

**SE1** *Hierro*  
*El Hierro*  
*Hierro*  
*Hierro*

***Chairpersons:***

Emilio García Ladona  
Joan Martí Molist José Ignacio Badal  
Nicolás José López Ruiz  
Juan Barrado Díaz



## Aurkibidea/Índice/Índice/Index

Función temporal (STF) del terremoto del 8 de Octubre de 2011 (Mw=4.0) en El Hierro (Islas Canarias) <i>Source Time Function (STF) of the earthquake of the 8th October 2011 at El Hierro (Canary Islands)</i> .....	743
<b>C. del Fresno, I. Domínguez Cerdeña, E. Buforn, C. López</b>	
Control de deformaciones en la reactivación y erupción de El Hierro (Islas Canarias, España) 2011-2012 <i>Deformation monitoring of the volcano unrest and eruption of El Hierro (Canary Island, Spain) 2011-2012</i> .....	747
<b>L. García-Cañada, M. A. Cano, M. J. García-Arias, J. Pereda, E. González-Alonso, M. Valdés</b>	
Solución Geoespacial del Instituto Español de Oceanografía a las Campañas en la Erupción del Volcán de El Hierro <i>Geospatial Solution developed by the Spanish Institute of Oceanography after the oceanographic surveys in the El Hierro volcanic eruption</i> .....	753
<b>Hermida N., Pastor E., Rivera J., Arrese B., Tello O., Vargas JL., Acosta J.</b>	



# Función temporal (STF) del terremoto del 8 de Octubre de 2011 ( $M_w=4.0$ ) en El Hierro (Islas Canarias)

## Source Time Function (STF) of the earthquake of the 8th October 2011 at El Hierro (Canary Islands)

C. del Fresno<sup>(1)</sup>, I. Domínguez Cerdeña<sup>(2)</sup>, E. Buforn<sup>(3)</sup> y C. López<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Observatorio Geofísico Central, Insto. Geográfico Nacional. c/ Alfonso XII 3, 28009 Madrid. [cdelfresno@fomento.es](mailto:cdelfresno@fomento.es)

<sup>(2)</sup>Centro Geofísico de Canarias, Insto. Geográfico Nacional. c/ La Marina 20, 2º, 38001 Sta Cruz de Tenerife

<sup>(3)</sup>Dpto. Física de la Tierra I (Geofísica y Meteorología). Universidad Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid

### SUMMARY

On the 8th of October of 2011, an earthquake of local magnitude 4.3 occurred on the South of El Hierro Island ( $M_w=4.0$ ). This event is part of the seismic crisis which preceded and accompanied the volcanic submarine eruption on this area (October 2011 – March 2012). The earthquake took place just 30 h before the onset of the volcanic tremor signal and it was the biggest shock before the start of the eruption. Therefore, it is of great interest the analysis of its rupture process. In this work we present the first results obtained of its source time function (STF). We have used the Empirical Green Function methodology, considering data of five smaller earthquakes of the same crisis as Green functions for the waveform modeling. Results showed a STF duration of 0.3s and a seismic moment of  $9 \times 10^{14}$  Nm, these values are in agreement with results obtained from spectral analysis and with the magnitude of the event.

### 1. INTRODUCCIÓN

El terremoto que tuvo lugar el 8 de octubre de 2011 a las 20:34 h es uno de los sismos más destacables en la crisis sismovolcánica de la Isla de El Hierro 2011-2012. Este sismo fue el de mayor magnitud ( $M_L=4.3$ ) ocurrido antes del comienzo de la erupción submarina.

El foco de este sismo ha sido localizado a 1.5 km al SW de la costa de la isla y a 12 km de profundidad, en una región de alta magnetización que ha sido considerada como posible zona de realimentación magmática de la dorsal S de la isla en estudios anteriores (Blanco-Montenegro, 2008). El terremoto fue sentido ampliamente en toda la Isla de El Hierro y alcanzó una intensidad máxima de V (EMS) en la población costera de La Restinga situada al sur de la isla. (Fuente: Instituto Geográfico Nacional, IGN).

A partir del día en el que ocurre este terremoto se empezó a observar un claro cambio de tendencia en la deformación superficial, indicando el comienzo de la estabilización del sistema. Durante esa misma noche y a lo largo el día siguiente, se registra un enjambre de sismos superficiales ( $1 \text{ km} < h < 6 \text{ km}$ ) de baja magnitud ( $M_L < 1.8$ ) a unos 5km de la costa S de la isla. Una intensa señal de tremor volcánico comenzó a registrarse en todas las estaciones sísmicas de la isla tan solo 30 h después del sismo. Y finalmente, dos días más tarde, el 12 de octubre, se observaron las primeras evidencias de la erupción submarina en la superficie del mar a unos 2 km del sur de la isla (López et al., 2012).

El estudio del proceso de ruptura de este terremoto es de gran importancia para determinar si pudo ser el desencadenante del ascenso del magma hacia la superficie. En este trabajo se presentan los primeros resultados de la función temporal de la fuente sísmica (STF) mediante el método de las funciones de Green Empíricas.

### 2. METODOLOGÍA Y DATOS

Se ha estudiado la función temporal de la fuente sísmica (STF) de este terremoto mediante la técnica de las funciones de Green Empíricas. Esta metodología se basa en el uso de terremotos de magnitud pequeña como funciones de Green (EGF) para la modelización de formas de onda de terremotos de magnitud mayor. Los sismos de menor magnitud aportan a la modelización los efectos de propagación en el medio y de sitio sin ser necesarios modelos teóricos de litosfera que los describan. (Mueller, 1985)

Para este estudio se han utilizado registros de las estaciones de la Red Sísmica Nacional y de la Red de Vigilancia Volcánica (IGN). Se han podido utilizar los datos de 6 de las 9 estaciones distribuidas

en la Isla de El Hierro, se han descartado los datos de las estaciones más cercanas a los epicentros puesto que la distancia entre los hipocentros no es lo suficientemente pequeña frente a las distancias foco-estación como para considerar que los rayos de cada terremoto recorren la misma trayectoria. Por otro lado, en dos de esas estaciones el sismo principal saturó los registros lo que imposibilita la modelización de la forma de onda. De las 6 estaciones utilizadas en este estudio, una de ellas corresponde a un registro de un sensor de banda ancha y el resto a sensores de periodo corto.

Para la elección de los terremotos que puedan hacer las veces de EGF se ha realizado una correlación cruzada de formas de onda de todos los terremotos con  $M_L > 2.5$  anteriores a la erupción. De esta manera se ha determinado una familia de terremotos con forma de onda similar a la del sismo principal. Se han considerado los datos de 6 estaciones y un filtro paso banda 1-4 Hz. Finalmente se han seleccionado los 5 sismos que mejor correlación presentan con el principal ( $> 0.71$ ) y al menos un grado de magnitud menor que el terremoto principal ( $M_L < 3.0$ ). Todos los sismos elegidos tuvieron lugar el día anterior o el mismo día que el sismo principal.

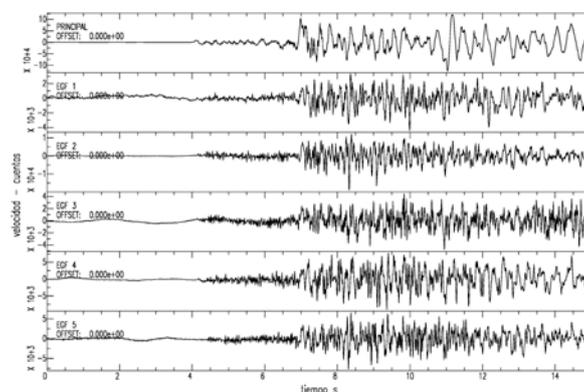


Figura 1 – Registros del terremoto principal y las cinco EGF en la componente EW de la estación de CTIG (Banda Ancha).

Como ejemplo de los datos utilizados, en la Figura 1 se muestran los registros correspondientes al terremoto principal y los cinco sismos elegidos como EGF en la estación de CTIG y la componente EW. Se puede observar la similitud entre las distintas formas de onda.

La deconvolución de formas de onda para la obtención de la STF aparente se ha llevado a cabo en el dominio temporal, utilizando el algoritmo iterativo desarrollado por Ligorria y Ammon (1999). Se han realizado pruebas tanto imponiendo condición de positividad como sin imponerla, observando que esta condición era necesaria para estabilizar las STF aparentes en algunas estaciones. Se ha considerado una ventana temporal de 5 s de duración de ondas S y superficiales en las componentes horizontales. No se han utilizado ondas P porque la baja relación señal/ruido en los sismos pequeños impedía la convergencia a una solución estable.

### 3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Tras la deconvolución de los distintos pares de formas de onda, los resultados en las distintas componentes muestran una sola fuente impulsiva de forma triangular y unos 0.3 s de duración. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de los sismogramas observado y teórico, los espectros observado, teórico y de la EGF y la STF aparente obtenida tras la deconvolución.

La duración de la STF aparente obtenida presenta un valor similar al de terremotos tectónicos del mismo orden de magnitud en otras regiones como Grecia (Courboux et al. 1996) o el S de la Península Ibérica (Buforn et al. 1997).

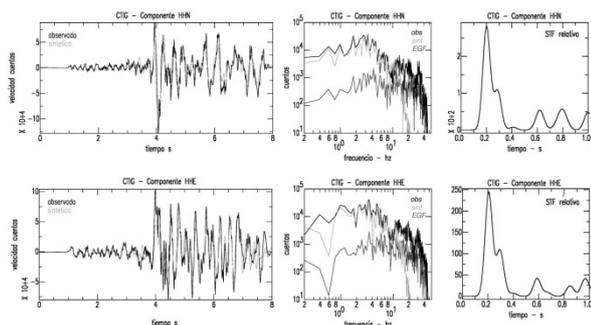


Figura 2 – Izda: Componentes horizontales de los sismogramas observado y teórico en la estación de banda ancha de CTIG utilizando la EGF4. Centro: espectros observado, teórico y EGF. Dcha: STF relativa obtenida en cada componente.

Comparando los resultados obtenidos en las distintas estaciones (Figura 3), se puede comprobar que el resultado obtenido no depende del tipo de sensor utilizado (banda ancha o periodo corto), pero sí se aprecia que hay estaciones en las que la deconvolución presenta un mayor nivel de ruido que en otras (CTAB o CJUL frente a CORC y CTIG). No se aprecia variación de la duración de la fuente en función del azimut, por lo que no se puede hablar de efectos de directividad a partir de los resultados obtenidos en este trabajo.

Tabla 1 – Resultados obtenidos del análisis espectral. (Results obtained using spectral analysis)

Sismo	Fecha	hora	r (km)	M <sub>0</sub> (Nm)	M <sub>w</sub>
Principal	08-10-2011	20:34:48	0.54	1.3x10 <sup>15</sup>	4.0
EGF1	07-10-2011	22:31:18	0.28	9.5x10 <sup>12</sup>	2.5
EGF2	07-10-2011	23:30:35	0.23	3.2x10 <sup>13</sup>	2.9
EGF3	07-10-2011	23:37:00	0.26	1.2x10 <sup>13</sup>	2.7
EGF4	08-10-2011	00:46:00	0.27	3.3x10 <sup>13</sup>	2.9
EGF5	08-10-2011	01:08:00	0.25	1.8x10 <sup>13</sup>	2.8

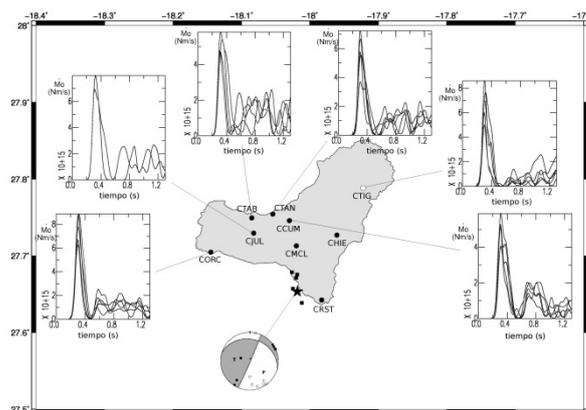


Figura 3 – Distribución de los sismos y las estaciones que se han utilizado en este estudio. Estrella: localización del sismo principal. Cuadrados: localización de los sismos utilizados como EGF. Las gráficas muestran los resultados de la STF aparente en cada estación tras la deconvolución con las distintas EGF. Círculos negros: estaciones de periodo corto; círculo blanco: estación de banda ancha. Mecanismo de doble par del sismo principal obtenido a partir de polaridades de ondas P.

Como comprobación de los resultados obtenidos en este trabajo, se ha estimado el M<sub>0</sub> del terremoto principal como el área bajo la curva de la STF promedio, obteniendo un valor de M<sub>0</sub>= 9x10<sup>14</sup> Nm, un valor similar, aunque ligeramente inferior al resultado a partir de análisis espectral (Tabla 1).

Asimismo, considerando los resultados de la duración de la STF aparente y una velocidad de ruptura de 3 km/s, se obtiene una dimensión de la ruptura de 0.9 km para este sismo. Este resultado concuerda con el obtenido a partir de análisis espectral de formas de onda y considerando el modelo de Brune de falla circular (Tabla 1).

Por último, aplicando la relación entre M<sub>0</sub> y el área de la fractura (Kanamori y Anderson, 1975) se ha estimado la caída de esfuerzos de los distintos terremotos (Figura 4). La caída de esfuerzos del terremoto principal se encuentra entre los 1-10 MPa, un valor superior a los estimados en otras regiones para sismos de la misma magnitud. Sin embargo, las caídas de esfuerzos de las réplicas varían entre los 0.1-1.0 MPa, que sí son valores similares a los obtenidos en otros estudios para terremotos del mismo rango de magnitud (Courboux et al.1996).

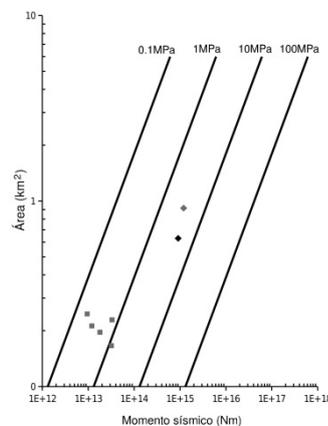


Figura 4 – Representación del área de la fractura frente al M<sub>0</sub> mostrando las líneas de igual caída de esfuerzos. Los rombos corresponden al terremoto principal y los cuadrados a las EGF. En negro la solución obtenida a partir de la deconvolución y en gris las soluciones a partir de análisis espectral.

#### 4. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Grupo de Vigilancia Volcánica (IGN) y a la Red Sísmica Nacional (IGN) la labor realizada durante la crisis de El Hierro. Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Fomento y por el proyecto CGL2010-19803-C03-01.

#### 5. REFERENCIAS

Blanco-Montenegro, I., I. Nicolosi, A. Pignatelli y M. Chiappini (2008): "Magnetic imaging of the feeding system of oceanic volcanic islands: El Hierro (Canary Islands)". *Geophys. J. Int.* 173, 339-35.

Bufo, E., P. Coca, A. Udías y C. Lasa (1997): "Source mechanism of intermediate and deep earthquakes in southern Spain". *J. Seismol.* 1, 113-130.

Courboux, F., J. Virieux, A. Deschamps, D. Gilvert y A. Zollo (1996): "Source investigation of a small event using empirical Green's functions and simulated annealing". *Geophys. J. Int.* 125, 768-780.

Kanamori, H. y D. L. Anderson (1975): "Theoretical basis of some empirical relations in Seismology". *Bull. Seism. Soc. Am.* 65, 1073-1095.

Ligorria, C. P. y C. Ammon (1999): "Iterative deconvolution and receiver function estimation". *Bull. Seism. Soc. Am.* 89, 1395-1400.

López, C., M. J. Blanco, R. Abella, B. Brenes, V. M. Cabrera Rodríguez, B. Casas, I. Domínguez Cerdeña, A. Felpeo, M. Fernández de Villalta, C. del Fresno, O. García, M. J. García-Arias, L. García-Cañada, A. Gomis Moreno, E. González-Alonso, J. Guzmán Pérez, I. Iribarren, R. López-Díaz, N. Luengo-Oroz, S. Meletlidis, M. Moreno, D. Moure, J. Pereda de Pablo, C. Rodero, E. Romero, S. Sainz-Maza, M. A. Sentre Domingo, P. A. Torres, P. Trigo, V. Villasante-Marcos (2012): "Monitoring the volcanic unrest of El Hierro (Canary Islands) before the onset of the 2011-2012 submarine eruption". *Geoph. Res. Lett.* 39, L13303. doi:10.1029/2012GL051846.

Mueller, C. (1985): "Source pulse enhancement by deconvolution of an empirical Green's function". *Geoph. Res. Lett.* 12, 33-36.



# Control de deformaciones en la reactivación y erupción de El Hierro (Islas Canarias, España) 2011-2012

## *Deformation monitoring of the volcano unrest and eruption of El Hierro (Canary Island, Spain) 2011-2012*

L. García-Cañada<sup>(1)</sup>, M. A. Cano<sup>(2)</sup>, M. J. García-Arias<sup>(1)</sup>, J. Pereda<sup>(3)</sup>, E. González-Alonso<sup>(1)</sup>, M. Valdés<sup>(2)</sup>, Unidad de Volcanología y Área de Geodesia del IGN.

<sup>(1)</sup> Observatorio Geofísico Central, Instituto Geográfico Nacional (IGN), C/Alfonso XII, 3, 28014 Madrid, Spain, lgarcia@fomento.es.

<sup>(2)</sup> Área de Geodesia, Instituto Geográfico Nacional (IGN), C/General Ibáñez de Ibero, 3, 28003 Madrid, Spain.

<sup>(3)</sup> Centro Geofísico de Canarias, Instituto Geográfico Nacional (IGN), C/La Marina 20, 2º, 38001 S/C de Tenerife, Spain.

### SUMMARY

*In July 2011 the Instituto Geográfico Nacional (IGN), responsible for the volcano monitoring in Spain, detected unusual seismic activity and deformations in El Hierro that could be the precursors of a volcanic activity reactivation. Therefore the IGN started to develop a multidisciplinary monitoring network including eight permanent GNSS sites. These GNSS data together with other permanent sites belonging to several institutions and some densifying points with temporal observations have been used to monitor the ground deformation in the island. Radar Interferometric techniques (InSAR) have been used to complement the information obtained. Preliminary GPS results show deformation in the pre-eruptive process. InSAR preliminary analysis corroborates these deformations.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Las Islas Canarias es un archipiélago volcánicamente activo situado frente a la costa noroeste africana. Se conocen numerosas erupciones históricas en todo el archipiélago, siendo Lanzarote, Tenerife y La Palma las islas que han presentado una mayor actividad en los últimos años, con 16 erupciones registradas desde el siglo XV (Romero, 2000).

En julio de 2011 el Instituto Geográfico Nacional (IGN) comienza a detectar una actividad sísmica anómala en la isla de El Hierro, isla en la que no se había detectado ninguna actividad volcánica desde hacía al menos 200 años. Como responsable de la vigilancia volcánica en España comienza en ese momento a desarrollar una red de monitoreo multidisciplinar para complementar la instrumentación ya existente y permitir el seguimiento y estudio de la actividad que estaba teniendo lugar en la isla. Dentro de esta red se instalan hasta un total de ocho estaciones permanentes GNSS (Global Navigation Satellite System) densificadas por tres puntos de observación periódica, que han permitido realizar el seguimiento de las deformaciones del terreno durante el periodo pre-eruptivo y posterior erupción submarina, que comenzó el 10 de octubre de 2011, aproximadamente a 2 km al sur de la isla de El Hierro. También se han adquirido imágenes de satélite para, mediante el uso de técnicas de Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR), procesarlas y complementar los resultados obtenidos por GPS (Global Positioning System).

Se va a realizar la descripción de la red de puntos medidos, posteriormente se explican los procesados y análisis realizados a los datos GPS para la obtención de coordenadas y a las imágenes InSAR para llegar a los interferogramas. Finalmente se verán las deformaciones obtenidas y que han permitido, junto a los resultados de las otras técnicas, la gestión de la emergencia surgida por la reactivación volcánica y posterior erupción, así como el estudio de todo el fenómeno ocurrido.

### 2. RED DE ESTACIONES

La red de Vigilancia Volcánica en las Islas Canarias se empezó a desplegar en el año 2007 en Tenerife, siendo esta isla la que se considera que presenta una mayor peligrosidad. Dentro de esta red multiparamétrica, para el control de deformaciones existe un total de ocho estaciones GNSS instaladas y en funcionamiento cuyos datos son recibidos y analizados de forma continua en los Centros de Datos de Madrid y Tenerife (Cano et al., 2008a).

A partir del comienzo de la actividad sísmica en El Hierro, en julio de 2011, se inicia la instalación de una red de estaciones GNSS

permanentes constituida en la actualidad por ocho estaciones del IGN, además de una estación GNSS situada en Frontera y perteneciente a GRAFCAN (Cartográfica de Canarias, S.A) denominada FRON. Esta estación se instaló en julio de 2010 y sus datos han sido utilizados desde entonces.

Debido a que la actividad sísmica durante el mes de julio tuvo lugar al norte de la isla, en el área de El Golfo (Frontera), las primeras estaciones GNSS se instalaron en esta zona, además de una de ellas fuera del área de actividad. De esta forma, desde finales de julio de 2011 se disponen de datos de HI01, situada en el vértice geodésico de Asomadas, como estación en el exterior del área de estudio, HI02 y HI03 en la zona de El Golfo, al este y oeste de la zona de máxima ocurrencia sísmica.

A primeros de septiembre, con el fin de confirmar las direcciones de los movimientos detectados, se instala HI04, también en el área de El Golfo, al oeste de HI03 (ver Figura 1).

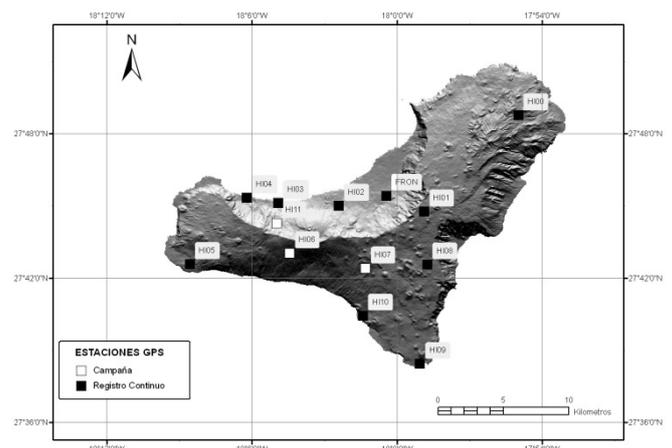


Figura 1 – Mapa de localización de las estaciones GNSS instaladas en la isla de El Hierro.

En septiembre se inicia la instalación en el sur de la isla de las estaciones restantes, comenzando por HI05, situada al oeste, en el vértice geodésico de Orchilla.

El Grupo de Geodesia de la Universidad de Cádiz (UCA) en colaboración con el IGN y el Instituto de Geociencias del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) instala nuevas estaciones permanentes, HI00 en Valverde, HI08 en El Pinar y HI09

en La Restinga, además de puntos para observación periódica, HI06 y HI07 en la zona de El Julán y HI10 en Tacorón.

A partir de octubre estas estaciones son remplazadas por equipos del IGN y con registro continuo allí donde ha sido posible, de forma que excepto los dos puntos de El Julán (HI06 y HI07) actualmente todas son estaciones permanentes desde primeros de noviembre y con comunicación para la transmisión de datos, excepto HI10.

En diciembre de 2011 se instala un nuevo punto de observación, HI11, como apoyo a los trabajos de control de una ladera en la cara norte de la isla (Brenes Fernández et al., 2012).

Finalmente, la red de estaciones GNSS instalada para el control de deformaciones en la isla de El Hierro queda como se muestra en la Figura 1. Esta red, a septiembre de 2012, se encuentra plenamente operativa.

### 3. TRATAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS GNSS

Los datos de las estaciones GNSS se han integrado en los centros de datos y cálculo que el IGN ya disponía para el Servicio de Vigilancia Volcánica (Cano et al., 2008b). Las estaciones envían datos horaria y/o diariamente, dependiendo de la comunicación, que se reciben en dos centros de datos gemelos en las instalaciones del IGN en Madrid y Santa Cruz de Tenerife. Una vez allí se realiza un control de calidad con el programa TEQC (Estey y Meertens, 1999) y son almacenados para el posterior procesado.

Tanto en el caso de las estaciones permanentes como para los puntos de observación periódica, el procesado se realiza con el programa Bernese v.5.0 (Dach et al. 2007), aunque con ligeras diferencias. En el caso de las estaciones permanentes de El Hierro los datos se han añadido al procesado ya existente para todas las estaciones del Sistema de Vigilancia Volcánica, procesándose una red regional formada por todas las estaciones de Canarias del IGN, GRAFCAN, MAS1 y estaciones IGS del norte de África, Azores y la Península Ibérica. Para la obtención de las coordenadas se usa el modelo de carga oceánica FES2004 (Lyard et al., 2006), calibración absoluta de las antenas del IGS para los satélites y estaciones y efemérides del IGS (Kouba 2009), utilizando una estrategia de procesado similar a la utilizada por el IGN como Centro Local de Análisis de EUREF (Valdés et al., 2008). Para la materialización del marco de referencia se realizan constreñimientos mínimos a las coordenadas IGS en cada época de un conjunto formado por cinco estaciones de referencia, MAS1, PDEL, SFER, RABT y VILL.

Para la obtención de los resultados de la forma más rápida posible, los datos de cada día son procesados tres veces usando en cada caso las efemérides disponibles en ese momento. Así, a las pocas horas de la obtención de los datos se realiza el primer procesado con efemérides ultrarrápidas, cuyos resultados se obtienen a primera hora del día siguiente. Posteriormente, a las 17 horas de la finalización del día, el IGS publica las efemérides rápidas, de forma que vuelve a procesarse el día anterior con estas efemérides, además de incluir datos que por problemas de comunicación no hayan entrado en el procesado anterior. Finalmente se realiza un procesado preciso con el uso de las efemérides IGS finales.

En todos los procesados, como resultado se obtienen las coordenadas cartesianas tridimensionales geocéntricas (X, Y, Z) para cada día en el sistema de referencia definido, que depende del marco de referencia de la órbitas y las coordenadas de las estaciones de referencia que se utilizan para definir el marco, siendo en este caso el IGS08. Estos resultados se obtienen en el fichero de salida de formato estándar SINEX (Solution Independent Exchange Format). A partir de ahí se agrupan las coordenadas diarias para cada estación obteniendo así las series temporales de coordenadas cartesianas. Para una interpretación más sencilla de los resultados se realiza una transformación de estas series a un sistema de referencia topocéntrico local, usando como referencia las coordenadas geográficas de las medias de las series anteriores. De esta forma se obtienen las series temporales diarias de coordenadas locales norte, este y elevación, (n,e,u), para cada estación. Un ejemplo de serie temporal de estas coordenadas puede verse en la Figura 2, donde está representada la serie precisa completa de la estación FRON.

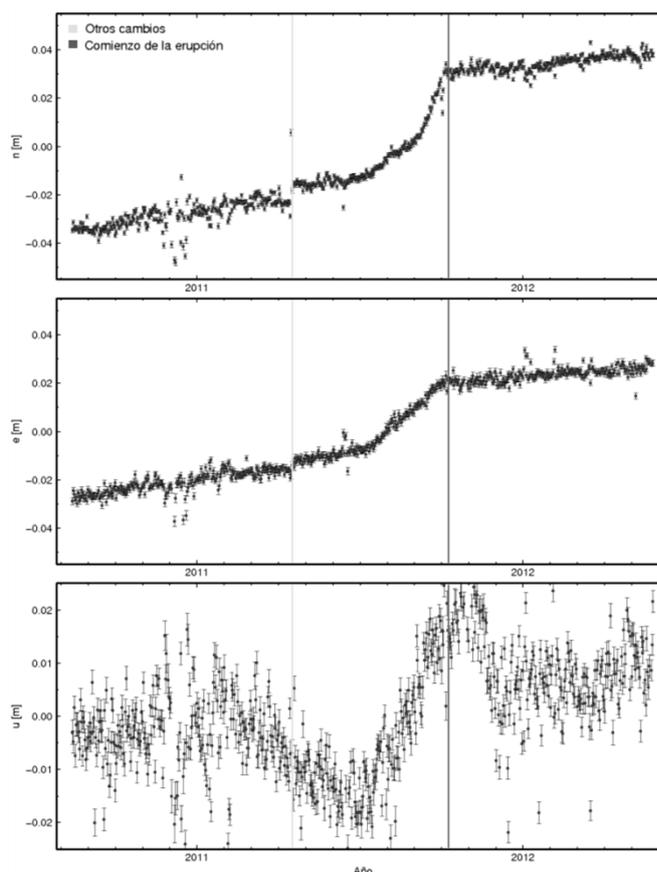


Figura 2 – Serie completa de coordenadas locales (n,e,u) de FRON.

Además de las coordenadas, para estudiar el comportamiento relativo entre estaciones, también se calculan las distancias entre unas estaciones de referencia seleccionadas y el resto de estaciones de la red. En el caso de las estaciones de El Hierro se ha considerado las distancias entre las propias estaciones de la isla, así como con la estación del IGN situada en La Palma. En la Figura 3 están representadas las variaciones de distancia entre HI02 y LPAL, como estación de referencia.

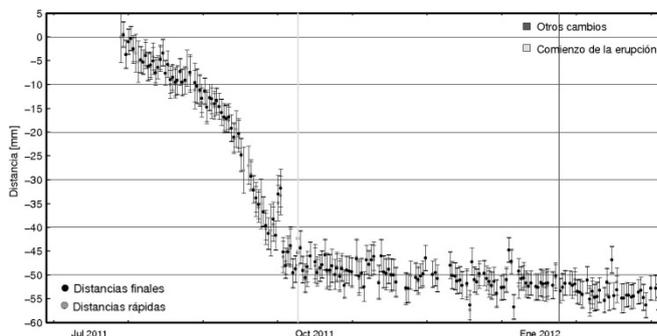


Figura 3 – Serie de las variaciones de la distancia entre HI02 y LPAL.

Los puntos de observación periódica permiten densificar la red, completando principalmente la zona conocida como el Julán, donde las características de la zona hacen difícil la instalación de una estación permanente. La observación se realiza semanalmente durante un periodo mínimo de cinco horas. Para la obtención de las coordenadas, estos datos son procesados con una estrategia similar a las estaciones permanentes, pero en una red más pequeña, formada solamente por las estaciones GNSS permanentes que el IGN tiene en

Tenerife, El Hierro y La Palma, y usando como estación de referencia LPAL. A partir de estos resultados también se obtienen series de coordenadas de HI06, HI07 y HI11 y distancias entre ellas.

#### 4. ANÁLISIS INSAR

Con la finalidad de complementar los resultados de deformaciones obtenidos con técnicas GNSS, temporal y espacialmente, se han usado técnicas de InSAR. El uso de InSAR ha permitido la creación de interferogramas tanto pre-eruptivos como de las etapas iniciales de la erupción, que permiten observar los desplazamientos del terreno derivados de la actividad volcánica.

Para ello se han adquirido una colección de imágenes TerraSAR-X cubriendo todo el proceso eruptivo. Aunque la técnica InSAR no permita la obtención de resultados en tiempo real, como ocurre con las estaciones permanentes GNSS, tiene la ventaja de obtener deformaciones no puntuales y disponer de catálogos de imágenes anteriores al comienzo de la actividad, por lo que su complementación permite un mayor conocimiento de cómo se ha desarrollado el proceso. Sin embargo una de las mayores dificultades y limitaciones de este uso es la necesidad de aislar la señal atmosférica de la deformación real en los interferogramas.

Normalmente se considera que la fase interferométrica se relaciona linealmente con la altura, lo que permite estimar la parte de la fase derivada de la atmósfera y eliminarla del interferograma para obtener de manera aislada la información correspondiente a la deformación (Hanssen, 2001). Pero en la serie de interferogramas de El Hierro se ha comprobado que las características atmosféricas de la isla y su compleja orografía hacen que esta aproximación no sea válida. Por esta razón se ha preferido mostrar los interferogramas sin aplicar ningún tipo de corrección atmosférica, de forma que la fase final es una combinación de la deformación real del terreno y el efecto atmosférico.

Para la obtención de los interferogramas se ha utilizado el programa DORIS de la Universidad Técnica de Delft (Kampes et al., 2003) usando órbitas precisas y un modelo digital de terreno del IGN de 5m de resolución. Posteriormente se ha aplicado una máscara para evitar que los píxeles de baja coherencia produzcan errores que puedan propagarse a todo el interferograma en el desenrollado de fase, proceso que se ha realizado con el programa Snaphu (Chen et al., 2001) y que ha permitido obtener de esta forma los valores absolutos de la fase.

#### 5. RESULTADOS OBTENIDOS

A partir de los datos e imágenes disponibles y siguiendo los procesado y análisis descritos en el apartado anterior, se va a describir los resultados de deformaciones obtenidos con GPS e InSAR durante las diferentes etapas de todo el proceso eruptivo.

#### 6. ESTACIONES GNSS

La deformación en el proceso pre-eruptivo comienza el 7 de julio de 2011, detectándose en la estación de FRON, la única estación GNSS permanente instalada en la isla en ese momento. Este comienzo, junto a la deformación de la estación FRON durante todo el proceso aparece en la Figura 2.

En general, en todas las estaciones instaladas, se detecta la inflación desde el inicio del registro de datos. Esto puede verse, por ejemplo, en la serie (n,e,u) de HI04 (Figura 4) desde el 31 de agosto de 2011, fecha en la que se instaló la estación, hasta marzo de 2012, cuando finaliza la erupción. En esta estación se ha detectado una deformación durante este periodo de 3 cm norte y casi 2 cm oeste.

A primeros de septiembre de 2011, coincidiendo con la migración hacia el sur de la actividad sísmica (López et al., 2012), se observa una aceleración y rotación hacia la dirección norte de la deformación (ver Figura 5) que llega a ser de más de 3 cm en 20 días.

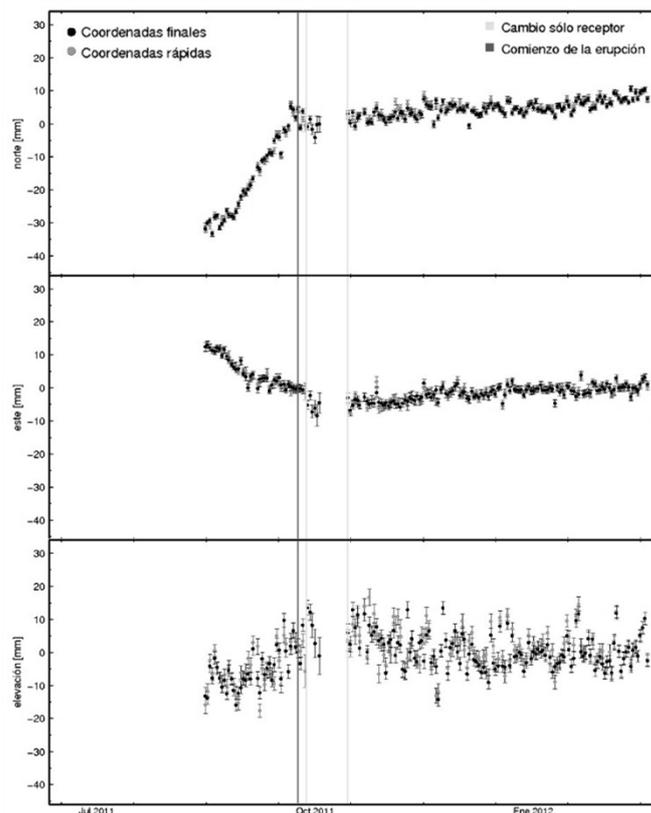


Figura 4 – Serie (n,e,u) de la estación HI04.

En los últimos días de septiembre la tendencia de deformación continua, aunque no tan rápido como en los días anteriores. A partir del 1 de octubre y durante aproximadamente unos 5 días, se observa en todas las estaciones una repentina deflación y posterior inflación de más de 2 cm, que coincide con señales anómalas en otras técnicas (López et al., 2012). Este fenómeno puede verse fácilmente en las componentes norte de HI03 (Figura 4) y HI04 (Figura 3). A partir del 8 de octubre las coordenadas se estabilizan, continuando así durante los primeros días de la erupción.

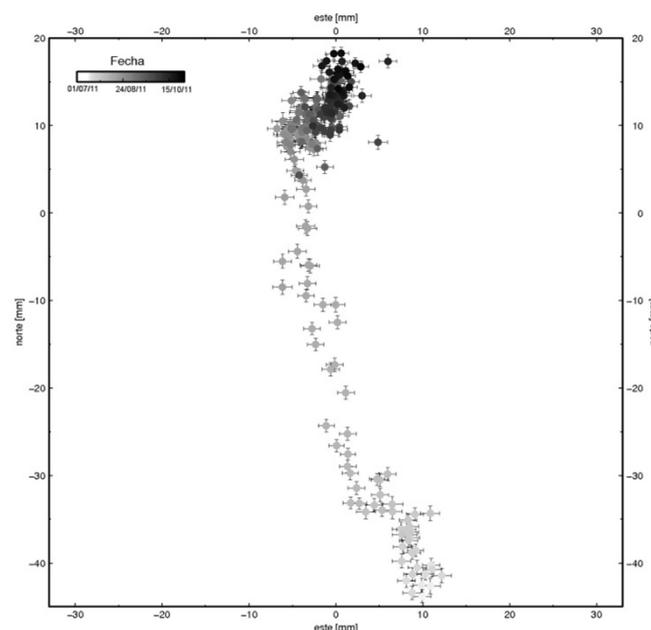


Figura 5 – Gráfico de coordenadas horizontales (n,e) de HI03.

En resumen, durante el proceso pre-eruptivo, desde principios de julio hasta el 10 de octubre, se ve claramente una inflación de la isla de más de 5 cm en horizontal y 4 en vertical. Esta inflación se ve reflejada en las velocidades estimadas que están representadas en la Figura 6, donde se muestran las velocidades horizontales (flecha negra) y verticales (barra gris) de las estaciones GNSS desde el 1 de julio de 2011, o la instalación de cada estación, hasta el comienzo de la erupción. En el caso de las estaciones HI05 y HI08, el corto periodo de datos hace que el error de la velocidad horizontal sea mucho mayor que en las demás estaciones aunque su valor está por encima de este error. Sin embargo esto no ocurre en la componente vertical, por lo que no se ha considerado la velocidad obtenida.

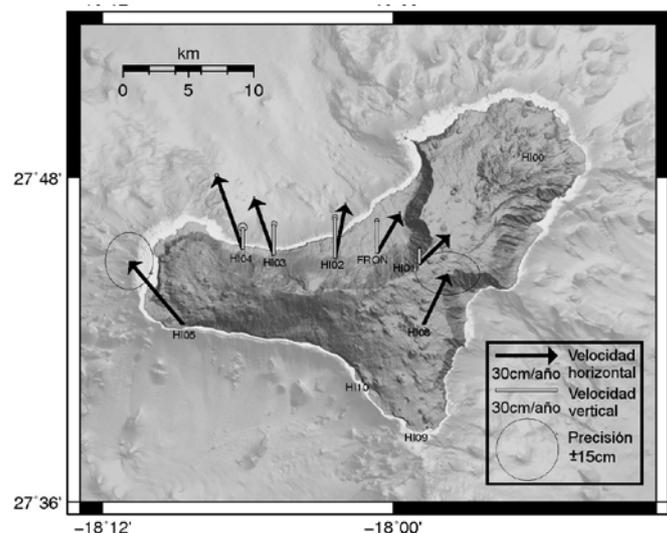


Figura 6 – Velocidades horizontales y verticales previas al comienzo de la erupción.

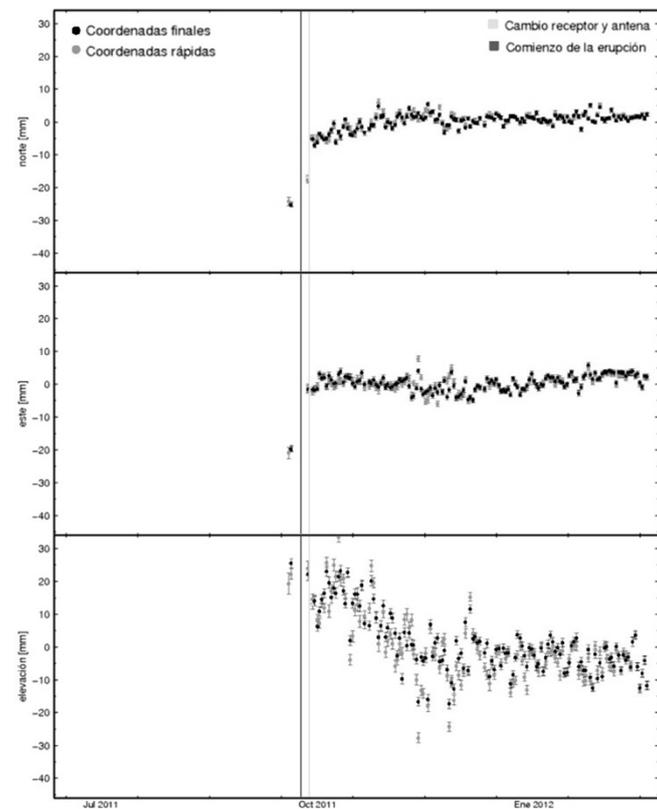


Figura 7 – Serie de coordenadas locales (n,e,u) de HI09.

Posteriormente, con la erupción ya en marcha, comienza a observarse una deflación, principalmente en el sur de la isla, que continúa hasta mediados de noviembre de 2011. Esta deflación tiene

una mayor magnitud en la componente vertical y es más clara en las estaciones más cercanas a la erupción, como es HI09 (Figura 7) donde el hundimiento vertical en ese periodo es de casi 3cm.

A partir de entonces y hasta la finalización de la erupción, en marzo del 2012, no se han detectado deformaciones significativas, aunque sí que hay pequeñas inestabilidades en algunas ocasiones, seguramente causadas por la erupción en curso.

Los puntos de observación periódica comenzaron a observarse a principios de noviembre, por lo que no se dispone de resultados para el periodo pre-eruptivo, aunque sí que confirman la tendencia de las otras estaciones durante la erupción.

Las series de coordenadas locales durante la erupción, tanto de los puntos de observación periódica (HI06, HI07 y HI11) así como de todas las estaciones GNSS permanentes (excepto FRON, HI04 y HI09, cuyas series están representadas en las figuras 2, 4 y 7 respectivamente), pueden observarse en la Figura 8, donde se observa que excepto la deflación durante las primeras fases de la erupción, no se aprecia ninguna deformación significativa.

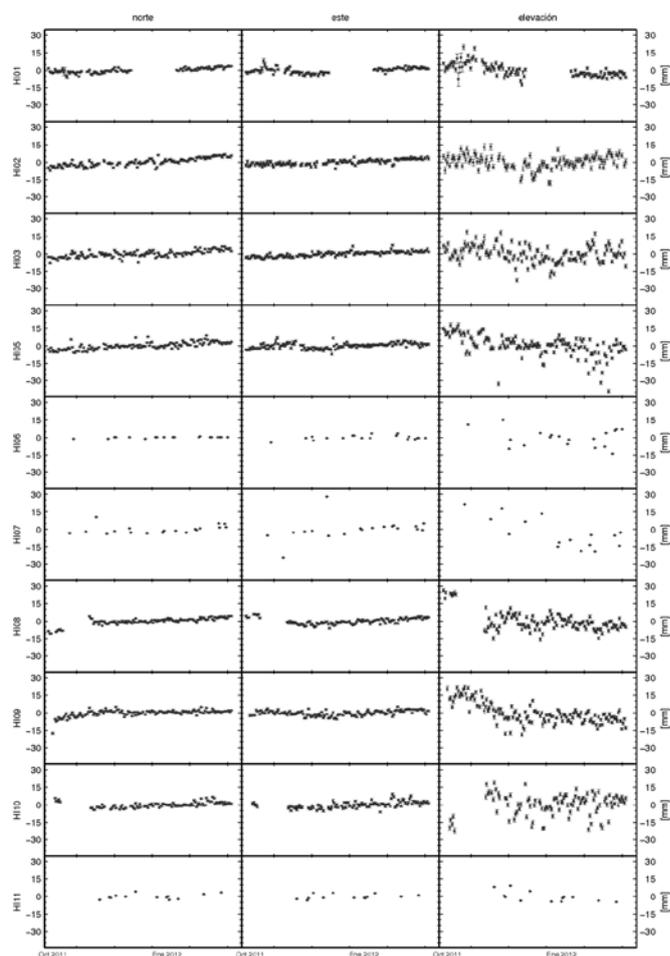


Figura 8 – Series (n,e,u) de las estaciones GNSS de El Hierro durante la erupción 2011-2012.

### 7. RESULTADOS INSAR

A partir de las imágenes disponibles se han seleccionado dos interferogramas (Figuras 9 y 10) para el estudio de deformaciones. Estos interferogramas obtenidos presentan únicamente geometría ascendente, aunque lamentablemente esta geometría no cubre la isla en su totalidad, y muestran la etapa pre-eruptiva y el inicio de la erupción.

El valor de la fase que se observa en las dos figuras sólo puede interpretarse de una forma cualitativa, ya que realmente el resultado obtenido es una combinación de la deformación real más el efecto atmosférico. De esta forma y teniendo en cuenta la línea de visión del satélite, las fases negativas son una combinación de la elevación,

con el movimiento oeste y el efecto atmosférico, mientras que las fases positivas representan hundimiento, más movimiento este y de nuevo los efectos atmosféricos. Actualmente se está trabajando en un método para eliminar dicho efecto adecuadamente.

La Figura 9 muestra el interferograma pre-eruptivo, entre el 11 de agosto y el 05 de octubre de 2011. Las zonas en blanco presentan coherencia baja y no se pueden determinar deformaciones sobre ellas. Como sabemos por los resultados GPS que entre estas dos fechas los movimientos en la dirección este-oeste fueron mucho menores que los verticales, se puede interpretar que los valores negativos de las fases que se observan en la zona de El Julán corresponden a elevaciones del terreno en esa área.

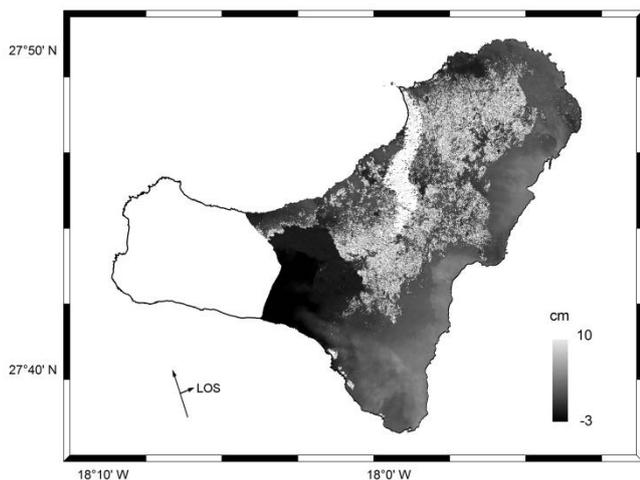


Figura 9 – Interferograma pre-eruptivo 11 agosto- 5 octubre 2011.

En el interferograma de la Figura 10 se muestran los desplazamientos entre el 11 de agosto y 16 de octubre de 2011. Se observan fases negativas en la costa del Mar de las Calmas y El Julán (sudeste de la isla) y fases positivas en el resto de la isla. Si comparamos este interferograma con el de la Figura 8, los resultados parecen indicar una posible etapa de deflación generalizada durante las primeras fases de la erupción.

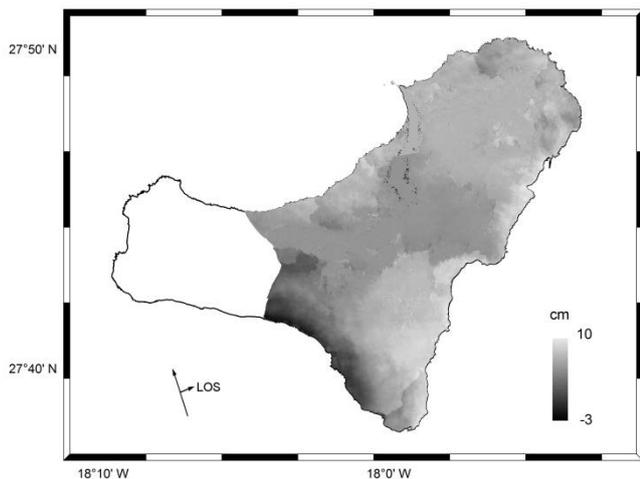


Figura 10 – Interferograma 11 agosto - 16 octubre 2011.

## 8. CONCLUSIONES

El uso de estaciones GNSS ha permitido el control de deformaciones en El Hierro desde el comienzo de la reactivación, a

primeros de julio de 2011. Todas las estaciones permanentes han registrado una inflación en el periodo pre-eruptivo de más de 5 cm. A primeros de septiembre, un cambio en el comportamiento del sistema hace que la deformación se acelere y sufra una rotación hacia el norte.

El análisis InSAR corrobora estas deformaciones obtenidas en la isla, aunque sus resultados sean preliminares, ya que es necesario un filtrado atmosférico apropiado. Además han permitido la detección de deformaciones en zonas donde no había estaciones GNSS, como en el Julán durante el periodo pre-eruptivo.

Estos resultados parecen corresponderse bien con una presión ejercida por la intrusión magmática existente antes de la erupción, en la zona donde los sismos estaban migrando del norte al sur entre esas fechas.

Durante la erupción los resultados GPS no presentan ninguna deformación en los primeros días, aunque posteriormente comienza una pequeña deflación hasta últimos de noviembre de 2011. El resto de las series hasta la finalización de la erupción, el 5 de marzo de 2012, no muestran ninguna tendencia clara.

Esta es la primera erupción monitorizada en las Islas Canarias, por lo que los datos obtenidos, de deformaciones, sismicidad y el resto de técnicas, ayudarán a la comprensión y estudio de la reactivación y su aplicación en otros casos similares

**Agradecimientos:** Queremos expresar nuestro agradecimiento por su ayuda en la instalación de las estaciones, mantenimiento, trabajo de campo y soporte al Grupo de Geodesia de la Universidad de Cádiz-CSIC (UCA), así como a Cartográfica de Canarias (GRAFCAN) y todos los residentes y autoridades de la isla de El Hierro sin los que no hubiera sido posible la obtención de estos datos.

## 9. REFERENCIAS

- Brenes Fernández, B., M.J. García Arias, M. Moreno Solanas, J. Pereda De Pablo, P. Trigo Gamaro-Espuig, J. Fraile Torrecilla y P. Gonzalo López (2012, enviado): "Desarrollo de la red de vigilancia volcánica del IGN durante la crisis de El Hierro", *X Topcart 2012, I Congreso Iberoamericano de Geomática y Ciencias de la Tierra*.
- Cano, M. A, L. García-Cañada, M. J. García-Arias, J. Pereda, y R. Quirós (2008a): "Desarrollo de la Red Geodésica del IGN para el Sistema de Vigilancia Volcánica en Tenerife, Congreso Internacional de Ingeniería Geomática y Topografía", *IX Congreso Nacional TOP-CART, 2008*.
- Cano, M. A, L. García-Cañada, M. J. García-Arias, J. Pereda, y R. Quirós (2008b): "Infraestructura geodésica del IGN para el Sistema de Vigilancia Volcánica", *6ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, 11-14 de febrero de 2008, pg. 289-290.
- Chen, C. W. y H. A. Zebker (2001): "Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization", *Journal of the Optical Society of America A (Optics, Image Science and Vision)*, 18 (2), 338 – 351, doi: 10.1364/JOSAA.18.000338.
- Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez y M. Meindl (Eds.) (2007): "Bernese GPS Software Version 5.0", Astronomical Institute University of Berne.
- Estey, L. H. y C. M. Meertens (1999): "TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data", *GPS Solutions*, Vol. 3, No. 1, p. 42-49, doi:10.1007/PL00012778.
- Hanssen, R. F (2001): "Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis", Springer.
- Kampes, B.M., R. F. Hanssen y Z. Perski (2003): "Radar Interferometry with Public Domain Tools", *Proceedings of the FRINGE 2003 Workshop*, Frascati :Italy.
- Kouba, J. (2009): "A guide to using international GNSS Services (IGS) products", disponible en <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/usage.html>.
- Lyard F, Lefevre F, Letellier T, Francis O (2006): "Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004", *Ocean Dyn* 56:394–415. doi:10.1007/s10236-006-0086-x.
- López, C., et al. (2012): "Monitoring the volcanic unrest of El Hierro (Canary Islands) before the onset of the 2011–2012 submarine eruption", *Geophys. Res. Lett.*, 39, L13303, doi:10.1029/2012GL051846.
- Romero, R., (2000): "Actividad volcánica histórica en Las Islas Canarias". En: Astiz, M. y García, A., eds., *Curso Internacional de Volcanología y Geofísica volcánica*, pgs. 115–128.
- Valdés, M., L. García-Cañada y M. A. Cano (2008): "Estado actual de procesamiento en el Centro de Análisis Local de EUREF (IGE)". *6ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, 11-14 de febrero de 2008, pg.283-284.



# Solución Geoespacial del Instituto Español de Oceanografía a las Campañas en la Erupción del Volcán de El Hierro

## *Geospatial Solution developed by the Spanish Institute of Oceanography after the oceanographic surveys in the El Hierro volcanic eruption*

Hermida N.<sup>(1)</sup> \*, Pastor E.<sup>(1)</sup>, Rivera J.<sup>(1)</sup>, Arrese B.<sup>(1)</sup>, Tello O.<sup>(1)</sup>, Vargas JL.<sup>(1)</sup>, Acosta J.<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Español de Oceanografía, Corazón de María nº8 28002. Madrid, España. [nuria.hermida@md.ieo.es](mailto:nuria.hermida@md.ieo.es)

### SUMMARY

The Spanish Oceanographic Institution (Instituto Español de Oceanografía: IEO) has developed a marine information viewer that is located in its official Web page (<http://www.ideo-elhierro.ieo.es>). This viewer shows the cartography, the results and interpretations related to the 12 Bimbache Surveys, which were led by the IEO from October 2011 to February 2012 in the Ramón Margalef Research Vessel.

The main aim of this viewer, is to facilitate either the researchers or the geoscientific information users, an interactive display that can be used for the study of the eruptive process geomorphologic evolution. In addition it lets consult the bathymetries, ROV dives and trawl camera transects conducted during the surveys for scientific assessment of civil defense.

### 1. INTRODUCCIÓN

El equipo de la Infraestructura de datos espaciales del IEO ha desarrollado un visor de información marina que muestra el cartografiado y los primeros resultados e interpretaciones relativas a las Campañas Bimbache, realizadas por el grupo de Geología y Geofísica de Madrid del IEO entre los meses de Octubre de 2011 y Febrero de 2012, a bordo del *B/O Ramón Margalef*. El objetivo principal del visor es facilitar, tanto a los investigadores como a los usuarios de información geocientífica en general, un entorno de visualización interactivo que permita estudiar la evolución geomorfológica del proceso eruptivo, además de consultar las batimetrías y los puntos de inmersión de ROV y trineo fotogramétrico realizados durante las campañas para la asesoría del Comité Científico del PEVOLCA de Protección Civil.

### 2. DESARROLLO

La aplicación permite publicar los resultados de las Campañas Bimbache como servicios REST (Representational State Transfer) y como servicios Web, concretamente el servicio Web Map Service (WMS) definido por el OGC (Open Geospatial Consortium) Implementation Specification v1.3, aprobada como ISO 19128 Geographic Information – Web Map Server Interface. Además se ha elaborado un visor interactivo dotado de herramientas de visualización que permiten conocer y comparar los resultados de los estudios e interpretaciones de dichas campañas a lo largo del proceso eruptivo. Estos servicios WMS, se integran en el nodo de la Infraestructura de datos Espaciales Oceanográficos que está desarrollando el IEO, dentro del marco del proyecto IDEO.

La plataforma tecnológica usada está basada en la interfaz de aplicaciones para Adobe Flex desarrollada por Esri.

### 3. FUNCIONALIDAD

El menú desplegable permite acceder a cada uno de los levantamientos batimétricos realizados por el equipo de Geología y Geofísica de Madrid del IEO, la información de cada levantamiento se compone de los elementos descritos en la *tabla 1*.

Sombreado	Permite obtener un sombreado de la superficie o grado de iluminación de cada uno de los píxeles respecto a la orientación y al ángulo de elevación solar o cenital. 315° de orientación y 45° de elevación solar.
MDE	Estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de las profundidades.
Isóbatas	Curvas extraídas del MDE, con una equidistancia de 100 m, convenientemente etiquetadas.
Cono y Colada	Cono volcánico y depósitos, asociados al levantamiento batimétrico correspondiente.
Reservas Marinas	Zonas declaradas específicamente para la protección, regeneración, concentración o aumento de la producción de los recursos vivos o para la protección y regeneración del medio físico con fines pesqueros, medioambientales, recreativos y otros.
Transectos	Puntos inicio de inmersión del trineo fotogramétrico <i>Politolana</i> y el ROV <i>Liropus 2000</i> (Remote Operated Vehicle).

El modelo de sombreado analítico, si bien no aporta una imagen métricamente precisa es particularmente adecuado para las visualizaciones del terreno ayudando a la comprensión e interpretación comprensión de las formas del fondo marino, solo o combinado con otras capas de datos. El usuario tiene la posibilidad de variar el orden de las capas, aplicar transparencia para aprovechar las propiedades del sombreado analítico, personalizar la visualización y comparar las diferentes fases del proceso eruptivo. El botón descripción da acceso al metadato resumen, con la información principal que caracteriza a cada grupo temático y a cada levantamiento y un listado de palabras clave. *figura 1*.

Tabla 1 – Lista de capas y su descripción. (*Layer list and description*)

Capa	Descripción
------	-------------



Figura 1 – Opciones del cuadro de diálogo de gestión de capas. (Dialog box options for Layer Management)

El visor cuenta también con un conjunto de herramientas que permiten, identificar, medir y dibujar sobre la información geoespacial del espacio de trabajo, para posteriormente imprimir el resultado de las interpretaciones realizadas por el usuario, personalizando etiquetas (título, subtítulo y autor) y la orientación de la composición.

La herramienta de dibujo sirve para añadir a la información publicada las figuras geométricas más comunes (puntos, líneas, polígonos, rectángulos, círculos, elipses) fruto de la interpretación visual del usuario, y muestra a la vez tanto la longitud como la superficie del elemento dibujado en las unidades de medida elegidas (Metros, Kilómetros, Millas Náuticas). También es posible incorporar un texto cualquiera al mapa, con un estilo personalizado figura 2.



Figura 2 – Cuadro de diálogo de la herramienta dibujar y medir. (Draw and measure widget dialog box)



Figura 3 – Cuadro de diálogo de la herramienta identificar y la imagen submarina asociada a ese punto. (Identify widget dialog box and the underwater picture linked to that point)

La herramienta identificar permite consultar las entidades del espacio de visualización. tabla 2. Y así acceder a la información

alfanumérica asociada al elemento gráfico, que se encuentra almacenada en la base de datos corporativa del Instituto Español de Oceanografía. Además se puede acceder a las fotografías obtenidas en las inmersiones de ROV y trineo pinchando en la capa transectos. En un futuro existirá la posibilidad de ver los vídeos grabados durante los transectos figura 3. También es posible consultar los informes de las diferentes Campañas Bimbache utilizando la herramienta sobre las capas de resultados.

Tabla 2 – Lista de capas e información devuelta por la herramienta identificar. (Layer list and information returned by identify widget)

Capas	Campos devueltos
Transectos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transecto: identificador del transecto</li> <li>- Tipo: trineo o ROV Liropus 2000.</li> <li>- Fecha/Hora/ en la que se realizó la inmersión.</li> <li>- Latitud/Longitud/Profundidad y Rumbo del punto de inicio de la inmersión.</li> <li>- Fotografías obtenidas.</li> </ul>
Reservas Marinas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: nivel de protección en función de la distribución de los elementos del medio que se quieren proteger.</li> <li>- Nombre de la Reserva.</li> </ul>
Cono y Colada	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Cono o Colada.</li> <li>- Campaña: Campaña en la se realizó el levantamiento correspondiente.</li> <li>- Informes: vínculo al pdf con el informe de dicho levantamiento.</li> </ul>
Isóbatas	Profundidad

#### 4. CONCLUSIONES

Con este desarrollo el IEO pretende divulgar de manera sencilla y rigurosa los resultados obtenidos en las Campañas Bimbache. Los perfiles de usuario para los que este visor ha sido diseñado abarcan un rango de uso que incluye, desde una simple consulta apoyada por las herramientas del visor, a la posibilidad de incluir esta información por medio de los servicios WMS en un Sistema de Información Geográfica que permita realizar análisis más exhaustivos sobre la información publicada.

#### 5. REFERENCIAS

- Acosta, J. et al (2011), "Campaña BIMBACHE 1011 – Fase 1. Geología y geofísica: reconocimiento batimétrico mediante ecosonda multihaz", *Instituto Español de Oceanografía, Memoria científico-técnica*, 13 pp.
- Ahmed, T., Orlando, D., (2011) "Flex 4 in Action", *Manning*, 606 pp.
- Felicísimo, A. (1994). " Modelos Digitales del Terreno Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales." *Pentalfa Ediciones. Madrid. España*. 122 pp.
- Gao Xiao-rong,XU Dan,LEI Ying.(2011)"Development of WebGIS System based on Flex and REST Service." *Remote Sensing Technology and Application*, 26(1), 123-128.
- Hengl, T. and Reuter, H. I. (2009): "Geomorphometry: Concepts, Software, Application, Developments in Soil Science." *Elsevier, Amsterdam*, vol. 33, 707pp.
- Navarro R (2007):"REST vs Web Services. Modelado, Diseño e Implementación de Servicios Web" *ELP-DSIC-UPV*. 19 pp.
- Rivera, J. et al (2011), "Campaña BIMBACHE 1011 – Fases 4, 6, 7, 9, 11. Nuevo cartografiado y seguimiento del proceso eruptivo por métodos acústicos.", *Instituto Español de Oceanografía, Memoria científico-técnica*, 60 pp..
- Sánchez, et al (2011), "Campaña BIMBACHE 1011 – Fase 2 Inmersiones efectuadas con el ROV Liropus 2000 y el trineo de fotogrametría Politolana a bordo del B/O Ramón Margalef (IEO)", *Instituto Español de Oceanografía, Memoria científico-técnica*, 21 pp.
- Web Map Service. OGC (s.f) Recuperado el 14 septiembre de 2012, <http://www.opengeospatial.org/standards/wms>

## Egileen Aurkibidea/Índice de Autores/Índice de Autores/Autor Index

<b>A</b>		<b>H</b>	
Acosta, J. ....	753	Hermida, N. ....	753
Arrese, B. ....	753	<b>L</b>	
<b>B</b>		López, C. ....	743
Bufofn, E. ....	743	<b>P</b>	
<b>C</b>		Pastor, E. ....	753
Cano, M. A. ....	747	Pereda, J. ....	747
<b>D</b>		<b>R</b>	
del Fresno, C. ....	743	Rivera, J. ....	753
Domínguez Cerdeña, I. ....	743	<b>T</b>	
<b>G</b>		Tello, O. ....	753
García-Arias, M. J. ....	747	<b>V</b>	
García-Cañada, L. ....	747	Valdés, M. ....	747
González-Alonso, E. ....	747	Vargas, J. L. ....	753

