

# Evolución diagenética durante el crecimiento del anticlinal de Puig-reig (cinturón de pliegues y cabalgamientos surpirenaico)

*Diagenetic evolution during the growth of the Puig-reig anticline (South Pyrenean fold-and-thrust belt)*

David Cruset<sup>1,2</sup>, Anna Travé<sup>2</sup>, Irene Cantarero<sup>2</sup> y Jaume Vergés<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera", CSIC, 08028 Barcelona, España.

dcruset@ictja.csic.es, jverges@ictja.csic.es

<sup>2</sup> Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica. Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, España.

atrave@ub.edu, i\_cantarero@ub.edu

## ABSTRACT

The Puig-reig anticline was generated since the Lower-middle Priabonian, due to the growth of a double thrust sheet buried by alluvial sediments affected by inverse and strike-slip faults that finally acted as normal faults. In these fractures two generations of calcite cement have been observed: The first one, with values of  $\delta^{18}\text{O}$  between -9 and -6‰ VPDB and Mg, Mn, Fe and Sr consistent with meteoric waters, precipitated in surficial conditions. The second generation, with  $\delta^{18}\text{O}$  values between -14 and -9,5‰ VPDB and Mg, Mn, Fe and Sr values consistent with meteoric to formation waters.

**Key-words:** Anticline, faults, calcite cement, isotopic data, elemental composition.

## RESUMEN

El anticlinal de Puig-reig se generó a partir del Priaboniense inferior-medio debido al crecimiento de un doble cabalgamiento enterrado por sedimentos aluviales, afectados por fallas inversas y direccionales que posteriormente actuaron como fallas normales. En estas fracturas se ha determinado la presencia de dos generaciones de cemento de calcita: La primera, con unos valores de  $\delta^{18}\text{O}$  entre -9 y -6‰ VPDB y valores de Mg, Mn, Fe y Sr consistentes con su formación a partir de aguas meteóricas, en condiciones superficiales. La segunda generación, con valores de  $\delta^{18}\text{O}$  entre -14 y -9,5‰ VPDB y valores Mg, Mn, Fe y Sr consistentes con su formación a partir de un fluido meteórico-de formación.

**Palabras clave:** Anticlinal, fallas, cemento de calcita, datos isotópicos, composición elemental.

Geogaceta, 58 (2015), 27-30  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 25 de junio de 2014  
Fecha de revisión: 29 de abril de 2015  
Fecha de aceptación: 15 de mayo de 2015

## Introducción

Los cementos carbonáticos en las fracturas de los cinturones de pliegues y cabalgamientos nos informan sobre el tipo de fluidos en los diferentes estadios de su evolución. Su estudio, aplicado al sistema de pliegues surpirenaicos, ha sido ya tratado anteriormente, tanto en sedimentos marinos del Eoceno Inferior (Travé *et al.*, 1997), como en sedimentos continentales del Eoceno Superior (Travé *et al.*, 2000). Durante esta última etapa, a partir del Priaboniense inferior-medio, se desarrollaron abanicos aluviales en el sector más meridional del cinturón de deformación surpirenaico, en condiciones de sedimentación endorreicas (Costa *et al.*, 2009).

Estos sedimentos sintectónicos, evidenciados por la presencia de discordancias

progresivas (Riba, 1973; Anadón *et al.*, 1986), recubrieron en parte los mantos de corrimiento a la vez que se deformaban generando los anticlinales de Oliana y Puig-reig en el sector comprendido entre los ríos Cardener y Segre (Vergés, 1993).

El objetivo de este trabajo es caracterizar petrológica y geoquímicamente los cementos precipitados en las fallas inversas, direccionales y normales, generadas durante el crecimiento del anticlinal de Puig-reig, con el fin de discernir el origen de los fluidos mineralizantes y establecer su evolución.

## Metodología

Para realizar este estudio se han muestreado los cementos precipitados en los diferentes planos de falla que afectan al an-

ticlinal, así como los de las rocas sedimentarias encajantes.

Para la caracterización petrológica de las muestras se han estudiado 32 láminas delgadas mediante microscopía óptica, y microscopía de catodoluminiscencia. La caracterización geoquímica de las muestras se ha realizado mediante el análisis de los isótopos estables de carbono y oxígeno de los diferentes cementos muestreados y de rocas encajantes carbonatadas. La caracterización geoquímica de estos cementos se ha completado con el análisis de su composición elemental mediante microsonda electrónica.

## Contexto geológico

El anticlinal de Puig-reig, con una dirección WNW-ESE es ligeramente oblicuo a las

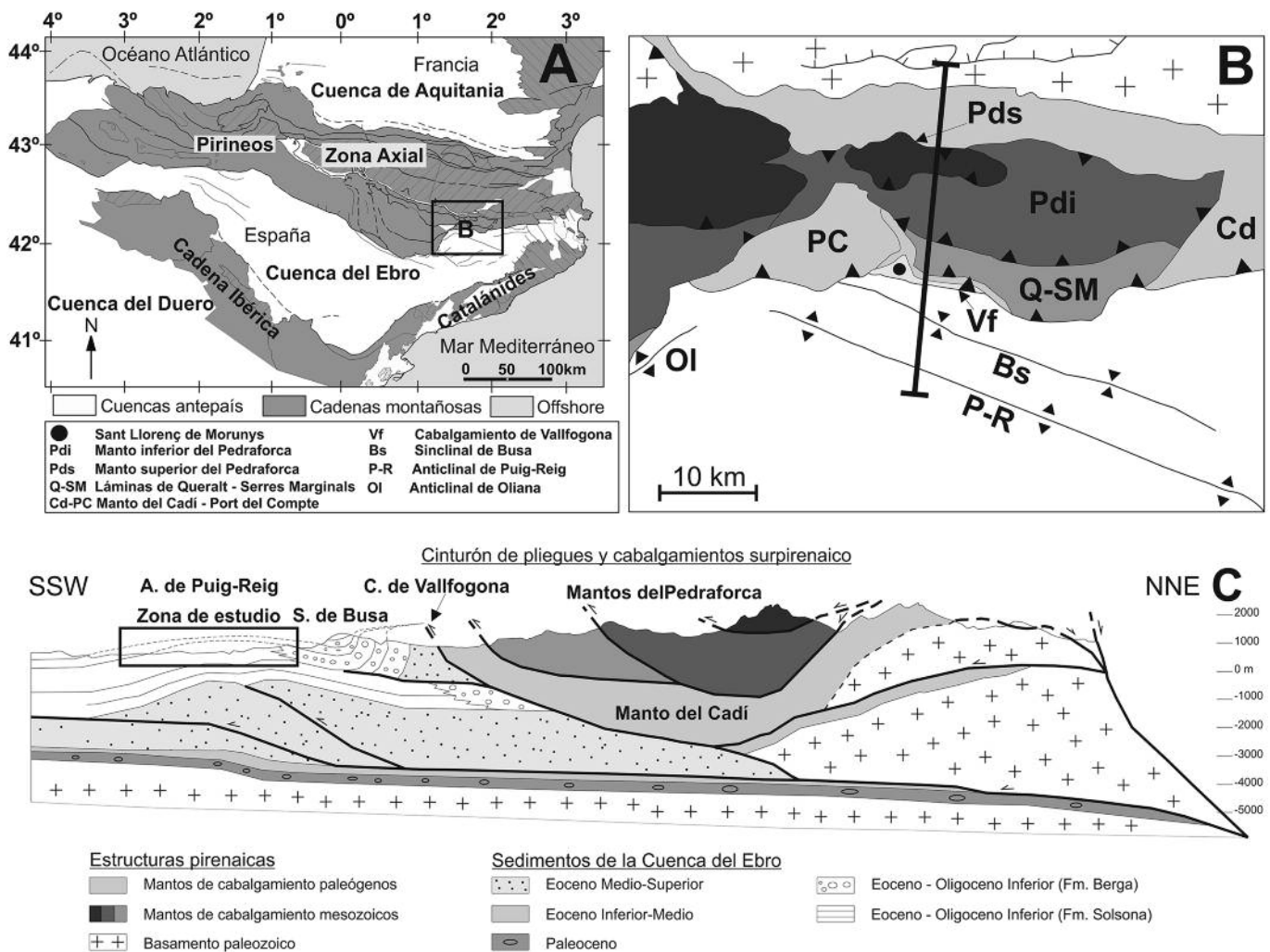


Fig. 1.- A) Mapa tectónico del NE de la Península Ibérica (Vergés, 1993). B) Esquema geológico simplificado de las principales unidades estructurales del cinturón de pliegues y cabalgamientos surpirenaico (CPCSP) a la altura del río Cardener (recuadro negro en A). La línea negra muestra la localización del corte geológico mostrado en C. C) Corte geológico de las principales estructuras de este sector del CPCSP. El recuadro negro indica la situación del anticlinal de Puig-reig. Simplificado de Vergés (1993).

Fig. 1.- A) Tectonic map of the north-eastern sector of the Iberian Peninsula (Vergés, 1993). B) Simplified geological scheme showing the main structural units of the South Pyrenean fold-and-thrust belt (SPFTB) along the Cardener river (black square in A). The black line indicates the location of the geological cross section. C) Geological cross section of the main structures of this sector of the SPFTB. The black square shows the Puig-reig anticline. Simplified from Vergés (1993).

estructuras principales pirenaicas y representa el primer anticlinal al sur del frente de cabalgamientos del Pirineo (Fig. 1A). El segmento estudiado se encuentra cerca de la localidad de Sant Llorenç de Morunys (Fig. 1B) y está constituido por los sedimentos continentales que comprenden los conglomerados de la Fm. Berga (Riba, 1973; Puigdefàbregas *et al.*, 1986, 1992) y las areniscas y arcillas fluviales de la Fm. Solsona (Sáez, 1987). Estos sedimentos fueron depositados a partir del Priaboniense inferior-medio, en el momento en que la Cuenca del Ebro perdió toda conexión con el Océano Atlántico debido al levantamiento de los Pirineos occidentales. El levantamiento de esta región comportó una

regresión marina a escala de cuenca y el paso a condiciones endorreicas (Sáez *et al.*, 2007). El carácter sintectónico de estos depósitos aluviales con el cabalgamiento de Vallfogona (Vergés, 1993) está demostrado por las geometrías de crecimiento y las numerosas discordancias progresivas (Riba, 1973).

Desde el punto de vista estructural, el anticlinal de Puig-reig es un pliegue suave, de gran amplitud y ligera vergencia hacia el sur, resultado de un doble cabalgamiento en profundidad (Fig. 1C), producido por una rampa que conecta el nivel de despegue basal situado en la Fm. evaporítica de Beuda con el nivel de sales de la Fm. Cardona (Vergés *et al.*, 1992). La actividad de

esta doble estructura fue simultánea a la del cabalgamiento de Vallfogona, tal y como se demuestra por la geometría de doble cuña del sinclinal de Busa (Vergés, 1993). Numerosas fallas normales que actualmente muestran salto normal y desplazamiento métrico a decamétrico, inversas y direccionales se desarrollaron en la charnela y flancos del anticlinal de Puig-reig durante su formación. Estas fallas son el objeto de nuestro estudio.

## Resultados

El estudio estructural de los afloramientos ha permitido determinar la presencia de fallas inversas, normales y direccionales. Las



fallas inversas muestran una orientación NE-SW y un buzamiento hacia el SE. Las fallas direccionales en general se orientan perpendicularmente a las fallas compresivas e indican un movimiento diestro en la mayoría de los casos. Finalmente, las fallas normales son paralelas y oblicuas al eje del pliegue y muestran indicios de haber actuado previamente como fallas direccionales.

El estudio petrológico de las muestras ha permitido diferenciar 2 generaciones de cemento de calcita (Fig 2). La primera de ellas (Cc1) se ha identificado en la porosidad de las rocas encajantes y en los planos de cizalla de fallas inversas, normales y direccionales. Está formado por cristales de esparita elongada y equidimensional de luminiscencia naranja brillante (Figs. 2B y 2D). Los cristales elongados, que pueden pasar lateralmente a equidimensionales con textura *blocky*, se encuentran únicamente en las fallas, donde se disponen paralelos a los planos de cizalla. El tamaño de los cristales elongados varía entre 1 y 1,5 mm de largo y 100 y 200  $\mu\text{m}$  de ancho. Los cristales equidimensionales en las fallas a veces muestran zonación de crecimiento y miden entre 100 y 500  $\mu\text{m}$  (excepcionalmente llegan hasta los 5 mm). Puntualmente, en los márgenes de algunas fallas, se observa un primer crecimiento de cristales *bladed* de hasta 100  $\mu\text{m}$  de ancho. En las rocas encajantes, el cemento Cc1 está representado por cristales de esparita entre 5 y 10  $\mu\text{m}$  en la porosidad intergranular de las rocas detríticas. En los *mudstones* lacustres forma estructuras geopetales en la porosidad vacuolar. El cemento Cc1 tiene valores entre -9 y -6 ‰ VPDB para el  $\delta^{18}\text{O}$  y entre -2,5 y +1 ‰ VPDB para el  $\delta^{13}\text{C}$  (Fig. 3). Los elementos traza (Mg, Mn, Fe y Sr) muestran valores medios y una desviación estándar de 2171 y 1085; 1406 y 464; 544 y 284; 537 y 74 ppm respectivamente.

La segunda generación de cemento de calcita (Cc2) solamente se encuentra en algunas fallas direccionales y en las fallas normales, que previamente actuaron como fallas direccionales. Este cemento consiste en cristales de esparita entre 100 y 500  $\mu\text{m}$  y catodoluminiscencia rojo-naranja apagado (Figs. 2B y 2D) con textura tipo *blocky*. Cc2 tiene valores entre -14 y -9,5 ‰ VPDB para el  $\delta^{18}\text{O}$  y entre -2 y +0,5 ‰ VPDB para el  $\delta^{13}\text{C}$ , estos últimos muy similares a los de Cc1 (Fig. 3). Los valores medios y la desviación estándar para el Mg, Mn, Fe y Sr

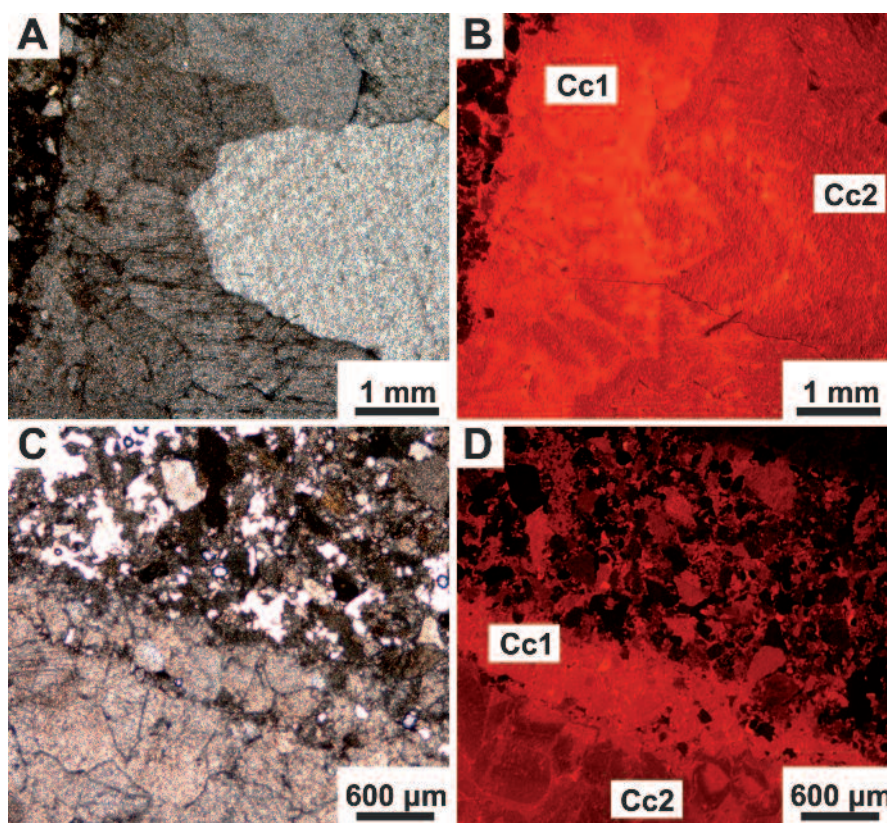


Fig. 2.- Imágenes de microscopio óptico de polarización (MOP) y catodoluminiscencia (CL) de algunos de los principales rasgos de los cementos estudiados. A-B) Imágenes de MOP y CL donde se ve el paso gradual entre Cc1 (más luminiscente) y Cc2 (rojo-naranja apagado). C-D) Imágenes de MOP y CL donde se ve el paso abrupto entre Cc1 y Cc2. (Ver figura en color en la Web).

Fig. 2.- Images from polarizing optical microscope and cathodoluminescence (CL) where are shown the main features of the studied cements. C-D) Plane light and CL images showing the gradual change between Cc1 (more luminiscent) and Cc2 (dull-red orange) cements. D) Plane light and CL images showing the sharp change from Cc1 and Cc2. (Sea colour figure on the Web).

son 1038 y 588; 1268 y 372; 1080 y 628; 886 y 674 ppm respectivamente. El contacto entre Cc1 y Cc2 puede ser gradual (Figs. 2A y 2B) o abrupto (Figs. 2C y 2D).

Refiriéndose a los carbonatos encajantes, los valores isotópicos de oxígeno se encuentran entre -7,28 y -6,91 ‰ VPDB y los del carbono entre -3,3 y -2,44 ‰ VPDB (Fig. 3).

## Discusión y conclusiones

Las relaciones molares de los elementos traza del cemento Cc1 son consistentes con su formación a partir de aguas meteóricas, mientras que para el cemento Cc2 son consistentes tanto con aguas meteóricas como con aguas de formación.

Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  del cemento Cc1 se encuentran dentro del rango de los carbonatos lacustres y ligeramente empobrecidos respecto al de las aguas meteóricas actua-

les en esta área (entre -6,4 y -4,6 ‰ SMOW, Travé y Calvet, 2001). Esto podría indicar que el cemento precipitó en condiciones superficiales y/o durante las primeras etapas de enterramiento. Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de Cc2, más empobrecidos (Fig. 3), podrían responder a un incremento de la temperatura y/o a un cambio de la composición isotópica del fluido. Tanto la dispersión isotópica (Fig. 3) como el estudio de catodoluminiscencia (Figs. 2A y 2B) demuestran un cambio gradual entre los dos cementos. Además, en el caso de Cc2 se observa un empobrecimiento relativo en  $\delta^{18}\text{O}$  del cemento según bajamos la serie estratigráfica. Esta distribución podría ser debida a 1) un incremento de la temperatura por enterramiento y 2) por la entrada gradual de aguas de formación a los niveles más profundos.

De este modo, se puede establecer una relación  $\delta^{18}\text{O}$ /tiempo, en la que los valores

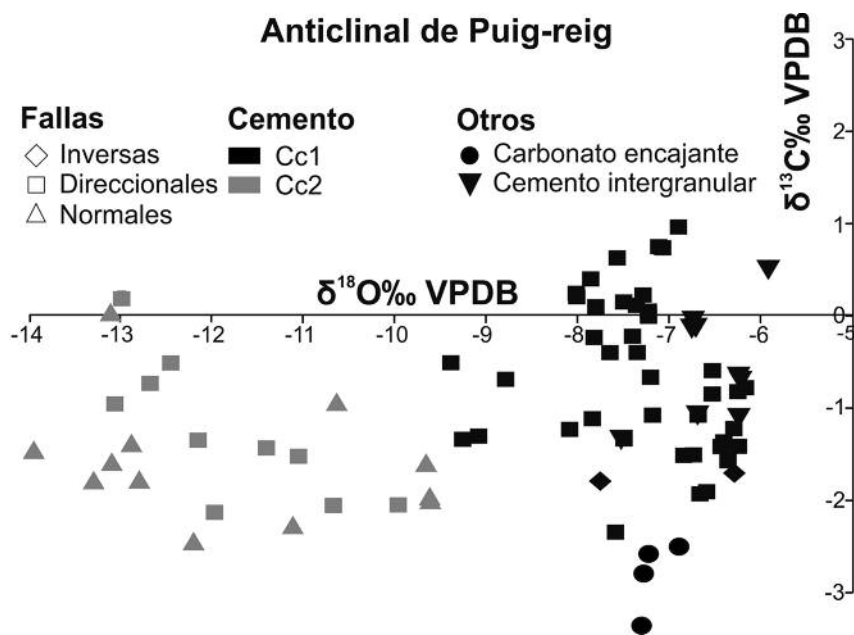


Fig. 3.- Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$  de los cementos y carbonatos encajantes del anticlinal de Puig-reig.

Fig. 3.-  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  cross-plot of cements and carbonate host rocks from the Puig-reig anticline.

más pesados son los más antiguos y los valores más ligeros los más modernos. Esta interpretación de posterioridad de Cc2 se demuestra por criterios petrográficos (Fig. 2A–D). También por el hecho de que este cemento solamente se encuentra en las fallas que han cambiado su campo de esfuerzos en las últimas fases de crecimiento de la estructura. En cambio, Cc1 se encuentra en todos los tipos de falla y en las rocas encajantes, habiendo precipitado durante los estadios iniciales de plegamiento.

Así, mediante la integración de datos petrológicos y geoquímicos, se puede explicar la evolución de los cementos que precipitaron en las fallas que afectan al anticlinal de Puig-reig en dos etapas. Una primera etapa, en la que precipitó un

cemento Cc1 a partir de un fluido de origen meteórico y en condiciones superficiales. Gradualmente, en la segunda etapa precipitó un cemento Cc2 a partir de un fluido meteórico-de formación de mayor temperatura. Este incremento de la temperatura puede explicarse mediante el enterramiento progresivo del sistema de fallas durante el depósito de las formaciones Berga y Solsona o bien a la entrada de un fluido externo de mayor temperatura a los niveles que se encuentran a mayor profundidad.

### Agradecimientos

Los autores agradecen los comentarios de las Dras. Rafaela Marfil y M<sup>a</sup> Isabel Benito y de un revisor anónimo que han ayudado a mejorar el manuscrito. Esta

investigación está financiada por el proyecto CGL2010-18260, y el *Grup Consolidat de Recerca "Geologia Sedimentària" 2014 SGR-251*.

### Referencias

- Anadón, P., Cabrera, L., Colombo, F., Marzo, M. y Riba, O. (1986). En: *Foreland Basins*. (P.A. Allen y P. Homewood, Eds.). IAS Special Publication 8, 259-271.
- Costa, E., Garcés, M., López-Blanco, M., Beaumud, E., Gómez-Paccard, M. y Larrasoña, J.C. (2009). *Basin Research* 22, 904-917.
- Puigdefàbregas, C., Muñoz, J.A. y Marzo, M. (1986). En: *Foreland Basins*. (P.A. Allen y P. Homewood, Eds.). IAS Special Publication 8, 229-246.
- Puigdefàbregas, C., Muñoz, J.A. y Vergés, J. (1992). En: *Thrust Tectonics* (K.R. McClay, Ed.). London, Chapman & Hall, 247-254.
- Riba, O. (1973). *Acta Geológica Hispánica* 8, 90-99.
- Sáez, A. (1987). *Estratigrafía y sedimentología de las formaciones lacustres del tránsito Eoceno-Oligoceno del NE de la Cuenca del Ebro*. Tesis Doctoral, Univ. de Barcelona, 318 p.
- Sáez, A., Anadón, P., Herrero, M.J. y Moscarriello A. (2007). *Sedimentology* 54, 367-390.
- Travé, A. y Calvet, F. (2001). *Tectonophysics* 336, 101-120.
- Travé, A., Labaume, P., Calvet, F. y Soler, A. (1997). *Tectonophysics* 282, 375-398.
- Travé, A., Calvet, F., Sans, M., Vergés, J. y Thirlwall, M. (2000). *Tectonophysics* 321, 73-102.
- Vergés, J. (1993). *Estudi tectònic del vessant sud del Pirineu central i oriental. Evolució cinemàtica en 3D*. Tesis Doctoral, Univ. de Barcelona, 203 p.
- Vergés, J., Muñoz, J.A. y Martínez, A. (1992). En: *Thrust Tectonics* (K.R. McClay, Ed.). London, Chapman & Hall, 255-264.