

(Editores)  
Rodrigo Álvarez García  
Almudena Ordóñez Alonso

# RECURSOS MINERALES Y MEDIOAMBIENTE: UNA HERENCIA QUE GESTIONAR Y UN FUTURO QUE CONSTRUIR

LIBRO JUBILAR  
DEL PROFESOR  
JORGE LOREDO



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*

2020





# UNIVERSIDAD DE OVIEDO

HOMENAJES



Rodrigo Álvarez García  
Almudena Ordóñez Alonso  
(editores)

*Recursos minerales y  
medioambiente: una herencia  
que gestionar y un futuro  
que construir*

LIBRO JUBILAR  
DEL PROFESOR  
JORGE LOREDO



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*

2020



Reconocimiento-No Comercial-Sin Obra Derivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.



Usted es libre de copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, bajo las condiciones siguientes:



Reconocimiento – Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el licenciador:

Álvarez García, Rodrigo; Ordoñez Alonso, Almudena (editores). (2020). *Recursos minerales y medioambiente: una herencia que gestionar y un futuro que construir. Libro jubilar del profesor Jorge Loredo*. Universidad de Oviedo.

La autoría de cualquier artículo o texto utilizado del libro deberá ser reconocida complementariamente.



No comercial – No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin obras derivadas – No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

© 2020 Universidad de Oviedo

© Los autores

Algunos derechos reservados. Esta obra ha sido editada bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Sin Obra Derivada 4.0 Internacional de Creative Commons.

Se requiere autorización expresa de los titulares de los derechos para cualquier uso no expresamente previsto en dicha licencia. La ausencia de dicha autorización puede ser constitutiva de delito y está sujeta a responsabilidad.

Consulte las condiciones de la licencia en: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>



Esta Editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo

Edificio de Servicios - Campus de Humanidades

33011 Oviedo - Asturias

985 10 95 03 / 985 10 59 56

[servipub@uniovi.es](mailto:servipub@uniovi.es)

[www.publicaciones.uniovi.es](http://www.publicaciones.uniovi.es)

ISBN: 978-84-17445-95-9

DL AS 1451-2020



Jorge Loredo Pérez



## Índice

PRÓLOGO .....	13
<i>Santiago García Granda, Rector de la Universidad de Oviedo</i>	

### SEMBLANZA PERSONAL

Bosquejo a vuelapluma de Jorge Loredo Pérez, alumno, colega, colaborador y, sobre todo, amigo entrañable .....	17
<i>J. García-Iglesias.</i>	
Jorge Loredo: un compañero de viaje y un maestro de vida.....	21
<i>N. Roqueñí.</i>	
Casi un cuarto de siglo trabajando con Jorge: una experiencia de vida.	25
<i>A. Ordóñez.</i>	
Jorge Loredo: un gran hombre, un gran científico, un gran maestro y, ante todo, una gran persona.....	29
<i>M. I. Rucandio.</i>	

### ARTÍCULOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS

¿Se está gestando una nueva crisis del petróleo?.....	33
<i>I. Álvarez.</i>	
Mineralogía, textura y geoquímica de depósitos minerales y residuos mineros: una herramienta de interés en estudios de contaminación de suelos.....	45
<i>R. Álvarez, J. Álvarez-Quintana y A. Ordóñez</i>	
Drenaje ácido de minas en la Faja Pirítica Ibérica: Geoquímica, tratamiento pasivo y sus residuos en una economía circular .....	59
<i>C. Ayora, S. Orden, F. Macías y J. M. Nieto</i>	

Mineralogía magnética aplicada al estudio de los yacimientos; repaso sobre el magnetismo de los minerales y ejemplos de aplicación: el metasomatismo ferrífero de la dolomía encajante de las mineralizaciones Zn-Pb-Ba de La Florida e historia de los «gossans» de la Faja Pirítica Ibérica.....	71
<i>L. Barbanson y M. Essalbi</i>	
Nuevo método de cálculo de recursos y reservas minerales para cuerpos minerales de forma tabular – Aplicación al proyecto Carlés .....	83
<i>C. Castañón, A. Martín-Izard, I. Diego y D. Arias</i>	
Determinación de niveles de fondo y referencia de elementos traza en suelos: un enfoque metodológico avanzado .....	93
<i>E. Chacón, A. Callaba, P. Fernández-Canteli, F. Barrio-Parra, M. Izquierdo-Díaz y E. de Miguel</i>	
Historia de las aguas minerales y termales .....	105
<i>M. M. Corral, M. E. Galindo, J. Á. Díaz, C. Ontiveros y J. M. Fernández.</i>	
Mobility of Thallium and other trace elements in mine drainage waters from two carbonate-hosted Lead-Zinc ore deposits in the northeastern Italian Alps .....	115
<i>S. Covelli, E. Pavoni, N. Barago, F. Floreani, E. Petranich, M. Crosera, G. Adami &amp; D. Lenaz</i>	
Comentarios heterodoxos sobre el cambio climático .....	129
<i>J. R. Fernández</i>	
The INCHaPA project: methodology for the study of historic quarries associated with the architectural heritage.....	141
<i>J. Fernández, E. Álvarez, J. M. Baltuille &amp; J. Martínez</i>	
Metodologías de fraccionamiento secuencial como herramienta útil para la evaluación de la movilidad de mercurio y arsénico y su impacto en la cuenca minera de Asturias .....	153
<i>R. Fernández-Martínez, A. Ordóñez, R. Álvarez e I. Rucandio</i>	
Recursos geotérmicos en Asturias .....	167
<i>C. García de la Noceda</i>	
Análisis de la presencia de mercurio en diferentes compartimentos ambientales del estuario del río Nalón como consecuencia de la minería..	179
<i>E. García-Ordiales, N. Roqueñí, P. Cienfuegos, S. Covelli y L. Sanz-Prada</i>	
Contribución al conocimiento de la geología económica en la cuenca del río Esva.....	193
<i>S. González-Nistal, R. Álvarez y F. Ruíz</i>	

Escombreras asociadas a minería de sulfuros: pasivo ambiental y potencial activo económico desde una perspectiva de minería circular .....	205
<i>J. A. Grande, J. M. Dávila, J. C. Fortes, M. Santisteban, A. M. Sarmiento, F. Córdoba, M. Leiva, M. L. de la Torre, A. Jiménez, J. Díaz-Curiel, B. Biosca, A. T. Luís, N. Durães, E. A. Ferreira da Silva, M. J. Rivera, J. Aroba, B. Carro, J. Borrego y J. A. Morales.</i>	
Mercurio en Almadén – datos recientes (2000-2020) sobre su presencia en el medioambiente y sus implicaciones.....	219
<i>P. L. Higuera, J. M. Esbrí, E. García-Ordiales y J. D. Peco</i>	
Evaluación medioambiental temprana de riesgos a la salud, a la seguridad y al propio medioambiente por proyectos geo-energéticos .....	245
<i>A. Hurtado y S. Eguilior</i>	
European dimension of the social license to operate in mining.....	257
<i>K. Komnitsas</i>	
El cambio climático, las tecnologías limpias y la minería .....	265
<i>J. F. Llamas</i>	
Las aguas subterráneas y los acuíferos: su carácter estratégico en escasez y periodos de sequía.....	277
<i>J. Antonio López-Geta</i>	
Comportamiento del agua de mina en instalaciones geotérmicas: Análisis de un caso particular .....	297
<i>C. Loredó</i>	
Una tecnología para reducir las emisiones: el almacenamiento geológico de CO <sub>2</sub> .....	309
<i>R. Martínez Orío y P. Fernández-Canteli</i>	
Perspectivas sobre reducción de emisiones de mercurio originadas en la producción de energía .....	321
<i>M. R. Martínez Tarazona, M. A. López Antón y R. García</i>	
Almacenamiento de energía térmica y eléctrica en minas subterráneas cerradas: situación actual y balances de energía .....	333
<i>J. Menéndez</i>	
Contribución del yacimiento de Carlés a la mineralogía española .....	345
<i>M. Mesa</i>	
La descarbonización de las industrias minerales en el Principado de Asturias .....	357
<i>A. Olay</i>	

Notas sobre liderazgo .....	367
<i>J. C. Rodríguez-Ovejero</i>	
Viabilidad económica ambiental para la recuperación o reducción del consumo de agua de plantas de procesamiento de oro .....	377
<i>J. Soto, J. Melendez y P. Cienfuegos</i>	
La explotación minera del karst fósil en la sierra del Aramo: del Calcolítico al siglo xx .....	391
<i>M. Suárez</i>	

# **MINERALOGÍA MAGNÉTICA APLICADA AL ESTUDIO DE LOS YACIMIENTOS; REPASO SOBRE EL MAGNETISMO DE LOS MINERALES Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN: EL METASOMATISMO FERRÍFERO DE LA DOLOMÍA ENCAJANTE DE LAS MINERALIZACIONES ZN-PB-BA DE LA FLORIDA E HISTORIA DE LOS «GOSSANS» DE LA FAJA PIRÍTICA IBÉRICA**

*Luc Barbanson,<sup>1</sup> y Mourad Essalhi<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Universidad de Orléans, Francia,

<sup>2</sup>Universidad Moulay Ismail, FST Errachidia, Marruecos

## **RESUMEN**

Para ilustrar el potencial de los estudios de magnetismo de rocas en metalogénia, tras una breve presentación de las propiedades magnéticas de los minerales, se presentan dos casos de estudio de interés minero. Se considera primero la dolomía ferrífera en la que encajan las mineralizaciones Zn – Pb de las formaciones carbonatadas de la cuenca cretácica cantábrica. Los resultados de la Anisotropía de Susceptibilidad Magnética, acoplados con los datos mineralógicos y tectono-sedimentológicos, apuntan hacia el papel de los diapiros en la formación de estos yacimientos. El segundo ejemplo son los gossans de la Faja Pirítica Ibérica. La fábrica magnética de estos objetos, así como las dataciones magnéticas permiten proponer una estructuración de los gossans en dos etapas que se pueden asociar a dos cambios climáticos de gran envergadura (calentamiento del final del Oligoceno y crisis messiniense). En este último estudio la aportación del estudio magnético ha delineado un cuadro necesario para desarrollar estudios mineralógicos, geoquímicos o mineros ulteriores.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En geología las propiedades magnéticas de los minerales se emplean: o bien con el fin de datación, o para determinar la fábrica de una roca. El pri-

mer empleo está muy extendido y a ese efecto se usa o bien la escala estratigráfica de las inversiones del campo magnético terrestre, o la comparación entre el paleocampo magnético terrestre grabado en una roca y la deriva en el tiempo, en la zona del estudio, de los polos magnéticos. El segundo empleo se basa en la respuesta de un mineral cuando está sometido a un campo magnético exterior (anisotropía de susceptibilidad magnética – ASM). Siendo esta respuesta controlada por la simetría cristalográfica y la forma del mineral. Por lo tanto se puede esperar, partiendo de la respuesta magnética de un mineral, deducir su orientación en el espacio. En una roca, varias fases pueden contribuir a la ASM y por lo tanto una interpretación de los datos necesita un estudio previo de «mineralogía magnética» para distinguir la contribución de los distintos minerales. En estas condiciones, la ASM de una roca permite estimar la distribución espacial de los minerales que responden a la sollicitación magnética exterior, estableciendo así la fábrica magnética de la roca. La ASM de roca ha dado lugar a muchos estudios dedicados esencialmente a la fábrica de granitos, rocas volcánicas, sedimentarias o metamórficas (Hroudá, 1982, Tarling y Hroudá, 1993, Dunlop y Özdemir, 1997), pero su uso en el estudio de yacimientos está todavía poco extendido.

En el primer apartado se presentan nociones de base sobre el magnetismo de los minerales y los principales métodos usados en mineralogía magnética. El segundo y tercer apartados tratan de dos ejemplos de uso de la ASM en metalogía: 1) en la dolomía ferrífera que alberga las mineralizaciones Zn-Pb-Ba de La Florida (Cantabria, Norte de España) y 2) en los gossans de la Faja Pirítica Ibérica.

## 2. PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LOS MINERALES Y FÁBRICA MAGNÉTICA DE UNA ROCA

La acción de un campo magnético  $\vec{H}$  sobre una substancia, induce en esta substancia un momento magnético  $\vec{M}$ . La relación entre la sollicitación magnética  $\vec{H}$  y el momento magnético inducido  $\vec{M}$  se escribe:  $\vec{M} = [\chi] \cdot \vec{H}$  donde  $[\chi]$  es el tensor de susceptibilidad magnética. Este tensor es de orden 2; en la gran mayoría de los casos, sus coeficientes tienen el mismo signo y por lo tanto el tensor puede ser representado por un elipsoide de semejeas mayor, medio y menor  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$ , siendo estos clasificados en orden decreciente de valor algebraico. Si todos los coeficientes son negativos con valores absolutos bajos, la substancia se llama diamagnética. Tal comportamiento se observa siempre y por lo tanto es considerado como una propiedad general de la materia. Usando una imagen basta, como son las imágenes con las que se ilustra el comportamiento de la materia a la escala atómica, el diamagnetismo se vincula a la «rotación» de los electrones a lo largo de sus órbitas atómicas. El sentido de este movimiento induce un momento magnético que se opone a la sollicitación magnética exterior (ley de Lenz) y de eso surge el signo negativo de la susceptibilidad magnética de los compuestos diamagnéticos. En un cristal diamagnético, debido a las interacciones entre las nubes electrónicas de los átomos que componen el mineral, la dirección del momento magnético inducido es paralela a una dirección cristalográfica dada. Por ejemplo, en una calcita o una dolomita, el momento magnético inducido está dirigido según el eje de simetría 3 (figura 1-A). Si dentro del mineral hay

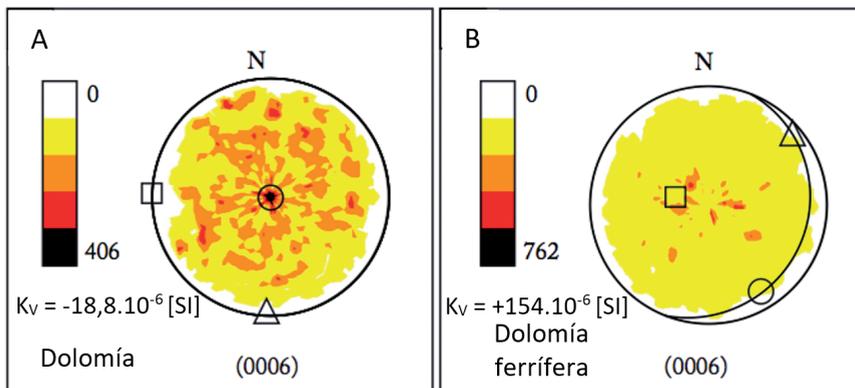


Fig. 1. Control por la simetría cristalina del elipsoide de susceptibilidad magnética, comparación entre la orientación de los ejes de simetría 3 de los carbonatos determinados por goniometría de textura y los semiejes del elipsoide de susceptibilidad magnética ( $\square$ :K1,  $\triangle$ :K2,  $\circ$ :K3 – en el orden de valores algebraicos), en una dolomía (A) y una dolomía ferrífera (B).  $K_v$  es la susceptibilidad magnética volumétrica. Siendo la dolomita un mineral diamagnético ( $K_v$  negativo), en la dolomía, los ejes de simetría 3 de la dolomita son paralelos a K3 (A). Siendo la dolomita ferrífera un mineral paramagnético ( $K_v$  positivo), en la dolomía ferrífera, los ejes de simetría 3 de los carbonatos son paralelos a K1 (B). Según Essalbi, 2009

átomos con electrones libres, el momento magnético intrínseco (spín) de estos electrones no está compensado. Si los *spines* se alinean en el sentido del campo magnético exterior, los coeficientes de  $[\chi]$  son positivos, con valores absolutos altos, la substancia está calificada como paramagnética. Los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  no tienen electrones libres al contrario del ion  $\text{Fe}^{2+}$ .

Así la dolomía ferrífera adopta, bajo la acción de un campo magnético exterior, un comportamiento paramagnético. Al tener valor absoluto más alto, el momento paramagnético se sobrepone al momento diamagnético y el acoplamiento entre estos dos momentos hace que el momento magnético sea dirigido según una dirección cristalográfica determinada. Por ejemplo, en una dolomita ferrífera el momento inducido es colineal al eje de simetría 3 y actúa en el mismo sentido que la sollicitación magnética exterior (figura 1-B): de ahí surge el signo positivo de la susceptibilidad magnética en una substancia paramagnética. El fundamento de la ASM se ubica en el control de la orientación del elipsoide de susceptibilidad magnética por la simetría cristalina. Este control no es más que la expresión del principio de Curie.

Si en la composición de una substancia hay átomos con electrones libres, las interacciones entre los spines de estos átomos pueden resultar: (1) al azar, por lo tanto el momento magnético resultante es nulo; pero bajo la influencia de un campo magnético exterior los momentos magnéticos intrínsecos de los átomos se vuelven colineales y en el mismo sentido de la sollicitación exterior, tales substancias son calificadas como paramagnéticas s. s.; (2) ordenado. Existen diferentes tipos de orden magnético. 1) Ferromagnético si los momentos magnéticos de los átomos son paralelos y dirigidos en el mismo

sentido, como en el hierro nativo. 2) Antiferromagnético cuando los spines son de igual magnitud, paralelos y orientados alternativamente en sentido opuesto. En este caso el momento magnético resultante es nulo (ejemplo la bunsenita, NiO, cúbico o la pirrotita hexagonal). 3) Ferrimagnético: los momentos magnéticos de los átomos son paralelos, orientados alternativamente en sentido opuesto, pero la magnitud de los momentos orientados en un sentido es diferente de la de los momentos orientados en el sentido opuesto. En este caso el momento magnético resultante es diferente de cero (ejemplo la magnetita, con un momento resultante dirigido según [111] o de la pirrotita monoclinica). 4) Antiferromagnético no-colineal. El orden es de tipo antiferromagnético pero los momentos magnéticos de los átomos no son estrictamente paralelos. En este caso el momento magnético resultante es diferente de cero. El hematites nos proporciona un ejemplo de este tipo de orden, el momento magnético resultante es incluido en el plano (0001). Estos distintos tipos de orden y las temperaturas a las cuales se registra un cambio de «fase magnética» son característicos de un mineral y por lo tanto una herramienta muy útil de la mineralogía magnética.

En minerales como la magnetita, el hematites o la pirrotita monoclinica, a temperatura ambiente, se observa un momento magnético remanente. Al subir la temperatura, la agitación térmica aniquila el orden magnético; el comportamiento de la magnetita y del hematites cambian de magnetismo ordenado a paramagnético s. s, el valor de la susceptibilidad magnética se anula en un rango muy pequeño de temperatura. El valor de la temperatura por el cual se observa este cambio (temperatura de Curie) es característico del mineral. Además, a temperatura constante y bajo la influencia de un campo magnético variable, el momento magnético inducido varía (curva de imantación remanente isotérmica o histéresis).

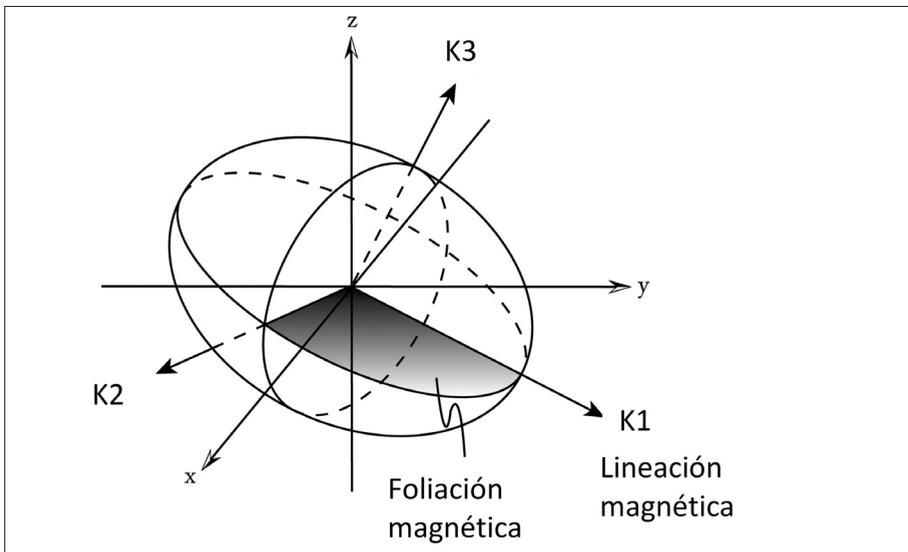


Fig. 2. Elipsoide de susceptibilidad magnética, según Hroudá, 1982

El elipsoide de susceptibilidad magnética de una roca (ASM de una roca) se construye midiendo el momento magnético inducido por un campo magnético exterior, en una muestra cuya forma es la más isotrópa posible, en la práctica un cilindro o un cubo. Estas medidas se hacen según diferentes orientaciones de la muestra con respecto al campo magnético exterior. Un ejemplo de elipsoide de susceptibilidad magnética de una roca es dado en la figura 2. La dirección de K1 define la lineación magnética, el plano K1-K2 la foliación magnética. Varios parámetros se usan para caracterizar la forma del elipsoide. De estos citaremos T y P'. El primero caracteriza la forma del elipsoide, el segundo estima el grado de anisotropía. Tenemos así:

$$T = \frac{\ln\left(\frac{K2}{K3}\right) - \ln\left(\frac{K1}{K2}\right)}{\ln\left(\frac{K2}{K3}\right) + \ln\left(\frac{K1}{K2}\right)}$$

T varía entre -1 (forma de cigarro o prolato) y +1 (forma de galleta u oblato). Por ejemplo, los elipsoides de susceptibilidad de la dolomía de La Florida, con un valor de T entre -0,1 y -0,6, son oblatos, mientras que los de la dolomía ferrífera son prolatos ( $-0,2 \leq T \leq +0,6$ ).

$$P' = \exp\left[2 \cdot \sum_{i=1}^3 \left(\ln \frac{K_i}{K_m}\right)^2\right]^{1/2} \quad \text{con: } K_m = \sqrt[3]{K1 \cdot K2 \cdot K3}$$

P' es una medida de la desviación del elipsoide de susceptibilidad magnética con respecto a una esfera, siendo P' igual a 1 para una esfera y P' >1 para un elipsoide de forma no esférica.

En una roca, varias fases magnéticas pueden contribuir a la respuesta ASM. Además, minerales como la magnetita o la pirrotita monoclinica, aunque presentes en proporción muy baja y bajo la forma de granos difícilmente visibles al microscopio, pueden ser decisivos en la determinación de la ASM de una muestra. Por lo tanto, una interpretación del elipsoide pasa por la determinación de los portadores mineralógicos de la susceptibilidad magnética. Como se ha dicho anteriormente el microscopio no basta y hay que realizar estudios de mineralogía magnética como son la variación del momento magnético inducido en función de la temperatura o de una sollicitación magnética variable. A título de ejemplo se puede citar el caso de la caliza aptiense de La Florida donde la ASM está portada por la magnetita. La presencia de este mineral, no observado al microscopio, fue detectada por la forma de las curvas de imantación remanente isotérmica (Essalhi, 2009, Essalhi *et al.*, 2009).

### 3. ESTUDIO MAGNÉTICO DE LAS DOLOMIAS APTIENSES QUE ALBERGAN LA MINERALIZACIÓN Zn Pb Ba DE LA FLORIDA

Las mineralizaciones de La Florida, forman parte de un grupo de yacimientos ubicados dentro de las formaciones carbonatadas aptienses de la

cuenca mesozoica de Cantabria. Dentro de este grupo figura el criadero de Reocín, de importancia mundial, y el distrito de Novales. Desde el Pérmico, en esta cuenca, la sedimentación está controlada por grandes estructuras marcadas por alineaciones de extrusiones diapíricas. El estudio del conjunto de estas mineralizaciones permitió proponer un modelo de mineralización de tipo «muñecas rusas» (Barbanson *et al.*, 1983; Barbanson, 1987; Barbanson y Touray, 1987; Barbanson, 1993; Barbanson *et al.* 2010) al estar encajadas las mineralizaciones en dolomía ferrífera y esta última ubicada dentro de dolomía desarrollada a expensas de la caliza aptiense (figura 3). Las observaciones hechas en el campo muestran que durante el Aptiense hubo un flujo sedimentario orientado NW-SE (Essalhi, 2009 y Essalhi *et al.*, 2009).

De los estudios de mineralogía magnética se deduce que en la dolomía ferrífera el portador de la ASM es la dolomita ferrífera, aunque, en ciertos casos no se podía rechazar la influencia del hematites. En contraste, en la caliza, la contribución de la magnetita es importante. Las características mineralógicas y texturales de la dolomía ferrífera muestran que resulta de un metamatismo ferrífero de la dolomía.

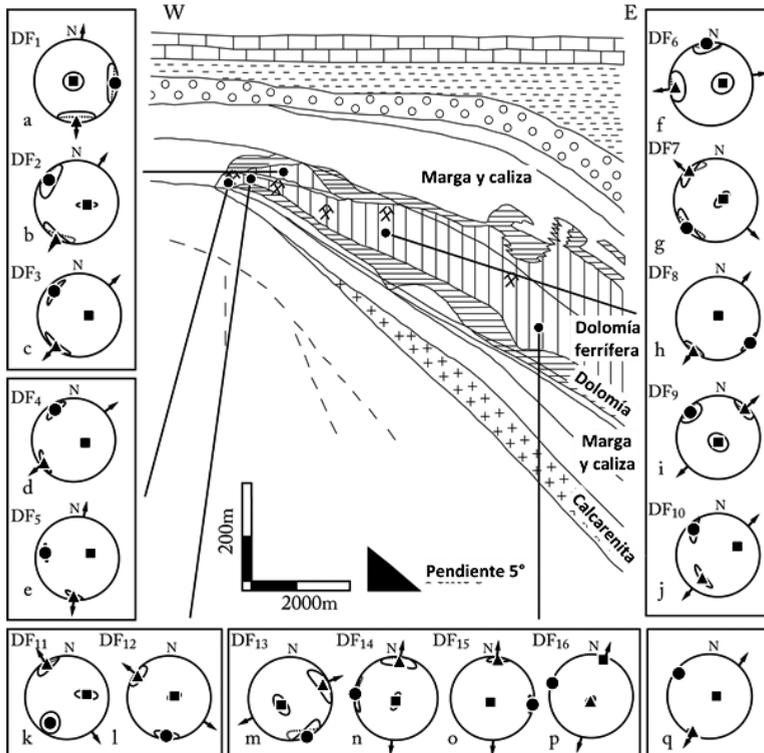


Fig. 3. Distrito minero de La Florida, corte vertical. Proyección estereográfica de la ASM para la dolomía ferrífera (■:  $K_1$ , ▲:  $K_2$ , ●:  $K_3$ ). Las curvas elipsoidales representan los intervalos de confianza de 95%. El estereograma q representa la media de todas las proyecciones. Según Barbanson y Touray, 1987; Essalhi, 2009; Essalhi *et al.*, 2009

A escala del microscopio las zonas enriquecidas en hierro de los granos mono-cristalinos de dolomita se presentan en bandas paralelas: 1) que cortan los límites de los cristales, 2) que están ubicadas en el plano K2-K3 y 3) que se extienden colineales a K2 (figura 4).

Los estereogramas de los semiejes del elipsoide de susceptibilidad magnética en la dolomía ferrífera están representados en la figura 3. La orientación dominante de K2 es NE-SW (ver en particular la figura 3q) y apunta hacia un diapiro (figura 5). Tanto en la dolomía ferrífera como en la caliza aparece también una dirección NW-SE, que coincide con la dirección del flujo sedimentario.

Al fin, los resultados enfatizan el papel de los diairos en la formación de las mineralizaciones Zn- Pb-(Ba) del Aptiense de la cuenca mesozoica cántabra.

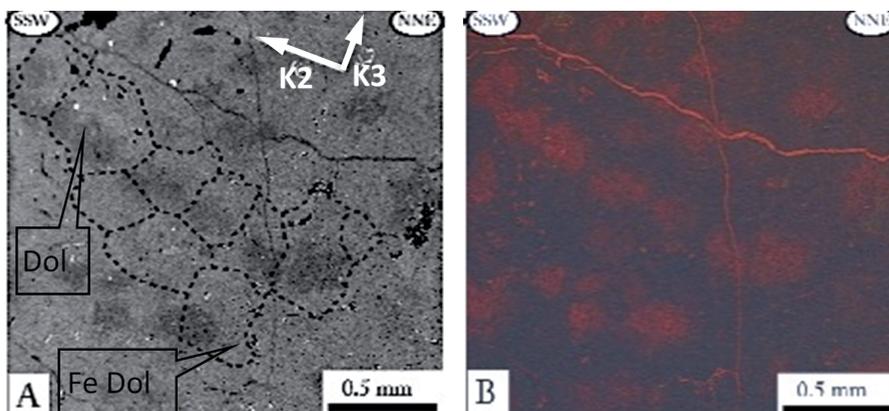


Fig. 4. Distribución a la escala del microscopio del hierro en la dolomía ferrífera. (A) Fotografía en electrones retrodispersados, las zonas negras están compuestas por dolomita (Dol), las zonas claras de dolomita ferrífera (Fe Dol). Las líneas discontinuas delimitan los bordes de granos mono-cristalinos. K2 y K3 son los semiejes intermedio y menor del elipsoide de susceptibilidad magnética. En (B) la misma muestra observada en cátodo-luminiscencia

#### 4. ESTUDIO MAGNÉTICO DE LOS «GOSSANS» DE LA FAJA PIRÍTICA IBÉRICA

Los yacimientos de sulfuros masivos de Faja Pirítica Ibérica han dado lugar a numerosas publicaciones (ver por ejemplo Sáez *et al.*, 1999). En este artículo nos limitaremos a decir que estas acumulaciones de sulfuros masivos se formaron hace alrededor de 350 Ma y que fueron deformados durante la orogenia varisca ( $\approx 320$  Ma). Se observan dos tipos de concentraciones ferríferas superficiales: 1) los *gossans*, productos de la oxidación de los cuerpos sulfurados y 2) las «terrazas» resultado de la erosión, el transporte y la deposición de fragmentos de los *gossans*. Los minerales de interés magnético son: el hematites y la goethita en los *gossans* y las terrazas y la pirrotita en la mineralización sulfurada. En los *gossans*, la susceptibilidad magnética es por-

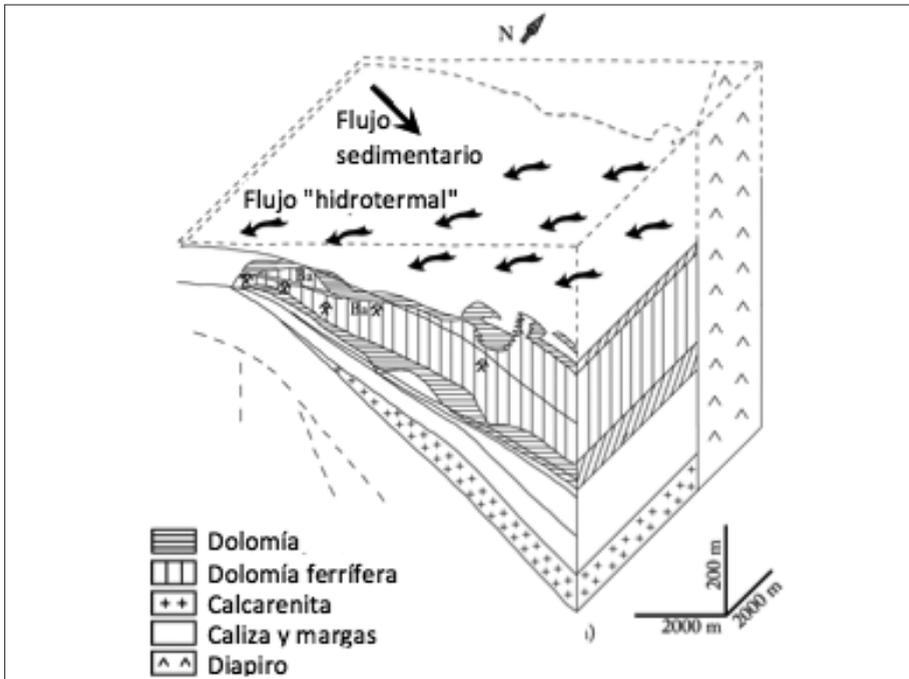


Fig. 5. Interpretación de los datos de la ASM en el distrito de La Florida. Según Essalhi, 2009; Essalhi et al., 2009.

tada por el hematites, siendo la señal de la goethita muy débil. El comportamiento magnético del hematites, a temperatura ambiente, es antiferromagnético no-colineal, con  $K_3$  paralelo a  $[0001]$  y  $K_1$  y  $K_2$  coplanares en el plano  $(0001)$ .

Se recogieron muestras a lo largo de perfiles verticales desde la superficie hasta, cuando era posible, dentro del filón. Los resultados de la ASM son dados en la figura 6 (Essalhi, 2009; Essalhi et al., 2011).

En los filones la ASM muestra una foliación de dirección E-W a NW-SE casi vertical (figura 6A) y unos valores de  $P'$  inferiores a 1,05. Como esta foliación está también observada en la roca encajante, está interpretada como una huella de la deformación varisca.

En la parte superior de los gossans (figura 6 C) la fábrica magnética es caracterizada por una foliación magnética horizontal que, en comparación con la fábrica observada en los perfiles lateríticos (Mathé et al., 1999), es considerada como resultante de la compactación de la parte superficial de los gossans. Los valores de  $P'$  son inferiores a los obtenidos en los filones.

La parte de los gossans entre el filón fresco y la parte superior presenta una foliación mixta (figura 6 B) cuyas características aparecen como una mezcla entre las de los amas y la fábrica de compactación. Los valores de  $P'$  son muy bajos, inferiores a los que se encuentran en la parte superior de los gossans.

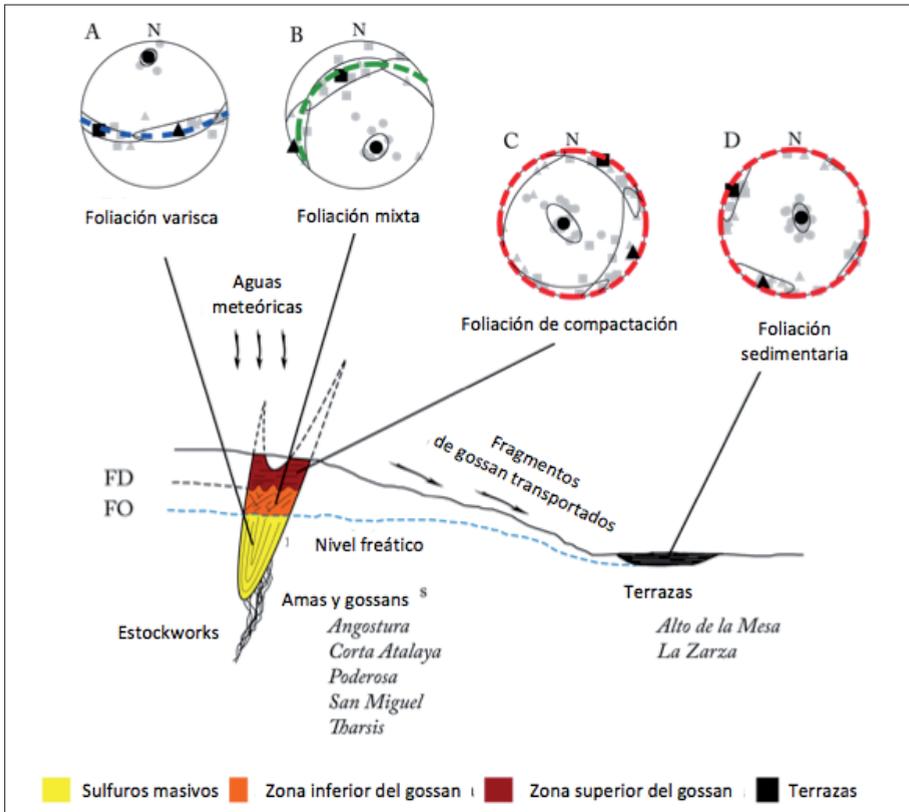


Fig. 6. Síntesis del estudio de ASM realizado sobre las concentraciones ferríferas superficiales. FD: frente de deshidratación, FO: frente de oxidación. Proyección estereográfica de la ASM (■:  $K_1$ , ▲:  $K_2$ , ●:  $K_3$ ). Las curvas elipsoidales representan los intervalos de confianza de 95%.

En las terrazas, la fábrica magnética (figura 6 D) exhibe la clásica foliación horizontal, paralela a la estratificación que se encuentra en los sedimentos (Tarling y Hrouda, 1993).

La zonalidad vertical de fábrica magnética en los gossans se superpone a la zonalidad mineralógica descrita por Capitán *et al.*, 2003 con: una parte superior donde domina el hematites y una parte inferior caracterizada por goethita y jarosita. Por lo tanto, el contacto entre la parte inferior y la mineralización primaria puede ser interpretado como un frente de oxidación (FO en la figura 6) y el contacto entre la parte superior y la parte inferior como un frente de deshidratación (FD en la figura 6). O dicho de otro modo la diferencia entre las dos zonas de los gossans puede considerarse como un grado de madurez: alto en la parte superior, bajo en la parte inferior.

El estudio paleomagnético (Essalhi, 2009 y Essalhi *et al.*, 2011) muestra que: 1) en la parte inferior de los gossans y las terrazas la polaridad es nor-

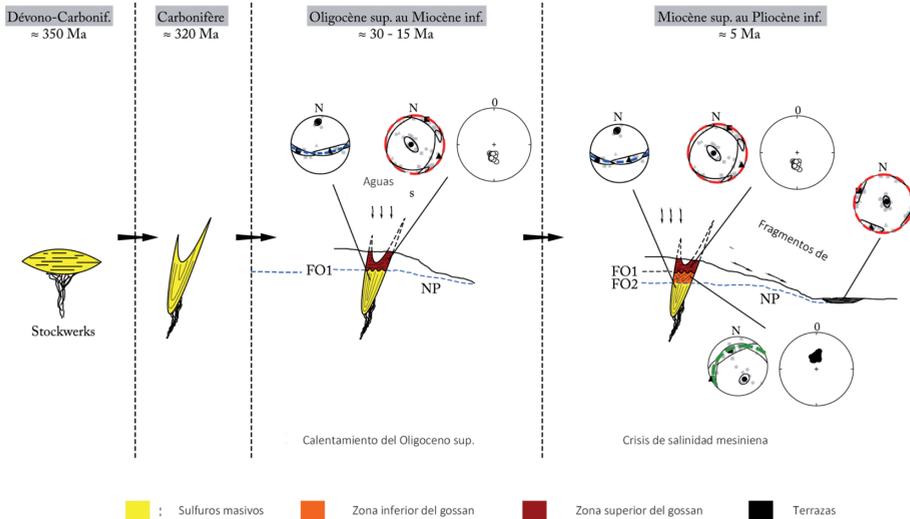


Fig. 7. Evolución de los gossans de la Faja Pirítica Ibérica desde la deposición de los amas hasta la formación de las «terrazas». Las fábricas magnéticas son dadas como las edades paleomagnéticas y las polaridades magnéticas (círculos blancos polaridad inversa, círculos negros polaridad normal). NP: Nivel freático, FO1 y FO2: los frentes de oxidación sucesivos. Según Essalhi, 2009

mal, con una edad magnética entre 5 y 10 Ma; 2) en la parte superior de los gossans la polaridad es inversa y la edad magnética entre 15 y 25 Ma (figura 7). Estos resultados sugieren la existencia de dos etapas en la formación de los gossans. La comparación con los datos geológicos (ver por ejemplo Alegret *et al.*, 2008) permite asociar las bajadas del nivel de base hidrostático que induce las dos etapas de alteración de los sulfuros: 1) al episodio de calentamiento del final del Oligoceno para la parte ahora madura de los gossans, 2) al evento messiniense para la zona inferior de los gossans y las terrazas.

En fin, el aumento de los valores del parámetro de anisotropía  $P'$  de la parte inferior a la parte superior de los gossans sugiere que  $P'$  puede ser utilizado para estimar el grado de madurez de un gossan.

## 5. CONCLUSIÓN: UTILIDADES DEL ESTUDIO MAGNÉTICO EN METALOGENIA

Otros ejemplos del uso de estudios del magnetismo de las rocas aplicado a la metalogenia, se pueden consultar en: Sizaret *et al.*, 2003 en relación con un depósito epitermal de barita; Li *et al.*, 2014 en conexión con un skarn de magnetita y Charles *et al.*, 2016, sobre yacimientos de «calamina».

Los dos casos presentados ilustran como el estudio magnético de las rocas, sobre todo la ASM, trae informaciones útiles en metalogenia. En el primer caso se ha podido confirmar el papel de los diapiros en la formación de las mi-

neralizaciones Zn–Pb encajadas en las formaciones carbonatadas del Cretácico cántabro. En el segundo ejemplo los métodos magnéticos han ayudado a la reconstitución de la historia de un objeto vinculado con yacimientos como son los gossans. Así, en este último caso se ha delineado un cuadro dentro del cual se pueden desarrollar estudios mineralógicos y geoquímicos.

Aparte de la posibilidad de datación, los estudios de magnetismo de las rocas tienen tres ventajas:

Una ventaja práctica. Con la ayuda de un aparato de medición portátil se puede recoger en poco tiempo un número importante de muestras que confiere al estudio un carácter estadísticamente significativo. Como siempre, la eficiencia será más alta si el problema ha sido bien definido anteriormente. La duración de las medidas de ASM es muy corta (algunos minutos por muestra), pero su interpretación requiere estudios mineralógicos y de mineralogía magnética.

Una ventaja «geométrica». Como los resultados expresan orientaciones en tres dimensiones, las muestras recogidas a lo largo de cortes 2D proporcionan informaciones en 3D.

En fin, algunos parámetros pueden tener una utilidad tanto en el ámbito académico como en la exploración minera. Sería, por ejemplo, el caso del parámetro de anisotropía  $P'$  que posiblemente puede cuantificar el grado de madurez de un gossan.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alegret, L., Cruz, L., Fenero, R., Molina, E., Ortiz, S., Thomas, E., 2008. Effects of the Oligocene climatic events on the foraminiferal record from Fuente Caldera section (Spain, western Tethys). *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 269: 94–102, 269: 94–102.
- Barbanson, L., Touray, J. C., 1987. *Les minéralisations Zn-Pb des systèmes biosédimentaires urgoniens du domaine ouest-santanderin (Nord de l'Espagne)*. En: Pelissonnier, K., Sureon, J. (Eds.), *Mobilité et concentration des métaux de base dans les couvertures sédimentaires, manifestations, mécanismes, prospection*. Mémoire BRGM, 129-141.
- Barbanson, L., Touray, J. C., Saulas, D., Vadala P., 1983. Distribution à différentes échelles et chronologie relative des carbonates de l'Aptien de la Province de Santander: relation entre auréole ferrifère et minéralisations Zn-Pb du type Réocin. *Chronique de la Recherche minière*, 473, 39-48.
- Barbanson, L., 1987. *Les minéralisations Zn Pb Ba Hg Cu de socle et de couverture carbonatée de la Province de Santander (Nord de l'Espagne)*. Thèse d'Etat, Université d'Orléans.
- Barbanson, L., 1993. *The carbonate hosted Zn-Pb deposit of West-santanderin type (North of Spain): tectonical control at regional and local scale*. En: Leach, D., Macquar, J., De Marsily, G., Rouvier, H., Thibieroz, J. (Eds.), *Mississippi Valley Type Deposits in Europe and North Africa, comparisons with North American Deposits, constraints on modelling paleocirculations*. Proceeding Workshop MVT, 15-27.
- Barbanson, L., En-Naciri, A., Chauvet, A., Badra, L., Sizaret, S., Chen, Y., Essalhi, M., Branquet Y., 2010. *Aportación de la mineralogía a la actividad minera: muestreo, distribución de subproductos valiosos (Ge, Au, Ag, Nb), análisis de textura*. En: Loredó, J. (Ed.), *Nuevos retos en la prospección e investigación de los recursos minerales*. Libro Homenaje al profesor Jesús García Iglesias, Oviedo, ISBN 978-84-614-4631-5, pp. 81-126.

- Capitán A., Nieto J. M., Sáez, R., Almodóvar, G. R., 2003 Caracterización textural y mineralógica del gossan del Filón Sur (Tharsis, Huelva). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 26: 45-58.
- Charles, N., Choulet, F., Sizaret, S., Chen, Y., Barbanson, L., Ennaciri, A., Badra, L., Branquet, Y., 2016. Internal structures and dating of non-sulphide Zn deposits using rock magnetism: Insights from the Moroccan High-Atlas. *Mineraet alm Deposita*, 51(1):151-175.
- Dunlop D. J., Özdemir Ö., 1997. *Rock Magnetism: fundamentals and frontiers*. Cambridge University Press, United Kingdom.
- Essalhi M., 2009. *Application de l'étude du magnétisme des roches à la compréhension des gisements*. Tesis Doctoral inédita, Université d'Orléans, Francia.
- Essalhi, M., Sizaret, S., Barbanson, L., Chen, Y., Branquet, Y., Panis, D., Camps, P., Rochette, P., Canals A., 2009. Track of fluid paleocirculation in dolomite host rock at regional scale by the Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS): An example from Aptian carbonates of La Florida (Northern Spain). *Earth and Planetary Science Letters*, 277(3-4):501-513.
- Essalhi, M., Sizaret, S., Barbanson, L., Chen, Y., Lagroix, F., Demory, F., Nieto, J. M., Sáez, R., Capitán, M.A., 2011. A case study of the internal structures of gossans and weathering processes in the Iberian pyrite belt using fabrics and paleomagnetic dating. *Mineraet alm Deposita*, 46: 981-999.
- Hrouda, F., 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Surveys in Geophysics*, 5(1): 37-82.
- Li, G., Sizaret, S., Barbanson, L., Branquet, Y., Chen, Y., Wang, B., Wu, G., Gu, L., Shu, L., 2014. Initial geometry and paleoflow reconstruction of the Yamansu skarn-related iron deposit of eastern Tianshan (China) from paleomagnetic and magnetic fabrics investigations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 93: 1-14.
- Mathé, P., Rochette, P., Vandamme, D., Colin, F., 1999. Volumetric changes in weathered profiles: iso-element mass balance method questioned by magnetic fabric. *Earth and Planetary Science Letters*, 167: 255-267.
- Sáez, R., Pascual, E., Toscano, M., Almodovar, G. R., 1999. The Iberian type of volcano-sedimentary massive sulphide deposits. *Mineraet alm Deposita*, 34: 549-570.
- Sizaret, S., Chen, Y., Chauvet, A., Marcoux, E., Touray, J. C., 2003. Magnetic fabrics and fluid flow directions in hydrothermal systems. A case study in the Chaillac Ba-F-Fe deposits (France). *Earth and Planetary Science Letters*, 206: 555-570.
- Tarling, D. H., Hrouda, F., 1993. *The magnetic anisotropy of rocks*. Chapman & Hall, Londres, UK.