

Estudio de la fracturación alpina en el sistema zócalo-cobertera de la zona de Boadella-Darnius (Pirineo Oriental)

Study of the Alpine fracturing in the basement-cover system of the Boadella-Darnius zone (Eastern Pyrenees)

Francisco José García-López, Jordi Carreras y Elena Druguet

Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra (Barcelona), España.
cesc.garcia.09@gmail.com, jordi.carreras@uab.cat, elena.druguet@uab.cat

ABSTRACT

This work focusses on the Alpine faulting that affected the basement-cover boundary in the Boadella-Darnius area (Eastern Pyrenees). We study the response of the Palaeozoic granitic basement, characterized by an intense jointing pattern, and the conglomeratic stratified cover to the orogeny. The used methodology is based on the analysis of the orientation of minor faults and associated structural elements (slickensides and fault striations), on fault crosscutting relationships, and on the relationship between the inferred stress tensors and tilting. The results point to a strike-slip regime, with σ_1 directions rotating from NNW-SSE to NNE-SSW, close to N-S. Alpine faulting is accommodated by reactivated fractures in the basement and by newly formed faults in the cover rocks.

Key-words: *Alpine tectonics, fault population analysis, Pyrenees, stress tensor, tilting.*

RESUMEN

Este trabajo se centra en la fracturación alpina que afectó el límite zócalo-cobertera en la zona de Boadella-Darnius (Pirineo Oriental). Se estudia la respuesta del zócalo granítico paleozoico dotado de un intenso diaclasado y de la cobertera conglomerática estratificada a la orogenia. La metodología utilizada se basa en el análisis de la orientación de fallas menores y de los elementos estructurales asociados (espejos y estrías de falla), en las relaciones de corte entre ellas, así como en la relación de los tensores de esfuerzos inferidos con el basculamiento. Los resultados indican un régimen tectónico de strike-slip, con direcciones de σ_1 que evolucionan en sentido horario de NNW-SSE a NNE-SSW, muy cercano a N-S. La fracturación se manifiesta en el zócalo con fallas reactivadas y en la cobertera mediante fallas neoformadas.

Palabras clave: *Tectónica alpina, análisis de poblaciones de fallas, Pirineo, tensor de esfuerzos, basculamiento.*

Geogaceta, 60 (2016), 35-38
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 28 de enero de 2016
Revisión: 20 de abril de 2016
Aceptación: 20 de Mayo de 2016

Introducción

El área de Boadella-Darnius se encuentra en el Pirineo Oriental, a caballo entre la Zona Axial y la Zona Surpirenaica. En la zona meridional del embalse de Boadella se observa la inconformidad de una serie conglomerática mesozoica sobre un zócalo paleozoico (Figs. 1 y 2A). Las rocas del zócalo corresponden a granitos (granito de Boadella) del complejo plutónico tardi-varisco de Sant Llorenç-La Jonquera, de edad 314–311 Ma (Aguilar *et al.*, 2013). La unidad detrítica está constituida por conglomerados basales y una secuencia detrítica (conglomerados, arenitas y limolitas) con intercalaciones de carbonatos lacustres que corresponden a la facies garumniense (Cretácico terminal). La edad de los conglomerados basales es incierta, dado que Cirés *et al.* (1994) los asimilan a la facies garum-

niense, mientras que Ashauer (1934) los atribuyó al Permotrias.

La zona se encuentra afectada por un basculamiento alpino, evidenciado por el buzamiento de la inconformidad y la estratificación (valor promedio de 52° hacia el sur, Fig. 1B), y corroborado por la orientación anómala de la fábrica magmática del granito de Boadella en su borde meridional (Druguet *et al.*, 2008). El zócalo granítico se encuentra afectado por un intenso diaclasado de múltiples orientaciones, con predominio de las diaclasas subparalelas a la estratificación de las rocas de la cobertera (Fig. 1C), atribuibles a un proceso de descompresión por erosión pre-cobertera. Tanto el zócalo como la cobertera presentan múltiples fallas menores con espejo y estrías (Figs. 1D, E y 2B). Gran parte de las fracturas en los conglomerados basales de la cobertera presentan indicadores cinemáticos,

mientras que en el zócalo sólo alguna familia de fracturas refleja desplazamientos.

Este trabajo pretende comparar la respuesta a la fracturación alpina de las dos unidades litológicas: una cristalina (granito de Boadella), dotada de un diaclasado extenso, y la cobertera estratificada. Se analiza el campo de esfuerzos compatible con la fracturación del zócalo y de la cobertera, y se interpreta la edad relativa de la fracturación en relación con el basculamiento alpino (fracturas pre-, sin- o post-basculamiento).

Metodología

Con el fin de interpretar los campos de esfuerzos compatibles con la población de fallas menores, en este trabajo se sigue la aplicación combinada de los métodos propuestos por Casas *et al.* (1990) y Liesa y Lisle

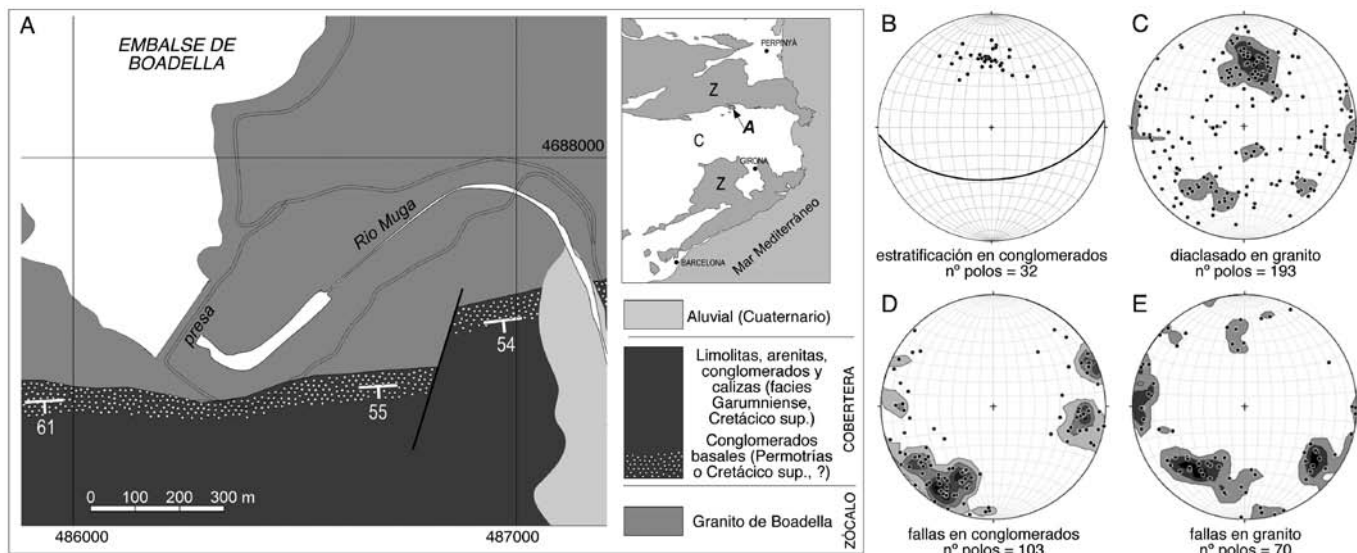


Fig. 1.- A) Esquema de situación y mapa geológico de la parte SE del Embalse de Boadella. Z: zócalo, C: cobertera, A: área de estudio. Coordenadas UTM 31N/ETRS89. B) a E) Estereogramas equiareales (hemisferio inferior) de los elementos estructurales analizados.

Fig. 1.- A) Schematic setting and geological map of the SE part of the Boadella dam. Z: basement, C: cover, A: study area. Coordinate network UTM 31N/ETRS89. B) to E) Lower-hemisphere equiareal stereoplots of the analyzed structural elements

(2004): diedros rectos (Angelier y Mechler, 1977), diagrama y-R (Simón-Gómez, 1986) y el método de Etchecopar *et al.* (1981). Éstos permiten conocer la orientación de los ejes principales de esfuerzos (σ_1 , σ_2 , σ_3) y la relación de esfuerzos mediante el parámetro R (Bott, 1959) o R_e (Etchecopar *et al.*, 1981). Para ello se han utilizado los programas Iberfalla (1995) y Tectonics FP (2013).

Dichos métodos dan resultados con un alto grado de confianza, aunque se debe tener en cuenta el carácter reactivado de los planos de falla, menos restrictivos que las fallas neoformadas. Si se dan esfuerzos suficientemente grandes, la posibilidad de que fracturas preexistentes sean reactivadas

como fallas menores sólo dependerá de su orientación. Diaclasas paralelas o perpendiculares a σ_1 no se reactivan como fallas, mientras que las oblicuas (ángulos $\approx 30-40^\circ$ respecto al eje σ_1 , dependiendo de su coeficiente de rozamiento) son las que tienen la máxima facilidad para hacerlo. Este hecho es fundamental para las fallas menores del zócalo paleozoico, donde es fácil suponer la existencia de un gran número de diaclasas previas. Si la movilización de las diaclasas previas es coetánea con la de las neoformadas en la cobertera, los campos de esfuerzos que explican las fallas menores en los conglomerados también pueden explicar las de los granitos.

La interpretación de la edad relativa de la fracturación en relación con el basculamiento se basa, además de en las relaciones de corte entre fallas, en el uso de los métodos citados, abatiendo los planos de falla y estrías medidas, y asociando cada uno/a a los campos de esfuerzos que mejor explican un número determinado de fallas, antes del basculamiento (abatimiento de 52°), durante el basculamiento (40 y 20°), y después del basculamiento (0°).

Análisis e interpretación

Se han medido los planos y las estrías de 103 fallas en los conglomerados de la cobertera (Fig. 1D) y también los planos y estrías de 70 fallas en los granitos del zócalo paleozoico. Las medidas fueron tomadas en una estrecha franja de 1 km de longitud a lo largo de la inconformidad (Fig. 1E). En todos los casos, los indicadores cinemáticos observados son estrías o estrías con escalones en los espejos de falla (Fig. 2B). En ningún caso se ha observado más de una familia de estrías en un mismo espejo de falla.

El análisis poblacional de fallas se ha efectuado por separado en el zócalo y en la cobertera. De los resultados obtenidos mediante el análisis de fallas de la cobertera sólo se toman los tensores de esfuerzos que quedan bien explicados por todos los métodos citados (p. ej., Fig. 3). Éstos muestran una población polifásica reflejada por orden

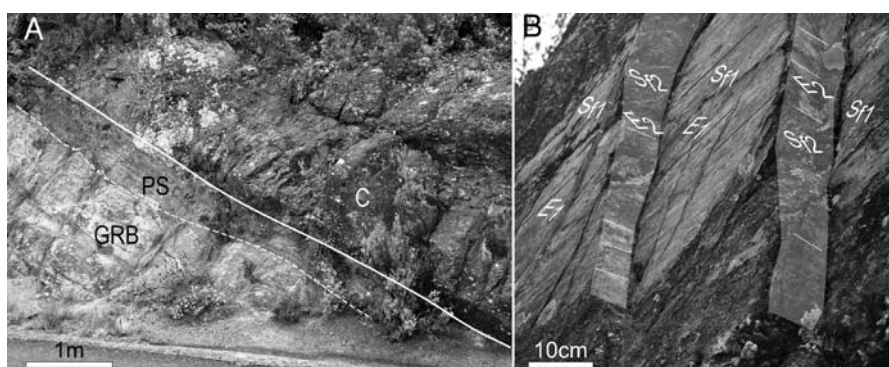


Fig. 2.- Fotografías de campo al sur del Embalse de Boadella. A) Inconformidad basculada entre el zócalo granítico y la cobertera conglomerática. GRB: granito de Boadella, PS: granito alterado (paleosuelo), C: conglomerados. B) Dos familias de fallas en los conglomerados, Sf1 y Sf2 (Sf2 corta a Sf1). E1 y E2: estrías de falla.

Fig. 2.- Field photographs (S of Boadella dam) A) Tilted unconformity between the granitic basement and the basal conglomerates. GRB: Boadella granite, PS: weathered granite (paleosol), C: conglomerates. B) Two fault sets in the conglomerates, Sf1 and Sf2 (Sf2 crosscuts Sf1). E1 and E2: fault striations.

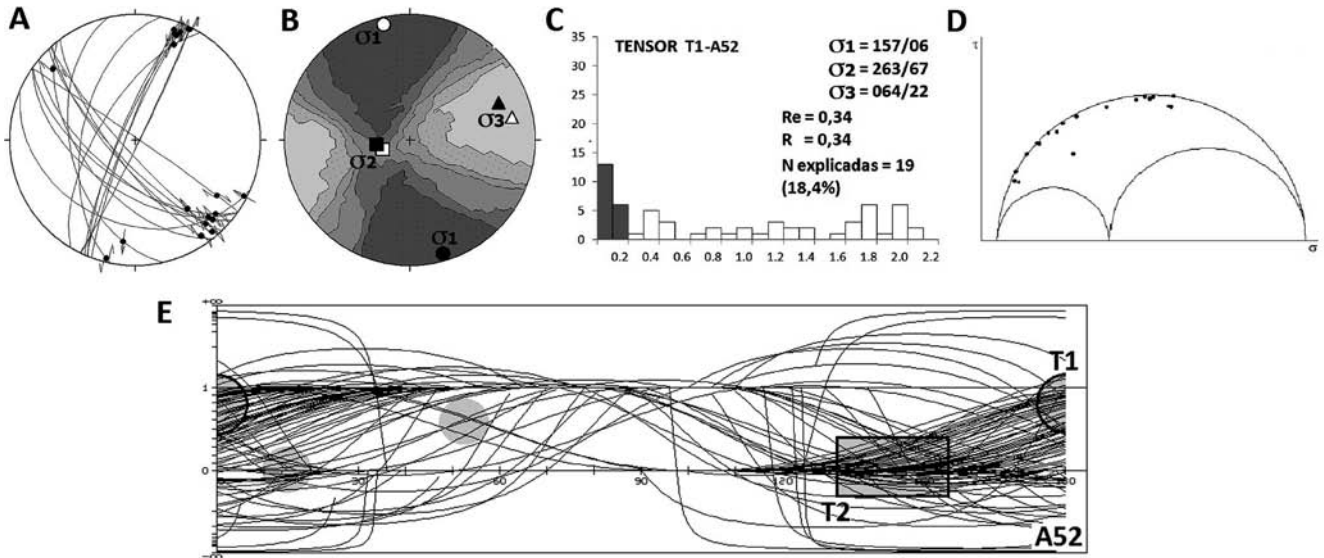


Fig. 3.- Uno de los tensores calculados en fallas de la cobertera para la etapa pre-basculamiento (tensor T1-A52). A) Estereograma equiareal (hemisferio inferior) de los planos y estrias de falla analizados. B) Diagrama de diedros rectos y, con símbolos blancos, sus ejes principales de esfuerzo. En negro, los obtenidos por el método de Etchecopar *et al.* (1981). C) Histograma de desviaciones angulares entre estrias teóricas (Etchecopar *et al.*, 1981) y reales. Abscisa: radianes; ordenadas: nº de fallas. D) Círculo de Mohr con los planos de falla explicados por el método de Etchecopar *et al.* (1981). E) Diagrama y-R (método de Simón-Gómez, 1986). Áreas con contorno: principales tensores de esfuerzos. Áreas sin contorno: posibles tensores minoritarios.

Fig. 3.- One of the stress tensors calculated for faults in the cover rocks (tensor T1-A52) obtained for the pre-tilting stage. A) Lower-hemisphere equiareal stereoplot of fault planes and fault striations. B) P- and T-dihedra method diagram with principal stress axes in white symbols. Those obtained by Etchecopar *et al.* (1981) method are depicted in black. C) Histogram of angular deviations between theoretical striae (Etchecopar *et al.*, 1981) and real ones. Abscissa: radians; ordinate: number of faults. D) Mohr circle with fault planes explained by Etchecopar *et al.* (1981) method. E) y-R diagram (method by Simón-Gómez, 1986). Contoured areas: main stress tensors. Uncontoured areas: other possible stress tensors

cronológico en la Tabla I: (1) dos tensores de esfuerzos pre-basculamiento (T1-A52 y T2-A52) explican un 59% de fallas neoforzadas en régimen *strike-slip*, con σ_1 de direcciones NNW-SSE; (2) dos tensores post-basculamiento (T3-A00 y T4-A00), que explican un 14% de fallas neoforzadas en régimen *strike-slip*, y un 11% de fallas *strike-slip* reactivadas, ambas con σ_1 de direcciones NNE-SSW muy cercanas a N-S; (3) un tensor post-basculamiento (T5-A00), que explica un 12% de fallas reactivadas en régimen distensivo (σ_1 vertical) con σ_3 de dirección NNW-SSE. No se ha encontrado

ningún tensor de esfuerzos que se ajuste a la etapa sin-basculamiento.

Del análisis de las fallas del zócalo, sólo el método de Etchecopar *et al.* (1981) genera resultados plausibles, pero únicamente para un 50% de ellas, de las cuales sólo 10 son susceptibles de ser neoforzadas. Asumiendo que la mayoría de las fallas son reactivadas, de la medida del ángulo entre los tensores de esfuerzos obtenidos para los conglomerados y las fallas de los granitos, se obtiene que la mayoría de ellas (97%) se puede haber movilizadas una o varias veces durante la tectónica alpina.

Tensor	Fallas	σ_1	σ_3	Re	R	n/N
T1-A52	cobertera	157/06	064/22	0,34	0,34	19/103
	zócalo	156/15	062/14	0,79	0,79	23/70
T2-A52	cobertera	344/18	083/27	0,15	0,15	42/103
	zócalo	341/10	073/10	0,42	0,42	25/70
TX-A40	cobertera	-	-	-	-	-
	zócalo	178/05	267/00	0,81	0,81	36/70
TX-A20	cobertera	-	-	-	-	-
	zócalo	189/24	095/08	0,79	0,79	32/70
T3-A00	cobertera	196/29	101/08	0,25	0,25	14/103
	zócalo	200/35	106/05	0,51	0,51	37/70
T4-A00	cobertera	194/36	096/12	0,67	0,67	11/103
	zócalo	198/37	099/12	0,58	0,58	36/70
T5-A00	cobertera	319/75	157/14	0,78	1,28	12/103
	zócalo	253/07	158/41	0,36	0,36	21/70

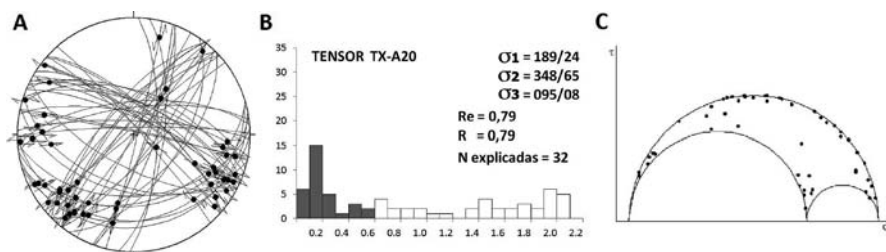


Fig. 4.- Aplicación del método de Etchecopar *et al.* (1981) en las fallas del zócalo para una etapa con basculamiento de 40°. A) Estereograma equiareal (hemisferio inferior) de los planos y estrias de falla analizados. B) Histograma de desviaciones angulares entre estrias teóricas y reales con permisividad de hasta 0,6 radianes. C) Círculo de Mohr con los planos de falla explicados mediante el método Etchecopar.

Fig. 4.- Application of Etchecopar *et al.* (1981) method to faults in the basement for 40° tilting stage. A) Lower-hemisphere equiareal stereoplot of fault planes and fault striations. B) Histogram of angular deviations between theoretical striae and real ones for up to 0.6 radians of freedom. C) Mohr circle with fault planes explained by the Etchecopar method

Tabla I.- Tabla comparativa de la orientación de los ejes principales de esfuerzo σ_1 y σ_3 y valor estimado de las relaciones entre los esfuerzos principales, R y Re para las fallas del zócalo y de la cobertera. Ejes de esfuerzos calculados según se explica en el texto principal. TX: nº de referencia del tensor; A00, A20, A40 y A52: grados (°) de abatimiento del plano de falla; n/N: nº de fallas del total.

Table I.- Comparative table of the orientation of the principal stress axes σ_1 and σ_3 and estimated value for the stress ratios R and Re for faults in the basement and in the cover rocks. The stress axes have been calculated as explained in the main text. TX: reference number of the tensor; A00, A20, A40 and A52: degrees (°) of fault plane flatness, n/N: number of faults from the total.

Para fallas neoformadas, el método de Etchecopar *et al.* (1981) restringe la validez del tensor calculado a aquellas estrías reales que no se desvíen más de 0,2 - 0,3 radianes de la teórica, pero resulta claro que las fallas del zócalo -en su mayoría- son reactivadas. Una buena manera de confirmar que las estructuras menores del zócalo responden a los mismos campos de esfuerzos que las de la cobertera, es aplicar ese método permitiendo una desviación de hasta 0,6 radianes como respuesta a la reactivación (Fig. 4). El resultado para las fases de *strike-slip* muestra que la diferencia de dirección entre los valores de σ_1 para los conglomerados, y los así calculados para los granitos, es de pocos grados (Tabla I).

Conclusiones

Las estructuras menores en la zona de contacto zócalo paleozoico-cobertera mesozoica en Boadella-Darnius son compatibles con un régimen principal de *strike-slip* con σ_1 de dirección aproximada N-S. Sin embargo, el zócalo y la cobertera respondieron a la tectónica alpina de forma diferente, el zócalo mediante la movilización de fracturas previas y la cobertera con la neoformación de fallas.

Los indicadores cinemáticos presentes en la cobertera responden a una primera etapa de *strike-slip* y a una segunda etapa distensiva. En la etapa de *strike-slip* dominan las fallas neoformadas pre- y post-basculamiento con direcciones de σ_1 que evolucionan en sentido horario de NNW-SSE a NNE-SSW, muy cercano a N-S. Este resultado es compatible con los campos de esfuerzos que predominan en todo el NE peninsular en las últimas etapas de la compresión alpina (Simón-Gómez, 2006; Liesa y Simón, 2009). La etapa distensiva, de ex-

tensión triaxial, se caracteriza por un σ_3 horizontal de orientación NNW-SSE que da lugar a la reactivación de fracturas. Esta etapa distensiva no tiene que ir necesariamente asociada a una extensión regional, ya que puede ser debida a la partición local del campo de esfuerzos. Esa partición generaría fallas normales como es el caso de la falla de dirección aproximada E-W que delimita el flanco sur del denominado sinclinal de Darnius (Ashauer, 1934; Cirés *et al.*, 1994), situado al N del área estudiada.

De los indicadores del zócalo se deduce que éstos se encuentran en diaclasas previas a la orogenia alpina. Las fracturas responden perfectamente como reactivadas a los mismos campos de esfuerzos y regímenes de *strike-slip* que los deducidos para la cobertera, pero con la diferencia de que las fallas de los granitos tuvieron una movilización pre-, sin- y post-basculamiento. Sin embargo, en el zócalo no se han obtenido evidencias de la etapa distensiva registrada para la cobertera.

Agradecimientos

Queremos dar las gracias a los revisores José Luis Simón y Jordi Cirés y al editor Carlos Liesa por sus comentarios y sugerencias que han contribuido a mejorar el artículo.

Referencias

- Aguilar, C., Liesa, M., Castiñeiras, P. y Navidad, M. (2013). *Journal of the Geological Society* 171, 181-192.
- Angelier, J. y Mechler, P. (1977). *Bulletin de la Société Géologique de France* 19, 1309-1318.
- Ashauer, H. (1934). Die Östliche Endigung der Pyrenäen. *Abhandlungen der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göt-*

tingen, math.-phys. Kl., 3 Folge, Heft 10: 2-115.

- Bott, M.H.P. (1959). *Geological Magazine* 96, 109-117.
- Casas Sainz, A.M., Gil Peña, I. y Simón-Gómez, J.L. (1990). *Estudios Geológicos* 46, 385-398.
- Cirés, J., Morales, V., Liesa, M., Carreras, J., Escuer, J., Pujadas, J. y Barnolas, A. (1994). *Mapa geológico de España 1:50.000, hoja nº 220 (La Jonquera) y memoria*. ITGE, Madrid, 53 p.
- Druguet, E., Gleizes, G., Olivier, Ph., Liesa, M., Castaño, L.M. y Carreras, J. (2008). *Geogaceta* 45, 7-10.
- Etchecopar, A., Vasseur, G. y Daigniers, M. (1981). *Journal of Structural Geology* 3, 51-65.
- Liesa, C.L. y Lisle, R.J. (2004). *Journal of Structural Geology* 26, 559-572.
- Liesa, C.L. y Simón, J.L. (2009). *Tectonophysics* 474, 144-159.
- Simón-Gómez, J.L. (1986). *Tectonophysics* 124, 37-53.
- Simón-Gómez, J.L. (2006). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 19, 163-179.

Software específico

- GeoID v1.8 (2014). Professional tool for measuring and analyzing geological structures. Designed for iPhone and iPad. Developed by Sang-Ho Lee. Engineering Geology & GIS Lab., SNU.
- IBERFALLA. V. 1.0 (1995). Programa de análisis de fallas. Universidad de Zaragoza, Dpto. Ciencias de la Tierra, Área de Geodinámica Interna.
- TECTONICS FP DEMO v. 1.7.7-Demo (2013). Software for Structural Geology written by Franz Reiter and Peter Acs for Microsoft Windows. Tectonics FP.