

2008

II Seminario del  
Geoparque de  
Sobrarbe

Investigación Geológica  
y Recursos Didácticos.  
**BOLTAÑA**



**[EL PALEOMAGNETISMO:  
FUNDAMENTO, MÉTODOS Y  
APLICACIONES AL ESTUDIO DE LA  
CEDENA PIRENAICA]**

24,25 y 26 de octubre de 2008

# EL PALEOMAGNETISMO: FUNDAMENTO, MÉTODOS Y APLICACIONES AL ESTUDIO DE LA CADENA PIRENAICA

Emilio L. Pueyo  
Instituto Geológico y Minero de España. Geología y Geofísica del Subsuelo  
Oficina de Proyectos de Zaragoza. C/ Manuel Lasala 44, 50006 ([unaim@igme.es](mailto:unaim@igme.es))

## Fundamento y método

El Paleomagnetismo es el estudio del campo magnético Terrestre registrado por las rocas en el momento de su formación o durante procesos geológicos relevantes acaecidos con posterioridad (p.e. metamorfismo). Se basa en tres suposiciones básicas: a) *Dipolo geocéntrico axial*: El campo magnético terrestre se asemeja al producido por un dipolo geocéntrico paralelo al eje de rotación de la Tierra (al menos el promedio en un tiempo considerado), de tal forma que los polos paleomagnéticos calculados en un área determinada coincidirán con los del eje de rotación. b) *Registro del campo magnético primario*: Los minerales ferromagnéticos contenidos en las rocas son capaces de registrar el campo magnético terrestre del pasado. c) *Registro invariable en el tiempo*: La magnetización adquirida por una roca en el momento de su formación puede permanecer invariable en el tiempo (Butler, 1992; Tauxe, 1998; McElhinny & McFadden, 2000).

El análisis paleomagnético incluye una serie de herramientas internas de control para verificar que estos supuestos se cumplen en una zona de estudio (Van der Voo, 1993; Opdyke & Channell, 1996). Se puede demostrar, o asumir razonablemente, que durante el muestreo se ha promediado la variación secular (efecto de la componente no dipolar del campo). Por medio de las pruebas de estabilidad (pliegue, conglomerado, inversión, contacto) se puede comprobar si el campo magnético registrado por las rocas se adquirió en el momento del depósito (o en un tiempo inmediatamente posterior; diagénesis temprana) o con posterioridad y si, al menos una porción de dicha magnetización, ha permanecido invariable en el tiempo.

En la actualidad las técnicas de laboratorio, apoyadas en instrumentación superconductora, permiten establecer con precisión la orientación, polaridad e intensidad de dicho registro en casi cualquier tipo de roca y así obtener información muy valiosa de dos naturalezas diferentes: 1) Geocronológica: La secuencia de cambios de polaridad magnética, es una referencia planetaria de gran precisión ( $\approx$  diez mil años) que permite la datación de secuencias estratigráficas locales. 2) Paleo-orientación de cuerpos geológicos: La desviación de la orientación del campo magnético registrado en las rocas respecto a la referencia esperable permite la reconstrucción de los procesos de deformación a diferentes escalas.

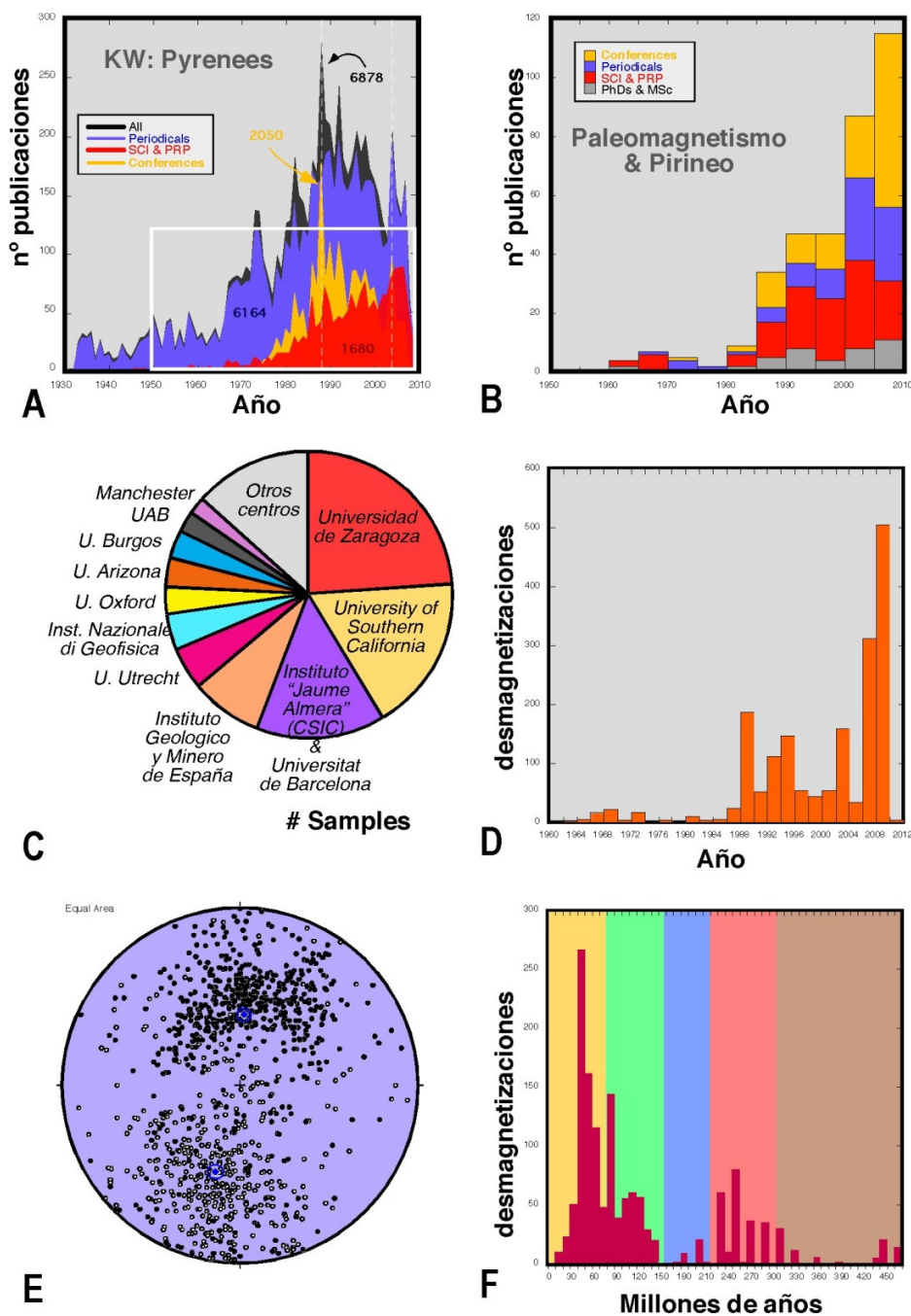
Respecto a esta segunda aplicación, el paleomagnetismo es una de las piedras angulares sobre la que se apoya la tectónica de placas ya que permite demostrar los movimientos relativos entre placas así como validar la expansión del suelo oceánico. Su aplicación no sólo se ha centrado en cuestiones geodinámicas globales, ya que su versatilidad le ha permitido adaptarse a otras escalas menores. Cuando se ha reconocido la dirección del campo magnético primario de una roca de una determinada edad en una posición "estable" (no deformada) de una placa, cualquier desviación de este valor que se determine en otra posición "no estable" (zona de deformación) de la misma placa será una rotación de eje vertical y podrá ser interpretada en su contexto geológico local. Esta es la ventaja del paleomagnetismo frente a otros métodos, la de tener una referencia original conocida, lo cual permite abordar de manera absoluta el problema de la caracterización de rotaciones, difícilmente reconocibles con precisión por el análisis estructural clásico. La aplicación del paleomagnetismo a la caracterización de rotaciones en sistemas de pliegues y cabalgamientos tiene sus inicios en los años 60 en los trabajos de Norris y Black (1961) en las Rocas canadienses, si bien estos trabajos pioneros pasaron desapercibidos hasta el final de los 70 y fue sobre todo en los 80 cuando la metodología paleomagnética se comenzó a aplicar en muchos cinturones orogénicos. Un estudio paleomagnético, ya sea para caracterizar rotaciones (o con fines magnetoestratigráficos) debería constar de las siguientes etapas (McCaig y McClelland (1992):

- 1) Selección del área (o sección) de estudio y definición realista de objetivos.
- 2) Diseño de la malla (o espaciado) de muestreo.
- 3) Muestreo en campo (extracción de muestras de roca orientadas).
- 4) Demagnetización progresiva y detallada de las muestras en el laboratorio.
- 5) Caracterización de las componentes estables de magnetización (análisis de mineralogía magnética, cálculo de las direcciones de la magnetización remanente)
- 6) Caracterización estadística de la estación (o perfil) y comparación entre estaciones (y perfiles).  
Realización de pruebas de estabilidad (test de inversión, pliegue, etc...)
- 7) Evaluación de la calidad (credibilidad y resolución) de la información e interpretación de los datos.

## Aplicaciones en la cadena Pirenica

El Pirineo, desde el punto geológico, representa una cadena de montañas excepcional en contraste con otras zonas del planeta. Esto es debido a su simplicidad relativa ya que, si se consideran otras zonas orogénicas generadas durante la convergencia Euroasiático-Africana, es la que menor acortamiento ha acomodado. También han jugado un papel destacado su pequeña escala y accesibilidad, su alto grado de preservación y sus excepcionales condiciones de afloramiento. Todas estas condiciones han justificado el desarrollo de cientos de tesis doctorales y numerosos trabajos de investigación llevados a cabo por diversas universidades, centros de investigación y empresas de todo el mundo (ver compilaciones recientes de Capote et al., 2002 y Barnolas y Pujalte, 2004). El interés en la investigación Pirenaica ha aumentado de forma continua (Fig. 1a) desde los años 60 hasta nuestros días según se deduce del número creciente de artículos científicos en revistas arbitradas (*peer reviewed & SCI*).

El paleomagnetismo se ha aplicado profusamente en el Pirineo (Fig. 1b) desde los trabajos pioneros de la Universidad de Utrecht en los años 60 (Van der Lingen, 1960) hasta la actualidad. Los excelentes afloramientos de series sintectónicas han sido objeto de numerosos estudios magnetoestratigráficos, además las abundantes estructuras oblicuas de la vertiente Sur han concentrado una considerable actividad investigadora con el fin de adquirir valores de rotación de eje vertical. El creciente interés en el paleomagnetismo pirenaico (Fig. 1b y 1d) también queda de manifiesto en las 35 tesis doctorales (siete de ellas actualmente en curso) y los más de 350 artículos científicos y comunicaciones en congresos (más de 100 del *SCI*) realizados por más de 35 grupos de investigación de todo el mundo (Fig. 1c): universidades de Arizona (USA), Aston-Birmingham (USA), Barcelona, Autónoma de Barcelona, Bergen (Noruega), Burgos, Cambridge (UK), Carleton College (USA), Languedoc (Francia) Leeds (UK), Leigh (USA), Michigan (USA), Minnesota (USA), München (Alemania), Newcastle upon Tyne (UK), Oxford (UK), Euskal Herriko Unibersitatea, Paris (Francia), Princeton (USA), Rennes (Francia), Rovira I Virgili, Southern California (USA), Strasbourg (France), Utrecht (Holanda), Zaragoza (Spain), Zürich (Suiza), así como el Instituto de Ciencias de la Tierra “Jaume Almera” (CSIC), Instituto Geológico y Minero de España, Servei Geològic de Catalunya, Istituto Nazionale di Geofisica (Italia), Institut de Physique du Globe de Paris (Francia) y de Strasbourg (Francia), Institute of Solid Earth Physics (Noruega), Los Alamos National Laboratory (USA), Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézetnek (Hungary) y Schlumberger.



**Figura 1:** A) Búsqueda bibliográfica en *Georef*, estrategia basada en *keyword*: "Pyrenees". Los máximos coinciden con el Simposio de Béticas y Pirineos (1988) y la reunión del AAPG de Barcelona. El rectángulo blanco representa la extensión de la figura 1B. B) Evolución de las publicaciones sobre paleomagnetismo del Pirineo durante los últimos 50 años en la que se aprecia una significativa tendencia creciente. C) Distribución de las muestras desmagnetizadas según centro de investigación. D) Evolución histórica del número de desmagnetizaciones donde queda patente el alto grado de actividad actual. E) Proyección estereográfica de más de 1500 medias paleomagnéticas distribuidas por toda la cadena donde se observa que, a pesar de no haber rotaciones promedio significativas, las magnitudes de rotación locales pueden alcanzar valores destacados tanto en sentido horario como antihorario. F) Distribución de las estaciones y perfiles paleomagnéticos en función de su edad geológica media.

La aportación de los más de 140 perfiles magnetoestratigráficos (más de 75 kilómetros de series analizadas y más de 9.000 muestras desmagnetizadas) para precisar la geocronología pirenaica se ha centrado fundamentalmente en las secuencias terciarias, y especialmente en los materiales sintectónicos y en los depósitos de antepaís de la Cuenca del Ebro. De hecho, y salvo el interés suscitado por algunos tránsitos estratigráficos distintivos (K/T, Paleoceno/Eoceno), la mayor parte de los perfiles se han localizado en el intervalo Eoceno-Oligoceno (momento crítico en la configuración de la cuenca surpirenaica) y, en menor medida, durante el Mioceno inferior, ambos periodos de gran actividad tectónica en la cadena.

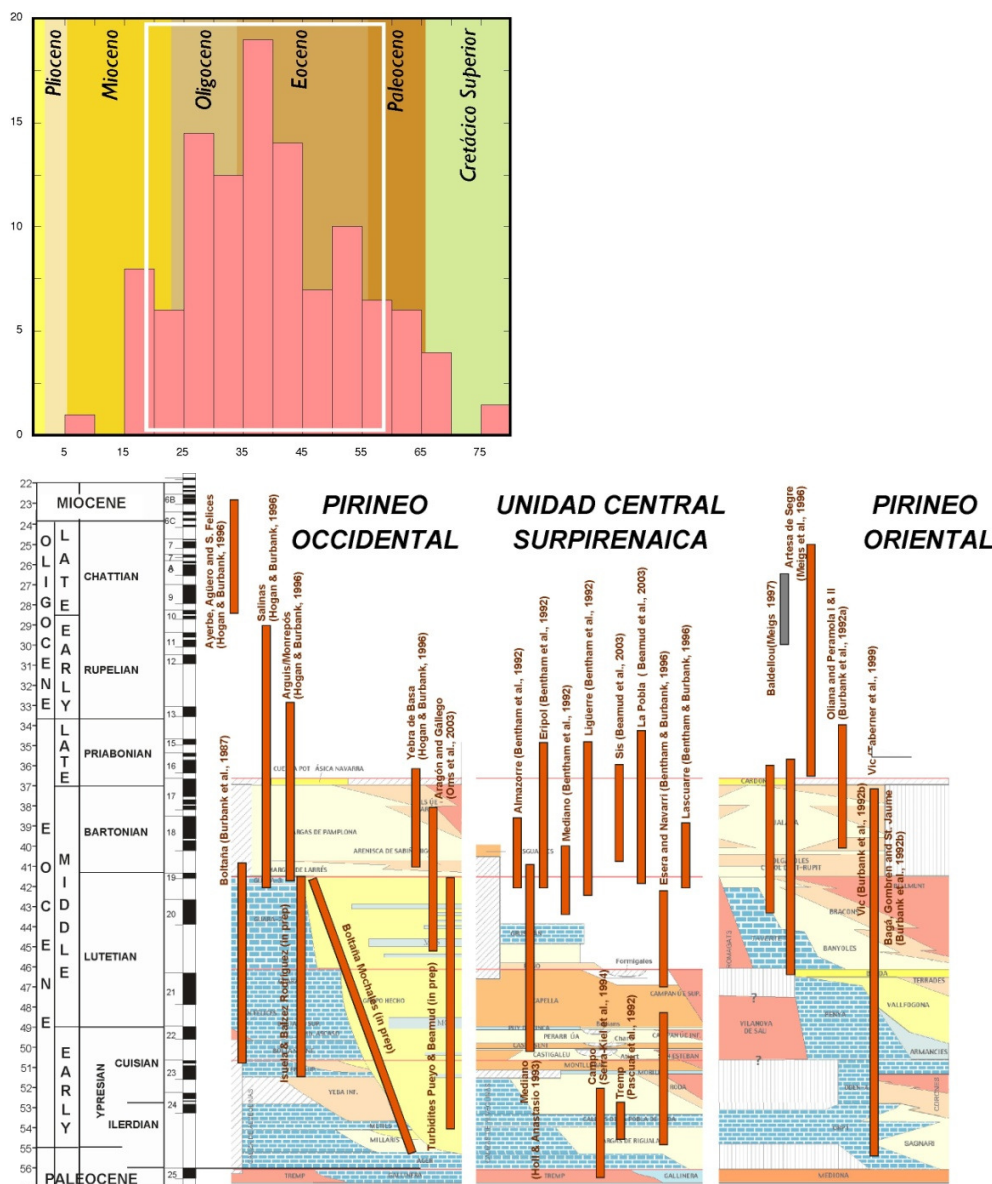


Figura 2: A) Número de perfiles magnetoestratigráficos en función del tiempo geológico. B) Estratigrafía de la cuenca surpirenaica eocena (Barnolas y Gil, 2001) en el que se han localizado las posiciones de los perfiles agnetoestratigráficos en las distintas unidades y su correlación con la escala de tiempo de polaridad magnética (Cande y Kent, 1995).

Todo ello ha permitido obtener un marco cronológico excepcional, especialmente en lo referente a la datación de sedimentos sintectónicos de la zona surpirenaica y de la Cuenca Eocena en particular (Fig. 2). En esta última, la edad de la casi la totalidad de las formaciones estratigráficas han sido precisadas por métodos paleomagnéticos, marco que ha permitido establecer correlaciones absolutas a escala cuenca y conocer con mayor detalle los procesos de deformación.

La geometría de las cuencas mesozoicas, la paleogeografía de los niveles de despegue de los cabalgamientos, el diacronismo de la deformación, los gradientes laterales de acortamiento, etc... han condicionado la geometría oblicua de numerosas estructuras pirenaicas que han sido investigadas con métodos paleomagnéticos con el fin de caracterizar las rotaciones de eje vertical (Figs. 1e y 3). Actualmente existen más de 1500 puntos de control de la rotación (sin incluir los perfiles magnetoestratigráficos) distribuidos en casi todas las unidades estructurales de la cadena (>11.000 desmagnetizaciones) si bien, su distribución no es homogénea y refleja más el interés suscitado por ciertas unidades o estructuras (Fig. 3a). El Pirineo Central ha centrado más de un tercio de las investigaciones desde los años 90 continuando en la actualidad con una gran actividad investigadora (cuencas de Jaca y Aínsa especialmente). Casi los otros dos tercios se reparten entre la cuenca del Ebro, los Pirineos orientales y los Pirineos occidentales (hasta la estructuras cantábricas). La alta densidad de información del Pirineo Central, en la que la combinación de estudios de rotación y magnetoestratigráficos, ha permitido no sólo caracterizar las magnitudes de rotación sino también su edad y su relación con otros procesos de deformación (plegamiento y deslizamiento de cabalgamientos). Todo este conjunto de información va a permitir a corto plazo desarrollar métodos de restitución 3D de las estructuras basados en la información paleomagnética.

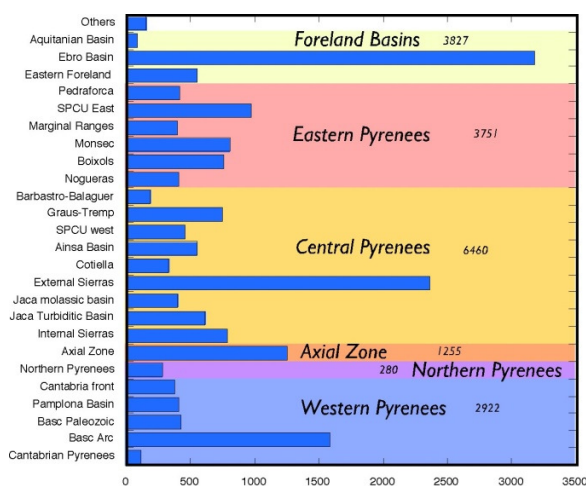
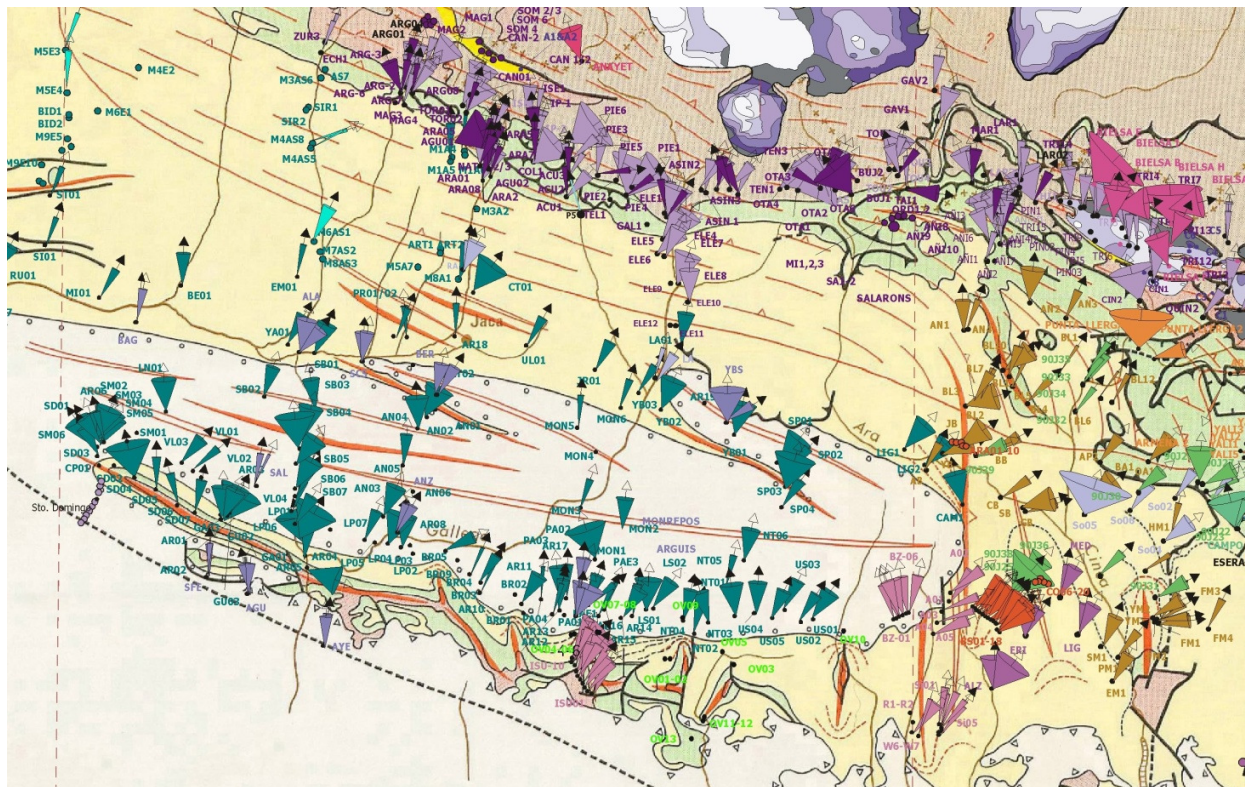


Figura 3: A) Distribución de las estaciones paleomagnéticas por unidades estructurales.



**Figura 3 B)** Base de datos paleomagnéticos del Pirineo (López et al., 2008), detalle del Pirineo Central. Cartografía geológica de Choukroune y Seguret (1973). La orientación del eje de los conos representa la rotación respecto a la dirección norte esperada, el ángulo apical representa el error asociado ( $a_{95}$  de Fisher, 1953) a cada punto de medida.

### Agradecimientos

Trabajo financiado por los proyectos: Geokin3D-Pir (CTPR04/2005 de la INTERREG IIIb-CTP, UE), Pmag3Drest (CGL-2006-2289-BTE del MEC) del ChronoPyr (IGME I+D 346) y de un contrato de investigación del programa “Ramón y Cajal” (MEC).



## Referencias

- Barnolas, A. y Gil-Peña, I.** (2001).- Ejemplos de relleno sedimentario multiepisódico en una cuenca de antepaís fragmentada: La Cuenca Surpirenaica. *Boletín Geológico y Minero*, 112 (3), 17-38.
- Barnolas, A. y V. Pujalte (Eds.)**. 2004. Capítulo 3: La Cordillera Pirenaica. En: *Geología de España*, J.A. Vera, Ed. principal (SGE, IGME eds). 231-343.
- Butler, R. F.**, 1992. *Paleomagnetism: From Magnetic Domains to Geologic Terranes*, Blackwell, 319 p.
- Cande, S. C. y Kent, D. V.**, 1995. Revised calibrations of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research*, 100 (B10). 6093-6095.
- Capote, R.; Muñoz, J.A.; Simón, J.L.; Liesa, C.L., Arlegui, L.E.** (2002). Alpine Tectonics I: the Alpine system north of the Betic Cordillera. In: Gibbons, W. & Moreno, T, (eds.) *The Geology of Spain*. Geological Society, London, 367-400.
- Choukroune, P. and Séguret, M.**, 1973, Carte structurale des Pyrénées, 1/500.000, Université de Montpellier – ELF Aquitaine.
- Fisher, R. A.**, 1953. Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society*, A217, 295 - 305.
- López, M. A.; C. Oliván, B. Oliva, E. L. Pueyo and the GeoKin3DPyr working.** Pyrenean Paleomagnetic databases. *Geotemas*, 10, 1219-1222. 2008.
- McElhinny, M. W. & McFadden, P. L.**, 2000. *Paleomagnetism, continents and Oceans*. Academic Press, International geophysics series, vol. 73, 386 pp.
- McCaig, A. M. y McClelland, E.**, 1992. Palaeomagnetic techniques applied to thrust belts. In: *Thrust Tectonics*, (Ed. by K.R. McClay), pp. 209-216, Chapman y Hall Eds., London. 447 pp.
- Norris, D.K.; Black, R.F.**, 1961. Application of palaeomagnetism to thrust mechanics. *Nature (London)*. 192; 4806, Pages 933-935.
- Opdyke, N. D. y Channell, J. E. T.**, 1996. *Magnetic Stratigraphy*. International Geophysics series, vol. 64. Academic Press.
- Tauxe, L.**, 1998. *Paleomagnetic principles and practice*. Modern Approaches in Geophysics, vol 17. Kluwer Academic Publications, London.
- Van der Lingen, G. J.**, 1960. *Geology of the Spanish Pyrenees, north of Canfranc, Huesca province*. (PhD Thesis, University of Utrecht). *Estudios Geológicos*. Inst. Invest. Geol. "Lucas Mallada", Madrid, 16, 205-242.
- Van der Voo, R.**, 1993. *Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys, and Iapetus oceans* Cambridge University Press, 411pp.