Determinación de la dirección de inyección filoniana, mediante el análisis de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM)

Determination of the direction of dyke injection from the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) analysis

M. Yenes

Dpto. de Geología. Fac. Ciencias. Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca.

ABSTRACT

The AMS thecnique allow us to make a quick and precise determination of the magmatic flow plane and the magmatic flow direction, inside dykes and in their igneous host rock. Once calculated, the existing relationships between these two parameters allow us to establish if the stress system which originated the dykes emplacement coincides with that contributing to the emplacement of the pluton where they are included or on the contrary, has an origin related with later regional stresses. In this article, we have studied three aplitic dykes intruding in the La Alberca-Bejar granitic area. Each of them represents one of the three main types of dykes existing in the granitic massifs.

Key words: *Dyke injection, magnetism, AMS, Spanish Central System, Central Iberian Zone.*

Geogaceta 23 (1998), 173-176
ISSN: 0213683X

Introducción

Dentro de las estructuras frágiles que presentan los macizos graníticos, destacan por su interés estructural, los filones de granitos, microgranitos, aplitas, pegmatitas, etc. Su estructuración dentro del macizo granítico, está en relación, bien con los esfuerzos que han producido el flujo del magma en sus estadios finales, o bien con esfuerzos regionales que actúan con posterioridad a su total cristalización .

Los filones son fracturas de tensión rellenas por líquidos magmáticos más evolucionados. Estas fracturas se producen por una tracción uniaxial en dirección perpendicular al plano del filón (Marre, 1982) y, por lo tanto, su plano es paralelo a la dirección del máximo esfuerzo (Jaeger y Cook, 1969; Shaw, 1980; Nicolas, 1984; Bouchez y Guineberteau, 1984; etc.). Esto permite determinar los sistemas de esfuerzos que han actuado sobre el plutón, a partir del estudio de la orientación de los sistemas de filones.

Por otro lado, la determinación de la dirección de la inyección del material magmático dentro de los filones, tiene gran importancia ya que puede indicar el régimen de flujo magmático regional y, en determinados casos, el área fuente de los materiales filonianos (Doblas, 1990). En este trabajo se propone una forma rápida y precisa de establecer la dirección de la inyección magmática dentro de los filones, mediante la determinación de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM). Además, al determinar, al mismo tiempo, el plano y la dirección de flujo magmático del granito encajante, se puede establecer una relación entre los esfuerzos que provocan el emplazamiento del magma y los que determinan la inyección del material dentro del filón.

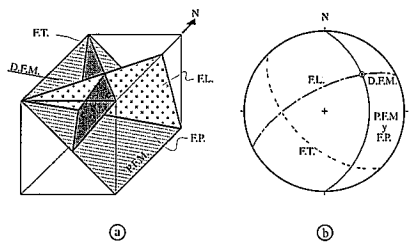

Fig. 1.- a) Bloque diagrama donde se ha representado el plano de flujo magmático (PFM) y la dirección de flujo magmático (DFM), del granito encajante. Los tres tipos principales de filones son: filones paralelos (F.P.) (no se han representado ya que coinciden con el PFM), filones transversales (F.T.) y filones longitudinales (F.L.). b) Representación en falsilla equiareal, hemisferio inferior, de los planos y línea representados en el bloque diagrama.

Fig. 1.- a) 3D sketch with a representation of the magmatic flow plane (PFM) and the magmatic flow direction (DMF) in the host granite. The three main types of dykes are: parallel dykes (F.P.) (these ones have not been represented as they coincide with the PFM), trasverse dykes (F.T.) and longitudinal dykes (F.L.). b) Representation of the planes and line shown in the 3D sketch on the lower hemisphere, equal-area diagrams.

La susceptibilidad magnética (K) es un tensor de segundo orden que puede ser geométricamente representado por un elipsoide con tres ejes principales $K_1 \geq K_2 \geq K_3$ (Hroudra, 1982; Borradaile, 1988). Se ha comprobado que cuando la estructuración de la roca es magmática, el eje K_1 es paralelo a la lineación magmática y el eje K_3 es perpendicular a la foliación magmática (King, 1966; Rousset y Daly, 1969; Guillet *et al.*, 1983; Bouchez *et al.*, 1990; Leblanc *et al.*, 1994; etc.). Si no existe deformación en estado sólido, la fábrica magmática refleja la dinámica propia del cuerpo granítico durante su ascensión y/o emplazamiento, o bien la interacción de esta dinámica con la deformación regional, si existiera.

En los estudios de ASM, además de los datos direccionales, se determina la susceptibilidad magnética media (K_m), que se define como la media aritmética de las magnitudes de susceptibilidad de cada uno de los tres ejes principales del elipsoide:

$$K_m = \frac{K_1 + K_2 + K_3}{3}$$

La importancia de este parámetro, radica en que existe una relación directa entre el valor de K_m y el contenido en hierro de la roca (Amice y Bouchez, 1989; Diot *et al.*, 1987; etc.), y por lo tanto, puede utilizarse como un indicador del tipo petrológico que se está estudiando.

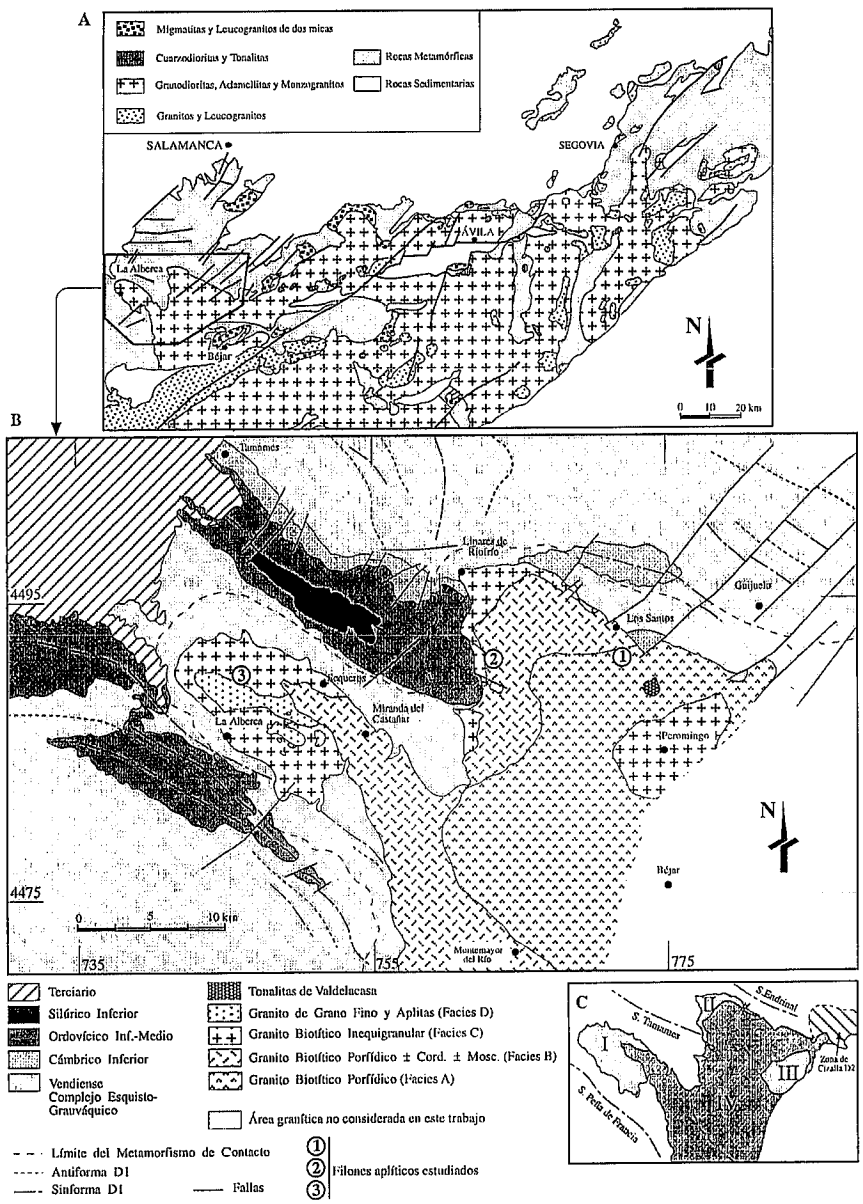

Fig. 2.- a) Esquema geológico del Sistema Central Español (tomado de Fuster y Villaseca, 1987) y localización de la zona estudiada. b) Esquema geológico del área estudiada con la localización geográfica de los tres filones aplíticos estudiados (UTM referidas al huso 29 T). c) Plutones: (I) Sequeros, (II) Linares de Riofrío, (III) Peromingo y (IV) Montemayor del Río.

Fig. 2.- a) Geological sketch of the Spanish Central System (from Fuster and Villaseca, 1987) and location of the studied area. b) Geological sketch of the studied area and geographic location of the three aplitic dykes studied (UTM referred to 29 T zone). c) Plutons: (I) Sequeros, (II) Linares de Riofrio, (III) Peromingo and (IV) Montemayor del Rio.

Por otro lado, también se puede cuantificar la fábrica de las rocas mediante el cálculo de la anisotropía total (Nagata, 1961):

$$P = \frac{K_1}{K_3}$$

Este parámetro puede ser expresado en porcentaje, de forma que el valor obtenido sea más intuitivo:

$$P\% = 100\left[\left(\frac{K_1}{K_3}\right) - 1\right]$$

Sin embargo, al utilizar este tipo de parámetros que dependen de la relación de intensidades de los ejes del elipsoide de ASM, es preferible corregir la contribución diamagnética del cuarzo y los feldespatos ($-1{,}4 \cdot 10^{-5}$ SI), ya que en granitoides con valores de susceptibilidad total bajos (sin contribución ferromagnética, como es el caso de los estudiados en este trabajo), la corrección del diamagnetismo evita valores anormalmente elevados de la anisotropía (Rochette, 1987; Bouchez *et al.*, 1987).

Por lo tanto, el parámetro utilizado en este estudio será:

$$P_p\% = 100\left[\left(\frac{K_1 + 1{,}4}{K_3 + 1{,}4}\right) - 1\right]$$

Tipos de filones

Siguiendo la clasificación de filones propuesta por Marre (1982), podemos diferenciar tres tipos de filones (Fig. 1):

Filones paralelos: son aquellos cuyo plano es paralelo al plano de flujo magmático (PFM) del granito encajante. Su origen puede estar relacionado con la disminución de volumen del magma que acompaña a su cristalización, lo que provoca la aparición de tensiones en la roca en todas las direcciones, estas tensiones se disipan mediante la fracturación de la roca aprovechando los planos de anisotropía previos, en este caso el PFM. Este mecanismo explicaría la aparición de filones centimétricos, pero no la de filones mayores. Por otro lado, su origen puede estar relacionado con un sistema de esfuerzos de escala regional, diferente del que ha provocado el emplazamiento del magma y que habría actuado una vez cristalizado éste totalmente. En este sentido, si los planos de anisotropía previos (en este caso el PFM) están favorablemente orientados respecto a estos esfuerzos se produciría la aparición de filones paralelos.

Filones transversales: son aquellos cuyo plano es perpendicular al PFM y su polo coincide con la dirección de flujo magmático (DFM) del granito encajante. Este tipo de filones aparecen en la mayoría de los macizos graníticos, ya que su origen está relacionado con los esfuerzos que provocan el emplazamiento del magma y, por lo tanto, registran las características finales del flujo magmático. Cuando el magma se está emplazando, lo hace con una dirección de máxima extensión que es la DFM, a medida que la ductilidad del magma decrece debido a su cristalización, la velocidad de deformación deja de ser constante en toda la roca, lo que provoca que se originen fracturas de tensión perpendiculares a la máxima extensión, estos dominios así separados, si se siguen desplazando, provocan la aparición de los filones transversales. Este tipo de filones suelen estar relacionados con plutones graníticos de grandes dimensiones, y se localizan, fundamentalmente, en las zonas de borde de los mismos.

Filones longitudinales: son aquellos cuyo plano es perpendicular al PFM y paralelo a la DFM del granito encajante. Estos filones se crean con posterioridad a los filones transversales y su origen es el mismo que el propuesto para los filones paralelos (disminución de volumen por cristalización y/o esfuerzos regionales posteriores).

Estudio de tres filones en el área granítica de La Alberca-Béjar

El área granítica de La Alberca-Béjar, está localizada en el extremo noroccidental del Sistema Central Español (Fig. 2). Su emplazamiento se produjo durante las últimas etapas de la Orogenia Varisca, siendo contemporáneo

	Muestra	K_1	K_3	K_m	Pp%
Encajante	YM-120	29/62	184/27	15,6	4,8
Fil—n	YA-121	100/8	279/82	3	6,3

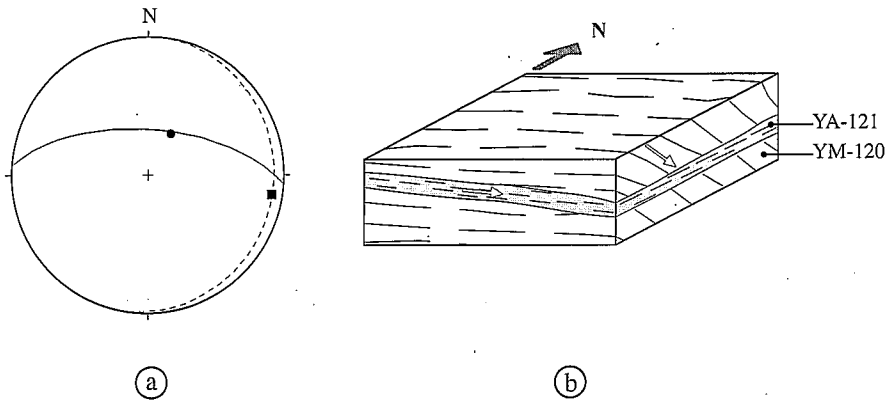

Fig. 3.- Filón nº 1. Tabla con los valores obtenidos en el análisis de ASM: K_1 (dirección e inclinación), K_3 (dirección e inclinación), K_m (susceptibilidad magnética media 10^{-5}SI) y Pp% (tasa de anisotropía total). a) Representación en falsilla equiareal, hemisferio inferior, de las medidas de ASM obtenidas para el granito encajante (la línea continua es el PFM y el círculo negro la DFM) y para el filón aplítico (la línea discontinua es el PFM y el cuadrado negro la DFM). b) Bloque diagrama esquemático de la estructuración del filón (las líneas discontinuas representan los PFM y las flechas blancas las DFM).

Fig. 3.- Dyke nº 1. Table of the obtained values in the AMS analysis: K_1 (direction and dip), K_3 (direction and dip), K_m (mean magnetic susceptibility 10^{-5}SI) and P_p% (percentage of total anisotropy). a) Representation on the lower hemisphere, equal-area diagrams, of the AMS measurements obtained for the host granite (solid line represents the PFM and the black circle represents the DFM) and for the aplitic dyke (dashed line represents the PFM and the black square represents the DFM) b) 3D sketch of the structure of the dyke (dashed lines represent the PFM and white arrows represent the DFM).

con la tercera fase de deformación varisca (D_3) de carácter compresivo (Yenes, 1996). En función de la distribución cartográfica de las diferentes facies graníticas y de las relaciones intrusivas entre ellas, se han diferenciado cuatro plutones (Yenes, 1996): Plutón de Sequeros (I), Plutón de Linares de Riofrío (II), Plutón de Peromingo (III) y Plutón de Montemayor del Río (IV) (Fig 2). Estos plutones presentan un cortejo filoniano importante formado, fundamentalmente, por filones aplíticos y, en menor proporción, pegmatíticos, cuyos espesores varían de centimétricos a decimétricos. En los plutones formados por Facies C (Granito Biotítico Inequigranular): Sequeros, Linares de Riofrío y Peromingo, aparecen distribuidos en todas las zonas, pero con mayor abundancia en las zonas de contacto con el encajante metamórfico o con otras facies graníticas; mientras que en el Plutón de Montemayor del Río, aparecen, fundamentalmente, en la Facies B (Granito Biotítico Porfídico ± Cordierita ± Moscovita), que es la facies de borde del plutón.

A continuación se presenta, el resultado del estudio realizado en tres filones aplíticos, dos localizados dentro de la Facies B del Plutón de Montemayor del Río y otro localizado dentro de la Facies C del Plutón de Sequeros (Fig. 2).

- *Filón nº 1* (Fig. 3): Es un filón aplítico de 0,5 m de potencia, localizado al oeste de Los Santos, que intruye subhorizontalmente dentro de la Facies B del Plutón de Montemayor del Río. Se tomaron dos muestras para el estudio de ASM: una en el granito situado por debajo del filón *(YM-120)* y otra dentro del filón *(YA-121)*. Se trata de un filón transversal (Fig. 3), ya que su emplazamiento se produce según un plano aproximadamente perpendicular al PFM del granito encajante y el polo del PFM del filón (K_3) está próximo a la DFM del granito encajante (K_1). Por lo tanto, su origen debe estar relacionado con el mismo sistema de esfuerzos que ha provocado el emplazamiento del macizo granítico.

- *Filón nº 2* (Fig. 4): Es un filón aplítico de 0,3 m de potencia, localizado al oeste de Sequeros, que intruye en la Facies C del Plutón de Sequeros. Se han tomado dos muestras para el estudio de ASM, una en el granito *(YI-142)* y otra en el filón *(YA-143)*. En la Fig. 4 se ve que se trata de un filón paralelo, ya que los dos PFM están muy próximos. Su origen, por tanto, no está relacionado con el mismo sistema de esfuerzos que ha provocado el emplazamiento del granito encajante, sino que está relacionado con otro sistema de esfuerzos que ha actuado con posterioridad a la completa cristalización del magma. En este sentido, se ha demostrado (Yenes, 1996) que el granito ha sido deformado ligeramente en estado sólido por la D_3 varisca, la cual tiene su dirección de máximo esfuerzo N30°E y subhorizontal, lo que podría producir la aparición de fracturas de tensión subhorizontales en el granito, aprovechando la anisotropía previa de la roca (PFM), cuando ésta se disponga subhorizontalmente, como en el caso estudiado.

- *Filón nº 3* (Fig. 5): Es un filón aplítico de 0,3 m de potencia, localizado al sur de Linares de Riofrío, que intruye dentro de la Facies B del Plutón de Montemayor del Río. Se han obtenido dos muestras para el estudio de ASM:

	Muestra	K_1	K_3	K_m	Pp%
Encajante	YI-142	15/5	164/78	12,7	2,7
Fil—n	YA-143	171/19	52/58	1	1,6

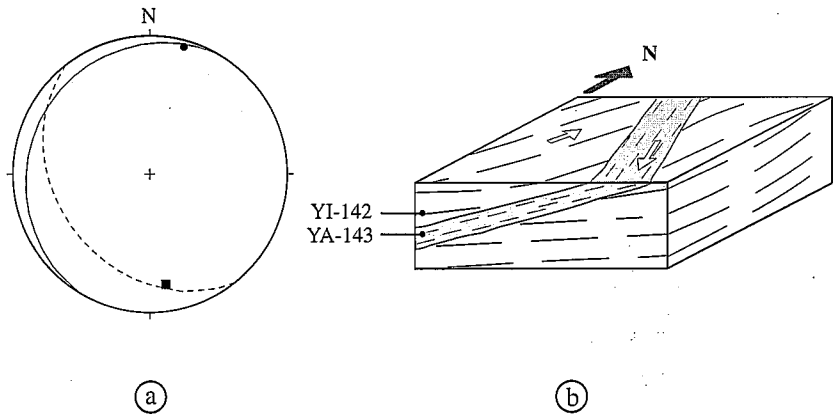

Fig. 4.- Filón nº 2. La misma leyenda que en la Fig. 3.

Fig. 4.- Dyke nº 2. Same legend as for Fig. 3

	Muestra	K_1	K_3	K_m	Pp%
Encajante	YM-128	56/10	321/50	16,6	1,8
Fil—n	YA-129	68/2	166/68	0,4	2,8

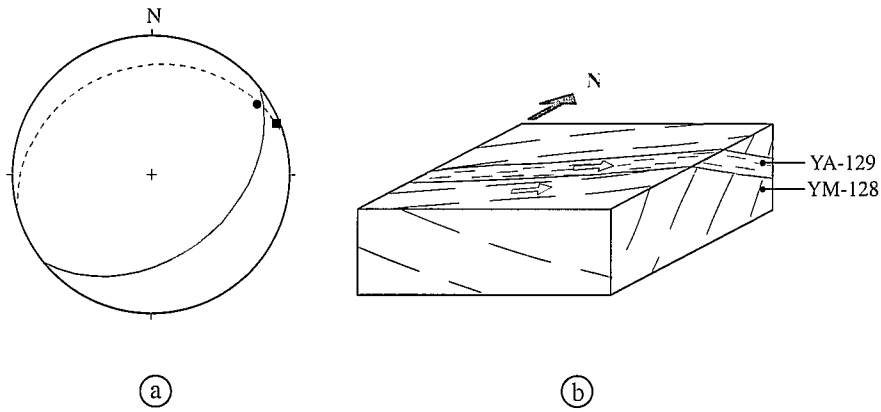

Fig. 5.- Filón nº 3. La misma leyenda que en la Fig. 3.

Fig. 5.- Dyke nº 3. Same legend as for Fig. 3.

una dentro del filón *(YA-129)* y otra en el granito encajante *(YM-128)*. Se trata de un filón longitudinal (Fig. 5), ya que los dos PFM son prácticamente perpendiculares y el PFM del filón pasa por la DFM del granito encajante. Su origen, al igual que el filón nº 2, no está directamente relacionado con el sistema de esfuerzos que ha provocado el emplazamiento del macizo granítico. Por lo tanto, podría estar relacionado con los esfuerzos producidos por la D_3 varisca, que originan la aparición de fracturas de tensión aprovechando, en este caso, la anisotropía marcada por la DFM del granito encajante.

En cuanto a los valores de susceptibilidad magnética media (K_m), las muestras tomadas dentro de los filones aplíticos *(YA-121, YA-143 y YA-129)*, presentan valores muy bajos ($<3\cdot 10^{-5}$ SI), lo que se corresponde con el escaso contenido en minerales magnéticos, principalmente biotitas, de las muestras analizadas. Por el contrario, las muestras tomadas en el encajante granítico de los filones, presentan susceptibilidades magnéticas medias mayores, siendo más altas en las dos muestras tomadas en la Facies B: *YM-120* ($15{,}6\cdot 10^{-5}$ SI) y *YM-128* ($16{,}6\cdot 10^{-5}$ SI), que en la muestra tomada en la Facies C: *YI-142* ($12{,}7\cdot 10^{-5}$ SI).

El porcentaje de anisotropía total (Pp%), aumenta a medida que se incrementa la tasa de deformación sufrida por la roca (Leblanc *et al.*, 1994; Bouchez y Gleizes, 1995). En este sentido, la inyección de magma a través de conductos estrechos confinados, origina una tasa de deformación elevada en el magma (Best, 1982); esta deformación es mayor en las zonas próximas al contacto con la roca de caja del filón, que en el centro del mismo (Coward, 1980). Estos hechos explican que la tasa de anisotropía sea mayor en los filones nº 1 y nº 3 (6,3 % y 2,8 %, respectivamente), que en sus encajantes (4,8% y 1,8 %, respectivamente). Sin embargo, en el filón nº 2, la tasa de anisotropía (1,6 %) es menor que la de su encajante (2,7 %), lo que puede ser debido a que esta muestra ha sido tomada en el centro del filón, donde la deformación debe ser menor que en los bordes. Para confirmar esta hipótesis sería necesario realizar un muestreo sistemático desde el centro del filón hasta sus bordes.

Conclusiones

Mediante el estudio de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM), se puede determinar de forma precisa la dirección de la inyección filoniana, lo que permite relacionar los filones estudiados, con los sistemas de esfuerzos que los han generado. Además de los datos direccionales, la técnica del ASM proporciona una serie de parámetros que están relacionados con la composición de la roca y con la tasa de deformación que ha sufrido, lo que permite completar el análisis de los filones y establecer conclusiones respecto al mecanismo de inyección del magma dentro de los filones.

Agradecimientos

A los Drs. Fernando Álvarez Lobato y Gabriel Gutiérrez Alonso por sus aportaciones a este trabajo. Financiado por la DYGICIT, proyecto: PB96-1452-C03-02

Referencias

Amice, M. y Bouchez, J. L. (1989): *C. R. Acad. Sci. Paris,* 308: 1171-1178.

Best, M. G. (1982): *Igneous and metamorphic potrology.* W. H. Freeman and Co., New York, 630 p.

Borradaile, G. J. (1988): *Tectonophysics,* 156: 1-20.

Bouchez, J. L. y Guineberteau, B. (1984): In: *Uranium y Granitoïdes.* CREGU Ed. Nancy. 19 p.

Bouchez, J. L., Bernier, S., Rochette, P. y Guineberteau, B. (1987): *Géol. Fr., Mém. GPF,* 2-3: 223-232.

Bouchez, J. L., Gleizes, G., Djouadi, T. y Rochette, P. (1990): *Tectonophysics,* 184: 157-171.

Bouchez, J. L. y Gleizes, G. (1995): *Jour. Geol. Soc. (London),* 152: 669-679.

Coward, M. P. (1980): *Jour. Geol. Soc. (London),* 137: 605-615.

Diot, H., Bouchez, J. L., Boutaleb, M. y Macaudiere, J. (1987): *Bull. Soc. Geol. France,* 3-1: 157-168.

Doblas, M. M. (1990): *Tesis Doctoral,* Univ. Complutense, Madrid. 465 p.

Fuster, J. M. y Villaseca, C. (1987): In: *Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico (Libro homenaje a L. C. García de Figuerola)* (Eds.: F. Bea, A. Carnicero, J. C. Gonzalo, M. López Plaza y M. D. Rodríguez Alonso), Rueda, Madrid: 27-35.

Guillet, P., Bouchez, J. L. y Wagner J. J. (1983): *Tectonics,* 2 (5): 419-429.

Hroudra, F. (1982): *Geophys. Survey,* 5: 37-82.

Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W. (1969): *Fundamentals of rock mechanics.* Methuen and Co., London, 513 p.

King, R. F. (1966): *Geol. Jour.,* 5: 43-46.

Leblanc, D., Gleizes, G., Lespinasse, P., Olivier, Ph. y Bouchez, J. L. (1994): *Jour. Struct. Geol.,* 16-2: 223-235.

Marre, J. (1982): *Méthodes d'analyse structurale des granitoïdes.* BRGM ed., Orlèans, nº 3, 126 p.

Nagata, T. (1961): *Rock Magnetism.* 2nd edition, Maruzen, Tokyo, 350 p.

Nicolas, A. (1984): *Principios de Tectonique.* Masson Ed., 196pp.

Rochette, P. (1987): *Jour. Struct. Geol.,* 9: 1015-1020.

Rousset, R. y Daly, L (1969): *C. R. Acad. Sci. Paris,* Sér D, 268: 1912-1915.

Shaw, H. R. (1980): In: *Physics of magmatic processes,* Hargraves Ed., 201-264.

Yenes, M. (1996): *Tesis Doctoral,* Univ. Salamanca, 229 p.