

SIGNIFICADO DE LA FÁBRICA MAGNÉTICA DE ALGUNAS ROCAS SEDIMENTARIAS DE LAS UNIDADES SUDPIRENAICAS

J.Dinarès-Turell (1,2), E.McClelland (1) y P.Santanach (2)

(1) Department of Earth Sciences, University of Oxford, Parks Rd., Oxford OX1 3PR, (REINO UNIDO)

(2) Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia, Universitat de Barcelona, Zona Universitaria de Pedralbes, 08028 BARCELONA

RESUMEN

En el presente trabajo se estudia la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) en varias localidades del margen sudpirenaico. En rocas no deformadas la fábrica magnética se interpreta como una fábrica sedimentaria que presenta una foliación paralela a la estratificación y los ejes k_{max} agrupados en una dirección preferente que representa la dirección de la paleocorriente. En rocas deformadas el elipsoide asociado a la ASM puede asemejar al elipsoide de deformación atendiendo al grado de deformación y a la relación angular entre fábrica tectónica y fábrica sedimentaria previa. Se evalúa también la importancia de la contribución de la fase dia-paramagnética en la fábrica magnética en rocas con baja susceptibilidad media.

Palabras clave: Anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM), paleocorriente, deformación, Pirineos.

ABSTRACT

The magnetic susceptibility anisotropy of several deformed and weakly to non-deformed rocks from the southern Pyrenees has been studied. Shape and orientation of the susceptibility anisotropy ellipsoid from non-deformed rocks is related to a sedimentary fabric with magnetic foliation parallel to bedding and magnetic lineation (k_{max} axes) mostly parallel to the flow direction. This is demonstrated by consistency with standard sedimentological palaeoflow determinations in a detritic unit from the Oliana area. The magnetic fabric from some deformed rocks enables the time relationship between the magnetic fabric generation and folding to be determined. In one instance principal directions of the magnitude ellipsoid of susceptibility show orientations consistent with the kinematic fold axes. Another example shows a tectonic fabric which postdates folding. A third case allows the kinematic interpretation of "joint" development to be made. The interference of tectonic and sedimentary fabrics in weakly deformed rocks is evaluated. Moreover, the importance of the paramagnetic phase contribution to the magnetic fabric in rocks with low bulk susceptibility (K) is also considered.

Key words: anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), palaeocurrent, strain, Pyrenees.

Dinarès-Turell, J., McClelland, E. y Santanach, P. (1991): Significado de la fábrica magnética de algunas rocas sedimentarias del margen sudpirenaico. *Rev. Soc. Geol. España*, 4: 179-186.

Dinarès-Turell, J., McClelland, E. and Santanach, P. (1991): Magnetic fabric significance of several sedimentary rocks from the southern Pyrenees. *Rev. Soc. Geol. España*, 4: 179-186.

1. INTRODUCCIÓN

La susceptibilidad magnética es una propiedad física de los minerales que forman las rocas y representa la respuesta o capacidad de éstas a ser magnetizadas bajo un campo magnético determinado. Normalmente se distinguen los minerales ferromagnéticos, responsables de la magnetización remanente natural (MRN), de los minerales no ferromagnéticos que se incluyen en el término "matriz" debido a que generalmente constituyen la casi totalidad de la roca. Generalmente, para un

campo magnético bajo (<100 Oe), la susceptibilidad magnética de la "matriz" es despreciable en comparación con la de los minerales ferromagnéticos.

La anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) puede ser descrita como un tensor simétrico de segundo orden al cual puede asociarse un elipsoide definido por las orientaciones de las susceptibilidades principales k_{max} , k_{int} y k_{min} . Se ha probado que este elipsoide se puede corresponder con la orientación de las fábricas sedimentaria, magmática o tectónica de las rocas (Hamilton y Rees, 1970; Hroudá y Stranik, 1985;

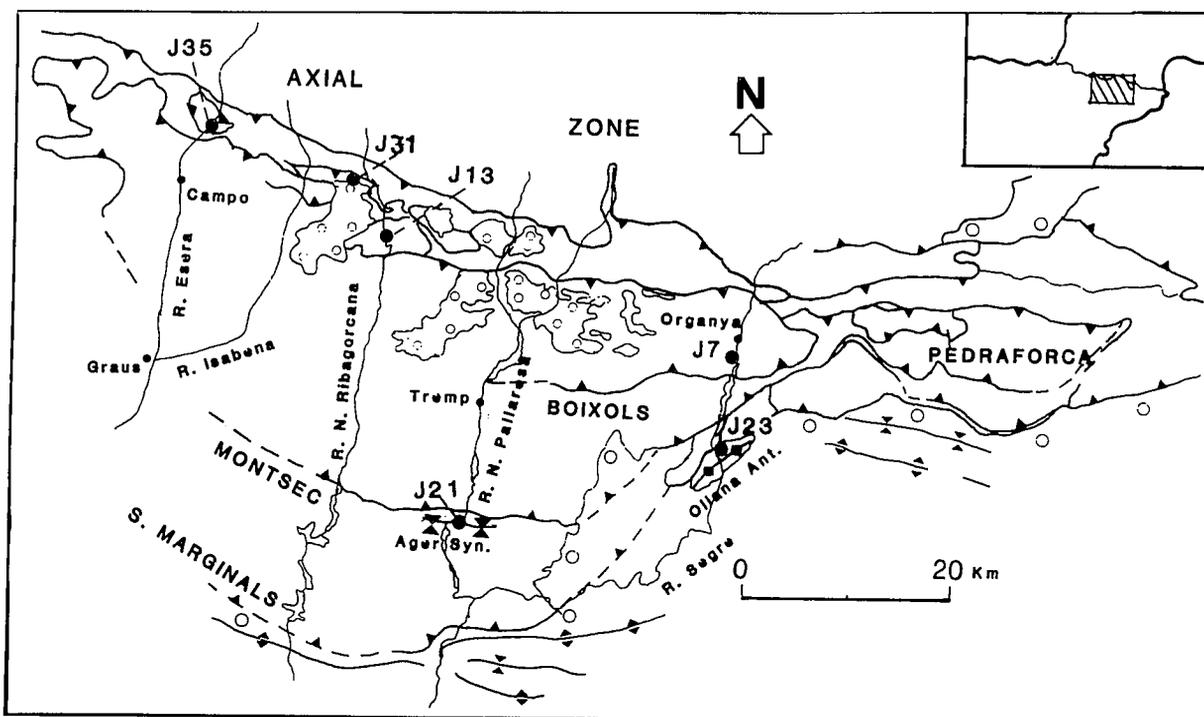


Fig. 1.-Mapa estructural con situación de las estaciones estudiadas.
Fig. 1.-Structural location map of the studied sites.

Lowrie y Hirt, 1987; Parés, 1988; Hrouda y Lanza, 1989; etc.). En el caso de rocas deformadas, las susceptibilidades principales a menudo se corresponden con las direcciones principales de la deformación determinadas a partir de marcadores convencionales y por tanto el elipsoide de susceptibilidad magnética es coaxial con el elipsoide de deformación finita (Rathore, 1979; Borradaile, 1988). En este caso k_{\min} coincide generalmente con el eje de deformación Z y k_{\max} y k_{int} pueden corresponder indistintamente a X o Y, excepto en los casos de las llamadas fábricas magnéticas inversas (Rochette, 1988; Ihmlé *et al.*, 1989) en la que Z coincide con k_{\max} . También se ha demostrado una relación entre la forma de ambos elipsoides (Kligfield *et al.*, 1981; Rathore y Henry, 1982; Borradaile, 1987; Borradaile y Alford, 1987; etc.). Como consecuencia de ello la medida de la ASM se ha convertido en una técnica alternativa en el estudio y cuantificación de la deformación de rocas. Además, el análisis de la fábrica magnética es una técnica no destructiva y está siendo de gran aceptación entre geólogos estructurales y sedimentólogos.

En esta nota se estudian algunos ejemplos de fábricas magnéticas de rocas que presentan diversos grados y estilos de deformación. Los ejemplos son de rocas de composición diferente pertenecientes a láminas cabalgantes de la unidad Sudpirenaica Central (fig. 1).

2. LA FÁBRICA MAGNÉTICA

La ASM de especímenes cilíndricos (2.5 x 2.5 cm) obtenidos de diversas muestras perforadas y orientadas en el campo ha sido medida en un instrumento MINI-

SEP (Molspin Ltd.). La orientación y forma del elipsoide de susceptibilidad magnética quedan definidas por los ejes principales k_{\max} , k_{int} y k_{\min} . Cuando $k_{\max} \approx k_{\text{int}} \gg k_{\min}$ el elipsoide tiene forma aplastada y la fábrica magnética define una foliación magnética con k_{\min} perpendicular a ésta (definida por el plano que contiene k_{\max} y k_{int}). En el caso en que $k_{\max} \gg k_{\text{int}}$ el elipsoide es de tipo alargado y se habla de lineación magnética. Existen diversos parámetros, propuestos por diferentes autores, que, relacionando de diversas maneras las susceptibilidades principales, pretenden caracterizar algún aspecto del elipsoide. En este trabajo utilizamos las razones axiales de las susceptibilidades principales donde $P1 = k_{\max}/k_{\text{int}}$ (expresa el grado de linealidad (L) de una fábrica magnética); $P3 = k_{\text{int}}/k_{\min}$ (expresa el grado de foliación (F)); $P2 = k_{\max}/k_{\min}$ (grado de anisotropía (A)) y $E = P1/P2$ (elipticidad), (Hrouda, 1982). Los valores de estos parámetros correspondientes a las muestras consideradas en este trabajo están representados en forma de porcentajes en la tabla 1. Las razones P1 y P3 son comparables a las relaciones axiales del elipsoide de deformación $a = X/Y$ y $b = Y/Z$ respectivamente, donde $X \geq Y \geq Z$ corresponden a la vez a los ejes mayor, intermedio y menor de la deformación. De modo similar pues podemos utilizar los parámetros P1 y P3 en un diagrama parecido al utilizado por Flinn (1962) para las relaciones axiales del elipsoide de deformación.

2.1. Fábricas sedimentarias

El estudio de la fábrica magnética en rocas sedi-

Site	%L	%A	%F	E	K ($\times 10^{-6}$ SI)
J7	1.9	6.5	4.5	1.0280	120
J23	1.2	7.0	5.7	1.0600	202
J35	6.1	8.1	1.9	1.0200	137
J21	3.2	5.9	2.5	0.9940	134
J13	7.8	14.6	6.8	0.9970	38
J31	2.3	4.0	1.6	0.9941	181

Tabla 1: Relación de la media para cada estación de los parámetros del elipsoide de la susceptibilidad magnética y de la susceptibilidad media (K). Los porcentajes se definen como %L = $(P_1-1) \times 100$; %A = $(P_2-1) \times 100$ and %F = $(P_3-1) \times 100$.

Table 1: Mean magnetic anisotropy parameters and bulk susceptibility (K) for each site. Percentages are defined as %L = $(P_1-1) \times 100$; %A = $(P_2-1) \times 100$ and %F = $(P_3-1) \times 100$.

mentarias no deformadas ha mostrado que la susceptibilidad magnética de éstas se caracteriza por un elipsoide aplastado ("oblate") con la foliación magnética, o plano definido por las susceptibilidades principales k_{int} y k_{min} , coincidente o ligeramente oblicuo respecto al plano de la estratificación (Hamilton, 1963; Graham, 1966; Hroudá y Janak, 1971). Este tipo de fábrica magnética se suele atribuir a procesos deposicionales o a la compactación. Cuando se observa una cierta lineación (k_{max} agrupado en una dirección preferente), generalmente se considera como resultado de corrientes deposicionales. Existen trabajos que han reproducido fábricas sedimentarias en símiles de laboratorio (Hamilton *et al.*, 1968; Rees y Woodall, 1975). El grado de anisotropía de las fábricas sedimentarias no deformadas es generalmente bastante bajo pero no exclusivo de este tipo ya que algunas rocas deformadas pueden al-

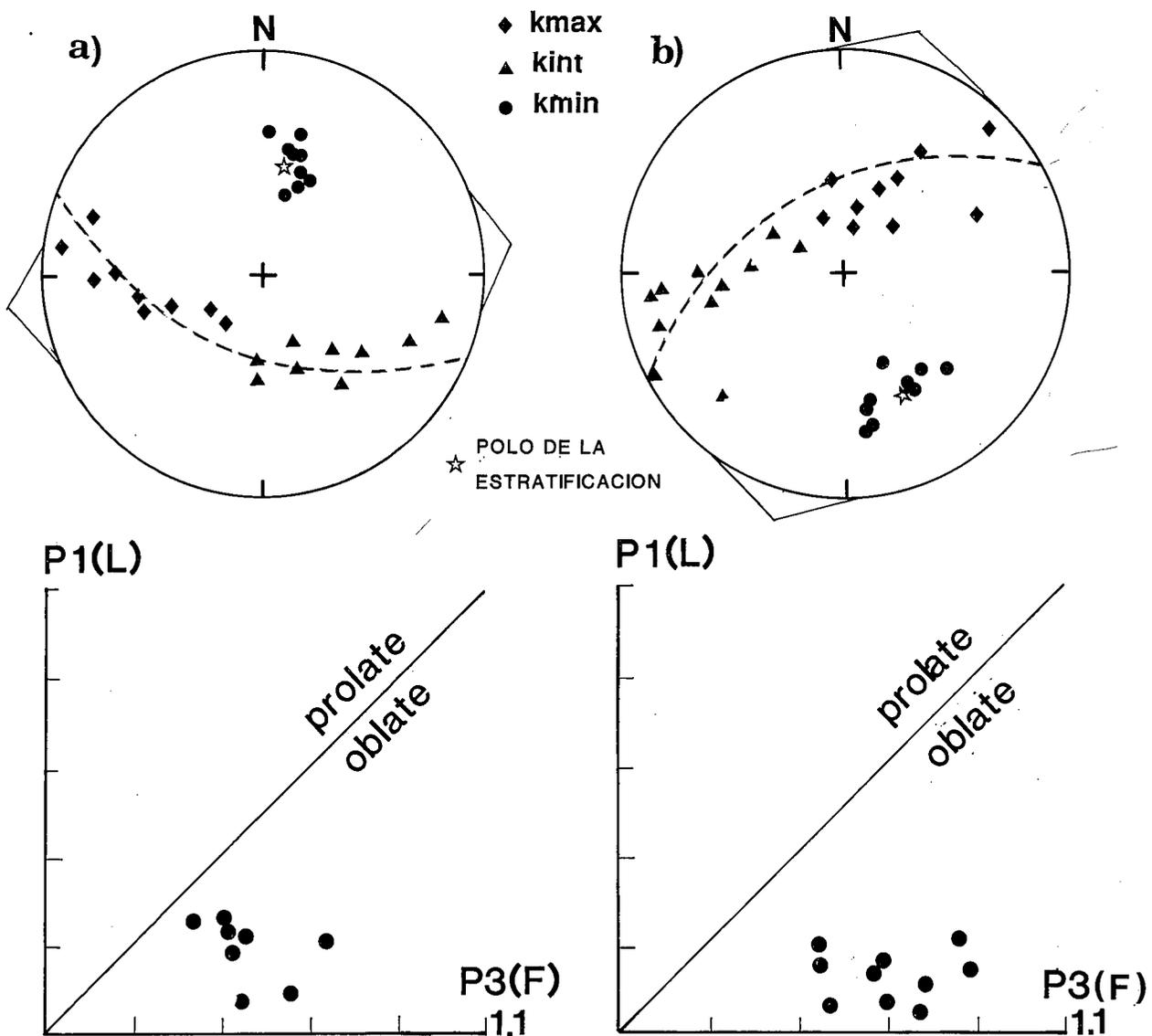


Fig. 2.-Proyecciones estereográficas *in-situ* de las direcciones principales de la susceptibilidad magnética y del diagrama de Flinn correspondiente (Flinn, 1962) de las estaciones J7 y J23: (a) estación J7 en margas del Cretácico inferior al S de Organyà, valle del río Segre (Unidad de Bóixols); (b) areniscas del Eoceno en el anticlinal de Oliana (estación J23). El círculo mayor en traza discontinua representa el plano de estratificación y los triángulos fuera de proyección, la dirección media de k_{max} una vez restituida la estratificación a la horizontal.

Fig. 2.-*In-situ* stereographic projections of principal susceptibility directions and Flinn diagram (Flinn, 1962) of: (a) lower Cretaceous marls (site J7) located S of Organyà, Segre valley (Bóixols Unit); (b) Eocene sandstones from the Oliana anticline (site J23). Dashed great circle represents bedding plane. Mean tilt-corrected k_{max} direction is shown by triangles out of projection. Fig.

canzar valores similares (Borradaile y Tarling, 1981).

En la fig. 2 se representan dos ejemplos típicos de fábricas sedimentarias (estaciones J7 y J23). En ambas se observa como los diversos k_{min} están agrupados alrededor del polo de la estratificación para cada caso, mientras que, k_{int} y k_{max} están distribuidos sobre el plano de estratificación tendiendo a orientarse según una dirección preferente. Del diagrama de Flinn asociado a cada caso y de los valores listados en la tabla 1 se observa como el porcentaje del grado de foliación domina sobre el de la lineación. Esta es una característica típica de las fábricas sedimentarias que contrasta con el resto de los casos presentados más adelante. En la fig. 2, además, se ha representado para cada caso la dirección media fisheriana de los k_{max} calculada una vez

restituidas las capas a la horizontal. Esta dirección es la que se estima pueda reflejar la dirección de la paleocorriente.

El caso de la fig 2b corresponde a areniscas del Eoceno (estación J23) situadas en el flanco noroccidental del anticlinal de Oliana (fig. 1), localizado en la parte frontal de la terminación oriental del cabalgamiento del Montsec. En el área de Oliana, Vergés y Muñoz (1990) han postulado una secuencia de cabalgamiento de tipo "break-back", coetánea con un sistema imbricado hacia el antepaís. La secuencia "break-back" se deduce por las relaciones entre cabalgamientos y sus depósitos sinorogénicos correspondientes. Estos depósitos sinorogénicos se subdividen en 4 unidades cada una de las cuales descansa de manera discordante sobre la unidad

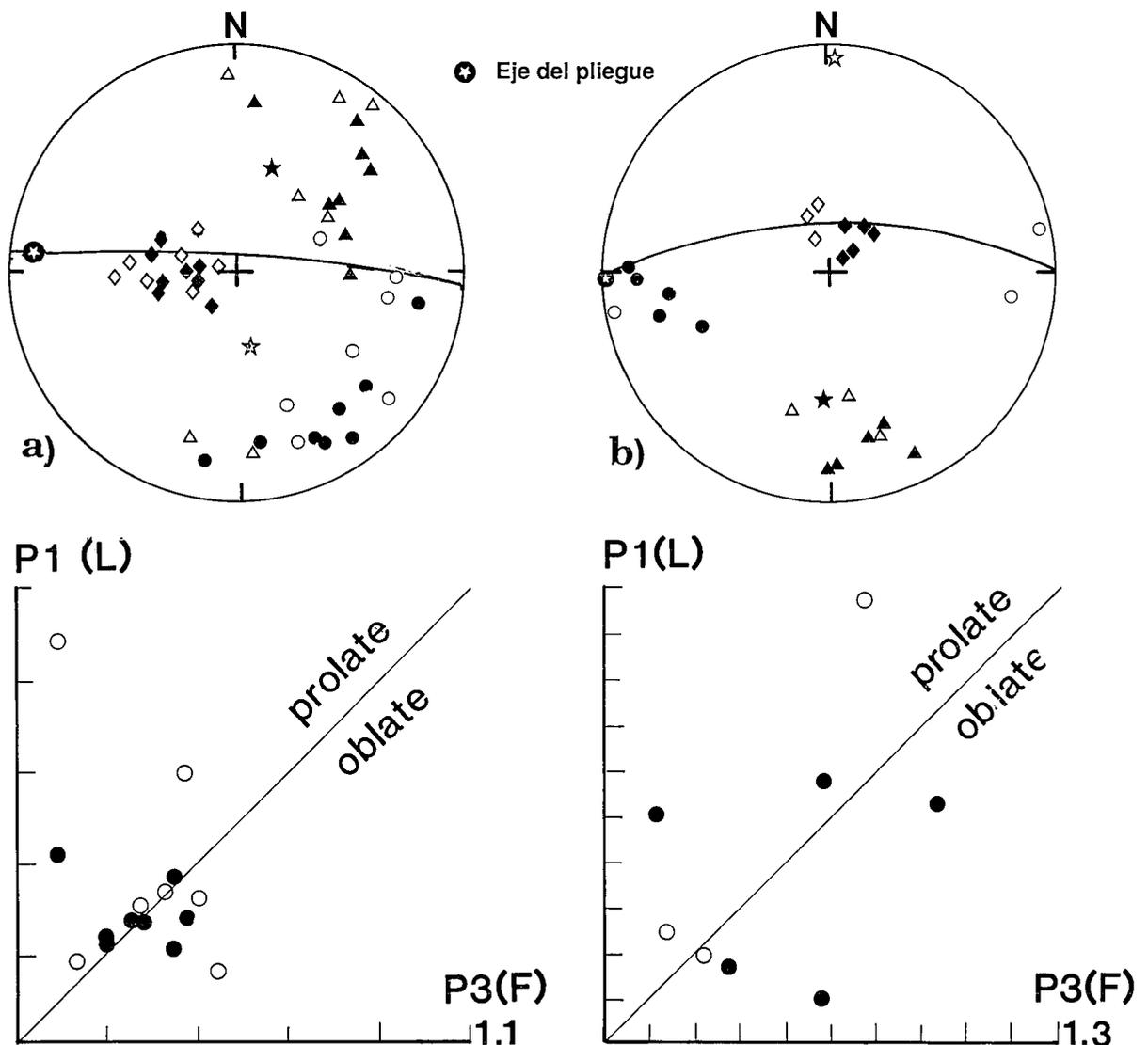


Fig. 3.-Proyecciones estereográficas *in-situ* de las direcciones principales de la susceptibilidad magnética y del diagrama de Flinn correspondiente (Flinn, 1962) de las estaciones J21 y J13. Símbolos iguales a fig.2. (a) Areniscas deltaicas del Eoceno en el sinclinal de Ager (estación J21). Los símbolos rellenos y vacíos corresponden a los flancos sur y norte del pliegue respectivamente. (b) Calizas margosas del Cretácico superior al N de Sopeira, valle del río Noguera Pallaresa, (estación J13). Los símbolos rellenos y vacíos corresponden a los flancos norte y sur del pliegue respectivamente. El círculo mayor en ambas proyecciones representa el plano axial del pliegue.

Fig. 3.-*In-situ* stereographic projections of principal susceptibility directions and Flinn diagram (Flinn, 1962) of: (a) Eocene deltaic sandstones from the Ager syncline (site J21). Full (open) symbols show data from the northern (southern) limb; (b) upper Cretaceous marly-limestones north of Sopeira, Noguera Pallaresa valley (site J13). Full (open) symbols show data from the southern (northern) limb. Both fold axial plane and fold axis are shown in each example.

anterior y a la vez es truncada por un cabalgamiento más interno. Este tipo de relaciones sugirió a los autores mencionados un crecimineto sincrónico del anticlinal de Oliana con la secuencia "break-back". El propio anticlinal representa una estructura formada por el apilamiento de "horses" sobre el cabalgamiento basal y por tanto acomoda la deformación del antepaís. El afloramiento que nosotros estudiamos corresponde a la parte basal de la unidad detrítica inferior. Estimaciones de paleocorrientes en las unidades detríticas mencionadas (Vergés, com. per.) muestran una clara coherencia con la dirección NNE-SSW estimada a partir de la lineación magnética y al mismo tiempo con el dispositivo estructural esbozado anteriormente (anticlinal de Oliana, orientado NE-SW).

2.2. Fábricas tectónicas

En la fig. 3 están representadas las fábricas magnéticas asociadas a dos pliegues de escala métrica. El caso representado en la fig. 3a corresponde a areniscas deltaicas de edad eocena que afloran en el sinclinal de Ager (estación J21). Esta estructura se localiza en la parte frontal del cabalgamiento del Montsec (fig. 1). Se trata de un pliegue formado por flexo-deslizamiento (*flexural-slip*) como indican las estrías que se encuentran sobre las superficies de estratificación, las cuales son perpendiculares a la charnela. En la fig. 3a se observa como la distribución de las direcciones de las susceptibilidades principales k_{max} , k_{int} y k_{min} es la misma en ambos flancos del pliegue antes de cualquier corrección estructural (proyección *in-situ*). Este hecho demuestra como la fábrica magnética ha tenido que originarse en un estadio tardío o posterior al plegamiento. Se observa también como la orientación de k_{max} está prácticamente incluida en el plano axial del pliegue y forma un ángulo de unos 70° con el eje del mismo. No existe ninguna relación entre la distribución de los k_{min} y los polos de la estratificación asociados a cada flanco. En el diagrama de Flinn de la fig. 3a se observa que los elipsoides se proyectan en el límite "oblate-prolate", dado que el grado de linearidad es sólo ligeramente superior al grado de foliación (tabla 1). El porcentaje del grado de anisotropía (5.9) es relativamente bajo.

Teniendo en cuenta la geometría del pliegue y su cinemática, el hecho de que el ángulo entre el eje del pliegue y la orientación de k_{max} sea de 70° y no de 90° , así como el poco desarrollo de la fábrica magnética (susceptibilidad casi isotrópica), permite suponer que esta fábrica sea el resultado de la superposición de una fábrica tectónica débil sobre una fábrica sedimentaria preexistente.

En general, para la interpretación de fábricas magnéticas tectónicas, cuyos ejes no coinciden con los del elipsoide de deformación, es de suma importancia la existencia de fábricas sedimentarias previas. Obviamente la relación espacial y magnitud de los elipsoides asociados a cada fábrica habrá de controlar la fábrica final. La importancia de este tipo de interferencias entre

fábricas magnéticas deposicionales y fábricas magnéticas tectónicas es discutida por Borradaile y Tarling (1981).

Un ejemplo donde la relación del eje de acortamiento tectónico y por tanto también de la dirección de la susceptibilidad principal k_{min} de la fábrica tectónica asociada es coaxial con el eje definido por la susceptibilidad principal k_{min} de la fábrica sedimentaria previa será discutido más adelante (fig. 4).

El caso ilustrado en la fig. 3b, corresponde a un pliegue de escala métrica en las calizas margosas del Cretácico inferior, pertenecientes a una subunidad estructural asimilable a la lámina cabalgante de Boixols (estación J13, fig. 1). Este pliegue es más apretado que el anteriormente analizado pero tampoco presenta ningún tipo de esquistosidad o estructura penetrativa. Como en el caso anterior, la fábrica magnética en ambos flancos del pliegue también es coherente sin desplegar la estructura. Este hecho permite considerar esta fábrica como generada por un proceso posterior a la formación del pliegue. La forma del elipsoide se caracteriza por un dominio del grado de linearidad (L) respecto al de foliación (F) y además por un grado bastante elevado de anisotropía (A), (tabla 1). Un hecho a destacar para las rocas estudiadas en este pliegue es el bajo valor de la susceptibilidad magnética total ($K = 38 \times 10^{-6}$ SI).

A pesar de la coincidencia entre los ejes de las susceptibilidades magnéticas principales y los ejes cinemáticos del pliegue, esta fábrica magnética no puede ser el resultado del mismo proceso deformativo que originó el pliegue, puesto que ni k_{min} , ni k_{max} son perpendiculares al plano axial del mismo, como deberían serlo respectivamente en el caso de las fábricas magnéticas normales o inversas.

Las fábricas magnéticas denominadas inversas (Rochette, 1988; Ihmlé *et al.*, 1989), se caracterizan por presentar la dirección de susceptibilidad máxima k_{max} intercambiada con la posición de k_{min} . En este caso pues, el eje de la susceptibilidad máxima es normal a la estratificación o a la esquistosidad. Esta particularidad parece común en rocas con baja susceptibilidad total en las que la fábrica magnética no estaría dominada por el contenido de minerales ferromagnéticos de la roca sino por la componente aportada por los minerales paramagnéticos de la "matriz". Hrouda y Jelinek (1990) han estimado que la componente paramagnética puede ser dominante en rocas con susceptibilidad media de bajo campo $K \ll 50 \times 10^{-6}$ SI. Rochette (1988) estudió este tipo de fábricas en calizas débilmente deformadas en los Alpes occidentales y propuso diversos mecanismos para explicar las fábricas magnéticas inversas. Potter y Stephenson (1988) atribuyeron la distribución de partículas de magnetita de dominio sencillo sobre una foliación textural como la posible causante de fábricas magnéticas inversas. Ihmlé *et al.* (1989) concluyeron que la observación de fábricas magnéticas inversas en algunas calizas pertenecientes al manto de Morcles en los Alpes Suizos era el resultado de la componente paramagnética debida a iones Fe^{2+} en la matriz de la calcita.

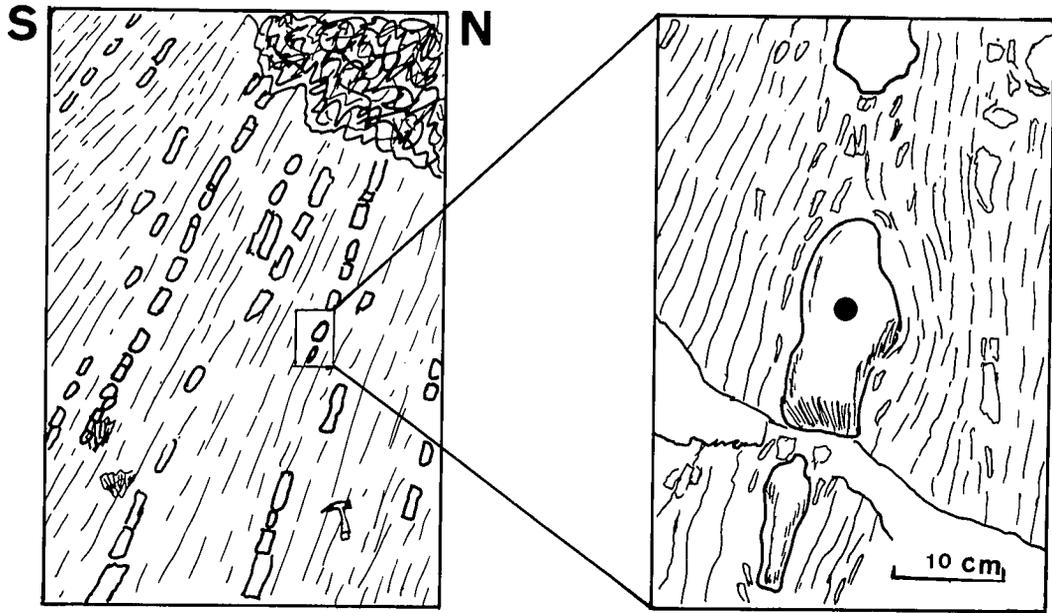


Fig. 4.-Esquemas a partir de fotografías de la estación J31 en las margas del Jurásico inferior (ver fig. 1 para su localización). Se observa claramente la estratificación buzando al S y el acortamiento perpendicular a las capas que se manifiesta por esquistosidad subparalela a la estratificación y por "boudinage". Las muestras se extrajeron de la parte central de los "boudins" donde no se observa esquistosidad penetrativa.

Fig. 4.-Sketch-diagrams from the lower Jurassic marls in site J31 (see fig. 1 for location). Note bedding dipping towards the S and shortening perpendicular to bedding shown by cleavage subparallel to bedding and "boudinage". Samples were taken from core of "boudins" where no cleavage is found.

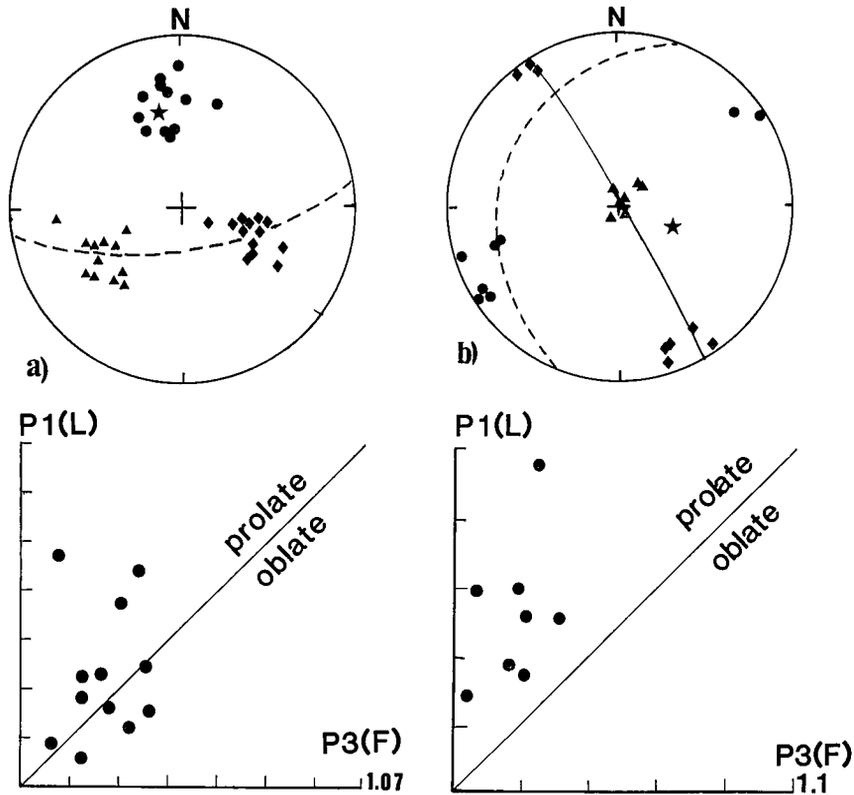


Fig. 5.-Proyecciones estereográficas *in-situ* de las direcciones principales de la susceptibilidad magnética y del diagrama de Flinn correspondiente (Flinn, 1962) de las estaciones J31 y J35. Símbolos iguales a fig.2: (a) margas del Jurásico inferior (estación J31); (b) calizas margosa del Cretácico inferior al N de Campo (estación J35). La ciclográfica en trazo continuo corresponde al plano medio de la familia de diaclasas; la traza discontinua representa la estratificación.

Fig. 5.-*In-situ* stereographic projections of principal susceptibility directions and Flinn diagram (Flinn, 1962) of: (a) lower Jurassic marls (site J31); (b) lower Cretaceous marly-limestones north of Campo (site J35). Continuous great circle represents mean joint plane, dashed great circle represents bedding plane.

Si bien en el caso de la estación J13 no existe un intercambio de los ejes k_{\max} y k_{\min} que nos defina una fábrica magnética inversa típica, la coincidencia entre los ejes magnéticos y cinemáticos y la baja susceptibilidad magnética $K = 38 \times 10^{-6}$ SI (tabla 1), permite no descartar la posibilidad de algún mecanismo similar a los propuestos para la generación de fábricas magnéticas inversas que pudiera explicar la fábrica magnética que observamos (fig. 3b) con k_{int} y k_{\max} intercambiados. Actualmente se están llevando a cabo diversos experimentos para conocer detalladamente la mineralogía que compone la roca y estudiar la aportación de las fases dia-, para-, y ferromagnética a la fábrica magnética.

Un caso particular en el que el eje de acortamiento tectónico es fácilmente identificado a partir de las mesoestructuras observadas en el campo (fig. 4) y en el que además este eje de acortamiento tectónico es perpendicular a la estratificación se muestra en la fig. 5a. Esta particularidad ha de condicionar la fábrica tectónica resultante de diferente modo al comentado para el caso de la fig. 3a, pues las direcciones de las susceptibilidades principales k_{\min} asociadas a la fábrica sedimentaria previa y a la fábrica tectónica sobrepuesta en este caso son coaxiales. De hecho, en la proyección estereográfica de la fig. 5a se observa el agrupamiento de los k_{\min} con el polo de la estratificación de forma similar a las fábricas sedimentarias típicas pero el elipsoide magnético asociado presenta un dominio de la linealidad (L) respecto a la foliación magnética (F) en este caso (tabla 1, estación J31). Este hecho se traduce en la tendencia de los elipsoides magnéticos a proyectarse en el campo "prolate" en el diagrama de Flinn de la fig. 5a. En este caso, pues, la fábrica tectónica sobrepuesta potencia una fábrica sedimentaria anterior aumentando el grado de linealidad y conservando la orientación de los k_{\min} . Cabe señalar que las muestras se extrajeron de la parte central menos deformada de los "boudins" donde la esquistosidad no se presenta como estructura penetrativa (fig. 4).

En la fig. 5b se ilustra la fábrica magnética observada en un afloramiento de calizas arenosas del Cretácico inferior al N de Campo, valle del río Esera, (estación J35, fig. 1). Esta fábrica magnética se caracteriza por un dominio claro del grado de linealidad sobre el de foliación (diagrama de Flinn de la fig. 5b y tabla 1). Este hecho y la no relación directa de los ejes principales de la susceptibilidad con la estratificación permite caracterizar esta fábrica como típicamente tectónica. En este afloramiento se observa una familia de diaclasas subverticales dominantes cuya orientación media se ha representado en la proyección estereográfica de la fig. 5b. En ella observamos como k_{\min} se distribuye perpendicular a las diaclasas mientras que los ejes de k_{\max} y k_{int} están contenidos sobre el plano de las mismas. La susceptibilidad total de estas rocas es suficientemente alta ($K = 137 \times 10^{-6}$ SI, tabla 1) como para desprejar cualquier componente aportado por los minerales no-ferromagnéticos y permite descartar el caso de fábrica magnética inversa. Si suponemos una relación di-

recta entre los elipsoides asociados a la ASM y los de la deformación además de la contemporaneidad del mecanismo de formación de las diaclasas con el de formación de la fábrica magnética cabe pues interpretar las diaclasas como generadas en una situación de esfuerzos con el esfuerzo principal mínimo s_3 perpendicular a las diaclasas que representarían un diaclasado de carácter extensivo muy penetrativo (*close-jointing*).

3. CONCLUSIONES

La investigación de la fábrica magnética en diferentes localidades de las unidades sudpirenaicas que muestran diferentes grados y estilos de deformación ha conducido a las siguientes conclusiones:

1) La fábrica magnética en las rocas no deformadas o involucradas en macroestructuras (estación J23 en el anticlinal de Oliana, y estación J7 localizada en la lámina cabalgante de Bóixols) es de origen sedimentario con la foliación magnética paralela a la estratificación y una orientación de k_{\max} que refleja la dirección de la paleocorriente estimada a su vez por métodos convencionales en el primer caso. Los elipsoides de la susceptibilidad magnética son del tipo aplastado ("oblate").

2) En los casos de rocas deformadas la fábrica magnética puede asemejar al elipsoide de deformación dependiendo del grado de deformación de las rocas y de la relación angular de la fábrica tectónica sobrepuesta a una fábrica sedimentaria previa. Este último aspecto es de relevante importancia en rocas débilmente deformadas. La forma de los elipsoides de la fábrica magnética en las rocas deformadas estudiadas tiende a ser del tipo alargado ("prolate").

3) En rocas con baja susceptibilidad media ($\ll 50 \times 10^{-6}$ SI) la influencia de la fase dia-paramagnética en la fábrica magnética puede ser dominante y puede conducir a fábricas magnéticas inversas que no tienen relación directa con la petrofábrica.

4) El estudio de la ASM es una técnica no destructiva que aún considerando sus presentes limitaciones es una buena herramienta de trabajo para geólogos estructurales y sedimentólogos. Además, el estudio de la ASM ha de ser fundamental en cualquier estudio paleomagnético dado el efecto que puede tener la fábrica magnética sobre la remanencia magnética y en definitiva sobre las paleodirecciones magnéticas bloqueadas en las rocas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a X.Riu, S.Rius y O.Pascual la ayuda prestada en el campo. También se agradece a J.M.Parés y a los revisores anónimos la revisión del manuscrito original. Este trabajo se ha realizado bajo la aportación económica de la CIRIT (convocatoria 1989 "d'ajuts a projectes de recerca d'investigadors joves").

BIBLIOGRAFÍA

- Borradaile, G.C. (1987): Analysis of strained sedimentary fabrics: review and tests. *Can. Jour. Earth Sci.*, 24: 442-455.
- Borradaile, G.C. (1988): Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain. *Tectonophysics*, 156: 1-20.
- Borradaile, G.C. y Alford, C. (1987): Relationships between magnetic susceptibility and strain in laboratory experiments. *Tectonophysics*, 133: 121-135.
- Borradaile, G.C. y Tarling, D.H. (1981): The influence of deformation mechanisms on magnetic fabrics in weakly deformed rocks. *Tectonophysics*, 77: 151-168.
- Flinn, F. (1962): On folding during three-dimensional progressive deformation. *Quart. Jour. geol. Soc. Lond.*, 118: 385-433.
- Graham, J.W. (1966): Significance of magnetic anisotropy in Appalachian sedimentary rocks. In: J.S. Steinbard and T.J. Smith (Editors), *The Earth Beneath the Continents*. *Geophys. Monogr. Am. Geophys. Union*, 10: 627-648.
- Hamilton, N., Owens, W.H. y Rees, A.L. (1968): Laboratory experiments on the production of grain orientation in shearing sand. *Jour. Geol.*, 76: 465-472.
- Hamilton, N. y Rees, A.L. (1970): The use of magnetic fabric in paleocurrent estimation. In: S.K. Runcorn (Editor), *Paleogeophysics*, Academic Press, London, 445-464.
- Hrouda, F. (1982): Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophys. Surv.*, 5: 37-82.
- Hrouda, F. y Jelinek, V. (1990): Resolution of ferrimagnetic and paramagnetic anisotropies in rocks, using combined low-field and high-field measurements. *Geophys. Jour. Int.*, 103: 75-84.
- Hrouda, F. y Lanza, R. (1989): Magnetic fabric in the Biella and Traversella stocks (Periadriatic line): implication for the mode of emplacement. *Physics Earth Planet. Int.*, 56: 337-348.
- Hrouda, F. y Stranik, Z. (1985): The magnetic fabric of the Zdanice thrust sheet of the flysch belt of the West Carpathians: sedimentological and tectonic implication. *Sedim. Geol.*, 45: 125-145.
- Imhlé, P.F., Hirt, A.M. y Lowrie, W. (1989): Inverse magnetic fabric in deformed limestones of the Morcles nappe, Switzerland. *Geophys. Res. Lett.*, 16: 1383-1386.
- Kligfield, R., Owens, W.H. y Lowrie, W. (1981): Magnetic susceptibility/anisotropy, strain and progressive deformation in Permian sediments from the maritime Alps (France). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 55: 181-189.
- Lowrie, W. y Hirt, A.M. (1987): Anisotropy of magnetic susceptibility in the Scaglia Rossa pelagic limestone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 82: 349-356.
- Parés, J.M. (1988): La utilización de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) en el estudio de la deformación finita: ejemplo en la zona milonítica de Cap de Creus (Cataluña). *Geogaceta*, 5: 30-33.
- Potter, D.K. y Stephenson, A. (1988): Single-domain particles in rocks and magnetic fabric analysis. *Geophys. Res. Lett.*, 15: 1097-1100.
- Rathore, J.S. (1979): Magnetic susceptibility anisotropy in the Cambrian Slate Belt of North Wales and correlation with strain. *Tectonophysics*, 53: 83-97.
- Rathore, J.S. y Henry, B. (1982): Comparison of strained magnetic fabrics in Dalradian rocks from the southwest Highlands of Scotland. *Jour. Struct. Geol.*, 4: 373-384.
- Rees, A.L. y Woodall, W.A. (1975): The magnetic fabric of sand and sandstones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 25: 121-130.
- Rochette, P. (1988): Inverse magnetic fabric in carbonate-bearing rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 90: 229-237.
- Vergés, J. y Muñoz, J.A. (1990): Thrust sequences in the southern central Pyrenees. *Bull. Soc. Geol. France*, (8), 6: 265-272.

Recibido el 23 de diciembre de 1990
Aceptado el 18 de abril de 1991