

# Sobre el origen de la fracturación de dirección NE-SW en la cuenca de Aínsa-Sierras Exteriores Aragonesas (Pirineo Central)

*On the origin of NE-SW fracturing in the Aínsa Basin-External Sierras (Central Pyrenees)*

Lorena Bentué Laluez<sup>1\*</sup>, Teresa Román Berdiel<sup>2</sup> y Antonio Casas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza. bentuelore@gmail.com

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra. Grupo Geotransfer-IUCA. Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza.

mtdjrb@unizar.es, acasas@unizar.es

\*Corresponding author

## ABSTRACT

A fracture system found in the Aínsa basin-External Sierras (Central Pyrenees) area is here analysed. This study performs a structural analysis of fracture geometry and orientation along three stratigraphic units: The calcareous Guara Fm., the Sobrarbe Fm., and the Escanilla Fm. The general structure is characterised by a kilometer-scale monocline underlain by the South Pyrenean main thrust. The mapping and the analysis of fractures data allows to define three main sets: the first set presents a NE-SW direction, the second one a NW-SE direction and the last one a N-S direction. Kinematic indicators of the N-S set indicate a clear dextral movement, and cartographic features show that the NE-SW set is constituted by steeply-dipping normal faults with downthrown blocks to the SE. The main fracture sets (NE-SW and N-S) can be interpreted as an initially conjugate strike-slip system where the  $\sigma$ , axis is located around 020. Subsequently, these faults could be reactivated as steeply-dipping normal faults due to salt tectonics related to extrusion of the Upper Triassic towards the Naval diapir.

**Key-words:** Pyrenean Chain, structural analysis, monocline, conjugate faults, salt tectonics.

## RESUMEN

Se analiza un sistema de fracturas en la transición entre la cuenca de Aínsa y las Sierras Exteriores (Pirineo Central). Se presenta el análisis estructural de la geometría y orientación de las fracturas a lo largo de tres unidades estratigráficas: La Fm. calcárea de Guara, la Fm. Sobrarbe y la Fm. Escanilla. La estructura general se caracteriza por un monoclinal de escala kilométrica infrayacente al cabalgamiento surpirineo. La cartografía y el análisis de la fracturación permiten definir tres conjuntos principales: el primero presenta una dirección NE-SW, el segundo una dirección NW-SE y el último una dirección N-S. Los indicadores cinemáticos del conjunto N-S indican un claro movimiento dextral, y los rasgos cartográficos muestran que el conjunto NE-SW está constituido por fallas normales de fuerte buzamiento con bloques hundidos hacia el SE. Los principales conjuntos de fracturas (NE-SW y N-S) pueden interpretarse como un sistema de fallas conjugadas inicialmente direccional en el que el eje  $\sigma$ , se sitúa alrededor de 020. Posteriormente, estas fallas podrían haberse reactivado como normales debido a la tectónica salina relacionada con la extrusión del Triásico Superior hacia el diapiro de Naval.

**Palabras clave:** Cordillera Pirenaica, análisis estructural, monoclinal, fallas conjugadas, tectónica salina.

Geogaceta, 77 (2025), 15-18

<https://doi.org/10.55407/geogaceta108702>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 15/07/2024

Fecha de revisión: 30/10/2024

Fecha de aceptación: 29/11/2024

## Introducción

La Cuenca de Aínsa recoge el registro sedimentario, de la tectónica Eocena Pirenaica, como así se muestra en numerosas publicaciones (Mochales *et al.*, 2012; Muñoz *et al.*, 2018, entre otros). En esta zona aparecen evidencias tanto de actividad diapírica (Santolaria, 2015), como compresiva (Muñoz *et al.*, 2018). Sin embargo, a excepción del trabajo realizado por Santolaria *et al.* (2015), ningún otro estudio se ha centrado en detalle en el patrón de fracturación distintivo de esta zona que presenta una orientación predominante NE-SW, en el sector SW de la cuenca, en la zona de contacto con las Sierras Exteriores.

La zona estudiada (Fig.1) comprende una superficie de 33 km<sup>2</sup> y se sitúa dentro del Geoparque Mundial UNESCO Sobrarbe-Pirineos, el Parque Natural de la Sierra y los Cañones de Guara y el Parque Cultural del Río Vero, dentro de los límites del municipio de Bárcabo en la Comarca de Sobrarbe, provincia de Huesca. Las estructuras principales que la circundan son el anticlinal de Boltaña, el sinclinal de Buil y el diapiro de Naval.

El objetivo del presente trabajo es caracterizar la variación de los patrones direccionales de la fracturación, tanto de diaclasas (fracturas sin desplazamiento) como fallas (fracturas con desplazamiento) a lo largo de diferentes unidades estratigráficas pertenecientes al Eoceno medio y Oligoceno. A partir del análisis

de la orientación y distribución de las fracturas tanto a escala de afloramiento como a escala cartográfica se establecerá un modelo evolutivo de la estructura de la zona. Este modelo está enmarcado dentro del emplazamiento de la Unidad Surpirenica Central (USPC).

## Marco geológico

El área de estudio se encuentra en el sector central de la Cordillera Pirenaica, concretamente en la transición entre la USPC y las Sierras Exteriores. En la zona occidental de la USPC se identifica un área donde los pliegues presentan una dirección característica N-S como los anticlinales de Mediano, Boltaña y Balzed (Fig.1).

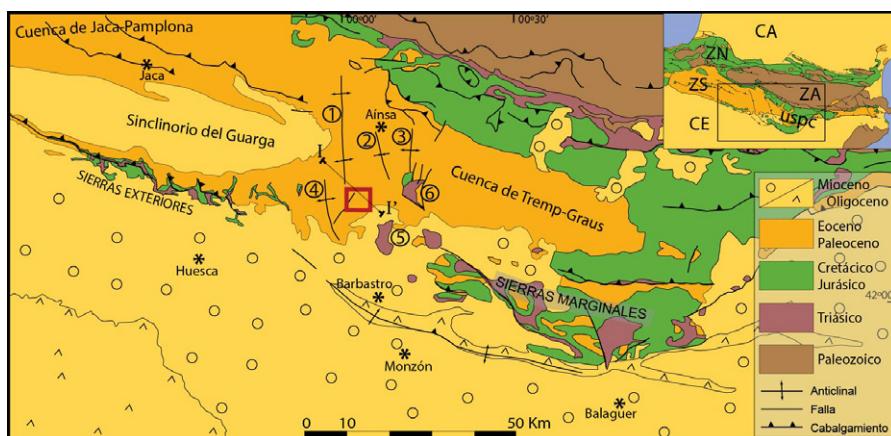


Fig. 1.- Mapa geológico simplificado del sector central de la Zona Surpirenaica con la situación del área de estudio (recuadro rojo), del corte geológico general (I-I') ilustrado en la figura 2<sup>a</sup>, y de las principales estructuras que la caracterizan (1: Anticlinal de Boltaña, 2: Sinclinal de Buil, 3: Anticlinal de Mediano, 4: Anticlinal del Balzed, 5: diapiro de Naval, 6: diapiro de Clamosa). En el recuadro superior derecho se muestra su localización en el contexto de la Cordillera Pirenaica; CA: Cuenca de Aquitania, ZN: Zona Norpirenaica, ZA: Zona Axial, ZS: Zona Surpirenaica, uspc: unidad surpirenaica central, CE: Cuenca del Ebro (modificado de Román-Berdiel y Santolaria Otín, 2012). Ver figura en color en la versión web.

Fig. 1.- Simplified geological map of the central sector of the South Pyrenean Zone with the situation of the study area (red box), the general cross-section (I-I') illustrated in figure 2A, and the main structures that characterize the area (1: Boltaña Anticline, 2: Buil Syncline, 3: Mediano Anticline, 4: Balzed Anticline, 5: Naval diapir 6: Clamosa diapir). We also show (inset) its location in the context of the Pyrenean Cordillera; CA: Aquitaine Basin, ZN: North Pyrenean Zone, ZA: Axial Zone, ZS: South Pyrenean Zone, uspc: central South Pyrenean unit, CE: Ebro Basin (modified from Román-Berdiel and Santolaria Otín, 2012). See color figure in the online version.

El registro sedimentario en la zona de estudio incluye: 1) Calizas de Boltaña-2, conformadas por calizas bioclásticas y arenosas de carácter marino, que afloran en la terminación periclinal del anticlinal de Boltaña (Samsó *et al.*, 2015). 2) Fm. San Vicente constituida por margas y lutitas, y la Unidad Guara inferior constituida por calizas margosas con gran abundancia de nummulites (Samsó *et al.*, 2015). 3) Unidad Guara Media-1, constituida por dos secuencias transgresivas-regresivas de facies carbonatadas de plataforma (Barnolas y Gil-Peña, 2001). 4) Facies transicionales del Mb. Paúles de la Fm. San Vicente constituidas por margas y calizas. 5) Las tres siguientes unidades, Margas de Arcusa, Areniscas y margas y, por último, Margas azules, arcillas ocres y capas de areniscas; constituyen la denominada Fm. Sobrarbe (De Federico, 1981). 6) Sedimentos de carácter fluvial conformados por la Fm. Escanilla, constituida por niveles de arcillas rojas con algunos canales conglomeráticos y arenosos intercalados.

## Metodología

Utilizando como base las cartografías de Puigdefábregas (1975) y Soto y Casas (2001), se ha realizado un análisis foto-geológico de la fracturación. El trabajo de campo consistió en la toma de datos de tipo estructural, que incluyen planos

de estratificación ( $S_0$ ), fallas y diaclasas. Esta información fue trasladada al sistema de información geográfica QGIS 3.20.3, plataforma que también se utilizó para la digitalización de la nueva cartografía geológica, a partir de la cual se realizaron dos cortes geológicos, uno en detalle y otro general (Fig.2). Además, se ha utilizado el software estadístico ImageJ para realizar un análisis de imagen y determinar y cuantificar las orientaciones dominantes de la fracturación y compararlas con los resultados obtenidos a partir de los datos medidos en campo. Para el análisis direccional de los datos se ha utilizado el software Stereonet 11.3.7.

## Resultados

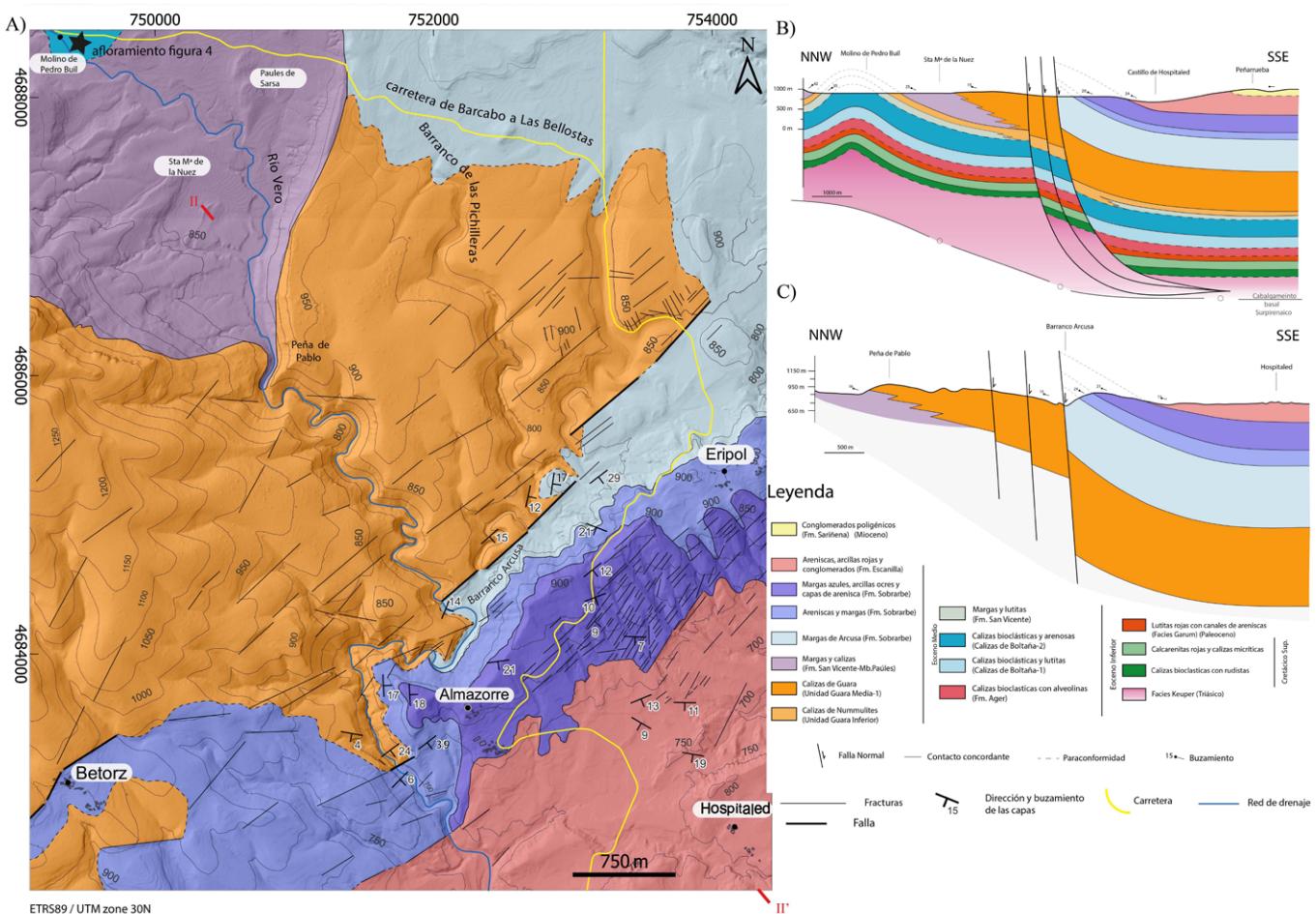
En la cartografía geológica realizada (Fig.2A) se pueden distinguir tres dominios litológicos: 1) el formado por las calizas de plataforma de Guara, 2) el conformado por la Fm. Sobrarbe y, 3) la Fm. Escanilla de carácter transicional. Los tres dominios presentan buzamientos entre 15°-20° al SE, y además están afectados por el mismo patrón de fracturación de dirección NE-SW. Por otro lado, la densidad de fracturación difiere, siendo menor en las margas de Arcusa y mayor en las margas azules, arcillas ocres y capas de areniscas de la Fm. Sobrarbe.

El corte geológico I-I' (Fig.2B) excede

los límites de la zona de estudio con el fin de caracterizar la estructura general de la zona de las Sierras Exteriores-Cuenca de Aínsa. En este se puede observar, de NNW a SSE, la terminación periclinal del anticlinal de Boltaña cuyo núcleo está formado por la unidad de las Calizas de Boltaña-2, que hacia el E presentan un buzamiento suave. Hacia el SSE, se dispone mediante paraconformidad la Fm. San Vicente. Sobre esta se encuentra de manera concordante la Unidad Guara inferior con buzamientos hacia el SE. En las inmediaciones de Sta M<sup>a</sup> de la Nuez se disponen concordantemente el Mb. Paúles de la Fm. San Vicente. Hacia el SE el Mb. Paúles pasa mediante un cambio lateral de facies a las calizas de la Unidad Guara Media-1. Estas presentan una potencia variable en ocasiones superior a los 1000 m con buzamiento al SE. En la zona central sobre las calizas de Guara se observan tres fallas principales de carácter normal con plano vertical en superficie, y quizás disminuyendo en profundidad. La falla más oriental genera un salto estratigráfico del orden de 750 m. En profundidad el plano de falla probablemente enraíza en un nivel de despegue (que consideramos situado en las facies Keuper del Triásico superior). En la zona SSE se observa un importante monoclinal que caracteriza la zona de estudio donde afloran las tres unidades de la Fm. Sobrarbe. Sobre esta última, continuando hacia el SE, se dispone de manera concordante la Fm. Escanilla.

El corte II-II' (Fig.2C), de orientación NNW-SSE, muestra con mayor detalle el monoclinal que caracteriza la estructura del área estudiada.

Se han cartografiado un total de 245 fracturas, dando un máximo de dirección de N040 a N050. Las familias con menor representación están en torno a N-S y 110 (Fig.3B, D). A partir de las 395 medidas de fracturas tomadas en campo (Fig.3A, C) también se observa que la familia dominante es la NE-SW con un rango de direcciones de 030 a 050. La segunda familia mejor representada es la familia de dirección 130 a 140 (NW-SE) y la tercera familia presenta un rango de direcciones de 170-010 (N-S). El análisis de imagen evidencia que las fracturas de dirección 080, 130 y 150 no se han cartografiado, pero si han sido reconocidas en campo con 49 medidas, lo que indica que su desarrollo es menor que el de la familia principal. Las fracturas de la familia dominante NE-SW se pueden dividir en dos subfamilias, una con buzamien-



**Fig. 2.- A) Cartografía geológica de la zona de estudio. B) Corte geológico general de la zona de estudio (ver localización I-I' en figura 1). C) Corte geológico en detalle de la zona de estudio (ver localización II-II' en figura 2A). Ver figura en color en la versión web.**

Fig. 2.- A) Geological map of the study area. B) General cross section of the study area (see location I-I' in figure 1). C) Cross section in detail of the study area (see location II-II' in figure 2A). See color figure in the online version.

tos de 70°-90° SE y la segunda presenta buzamientos de 60°-90° NW. La familia NW-SE, presenta buzamientos muy altos a subverticales hacia el SW, aunque se reconoce algún plano que presenta un buzamiento medio de 50° NE. La tercera familia N-S presenta un buzamiento medio de 70°W.

Los indicadores cinemáticos sobre las estructuras son muy escasos. En las inmediaciones del molino de Pedro Buil, en el límite norte de la zona de estudio (Fig.2A), se ha encontrado un afloramiento con varios sistemas de fallas afectando a las calizas bioclasticas y arenosas de la unidad de Calizas de Boltaña-2. Las fallas mejor definidas presentan direcciones N-S y NE-SW. Sobre las fallas de alto buzamiento de dirección N-S se reconocen estructuras S-C (Fig.4A) que han permitido calcular una dirección de movimiento (Fig.4B) dextro-normal de bajo cabecero. Las fallas con estriás tienen sentido de movimiento similar (Fig.4C), incluyendo planos de fuerte buzamiento y buzamiento intermedio hacia el SE.

## Discusión y conclusiones

En la zona de estudio la estratificación presenta buzamientos de entre 15°-20° S y SE, exceptuando afloramientos concretos donde se ha registrado un buzamiento de 39° asociado a una falla normal. Esta tendencia general es debida a que la zona de estudio se sitúa en las inmediaciones de la terminación periclinal del anticlinal de Boltaña. La cartografía de fracturas muestra una clara dominancia de la dirección NE-SW, tanto en extensión como en número. La toma de datos estructurales ha permitido dividir en dos familias esta dirección dominante. La tercera familia de fracturas presenta dirección NW-SE y buzamientos subverticales y la cuarta familia tiene una dirección N-S con buzamientos de 70°W. Este patrón de fracturas se ha registrado en la zona de estudio independientemente de la litología (calizas, margas, areniscas y conglomerados) y la edad de los materiales. A pesar de que en muchos casos no se ha podido determinar el sentido de movimiento de las fallas, se ha podido observar

un sistema conjugado con fallas N-S de fuerte componente dextra (cabeceros muy bajos) y una familia asociada de dirección NE-SW con componente normal. Una posible interpretación es que estas dos familias sean fallas conjugadas direccionales, al menos en su origen. De las dos familias, la aproximadamente N-S sería la dextra y la NE-SW la sinistra. Así la dirección de  $\sigma_1$  correspondiente estaría alrededor de 020 que coincide con la dirección de compresión en esta zona del Pirineo, como ya indicaron Martínez-Peña *et al.* (1995). Los indicadores cinemáticos encontrados en este trabajo son consistentes con esta dirección de compresión.

No obstante, el movimiento direccional de las fallas no explica el descenso de los bloques de falla hacia el SE que se observa de forma muy clara en los cortes presentados. Una de las posibles opciones para la generación de saltos de falla normales sería la existencia de un régimen transtensivo, compatible con los indicadores cinemáticos encontrados con movimiento dextro-normal y sinis-

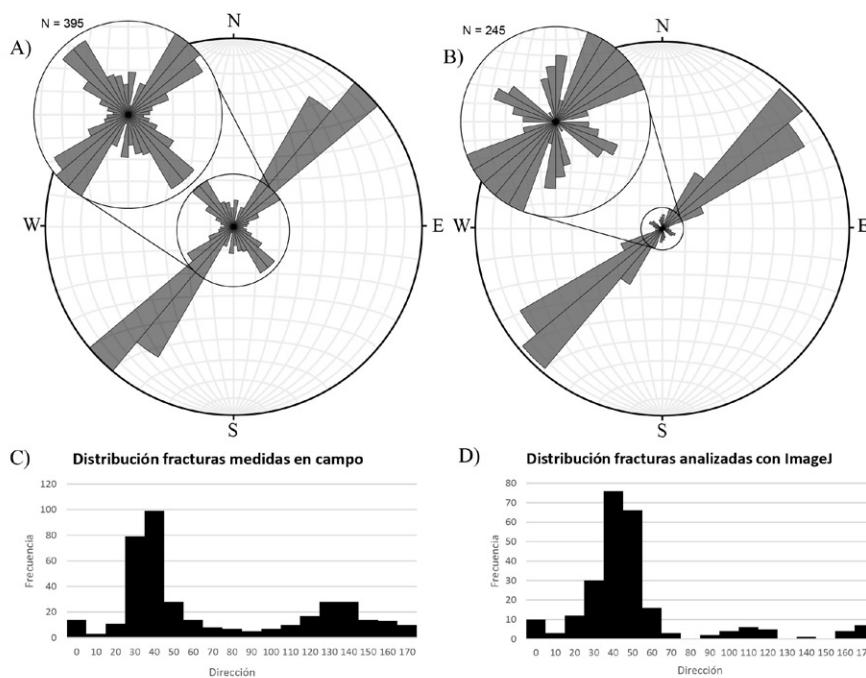


Fig. 3.- A) Diagrama en rosa de orientaciones de las fracturas/fallas medidas en campo. B) Diagrama en rosa de orientaciones de las fracturas/fallas cartografiadas en Qgis y analizadas con el software ImageJ. C) Distribución de frecuencia de direcciones de las fracturas/fallas medidas en campo. D) Distribución de frecuencias de las fracturas/fallas cartografiadas en QGIS y posteriormente analizadas con el software ImageJ.

Fig. 3.- A) Rose diagram of orientations of the fractures/faults measured in the field. B) Rose diagram of fracture/faults orientations mapped in Qgis and analyzed with ImageJ software. C) Frequency distribution of directions of fractures/faults measured in field. D) Frequency distribution of fractures/faults mapped in QGIS and subsequently analyzed with ImageJ software.

tro-normal. No obstante, en el caso de las observaciones sobre macroestructuras, no se observan fallas con salto normal conjugado que hagan descender los bloques situados al NW. Por ello, consideramos más plausible la existencia de dos etapas, una de formación de fallas de buzamiento alto con desplazamiento próximo a la horizontal y ligera componente normal, y un segundo movimiento

que produjera el descenso de los bloques orientales de las fallas. La reactivación de la familia de dirección NE-SW podría haber tenido lugar bajo un régimen extensional posterior. Sin embargo, teniendo en cuenta su cinemática, mencionada anteriormente, parece más plausible una reactivación ligada al movimiento de sales y lutitas del Triásico, ya que el diapiro de Naval (Santolaria, 2015) se encuentra

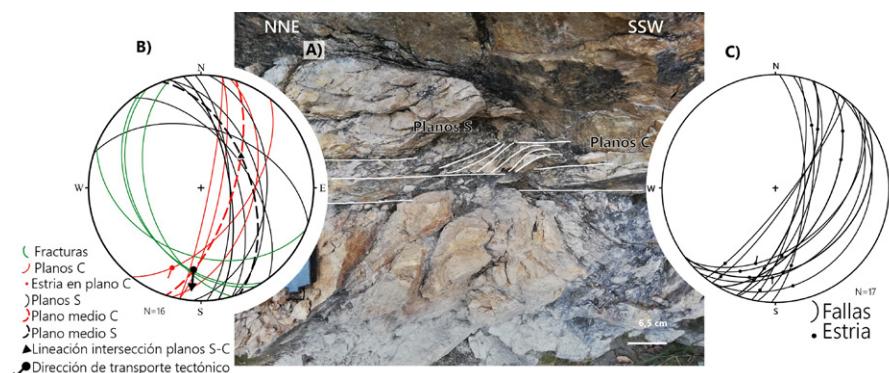


Fig. 4.- A) Fotografía interpretada de la zona de cizalla del Molino de Pedro Buil (ver situación en la figura 2) donde se observan estructuras S-C. B) Estereograma de las diferentes medidas en la zona de cizalla y cálculo de la dirección de transporte. C) Planos de falla con estrías medidas en el mismo afloramiento, sobre las calizas bioclásticas y arenosas (Calizas de Boltaña-2). Ver figura en color en la versión web.

Fig. 4.- Interpreted photograph of the shear zone of the Pedro Buil Mill (see location in figure 2) where S-C structures are observed. B) Stereogram of the different measurements in the shear zone and calculation of the transport direction. C) Fault planes with striations measured in the same outcrop, on the bioclastic and sandy limestones (Calizas de Boltaña-2). See color figure in the online version.

cerca de esta zona. La expulsión de material de la parte inferior podría haber dado lugar al hundimiento de los bloques que anteriormente habían sufrido un proceso de fracturación.

## Contribución de los autores

B.L.: Adquisición de datos, edición, figuras, investigación/análisis.

R.B. y C.S.: Estructura del trabajo, revisión del manuscrito, coordinación y supervisión.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto PID2019-108753GB-C22 de la Agencia Estatal de Investigación (AEI/10.13039/501100011033), y por el Gobierno de Aragón (E32\_20R: Grupo de Investigación Geotransfer).

Los autores agradecen los comentarios de los revisores y del editor.

## Referencias

- Barnolas, A. y Gil-Peña, I. (2001). *Boletín Geológico y Minero* 112 (3), 17-38.
- De Federico, A. (1981). *Publicaciones de Geología* n° 12. Univ. Autónoma de Barcelona, 245 p.
- Martínez-Peña, B., Casas-Sainz, A.M. y Millán-Garrido, H. (1995). *Journal of the Geological Society* 152(2), 353-364. <https://doi.org/b8289z>
- Mochales, T., Casas, A.M., Pueyo, E.L. y Barnolas, A. (2012). *Journal of Structural Geology* 35, 2-16. <https://doi.org/c2sh6g>
- Muñoz (2018). *Geológica Acta* 16, 4, 439-460. <https://doi.org/m75t>
- Puigdefábregas, C. (1975). *La sedimentación molásica en la cuenca de Jaca*. Pirineos 104, 188 p.
- Román-Berdiel, T. y Santolaria, P. (2012). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 20(3), 262-262.
- Samsó, J.M., Montes, M.J., Arbués, P. y Mateos, I. (2015). *Mapa Geológico de España. 1:50.000, n° 249 (Alquézar)* y memoria. IGME, Madrid, 59 p.
- Santolaria, P. (2015). *Tectónica salina y estructuras compresivas en el Pirineo centro meridional*. Tesis Doctoral, Univ. de Zaragoza.
- Santolaria, P., Mochales, T., Casas Sainz, A., y Soto Marín, R. (2015). *Geogaceta* 58, 87-90.
- Soto, R. y Casas, A.M. (2001). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 14, 199-211.