

Caracterización por medio de ASM de los sistemas de diques de la isla de Santa María (Azores oriental, Portugal)

AMS characterization of the Santa María Island dike systems (Eastern Azores, Portugal)

Óscar Pueyo Anchuela¹, Andrés Gil Imaz¹, Marceliano Lago San José¹, Zilda França² y Víctor Hugo Forjaz²

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra. Grupo de Investigación Geotransfer. Instituto Universitario en Ciencias Ambientales. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, nº 12 CP.50.009. Zaragoza. opueyo@unizar.es; agil@unizar.es; mlago@unizar.es

² Observatorio Vulcanológico e Geotérmico dos Açores (OVGA), 9560-414 Lagoa, Açores, Portugal zfranca.volcanologist@gmail.com, vforjazovga@gmail.com

ABSTRACT

The analysis of the interaction between mantle plumes and the geodynamical context has produced debates about their influence in the development of insular volcanism. In the case of the Azores archipelago, the alignment of islands related to a static plume has led to models associated with the interaction of the Azores triple point. In this context, the interaction between the Azores-Gibraltar fault and the Terceira rift has been evaluated for the current volcanism distribution. The Santa María Island, the eastern most one from the Azores archipelago, is located in the intersection between both systems and presents fracturation and dike networks agreeing with the two main fracture systems. In this work diachronic dike systems are analyzed through AMS (Anisotropy of Magnetic Susceptibility) with the aim of giving information about the emplacement conditions of dikes during the fracturation stages. The obtained results allow us to identify subvertical dike injections that are compatible with a passive injection through tectonic fractures.

Key-words: AMS, Azores, Santa María Island, dikes, fracturation net.

RESUMEN

El análisis de la interacción entre los procesos asociados a plumas mantélicas y el contexto geodinámico sobre el que se encuentran ha propiciado debates sobre su influencia y el desarrollo del vulcanismo insular. En el caso del archipiélago de las Azores, el modelo de alineamiento de promontorios insulares asociado a una pluma estática ha dado paso a la evaluación de la interacción del punto triple de las Azores. En este contexto interaccionan el límite Azores-Gibraltar y el rift de Terceira. La Isla de Santa María, la más oriental del archipiélago, se encuentra en la unión entre ambos sistemas y presenta una distribución de fracturas y diques compatible con los sistemas de fracturación principales. En este trabajo se analizan los sistemas diacrónicos de diques a través de la ASM (Anisotropía de Susceptibilidad Magnética). Los resultados obtenidos permiten interpretar flujos subverticales asociados a cada uno de los sistemas compatibles con una inyección pasiva en fracturas de origen tectónico.

Palabras clave: ASM, Azores, Isla de Santa María, diques, sistema de fracturación.

Geogaceta, 63 (2018), 127-130
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 14 de julio de 2017
Revisión: 13 de octubre 2017
Aceptación: 23 de octubre 2017

Introducción

El análisis de la Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM) puede permitir analizar las condiciones de emplazamiento de distintos tipos de rocas ígneas con aplicación tanto en lavas como en diques (Cañón Tapia, 2004; Cañón Tapia y Chávez-Álvarez, 2004). Las condiciones de emplazamiento o la dirección e inmersión del vector de flujo pueden dar información sobre la posición de las cámaras magmáticas, la reología del emplazamiento o la caracterización de las relaciones temporales entre inyección y fracturación. El archipiélago de las Azores (Portugal) se localiza en

las proximidades del punto triple entre las placas europea, norteamericana y nubia/africana (Fig. 1). Numerosos trabajos han puesto de manifiesto la presencia de una pluma de contaminación mantélica en los materiales volcánicos aflorantes en el archipiélago, aunque la distribución del vulcanismo actual y el patrón estructural de los edificios volcánicos muestra relaciones con los sistemas de fallas tectónicas de la zona. En este sentido, los sistemas de Flores-Corvo (Azores occidental) muestran una dirección principal de fracturación paralela a la dorsal mesoatlántica, el promontorio insular (sector centro-oriental del archipiélago) muestra una relación con el límite de

la falla Azores-Gibraltar, mientras que el vulcanismo actual se desarrolla según un patrón de fracturación general NW-SE y asociado al rift de Terceira (Fig. 1). Esta distribución de focos volcánicos, la propia geometría y el paralelismo de los promontorios insulares y los edificios volcánicos subaéreos definen un control estructural-geodinámico para el emplazamiento de los sistemas volcánicos con independencia de la presencia de contaminaciones mantélicas en los materiales asociados.

La ASM se ha aplicado en varias de las islas para analizar el modo de emplazamiento de los sistemas de diques, especialmente aquellos que afectan a sus

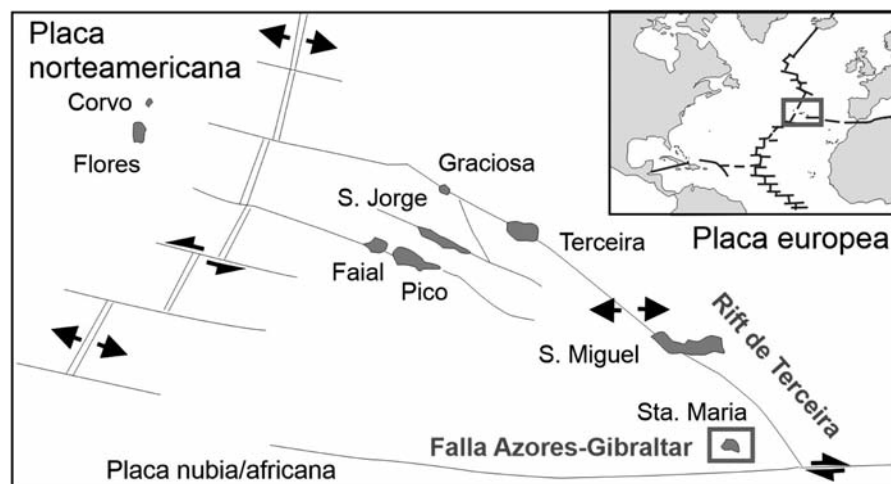


Fig. 1.- Contexto tectónico del archipiélago de las Azores con la localización de la isla de Santa María (modificado de Weiß *et al.*, 2015).

Fig 1.-Tectonic context from the Azores archipelago and the location of the Santa Maria Island (modified from Weiß *et al.*, 2015).

complejos basales, como indicadores indirectos del sistema de fracturación y las tasas de extensión durante el emplazamiento. De esta forma, los sistemas de Corvo o Flores (Pueyo Anchuela *et al.*, 2009) muestran una relación directa con el eje de la dorsal en el que se identifican sistemas de diques con inyección subvertical en el centro de los protovolcanes y pérdida de la inmersión de la inyección en sectores

marginales de los sistemas insulares. Recientemente, Moreira *et al.* (2014), evaluaban los datos de varias islas del archipiélago con sistemas geométricos similares de intrusión verticalizada en zonas de máxima extensión y volcanes actuales, y pérdida de la inmersión del flujo al alejarse de los sistemas principales volcánicos. En este trabajo se presenta un análisis combinado del sistema de fracturación y de las

condiciones de inyección de 9 diques, con el objetivo de evaluar sus condiciones de emplazamiento y su relación con los sistemas de fracturación presentes en la isla.

Contexto geológico y muestreo

La isla de Santa María, la más suroriental del archipiélago (Fig. 1), y de vulcanismo subaéreo más antiguo (Mioceno Superior; Féraud *et al.*, 1980), se relacionaba con el modelo de pluma estática de tipo Hawái (isla más lejana a la dorsal y más antigua). Sin embargo, un análisis estructural más detallado muestra dos periodos definidos de actividad volcánica, con sedimentación marina intercalada. El periodo más antiguo, anterior a los 5 Ma, presenta un patrón estructural paralelo al sistema Azores-Gibraltar, mientras que la estructura del periodo más moderno, es paralela al borde SE del *rift* de Terceira (Storetvedt, 1989; Sibrant *et al.*, 2015; Ramalho *et al.*, 2017).

Los sistemas volcánicos previos están afectados por dos direcciones de fracturación y diques asociados con orientación diferente en función de la edad de las unidades volcánicas afectadas (Fig. 2). Por un lado un sistema inferior con orientación principal NE-SW (5,3 Ma; sistema 01), bien desarrollado en el sector occidental de la Isla (paralelo a la propia orientación del promontorio insular en esta zona), y un sistema de orientación algo más variable, en el sector oriental de la isla, con una orientación principal NNW-SSE pero que varía entre NW-SE y NE-SW (Sistema 02). Los depósitos más recientes analizados permiten identificar también sistemas de diques con una orientación radial con respecto a los edificios volcánicos recientes, aunque con predominio y mayor desarrollo en los de orientación NNE-SSW y N-S (Fig. 2).

Los materiales volcánicos aflorantes permiten definir dos grupos de unidades, el complejo inferior (unidades de Anjos, Touril y Cabrestantes) y una unidad superior (Facho-Pico Alto y Feteiras: Serralheiro *et al.*, 1987). Entre ambas unidades se identifican una serie de depósitos con fósiles marinos (Ávila *et al.*, 2009 y referencias allí incluidas). Los diques (Fig. 2) de orientación principal N045 presentan una edad de 5,3 Ma, frente a los de orientación general N150, más jóvenes, con una edad de 4,3 Ma (Sibrant *et al.*, 2015).

El muestreo realizado en este trabajo incluye ambos sistemas de diques; el primer

estación	K1			K2			K3		
	azi	inm	Ángulo conf.	azi	inm	Ángulo conf.	azi	inm	Ángulo conf.
SMP01	217	68,8	46,3/21,3	52,7	20,5	46,4/21,3	320,7	5,2	23,7/19,6
SMP02	261,9	58,3	39,6/19,8	53,4	28,5	39,7/22,6	150,4	12,7	23,7/18,7
SMP03	144,8	65,4	33,3/18,9	274,8	16,4	34,7/30	10,3	17,8	32,1/19,6
SMF01	295,1	13,1	32,7/22	29,9	19,7	31,6/17,6	173,6	66,1	25,9/19
SMD01	207,9	68,9	10,4/6,4	339,6	14,4	12,7/7,3	73,6	15,1	1,9/6,5
SMG01	261,8	50,3	52,9/16,4	39	31,3	52,9/18,9	143	21,7	20/15,1
SMG02	16	49	26,9/9,7	176,5	39,3	27/20,6	274,6	9,7	21,5/8,2
SMG03	335,4	78,5	23,4/13,2	141,4	11,2	48,2/22,3	231,9	2,7	48,1/13
SMT01	322	82	44,6/17,9	44,6	22,1	24/15,7	203,8	3,8	24/15,7

Tabla I.- Parámetros magnéticos de las estaciones analizadas. n: número de especímenes analizados, Km: susceptibilidad media, L: factor de lineación, F: factor de foliación, P': grado de anisotropía corregida, T: parámetro de forma (σ : desviación estándar de las medidas).

Table I.- Magnetic parameters from the analyzed AMS sites. n: number of specimens, Km: mean susceptibility, L: lineation factor, F: foliation factor, P': corrected degree of anisotropy, T: shape parameter (σ : standard deviation)

estación	n	Km (σ)	L (σ)	F (σ)	P' (σ)	T (σ)
SMP01	153	139E-02 (4,63E-03)	1,018 (0,017)	1,030 (0,019)	1,050 (0,031)	0,253 (0,360)
SMP02	173	3,31E-02 (7,01E-03)	1,009 (0,007)	1,019 (0,011)	1,030 (0,014)	0,295 (0,439)
SMP03	55	8,04E-03 (3,99E-03)	1,004 (0,003)	1,005 (0,003)	1,008 (0,005)	0,227 (0,340)
SMF01	8	5,15E-03 (6,28E-03)	1,004 (0,002)	1,009 (0,010)	1,013 (0,013)	0,281 (0,322)
SMD01	10	1,45E-02 (3,19E-03)	1,050 (0,011)	1,023 (0,009)	1,076 (0,008)	-0,360 (0,247)
SMG01	46	2,78E-02 (1,14E-02)	1,010 (0,008)	1,032 (0,024)	1,045 (0,033)	0,504 (0,176)
SMG02	19	3,32E-02 (3,01E-03)	1,013 (0,005)	1,026 (0,011)	1,040 (0,014)	0,334 (0,193)
SMG03	59	4,16E-02 (4,85E-03)	1,044 (0,030)	1,032 (0,016)	1,080 (0,032)	-0,078 (0,479)
SMT01	157	2,69E-02 (8,02E-03)	0,044 (0,003)	1,005 (0,005)	1,009 (0,008)	0,141 (0,375)

Tabla II.- Datos direccionales del elipsoide de la ASM (estadística de Jelinek, 1978).

Table II.- Directional AMS data (Jelinek 1978 statistics).

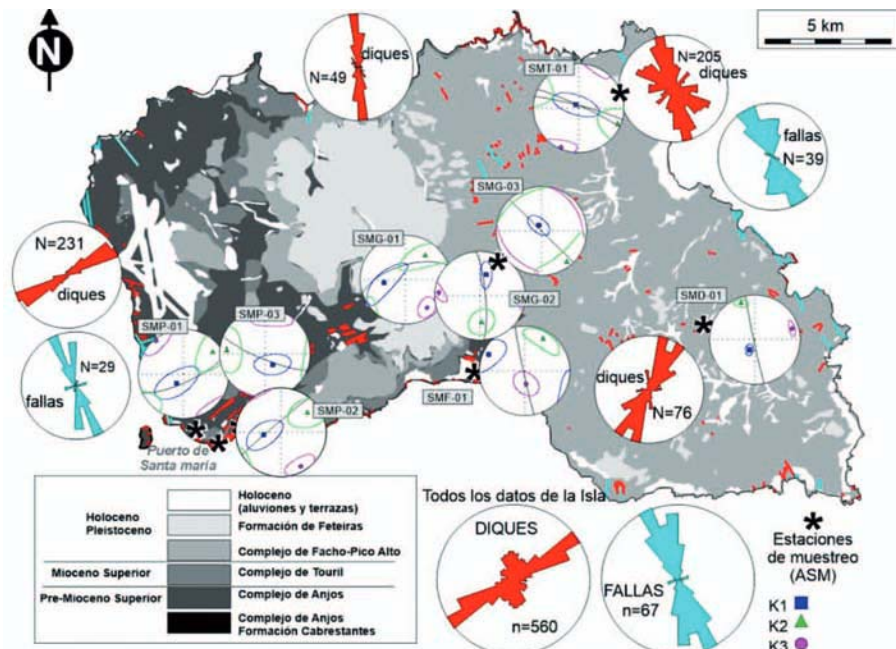


Fig. 2.- Cartografía geológica de la Isla de Santa María sobre la que se superponen las direcciones de diques y fallas y los resultados obtenidos del estudio de la ASM (modificado de Serralheiro *et al.*, 1987). En los estereogramas de ASM se representa las medias y conos de confianza de la estadística de Jelinek (1978) y el plano medio de la superficie de emplazamiento del dique. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Geological map of Santa María Island where dikes, faults and AMS results are included (modified from Serralheiro *et al.*, 1987). Confidence cones and mean values of AMS axes are represented following Jelinek's statistics (1978). The mean emplacement surface is also represented in the stereoplots. See color figure in the web.

sistema en el entorno del puerto de Santa María y sector centro-meridional de la isla (sistema 1; diques SMP 01, 02 y 03 y SMF01), y el segundo sistema en el sector oriental de la isla (sistema 2; diques SMG 01, 02 y 03; SMD, 01 y SMT01; Fig. 2).

La toma de muestras se realizó con una perforadora de gasolina y las muestras fueron analizadas con un equipo KLY-3S de AGICO (792 muestras; ver Tablas I y II). El muestreo fue realizado siguiendo patrones borde-centro-borde con el objetivo de analizar la variabilidad mineralógica y el patrón de orientación del elipsoide magnético a lo largo de los diques. La anisotropía del elipsoide de la susceptibilidad magnética fue caracterizada principalmente a través de los parámetros P' y T (definición en Jelinek, 1981) y de la susceptibilidad media K_m .

Resultados

Considerando el conjunto de datos de todos los diques analizados, la susceptibilidad media muestra valores altos que pueden superar los 50.000×10^{-6} (SI). Estos valores están de acuerdo con las características máficas de las rocas analizadas. Sin embargo existe una amplia variación (Fig. 3). El análisis de la orientación de los diques

y su edad con respecto al parámetro K_m no muestra una relación directa, identificándose una superposición de los valores para ambos sistemas (Fig. 3). El análisis en detalle muestra que el rango máximo de variación de parámetros magnéticos analizados puede producirse dentro de un mismo dique, relacionado con su diferenciación composicional.

El elipsoide de la ASM muestra fábricas de tipo planar (ejes K_1 y K_2 contenidos o paralelos al plano de emplazamiento medido en campo) y parámetros de forma positivos ($T > 0$; Fig. 3b). Excepto la estación SMF-01, que presenta una relación geométrica diferente con respecto a la superficie de emplazamiento, el resto de estaciones presentan una lineación magnética contenida en el plano de emplazamiento y altas inmersiones. Dentro de un mismo dique los ejes del elipsoide la ASM pueden mantenerse iguales o presentar ligeras variaciones en el análisis borde-centro-borde (Fig. 4). En detalle puede identificarse como la lineación magnética y la foliación varían a lo largo del dique con una disposición imbricada con respecto a las paredes del dique en las zonas de borde frente a una lineación magnética subvertical, paralela a las paredes del dique y a la elongación de vacuolas

en los depósitos (ver Fig. 4 como ejemplo de variación). Esta variación se produce de forma paralela a una modificación de la anisotropía del elipsoide.

Las curvas de variación de la susceptibilidad realizadas muestran un predominio de fases ferromagnéticas en las muestras analizadas con resultados similares a los obtenidos por Pueyo Anchuela *et al.* (2009) o Morerira *et al.* (2014) con temperaturas de Curie progresivas y variables debido a la variación composicional de titanomagnetitas

Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos a partir del análisis realizado permiten constatar la presencia de dos direcciones de fracturación y diques asociados con orientación diferente en función de la edad de las unidades volcánicas afectadas (Fig. 2).

El flujo inferido a partir del análisis de la ASM muestra, en los perfiles borde-centro-borde, cambios progresivos de la anisotropía del elipsoide, con distribución general simétrica respecto al plano central de los diques (ver por ejemplo Cañón Tapia y Herrero-Bervera, 2009 o Pueyo Anchuela *et al.*, 2009; Fig. 4) y cambios de orientación de la foliación magnética con respecto a las paredes, pasando de ligera imbricación en los bordes a lineación magnética subvertical y contenida en la superficie de emplazamiento en el sector central. Resultados similares, y de variación progresiva, han sido puestos de manifiesto previamente (Correa Gomes *et al.*, 2001) como también en otros diques recientes de las Azores (Pueyo Anchuela *et al.*, 2009). En ambos casos la fábrica magnética ha sido interpretada como representativa tanto del cambio del tipo como de la orientación del material ígneo durante la inyección. Estos patrones son imbricación de la foliación magnética (paralela a las paredes del dique) asociada al efecto de cizalla contra el encajante (Knight y Walker, 1988) y un flujo newtoniano en el sector central de los mismos (Wing-Fatt y Stacey, 1966; ver discusión en Cañón Tapia, 2004 y Cañón Tapia y Chávez-Álvarez, 2004).

Evaluando dicho modelo geométrico, los resultados obtenidos en este trabajo permitirían definir un sentido de flujo subvertical para el primer sistema, y flujos subverticales para el sector oriental y pérdida de inmersión hacia el W en el caso del se-

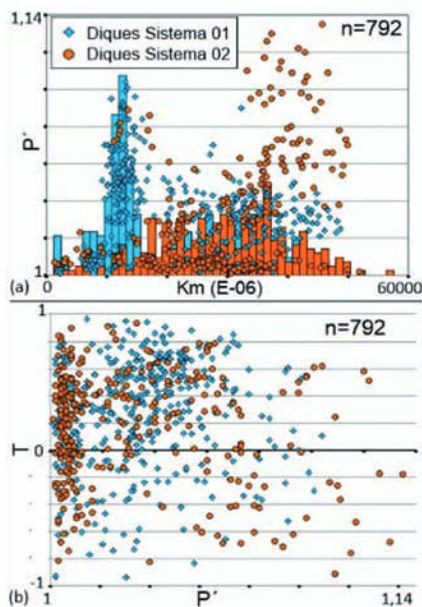


Fig. 3.- (a) Diagrama Km vs. P' . Se incluye el histograma de valores de Km. (b) P' vs. T. Los diques se han separado por sistemas. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- (a) Km vs. P' plot with Km histogram and (b) P' vs. T. Dikes are represented grouped by systems. See color figure in the web.

gundo sistema. Esta distribución permitiría explicar la propia orientación del sistema volcánico de la isla con dos sistemas de fracturación independientes y asociados por un lado a una extensión principal perpendicular al sistema Azores-Gibraltar, y un segundo sistema con dirección de extensión perpendicular al sistema del *rift* de Terceira. En ambos casos con inyecciones de tipo subvertical y controladas por la fracturación tectónica de la zona.

Localmente (estación SMF01) la presencia de procesos de basculamiento y colapso del sistema volcánico podría explicar la distribu-

ción anómala del flujo inferido (Pueyo Anchuela *et al.*, 2014) o bien la presencia de un cambio de la reología del material durante la intrusión compatible con un flujo de tipo subhorizontal, en situación distal con respecto al foco de inyección principal. En estos casos, la cizalla con el encajante definiría modelos geométricos más complejos (flujo paralelo al eje K2; Khan, 1962; o flujos más viscosos y cambios de los tamaños de partículas; Cañón Tapia, 2004). La variación del patrón de fábrica magnética de borde a centro en los diques analizados muestra características similares para ambos sistemas que supondrían un mecanismo volcánico similar. Esta similitud mostraría un proceso volcánico asociado a sistemas de fracturación tectónica diferentes acorde con una inyección de material mantélico de forma pasiva y asociada a la variación geodinámica del punto triple analizado.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento (FLAD), "VULMAC Vulcanismo da Macaronesia Project", code MAC/2.3/A7, Acções Integradas Luso-Espanholas-CRUP y el Grupo de Investigación Geotransfer de la Universidad de Zaragoza. Los autores quieren agradecer los comentarios y sugerencias de Néstor Vegas, Manuel Díaz Azpiroz y un revisor anónimo a la versión original del manuscrito.

Referencias

Ávila, S.P., Madeira, P., Zazo, C., Kroh, A., Kirby, M.m Marques da Silva, Cachao, M. y Frias Martins, A.M. (2009). *Palaeogeogra-*

phy, Palaeoclimatology, Palaeoecology 274, 18–31

Cañón Tapia, E. (2004). En: *Magnetic Fabric: Methods and Applications* (F. Martín-Hernández, C.M. Lüneburg, C. Aubourg y M. Jackson, Eds.). Special Publications, Geological Society of London 238, 205–225.

Cañón Tapia, E. y Chávez-Álvarez, M.J. (2004). En: *Magnetic Fabric: Methods and Applications* (F. Martín-Hernández, C.M. Lüneburg, C. Aubourg y M. Jackson, Eds.) Special Publications, Geological Society of London 238, 227–249.

Cañón Tapia, E. y Herrero-Bervera, E. (2009). *Tectonophysics* 466, 3–17.

Correa-Gomes, L.C., Souza Filho, C.R., Martins C.J.F.N. y Oliveira, E.P. (2001). *Journal of Structural Geology* 23, 1415–1428.

Féraud, G., Kaneoka, S. y Allègre, C. (1980). *Earth and Planetary Science Letters* 46, 275–286.

Jelinek, V. (1978). *Studia Geophysica et Geodetica* 22, 50–62.

Jelinek, V. (1981). *Tectonophysics* 79, 63–67.

Kahn, M.A. (1962). *Journal of Geophysical Research* 67, 2873–2885.

Knight, M.D. y Walker, G.P.L. (1988). *Journal of Geophysical Research* 93, 4301–4319.

Moreira, M.A., Geoffroy, L., Pozzi, J.P. (2014). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 10.1002/2014JB010982

Pueyo Anchuela, Ó., Gil Imaz, A., Lago San José, M., França, Z. y Forjaz, V.H. (2009). *Geogaceta* 47, 149–152.

Pueyo Anchuela, Ó., Gil Imaz, A., Gil-Peña, I., Maestro, A., Galindo-Zaldívar, J., López-Martínez, J., Rey, J., Soto, R. y Oliva-Urcia, B. (2014). *Tectonophysics* 626, 69–85.

Ramalho, R.S., Hellfrich, G., Maderia, J., Cosca, M., Thomas, C., Quartau, R., Hipólito, A., Rovere, A., Hearty, P.J. y Ávila, S.P. (2017). *GSA Bulletin* 129, 372–391.

Serralheiro, A., Alves, C.M., Forjaz, V.H. y Rodrigues, B. (1987). *Carta Vulcanológica dos Açores, Ilha de Santa Maria*. Centro de Vulcanologia INIC, Ponta Delgada.

Sibrant, A.L.R., Hildenbrand, A., Marques, F.O. y Costa, A.C.G. (2015). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 291, 49–62.

Storetvedt, K.M., Serralheiro, A., Moreira, M. y Abranches, M.C. (1989). *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 58, 228–238.

Weiß, B.J., Hübster, C. y Lüdmann, T. (2015). *Tectonophysics* 654, 75–95.

Wing-Fatt, L. y Stacey, F. (1966). *Pure and Applied Geophysics* 64, 78–80.

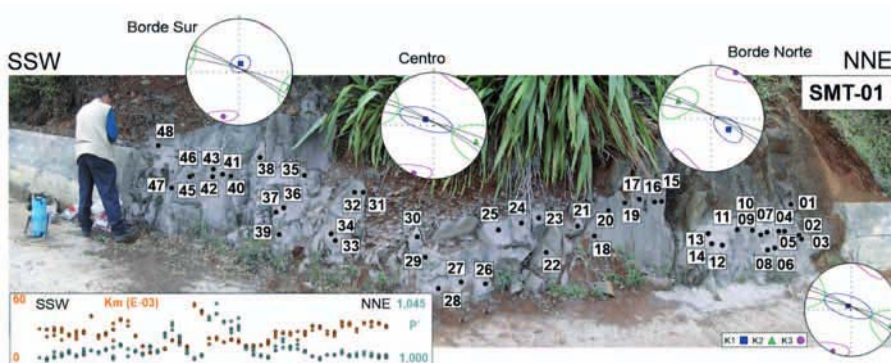


Fig. 4.- Resultados obtenidos en el análisis del dique SMT-01. En la fotografía se incluyen indicaciones de la posición del muestreo, se representa el estereograma de la estación completa y 3 estereogramas para los sectores de borde y centro. En la esquina inferior izquierda se representan dos cortes de parámetros (Km y P') del dique completo. Ver figura en color en la web.

Fig.4.- Main results obtained in the analysis of SMT-01 dike, over the photograph the location of sampling points is highlighted, the stereoplot for the site and separated for border-center-border is also included. At the lower-left corner a section of Km and P' for the whole dike is presented. See color figure in the web.