

# Análisis de estrías en pliegues N-S del Pirineo central meridional

## Analysis of slickenfibres in N-S folds of the Southern Central Pyrenees

Ruth Soto<sup>1</sup> y Antonio M. Casas-Sainz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico y Minero de España (Unidad de Zaragoza). C/ Manuel Lasala 44, 9B, 50006 Zaragoza, Spain. r.soto@igme.es

<sup>2</sup> Dpto. Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, Spain. acasas@unizar.es

### ABSTRACT

This work studies the use of slickenfibres measured on bedding surfaces as kinematic indicators in N-S trending, N-plunging folds located in the Southern Pyrenees. To explain oblique to fold axis slickenfibres, two geometrical models are derived from flexural-slip mechanism of cylindrical folding: (1) two sequential stages of folding and plunging, and (2) simultaneous folding and plunging.

**Key-words:** Flexural-slip folding, plunge, slickenfibres on bedding surface, Southern Pyrenees.

### RESUMEN

Este trabajo muestra el análisis de indicadores cinemáticos (estrías) tomados sobre planos de estratificación de varios pliegues N-S con inmersión N de la vertiente meridional del Pirineo Central. Para explicar la orientación no perpendicular al eje del pliegue de varias estrías encontradas se han propuesto dos modelos geométricos relacionados con pliegues cilíndricos formados por mecanismo de flexural-slip: (1) dos etapas de plegamiento e inmersión sucesivas, y (2) plegamiento e inmersión simultáneos.

**Palabras clave:** Plegamiento flexural-slip, inmersión, estría sobre plano de estratificación, Pirineo meridional.

Geogaceta, 61 (2017), 67-70  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 29 de junio de 2016  
Revisión: 3 de noviembre de 2016  
Aceptación: 25 de noviembre 2016

## Introducción

El estudio de pliegues se basa en conocer su geometría y cinemática, aspectos íntimamente relacionados (Bastida *et al.*, 2004). Son varios los mecanismos cinemáticos de plegamiento propuestos. Así, cuando durante el plegamiento tiene lugar un deslizamiento "capa sobre capa", el mecanismo de plegamiento recibe el nombre de *flexural-slip* (Billings, 1954).

Las estrías medidas en planos de estratificación de flancos de pliegues cilíndricos de tipo *flexural-slip* son generalmente perpendiculares al eje del pliegue (Ramsay, 1967; Fig. 1A). En este trabajo algunas de las estrías medidas se disponen paralelas u oblicuas a los ejes de los pliegues, como también han descrito previamente otros autores (e.g. Ramsay, 1967). Tanner (1989) presenta cuatro posibles causas para explicar el origen de las estrías oblicuas al eje del pliegue (Fig. 1B): (1) el pliegue crece cuando las capas que lo forman han sido previamente plegadas, es decir, las estrías son pre-plegamiento, (2) las estrías

están asociadas a pliegues no cilíndricos, y estrías perpendiculares al eje del pliegue solo aparecerán en las culminaciones y depresiones del mismo, (3) existen dos etapas de plegamiento y, (4) formación de pliegues bajo régimen transpresivo.

En este trabajo se proponen dos modelos geométricos de plegamiento de tipo *flexural-slip* en pliegues cilíndricos con inmersión que muestran la generación de estrías paralelas y oblicuas con respecto al eje del pliegue, como las observadas en la zona de estudio.

## Situación geológica

Salvo el anticlinal de Boltaña, que se encuentra en el interior de la Cuenca Surpirenaica, los pliegues estudiados se encuentran en las Sierras Exteriores Aragonesas, un conjunto de pliegues y cabalgamientos despegados en los materiales triásicos de las facies Keuper que constituyen el frente de deformación surpirenaico (Fig. 2). Estos pliegues presentan una dirección N-S, oblicua a la dirección principal pirenaica WNW-ESE, y se

encuentran en el bloque superior del cabalgamiento frontal surpirenaico (Fig. 2B y C).

Los pliegues estudiados son (Fig. 3): de E a W en las Sierras Exteriores, los anticlinales del Balces, Alcanadre, Guara, Gabar-

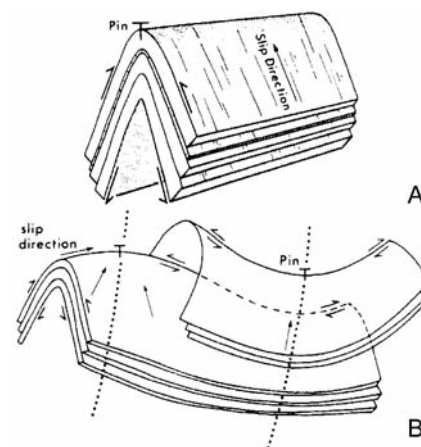


Fig. 1.- Mecanismo de flexural-slip en pliegues cilíndricos (A) y no cilíndricos (B). Modificado de Tanner (1989).

Fig. 1.- Flexural-slip mechanism in cylindrical (A) and non-cylindrical (B) folds. Modified from Tanner (1989).

diella, Lúsera, Pico del Águila, Bentué de Rasal y Rasal, y al NE de la zona de estudio, el anticlinal de Boltaña. Salvo este último, todos presentan inmersión que varía entre 10 y 40° hacia el N. Esta inmersión se ha interpretado como consecuencia de la posición de estos pliegues sobre la rampa de bloque inferior que buza de media 30° hacia el N (Millán, 1996; Fig. 2B y C).

**Datos cinemáticos**

Se tomaron medidas de estrías sobre planos de estratificación en 13 estaciones (Fig. 3). Doce de las estaciones se localizan en los flancos de los pliegues estudiados y una estación en la charnela del anticlinal del Pico

del Águila. La mayoría de las estrías medidas en los flancos de los pliegues son perpendiculares con respecto al eje de los pliegues y muestran movimiento inverso o sinistro (estaciones 3, 8, 9, 10, 11 y 12), características de mecanismo de *flexural-slip* durante el plegamiento. Sin embargo, en algunas estaciones se observan indicadores cinemáticos paralelos al eje del pliegue (estaciones 6 y 10) o con una orientación oblicua con respecto al mismo (estaciones 2, 5, 6 y 8). Los indicadores cinemáticos medidos sobre la charnela del anticlinal del Pico del Águila se disponen paralelos al eje del pliegue (estación 1).

Para explicar la orientación de algunas de las estrías que no se disponen perpendiculares al eje de los pliegues, se proponen dos po-

sibles modelos geométricos relacionados con pliegues de tipo *flexural-slip* que presentan inmersión.

**Modelos geométricos en pliegues cilíndricos con inmersión**

La diferencia entre los dos modelos geométricos planteados está en la simultaneidad o no de su plegamiento e inmersión.

*Modelo A. Etapas de plegamiento e inmersión sucesivas*

En este modelo se consideran dos etapas de plegamiento sucesivas y separadas en el tiempo. En primer lugar sucede el plegamiento según un eje de dirección N-S que da lugar a un pliegue cilíndrico de eje horizontal. Los indicadores cinemáticos de esta primera etapa se disponen perpendiculares a la dirección del eje del pliegue y paralelos a la línea de máxima pendiente del plano que los contiene (Ramsay, 1967; Fig. 4).

A continuación, se produce la sucesiva inmersión (10, 20, 30 y 40° de inmersión hacia el N) del pliegue en una dirección paralela al eje del mismo, también acompañada de *flexural-slip*. La inmersión provoca la rotación de todos los elementos del pliegue según el eje N090E (Fig. 4). Los indicadores cinemáticos que reflejan esta segunda etapa se disponen, en este caso, paralelos al eje del pliegue. Sin embargo, los indicadores cinemáticos de la primera etapa de plegamiento sufren rotación pasiva y se disponen como muestran las proyecciones estereográficas de la figura 4.

Por tanto, en un pliegue cilíndrico de tipo *flexural-slip* que ha experimentado una primera etapa de plegamiento de eje horizontal, seguido de una etapa de plegamiento perpendicular, que da lugar a la inmersión del eje, los indicadores cinemáticos se disponen en dos familias, a excepción de las zonas que pertenecen a la charnela del pliegue (dirección N090), en las cuales, únicamente se encontrará una familia de estrías paralelas al eje del pliegue (Fig. 4). Así, en un plano perteneciente a cualquiera de los dos flancos encontraremos una primera familia, cuya orientación depende de la posición del pliegue en la que se encuentra y la inmersión que ha sufrido el pliegue, y una segunda familia paralela el eje del pliegue (Fig. 4).

En este modelo se considera que se produce el plegamiento según el eje N-S y una rotación con eje 090 de forma simultánea. La figura 5 muestra la evolución que experimen-

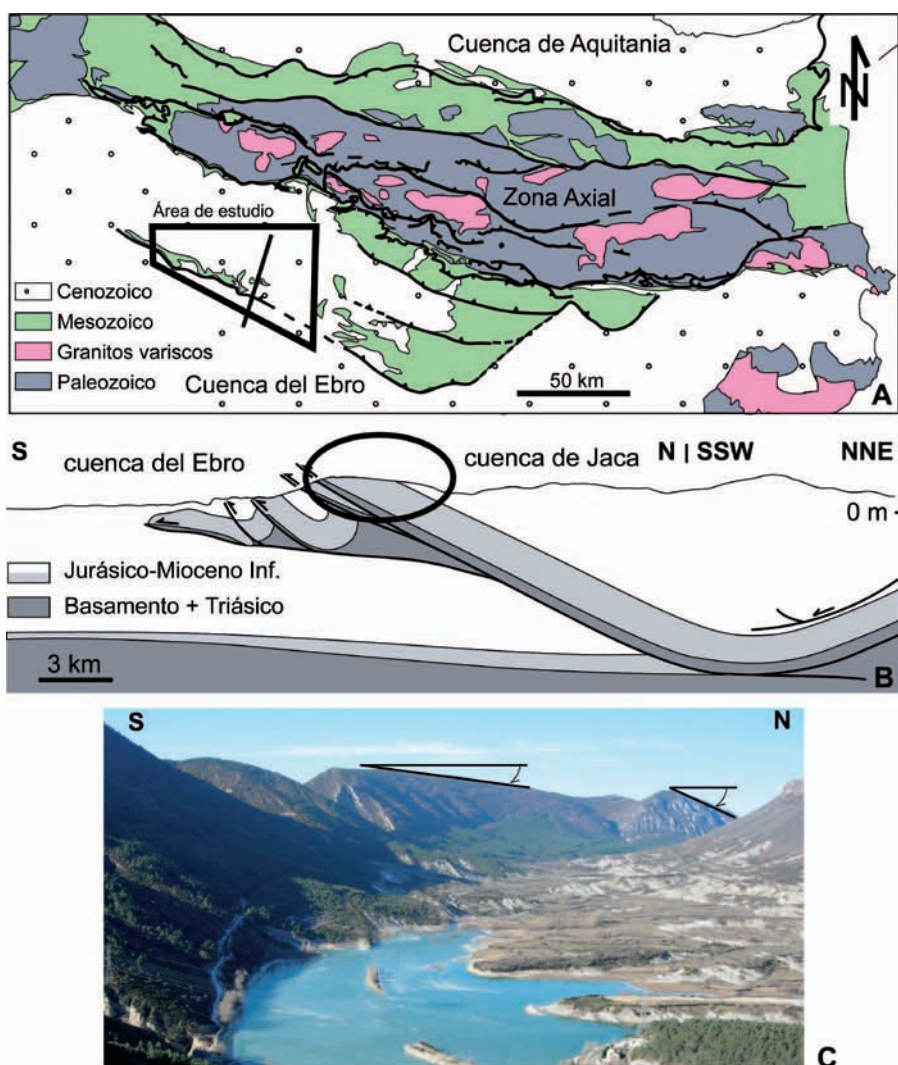


Fig. 2.- A) Localización del área de estudio en el Pirineo. B) Corte geológico esquemático mostrando como los pliegues N-S de las Sierras Exteriores Aragonesas se sitúan sobre una rampa de bloque inferior buzando al N de media 30° (modificado de Millán *et al.*, 2000). C) Anticlinal de Bentué desde el anticlinal Pico del Águila situado al E donde se observa su inmersión al N. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- A) Location of the studied area in the Pyrenees. B) Schematic cross-section showing the position of the N-S plunging folds over a N-dipping footwall ramp with an average dip of 30° (modified from Millán *et al.*, 2000). C) Bentué anticline and its plunge towards the N. See Colour figure on the web.



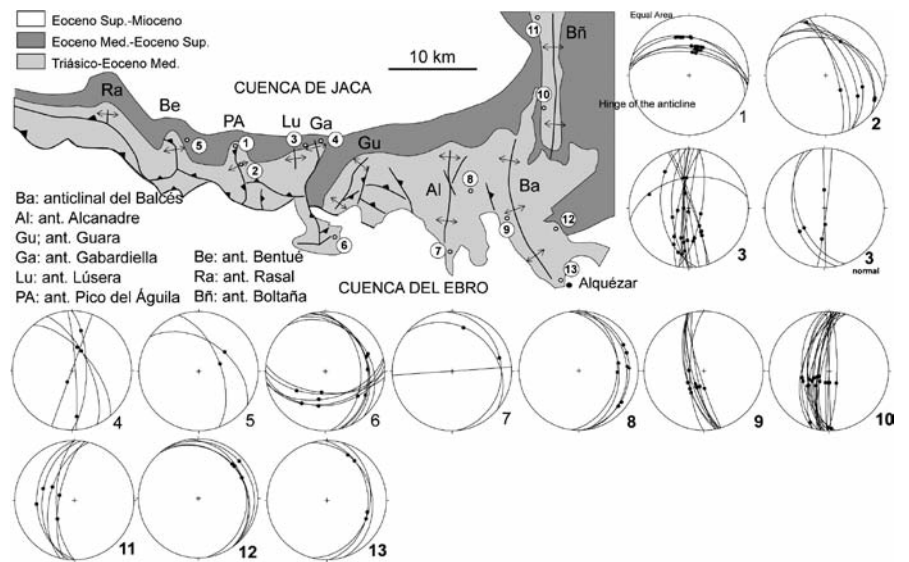
taría un plano tangente a la charnela y a ambos flancos al incrementar los valores de buzamiento por plegamiento y de inmersión del eje en distintas condiciones: (a) si los valores de incremento del buzamiento por plegamiento e incremento de la inmersión del eje aumentan la misma cantidad en cada paso (relación 1:1) y (b) si los valores de incremento del buzamiento por plegamiento son el doble que los incrementos en los valores de inmersión (relación 2:1).

En el caso de plegamiento e inmersión simultáneos, aparece una única familia de estrías tanto en la zona de charnela del pliegue (planos de dirección N090E) como en los flancos. Las estrías en los planos de la zona de charnela son paralelas al eje del pliegue, como en el caso anterior en todo momento. En los flancos, la orientación de la estría recién creada coincide con la dirección de la estría heredada de la etapa anterior (Fig. 5). Es decir, conforme se produce el plegamiento con inmersión simultáneos, la orientación de la estría en un plano concreto varía ligeramente en el tiempo (Fig. 5), pero ésta coincide con la orientación de las estrías heredadas después del plegamiento e inmersión. Por tanto, en cada plano concreto perteneciente a los flancos, únicamente se observará una familia de estrías.

**Discusión y Conclusiones**

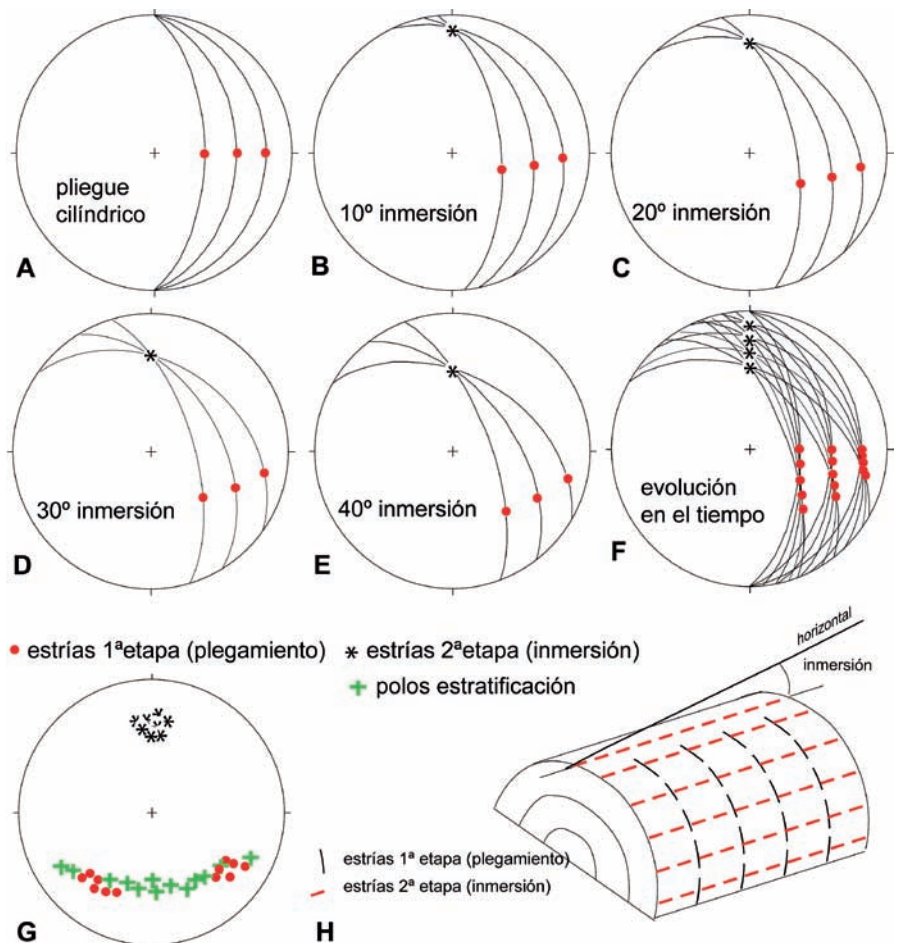
Las estrías medidas sobre planos de estratificación en el flanco occidental del anticlinal de Boltaña se disponen perpendiculares al eje del mismo (estaciones 10 y 11). En la estación 10, también aparecen estrías paralelas al eje del pliegue, que podrían estar ligadas al deslizamiento por *flexural-slip* entre las capas ligadas a las ensilladuras que presenta este pliegue a lo largo de su longitud o a la cercanía a su terminación peridinal, que sugieren una evolución en dos etapas (modelo A). El anticlinal del Balces, en su parte intermedia, también presenta estrías perpendiculares al eje del pliegue (estaciones 9 y 12). Sin embargo, las estrías de la estación 13, situada en una posición próxima a la terminación meridional del pliegue, muestran estrías oblicuas al eje del mismo.

La estación 8, en el flanco oriental del anticlinal del Alcanadre, presenta una familia de estrías perpendiculares al eje del pliegue y otras dos familias oblicuas. En esta estación, las estrías perpendiculares al eje del pliegue y las estrías de orientación N060 aparecen superpuestas a las estrías de dirección N130 indicando una evolución en dos etapas.



**Fig. 3.-** Indicadores cinemáticos (puntos negros) tomados sobre plano de estratificación (ciclográficas). Las estereográficas representan el hemisferio inferior y son equiareales.

*Fig. 3.- Slickenfibres (black dots) on bedding surfaces (great circles). Lower hemisphere, equal area plots.*



**Fig. 4.-** Modelo A. Plegamiento e inmersión no simultáneos. Evolución cinemática del flanco oriental de un pliegue cilíndrico horizontal con inmersión posterior (A-F). Ejemplo de la etapa final para ambos flancos (G). Ejemplo pliegue cilíndrico con las dos familias de estrías (H).

*Fig. 4.- Model A. Two sequential stages of folding and plunging not simultaneous. Kinematic evolution for the eastern limb of a cylindrical fold (A-F). Final stage for both limbs (G). Example of a cylindrical fold with two families of slickenfibres (H)*

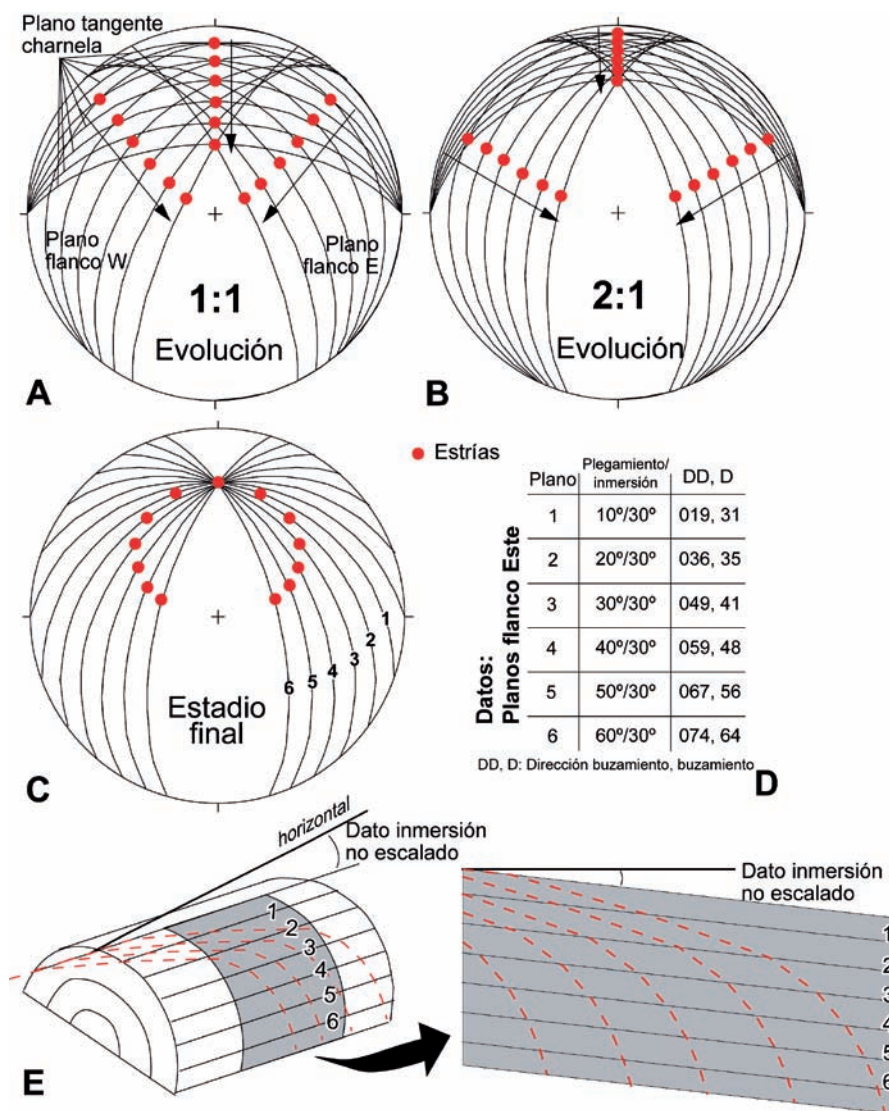


Fig. 5.-Modelo B. Plegamiento e inmersión simultáneos. Evolución cinemática de un plano tangente a la charnela y dos pertenecientes a los flancos E y W de un pliegue cilíndrico (A) con incrementos de 10° de plegamiento y 10° de inmersión en cada etapa y (B) con incrementos de 20° de plegamiento y 10° de inmersión en cada etapa. (C-E) Estadio final para planos con distinto buzamiento pertenecientes al mismo pliegue cilíndrico (datos referidos a plano de flanco E) con plegamiento e inmersión simultáneos 2:1.

Fig. 5.-.- Model B. Simultaneous folding and plunging. Kinematic evolution for a plane of the hinge and both limbs of a cylindrical fold for the same quantity of folding (A) and for two times of folding with respect to plunging for each step (B). Final stage for different dipping planes of a cylindrical fold at both limbs with 60° of folding and 30°N of plunge (2:1) (C-E).

Los indicadores cinemáticos encontrados en la charnela del anticlinal del Pico del Águila (estación 1), se disponen paralelos al eje del pliegue y paralelos también a la línea máxima pendiente de los planos medidos. Su orientación podría corresponder, aunque no necesariamente, a los pliegues en los cuales el plegamiento e inmersión

son simultáneos (modelo A y B). Sin embargo, la disposición de las estrías observadas en el flanco oriental de este pliegue (estación 2), indican que la inmersión tuvo lugar con posterioridad al plegamiento en el anticlinal del Pico del Águila, siguiendo posiblemente la evolución descrita en el modelo A.

Por otro lado, la disposición de las estrías en las estaciones 5 y 6, podría estar relacionada con un plegamiento e inmersión simultáneos en la formación del pliegue (modelo B), aunque la estación 5 solo cuenta con dos datos.

En conjunto, a partir de los datos obtenidos en estrías de deslizamiento capa sobre capa en los pliegues N-S de las Sierras Exteriores Aragonesas, se deducen cinemáticas distintas para los diferentes pliegues sin una relación clara que permita explicarlos de forma sencilla de acuerdo con los modelos planteados. Los factores que influyen en esta falta de correspondencia van desde la escasez de datos, debido en muchos casos a la estilolitización de los planos de estratificación, a la posibilidad de que no exista una relación unívoca en la cronología de las etapas de plegamiento, la existencia de rotaciones de eje vertical sin-plegamiento (Millán *et al.*, 2000 y referencias incluidas), que algunas de las estrías se relacionen con el movimiento de cabalgamientos y no con el plegamiento o al borrado de estrías en las últimas etapas de plegamiento.

**Agradecimientos**

Este trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos CGL2013-42670-P y CGL2014-54118-C2-2-R. Los autores agradecen a Fernando Bastida su revisión.

**Referencias**

Bastida, F., Aller, J., Toimil, N.C. y Bobillo-Ares, N.C. (2004). *Trabajos de Geología* 24, 9-41.

Billings, M.P. (1954). *Structural Geology*. 2ª Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 514 p.

Millán, H. (1996). *Estructura y cinemática del frente de cabalgamiento surpirenaico en las Sierras Exteriores Aragonesas*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza, 330 p.

Millán, H., Pueyo-Morer, E.L., Aurell Cardona, M., Luzón Aguado, A., Oliva-Urcia, B., Martínez-Peña, M.B. y Pocoví, A. (2000). *Rev. Soc. Geol. España* 13, 279-300.

Ramsay, J.G. (1967). *Folding and Fracturing of Rocks*. McGraw Hill, New York, 568 p.

Tanner, P.W. (1989). *Journal of Structural Geology* 11, 635-655.