencies. These events are classified according to the frequency band where the maximum of energy are located allowing to know its time variation. Some periods with the maximum of energy varies between 10 to 15 Hz have been detected (i.e. 2004, September). Other periods (2005, March and April) show the maximum of energy at lower frequencies of 8 Hz. Some differences at the energy distribution have been detected appearing the tremor signal with highly concentrated energy at low frequency bands and noise at higher frequencies (figure 1a), although in other cases the aspect is more diffuse (figure 1b).

tura. Las especiales condiciones ambientales de Timanfaya y la presencia de una moderada y estable actividad sísmica, junto con las facilidades logísticas de las que se dispone, hacen que sea un lugar idóneo para realizar este estudio. Para llevar a cabo este trabajo, se cuenta en primer lugar con los registros continuos de la actividad sísmica de los últimos años, de la red de sondeos para estudio del campo geotérmico realizados en el proyecto UE JOULE (1992) y de una estación meteorológica instalada en la misma zona dependiente del P. N. de Timanfaya. Las variaciones de temperatura en los sondeos se han obtenido de los termómetros de alta temperatura que el Observatorio Real de Bruselas (ROB) ha instalado en la zona. La información meteorológica, especialmente la precipitación, es muy importante, ya que es uno de los procesos de recarga de agua del sistema geotérmico superficial.

Los experimentos realizados han puesto de manifiesto que existe un campo eléctrico en la zona de anomalías térmicas de Timanfaya con una polarización media estable, en módulo y azimut, y que presenta variaciones importantes correlacionadas con la actividad sísmica detectada. Estas

variaciones del campo eléctrico no siempre tienen su reflejo en la presión del gas en el sondeo de Timanfaya, utilizado para el estudio. El campo eléctrico presenta una importante modulación diurna que impide poner de manifiesto otros fenómenos. En todos los casos, esta modulación desaparece abruptamente durante algunos días después de la ocurrencia de un enjambre sísmico lo que sugiere una clara relación entre ambos fenómenos. Una vez removido el efecto diurno, todos los datos disponibles muestran una relación entre la variación del campo eléctrico y la ocurrencia de eventos sísmicos. En los casos más significativos, el campo eléctrico disminuye fuertemente antes de la ocurrencia de un enjambre sísmico, momento en el que se estabiliza, permaneciendo en ese estado durante varios días. En otros casos, la actividad sísmica esta ligada a un cambio de tendencia en la variación del campo eléctrico, presentándose coincidente con máximos o mínimos relativos. En general, varía muy poco el azimut del campo eléctrico, salvo cuando ocurre una precipitación importante, momento en el que el campo gira más de 90°, volviendo a su valor normal en el curso de unos pocos días. Aunque la presión en el sondeo varía poco y no

suele presentar correlaciones con la actividad sísmica, existen unos pocos casos en los que la correlación es muy evidente. Finalmente, aparecen situaciones en las que una variación significativa del campo eléctrico no está acompañada de eventos sísmicos, la explicación se podría buscar en la falta de detectabilidad entre las 09:00 y 18:00 a consecuencia del ruido producido por el elevado tráfico turístico.

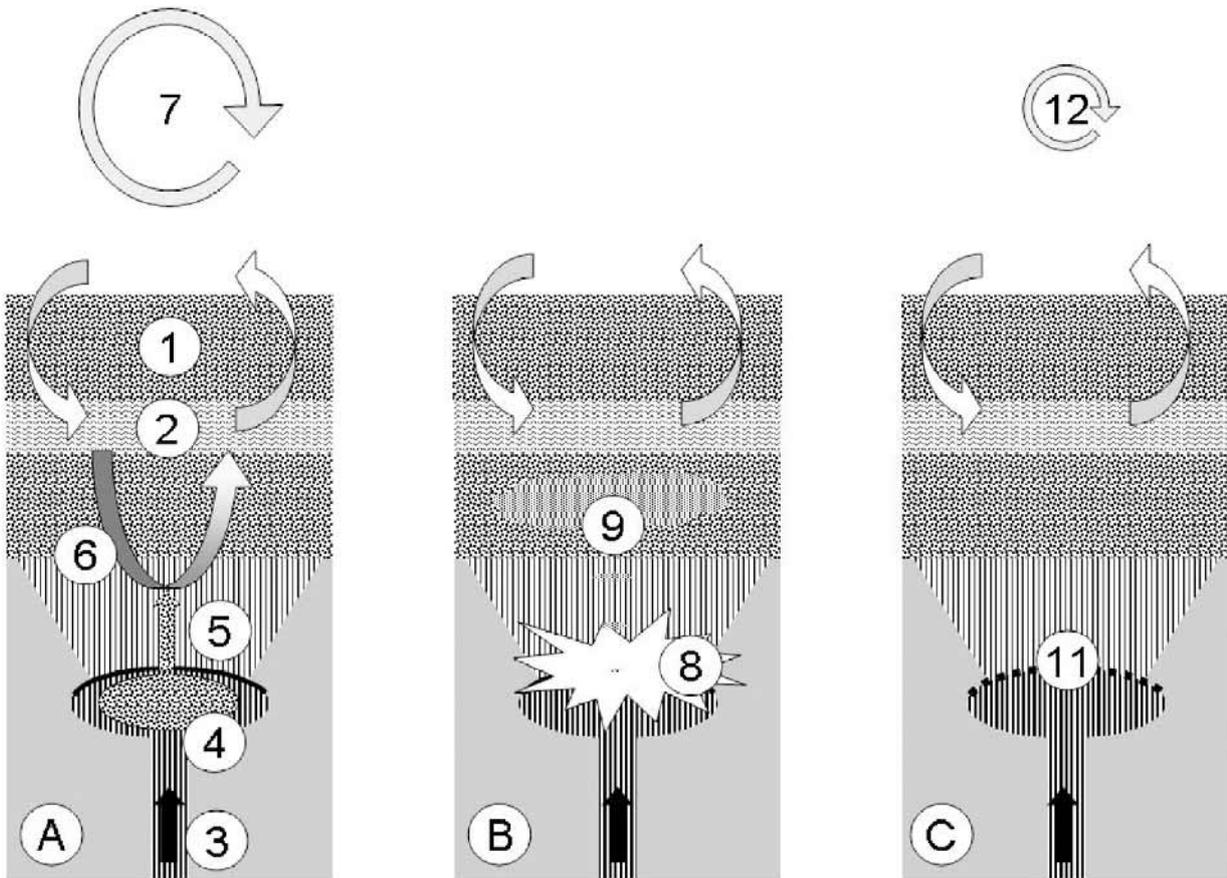
El efecto de la precipitación es muy marcado y responde generalmente a la misma pauta: la precipitación suele ir seguida a las pocas horas por una ligera actividad sísmica y una caída y rotación del campo eléctrico que puede tardar unos días en recuperar los valores normales, entre diez y veinte días más tarde se produce un incremento notable de la actividad sísmica, muchas veces en forma de enjambre. En precipitaciones importantes, se ha constatado un aumento significativo en la presión del gas en el sondeo transcurridos varios días. Un modelo cualitativo de la interacción entre el sistema geotérmico y la precipitación se obtiene con un dispositivo de medida situado sobre un campo de lapilli, en las proximidades de la fractura de 1730-36 por donde ascienden gases calientes, fundamentalmente vapor de agua que se ha mezclado con aire cerca de la superficie. Estos gases se acumulan en zonas superficiales muy alteradas, cuyos poros y fisuras se autosellan a consecuencia de la deposición de sales y alteración de los materiales. Cuando la presión del gas es suficiente se produce la fracturación del sello, produciéndose pequeños eventos sísmicos y el escape del gas. El ciclo diario produce condensación y evaporación en la capa superficial de lapilli. El agua de lluvia queda retenida en las capas superficiales produciendo perturbaciones en pocas horas o días, pero una parte significativa penetra a mayores profundidades, incorporándose al sistema geotérmico y provocando perturbaciones bastantes días después. Cuando el volumen de agua que se aporta al sistema geotérmico es importante, aumenta la cantidad de vapor disponible y, como consecuencia, aumenta la presión en el sondeo y se desencadena el enjambre sísmico. En la figura 2 se presenta un modelo cualitativo de este proceso.

Finalmente, en el proyecto también se contemplaba una optimización de la estación sísmica

permanente del Laboratorio del Parque Nacional de Timanfaya. Desde 2004 se cuenta con una estación sísmica actualizada, pasando de una a tres componentes, mejorando la resolución y autonomía. Además, se han instalado dos estaciones sísmicas más de una componente, alimentadas por paneles solares en el Islote de Hilario y la otra en la zona de anomalías térmicas próxima a los sondeos geotérmicos y a los termómetros de alta resolución instalados en sus proximidades. Por problemas logísticos, actualmente sólo funciona una de ellas emplazada en el entorno de Montaña Rajada (Figura 3).

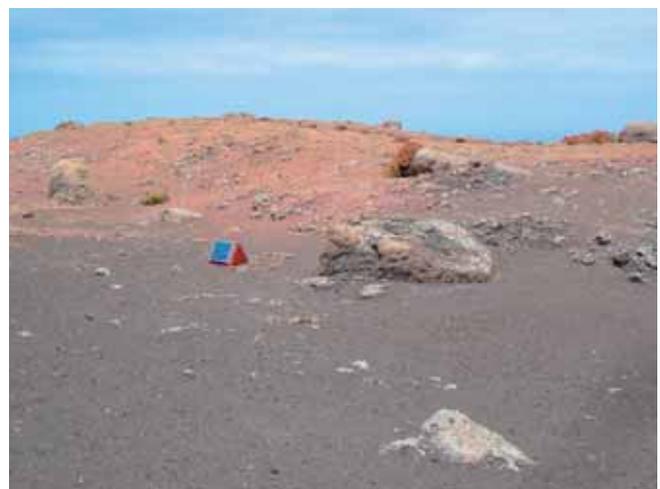
Mediante 6 estaciones portátiles de las mismas características, se ha recorrido todo el P.N., de Timanfaya, poniendo de manifiesto que la única actividad persistente se encuentra concentrada en una estrecha banda asociada a la presencia de anomalías térmicas (Islote Hilario, Timanfaya). El elevado tráfico turístico en la zona hace que sólo puedan analizarse correctamente las horas en las que el acceso al parque está cerrado, por lo que es necesario compensar estadísticamente la actividad registrada las 24 horas, admitiendo que el sistema es estacionario.

En cuanto a los aspectos geomorfológicos, se ha llevado a cabo un análisis pormenorizado de los rasgos topográficos del Parque Nacional y, más específicamente, de cada uno de los conjuntos volcánicos. Se ha recopilado una cantidad importante de bibliografía referida a aspectos morfométricos de volcanes monogénicos, y a partir de ésta e introduciendo las especificidades de los volcanes basálticos monogénicos de Timanfaya, se ha elaborado una ficha morfométrica que incluye más de una treintena de parámetros tanto referidos a los rasgos estructurales del volcán como a los derivados de los procesos de desmantelamiento post eruptivo (índice de frecuencia y de drenaje, etc.). Asimismo, se ha recopilado un volumen importante de bibliografía referida a los rasgos geológicos del Parque Nacional, fundamentalmente sobre los aspectos de petrología y geoquímica, tipos de productos, etc. En las campañas de campo se han ido realizando observaciones específicas de determinados conjuntos volcánicos.



**Figura 2.** Modelo cualitativo para la oscilación diurna del campo eléctrico: 1 lapilli superficial, 2 nivel saturado, 3 fracturas por las que asciende el gas, 4 reservorio auto sellado, 5 escapes de gas, 6 interacción con los niveles superiores, 7 oscilación campo eléctrico, 8 enjambre sísmico asociado a la ruptura del sello, 9 difusión de gas, 11 reinicio del proceso de sellado, 12 amplitud mínima de la oscilación.

**Figure 2.** Qualitative model of the electric field diurnal oscillation: 1 superficial lapilli; 2 saturated level; 3 fractures where ascending gases; 4 auto-sealed reservoir; 5 gas escapes; 6 zone of interaction with superior levels; 7 electric field oscillation; 8 seismic swarm associated to the seal rupture; 9 gas diffusion; 11 reset of the sealed process; 12 minimum amplitude of oscillation.



**Figura 3. a)** Montaje de la electrónica y panel solar de la estación sísmica autónoma de Timanfaya. **b)** Aspecto de la estación sísmica una vez completada su instalación.

**Figure 3. a)** Assembling the seismic station (electronics and solar panel) in Timanfaya National Park. **B)** Seismic station in operation.

Se ha obtenido toda la información morfológica referida a cráteres, formas de conos, modelado posteruptivo, dimensiones, relaciones cronoestratigráficas, etc. que han sido volcadas en formato SIG en el que se integra la elaboración de la cartografía geomorfológica y la elaboración de las unidades morfológicas del Parque Nacional, a escala 1.5000.

Se ha correlacionado la actividad de los distintos centros eruptivos, reconocida en el campo y en la fotografía aérea, con los datos de las crónicas documentales. Ello ha permitido la definición de las diferentes etapas eruptivas y los rasgos dinámicos de los conjuntos volcánicos analizados.

Se ha completado la recopilación de fuentes históricas referentes a la erupción de Timanfaya. Es muy relevante el hallazgo de la información gráfica que sirvió para la copia del mapa que se halla en el Archivo de Simancas. Se ha digitalizado la información histórica disponible para incorporarla a la base de datos.

En cada campaña de campo, se han señalado los procesos de deterioro que afectan a áreas determinadas del Parque Nacional. Muchos de ellos están asociados a una fragilidad extrema de las formas volcánicas del Parque (depósitos de spatter, acumulaciones de lapilli, estructuras lávicas en tubos y canales, etc.) y otros a usos indebidos (recolección de material volcánico, visitas masivas en los límites del Parque, etc.).

### ***Campañas de campo***

Se han realizado seis campañas de campo. Los lugares visitados y los principales resultados obtenidos, se comentan a continuación:

1) Reconocimiento sistemático de los principales elementos que caracterizan a los sistemas volcánicos del conjunto eruptivo de Halcones, del sector septentrional de Pico Partido y del área de Los Miraderos – Charco de Lava – Corazoncillo, pertenecientes a la erupción de 1730-36.

### **Playa del Paso**

Reconocimiento y estudio de uno de los volcanes más emblemáticos del P.N. Timanfaya (declarado

Monumento Natural por la ley 12/1994 de Espacios Naturales Protegidos de Canarias). El edificio se encuentra intensamente desmantelado, tanto por procesos de dinámica marina antigua como por procesos de vertientes aún activos en la actualidad. El islote se encuentra rodeado por un mar de lava en el que se observan unidades estratigráficas diferenciadas con morfologías particulares. También se han analizado los caracteres de la morfología litoral de las coladas de 1730-36, en el entorno de la Playa del Paso.

### **Sector septentrional de Pico Partido**

La complejidad morfológica, eruptiva y envergadura de Pico Partido sólo ha permitido el recorrido de su parte norte. En todo este sector, se reconocen varios edificios volcánicos, imbricados y adosados, de gran riqueza volcanológica estructural y con multitud de elementos volcanológicos con variaciones escalares significativas. Fundamentalmente asociados a los flancos y en los sectores intervolcánicos de debilidad, se asocia todo un conjunto de hornitos que se diferencian no sólo en función de su envergadura sino también de su génesis (hornitos con y sin raíz, asociados a tubos volcánicos).

Uno de los rasgos más característicos de este sector, es la intensa degradación de los elementos más significativos como consecuencia del libre acceso y visitas incontroladas. La proliferación de sendas sobre materiales piroclásticos ha favorecido desplomes parciales de los flancos de los conos y una aceleración de los procesos de vertientes. Asimismo, se constata la desaparición de micromorfologías por agresión antrópica. Se destaca este hecho al producirse en una zona de gran significado volcanológico de la gran erupción de Timanfaya de 1730-36, incluido en el Parque Natural de los Volcanes pero no integrado en los límites actuales del Parque Nacional de Timanfaya.

### **Corazoncillo**

Constituye un sistema volcánico relativamente independiente dentro de los grandes sistemas volcánicos que configuran Timanfaya. Aunque se trata de un sistema de conos volcánicos imbricados espacialmente, los caracteres morfodinámicos

que los definen presentan múltiples matices genéticos, estructurales, dinámicos y morfológicos.

*Charca de lava*: Gran cráter circular ( $\approx 400$  m  $\varnothing$ ) que aloja en su interior una charca de lava de notable singularidad morfológica.

*Conjunto escoriáceo*: Se trata de un edificio volcánico complejo con seis centros diferentes de emisión que han dado lugar a una estructura volcánica construida a partir de escorias, plastrones y jirones de lava de gran tamaño. *Corazoncillo*: Es uno de los volcanes con mayor génesis de identidad del P.N. de Timanfaya. Morfológicamente, corresponde a un gran cráter en embudo cuyas paredes internas muestran una clara estratificación que pone de manifiesto la existencia de, al menos, tres grandes fases de construcción. Estas fases indican variaciones en el grado de explosividad y en la dinámica de la erupción. A la complejidad morfoestructural se suma la derivada de los procesos actuales de modelado.

2) Reconocimiento sistemático y exhaustivo de los principales elementos morfológicos que caracterizan a los sistemas volcánicos del sector meridional de Pico Partido, Montaña del Señalo y su orla basal de hornitos, Caldera Colorada, litoral lávico occidental del Parque Nacional y lavas de Masdache-Cueva de Los Naturalistas.

### **Montaña del Señalo-orla basal de hornitos**

Junto con Pico Partido, constituye el sector sureste del conjunto eruptivo Pico Partido-Montaña del Señalo. Al igual que el primero, Montaña del Señalo corresponde a un volcán monogénico de naturaleza basáltica que desarrolló comportamientos estrombo-efusivos y está construido a partir de materiales de proyección aérea (lapilli, escorias y algunas bombas y cenizas) que aparecen soldados hacia la parte superior del cono coincidiendo con los cráteres sumitales. Sin embargo, lo más interesante desde el punto de vista morfológico es la orla basal de hornitos ( $>10$ ) que constituyen puntos de salida de lavas pahoehoe muy fluidas y aa que alcanzan largos recorridos.

### **Sector Meridional de Pico Partido**

Se señalan los rasgos morfológicos que caracterizan a la charca lávica de inundación y represa-

miento, ubicada en su parte superior y la de todos los sistemas de hornitos, coneletes escoriáceos y bocas efusivas responsables de la emisión de los caudales de lava sumitales de Pico Partido.

La charca constituye un mar de lavas alimentado tanto desde los sistemas de hornitos del interior de la misma como desde los coneletes ubicados fuera. Existen varias bocas ( $>10$ ) todas ellas constituidas por la acumulación de escorias soldadas, jirones y plastrones que edifican una construcción escoriácea en la vertical, muy frágil, con varias bocas y canales de salida de lavas. Estos sistemas de hornitos constituyen verdaderos "laboratorios" morfológicos y estéticos.

### **Caldera Colorada**

Montaña Colorada, junto con la de Las Nueces, parecen corresponder a las últimas etapas de la erupción del siglo XVIII de Lanzarote. Se trata de un edificio volcánico de dinámica estrombo-efusiva, constituido por materiales de proyección aérea (lapilli, escorias soldadas, bombas, jirones, etc.) que emitió abundantes caudales de lava. La importancia y originalidad de esta construcción volcánica está en relación con la charca lávica de su cráter anular superior.

### **Litoral occidental del Parque Nacional de Timanfaya**

Este itinerario se caracteriza por su extremada dureza dado su longitud ( $>12$  km), características morfológicas superficiales (malpaíses y lajiales de la erupción de 1730-36) y rasgos topográficos. A lo largo de los 12 kilómetros se han cartografiado las diferentes unidades lávicas identificadas y reconocido su morfología superficial (pahoehoe ricas en formas, lavas en bolas, aa, de transición, etc.), así como toda la gama de microformas que las acompaña (tubos, canales, muros, losas, etc). Al mismo tiempo, se estudiaron los procesos y las formas generadas por el modelado litoral sobre las lavas recientes.

### **Campo lávico de Masdache-Cueva de Los Naturalistas**

Las lavas de Masdache pertenecen a la erupción del volcán de Las Nueces correspondiente a las

etapas finales de la erupción de 1730-36. Este edificio volcánico desarrolló comportamientos eruptivos eminentemente efusivos, cuyas lavas recorrieron más de 20 km, dando lugar al campo lávico de Masdache y al tubo volcánico de la Cueva de Los Naturalistas. El campo se caracteriza por presentar, en líneas generales, una morfología superficial homogénea de tipo pahoehe con toda su gama de formas superficiales (tripas, cordadas, digitaciones, microtubos, hundimientos, etc.) en la que es posible individualizar varias unidades lávicas superpuestas que llegan a alcanzar varios metros de altura (Cueva de Los Naturalistas) con potencias que oscilan entre los 25-50 cm cada una.

La Cueva de Los Naturalistas corresponde a un tubo volcánico complejo generado durante la erupción de 1730-36. Posee varios tubos que van en direcciones opuestas, presenta hundimientos parciales que constituyen los jameos de entrada y de salida y disponen de numerosas microformas propias de este tipo de procesos (estalactitas, estalagmitas, goterones, cornisas, etc.).

3) Reconocimiento sistemático de los principales elementos que caracterizan a los sistemas de hornitos localizados al oeste del islote de Hilario, los edificios volcánicos de Las Calderas Quemadas, Montaña Rajada y Montaña Miraderos-Caldera Corazoncillo-Montaña Junquera-Montaña Señalo-Pico Partido y las lavas entre Montaña Caldereta y Caldera Blanca, pertenecientes, casi todos, a la erupción histórica de Timanfaya y encuadradas dentro del Parque Nacional.

#### **Hornitos al oeste del islote Hilario.**

El estudio de los depósitos tipo spatter puso de manifiesto la importancia volcanológica de este tipo de morfologías tanto en el conjunto de la erupción, por el importante volumen de lavas emitidas, como en el Parque dada su extrema fragilidad, lo que es necesario tener en cuenta a la hora de planificar y gestionar cualquier tipo de actuación sobre los mismos.

El reconocimiento y estudio de uno de los sistemas de hornitos más emblemáticos del Parque Nacional tiene como objetivo parcial intentar es-

tablecer una clasificación geomorfológica de las estructuras volcánicas de este tipo e intentar cartografiar las lavas emitidas desde los mismos, con el fin de ratificar la hipótesis de que se trata, no sólo de conductos de desgasificación sino de las bocas de emisión lávica más importantes de la erupción histórica de Timanfaya.

#### **Calderas Quemadas**

La nidificación de una especie emblemática del Parque (halcón de Berbería) en una de ellas, determinó que sólo se visitaran tres de las cuatro Montañas del Fuego.

Las Calderas Quemadas constituyen una alineación volcánica ubicada entre dos de los principales conjuntos eruptivos de Timanfaya, Montaña Rajada y Macizo de Timanfaya. En las tres construcciones recorridas se identifican caracteres comunes: se trata de volcanes muy escoriáceos, con cráteres múltiples la mayoría de ellos (anulares, en herradura, etc.) de dinámicas mixtas y de morfología compleja, en los que se reconocen hornitos, bocas secundarias, charcas lávicas de superficies pahoehe, grietas, etc., todas ellas afectadas por los procesos de gravedad en la base de los dorsos y al pie de las paredes internas de los cráteres, puntualmente por fenómenos de escorrentía superficial con efectos morfológicos de detalle y, sobre todo, por procesos de eolización cuyas huellas se han visto incrementadas por los efectos de la tormenta tropical Delta de diciembre de 2005. En conjunto, se trata de edificaciones escoriáceas con importantes caudales de lava y de naturaleza muy frágil.

#### **Montaña Rajada**

Constituye uno de los grandes elementos volcánicos que configuran Timanfaya. Se trata de un conjunto eruptivo con múltiples edificios y cráteres embutidos unos en otros de comportamientos diferenciados (emisión lávica, explosivos y mixtos) que generan una construcción morfológica y dinámicamente compleja, donde es posible reconocer diversas formas estructurales (charcas de lava, edificios de piroclastos, hornitos, etc.) y de modelado (barranquillos, ripples, taludes escoriáceos de gravedad, nebkas, etc.) e

identificar varias fases de comportamiento dinámico específico.

### **Miraderos-Corazoncillo-Junquera-Señalo-Pico Partido**

La mayor parte de este sector ya se había estudiado en campañas anteriores, sin embargo, tras la tormenta Delta ha sido necesario volver a recorrerlos con el fin de detectar los efectos que la misma ha provocado sobre los lapilli de cada uno de estos conjuntos eruptivos. Los cambios reconocidos han sido significativos, por ejemplo, en el flanco NE del volcán Miraderos se han acentuado los ripples que ahora alcanzan varias decenas de centímetros de alto por varias decenas de metros de longitud, en el flanco meridional de este mismo edificio, en el contacto con el Volcán de Las Grietas, el barrido prácticamente total de los lapilli ha borrado los incipientes ripples y/o los taludes escoriáceos basales, previamente cartografiados.

Estos datos, junto con los obtenidos de los otros volcanes de esta ruta, han permitido apreciar la enorme eficacia morfogenética del viento sobre los productos de proyección aérea, de lo que se desprende la elevada fragilidad y dinámica del paisaje volcánico de Timanfaya, hasta el punto que presenta una morfología de detalle distinta tras un evento puntual de connotaciones excepcionales como la tormenta Delta.

También se han identificado varias estructuras inmersas en el mar de lavas al sureste de Montaña de las Junqueras, que constituyen restos de edificios volcánicos.

### **Coladas históricas entre Caldereta y Caldera Blanca**

Rodeando y a través del collado que generan los volcanes de Caldera Blanca y Montaña Caldereta, discurrieron numerosos derrames lávicos procedentes de la erupción de Timanfaya y de los cuales muchos de ellos están dentro de los límites actuales del Parque Nacional. Por este motivo fue necesario recorrerlos, caracterizarlos y cartografiarlos.

### **Efectos de la tormenta tropical Delta**

Cambio sustancial de la distribución de las formas eólicas, lo que ha obligado a la realización de una nueva cartografía de las mismas. Durante la tormenta se produjo un cambio entre los sectores eolizados fuertemente, con pérdida del recubrimiento superficial de lapilli y exposición de los niveles endurecidos, y aquellos donde se acumularon gran parte de los lapilli eolizados por el viento. Aparición de nuevos procesos: erosión de los conos y formación de *debris flows*.

4) Reconocimiento sistemático y exhaustivo de los principales elementos morfológicos que caracterizan a los sistemas volcánicos de Montaña de Las Lapas, Montaña Colorada, Caldera Blanca, Montaña de las Nueces, Caldera de la Rilla, Hornitos Camelleros y conjunto lávico del canal principal del volcán Chinero.

### **Montaña de las Lapas y Montaña Roja**

Ambos conjuntos eruptivos pertenecen a los primeros y a los últimos estadios de la erupción de Timanfaya de 1730-36, pero están fuera de los límites administrativos del Parque Nacional, quedando incluidos en el Parque Natural de los Volcanes de Lanzarote.

### **Caldera Blanca**

Constituye el edificio volcánico monogénico de mayores dimensiones de Canarias. Se procedió al examen detenido de todas las características volcanológicas, morfológicas y eruptivas de este volcán y se han cartografiado sus principales formas (taludes, barrancos, áreas de acumulación etc.). No constituye un área especialmente frágil.

### **Montaña de las Nueces y Caldera Santa Catalina**

Son dos conjuntos de la erupción de Timanfaya. En ambos predomina el carácter escoriáceo de los edificios, pero en el de las Nueces destaca la complejidad de sus diferentes bocas eruptivas y el de sus emisiones lávicas. En Caldera Rilla o Santa Catalina, lo más llamativo es su cráter circular y los rasgos morfológicos del mismo. Constituyen espacios muy frágiles.

### **Hornitos Camelleros**

Se recorrió el sendero de los hornitos de camelleros de la erupción de Timanfaya e incluidos dentro del Parque Nacional. Se identificó cada uno de ellos (>34 hornitos), se describieron sus rasgos morfovolcánicos y se cartografiaron. De esta zona destaca la elevada complejidad y fragilidad de los depósitos de spatter y el de las coladas de lava.

### **Canal lávico principal del volcán Chinero**

Este volcán corresponde a la erupción de 1824 y está incluido dentro del Parque Nacional. Este itinerario fue de unos 3 km sobre coladas pahoehoe y malpaís. Durante el recorrido se cartografiaron las variaciones morfológicas de detalle de las lavas emitidas por este volcán y se describieron las principales características de la morfología superficial. De todo el recorrido destaca la enorme fragilidad de las lavas pahoehoe y el difícil recorrido de los malpaíses.

5) Reconocimiento sistemático y exhaustivo de los principales elementos morfológicos que caracterizan a los sistemas volcánicos de Montaña de Mazo, Sistema de Hornitos del Manto de la Virgen-Islole Hilario, Campo de Lavas del sector Manto de la Virgen-Punta Cochino-Playa de la Madera, Edificios Volcánicos de Las Calderas Quemadas, desde el Laboratorio a Caldera Rajada.

### **Montaña de Mazo**

El conjunto volcánico de Mazo es emblemático dentro de la erupción histórica de 1730-36, ya que existen investigadores que proponen que no pertenece a la erupción, frente a otros que la incluyen. Este hecho hace necesario un estudio morfológico detallado de la estratigrafía de los materiales piroclásticos de las coladas de lava para poder encuadrar el edificio eruptivo dentro o no de los generados por el paroxismo histórico. Se trata de un volcán con doble cráter, muy afectado por procesos de erosión eólica y huellas de alteraciones geotérmicas. Por lo reconocido durante la campaña de campo, pero sobre todo por la disposición estratigráfica de las coladas de lava respecto a

otras claramente históricas de volcanes próximos y a las del Chinero (1824), la hemos incluido dentro de los volcanes nacidos en 1730-36.

### **Sistema de Hornitos de Manto la Virgen-Islole Hilario**

Se trata de un sector en el que existen numerosos hornitos con raíz, hornitos lávicos (driblet-cones) sin raíz y numerosas terrazas lávicas con abundantes emisiones de lavas, similares a las descritas por otros autores para erupciones históricas de volcanes como el Etna.

### **Campo de lavas hornitos Manto la Virgen-Punta Cochino-Playa Madera**

Se trata de una superficie continua de lavas pahoehoe no muy frágiles y de fácil acceso (por el camino), donde se reconocen algunos coneletes escoriáceos, canales de lavas, jameos y tubos y numerosas terrazas de lavas (nunca antes descritas en Timanfaya). El trayecto por el litoral permitió analizar con más detalle los acantilados generados en las lavas históricas, las playas incipientes que se están formando y observar las pequeñas islas bajas, también descritas por primera vez para Timanfaya.

### **Dorsos de las Calderas Quemadas-Montaña Rajada**

Este recorrido completa el realizado en su día por el interior de los cráteres de Las Calderas Quemadas. Se describieron los depósitos de piroclastos (lapilli, escorias, spatter, etc.) que configuran los dorsos y se cartografió todo el sistema de fracturas del sector que va desde el Laboratorio, en la base de Timanfaya, hasta Montaña Rajada.

## **SIG TIMANFAYA**

Se ha trabajado con el programa Arcview como editor del SIG, con ortofotos 1:25.000 de Timanfaya e imágenes satélite a resolución 25 metros gratuitas del programa de mapas de satélite I & CLC 2000 de la UE.

*Confección de una base de datos de los edificios volcánicos en la superficie cubierta por la erupción de 1730 a 1736*

- Diseño de una ficha para cada tipo
- Almacenamiento en ficheros EXCEL
- Acotación del área de cada edificio

Las tareas desarrolladas en este apartado son:

- Descripción topográfica y geomorfológica de todos los edificios volcánicos
- Clasificación del tipo de cada volcán (cono, cráter y volcán desmantelado)

Para describir los volcanes se ha empleado un modelo digital topográfico con precisión horizontal de 25 metros y de 1 metro en la vertical. A continuación, se adjunta la leyenda de las fichas de los volcanes y el método empleado en cada característica para obtenerlas:

### Conos

Nombre	Topónimo o en su ausencia c + altitud del punto mas alto.
Erupción	? Previa a 1730. T1 1730 – 1736. T2 1824.
Longitud	Coord. X UTM del punto más alto del volcán (Km. precisión 25 metros).
Latitud	Coord. Y UTM del punto más alto del volcán (Km. precisión 25 metros).
Altitud	Altura desde el nivel del mar del punto más alto (m)
Altitud mínima de base	Altura mínima donde es reconocible la forma del cono en la forma de las curvas de nivel (m.)
Altitud máxima de base	Curva de nivel más baja que se cierra alrededor del edificio volcánico (m).
Altura	Altitud – Altitud del punto de la base más cercano al punto culminante donde cambia la pendiente debido al inicio del edificio volcánico (m).
Diámetro basal mayor	Longitud en el plano de la línea más larga posible que pasa por el centro del volcán limitada por ambos extremos por la curva de nivel más baja que se encierra sobre si misma alrededor del volcán (m).
Diámetro basal menor	Longitud en el plano de la línea más corta posible que pasa por el centro del volcán limitada por ambos extremos por la curva de nivel más baja que se encierra sobre si misma alrededor del volcán (m).
Eje menor del cono	Dirección respecto al norte y medida en sentido horario de la línea mas corta que pasa por el centro del volcán limitada por la curva de nivel mas baja que se encierra sobre si misma alrededor del volcán (grados).
Volumen	Volumen del volcán limitado por debajo por una superficie plana a una altura equidistante de la altura máxima y mínima de la base del volcán, calculado mediante el método de Simpson (hm <sup>3</sup> ).
Área	Área de la superficie topográfica del volcán, limitada su forma por encima de una superficie plana a una altura equidistante de la altura máxima y mínima de la base del volcán. Se calcula mediante aproximación a la Integración (Km <sup>2</sup> ).
Longitud de pendiente	(Altura máxima - altura mínima) / sen pendiente (m).
Pendiente	Media de 5/6 muestras de pendiente máxima del cono del volcán tomadas en un mapa de pendientes de la zona (grados y porcentaje).
Elongación	$1 + [[(\text{diámetro Máximo})^2 + (\text{diámetro Mínimo})^2] / (\text{diámetro Máximo})^2]^{1/2}$ .

### Cráteres y volcanes desmantelados

Es igual que para los conos, añadiendo las características:

Altitud mínima	Altura desde el nivel del mar del fondo del cráter más profundo del volcán.
Radio mayor	Distancia máxima desde el punto más profundo del edificio al borde del cráter que lo contiene (m).
Radio menor	Distancia mínima desde el centro del punto más profundo del edificio al borde del cráter que lo contiene (m).
Dirección punto culminante	Dirección desde el norte medida en sentido horario del vector que va desde el punto mas profundo del edificio al punto mas alto del mismo (grados).
Dirección de la abertura	Dirección desde el norte medida en sentido horario del vector que va desde el punto mas profundo del edificio al punto de menor altura del borde del cráter (grados).

Recopilación bibliográfica de datos de análisis geoquímicos y petrológicos realizados en muestras de roca del Parque. La base de datos tiene como soporte formato EXCEL. Los análisis numéricos y sus correspondientes representaciones gráficas están enlazados a archivos de imagen. (Figura 4)

### Otras actividades no previstas e incorporadas al proyecto

#### *Estudios de las alteraciones hidrotermales en lavas de la erupción de 1730-36*

Durante las campañas de campo en el Parque Nacional de Timanfaya se recogieron una serie de enclaves que aparecían tanto sueltos como contenidos entre las lavas de la erupción de 1730-36. Estos enclaves fueron examinados en primer lugar con láminas delgadas pudiéndose identificar desde el principio dos tipos distintos de enclaves: el primer grupo de enclaves se clasificaron petrológicamente como calizas, lutitas y areniscas, mientras

que el segundo grupo mostraba mayor complejidad presentando texturas de reemplazamiento y composiciones cuarcíferas. Los enclaves sedimentarios correspondían a fragmentos de calizas y areniscas en su mayoría, donde se podían observar texturas de recristalización diagenética y fragmentos fósiles de espongiarios en las calizas. Petrológicamente se podían clasificar como calizas bioclásticas y calizas micríticas, sin embargo, las areniscas presentaban esencialmente cuarzo en su composición.

El análisis por difracción de rayos X del segundo tipo de enclaves, reveló la presencia de fases minerales muy características como cuarzo y ópalo, por lo que, a priori, indicaba un origen muy distinto a los anteriores sedimentarios. Del estudio textural se dedujo que podría deberse a un proceso de alteración más que auténticos enclaves, de manera que se produciría un reemplazamiento de minerales en la roca original dado que la composición silíceo afectaba a los basaltos (CARMONA *et al.* 2009).



Figura 4. Imagen de la base de datos. Se observan los principales centros de emisión de la erupción 1730-36.

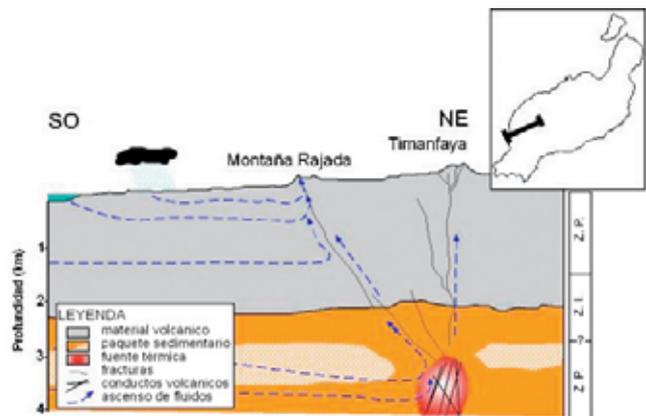
Figure 4. Data base image. The main emission centers of the 1730-36 eruption can be observed.

El origen de los enclaves sedimentarios, según los datos disponibles del sondeo para la evaluación geotérmica Lanzarote-1 de 2.700 m de profundidad (SÁNCHEZ GUZMÁN & ABAD 1986), estaría a partir de los 2598 m donde se localiza el final de los materiales volcánicos de la isla y el inicio de un paquete sedimentario de 2 km de espesor (BANDA *et al.* 1981). Según los testigos recogidos en este sondeo los mismos tipos petrológicos han sido identificados por lo que parece indicar que estos enclaves procederían del basamento sedimentario por debajo de la isla. Sin embargo, el origen de la alteración reconocida en los basaltos podría deberse a la circulación, en profundidad, de fluidos hidrotermales capaces de disolver y transportar grandes cantidades de sílice en forma coloidal. En superficie este proceso se expresaría con la surgencia de aguas cloruradas alcalinas saturadas en sílice a temperaturas superiores a 175°C (LYNNE *et al.* 2005), por lo que tras el descenso de la temperatura por debajo de 100°C y el posterior equilibrio con la roca encajante empezaría el depósito del ópalo y posteriormente del cuarzo (CARMONA *et al.* 2009).

La existencia de este tipo de alteración indica la presencia, al menos temporal, de células transportadoras de fluidos calientes en la isla, constatable hoy en día por las zonas de anomalías geotérmicas del Parque Nacional de Timanfaya, de lo que se deduce que estas zonas geotérmicas habrían sido más abundantes en el pasado o que posiblemente las que originaron los enclaves hidrotermales, se encuentren ahora auto selladas por el mismo proceso de precipitación mineral bajo las lavas de la erupción de Timanfaya ya que no se observa ningún indicio de actividad geotérmica (CARMONA *et al.* 2009).

Del estudio de la microsismicidad en Lanzarote asociada a perturbaciones del campo geoelectrico, se obtuvieron datos de la variación de la presión de salidas de gases en un sondeo realizado en el Parque Nacional de Timanfaya, al comparar estos datos con las precipitaciones acontecidas se observaron ciertas correlaciones que, a priori, sugerían la presencia de un sistema hidrológico superficial efímero y discontinuo en el tiempo (CARMONA Y GARCÍA, 2009). Por lo tanto, tenemos, por un lado, un doble sistema hi-

drológico (superficial y profundo) que se manifiesta en superficie con las anomalías geotérmicas. Este sistema se origina en profundidad y asciende a la superficie donde se uniría al sistema superficial generando en conjunto un sistema geotérmico responsable de las anomalías observadas en superficie, de los depósitos hidrotermales y posiblemente de las mineralizaciones de sulfuros en profundidad (Figura 5).



**Figura 5.** Esquema idealizado de la posible estructura hidrológica profunda de Lanzarote con las zonas permeables (Z.P.) e impermeables (Z.I.) tomadas del sondeo Lanzarote-1: en las zonas permeables el agua marina penetra, en las proximidades de la fuente térmica adquiere las condiciones necesarias para disolver la sílice y asciende a través de las fracturas hasta la superficie. Durante su ascenso, tanto de profundidades intermedias como procedente del sistema hidrológico superficial se añaden más aguas, configurando de esta manera el doble sistema hidrológico de la isla.

**Figure 5.** Deep hydrologic structure idealized scheme of Lanzarote Is. The permeable (Z.P.) and impermeable (Z.I.) zones have been taken of the Lanzarote-1 drill: in the permeable zones penetrates the sea water, close to the thermal source the need conditions to dissolve the silica are reaching then it could be possible the ascent to the surface across the fractures. During its ascent, more water is added from both intermediate depths and superficial hydrologic system, configuring the double hydrologic system of the island.

## CONCLUSIONES

Los objetivos planteados en el proyecto se han cumplido satisfactoriamente, destacando:

Realización del catálogo sísmico.

Mejora del instrumental sísmico.

Puesta en marcha de nuevas técnicas de vigilancia electromagnética.

Estudio de la relación Sismicidad – Precipitación.

Establecimiento de un modelo doble del sistema hidrológico.

Realización de una base de datos y catálogo digitalizado de las principales unidades de relieve del Parque Nacional de Timanfaya.

Estudio sobre los efectos de la tormenta tropical Delta.

Estudios de enclaves de lavas de la erupción de 1730-36.

Hallazgo de la información gráfica que sirvió para la copia del mapa de la erupción de 1730 a 1736, que se halla en el Archivo de Simancas.

Toda esta información está preparada para su integración en el Sistema de Información Geográfica del Parque Nacional de Timanfaya, completando la actual documentación, esencialmente biológica.

### **Agradecimientos**

Esta investigación no hubiera podido llevarse a cabo sin la colaboración del Director y Guías del P. N. de Timanfaya y de Orlando Hernández, Jaime Arranz y Joaquín Naverán del Excmo. Cabildo de Lanzarote.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ARAÑA, V., ORTIZ R. & YUGUERO, J. 1973. Thermal anomalies in Lanzarote (Canary Islands). *Geothermics*, 2: 73-75.
- ARAÑA, V., DIEZ-GIL, J. L., ORTIZ, R. & YUGUERO, J. 1984. Convection of geothermal fluids in the Timanfaya volcanic area (Lanzarote Canary Islands). *Bulletin of Volcanology*, 47, 3: 667- 677.
- BANDA, E., DAÑOBEITIA, J. J., SURINACH, E. & ANSORGE, J., 1981. Features of crustal structure under the Canary Islands. *Earth and Planetary Science Letters*, 55 (1): 11-24.
- CARMONA, J., ROMERO, C., DÓNIZ, J. & GARCÍA, A. 2009. Las alteraciones silíceas de las lavas de Montaña Señalo, erupción de Timanfaya (1730-36) (Lanzarote, Islas Canarias). *Estudios Geológicos* 65 (1). doi: 10.3989/egeol.09651.050.
- CARMONA, J., GARCÍA, A. 2009. Nuevas evidencias de un doble sistema hidrológico en Lanzarote (Islas Canarias). *Estudios Geológicos* (enviado).
- CARRACEDO, J.C. & RODRÍGUEZ BADIOLA, E. 1991. Lanzarote. La erupción volcánica de 1730. Servicio de Publicaciones del Excmo. Cabildo Insular de Lanzarote. Las Palmas de Gran Canaria. 183 pp.
- CARRACEDO, J.C. & RODRÍGUEZ BADIOLA, E. 1993. Evolución geológica y magmática de la isla de Lanzarote (Canarias). *Rev. Acad. Canar. Ciencias*, 4: 25-58.
- CARRACEDO, J. C., RODRIGUEZ BADIOLA, E. & 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, Issues 1-4: 239-250.
- DÍEZ GIL, J.L., ARAÑA, V., ORTIZ, R. & YUGUERO, J. 1987. Stationary convection model for heat transport by means of geothermal fluids in post eruptive systems. *Geothermics*, 15: 77-87.
- ENDO, E.T. & MURRAY, T. 1991. Real-time Seismic Amplitude Measurement (RSAM): a volcano monitoring and prediction tool. *Bulletin of Volcanology*, 53, no. 7: 533-545.
- FELPETO, A., ARAÑA, V., ORTIZ, R., ASTIZ, M. & GARCÍA, A. 2001. Assessment and modelling of lava flow hazard on Lanzarote. Canary Islands. *Natural Hazards*, 23: 247-257.
- FERNÁNDEZ NAVARRO, L. 1919. Las erupciones de fecha histórica en Canarias. *Memorias de la Real Sociedad española de Historia Natural*. XI-2: 37-71.
- FÚSTER, J.M., FERNÁNDEZ SANTÍN, S. & SAGREDO, J. 1968. *Geología y Volcanología de las Islas Canarias, Lanzarote*. Instituto Lucas Mallada. CSIC. Madrid. 239 pp.
- GARCIA, A. 1985. Modelos corticales a partir de sondeos magnetotélúricos. Aplicación a zonas volcánicas activas. Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense de Madrid. 193 pp.

- GARCÍA CACHO, L. & ROMERO, C. 2000. Fenómenos hidromagmáticos en Lanzarote. En: Mar Astiz y Alicia García (Edit): Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica. (Edición 2000). Servicio de Publicaciones del Excmo. Cabildo Insular de Lanzarote, ISBN 84-87021-74-3: 153-162.
- LYNNE, B., CAMPBELL, Y., KATHLEEN A., MOORE, J.N. & BROWNE, P.R.L. (2005). Diagenesis of 1900-year-old siliceous sinter (opal-A to quartz) at Opal Mound, Roosevelt Hot Springs, Utah, U.S.A. *Sedimentary Geology* 179(3-4): 249-278.
- MITCHELL THOMÉ, R.C. 1981. Vulcanicity of historic times in the middle Atlantic Islands. *Bulletin of Volcanology*, 44-1: 57-69.
- ORTIZ, R., ARAÑA, V. & VALVERDE, C. 1986. Aproximación al conocimiento del mecanismo de la erupción de 1730-1736 en Lanzarote. *Anales de Física*, 82: 127-142.
- ORTIZ, R., GARCÍA, A. & ASTIZ, M. 2001. Instrumentación en Volcanología. Serie Casa de Los volcanes, 8: 347 pp.
- ORTIZ, R., H. MORENO, A. GARCÍA, G. FUENTEALBA, M. ASTIZ, P. PEÑA, N. SÁNCHEZ & M. TÁRRAGA 2003. Villarrica volcano (Chile): characteristics of the volcanic tremor and forecasting of small explosions by means of a material failure method. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 128: 247-259.
- ROMERO, C., MARTÍNEZ DE PISÓN, E., QUIRANTES, F. & LUIS, M. 1981. Morfología del sistema eruptivo de Timanfaya, Montañas del Fuego y Pico Partido. *Anuario del Departamento de Geografía*, 2. Universidad de La Laguna. La Laguna: 64- 85.
- ROMERO, C. 1987. Comentario al mapa geomorfológico de la isla de Lanzarote. *Revista de Geografía Canaria*, 2. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de La Laguna. Tenerife: 151-172.
- ROMERO, C. 1991<sup>a</sup>. Distribución y articulación espacial del Volcanismo Histórico Canario. *Revista de Geografía Canaria*. Secretariado de Publicaciones Universidad de La Laguna: 141-161.
- ROMERO, C. 1991b. Las manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario. *Consejería de Política Territorial. Gobierno Autónomo de Canarias (2 volúmenes)*: 1399 pp.
- ROMERO, C. 1991c. La erupción de Timanfaya (Lanzarote-1730-1736). Análisis documental y estudio geomorfológico. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de La Laguna. La Laguna. Tenerife.
- ROMERO, C. 1997. Crónicas documentales sobre las erupciones de Lanzarote. Fundación Cesar Manrique. Colección Torcusa. Madrid.
- RUMEU DE ARMAS, A. & ARAÑA, V. 1982. Diario pormenorizado de la erupción volcánica de Lanzarote en 1824. *Anuario de Estudios Atlánticos*, 28: 15-61.
- TÁRRAGA, M., GARCÍA, A., ORTIZ, R., ABELLA, R. & PEÑA, J. 2001. Sanaris Project: A Satellite Network for Natural Risk Monitoring. *Natural Hazards* 23: 417-429.
- SÁNCHEZ GUZMÁN, J. & ABAD., J. 1986. Sondeo geotérmico Lanzarote-1. *Anales de Física*, serie B, 82: 102-109.
- VAN RUYMBEKE, M., VIEIRA, R., ORTIZ, R. & CARBONEZ, M. (1997). Geothermal signals recorded in the Timanfaya area (Lanzarote, Canarias, Spain). *Cahiers de Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie*, 14: 185-194.