

Determinación del campo de esfuerzo/deformación activo en una isla volcánica a partir de técnicas fractales y estructurales (Isla Decepción, Antártida Occidental)

Active tectonics on a volcanic island by using fractal and structural techniques (Deception Island, West Antarctica)

R. Pérez-López¹, J. L. Giner-Robles¹, M. Bejar², M. A. Rodríguez-Pascua³, J. J. Martínez-Díaz², C. Paredes⁴ y J. M. González-Casado^{5†}

1 Dpto. CC. AA. Y RR. NN. Universidad San Pablo. Campus Monteprincipe, 28668. Madrid. rperez.fcex@ceu.es

2 Dpto. de Geodinámica. Facultad de CC. Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. 28004. jmdiaz@geo.ucm.es; martabejar@geo.ucm.es

3 Área de Riesgos Geológicos. Instituto Geológico y Minero de España. ma.rodriguez@igme.es

4 Dpto. de Matemática Aplicada y Métodos Informáticos. ETSIM. Universidad Politécnica de Madrid. cparedes@dmami.upm.es

5 † Dpto. de Geología y Geoquímica. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. g.casado@uam.es

Resumen: En este trabajo se obtiene el campo de esfuerzo y deformación activo en la isla volcánica de Decepción, en la Antártida Occidental. Para ello, se han aplicado tres técnicas estructurales diferentes: (1) medida de planos de falla con vector de deslizamiento, (2) estudio de la geometría fractal de la distribución espacial de lineamientos en la isla, interpretados a partir de imágenes satélite y MDT de alta resolución y (3) cartografía y geometría de la caldera volcánica. El campo de deformación obtenido es de tipo extensional con dos orientaciones ortogonales para el máximo acortamiento horizontal (ey), NE-SO y NO-SE. El campo de esfuerzos obtenido mediante el análisis fractal y de la geometría de la caldera volcánica se define a partir de SHMAX según NE-SO.

Palabras clave: tectónica activa, fallas, caldera volcánica, análisis fractal, Antártida.

Abstract: *The tectonic field on Deception Island (South Shetlands, West Antarctica) is determined from structural and fractal analyses. Three different analyses are applied to the study of the strain and stress fields into the area: (1) field measurements of faults (strain analysis), (2) fractal geometry of the spatial distribution of lineaments and (3) the caldera plan shape (stress analysis). In this work, the identified strain field is extensional with the maximum horizontal shortening trending NE-SW and NW-SE. The fractal technique applied to the spatial distribution of lineaments indicates a stress field with SHMAX oriented NE-SW. The elliptical caldera of Deception Island, determined from field mapping, satellite imagery and vents and fissure eruptions, has an elongate shape and a stress field with SHMAX trending NE-SW as well.*

Key words: *active tectonics, faults, volcanic caldera, fractal analysis, Antarctica.*

INTRODUCCIÓN

La Isla Decepción constituye una caldera volcánica localizada en el estrecho de Bransfield, en las Islas Shetland del Sur, en la Antártida Occidental (Figs. 1 y 2). Este estrecho, elongado NE-SO, está limitado por una dorsal hacia el SE y una fosa tectónica inactiva hacia el NO. La isla se forma dentro del contexto de una cuenca trasarco (González-casado *et al.*, 2000), pero con unas características particulares en relación a su dinámica (González-Casado *et al.*, 2000). El campo de esfuerzos determinado por estos autores consiste en un desgarre con SHMAX según NE-SO y SHMIN ortogonal. Bajo este campo de esfuerzos se generó un estratovolcán que emergió dando lugar a la isla constituida por una sucesión de erupciones mixtas (estrombolianas y freatomagmáticas). Tras el hundimiento de la caldera central, de edad aun incierta (Puerto Foster), el volcanismo explosivo se concentra

alrededor de la fracturación que controla morfológicamente dicha caldera.

Se han realizado múltiples análisis de carácter tecto-estructural con el fin de determinar el campo de esfuerzos activo en la Isla Decepción, análisis de los mecanismos focales de terremotos instrumentales, análisis poblacional de fallas, análisis sismotectónico, geomorfología tectónica, etc. (e.g. Smellie, 2002; González-Casado *et al.*, 2000; Fernández-Ibáñez *et al.*, 2005; Maestro *et al.*, 2007). Con el fin de explicar la complejidad cinemática y dinámica observada en la evolución tectónica de la isla, recientemente se han propuesto dos modelos tectónicos: (1) Modelo de fracturación complejo de tipo Riedel bajo un campo de esfuerzos en desgarre (Maestro *et al.*, 2007) y (2) campo de deformación extensional con una componente sinistral, de carácter regional, con el máximo acortamiento horizontal (ey) según NE-SO, y una extensión uniaxial local en relación con el hundimiento

de la caldera volcánica (ey según NO-SE) (Pérez-López *et al.*, 2007). Este último modelo respondería al adelgazamiento litosférico en el estrecho de Bransfield.

La caldera volcánica constituye la principal característica geológica de la Isla Decepción. Dicha caldera consiste en una bahía interna de geometría en planta elíptica, con el eje mayor según NO-SE, un perímetro de 32 Km. y una profundidad máxima de 350 m.

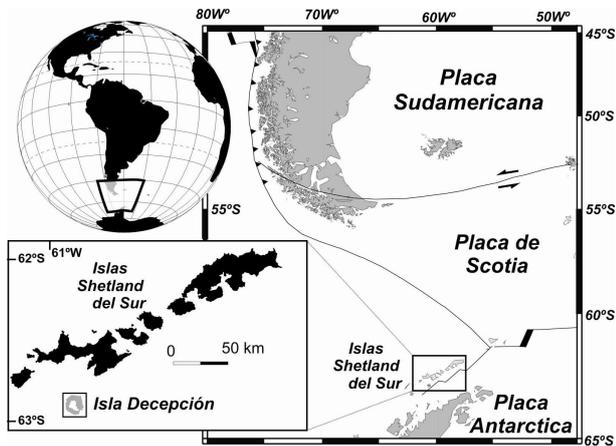


FIGURA 1. Localización geográfica de la Isla Decepción, Shetlands del Sur, estrecho de Bransfield en la Antártida occidental.

El principal problema en la determinación del campo de esfuerzo/deformación activo en materiales volcánicos es la generalizada ausencia de marcadores cinemáticos. Sin embargo, es posible determinar el campo de deformación mediante el vector de deslizamiento sobre planos de fallas y la orientación de diques. Por otro lado, mediante la aplicación de técnicas fractales en la distribución espacial de fracturas y/o lineamientos, es posible estimar la orientación del campo de esfuerzos (Pérez-López *et al.*, 2005; Pérez-López y Paredes, 2006). Finalmente, el estudio estructural de la caldera volcánica, permite establecer el campo de esfuerzos bajo el cual colapsó la cámara magmática. Bosworth *et al.* (2000) y Holohan *et al.* (2005) establecieron los campos de esfuerzos activos a partir de la forma en planta de la caldera volcánica, tanto en trabajos de campo como a partir de ensayos de laboratorio con modelos analógicos. Ambos trabajos concluyeron que la forma elíptica de una caldera volcánica desarrollada bajo un campo activo de esfuerzos se orienta de tal forma que, el eje menor de la elipse (emin) es paralelo a la orientación del máximo acortamiento horizontal (SHMAX), ya que las cámaras magmáticas sometidas a campos de esfuerzos diferenciales adquieren formas elípticas en planta.

MÉTODOLÓGIA Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Análisis Fractal de los morfolineamientos

Entre otros, el trabajo de Pérez-López *et al.* (2005) indica que la fracturación se distribuye espacialmente según una geometría fractal. Además, dicha geometría presenta una anisotropía que está relacionada con el tensor de esfuerzos. Estos autores obtuvieron un mapa

de morfolineamientos a partir de la interpretación de fotografías aéreas y modelos digitales del terreno a varias escalas de la zona de estudio. Sobre estos mapas calcularon la dimensión fractal de la distribución espacial de dichos lineamientos. Esta dimensión fractal la midieron mediante técnicas de *box-counting* 1-D, aplicadas sobre la intersección de un transecto con los mapas de morfolineamientos. De esta forma, obtuvieron dos valores, la dimensión fractal (D_0) en función de la orientación (δ) del transecto medido. La representación en un diagrama polar de ambos valores mostró que la dimensión fractal de la distribución espacial de lineamientos es anisótropa, ajustándose a un elipsoide. Además, la representación de dicho elipsoide en 2-D demostró que el eje menor de la elipse fractal (DHMIN) es paralelo al eje SHMAX del campo de esfuerzos bajo el que apareció el patrón de fracturación estudiado.

En el caso de la Isla Decepción, obtuvimos un MDT a partir del mapa topográfico 1:25.000 (SGE, 2006), con una resolución de 15x15 m. La Figura 2 muestra el mapa de morfolineamientos interpretados, 630 estructuras orientadas principalmente ENE-OSO, con dos modas secundarias NO-SE y N-S. El resultado de la determinación de la anisotropía fractal aparece en el gráfico superior derecho de la Figura 2. Se observan dos elipses truncadas, lo que se interpreta como el solape de dos campos de esfuerzos (Pérez-López y Paredes, 2006). La elipse más evidente, presenta una orientación de DHMIN según ENE-OSO (Fig. 2), lo que indica una orientación de SHMAX según ENE-OSO. La elipse secundaria muestra poca excentricidad, lo que se interpreta como que SHMAX y SHMIN tienen una magnitud similar.

Análisis de la deformación

A partir de la medida de planos de fallas y de la orientación del vector de deslizamiento se determinó el campo de deformación (máximo acortamiento horizontal, ey y mínimo acortamiento horizontal, ex) Reches (1987).

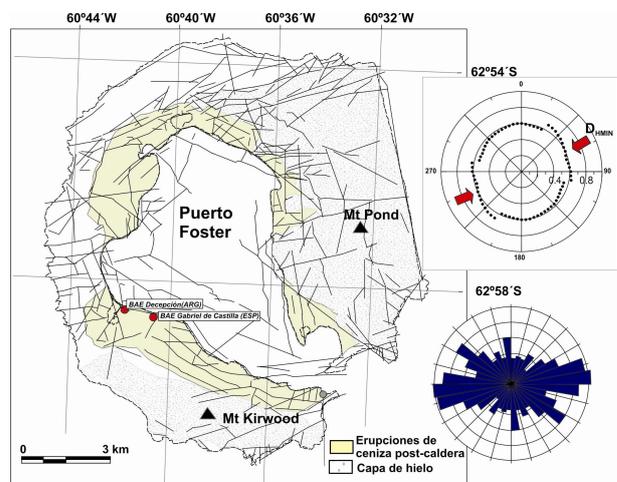


FIGURA 2. Izquierda: mapa de morfolineamientos interpretados a partir de un MDT (15 x 15 m). Derecha superior: elipse de anisotropía fractal obtenida a partir de la distribución espacial de los morfolineamientos. Derecha inferior: Rosa de direcciones de la frecuencia de orientación de los morfolineamientos.

Se midieron un total de 575 datos entre fallas, diaclasas y diques durante tres campañas de campo en la Isla Decepción (2004, 2005 y 2007). De todos ellos, 457 datos representan fallas con criterio de movimiento, medidas a lo largo de 20 estaciones (Fig. 3). El 90 % de estas fallas afectan a material post-caldera, depósitos de oleadas piroclásticas, depósitos volcano sedimentarios granodiferentes, bien clasificados y con estratificación cruzada (formación P1, Smellie, 2002).

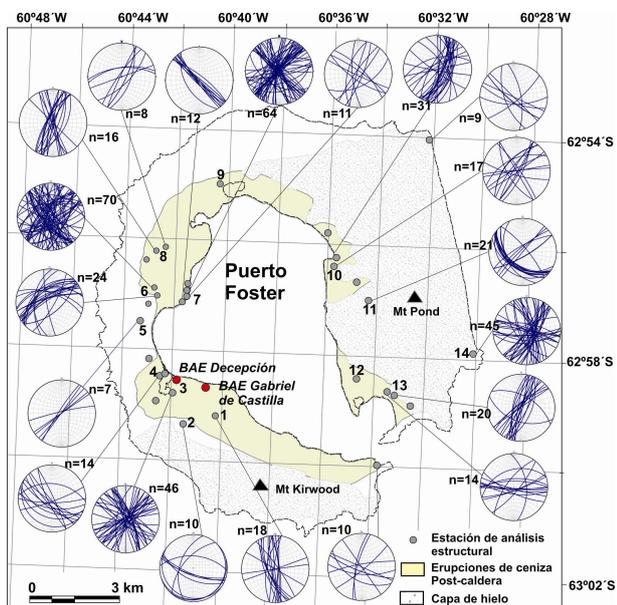


FIGURA 3. Localización de las estaciones de medida en la Isla Decepción y estereogramas de las fracturas medidas.

A partir de este análisis, se interpretan dos campos de deformación (Fig. 4):

1- Campo extensional de componente sinistral (ey según NE-SO), caracterizado por fallas en desgarre con componente normal y fallas normales puras. La orientación del ey de este campo es paralela al valor de SHMAX regional obtenido por otros autores (González-Casado *et al.*, 2000, Maestro *et al.*, 2007).

2- Extensión uniaxial local, probablemente en relación con el hundimiento de la caldera volcánica. La orientación de ey es NO-SE, caracterizado por fallas normales, siendo ortogonal al campo de esfuerzos regional mencionado anteriormente.

De estos análisis no se han podido establecer relaciones temporales entre los dos campos de la deformación interpretados.

Geometría de la caldera volcánica

El colapso de la cámara magmática en la Isla Decepción dio lugar a una bahía interna en la isla, de forma elíptica en planta, con el eje mayor orientado NO-SE. La primera propuesta de límite de la caldera la proponen Pérez-López *et al.*, 2007, a pesar de que está cubierta por erupciones posteriores. Holohan *et al.* (2005) describen diferentes conjuntos de fracturas desarrollados durante los colapsos de calderas. Estos autores señalan la relevancia del desarrollo de fallas radiales y en anillo, que junto con el análisis de la

topografía permiten el estudio y determinación del perímetro de la caldera. Sin embargo, pocas de estas fallas radiales y/o concéntricas se observan en la isla (Fernández-Ibáñez *et al.*, 2005; Maestro *et al.*, 2007).

Pérez-López *et al.* (2007) utilizaron las siguientes características geológicas para definir el límite de la caldera volcánica en la Isla Decepción (Fig.5):

- a- Lineamientos de cráteres post-caldera.
- b- Fisuras eruptivas.
- c- Fallas mayores (Smellie, 2002).
- d- Análisis de la microfracturación.
- e- Cartografía de los depósitos post-caldera. (Smellie *et al.*, 2000).
- f- Estudio de abanicos aluviales activos modificados tectónicamente (utilizando una imagen Quickbird de alta resolución).

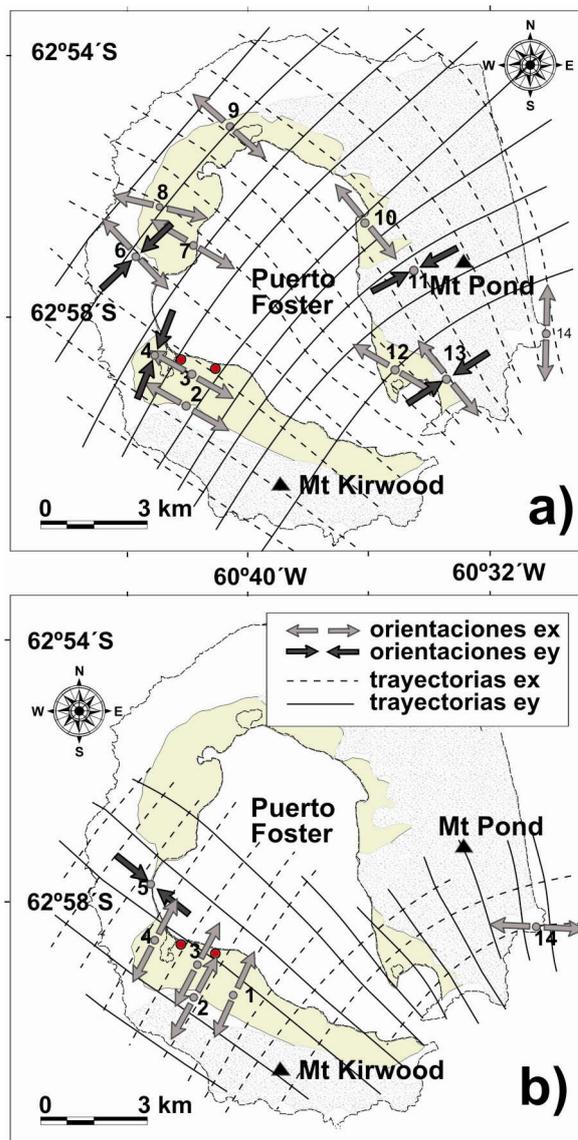


FIGURA 4. Trayectorias de máximo acortamiento en la horizontal (ey) obtenidas mediante planos de falla con la orientación del vector de deslizamiento: a) Campo de deformación regional con ey NE-SO y b) campo de deformación local con ey orientado NO-SE, ortogonalmente con el anterior. Los puntos rojos representan la BAE Gabriel de Castilla y la BAA Decepción.

Según los trabajos de Bosworth *et al.* (2000) y Holohan *et al.* (2005), la forma elíptica de la caldera volcánica de la Isla Decepción, respondería a un colapso desarrollado bajo campo de esfuerzos con SHMAX según NE-SO. Bosworth *et al.* (2000) interpretaron que la elongación de la caldera también refleja la forma de la cámara magmática infrayacente. Esto implica una respuesta mecánica a la presencia de un campo de esfuerzos desviador afectando a la roca encajante. Finalmente, dichos autores también sugieren que la forma final de la caldera puede ser debida a un proceso de “break-out” donde la presencia de estructuras previas controla la orientación y el crecimiento de la caldera.

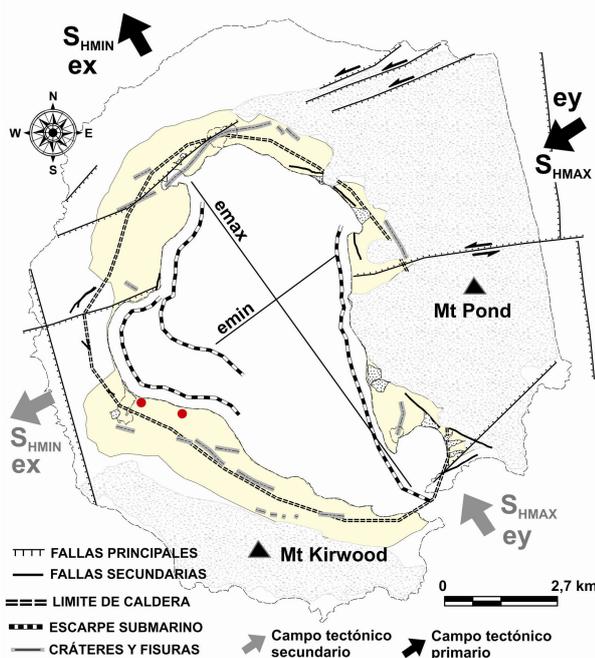


FIGURA 5. Perímetro de la caldera e Isla Decepción, junto con la orientación de los campos de esfuerzo y deformación obtenidos en este trabajo. Si SHMAX es paralelo a e_y sólo se indica una flecha.

CONCLUSIONES

La orientación de SHMAX obtenida en este trabajo a partir del análisis de la anisotropía fractal es similar a la obtenida por otros autores (SHMAX NE-SO) (González-Casado *et al.*, 2000 y Maestro *et al.*, 2007) y compatible con la geometría de la caldera volcánica, elíptica con el eje mayor orientado NO-SE. El análisis de la deformación indica la existencia de dos campos, un primer tensor definido por e_y según NE-SO, paralelo a la orientación regional de SHMAX y un tensor local según NO-SE. Ambos tensores de deformación son ortogonales, asumiendo que pueden ser contemporáneos, se puede interpretar una permutación de ejes de la deformación.

Concluimos que el patrón activo de la fracturación en la Isla Decepción evolucionó a partir del colapso de la caldera bajo un campo de esfuerzos con SHMAX NE-SO. Este campo regional activa fallas en dirección con componente normal y fallas normales puras de orientación NNE-SSO.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CGL2005-24148-E/ANT y CGL2006-28134-E/CLI. Agradecemos al Ejército de Tierra su labor en la Base Antártica Española Gabriel de Castilla y a la Armada Española por su labor en el buque BIO Las Palmas, A-52.

REFERENCIAS

- Bosworth, W., Burke, K. y Strecker, M. (2000): Magma chamber elongation as an indicator of intraplate stress field orientation: “borehole breakout mechanism” and examples from the Late Pleistocene to Recent Kenya Rift Valley. *Journal of the Virtual Explorer*, 2: 34pp.
- Fernández-Ibáñez, F., Pérez-López, R., Martínez-Díaz, J.J., Paredes, C., Giner-Robles, J.L., Caselli, A. T. y Ibáñez, J. M. (2005): Costa Recta beach, Deception Island, West Antarctica: a retreated scarp of a submarine fault?. *Antarctic Science*, 17(3): 418-426.
- González-Casado, J.M., Giner-Robles, J.L. y López-Martínez, J. (2000): Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: not a normal backarc basin. *Geology*, 28: 1043-1046.
- Holohan, E.P., Troll, V.R., Walter, T.R., Münn, S., McDonnell, S. y Shipton, Z.K. (2005): Elliptical calderas in active tectonic settings: an experimental approach. *Journal of Volcanism and Geothermal Research*, 144: 119-136.
- Maestro, A., Somoza, L., Barnolas, A., Rey, J., Martínez-Frías J. y López-Martínez, J. (2007): Active tectonics, fault patterns and stress field of Deception Island: A response to oblique convergence between the Pacific and Antarctic Plates. *Journal of South American Science*, 23: 253-268.
- Pérez-López, R., Paredes, C. y Muñoz-Martín, A. (2005): Relationship between the fractal dimension anisotropy of the spatial faults distribution and the paleostress fields on a Variscan granitic massif (Central Spain): the F-parameter. *Journal of Structural Geology*, 27: 663-677.
- Pérez-López, R. y Paredes, C. (2006): On measuring the fractal anisotropy of 2-D geometrical sets: Application to the spatial distribution of fractures. *Geoderma*, 134: 402-414.
- Pérez-López, R., Giner-Robles, J. L., Martínez-Díaz, J. J., Rodríguez-Pascua, M. A., Bejar, M., Paredes, C. y González-Casado, J. M. (2007): Active tectonics on Deception Island (West-Antarctica): A new approach by using the fractal anisotropy of lineaments, fault slip measurements and the caldera collapse shape. En: *Antarctica: A Keystone in a Changing World* (A. K. Cooper and C. R. Raymond *et al.*, eds.), USGS Open-File Report 2007-1047, Short Research Paper 086, 4p.
- Reches, Z. (1987): Determination of the tectonic stress from slip along faults that obey the Coulomb yield condition. *Tectonics*, 7: 849-861.
- SGE, (2006): Hoja Topográfica: Isla Decepción. 1:25.000. Servicio Geográfico Español Ejército de Tierra.
- Smellie J. L., (2002): *GEOMAP Series Sheets 6-A 6-B, 1:25.000*. En: *Geology and geomorphology of Deception Island* (Smellie, J.L. López-Martínez J. *et al.* eds.). British Antarctic Survey, Cambridge.