

# Disposición geométrica profunda de los materiales terciarios en el corte del río Najerilla. (Sector Riojano de la Cuenca del Ebro)

*Deep geometry of the tertiary deposits in the Najerilla River cross-section (Ebro Basin, La Rioja).*

J. Molinero Huguet (\*), F. Colombo Piñol (\*) y S. Hardy (\*\*)

(\*) Grup de Geodinàmica y Anàlisi de Conques. Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica y Paleontologia. Universitat de Barcelona, 08028, Barcelona  
(\*\*) Inst. C. de la Terra (J. Almera). C.S.I.C.. c/ Martí y Franqués, s/n, 08028, Barcelona.

## ABSTRACT

A geological section has been constructed along the Najerilla River crossing the extreme north of the Sierra de La Demanda and the southern margin of the Ebro Basin. This section was augmented with sub-surface information from seismic profiles. However, given the lack of information on the geometries of deeper Tertiary deposits close to the Cameros Thrust, we considered two explanations of this geometry are considered and that the following kinematic model is suggested as the more probable: one the geometries were produced as a result of a fault-propagation fold which was later cut by the Cameros Thrust. This model was incorporated into a computer model and suggests that it is necessary to have three stages in the development of the thrust with increasing propagation intensities in order to produce the observed structure.

**Key words:** La Demanda range, western Ebro Basin, Najerilla River, Cross-section, kinematical model, mathematical model.

*Geogaceta*, 20 (4) (1996), 792-795  
ISSN: 0213683X

## Introducción

Las sierras de Cameros y La Demanda constituyen la parte más noroccidental de la Cordillera Ibérica y forman una unidad alóctona con un desplazamiento hacia el antepaís de la Cuenca del Ebro que varía según los diferentes autores entre los 25 km (Casas, 1993) y los 30 km (Guimerà y Álvaro., 1990) aproximadamente. Este desplazamiento fue debido a un proceso de inversión tectónica que durante el Terciario levantó y desplazó hacia el norte la cuenca extensiva de Cameros formada durante el Jurásico-Cretácico (Casas, 1992; Casas, 1993; Mas et al., 1993; Guimerà et al., 1995).

Se ha realizado un corte geológico siguiendo la orientación del río Najerilla desde varios km al sur de la localidad de Anguiano hasta la población de Baños de Río Tobía (Fig. 1). El corte realizado comprende materiales paleozoicos y mesozoicos de la lámina cabalgante de Cameros-La Demanda y materiales terciarios de las láminas cabalgantes de Anguiano y Nájera (Fig. 1).

En este trabajo, se discute sobre los problemas encontrados al intentar integrar la información sobre la estructura en profundidad obtenida en la interpretación de varios perfiles sísmicos de reflexión, con los datos superfi-

ciales, se proponen dos hipótesis sobre la estructura y se exponen los argumentos que favorecen una de las dos hipótesis. Posteriormente se propone un modelo cinemático que se ha reproducido informáticamente en base a un modelo matemático.

## Corte Geológico Superficial

En el corte geológico realizado (Fig. 2) se pueden reconocer los siguientes elementos estructurales:

**Lámina cabalgante de Cameros-La Demanda.** formada al sur por materiales paleozoicos (precámbricos, cámbricos y ordovícicos) y triásicos. En la zona estudiada estos materiales se disponen formando una estructura anticlinal, seguida más al sur por un sinclinal (sinclinal de Brieva). La parte norte de esta lámina, está compuesta en esta zona por una estrecha franja de materiales carbonatados mesozoicos fundamentalmente jurásicos (Lias y Dogger), aunque también aparecen materiales detríticos (lutitas y areniscas finas) de las facies continentales Weald características de la Cuenca extensiva de Cameros (Jurásico-Cretácico). Estos materiales afloran invertidos con buzamientos entre los 85°S y los 55°S.

Esta lámina cabalgante está separada de la

Cuenca terciaria del Ebro por el Cabalgamiento de Cameros. En esta zona los materiales paleozoicos cabalgan sobre los materiales mesozoicos, aunque este cabalgamiento no es muy continuo lateralmente. A efectos de evitar confusiones se ha denominado a esta estructura Cabalgamiento de Las Cuevas en vez de Cabalgamiento de La Demanda, con el fin de resaltar que se trata de una estructura de menor rango que está dentro de la lámina de Cameros-La Demanda, la cual es desplazada por el Cabalgamiento de Cameros.

**Unidad terciaria de la Cuenca del Ebro.** formada por materiales detríticos continentales cenozoicos. En el extremo sur de la cuenca, estos materiales afloran invertidos buzando 70°-80° al sur y formando un dispositivo de abanico de capas abierto hacia el norte, que se interpreta como una discordancia sintectónica progresiva compuesta en el sentido de Riba (1976). Más hacia el norte, estos materiales afloran con buzamiento constante entre 4° y 8°N hasta llegar a un pliegue monoclinal en el que las capas alcanzan buzamientos de hasta 27°N (flexión de Baños de Río Tobía) durante algunos km, para volver después a una disposición subhorizontal. Más al norte de la zona estudiada aparece otro pliegue de similares características (flexión de Nájera).

Se han observado tres discordancias an-

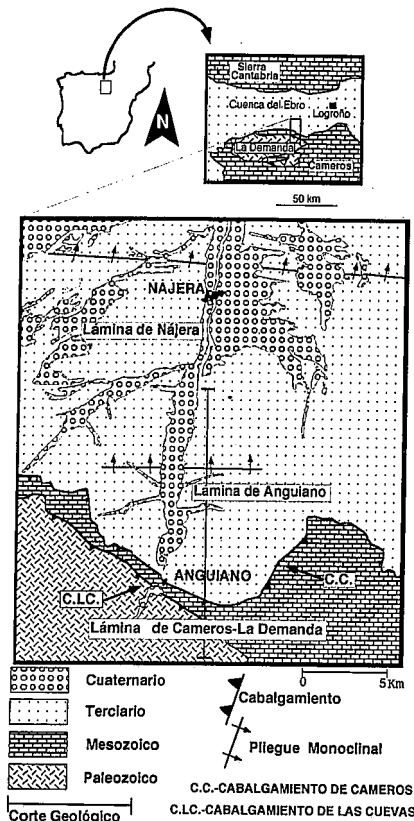


Fig.1. Situación y mapa geológico de la zona estudiada (modificado de Muñoz, 1992).

Fig.1. Location and geological map of the studied area (modified from Muñoz, 1992).

gulares dentro de los materiales terciarios de la zona estudiada, dos de ellas cerca del límite con la lámina cabalgante de Cameros-La Demanda y la otra en el flanco del pliegue monoclin.

En estos sedimentos terciarios se han definido varias Unidades Tectosedimentarias (UTS). Ramírez *et al.*, (1989) los agrupan en 3 unidades (UTS 2,3 y 4) y Muñoz (1992) en 5 unidades (UTSA2, A3, A4, A5 y A6), para estos autores los materiales terciarios tienen un rango temporal que comprende aproximadamente el Oligoceno inferior y el Mioceno medio.

Dentro de esta unidad está el Cabalgamiento ciego de Baños de Río Tobía, constatable de forma clara en los perfiles de sísmica de reflexión y que es el responsable del pliegue monoclin observable en esa misma localidad. Este cabalgamiento transporta la Lámina cabalgante de Anguiano, constituida por los materiales terciarios limitados al sur por el cabalgamiento de Cameros y al norte por el pliegue monoclin de Baños de Río Tobía.

La Lámina cabalgante de Nájera, de simi-

lares características, está constituida por los materiales terciarios limitados al sur por el pliegue monoclin de Nájera, que es la respuesta superficial a otro cabalgamiento ciego que transporta esta lámina.

### Interpretación de la estructura profunda

Como se observa en la Figura 2, a partir de los datos superficiales y las interpretaciones de los perfiles sísmicos se puede construir un corte geológico parcial con una componente interpretativa muy pequeña. Sin embargo, queda una zona sin información en cuanto a la geometría de los materiales terciarios profundos cercanos al cabalgamiento de Cameros.

Para completar el corte con la interpretación de esta zona se proponen dos hipótesis que se ilustran en la Figura 2.

La hipótesis A, consiste en prolongar las capas terciarias profundas más o menos de forma horizontal hasta el contacto con el cabalgamiento de Cameros, siguiendo así una cierta coherencia con lo que parece observarse en otros perfiles sísmicos paralelos de la misma región. Esto implica que dicho cabalgamiento tuvo que ser aflorante durante la sedimentación de estos materiales, de manera que no provocase ninguna rotación de estas capas que continuarían siempre horizontales.

Sin embargo al continuar el perfil hacia la superficie se plantea un problema de espacio, puesto que los materiales superficiales afloran invertidos y formando una discordancia progresiva. Para solucionar esto es necesario un cabalgamiento ciego dentro de los materiales terciarios que permitiese restituir a la horizontal sin que quedase un hueco en estos sedimentos.

La hipótesis B, consiste en acoplar las capas más profundas a las que se observan en superficie, de manera que formen un monoclin con el flanco invertido. De esta manera no se necesita ningún cabalgamiento adicional para poder restituir los materiales a la posición horizontal inicial.

El problema de la interpretación radica en que en esta zona que queda por debajo del cabalgamiento de Cameros se pierden los reflectores sísmicos del Terciario, produciéndose un cambio de las facies sísmicas con reflectores de gran amplitud y relativa continuidad en las partes más alejadas del cabalgamiento, que pasan a unas facies sísmicas caóticas (sin reflectores continuos) en las zonas más próximas y por debajo de aquel. Esta pérdida de los reflectores puede ser debida a un efecto pantalla producido por la superposición de los materiales mesozoicos y paleozoicos sobre los terciarios, y/o al hecho de que las capas dejen de ser horizontales y por lo tanto dejen de constituir superficies de reflexión preferente para las ondas sísmicas.

En la interpretación sísmica realizada se han encontrado zonas en las que parece que algunos reflectores se prolongan continuamente más que otros que ocupan posiciones superiores. Esto parece que no es del todo compatible con el efecto de la interferencia producida por los materiales cabalgantes, y si lo es con que las capas estuviesen plegadas como en la hipótesis B. Además, el cabalgamiento que se necesita en la hipótesis A queda relativamente poco profundo y no se observa en los perfiles sísmicos.

Todo esto, junto a que la hipótesis B explica de manera más sencilla los datos superficiales, nos hace proponer esta hipótesis como la más probable.

### Modelo cinemático

Este modelo cinemático, que posteriormente se reproduce con un modelo matemático, consiste en asociar genéticamente una gran parte de los materiales terciarios al crecimiento de un pliegue de propagación (Fig 3.A).

El flanco norte de este pliegue correspondería en parte a los materiales mesozoicos invertidos que afloran en contacto con el Terciario. La estructura anticlinal que presentan los materiales paleozoicos contiguos, corresponderían también a este pliegue de propagación. El pliegue continuaría creciendo junto a la deposición de sedimentos terciarios contemporáneos que sufrirían deformación sinsedimentaria asociada a este plegamiento, hasta que en un momento dado el Cabalgamiento de Cameros se propagaría cortando el pliegue. Otra parte de estos materiales terciarios estarían genéticamente relacionados con el desplazamiento de este cabalgamiento y con el Cabalgamiento de Las Cuevas (Fig 3.A), que posteriormente o sincrónicamente, levantaría materiales paleozoicos de las partes más internas del anticlinal sobre los materiales mesozoicos del flanco invertido. No se han encontrado criterios de campo para discernir si la discordancia progresiva que se observa en superficie está genéticamente relacionada con el desarrollo del pliegue o con la actuación posterior del Cabalgamiento de Cameros.

### Modelo matemático

Para probar si la hipótesis propuesta puede ser factible para explicar la geometría observada, se ha realizado una comparación con las predicciones de un modelo matemático de pliegues de propagación (Fig 3.B).

El modelo que se ha usado es una adaptación del publicado por Erslev (1991) y está descrito en detalle en Hardy & Ford (1996, submitted). Al contrario que los métodos de *kink band*, este modelo de zonas triangulares de deformación distribuida (Erslev, 1991)

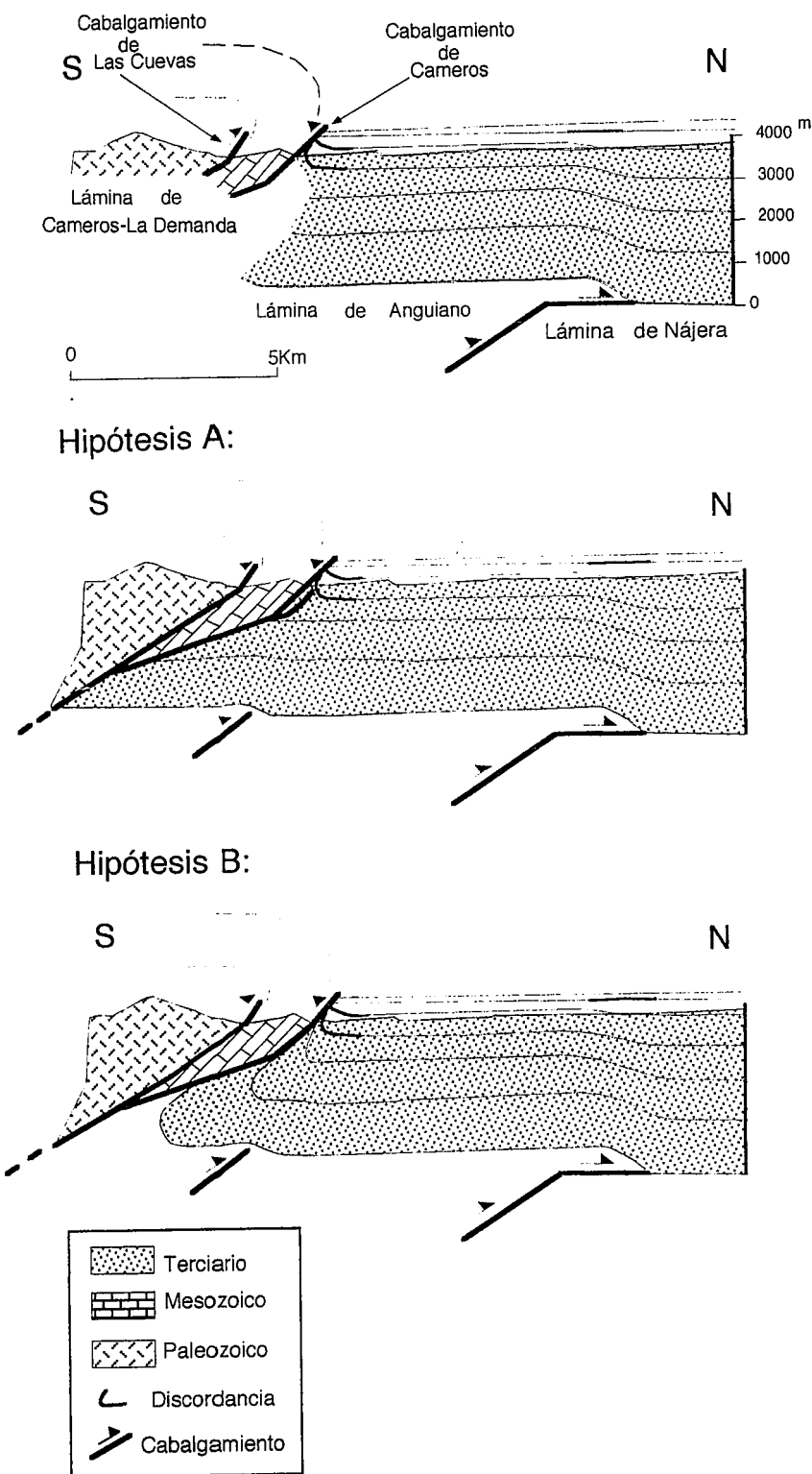


Fig.2. Corte geológico del río Najerilla y dos hipótesis interpretativas sobre la geometría en profundidad.

Fig 2. Geological cross-section of the Najerilla River and two hypotheses to explain the deep geometry.

produce pliegues de propagación con contornos suavizados y charnelas redondeadas, que parecen más apropiados para simular las geometrías observadas en el campo. Anteriormente ya se han utilizado otras adaptaciones de este modelo para modelizar situaciones de

pliegues de adaptación y propagación (Hardy & Poblet, 1995).

Este modelo, que se basa en una zona triangular de deformación distribuida (donde se produce el plegamiento) que converge en el extremo (*tip*) de una falla propagante, además

incluye sedimentación sintectónica que es lo que realmente permite aplicarlo a este caso concreto. La principal premisa que utiliza este modelo es que la altura de una superficie geológica, puede ser modificada de cuatro maneras: (1) puede existir adición o sustracción de material en la superficie; (2) puede moverse material de una parte a otra de la superficie; (3) la superficie se puede mover; (4) la superficie se puede deformar. Obsérvese que los dos mecanismos iniciales son de carácter sedimentario y los dos últimos son tectónicos. Estas cuatro premisas son las que Waltham (1992) tuvo en cuenta para derivar la ecuación diferencial que se usa en los modelos bidimensionales de tectónica y sedimentación.

Para ejecutar este modelo es necesario introducir unos parámetros de entrada que se ajustan a los valores estándar que se suelen utilizar (dispersión de sedimento y velocidad de sedimentación), y en todo caso afectan muy poco a la geometría final resultante. Otro tipo de parámetros como el buzamiento del cabalgamiento y el ángulo de la zona triangular (Fig. 3.B1) se extraen de la interpretación del perfil real.

Una vez fijados estos valores consiste en realizar tanteos por aproximaciones sucesivas en los valores de los desplazamientos (*slip*) del cabalgamiento propagante, para conseguir el perfil final que sea más parecido a la hipótesis propuesta (en geometría y escala). Cuando se ha conseguido este perfil final se pueden visualizar todas las etapas evolutivas a lo largo del tiempo y las correspondientes cuantificaciones de las diferentes etapas tectónicas. La ausencia de dataciones en los materiales continentales estudiados no permite esta cuantificación (puesto que se desconoce la variable temporal), lo cual hace que este modelo en concreto quede limitado a resultados cualitativos.

En la Figura 3.B se presentan los resultados de la modelización bidimensional del desarrollo del pliegue de propagación interpretado en el modelo cinemático (Fig. 3.A), y se observa como en la Figura 3.B3 se llega a producir una discordancia progresiva equivalente a la observada en superficie, que estaría relacionada genéticamente al desarrollo del pliegue. Posteriormente el cabalgamiento continuaría propagándose y rotando los sedimentos sintectónicos hasta que afloraría en superficie, y ya en este momento deja de ser válido el modelo de pliegues de propagación.

La aportación cualitativa de este modelo matemático, a parte de confirmar que el modelo cinemático es aceptable desde un punto de vista teórico, radica en que al menos son necesarias tres etapas tectónicas diferentes (en cuanto a la intensidad de la propagación del cabalgamiento) hasta llegar al punto en que este aflorase en superficie (Fig. 3. B4). Además estas etapas tectónicas tienen que ser de

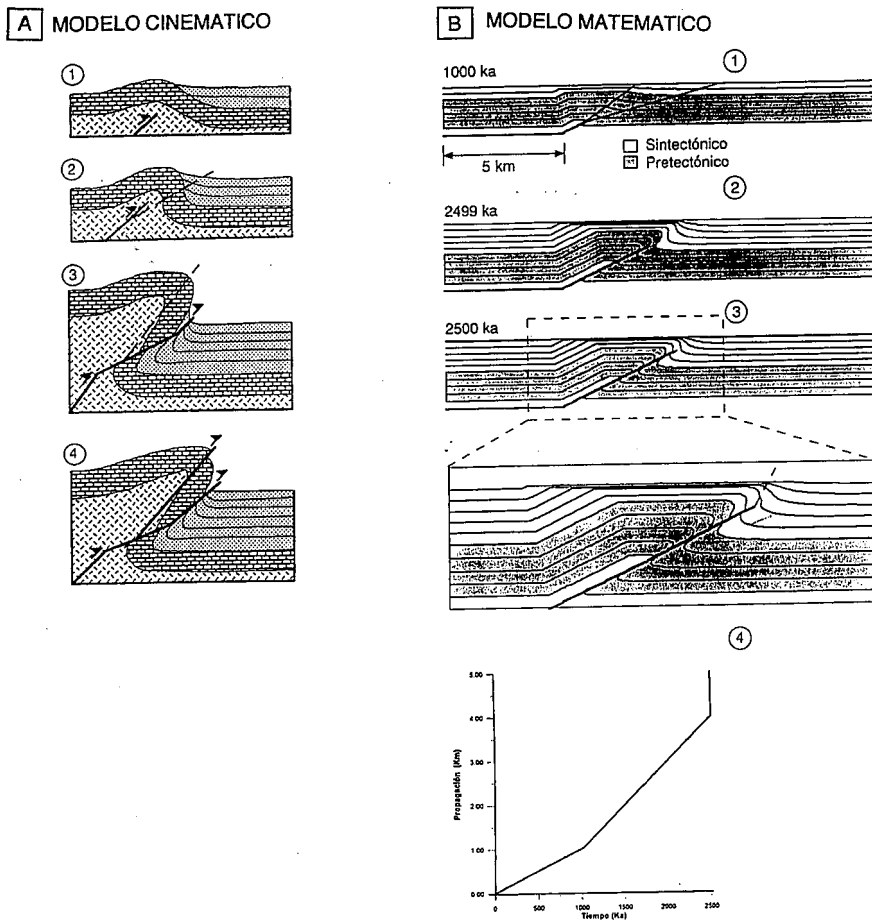


Fig 3. A) Modelo cinemático de la evolución tectónica en el corte del río Najerilla. B) Representación gráfica y resultados del modelo matemático del pliegue de propagación.

Fig 3. A) Kinematical model of the tectonic evolution in the Najerilla River cross-section. B) Graphical representation and results of the fault-propagation fold mathematical model.

intensidad creciente siendo la última una propagación casi instantánea de 1 Km. Esta propagación instantánea representa el momento en el que el flanco norte del pliegue rebasa el límite de deformación dúctil y se fractura, por lo que justamente después de esto ya no tiene sentido continuar con el modelo y se pasaría a una siguiente etapa tectónica relacionada con la actuación del cabalgamiento aflorando en superficie. Cabe resaltar que esta propagación de 1 Km en 1000 años, se da para un tiempo total de ejecución del modelo de 2.500.000 años, con lo que si trasladamos esto a la escala temporal a la que realmente debió producirse este plegamiento (orogenia alpina) queda claro que simplemente refleja una propagación muy rápida respecto a las etapas anteriores.

#### Consideraciones

En base a los datos de campo y a las interpretaciones de perfiles sísmicos de la zona se

ha construido un corte parcial a lo largo del Río Najerilla que se puede completar con dos hipótesis.

La interpretación de algunos detalles de estos perfiles sísmicos y la observación superficial de los materiales terciarios en el contacto con el Cabalgamiento de Cameros, hace que se proponga una de estas hipótesis como la más probable. Esta hipótesis consiste en acoplar los sedimentos terciarios profundos a la geometría superficial, de manera que se disponen formando un monoclinial con el flanco invertido.

Esta geometría propuesta se explica por medio de un modelo evolutivo cinemático que se basa en el desarrollo de un pliegue de propagación que genera un volumen importante de sedimentos sintectónicos asociados en la Cuenca del Ebro. Posteriormente, este pliegue sería cortado en el flanco norte por los cabalgamientos de Cameros y de Las Cuevas, que generarían otro volumen menor de sedimen-

tos sintectónicos asociados.

En base a un modelo matemático, se ha reproducido informáticamente el modelo cinemático del crecimiento de este pliegue de propagación consiguiéndose un resultado final que se ajusta razonablemente a la geometría propuesta. Este modelo implica que son necesarias tres etapas tectónicas diferentes con intensidades de propagación crecientes para obtener el resultado que se buscaba. También implica que la discordancia progresiva observada en superficie estaría relacionada genéticamente con la propagación del pliegue.

Para explicar la segunda discordancia angular que se observa en superficie, se deduce que al menos existió otra etapa tectónica diferente una vez que los cabalgamientos de Cameros y Las Cuevas ya actuaban aflorando en superficie.

#### Agradecimientos

Agradecemos las ideas y comentarios realizadas por Manu Gómez y Miguel López, así como la ayuda de María José Prieto en las interpretaciones sísmicas. También queremos agradecer la revisión crítica del texto al Dr. Joan Guimerà. Este estudio ha sido financiado con una Ayuda para Estudios Científicos de Temática Riojana concedida por el Instituto de Estudios Riojanos y por el proyecto PB94-0908 y PB94-0871 de la DGICYT. Grup de Qualitat GRQ94-1048 de la Generalitat de Catalunya.

#### Referencias

- Casas, A.M. (1992): *Zubia*, monográfico n°4, 220p.  
 Casas, A.M. (1993): *Geodinámica Acta*, 6(3), 202-216.  
 Erslev, E.A. (1991): *Geology*, v.19, 617-620.  
 Guimerà, J. y Álvaro, M. (1990): *Bull. Soc. Geol. France* (8), VI (2), 339-340.  
 Guimerà, J.; Alonso, A. & Mas, J. R. (1995): *Geol. Soc. Spec. Publ.* n° 88, 433-453.  
 Mas, J.R.; Alonso, A. y Guimerà, J. (1993): *Rev. Soc. Geol. Esp.*, 6(3-4), 129-144.  
 Hardy, S. & Poblet, J. (1995): *Mar. & Petrol. Geol.*, v.12, n°2, 165-176.  
 Muñoz, A. (1992): *Ciencias de la Tierra* (15). Instituto de Estudios Riojanos, 347p.  
 Ramírez, J.I.; Olivé, A.; Álvaro, M. y Hernández, A. (1990): *MAGNA. Hoja n° 241 (Anguiano)*. ITGE. Madrid.  
 Riba, O. (1976): *Sedim. Geol.*, 15, 213-223.  
 Waltham, D. A. (1992): *Mar. & Petrol. Geol.*, V.9, 265-273.