

¿Qué aporta la información magnética de las rocas sedimentarias e ígneas de la Zona Axial Pirenaica a su evolución cinemática?

What the magnetic information in sedimentary and igneous rocks tells us about the kinematics of the Pyrenean Axial Zone?

Belén Oliva-Urcia^{1*}, Emilio L. Pueyo Morer², Andrés Gil Imaz³, Inmaculada Gil Peña³, Stéphane Brusset⁴, Pierre Souquet⁵, José I. Valenzuela-Ríos⁶, Jau-Chyn Liao⁷

¹ Grupo GEOtransfer, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Instituto de Investigación en Ciencias Ambientales (IUCA), Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain, boliva@unizar.es, agil@unizar.es

² IGME, CSIC, Unidad de Zaragoza. 50059 Zaragoza. unaim@igme.es

³ IGME, CSIC. Ríos Rosas, 28003 Madrid. i.gil@igme.es

⁴ Géosciences-Environnement, Université Toulouse III-Paul Sabatier. 14 avenue E. Belin 31400 Toulouse. stephane.brusset@get.omp.eu

⁵ Geólogo consultor. 31400 Toulouse. pierresqt0931@orange.fr

⁶ Departamento de Geología, Universidad de Valencia. Jose.I.Valenzuela@uv.es

⁷ Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Universidad Complutense de Madrid. jaucliao@ucm.es

*Corresponding author

ABSTRACT

Paleomagnetic information is presented of the Devonian rocks of the Axial Zone in its western part (Aspe valley) and central part (around Laspaúles and Orri Dome), as well as Permian igneous rocks from the Anayet Massif, Triassic ophiolites and Mesozoic peridotites near the North Pyrenean Fault, and Upper Cretaceous rocks just South of the North Pyrenean Fault. Results suggest remagnetizations in the Devonian rocks. Samples in the basaltic sills of Anayet suggest the presence of a post-magnetization tilting because the paleomagnetic inclination is larger than expected. The results from ophiolites are quite homogeneous and show a paleomagnetic direction similar to the postfolding remagnetization described previously in the Internal Sierras. However, peridotites show a variable magnetization with different paleomagnetic directions. These results open local reconstructions of bedding at the time of remagnetization, when it is isochronous.

Key-words: Devonian, ophiolites, peridotites, Axial Zone, paleomagnetism.

RESUMEN

Se presenta información paleomagnética de las rocas devónicas de la Zona Axial en su parte occidental (valle del Aspe) y zona central (alrededor de Laspaúles y Domo de Orri), además de las rocas ígneas pérmicas del Macizo de Anayet, ofitas triásicas en la falla Norpirenaica y peridotitas mesozoicas, junto con dos estaciones en rocas del Cretácico superior localizadas justo al sur de la Falla Norpirenaica. Los resultados de las rocas del Devónico sugieren remagnetizaciones ocurridas posteriormente al tiempo de depósito. Las muestras de los sillós basálticos de Anayet sugieren la presencia de un basculamiento posterior a la magnetización pues la inclinación es mayor de la esperada. Los resultados de las ofitas son muy homogéneos y con una dirección paleomagnética similar a la remagnetización postpliegue que se ha documentado en las Sierras Interiores. Sin embargo, las peridotitas muestran una magnetización variable con diferentes direcciones paleomagnéticas. Estos resultados abren la posibilidad de reconstrucciones de la estratificación al momento de adquisición de la remagnetización.

Palabras clave: Devónico, ofitas, peridotitas, Zona Axial, paleomagnetismo.

Geogaceta, 77 (2025), 91-94

<https://doi.org/10.55407/geogaceta108695>

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

El obtener información sobre la magnetización primaria en rocas de la Zona Axial Pirenaica es un reto que es necesario abordar para comprender mejor la evolución cinemática de esta zona y su relación con el Macizo Ibérico. Se ha apuntado a que las intrusiones plutónicas durante la transtensión final Varisca (hace unos ~290-300 Ma) han producido remagnetizaciones en las rocas devónicas (Pastor-Galán *et al.*, 2021). Además, la extensión en el Mesozoico y el metamorfismo asociado han podido producir remagnetizaciones en rocas del Paleozoico, como ocurre en la zona norte de la Zona Axial (Izquierdo-Llavall *et al.*, 2020).

La Zona Axial Pirenaica en la que se ha muestreado constituye una zona con deformación "intermedia" del Orogéno Varisco, con metamorfismo de bajo grado, plutonismo tardío, vulcanismo y cinturones de pliegues y cabalgamientos (Carreras y Druget, 2014), por lo que se ha relacionado con la Zona Asturoccidental Leonesa o con la Zona Centro-Ibérica en algunas reconstrucciones (García-Sansegundo *et al.*, 2011; Simancas *et al.*, 2019). Además, la Zona Surpirenaica ha sido objeto de numerosos estudios paleomagnéticos y de fábricas magnéticas (Pocoví *et al.*, 2014 y referencias; Pueyo *et al.*, 2017). Estos datos aportan información sobre la evolución cinemática durante la Orogenia

Alpina. En concreto, es de destacar en la Zona Surpirenaica (Sierras Interiores) la presencia de una remagnetización postpliegue generalizada y portada por magnetita en rocas del Mesozoico (algo rotada en sentido horario) (Oliva-Urcia, 2004; Izquierdo-Llavall, 2014).

En este trabajo se presentan nuevos datos paleomagnéticos de 26 estaciones de rocas sedimentarias e ígneas del Paleozoico principalmente, con el objetivo de aportar la información sobre la magnetización primaria, o en su defecto, comprender lo que la información de la magnetización secundaria (remagnetización) permite deducir de la evolución de las rocas que hoy encontramos en la Zona Axial (y alrededores).

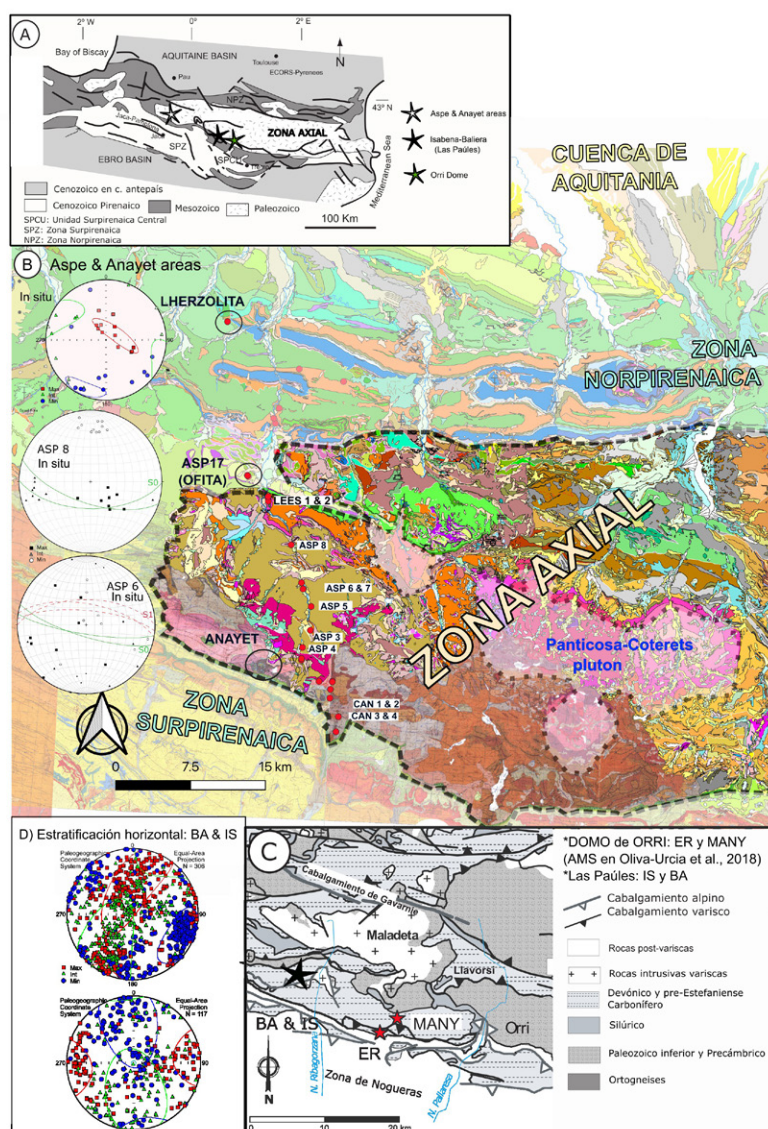


Fig. 1.- Localización de la zona de muestreo sobre el mapa geológico A) general del Pirineo ístmico, B) Valle del Aspe (BRGM, IGME), C) Zona del Domo de Orri (ER & MANY, Oliva-Urcia *et al.* (2018)) y de Laspaúles (BA & IS). Los materiales de la Zona Axial son Precámbricos y Paleozoicos. Los de las Zonas Norpirenaica y Surpirenaica son Mesozoico-Cenozoicos. Se presentan ejemplos de fábricas magnéticas del Devónico y de Iherzolitas en coordenadas geográficas (B), y con la estratificación corregida a la horizontal (D) con la estratificación corregida a la horizontal. Nótese la dispersión de los ejes en ASP 6, la verticalidad de la lineación magnética (eje kmax) en las Iherzolitas o la fábrica magnética "tectónica" variable en la zona de Laspaúles. Proyección estereográfica en hemisferio inferior. S_0 : plano de estratificación, S_1 : plano de foliación tectónica. Estudios previos de paleomagnetismo y de fábricas magnéticas en la cuenca de Mauléon (cuenca Cretácica marcada como Zona Norpirenaica en mapa B) se han publicado en Oliva-Urcia *et al.* (2010a) y (2010b). Estudios de fábricas magnéticas y de paleomagnetismo de las facies rojas en áreas de Anayet y Somport se han publicado en Gil *et al.*, (2002) y Oliva-Urcia *et al.* (2012). Ver figura en color en la Web.

Fig. 1.- Location of the sampling zone on the geological map A) general of the Pyrenees, B) Gave d'Aspe (BRGM, IGME), C) Orri Dome (ER & MANY) and Las Paules (BA & IS). Rocks in the Axial Zone are Precambrian and Paleozoic. Rocks in the North Pyrenean and South Pyrenean Zones are Mesozoic-Cenozoic in age. Some examples of the magnetic fabric are also shown from Devonian units and Iherzolites in B) in situ and in D) with bedding plane corrected to horizontal. Note the scattering of axes in ASP6, the high inclination of the magnetic lineation (kmax axes) in the Iherzolites or the different tectonic fabric seen in Las Paules zone. Stereographic projection in lower hemisphere. S_0 : bedding plane, S_1 : tectonic foliation. Previous paleomagnetic and magnetic fabric studies in the Mauléon basin (area marked as North Pyrenean Zone in map B) are published in Oliva-Urcia *et al.* (2010a) and (2010b). Magnetic fabrics and paleomagnetic studies of red beds in Anayet and Somport nearby areas are published in Gil *et al.*, (2002) and Oliva-Urcia *et al.* (2012). See coloured figure in the web.

Localización geológica y muestreo

La zona de muestreo principal se localiza al oeste de la Zona Axial, en el valle del Aspe (rocas sedimentarias principalmente

del Devono-Carbonífero) y en los alrededores de Anayet (Fig. 1), particularmente en los sills basálticos que aparecen intercalados entre las facies rojas del Pérmico del Macizo de Anayet (la fábrica magné-

tica de estas últimas se ha publicado en Gil *et al.*, 2002). Además, hay 4 puntos de muestreo en rocas devónicas, localizados en la parte centro-meridional de la Zona Axial (Laspaúles y Domo de Orri algo más al Este). Se cuenta además con los datos de ofitas localizadas en las facies del Keuper en la parte oeste de la falla Norpirenaica, en el Cretácico superior (muestras con siglas: LEES) y en las Iherzolitas (peridotitas) localizadas algo más al norte. El momento del emplazamiento de estas últimas también es objeto de controversia (Lagabriele y Bodinier, 2008).

Las unidades devónicas se relaciona con el margen norte de Gondwana, margen pasivo de plataforma continental. En la Zona de Las Paúles los estudios de conodontos han permitido datar con precisión estos afloramientos como Praguense-Emsiense inferior (Martínez-Pérez y Valenzuela-Ríos, 2014).

La extensión durante el Mesozoico permite el emplazamiento de rocas volcánicas y subvolcánicas, que aquí aparecen muestreadas en las ofitas (ASP17) y el depósito en plataforma somera del Cretácico Superior (LEES 1 y 2).

Metodología

Se han tomado muestras orientadas en campo, bloques y cilindros perforados con una perforadora de gasolina refrigerada con agua. Se han tomado datos de estratificación y foliación tectónica cuando ha sido posible. La desmagnetización por pasos, térmica y por campos alternos se ha llevado a cabo en los laboratorios de paleomagnetismo de las Universidades de Michigan, Burgos y Barcelona-CSIC (GEO3BCN), utilizando: magnetómetro criogénico 2G, horno Schonsted y desmagnetizador AF acoplado al criogénico. Se han realizado curvas termomagnéticas de muestras seleccionadas en el susceptómetro KLY3 de la Universidad de Zaragoza, y la balanza de Curie en la Universidad de Burgos. En total, se han desmagnetizado 26 estaciones con 5 a 19 muestras estándar por estación.

Resultados

Los resultados paleomagnéticos de las estaciones de la Tabla I aparecen resumidos en la Fig. 2.

Se observa un comportamiento paleomagnético diferente dada la variabilidad del tipo de roca. En los sills basálticos, tal y como señala Gil *et al.* (2002) hay presencia de magnetita y hematites como se constata en las temperaturas de des-

	Estación	Long WGS84	Lat WGS84	Litología	Edad (Fm)	Dirección S0	Dip	DD
Gave d'Aspe	ASP03	-0.54991	42.84624	Calizas y pizarras	Devono-Carbonífero	114	65	N (o)
Gave d'Aspe	ASP04	-0.55875	42.83051	calizas	Devono-Carbonífero	128	71	N
Gave d'Aspe	ASP05	-0.55029	42.86766	calizas	Devono-Carbonífero	108	85	N
Gave d'Aspe S	ASP06	-0.56118	42.88309	calizas	Devono-Carbonífero	107	76	S
Urdo ant.	ASP07	-0.56342	42.88871	calizas	Devono-Carbonífero	77	50	N
Gave d'Aspe N	ASP08	-0.57821	42.9224	calizas	Devono-Carbonífero	108	65	S
Urdo ant.								
Gave d'Aspe. S ant.								
Canfranc	CAN1-Rioseta	-0.51105	42.76965	calizas	Devónico N limb	153	19	NE
Canfranc	CAN2-Rioseta	-0.51105	42.76965	calizas	Devónico S limb	57	69	SE
Canfranc	CAN-3	-0.51307	42.75594	calizas	Devónico	42	60	S
Canfranc	CAN-4	-0.47339	42.76197	calizas	Devónico	137	45	N
Lees-Athas	LEES-1	-0.60957	42.96398	calizas	Cretácico Superior	120	85	N
Lees-Athas	LEES-2	-0.60855	42.96064	calizas	Cretácico Superior	120	88	N
Orri dome	ER1	31T 322573	4699114	calizas	Devónico Inferior (Fm Rueda)	170	37	W
Orri dome	ER2	31T 322518	4699113	calizas	Devónico Inferior (Fm Rueda)	175	21	W (o)
Orri dome	MANY1	31T 327055	4701693	calizas	Devónico Inferior (Fm Rueda)	62	88	S
Orri dome	MANY2	31T 327055	4701693	calizas	Devónico Inferior (Fm Rueda)	32	24	S(o)
Laspaúles	IS	0.593953	42.50937	calizas	Devónico Inferior	175	85	E
Laspaúles	BAL	0.659288	42.52879	calizas	Devónico Inferior	100	55	N (o)
Gave d'Aspe	ASP17	-0.63545	42.98278	Ofita	Ladiniense-Rhaetiense (Keuper)	-	-	-
Gave d'Aspe	PER	-0.66563	43.1181	Peridotita	Mesozoico	-	-	-
Sill-Aoavet.	AA2	-0.42674	42.76708	sill basáltico	Pérmico	95	80	N
Sill-Aoavet.	AM1	-0.42614	42.76984	sill basáltico	Pérmico	120	10	N
Sill-Aoavet.	CH1	-0.41801	42.76739	sill basáltico	Pérmico	140	41	S
Sill-Aoavet.	JA1	-0.41655	42.76607	sill basáltico	Pérmico	155	30	S
Sill-Aoavet.	JB1	-0.41587	42.75959	sill basáltico	Pérmico	86	14	N
Sill-Aoavet.	JB2	-0.41964	42.76569	sill basáltico	Pérmico	40	15	W

Tabla I.- Estaciones analizadas, localización, tipo de roca, edad, datos de estratificación, donde (o) indica plano invertido. DD: sentido de buzamiento. El fondo gris en el nombre de la estación marca pares de estaciones que forman un pliegue a escala métrica-decamétrica. Ver tabla en color en la Web.

Table I.- Analyzed sites, location, rock type, age, bedding data where (o) means overturned. DD: Dip Direction. Grey background in the site marks pairs of sites belonging to the same metric-decametric fold See table with colours in the web.

bloqueo finales, que pueden variar entre 580° y 620° C. Aunque se puede calcular una componente estable en la mayoría de las muestras, esta componente no se agrupa salvo en la mitad de las estaciones (AA2, JB2 y AM1) y es en dos de ellas donde se podría considerar primaria ya que es la de más alta temperatura que se dirige al origen (JB2, AM1) y se agrupan tanto in situ como con la estratificación corregida a la horizontal (Fig. 3.A). Las ofitas presentan una dirección muy homogénea en todas las muestras, con una temperatura de desbloqueo de 540° C posiblemente debida a magnetita, y con una media robusta que se agrupa in situ. La dirección media calculada (Dec, Inc: 193, -44, $\alpha_{95} = 7$) es muy similar a la componente paleomagnética remagnetizada que se encuentra en las Sierra Interiores. Por el contrario, las peridotitas analizadas muestran un comportamiento muy diferente, con una temperatura de desbloqueo muy baja (360° – 430° C) y una variabilidad que se traduce en una media con una dispersión alta (Dec, Inc: 264, -51 $\alpha_{95} = 45.6$).

Las rocas sedimentarias devónicas por lo general no presentan un buen agrupamiento de las direcciones paleomagnéticas por estación. El agrupamiento se da en 8 estaciones (del total de 16, es decir, el 50%). Tampoco se ha podido obtener una media fiable en ninguna de las estaciones muestreadas del Cretácico Superior.

Lo que se observa al comparar los datos de las estaciones in situ con los datos con la estratificación corregida a la horizontal es que en el valle del Aspe hay tres estaciones donde las direcciones paleomagnéticas se agrupan relativamente entre sí, una vez corregida la estratificación (CAN2, CAN1 y ASP6), Fig. 3.B. En ASP6 la componente calculada no se dirige al origen y se ha utilizado la intersección de círculos mayores. ASP3LT es la componente de baja temperatura (se desbloquea entre 300° y 360° C) que tiene significado estadístico para la estación. Por otro lado, es significativo ver que las direcciones de las muestras de rocas del Devónico del Pirineo Central se agrupan mejor por estación antes de corregir la estratificación, sugiriendo que la componente es una remagnetización Fig. 3.C. Si la remagnetización ha ocurrido en un mismo momento, se puede utilizar para restituir los movimientos relativos de las rocas durante las deformaciones Varisca/Alpina. Por otro lado, la remagnetización puede ser diacrónica. En cualquier caso, las componentes calculadas han tenido que tener una orientación hacia el norte-negativo o hacia el sur-positivo (en el Devónico, Iberia se localiza a unos 25° en el hemisferio sur), y en la actualidad aparecen rotadas, sugiriendo modificaciones fuera de plano durante la deformación que hayan experimentado.

Sin embargo, es interesante tener en cuenta que el Devónico es un periodo de tiempo donde el campo magnético terrestre ha sido débil a muy débil, y quizá no dipolar (van der Boon *et al.*, 2022; Hawkins *et al.*, 2019), por lo que las asunciones de dirección esperable han podido no darse.

Conclusiones

El estudio paleomagnético realizado en las rocas de edad devónica de la Zona Axial sugiere el desarrollo de remagnetizaciones, principalmente en la zona central -Domo de Orri y zona de Las Paúles-. En la parte occidental (Aspe y Anayet) parece que se ha preservado una componente que se agrupa relativamente mejor cuando la estratificación es corregida a la horizontal. Las ofitas registran una componente estable mientras que las peridotitas no. Los sills basálticos parecen indicar una componente primaria basculada.

Contribución de los autores

Oliva-Urcia: trabajo de campo, laboratorio, análisis, discusión y redacción. Pueyo Morer, Brusset, Souquet, Gil Imaz, Gil Peña: trabajo de campo, discusión y revisión de texto. Valenzuela Ríos y Liao trabajo de campo y revisión. A.M. Casas Sainz no puede figurar como autor, pero ha realizado trabajo de campo, discusión y revisión de texto.

Agradecimientos

Gracias a las personas de los laboratorios de paleomagnetismo de la Universidad de Michigan, Burgos y Barcelona (GEO3BCN) y al Laboratorio de Fábricas Magnéticas de la Universidad de Zaragoza por la facilidad en el uso del laboratorio y discusiones. Gracias a todos los gigantes que han estudiado y estudian la Geología Pirenaica. Investigación financiada por el Gobierno de Aragón (E32_23R: Grupo *GEOtransfer. Investigación para la Ciencia y la Sociedad*).

Referencias

- Carreras, J., y Druguet, E. (2014). *Geological Society, London, Special Publications*, 405(1), 249-264. <https://doi.org/10.1144/SP405.7>
- García-Sansegundo, J., Poblet, J., Alonso, J. L., & Clariana, P. (2011). *Geological Society, London, Special Publications*, 349(1), 169-184.
- Gil, A., Lago, M., Galé, C., Pocoví, A., y

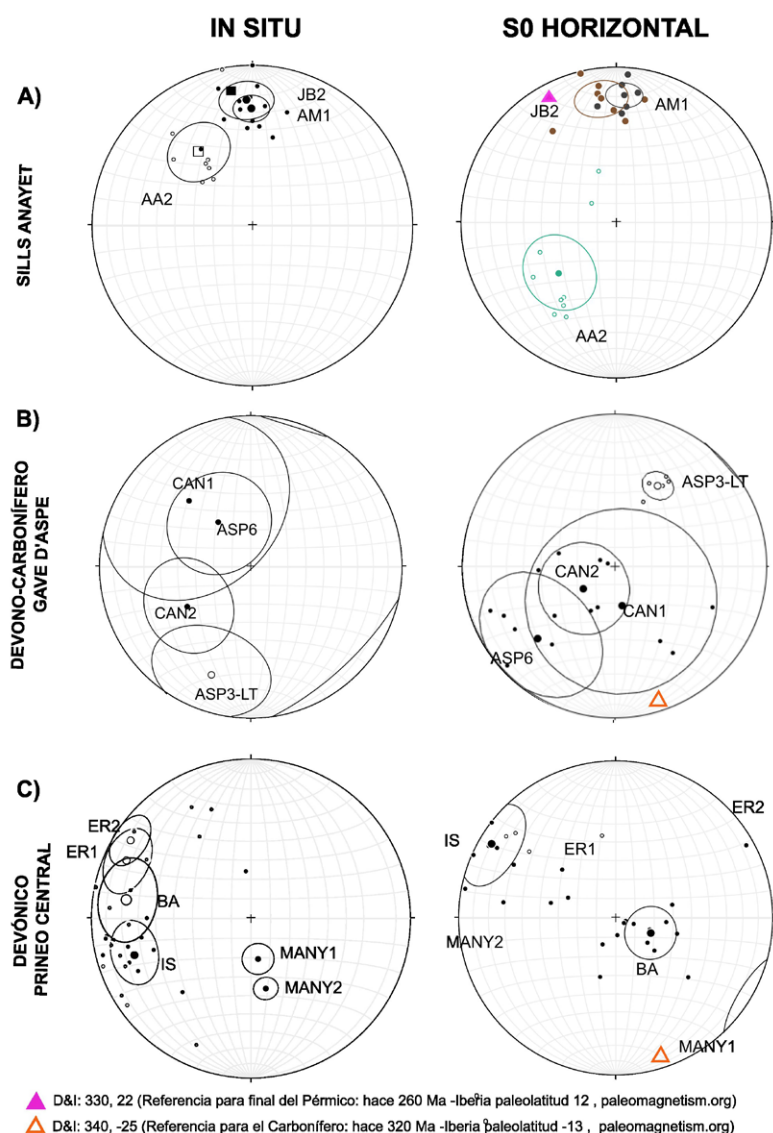


Fig. 2.- Proyección estereográfica de las muestras agrupadas por estación, en coordenadas geográficas (in situ) y con la estratificación corregida a la horizontal. Se representan las muestras que se agrupan en una dirección de manera significativa. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Stereographic projection of the samples grouped by sites, in geographic coordinates (in situ) and with bedding corrected to horizontal. See coloured figure in the web.

Arranz, E. (2002). *Tectonophysics*, 350(1), 1-15.
[doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00078-1)
 Hawkins, L. M. A., Anwar, T., Shcherbakova, V. V., Biggin, A. J., Kravchinsky, V. A., Shatsillo, A. V., & Pavlov, V. E. (2019). *Earth and Planetary Science Letters*, 506, 134-145.
doi.org/10.1016/j.epsl.2018.10.035
 Izquierdo-Llavall, E. (2014). *Variaciones*

longitudinales en la estructura de la zona axial pirenaica: aportaciones de la fábrica magnética, el paleomagnetismo, la paleotermometría y la modelización analógica. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza.
 Izquierdo-Llavall, E., A. Menant, Ch. Aubourg, JP. Callot, G. Hoareau, P. Camps, E. Péré, & A. Lahfid. (2020.), *Tectonics* 39, no. 7: e2019TC005719.

Lagabriele, Y., y Bodinier, J. L. (2008). *Terra Nova*, 20(1), 11-21.

doi.org/10.1111/j.1365-3121.2007.00781.x
 Martínez-Pérez, C., Valenzuela-Ríos, J. I., Navas-Parejo, P., Liao, J. C., & Botella, H. (2011). *Journal of Iberian Geology*, 37(1), 45-64.

Oliva-Urcia, B. (2014). *Geometría y cinemática rotacional en las Sierras Interiores y Zona Axial (sector de Bielsa) a partir del análisis estructural y paleomagnético*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. 290pp.

Oliva-Urcia, B., Casas, A. M., Pueyo, E. L., Román-Berdiel, T., y Geissman, J. W. (2010a). *Tectonophysics*, 494(3-4), 165-179.

Oliva-Urcia, B., Roman-Berdiel, T., Casas, A. M., Pueyo, E. L., y Osacar, C. (2010b). *Journal of Structural Geology*, 32(3), 362-376.

Oliva-Urcia, B., Pueyo, E. L., Larrasoana, J. C., Casas, A. M., Román-Berdiel, T., Van der Voo, R., y Scholger, R. (2012). *Tectonophysics*, 522, 158-175.

Oliva-Urcia, B., Gil-Peña, I., Soto, R., Samsó, J. M., Antolín, B., y Pueyo, E. L. (2018). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 62, 291-322.

Pastor-Galán, D., Groenhof, O., Pueyo, E. L., Izquierdo-Llavall, E., Dinarès-Turell, J., y Dekkers, M. J. (2021). *Geophysical Journal International*, 227, (2), 849-874.

<https://doi.org/10.1093/gji/ggab244>
 Pocoví-Juan, A., Anchuela, O. P., Pueyo, E. L., Casas-Sainz, A. M., Berdiel, M. R., Imaz, A. G., ... y Villalain, J. J. (2014). *Tectonophysics*, 629, 303-318.

doi.org/10.1016/j.tecto.2014.03.027

Pueyo, E. L., García-Lasanta, C., López, M. A., Oliván, C., Miguel, G. S., Gil-Garbi, H., y Lange, O. (2017). Metodología para el desarrollo de la BBDD paleomagnética de Iberia (EPOS-DDSS Iberian Paleomagnetism). In *MAGIBER X*. (pp. 94-99).

Simancas, J. F. (2019). Variscan cycle. *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach: Volume 2: The Variscan Cycle*, 1-25.

van der Boon, A., Biggin, A. J., Thallner, D., Hounslow, M. W., Bono, R., Nawrocki, J., y Da Silva, A. C. (2022). *Earth-Science Reviews*, 231, 104073.

doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104073