



## TÍTULO

**ESTUDIO MINERALÓGICO DE MINERALIZACIONES RICAS  
EN MAGNETITA ASOCIADAS A YACIMIENTOS DE  
SULFUROS MASIVOS DE LA FAJA PIRÍTICA IBÉRICA**

## AUTORA

**Irene Úbeda Escribano**

	<b>Esta edición electrónica ha sido realizada en 2016</b>
Director	Gabriel Ruiz de Almodóvar
Tutor	Reinaldo Sáez Ramos
Curso	<i>Máster Oficial en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales</i>
ISBN	978-84-7993-696-9
©	Irene Úbeda Escribano
©	De esta edición: Universidad Internacional de Andalucía
Fecha documento	2016



## Reconocimiento-No comercial-Sin 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 autor o el licenciadore (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra).
- **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.
  
- *Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.*
- *Alguna de estas condiciones puede no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.*
- *Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.*

# Estudio mineralógico de mineralizaciones ricas en magnetita asociadas a yacimientos de sulfuros masivos de la Faja Pirítica Ibérica

Irene Úbeda Escribano

Tutor: Reinaldo Sáez Ramos



## Índice:

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>CONTEXTO GEOLÓGICO</b>	<b>3</b>
<b>METODOLOGÍA</b>	<b>9</b>
<b>TRABAJO DE CAMPO</b>	<b>9</b>
<b>TRABAJO DE LABORATORIO</b>	<b>9</b>
DIFRACCIÓN DE RAYOS X	9
MICROSONDA ELECTRÓNICA (EPMA)	9
<b>TRABAJO DE GABINETE</b>	<b>12</b>
<b>RESULTADOS</b>	<b>12</b>
<b>DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS:</b>	<b>12</b>
MGT1	12
MGT2	14
MGT3	15
MGT4	16
MGT5	18
MGT6	19
<b>DIFRACCIÓN RAYOS X</b>	<b>20</b>
<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA</b>	<b>21</b>
TABLAS DE RESULTADOS DE MICROSONDA ELECTRÓNICA	24
GRÁFICOS BINARIOS DE LAS MAGNETITAS	28
GRÁFICOS BINARIOS DE LAS HEMATITES	29
DIAGRAMAS TERNARIOS DE LAS MAGNETITAS	30
DIAGRAMAS TERNARIOS DE LAS HEMATITES	31
MEDIA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN MICROSONDA ELECTRÓNICA DE CAO, MGO Y MNO	32
<b>DISCUSIÓN</b>	<b>33</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>35</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>35</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>36</b>
<b>ANEXO 1. ESPECTROS OBTENIDOS CON DIFRACCIÓN DE RAYOS X.</b>	<b>¡ERROR!</b>
<b>MARCADOR NO DEFINIDO.</b>	
<b>MGT1</b>	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
<b>MGT2</b>	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
<b>MGT3</b>	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
<b>MGT4</b>	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
<b>MGT5</b>	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
<b>MGT6</b>	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

## Introducción

La magnetita tiene una composición química muy variable debido a que el oxígeno tiene capacidad de expandirse o contraerse para acomodar cationes de tamaño diferente a los del Fe (Lindsley et al 1976). Según Dare et al 2014 los patrones químicos de la magnetita para diferentes ambientes, están controlados por la composición del fundido o fluidos iniciales, las fases que cocrystalizan y parámetros fisicoquímicos como la temperatura o la fugacidad del oxígeno. Con estos antecedentes, se puede deducir que la composición química de la magnetita depende en gran medida de su origen, por tanto, el objetivo de este trabajo es hallar los mecanismos de formación de seis muestras de magnetita pertenecientes a diferentes depósitos VMS de la Faja Pirítica Ibérica, excepto una que pertenece a Brunswick 13, como muestra de contraste, a partir de sus diferencias composicionales e intentar establecer una relación entre el origen de la magnetita y su composición.

En los últimos tiempos, se ha descubierto que analizar la composición de la magnetita nos permite conocer diferentes aspectos de la formación de ésta, y cada vez más estudios se realizan sobre este tema debido a su gran interés científico. No existen trabajos publicados sobre composición de magnetita asociada a las mineralizaciones de sulfuros masivos de la Faja Pirítica Ibérica. Este trabajo representa la primera aproximación al análisis de su composición y del posible significado respecto a los contextos de depósito de las mineralizaciones relacionadas.

## Objetivos

Como ya se ha explicado en el apartado anterior el objetivo principal de este trabajo es hallar los mecanismos de formación de las magnetitas encontradas en los seis depósitos estudiados, a partir de las asociaciones minerales en que se integra y de su composición química.

## Contexto geológico

Como se ha explicado en la introducción, cinco de las seis muestras analizadas proceden de la Faja Pirítica Ibérica, situada en la zona Sudportuguesa del Macizo Varisco Ibérico.

De acuerdo con la vergencia de las estructuras, la Cadena Varisca del Macizo Ibérico se divide en dos ramas, la septentrional y la meridional, cuyo límite se sitúa en la Zona de Cizalla de Badajoz-Córdoba (Robardet et al, 1976; Burg et al, 1981). La rama septentrional consta de las zonas Cantábrica, Asturoccidental-leonesa, Centroibérica y de Galicia-Trás-os-Montes. La rama meridional consta de las zonas de Ossa-Morena y la Sudportuguesa. Véase Fig.1.

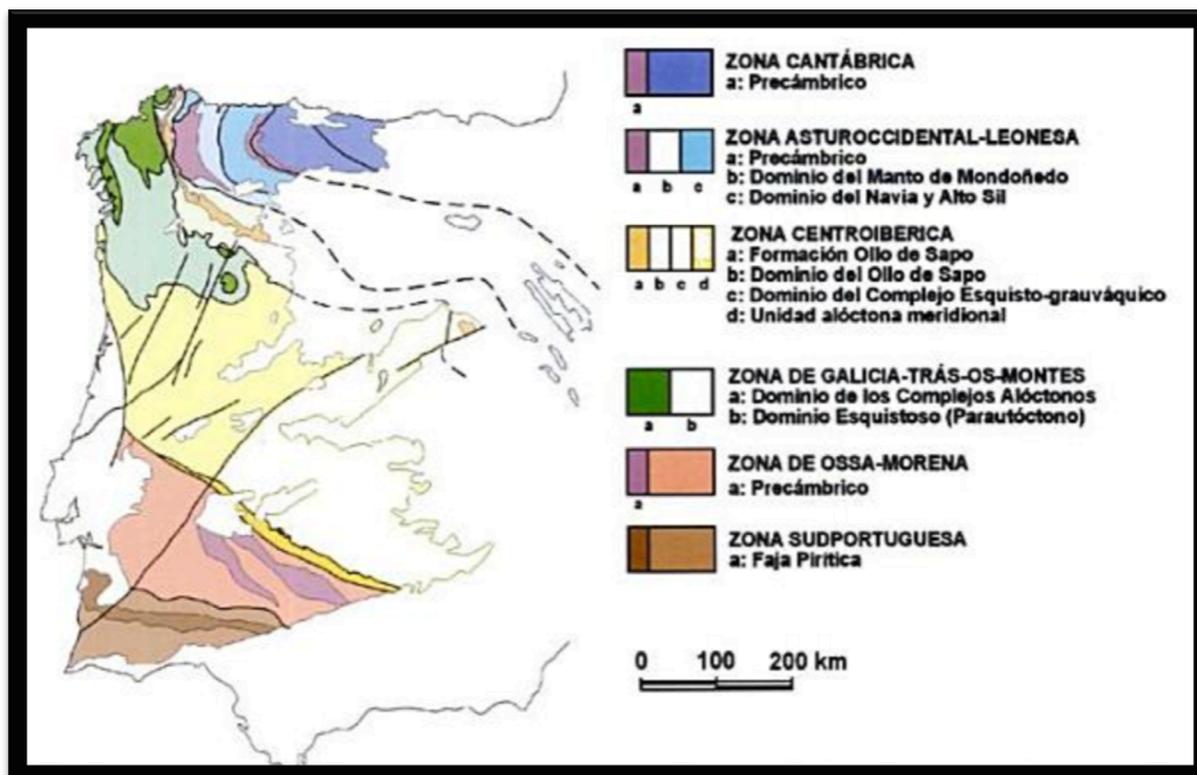


Fig.1: Esquema del Macizo Varisco Ibérico. Mapa extraído del libro *Geología de España*, ed. J.A. Vera (2004).

La zona Sudportuguesa, véase Fig.2, ocupa la parte SO del Macizo Ibérico y se le suele atribuir una posición externa en el orógeno (Oliveira et al, 1979). Esta zona por el N limita con la zona de Ossa-Morena mediante un contacto tectónico complejo interpretado como una sutura del orógeno. La zona Sudportuguesa posee rasgos atípicos en regiones de esta clase: desarrollo generalizado de foliación, abundante magmatismo y un gradiente térmico elevado, estos rasgos son debidos a que entre el Devónico terminal y el Viseense medio, se produjo un periodo extensional.

Entre la zona Sudportuguesa y la zona de Ossa Morena se sitúa un complejo de acreción en el que cabe distinguir:

- **Unidad Pulo do Lobo:** Formada por filitas, cuarcitas y escasos niveles volcánicos, está fuertemente deformada y contiene abundantes venas de cuarzo; en su interior aparecen basaltos de afinidad MORB (Munhá et al, 1983a; Giese y Bühn et al, 1993). Esta unidad ha sido interpretada como un prisma de acreción de una subducción activa durante el Devónico inferior-medio (Silva et al, 1990; Eden y Andrews et al, 1990).
- **Anfibolitas de Bejas-Acebuches:** Es una banda constituida principalmente por anfibolitas, que aflora al norte de la unidad Pulo do Lobo de forma casi continua a lo largo del límite entre la zona Sudportuguesa y la zona de Ossa-Morena. Las rocas que componen esta unidad son metabasaltos, metadoleritas, metagabros y escasas rocas ultramáficas serpentinizadas (Crespo-Blanc et al, 1989, Quesada et al, 1994 y Figueiras et al, 2002). Esta banda se considera ofiolítica (Dupuy et al, 1979; Munhá et al, 1986; Quesada et al, 1994; Giese y Bühn et al, 1993; Castro et al, 1996) y debió de obducir hacia el norte sobre la corteza continental de la zona Ossa-Morena

(Fonseca y Ribeiro et al, 1993). La deformación principal y el metamorfismo que presentan las rocas de esta unidad se desarrollaron durante la compleja evolución posterior a la obducción (Figueiras et al, 2002)

- **Unidades alóctonas del sudoeste de la zona Ossa-Morena:** Estas unidades aparecen como pequeños afloramientos en el dominio Beja-Évora, en el extremo sudoeste de la Zona de Ossa-Morena. Están formados por fragmentos ofiolíticos y rocas con metamorfismo de alta presión que afloran conjuntamente y forman imbricaciones tectónicas aparentemente trasladadas hacia el norte. Las rocas ofiolíticas provienen de un ámbito oceánico localizado entre las zonas Ossa-Morena y Sudportuguesa y las imbricaciones con alto metamorfismo de alta presión corresponden al margen continental adelgazado de la zona de Ossa-Morena, primera subducido y luego exhumado (Fonseca et al, 1999).
- **Anfibolitas de La Corte:** Rocas básicas intruidas en el margen continental adelgazado de la zona de Ossa-Morena. Afloran en el borde meridional de la zona Ossa-Morena, en la región de Aracena y están emplazadas en el interior de una sucesión de rocas continentales.

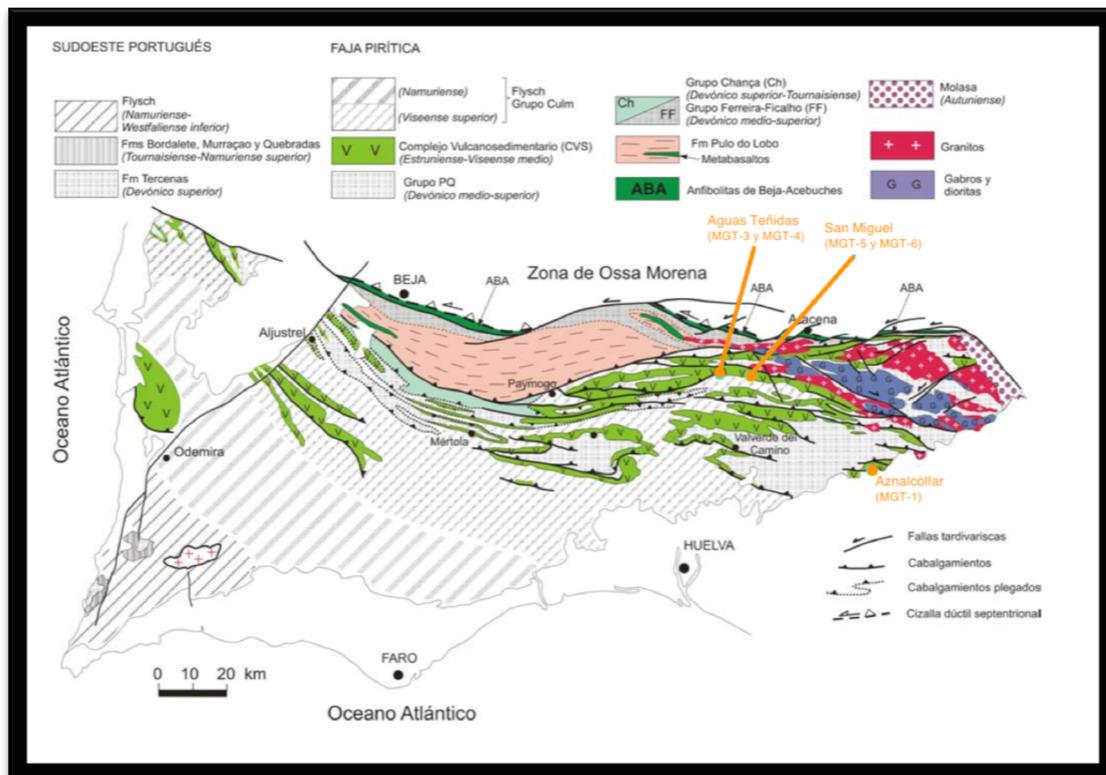


Fig.2: Esquema de la zona Sudportuguesa. Mapa extraído del libro *Geología de España*, ed. J.A. Vera (2004).

Mediante la fragmentación de la plataforma detrítica devónica, el abundante magmatismo y el elevado gradiente térmico en la corteza superior, se desarrolló la cuenca de la Zona Sudportuguesa en el Carbonífero basal, en el que se formaron los grandes depósitos de sulfuros masivos que caracterizan la Faja Pírica Ibérica. La Faja Pírica Ibérica es una de las unidades geotectónicas del Cinturón de plegamiento Hercínico en la Península Ibérica. La columna litológica

representativa de este dominio incluye tres unidades litológicas principales, que según el esquema propuesto por Schermerhorn, 1971, de muro a techo son:

- **Grupo Filitico y Cuarzítico (PQ):** Es la base de la serie estratigráfica regional e incluye todos los depósitos infrayacentes al CVS. La mayor parte de la columna estratigráfica del PQ está formada por pizarras negras con intercalaciones de niveles centimétricos de areniscas cuarzosas. Estos niveles se agrupan a veces en tramos lutítico-areniscosos de potencia métrica, con una relación arena/lutita igual a uno, que aparecen intercalados entre las pizarras (Sáez y Moreno et al, 1997). Hacia el techo de la unidad, la proporción arena /lutita se invierte, los niveles de areniscas cuarzosas aumentan de potencia a la vez que los granos de arena aumentan progresivamente de tamaño dando lugar a una secuencia areniscosa estrato y granocreciente. En su techo se pueden encontrar algunas lentes de caliza con fauna del Devónico Superior (Moreno y Sáez, 1990; Oliveira, 1990; Moreno et al, 1996; Sáez y Moreno, 1997).
- **Complejo Vulcano- Silíceo (CVS):** Lo encontramos concordantemente por encima del Grupo PQ y su litología es muy variable. Incluye gran diversidad de rocas volcánicas submarinas con composición desde félsica a máfica y sedimentos como pizarras, cuarcitas, grauvacas, calcáreas y cherts y es la unidad dónde se encuentran los depósitos de sulfuros de la región. El registro estratigráfico del CVS se divide en tres episodios volcánicos ácidos y dos básicos (Schermerhorn, 1971), El primer episodio de vulcanismo ácido (VA<sub>1</sub>) es esencialmente piroclástico y tiene una distribución muy irregular a escala regional. El segundo episodio ácido (VA<sub>2</sub>) es predominantemente subvolcánico y está representado por sills de escasa potencia intercalados en niveles pizarrosos. (Boulter, 1993a). El segundo episodio básico (VB<sub>2</sub>) tiene carácter local, y su representación en la columna estratigráfica es muy reducida. El techo de este ciclo está marcado por niveles discontinuos de jaspes, que a veces incluyen mineralizaciones de Mn, y por un nivel muy continuo de cineritas moradas. El tercer episodio ácido (VA<sub>3</sub>) está compuesto fundamentalmente por niveles pizarrosos y rocas vulcanodetríticas procedentes de la erosión de vulcanitas previamente depositadas (Moreno, 1987). Los depósitos del techo del CVS pasan de manera gradual a formar parte de la secuencia pizarrosa de la base del grupo Culm (Serie Pizarrosa Basal de Moreno, 1987; Moreno y Sequeiros, 1989). La edad de este complejo está comprendida entre el Fameniense terminal y el Viseense medio.
- **Grupo Culm:** Lo encontramos concordante y por encima del complejo vulcanosedimentario. En este grupo encontramos el estrato Flysch que es una sucesión de capas finas y homogéneas de grauvacas y pizarras del Viseense tardío. Este grupo comprende todas las rocas sedimentarias postvolcánicas de la Faja Pirítica Ibérica. Está compuesto por tres unidades estratigráficas: la Serie Pizarrosa Basal, la formación turbidítica de facies Culm s.s. y la Unidad arenosa de plataforma somera (Moreno, 1987, 1993). La Serie Pizarrosa Basal es una secuencia mixta vulcanodetrítica y pizarrosa que incluye las epiclastitas del techo del VA<sub>3</sub> y las pizarras con *Posidonia becherii* del muro de la formación turbidítica. (Oliveira y Wagner-Gentis,

1983). La formación turbidítica de facies Culm s.s. es una secuencia turbidítica de pizarras, litarenitas y escasos conglomerados, de varios miles de metros de potencia, que representa el flysch de la orogenia varisca en la región (Moreno, 1987, 1988; Moreno y Sáez, 1989). En la parte portuguesa de la FPI, el Grupo Culm es denominado Grupo Flysch del Baixo Alentejo. Está constituido por tres unidades turbidíticas (Formaciones Mértola, Mira y Brejeira) que incluyen paquetes pizarrosos Oliveira et al. (1979).

Todas ellas limitadas por contactos concordantes marcados por dos paquetes esencialmente pizarrosos (Colmenero et al., 2002).

A escala regional, los yacimientos se distribuyen, en dos bandas, una al Sur y otra Norte (Routhier et al, 1980; Sáez et al, 1999). En la banda Norte predominan las rocas volcánicas y los depósitos son numerosos pero, en general, de tamaño pequeño y mediano, mientras que en la banda Sur predominan las rocas sedimentarias y hay pocos depósitos pero de grandes dimensiones.

La morfología de los depósitos está compuesta por una parte superior masiva, de geometría tabular a lenticular y congruente con la estratificación, y otra parte inferior con mineralización diseminada o de stockwork. La principal roca encajante son las pizarras negras (Strauss, et al, 1970; Sáez et al, 1996; Tornos et al, 1998, Almodóvar et al, 1998, Santos et al, 1993, Ruiz et al, 2001) aunque también es frecuente encontrar niveles silíceos a techo de los depósitos masivos (Barriga y Fyfe et al, 1988; Tornos et al, 1998; Relvas et al, 2000) y secuencias magmáticas félsicas a muro de los sulfuros masivos (Lécolle et al, 1972, 1977; Leistel et al, 1994, 1998a; Sáez et al, 1996, 1999),

La composición mineralógica de estos depósitos es esencialmente pirita y, en menor medida, esfalerita, galena, calcopirita y tetraedrita. Como componentes minoritarios, se encuentran arsenopirita, pirrotita, casiterita, sulfosales de Cu-Pb y de Bi-Pb, estannita, barita, magnetita, electrum, cobaltita y un número muy elevado de especies minerales menos comunes (Routhier et al, 1980; Mitsuno et al, 1988; Kase et al, 1990; García de Miguel et al, 1990; Marcoux y Moëlo et al, 1993; Gaspar y Pinto et al, 1994; Marcoux et al, 1996; Almodóvar et al, 1998; Gaspar et al, 2002; Relvas et al, 2002).

Hay tres tipos de mineralización, según las proporciones de los componentes mayoritarios: pirítica, cobriza y polimetálica. Las zonas ricas en Cu se suelen concentrar sobre todo en los stockworks y en la parte inferior y central de los sulfuros masivos, mientras que el Zn y Pb tienden a hacerlo en las zonas periféricas (Routhier et al, 1980; Almodóvar et al, 1998; Leistel et al, 1998a Relvas et al, 2002).

La alteración hidrotermal relacionada con las mineralizaciones es clorítica en la zona central del sistema y sericítica en la periferia (García Palomero et al, 1977; Routhier et al, 1980; Plimer y Carvalho et al, 1982; Barriga y Relvas et al, 1993; Toscano et al, 1993; Almodóvar et al, 1995; Pascual et al, 1996, 1997a; Leistel et al, 1998a; Sánchez-España et al, 2000). La alteración sericítica tiende a estar asociada a las fases iniciales del sistema y a las mineralizaciones de baja temperatura,

mientras que la clorítica se asocia a las fases más tardías y de mayor temperatura (Almodóvar et al, 1998; Sáez et al, 1999). Existe también alteración silíceo carbonatada, en coincidencia espacial con cualquiera de las dos anteriores. La alteración silíceo carbonatada se relaciona con removilización de sílice a baja temperatura y depósito en las partes superiores del sistema (Leistel et al, 1998b; Barriga et al, 1983; Barriga y Fyfe et al, 1998; Sáez et al, 1999; Relvas et al, 2000) mientras que la alteración carbonatada se relaciona con procesos de ebullición parcial (Toscano et al, 2000), y carbono de procedencia orgánica, movilizado por los fluidos hidrotermales a partir de pizarras negra ricas en materia orgánica y de bicarbonatos marinos (Tornos et al, 1998; Toscano et al, 2000; Sánchez-España et al, 2003).

Además de la alteración hidrotermal asociada a las mineralizaciones, existe una alteración hidrotermal regional, de baja temperatura y de tipo estrato-ligada, que afecta a la totalidad de las rocas permeables del CVS (Munhá y Kerrich et al, 1981; Munhá et al, 1986; Barriga et al, 1990; Sáez et al, 1996, 1999).

El contexto tectónico en que se produjo el depósito de los sulfuros masivos es la etapa extensional que tuvo lugar entre el Devónico terminal y el Carbonífero basal, que favoreció el ascenso de magmas de composición diversa y la formación de sistemas hidrotermales (Moreno et al, 1996; Sáez et al, 1996; 1999; Tornos et al, 2002)

Se distinguen tres tipos de metamorfismo en la Zona Sudportuguesa: hidrotermal, de contacto y regional. El metamorfismo hidrotermal fue causado por la interacción entre el agua marina y las rocas volcánicas, desarrollado mientras tenía lugar la actividad ígnea (Munhá et al, 1990). El metamorfismo regional se asocia a la deformación, y el de contacto a cuerpos intrusivos máficos precinemáticos y a plutones de diversa naturaleza postcinemáticos.

Para una descripción más detallada se recomienda consultar Bernard and Soler 1974; Strauss and Madel 1974; Carvalho et al. 1976; Strauss et al. 1977; Routhier et al, 1980; Carvalho et al, 1979; Barriga and Carvalho et al, 1983; Barriga et al, 1990; Ruiz de Almodóvar and Sáez et al, 1992; Saéz et al, 1996; 1999; Leistel et al, 1998<sup>a</sup>; Tornos et al, 2006.

Las muestras seleccionadas para el estudio, forman parte de depósitos VMS que pertenecen estratigráficamente en el Complejo Vulcanosedimentario. En la Fig.2 se puede observar su situación en la Faja Pirítica Ibérica.

La muestra MGT-1 fue obtenida a techo de los sulfuros masivos y pizarras negras encajantes en Los Frailes, Aznalcóllar. La magnetita en esta muestra aparece asociada con galena y piritita.

En cuanto a las muestra MGT-3 y MGT-4 pertenecientes a Aguas Teñidas, la muestra MGT-3 forma parte del stockwork del depósito y la MGT-4 pertenece a la zona cercana al muro de la mineralización masiva. La magnetita en estas muestras aparece asociada a piritita y calcopiritita, y a óxidos de hierro y venas finas de barita, respectivamente.

Por otra banda, las muestras MGT-5 y MGT-6 pertenecientes a la mina de San Miguel, forman parte del stockwork del depósito. En la primera la magnetita aparece asociada a piritita, y en la segunda a piritita, cuarzo y hematites.

Como muestra de contraste, se ha estudiado la muestra MGT2 perteneciente al techo de la mineralización masiva del depósito de Brunswick 13 (MGT-2), situado en Canadá, la magnetita de la cual está asociada a galena y esfalerita. Para una descripción más detallada, se recomienda consultar Peter et al, 2003 parte 1 y parte 2.

## Metodología

### Trabajo de campo

Las muestras han sido proporcionadas por el equipo de la UHU que estudia las mineralizaciones del sulfuros masivos de la FPI en el marco del Proyecto PS-ANOXIA.

### Trabajo de laboratorio

Las muestras de magnetita se estudiaron primero con lupa de 10 aumentos y el microscopio electrónico que lleva incorporado la microsonda, después se analizó su composición química con microsonda y, simultáneamente, parte de estas muestras fueron trituradas y sometidas a una difracción de rayos X para comprobar que era correcta la identificación mineralógica llevada a cabo, tanto con lupa como con microscopía óptica.

### Difracción de rayos X

Se prepararon las muestras triturando con un mortero de ágata una porción de cada muestra hasta obtener granos de unas 100µm. Primero se golpearon las muestras verticalmente y, después, con movimientos circulares. Posteriormente, se pasaron estas muestra por un tamiz de 75 µm hasta conseguir una cantidad de 1cm<sup>3</sup> y, por último, se enviaron a los laboratorios de los Servicios Centrales de Investigación de la Universidad de Huelva, para hacer difracción de rayos X. El difractor de rayos X utilizado es de la marca BRUKER modelo D8 Advance y está dotado de una fuente rayos X con ánodo de cobre de 2 KW de potencia, de alta estabilidad, y un detector de centelleo.

Geometría de trabajo: Theta-2Theta (Geometría Bragg-Brentano).

En cuanto a las condiciones de trabajo, el rango de barrido fue de 3º a 65º 2THETA, a una velocidad de 2º/minuto y la fuente de RX operó a 40Kv-30mAmp.

También se comprobó el magnetismo de todas estas muestras acercándolas a un imán, dando como resultado todas un fuerte magnetismo.

### Microsonda electrónica (EPMA)

Parte de cada una de estas muestras, se corto utilizando una cortadora y, posteriormente, se pulieron a mano con polvo de carborundo de 800 µm, 600 µm, 400 µm y 230 µm y, con una pulidora Struers Dap-6 con paños de 6 y 3 µm. Una vez pulidas, las muestras se estudiaron mediante una microsonda electrónica JEOL modelo JXA-8200 SuperProbe equipada con 4 espectrómetros WDS y uno EDS (Si(Li)). Dos espectrómetros WDS son normales de 4 cristales y detector de flujo, y dos de alta intensidad con 2 cristales y detector sellado de Xe. El sistema de vacío está equipado con bomba turbomolecular y bomba iónica en el cañón (posibilidad de operar con W o LaB6). También consta de detectores de electrones secundarios y retrodispersados y un detector de catodoluminiscencia. Además, tiene capacidad

de análisis desde el B al U, imágenes compo, topo, cátodo y mapas de RX. Cada punto se sometió a un análisis de entre 15 y 20 segundos y el resto de las condiciones de trabajo que se utilizaron se muestran en las Tablas 1a y 1b que se muestra a continuación:

Standard data								
Name	Element	Standard name	Mass(%)	ZAF	Fac.	Z	A	F
1		SiO2	M8-Wollast	50,94	3,4363	4,4277	0,7746	1,002
2		ZnO	M2-ZnO	99,99	0,0636	0,0641	0,9929	1
3		TiO2	M13-PTiK	40,33	0,5507	0,5906	0,9324	1
4		CaO	M8-Wollast	48	0,88	0,941	0,9352	1
5		Al2O3	016-Al2O3	99,99	4,4945	5,8915	0,7629	1
6		CuO	S0-Cu-Sil	125,177	0,0956	0,0966	0,9901	1
7		MnO	020-MnO	99,99	0,2888	0,2938	0,9831	1
8		P2O5	M13-PTiK	35,87	2,8588	3,4764	0,8183	1,005
9		MgO	015-MgO	100	5,4677	7,8316	0,6982	1
10		NiO	024-NiO	99,99	0,1201	0,1213	0,9898	1
11		FeO	021-Fe2O3	89,9722	0,214	0,217	0,9864	1
12		V2O3	032-CaVO	51,95	0,437	0,4686	0,9326	1
13		Ga2O3	S1-GaP	93,0748	7,161	11,6514	0,6146	1
14		Cr2O3	019-Cr2O3	99,99	0,3636	0,3706	0,9811	1
15		CoO	023-CoO	99,99	0,1665	0,1685	0,9878	1

Tabla 1a. Tabla donde se muestran las condiciones de trabajo utilizadas en la microsonda electrónica referentes a los estándares de referencia.

Standard Intensity of WDS								
Name	Element	Curr.(A)	Net(cps)	Bg-(cps)	Bg+(cps)	S.D.(%)	Date	Hour
1	Si	2,06E-08	10124,2	262,9	113,9	0,52	05-jun-15	09:23
2	Zn	2,05E-08	7233,8	228,3	159,6	0,76	05-jun-15	09:32
3	Ti	2,06E-08	1476,6	8,8	5,8	1,65	05-jun-15	09:25
4	Ca	2,06E-08	4163,5	31,5	28	0,81	05-jun-15	09:23
5	Al	2,05E-08	20350,7	142,6	52,3	0,36	05-jun-15	09:14
6	Cu	2,05E-08	11672,4	301,8	154,4	0,49	05-jun-15	09:34
7	Mn	2,05E-08	9071,1	33,8	51,4	0,67	05-jun-15	09:18
8	P	2,06E-08	1168,9	7,4	6,4	1,32	05-jun-15	09:25
9	Mg	2,05E-08	17043,2	27,2	26,8	0,4	05-jun-15	09:12
10	Ni	2,05E-08	9764,4	102	84,8	0,65	05-jun-15	09:28
11	Fe	2,06E-08	8288,6	42	45,8	0,7	05-jun-15	10:14
12	V	2,05E-08	431	6,5	5,5	1,78	05-jun-15	09:30
13	Ga	2,05E-08	5790,3	68,9	40,1	0,68	05-jun-15	09:33
14	Cr	2,05E-08	8820,2	82,2	66,4	0,68	05-jun-15	09:17
15	Co	2,05E-08	9519,3	56,5	65,2	0,53	05-jun-15	09:26

Tabla 1b. Tabla donde se muestran las condiciones de trabajo utilizadas en la microsonda electrónica referentes a los estándares de intensidad de WDS.

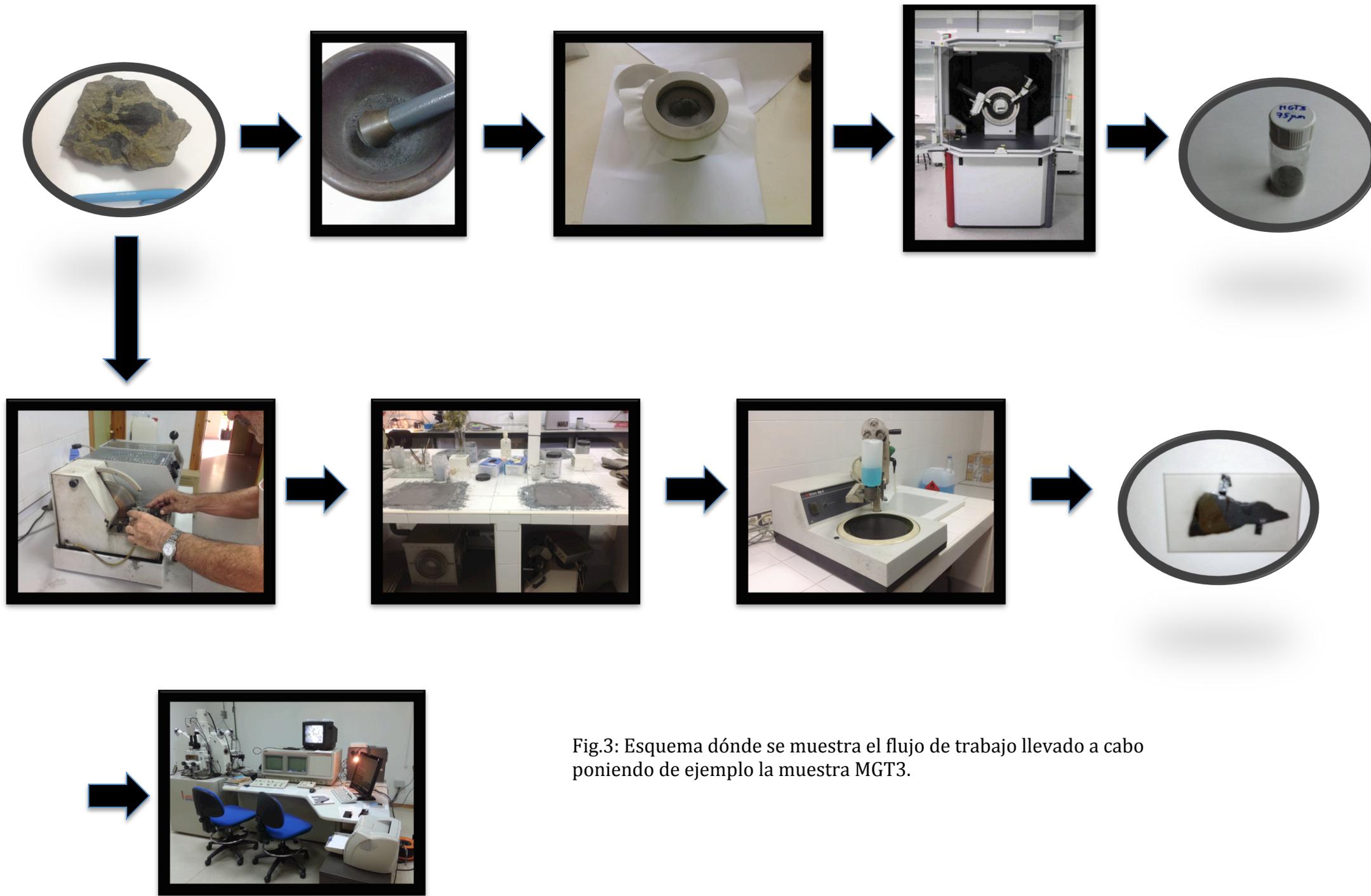


Fig.3: Esquema dónde se muestra el flujo de trabajo llevado a cabo poniendo de ejemplo la muestra MGT3.

## Trabajo de gabinete

Los resultados de microsonda han sido tratados estadísticamente para establecer los parámetros significativos y las correlaciones entre los componentes químicos analizados. Mediante la matriz de Pearson se han seleccionado los elementos de la magnetita y hematites más interesantes para analizar su composición y compararla entre las diferentes muestras estudiadas. Una vez seleccionados los elementos más interesantes, se han analizado realizando diagramas binarios y ternarios, además de calcular la mediana y la desviación estándar de los elementos de la magnetita y hematites de cada muestra.

Tanto, la matriz de Pearson como los gráficos binarios y los de mediana y desviación estándar se han realizado con el programa Excel, mientras que los gráficos ternarios se han realizado con el programa DeltaGraph 5.

## Resultados

### Descripción de las muestras:

#### MGT1

- **Localización:** Techo de sulfuros masivos y pizarras negras encajantes en *Los Frailes, Aznalcóllar*.
- **Descripción macroscópica:** La muestra presenta un bandeo sedimentario de color oscuro (negra con manchas rojizas) Véase Fig.4
- **Descripción microscópica:** Se observan dos minerales muy parecidos, uno es la magnetita que se distingue porque sus granos son más redondeados, y la hematites, caracterizada por tener un hábito tabular que define una foliación. La magnetita contiene inclusiones de calcopirita y galena, mientras que la hematites no tiene inclusiones.  
Si observamos la Fig.5 se deduce que primero se formó la hematites y, posteriormente, la magnetita pero las dos son anteriores a la deformación de la roca.
- **Mineralogía:** En muestra de mano (Fig.4) sólo se distingue magnetita, que es el componente mayoritario. Las imágenes de electrones retrodispersados obtenidas mediante la Microsonda (Fig. 5), permiten, además de la distinción entre magnetita y hematites, diferenciar otros minerales significativos como galena y calcopirita incluidas en los granos de magnetita
- **Descripción textural:** Presenta fábrica planar y foliación. También se observa una textura porfiroblástica, con cristales de magnetita que engloban pequeñas inclusiones de calcopirita y galena.



Fig.4: Aspecto macroscópico de la muestra MGT1.

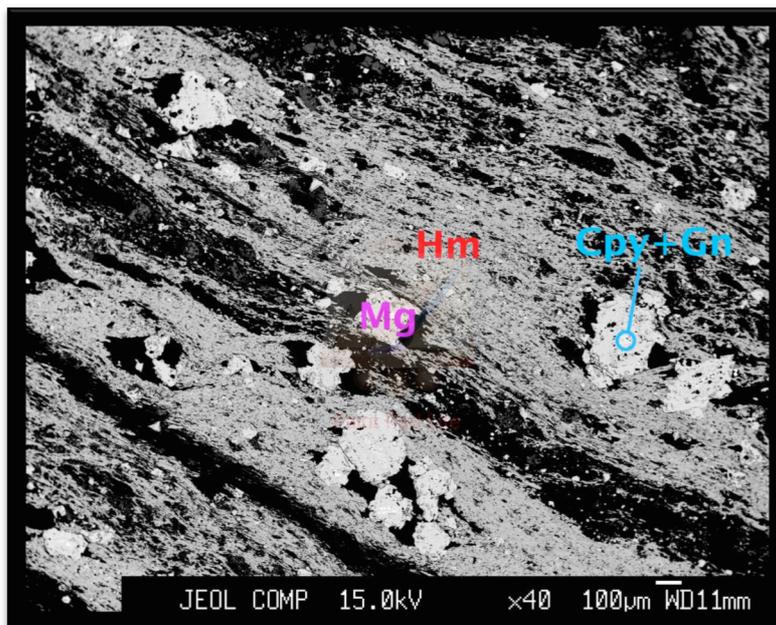


Fig. 5: Aspecto microscópico de la muestra MGT1. Mg es la magnetita, Hm es la hematites y Cpy+Gn son las inclusiones de calcopirita y galena que contiene la magnetita. La escala gráfica está en la esquina inferior derecha encima de la W.

## MGT2

- **Localización:** Techo de sulfuros masivos en *Brunswick 13*, Canadá.
- **Descripción macroscópica:** Roca laminada que presenta un bandeo composicional, con unas bandas negras y otras con tonalidades marrones.(Véase Fig. 6).
- **Descripción microscópica:** La muestra es bastante homogénea, se puede observar la magnetita bastante corroída y con inclusiones de galena y esfalerita (Fig. 7).
- **Mineralogía:** Las bandas negras están compuestas de magnetita, mientras que las bandas marrones son otros óxidos de hierro, muy probablemente, hematites. La microsonda pone de manifiesto, además de la magnetita, la existencia de galena y esfalerita.
- **Descripción textural:** Presenta fábrica planar y textura bandeada.



Fig.6: Aspecto macroscópico de la muestra MGT2.

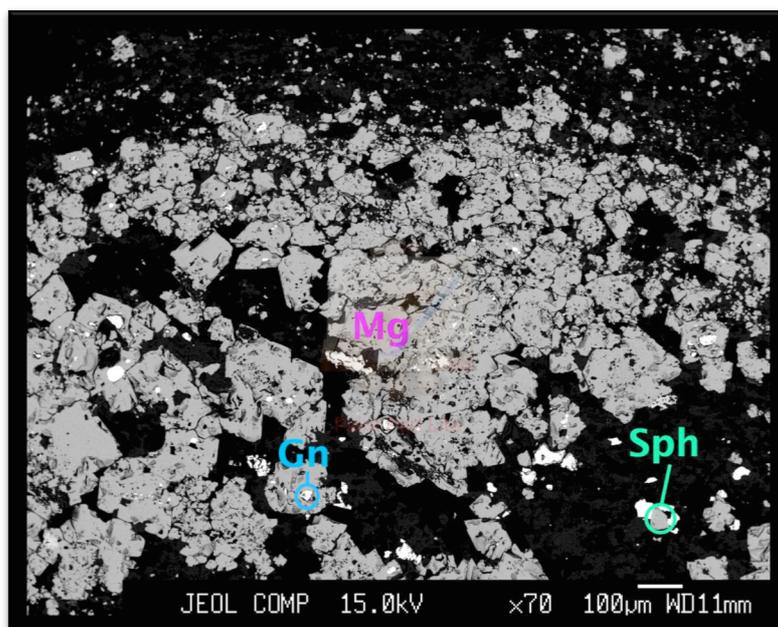


Fig.7: Aspecto microscópico de la muestra MGT2. Mg es la magnetita, Gn es la galena y Sph es la esfalerita. La escala gráfica está en la esquina inferior derecha encima de la W.

### MGT3

- **Localización:** Magnetita de *Aguas Teñidas Este*.
- **Descripción macroscópica:** Brecha compuesta por fragmentos de hematites englobados y corroídos por pirita masiva y calcopirita. La misma asociación rellena pequeñas fisuras a través de los fragmentos de hematites. (Fig.8).
- **Descripción microscópica:** En el microscopio también se observa una brecha compuesta por fragmentos de hematites cementados y corroídos por pirita masiva y calcopirita. (Fig.9).
- **Mineralogía:** Los clastos están formados por hematites, mientras que el relleno de las fisuras y la matriz están formados mayoritariamente por pirita y, en menor medida, por calcopirita.
- **Descripción textural:** Presenta estructura de brecha con clastos de tamaño centimétrico y bordes festoneados. Las texturas que se distinguen son la porfídica formada por cristales gruesos de hematites, la porfidoblástica formada por cristales de pirita y calcopirita que engloban los cristales de hematites y la jig-saw.



Fig.8: Aspecto macroscópico de la muestra MGT3.

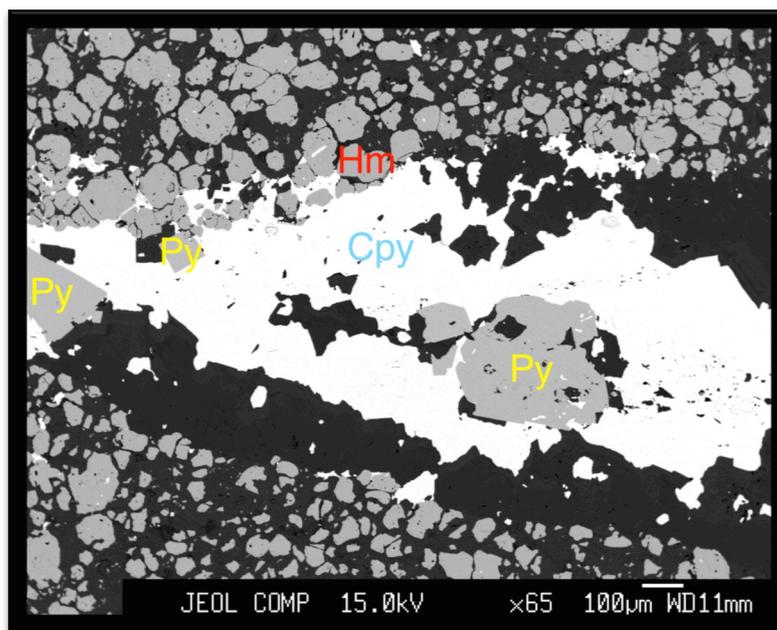


Fig.9: Aspecto microscópico de la muestra MGT3. Hm es la hematites, Cpy es la calcopirita y Py es la pirita. La escala gráfica está en la esquina inferior derecha encima de la W.

#### MGT4

- **Localización:** Magnetita masiva perteneciente al sondeo AGT-60/173,9 de Aguas Teñidas Este.
- **Descripción macroscópica:** Roca con textura porfídica donde se observan cristales aciculares de hematites y pequeñas inclusiones de otros óxidos de Fe. Véase Fig.10.
- **Descripción microscópica:** Se observan cristales aciculares de hematites desorientados y cementado. Éstos están travesados por una fisura rellena de barita o carbonato. Véase Fig.11.

- **Mineralogía:** La muestra está compuesta esencialmente por hematites con pequeñas cantidades de otros óxidos de Fe, probablemente sílice microcristalina (chert), se observan venas finas de barita cortando a la asociación anterior.
- **Descripción textural:** Roca cementada que presenta una textura porfídica con granos gruesos de hematites y otros óxidos de Fe. También se observan venas finas de barita travesando la matriz.



Fig.10: Aspecto macroscópico de la muestra MGT4.

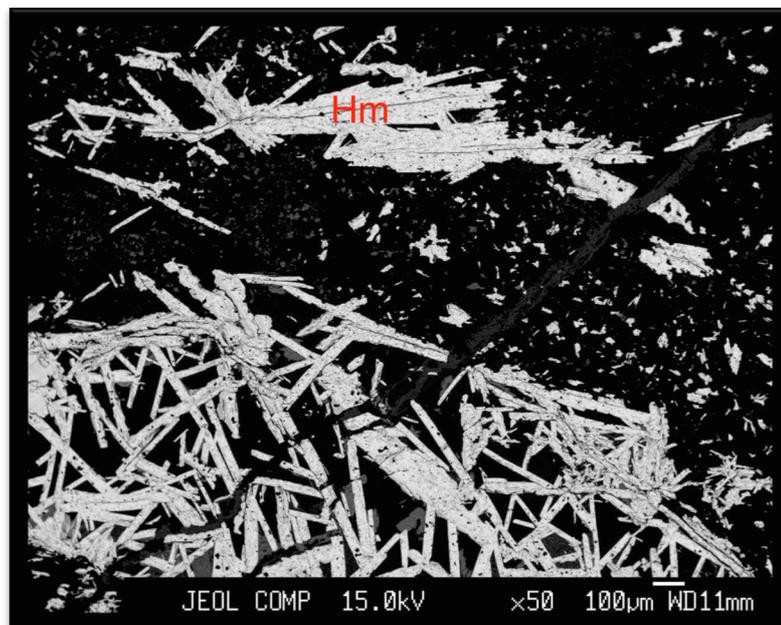


Fig.11: Aspecto microscópico de la muestra MGT4. Hm es la hematites. La escala gráfica está en la esquina inferior derecha encima de la W.

## MGT5

- **Localización:** Magnetita perteneciente al sondeo SM-14-01/42,2 de San Miguel.
- **Descripción macroscópica:** Fragmento de un testigo de sondeo en el que una roca rica en magnetita está cortada por fracturas rellenas de sulfuros, es decir, es una roca perteneciente al stockwork del depósito (Fig.12).
- **Descripción microscópica:** Se observan esencialmente dos minerales: hematites, los cristales de la cual son aciculares y están desorientados y magnetita, los cristales de la cual son subredondeados y se encuentran entre los cristales de magnetita (Fig.13).
- **Mineralogía:** Magnetita, hematites, pirita y un mineral negro con brillo vítreo entre la magnetita y la pirita.
- **Descripción textural:** La magnetita se presenta con dos tipos texturales: microcristalina y masiva, y como cristales idiomorfos. La pirita y la calcopirita, junto a la magnetita de grano grueso, dan lugar a una textura porfírica con cristales de orden milimétrico incluidos en la matriz de magnetita microcristalina.



Fig.12: Aspecto macroscópico de la muestra MGT5.

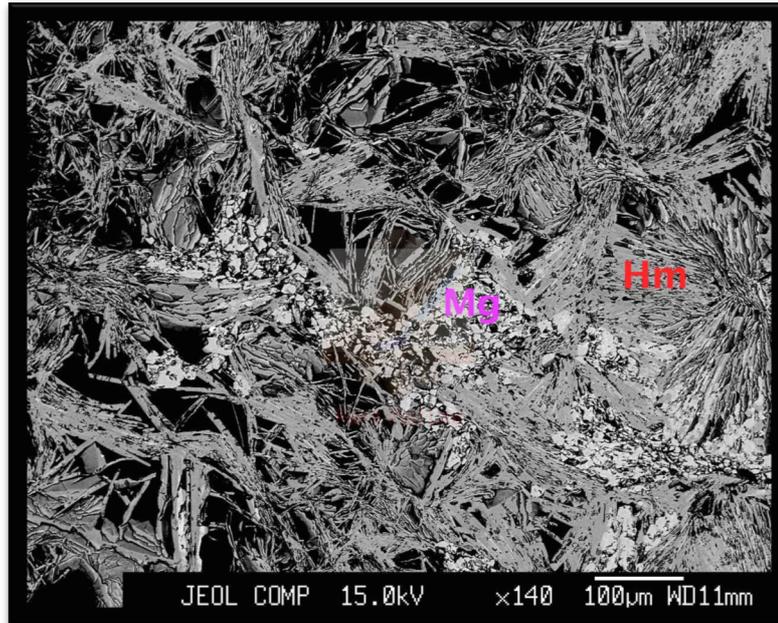


Fig.13: Aspecto microscópico de la muestra MGT5. Mg es la magnetita y Hm es la hematites. La escala gráfica está en la esquina inferior derecha encima de la W.

#### MGT6

- **Localización:** Magnetita precoz perteneciente al sondeo SM-14-01/36,3 de San Miguel.
- **Descripción macroscópica:** Fragmento de un testigo de sondeo constituido por magnetita y fracturas rellenas de sulfuros y cuarzo cortando a la magnetita. (Fig.14).
- **Descripción microscópica:** Se observan cristales aciculares desorientados de hematites siendo reemplazados por granos subredondeados de magnetita. También se observan granos grandes de pirita fisurados y con pequeñas inclusiones de feldespato. (Fig. 15)
- **Mineralogía:** Magnetita, pirita, cuarzo y hematites.
- **Descripción textural:** La magnetita presenta una textura masiva, mientras que la de la pirita está fracturada con pequeñas inclusiones de feldespato.



Fig.14: Aspecto macroscópico de la muestra MGT6.

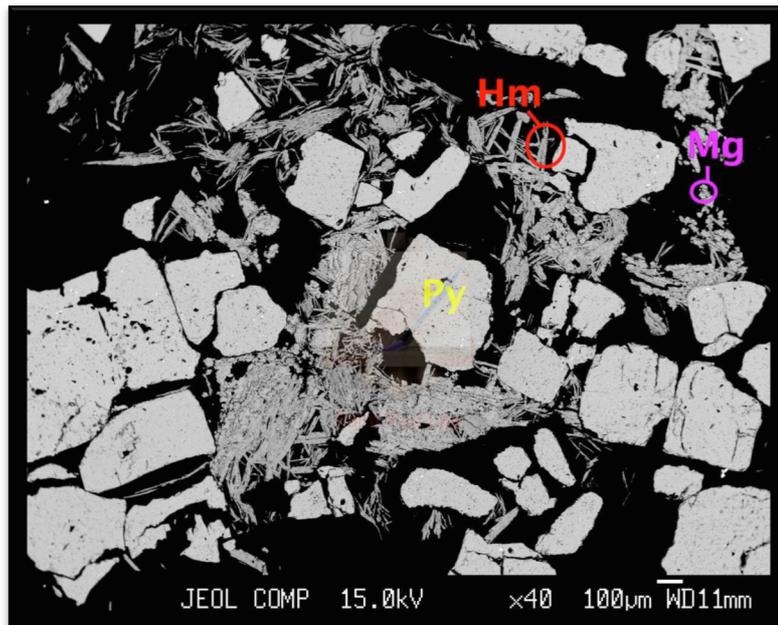


Fig.15: Aspecto microscópico de la muestra MGT6. Mg es la magnetita, Hm es la hematites y Py es la pirita. La escala gráfica está en la esquina inferior derecha encima de la W.

### Difracción rayos X

Después de analizar las muestras estudiadas con difracción de rayos X, y analizar los espectros obtenidos, se obtuvieron los minerales que se muestran en la Tabla 2. Los minerales están ordenados de mayor a menor cantidad y las muestras que contienen xxx significa que son minerales que no se han podido identificar.

Muestra	Minerales encontrados
MGT1	Xxx, hematites, cuarzo y clorita
MGT2	Clorita, cuarzo, magnetita y moscovita
MGT3	Siderita y pirita
MGT4	Cuarzo, hematites, clorita y moscovita
MGT5	Clorita, hematites y xxx
MGT6	Clorita, cuarzo, hematites y dolomita

Tabla2. Tabla resumen de los minerales identificados mediante difracción de rayos X.

### Composición química

Después de realizar la matriz de Pearson, se obtuvo correlaciones significativas positivas entre el Ca y Mg, el Ca y Mn y el Mg y Mn, mientras que las correlaciones significativas negativas son las que hay entre el Fe y el Ca, el Fe y el Mn y el Fe y Mg. Por tanto, los elementos más interesantes para analizar la composición de las magnetitas y hematites, y compararlas entre las diferentes muestras estudiadas son el Fe, Mg, Mn y Ca. Las correlaciones positivas indican que esos dos elementos se suelen incorporar conjuntamente en la estructura de la magnetita, mientras que las correlaciones negativas indican que uno de esos elementos se substituye por el otro y viceversa. A continuación, en las Fig. 16, Fig.17, Fig.18 y Fig.19 se muestran los diagramas binarios y ternarios realizados para comparar estos elementos. Posteriormente, para completar el estudio con microsonda electrónica, se han calculado la media y la desviación estándar del Mg, Mn y Ca para comprobar la fiabilidad de las mediciones.

Primeramente, en las tablas 3 y 4, se observa que la muestra MGT4 no contiene hematites y que en la muestra MGT2 no se ha encontrado magnetita, debido a que la magnetita cierra entorno al 90% mientras que la hematites lo hace entorno al 95%. Por otra banda, en la muestra MGT6 sólo se ha encontrado un punto de hematites con bajos contenidos en Mg, Mn y Ca, y altos contenidos en Fe. Cómo sólo se ha obtenido un punto, no se ha analizado en los gráficos posteriores (Fig.16, 17,18 y 20).

A partir de las tablas 3 y 4, se han realizado los gráficos binarios y ternarios de las Fig.16, 17, 18 y 19. Por lo general, en estos gráficos, se observa que en los depósitos VMS estudiados, tanto la magnetita como la hematites, contienen entre un 70 y 100% de Fe de la composición y entre el 1 y el 30% restante están formadas por, Ca, Mg y Mn. Como elementos minoritarios, se han observado Co, Si, Ti, Zn, Al, P, V en la gran mayoría de puntos analizados. Y por último, el Ni, Cu, Ga y Cr, que también han sido analizados, se han encontrado de forma accidental en pocos puntos.

Si se analizan los elementos minoritarios en cada una de las muestras, observando las tablas 3 y 4, tanto en la magnetita como en la hematites, se observa que en:

- MGT1 el Cu, P, Ga se encuentran en muy pocos puntos, mientras que el resto de elementos minoritarios están en casi todos los puntos.
- MGT2 el Ni, Cr, Ga se encuentran en muy pocos puntos, mientras que el resto de elementos minoritarios están en casi todos los puntos.
- MGT3 el Ni y el Mg se encuentran en muy pocos puntos.

- MGT4 el Ti, Co, Mg, Ga y Cr se encuentran en muy pocos puntos.
- MGT5 el Co, Al, P y Si se encuentran en la mayoría de los puntos, el resto en pocos.
- MGT6 el Zn, Mn, P, Ni y Ga se encuentran en muy pocos puntos.

Por tanto, en base a los elementos minoritarios, no se observa ningún patrón o similitud entre las muestras. Así que, se ha procedido a realizar gráficos binarios y ternarios de las muestras con los elementos Ca, Mg, Mn y Fe.

Observando los diagramas ternarios de magnetita se intuye que las muestras MGT1, MGT3, MGT5 y MGT6 tienen composiciones químicas similares, mientras que la composición química de la muestra MGT4 es diferente. Es decir, mientras que las primeras contienen altos contenidos en Fe entre el 90 y el 100% y bajos contenidos en Ca, Mg y Mn entre los cuales suman como máximo el 10% de la composición, en la muestra MGT4, encontramos contenidos de Fe menores, entre el 70 y el 90% y un contenido del 30% de Ca, Mg y Mn, la distribución de los contenidos de los cuales es  $Mg > Mn > Ca$ . Además, el contenido en Mg de MGT4 respecto al Ca y Mn es muy variable, mostrando un rango entre medio-alto y alto, mientras que el resto de las muestras tiene un alto contenido en Mg y el rango de variación es pequeño.

Al observar los diagramas ternarios de hematites se sospecha que MGT1 y MGT2 tienen una composición química diferente entre ellas y al resto, debido a que el contenido en Mg es bastante inferior a MGT3 y MGT5. Además de que MGT1 contiene más Mg que MGT2. Pero MGT3 y MGT5 (excepto en dos puntos) tienen composiciones bastante similares entre ellas, siendo más variable en composición MGT5 que MGT3, las hematites de estas dos muestras contienen más Mg en relación al Ca y Mn que MGT1 y MGT2.

Por tanto, analizando los diagramas ternarios de magnetita y hematites en conjunto, se observa que:

- **MGT3, MGT5 y MGT6 tienen una composición química muy similar**, ya que tanto en los diagramas ternarios de magnetita como en los de hematites MGT3 y MGT5 aparecen asociados. En el caso de MGT6, sólo aparece asociado claramente, a los otros dos en los diagramas de magnetita, porque en los de hematites no se tuvo en cuenta debido a que solo se obtuvo un punto, pero ese punto tiene una composición similar a MGT3 y MGT5. MGT6 procede de la mina de San Miguel, igual que MGT5, así que es lógico pensar que la composición es la misma o similar.
- **MGT1 tiene una composición química similar a MGT3, MGT5 y MGT6 en las magnetitas, pero no en las hematites.**
- **MGT2 y MGT4 tienen una composición química diferente a todas las demás.**
- MGT3 y MGT4 a pesar de proceder las dos de la mina de Aguas Teñidas, tienen composiciones químicas diferentes.

Por otra banda, en la Fig. 22 y en la tabla 5 se muestra la desviación estándar del CaO, MnO y MgO de los análisis efectuados en todos los puntos de las muestras estudiadas y se ha obtenido que esta desviación es mayor al promedio en CaO, MgO

y MnO de la muestra MGT-3 y el MgO de las muestras MGT-5 y MGT-6. La desviación estándar normalmente es menor al promedio, por tanto, debió de haber algún fallo en la medición de algún punto de estos elementos, que hizo distorsionar la desviación estándar, y al tener pocos puntos por muestra, la distorsión se acentuó.

## Tablas de resultados de microsonda electrónica

Datos	Magnetita															
	SiO2	ZnO	TiO2	CaO	Al2O3	CuO	MnO	P2O5	MgO	NiO	FeO	V2O3	Ga2O3	Cr2O3	CoO	Total
MGT1-1	0,07	-	0,034	0,025	0,062	-	0,245	0,017	-	-	90,334	0,032	0,043	-	0,063	90,925
MGT1-3	0,242	0,055	0,043	0,04	0,134	-	0,071	0,039	0,05	0,035	90,646	0,023	-	0,041	0,103	91,522
MGT1-6	-	-	0,043	0,048	0,029	-	0,008	0,002	-	0,021	90,985	0,036	0,152	-	0,078	91,402
MGT1-8	0,024	0,012	0,041	0,046	0,041	0,049	-	0,072	-	-	90,674	0,081	-	-	0,088	91,128
MGT1-10	0,056	0,051	0,068	-	0,078	0,033	0,051	-	0,002	0,012	91,882	0,003	-	0,033	0,082	92,351
MGT1-15	0,026	-	0,098	0,017	0,004	0,064	0,029	0,032	-	-	91,673	-	0,02	0,016	0,098	92,077
MGT1-16	0,013	-	0,051	0,046	-	-	0,023	-	-	0,044	91,525	0,081	-	-	0,092	91,875
MGT1-17	0,016	0,016	0,036	0,028	0,033	0,043	-	-	0,011	0,014	91,003	0,052	0,026	0,02	0,154	91,452
MGT1-18	0,011	-	0,02	0,023	0,066	-	0,059	-	0,009	-	90,99	0,026	-	0,002	0,074	91,28
MGT3-10	0,098	-	-	0,043	-	0,042	0,012	0,002	-	0,006	92,758	-	0,017	0,011	0,097	93,086
MGT3-16	0,094	0,077	-	0,082	0,031	0,057	0,02	0,007	-	-	92,202	0,019	-	0,006	0,109	92,704
MGT3-17	-	0,016	-	0,267	0,009	-	-	0,03	-	-	92,748	-	-	0,026	0,072	93,168
MGT4-1	-	-	0,032	0,047	-	-	0,094	-	-	0,036	90,453	0,223	-	0,014	0,076	90,975
MGT4-2	0,026	0,06	-	0,051	0,028	-	0,206	0,098	-	0,008	90,459	0,178	0,138	-	0,085	91,337
MGT4-3	0,034	-	-	-	-	0,042	0,186	0,037	-	0,002	89,14	0,223	-	-	0,122	89,786
MGT4-4	0,249	-	-	0,028	0,032	0,019	0,089	0,039	-	0,043	89,763	0,065	-	-	0,152	90,479
MGT4-5	0,371	0,031	-	0,038	0,05	-	0,263	0,015	0,005	-	89,405	0,195	0,017	0,039	0,106	90,535
MGT4-6	0,005	-	0,017	0,062	0,009	0,027	0,193	0,001	0,011	0,022	89,711	0,233	0,072	-	0,072	90,435
MGT4-7	-	0,006	0,019	0,063	0,038	-	0,238	0,014	-	-	89,136	0,357	0,02	0,014	0,114	90,019
MGT4-8	0,014	0,005	-	0,035	-	-	0,135	-	-	0,047	90,158	0,026	0,075	0,01	0,107	90,612
MGT4-9	0,007	0,029	-	0,029	-	0,021	0,076	-	-	0,028	90,3	0,1	-	-	0,114	90,704
MGT4-10	-	0,057	-	0,015	0,087	0,029	0,235	0,031	-	-	89,739	0,22	-	-	0,086	90,499
MGT5-6	0,011	0,038	0,042	0,063	0,372	0,06	-	0,04	0,004	-	89,778	0,026	0,049	0,001	0,103	90,587

<b>MGT5-7</b>	0,002	0,016	0,079	0,015	0,048	0,096	-	0,052	0,029	-	91,507	0,107	-	0,006	0,073	92,03
<b>MGT5-8</b>	-	0,015	0,026	0,017	0,174	-	0,006	0,01	0,018	-	89,858	-	-	0,011	0,086	90,221
<b>MGT5-14</b>	-	0,001	-	0,027	1,888	-	0,003	0,035	-	-	88,157	-	-	-	0,11	90,221
<b>MGT5-15</b>	-	-	0,078	0,054	0,006	-	0,057	-	-	-	91,627	-	-	-	0,054	91,876
<b>MGT6-1</b>	0,738	0,047	1,427	0,064	0,844	0,015	0,007	0,004	0,628	-	85,697	0,092	0,011	0,002	0,096	89,672
<b>MGT6-2</b>	0,104	-	0,302	0,034	0,232	-	-	-	-	0,021	88,926	0,003	-	0,012	0,094	89,728
<b>MGT6-3</b>	0,253	0,036	-	-	0,796	0,012	0,026	-	0,024	-	88,75	-	-	0,01	0,109	90,016
<b>MGT6-4</b>	0,153	-	0,068	0,01	0,237	0,003	0,007	-	-	-	91,885	0,094	0,014	0,014	0,122	92,607
<b>MGT6-5</b>	0,027	0,033	0,024	0,045	1,14	0,01	-	0,043	0,024	-	88,045	-	0,009	0,025	0,106	89,531
<b>MGT6-6</b>	0,073	0,114	1,578	0,037	0,095	0,038	-	-	0,03	0,018	88,214	0,121	-	0,015	0,061	90,394
<b>MGT6-7</b>	0,218	-	0,022	0,027	0,076	-	0,015	-	0,045	0,043	92,729	0,062	-	-	0,082	93,319
<b>MGT6-8</b>	0,029	0,067	0,18	0,025	0,16	0,025	0,001	0,002	0,003	-	89,183	-	0,02	0,032	0,11	89,837
<b>MGT6-10</b>	0,056	-	0,343	0,046	0,327	-	-	-	-	-	88,904	0,029	-	0,017	0,106	89,828

Tabla 3. Tabla dónde se muestran los resultados de magnetita obtenidos con microsonda electrónica.

Hematites																
Datos	SiO2	ZnO	TiO2	CaO	Al2O3	CuO	MnO	P2O5	MgO	NiO	FeO	V2O3	Ga2O3	Cr2O3	CoO	Total
MGT1-2	-	0,119	0,001	0,019	-	-	0,161	-	0,011	0,082	94,196	0,094	-	0,026	0,101	94,81
MGT1-4	-	0,112	0,02	0,011	0,002	-	0,153	0,009	-	0,041	93,92	0,068	-	0,001	0,101	94,438
MGT1-5	0,779	0,072	0,019	0,032	0,026	-	0,258	-	0,007	0,021	94,16	-	-	0,005	0,12	95,499
MGT1-7	0,548	0,2	-	0,028	0,003	-	0,232	-	0,003	0,01	94,551	-	-	0,058	0,101	95,734
MGT1-9	0,519	0,167	-	-	-	0,012	0,21	0,036	-	0,005	94,739	-	0,009	0,002	0,11	95,809
MGT1-11	0,485	0,173	0,006	0,018	0,01	-	0,193	0,034	0,025	0,015	94,096	-	-	0,017	0,14	95,212
MGT1-12	0,278	0,143	-	0,039	0,028	-	0,261	-	-	-	93,743	0,097	-	0,014	0,098	94,701
MGT1-13	0,508	0,229	0,011	0,057	0,014	0,078	0,231	0,006	0,019	-	93,991	0,071	-	0,013	0,088	95,316
MGT1-14	0,024	0,126	-	0,05	-	0,005	0,178	-	-	0,071	94,622	0,081	-	-	0,109	95,266
MGT1-19	0,013	-	0,026	0,031	-	0,051	0,154	0,018	0,009	-	94,833	-	0,086	-	0,138	95,359
MGT1-20	-	0,068	-	-	0,012	-	0,163	-	-	-	94,437	0,065	-	0,008	0,129	94,882
MGT2-1	0,017	0,189	0,007	0,026	0,036	-	0,413	0,032	-	-	94,766	0,016	-	-	0,079	95,581
MGT2-2	-	0,188	-	0,017	0,02	-	0,418	0,031	0,013	-	94,273	0,029	0,052	-	0,096	95,137
MGT2-3	-	0,077	0,019	0,02	0,024	0,079	0,464	0,031	-	-	93,889	0,016	-	0,03	0,077	94,726
MGT2-4	0,001	0,235	-	0,009	0,03	0,002	0,445	0,043	0,007	0,007	94,166	0,026	-	0,02	0,1	95,091
MGT2-5	0,021	0,22	-	0,047	-	0,015	0,526	-	-	-	94,918	0,019	-	-	0,096	95,862
MGT2-6	0,051	0,184	-	0,028	0,016	-	0,542	-	0,006	-	94,916	0,142	0,086	0,014	0,074	96,059
MGT2-7	1,166	0,111	0,029	0,052	-	-	0,456	0,006	0,012	-	93,151	0,016	-	0,004	0,134	95,137
MGT2-8	0,807	0,14	0,016	-	-	0,024	0,455	0,046	0,01	-	93,093	-	-	0,019	0,134	94,744
MGT2-9	-	0,222	0,019	0,005	0,004	0,051	0,446	-	0,008	-	94,965	0,094	-	-	0,085	95,899
MGT2-10	0,044	0,134	0,003	0,026	-	0,036	0,477	0,01	-	-	93,984	-	-	-	0,103	94,817
MGT3-1	0,175	-	0,032	0,045	-	0,008	0,032	0,013	0,003	-	93,465	0,084	0,15	-	0,086	94,093
MGT3-2	-	0,013	0,002	0,486	0,024	-	2,492	0,015	2,599	0,023	52,568	-	-	-	0,051	58,273
MGT3-3	0,185	0,007	0,021	0,028	-	-	0,053	0,041	-	-	93,455	-	0,04	0,013	0,087	93,93
MGT3-4	0,178	0,065	-	0,069	0,014	0,092	0,064	-	-	0,032	93,058	-	-	0,009	0,09	93,671

<b>MGT3-6</b>	0,519	0,045	0,007	0,051	0,01	0,034	0,026	-	0,019	0,022	93,929	0,078	0,049	-	0,161	94,95
<b>MGT3-7</b>	0,643	0,007	-	0,021	0,005	-	0,013	0,016	0,018	0,027	92,888	0,036	0,095	0,001	0,078	93,848
<b>MGT3-8</b>	1,07	0,019	0,003	0,039	0,014	-	0,002	0,018	0,034	0,014	92,235	0,149	-	0,03	0,107	93,734
<b>MGT3-9</b>	0,301	0,044	0,041	0,02	0,008	0,011	0,033	0,01	-	-	93,476	-	0,014	0,006	0,117	94,081
<b>MGT3-11</b>	0,299	0,071	0,039	0,007	-	0,027	0,058	-	-	-	93,245	0,052	-	-	0,089	93,887
<b>MGT3-14</b>	1,203	0,102	-	0,021	-	0,003	-	-	0,031	0,037	92,453	0,032	-	-	0,054	93,936
<b>MGT3-15</b>	0,026	0,087	-	-	-	-	0,055	-	0,011	-	93,246	-	0,035	0,007	0,077	93,544
<b>MGT3-18</b>	0,441	-	-	0,07	0,018	0,065	0,108	0,034	-	0,001	93,313	0,01	-	0,018	0,108	94,186
<b>MGT3-19</b>	0,056	0,047	0,008	0,153	0,016	-	0,09	-	0,002	0,014	93,229	0,126	-	0,017	0,113	93,871
<b>MGT5-1</b>	0,042	-	-	-	0,02	0,045	0,016	0,03	-	-	95,808	0,142	0,101	-	0,09	96,294
<b>MGT5-2</b>	0,093	0,001	-	0,036	-	-	-	-	0,021	0,008	93,783	-	-	0,008	0,109	94,059
<b>MGT5-3</b>	1,363	-	-	0,133	0,022	-	0,019	-	0,135	0,036	93,496	-	0,186	-	0,044	95,434
<b>MGT5-4</b>	0,042	0,054	0,003	0,007	-	0,017	0,012	-	-	-	94,903	0,023	-	-	0,057	95,118
<b>MGT5-5</b>	0,111	-	-	0,037	-	0,001	0,008	0,004	-	-	94,421	0,016	0,003	-	0,064	94,665
<b>MGT5-9</b>	0,025	-	-	0,043	-	-	-	0,007	0,016	-	95,49	-	-	-	0,14	95,721
<b>MGT5-10</b>	-	-	-	0,028	0,022	-	0,001	-	0,022	-	94,849	0,081	0,006	0,025	0,122	95,156
<b>MGT5-11</b>	-	-	-	0,035	0,033	0,01	0,051	0,007	0,009	-	94,338	-	0,152	-	0,135	94,77
<b>MGT5-12</b>	-	0,094	0,007	-	0,036	-	0,025	0,01	0,01	-	95,243	-	0,052	0,013	0,059	95,549
<b>MGT5-13</b>	1,168	0,013	-	0,029	0,032	-	0,034	-	0,137	-	93,695	-	0,017	0,024	0,11	95,259
<b>MGT6-9</b>	0,137	-	-	0,079	0,019	0,055	-	0,019	0,001	0,014	93,066	-	0,055	-	0,112	93,557

Tabla 4. Tabla dónde se muestran los resultados de hematites obtenidos con microsonda electrónica.

## Gráficos binarios de las magnetitas

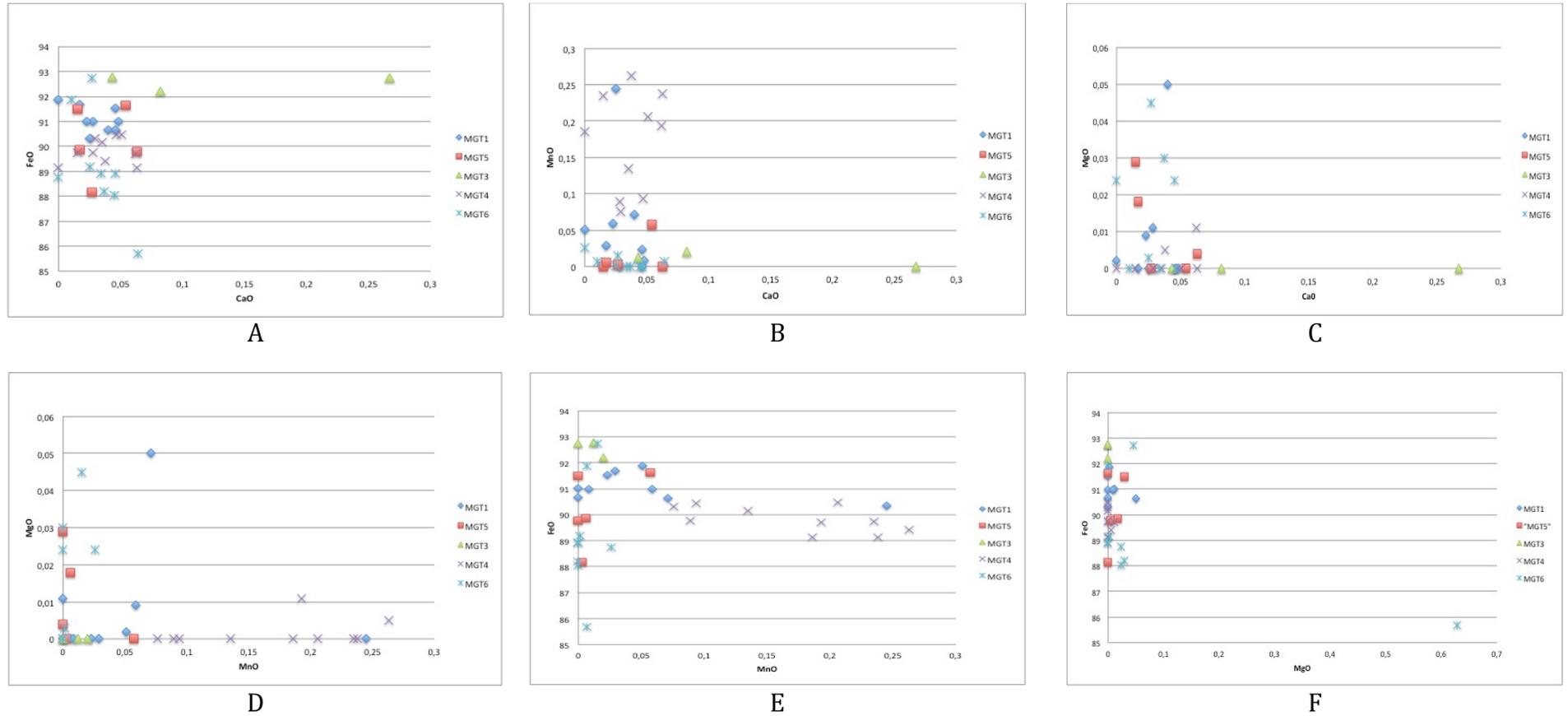


Fig.16 A, B, C, D, E y F. Gráficos binarios de las magnetitas comparando los elementos más significativos de su composición.

## Gráficos binarios de las hematites

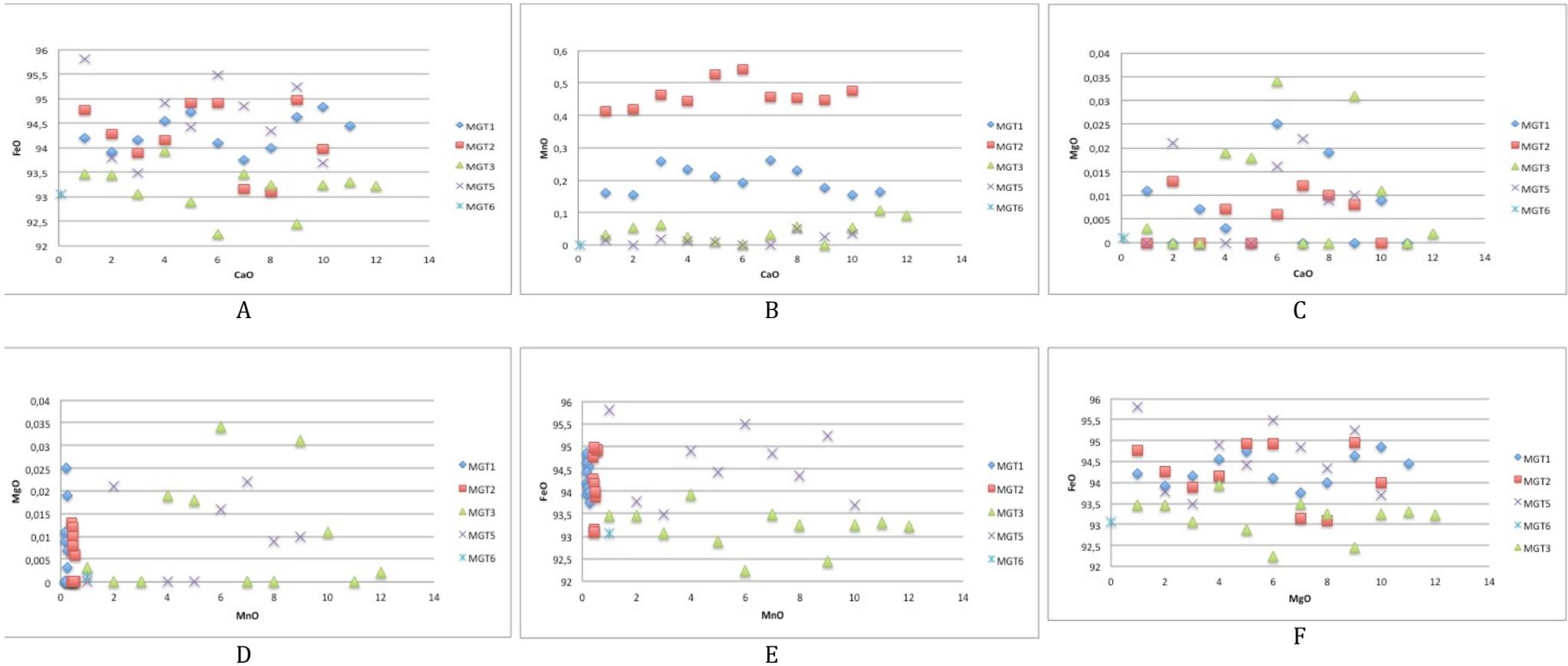


Fig.17 A, B, C, D, E y F. Gráficos binarios de las hematites comparando los elementos más significativos de su composición.

## Diagramas ternarios de las magnetitas

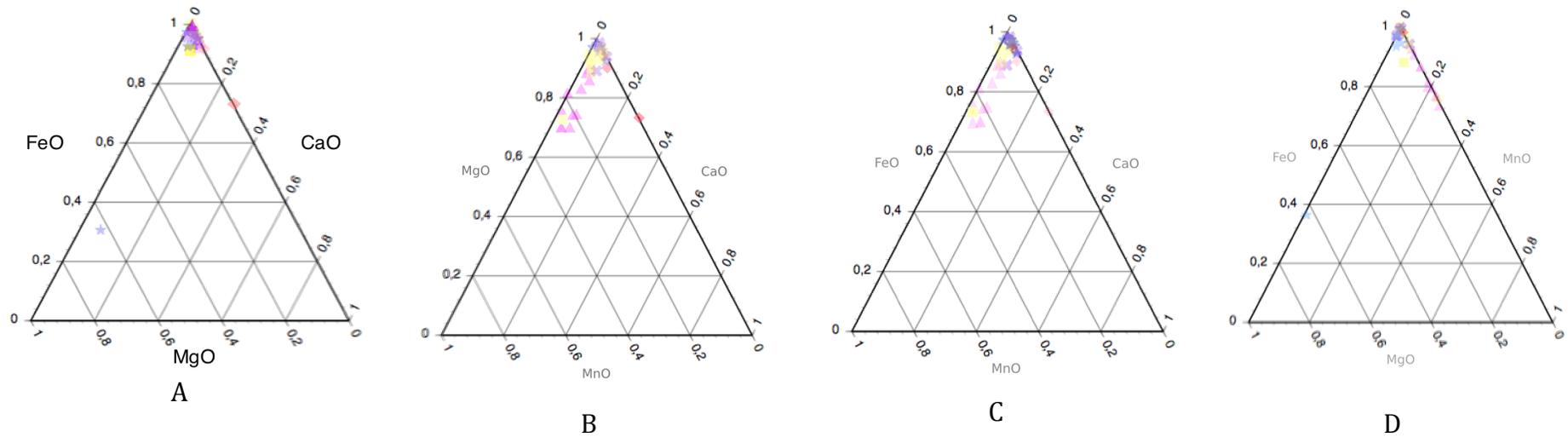


Fig.18 A, B, C y D. Gráficos ternarios de las magnetitas comparando los elementos más significativos de su composición. Los cuadrados amarillos pertenecen a MGT-1, los rombos rojos a MGT-3, los triángulos rosas a MGT-4, las cruces lilas a MGT-5 y las estrellas azules a MGT-6.

## Diagramas ternarios de las hematites

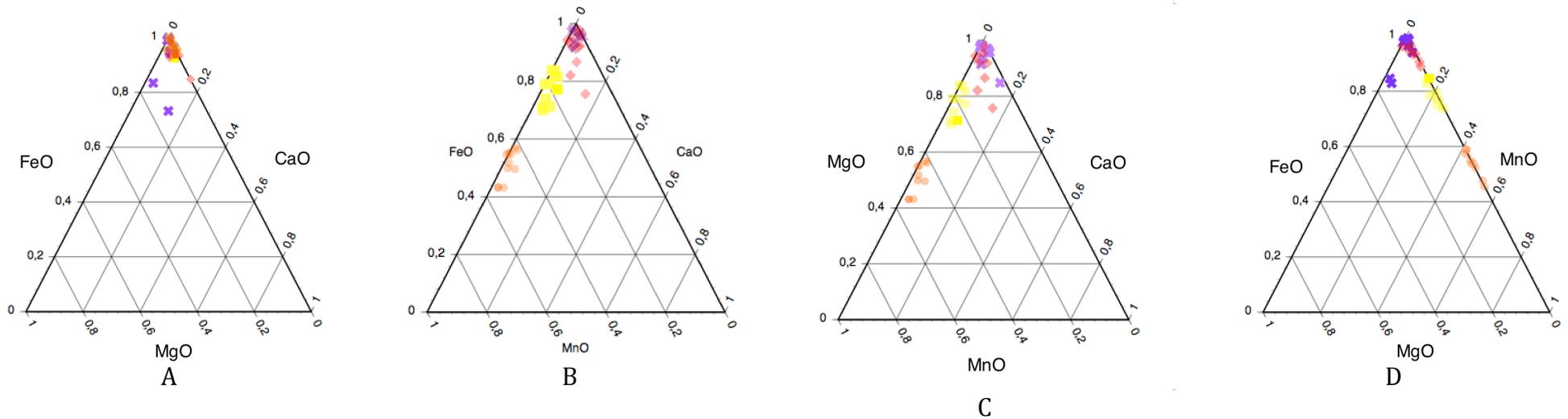


Fig.19 A, B, C y D. Gráficos ternarios de las hematites comparando los elementos más significativos de su composición. Los cuadrados amarillos pertenecen a MGT-1, los círculos naranjas a MGT-2, los rombos rojos a MGT-3 y las cruces lilas a MGT-5.

Media y desviación estándar de los resultados obtenidos en microsonda electrónica de CaO, MgO y MnO

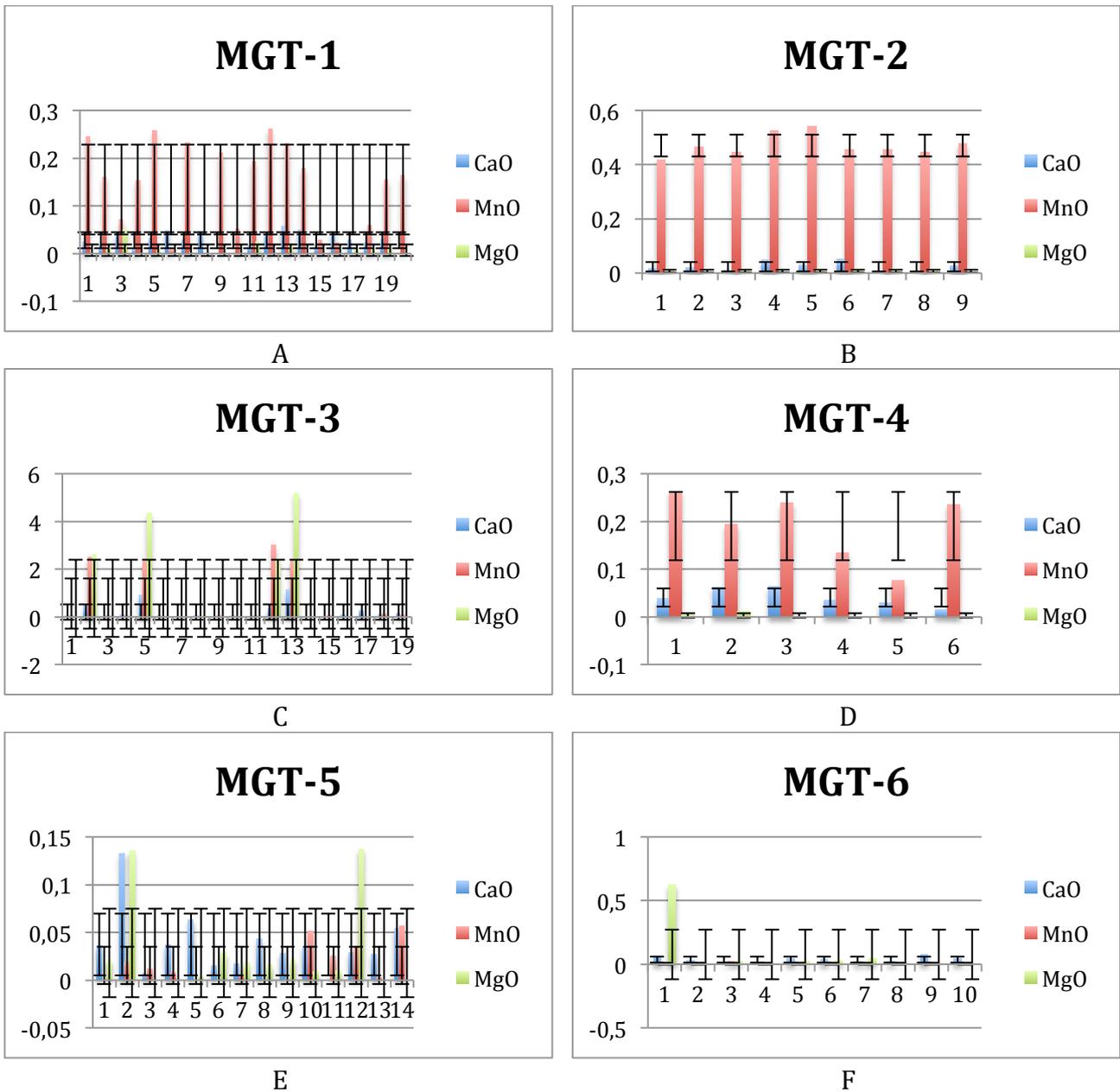


Fig.20 A, B, C, D, E y F: Gráficos donde se muestra la media y la desviación estándar del MgO, MnO y CaO de las diferentes muestras.

		Ca	Fe	Mg	Mn
<b>MGT1</b>	Promedio	0,0328	92,85	0,0146	0,1489
	Desviación estándar	0,0134	1,6972	0,0142	0,0868
<b>MGT2</b>	Promedio	0,0256	94,2121	0,0093	0,4642
	Desviación estándar	0,0157	0,6998	0,0028	0,0417
<b>MGT3</b>	Promedio	0,2101	84,3413	1,3312	0,6305
	Desviación estándar	0,3238	17,3338	1,9687	1,0997
<b>MGT4</b>	Promedio	0,0409	89,8264	0,008	0,1715
	Desviación estándar	0,0162	0,5030	0,0042	0,0683
<b>MGT5</b>	Promedio	0,0403	93,1302	0,0401	0,0211
	Desviación estándar	0,0318	2,3736	0,0511	0,0190
<b>MGT6</b>	Promedio	0,0408	89,5399	0,1079	0,0112
	Desviación estándar	0,0209	2,3189	0,2299	0,0097

Tabla 5: Tabla dónde se muestra el promedio y la desviación estándar de los elementos analizados de cada muestra.

## Discusión

Para empezar, se han analizado a qué minerales está asociada la magnetita en las muestras estudiadas. Por una banda, están las muestra MGT1 y MGT2, que están asociadas a galena y pirita y, galena y esfalerita respectivamente. Y por otra banda, las muestras MGT3, MGT5 y MGT6, que se asocian con pirita y calcopirita, con pirita y, con pirita, cuarzo y hematites, respectivamente. Por último, la muestra MGT4 se asocia a óxidos de hierro y barita.

Por tanto, esta asociación tiene relación con la zona del depósito a la que pertenecen las muestras, ya que MGT1 y MGT2, que pertenecían al techo de la mineralización se asocian con galena; las muestras MGT3, MGT4 y MGT6, que pertenecían al stockwork, se asocian con sulfuros; y la MGT4, que pertenecía al muro de la mineralización se asocia con óxidos de hierro. Esto queda reforzado por el hecho de que, en los depósitos VMS, los diferentes tipos de mineralizaciones tienden a distribuirse, según patrones típicos de zonación, donde el Cu se concentra sobre todo en los stockworks y, en la parte inferior y central de los sulfuros masivos, de ahí que la magnetita/hematites se asocie con pirita en el stockwork, mientras que Zn y Pb tienden a hacerlo en las zonas periféricas, por esto, a techo de la mineralización masiva, la magnetita/hematites se asocia con esfalerita y galena (Routhier et al., 1980; Almodóvar et al., 1998; Leistel et al., 1998a; Relvas et al., 2002).

A continuación, se han analizado los resultados de la difracción de rayos x, donde en las muestras MGT1, MGT3, MGT4, MGT5 y MGT6 no se ha detectado magnetita, a pesar de haberla identificado mediante el microscopio electrónico, y comprobado su magnetismo con un imán. En vez de la magnetita, se ha hallado hematites y siderita en el caso de MGT3. La hematites tiene la misma composición química que la magnetita, lo único que cambia es la relación Fe/O. Por tanto, los espectros deben de ser muy similares, lo que explica la discrepancia entre los resultados de la difracción de rayos x y los de la microsonda electrónica. Por otra banda, la siderita también puede aparecer asociada a la magnetita y hematites, por tanto, es probable que aparezca en lugar de éstas (Melgarejo, 1997).

En cuanto a los resultados obtenidos de los diagramas binarios y ternarios, se observa que la magnetita y la hematites de las muestras MGT3 y MGT4, a pesar de proceder las dos de la mina de Aguas Teñidas, tienen composiciones químicas diferentes, debido a que, las muestras proceden de diferentes partes del depósito, mientras que la muestra MGT3 procede del stockwork, la muestra MGT4 procede del muro de la mineralización masiva. Esto demostraría que la composición de la magnetita y de la hematites varía según la zona del depósito donde se encuentre. Esta teoría queda reforzada por las muestras MGT5 y MGT6, ya que los diagramas muestran que la composición de la magnetita es similar, debido a que estas dos muestras proceden del stockwork de la mina de San Miguel. Además, también se ha encontrado similitud entre las muestras MGT3, MGT5 y MGT6, todas procedentes de la zona del stockwork, con lo cual, no sólo tendríamos

la misma composición por zonas dentro de un depósito, sino que sería extrapolable a otros depósitos de la Faja Pirítica Ibérica.

Para terminar, se comparó la muestra MGT1 y la MGT2, que proceden las dos del techo de la mineralización masiva pero de depósitos diferentes. La composición de estas muestras a pesar de ser de la misma zona de depósito, son diferentes, esto se puede explicar porque MGT1 procede de la Faja Pirítica Ibérica, mientras que la muestra MGT2, procede de Brunswick 13, Canadá. Por tanto, podemos afirmar, que dentro de la Faja Pirítica Ibérica, la composición de las magnetitas es la misma según en la zona del depósito donde nos encontremos, pero no es extrapolable a depósitos que no pertenezcan a la FPI.

## Conclusiones

- Según la zona del depósito en la que se encuentre la magnetita y/o la hematites, aparecen asociadas a minerales distintos. Cuando se encuentran a techo de la mineralización masiva, se asocian con galena y esfalerita, cuando se encuentran a muro de la mineralización masiva se asocian con óxidos de hierro, y cuando forman parte del stockwork, aparecen asociadas con sulfuros.
- La composición química de las magnetitas y hematites está condicionada por su posición dentro del depósito. Es decir, la composición química de las magnetitas del stockwork es similar entre ellas, pero diferente de las magnetitas que proceden del muro o techo de la mineralización masiva.
- El punto anterior es extrapolable a los depósitos que se encuentran en la Faja Pirítica Ibérica. Es decir, la composición de las magnetitas de stockwork es la misma independientemente del depósito donde se encuentren. Pero no es extrapolable a depósitos que no sean de la Faja Pirítica Ibérica.

## Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a Reinaldo Sáez por ser mi tutor, a Manuel Toscano por ayudarme con la difracción de rayos x, a Carmen Moreno por ser la IP del proyecto, a Lola por la supervisión del pulido de las muestras y, a todo el personal del *Centro de Investigación Marie Curie* del campus universitario del Carmen, Huelva. También al proyecto PS-ANOXIA que ha pagado los gastos analíticos hechos en la UHU.

## Referencias

- Almodóvar, G., Sáez, R., Toscano, M. y Pascual, E. (1995): Co, Ni, and "immobile" element behaviour in ancient hydrothermal systems, Aznalcóllar, Iberian Pyrite Belt, Spain. In: Pašava, J., Kríbek, B., Zák, K. (Eds.) *Mineral Deposits: From Their Origin to Their Environmental Impact*. Balkema, Rotterdam, 217-220.
- Almodóvar, G.R., R. Sáez, J. M. Pons, A. Maestre, M. Toscano, E. Pascual (1998): Geology and genesis of the Aznalcóllar massive sulphide deposits, Iberian Pyrite Belt, Spain. *Mineral. Deposita*, 33, 111-136.
- Barriga, F.J.A.S. (1983): Hydrothermal metamorphism and ore genesis at Aljustrel, Portugal. Unpub. Ph.D. Thesis, Univ. Western Ontario, Ontario, Canada 386 pp.
- Barriga, F.J.A.S. (1990): Metallogenesis in the Iberian Pyrite Belt. In: Dallmeyer R.D., Martínez-García E. (Eds.) *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer, Berlin Heidelberg, New York, pp. 369-379.
- Barriga F.J.A.S. y Carvalho D (1983) Carboniferous volcanogenic sulphide mineralizations in South Portugal (Iberian Pyrite Belt). *Mem Serv Geol Port* 29: 99-113
- Barriga, F.J.A.S. y Fyfe, W.S. (1988): Giant pyritic base-metal deposits: the example of Feitais (Aljustrel, Portugal). *Chem. Geol.* 69: 331-343.
- Barriga, F.J.A.S. y Kerrich, R. (1984): Extreme  $^{18}\text{O}$ -enriched volcanics and  $^{18}\text{O}$ -evolved marine water, Aljustrel, Iberian Pyrite Belt: transition from high to low Rayleigh number convective regimes. *Geochim. Cosmochim. Acta* 48:1021-1031.
- Barriga, F.J.A.S. y Relvas, J.M.R.S. (1993): Hydrothermal alteration as an exploration criterion in the IPB: Facts, problems and future. Symposium on the Polymetallic Sulphides of the Iberian Pyrite Belt, Evora, Portugal, pp.1.3.1-1.3.2.
- Bernard A, Soler E (1974) Aperçu sur la province pyriteuse sudibérique. *Centen de la Soc Géol Belg, Gisements stratiformes et provinces cuprifères, Liège*, pp 287-316.
- Boulter, C.A. (1993a): High-level peperitic sills at Rio Tinto: stratigraphic and mineralization implications. *Trans. Inst. Min. Metall.* 102: 30-38.
- Burg, J.P., Laurent, Ph., Matte, Ph., Ribeiro, A. (1981): Variscan intracontinental deformation, the Porto-Tomar-Córdoba shear zone (SW Iberian Peninsula). *Tectonophysics*, 78, 161-177.
- Canil, Dante, Grondahl, Carter, Lacourse, Terri, Pisiak, Laura K. (2015) Trace elements in magnetite from porphyry Cu–Mo–Au deposits in British Columbia, Canada, *Ore Geology Reviews*, doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.10.007
- Carvalho D (1976) Considerações sobre o vulcanismo da região de Cercal-Odemira. Suas relações com a faixa piritosa. *Comun Serv Geol Portugal* 60: 215-238
- Carvalho D (1979) Geology, metallogeny and prospecting of South Portugal massive sulphide deposits. *Comun Serv Geol Portugal* 65: 169-191

- Carvalho D, Correia HAC, Inverno CMC (1976) Livro guia das excursões geológicas na Faixa Piritosa Iberica. *Comun Serv Geol Portugal* 60: 271-315
- Castro, A., Fernández, C., De La Rosa, J., Moreno-Ventas, I. y Rogers, G. (1996): Significance of MORB-derived Amphibolites from the Aracena Metamorphic Belt, Southwest Spain. *Jour. Petrol.* 37: 235-260.
- Chen T.W, Zhou M.F, Gao R.H (2015) Geochemistry of magnetite from Proterozoic Fe-Cu deposits in the Kangdian metallogenic province, SW China. *Miner Deposita* 50: 795-809.
- Colmenero, J.R., Fernández, L.P., Moreno, C., Bahamonde, J.R., Barba, P., Heredia, N. y González, F. (2002): Carboniferous of Spain. In: W. Gibbons and T. Moreno (Eds) *Geology of Spain*. Geological Society of London, 7: 120-153.
- Crespo Blanc, A. (1989): Evolución geotectónica del contacto entre la Zona de Ossa-Morena y la Zona Surportuguesa en las sierras de Aracena y Aroche (Macizo Ibérico meridional): un contacto mayor en la Cadena Hercínica europea. Tesis Univ. Granada, 324 pp.
- Dare ,S., Barnes, J., Beaudoin G., Méric J., Boutroy, E., Potvin-Doucet, C. (2014) Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators. *Miner Deposita* 49:785-796.
- Dupuy C., Dostal, J. y Bard, J.P. (1979): Trace element geochemistry of paleozoic amphibolites from SW Spain. *Tschermaks Min. Petrol. Mitt.* 26: 87-93.
- Eden, C.P. y Andrews, J. (1990): Middle to Upper Devonian mélanges in SW Spain and their relationship to the Meneage Formation in south Cornwall. *Proceedings of the Ussher Society*, 7: 217-222.
- Figueiras, J., Mateus, A., Gonçalves, M-A., Waerenborgh, J. y Fonseca, P. (2002): Geodynamic evolution of the South Variscan Iberian Suture as recorded by mineral transformations. *Geodinamica Acta*, 15: 45-61.
- Fonseca, P. y Ribeiro, A. (1993): Tectonics of the Beja-Acebuches Ophiolite: a major suture in the Iberian Variscan Foldbelt. *Geol. Rundschau*, 82: 440-447.
- Fonseca, P., Munhá, J., Pedro, J., Rosas, F., Moita, P., Araújo, A. y Leal, N. (1999): Variscan Ophiolites and High-Pressure Metamorphism in Southern Iberia. *Ophioliti* 24: 259-268.
- García de Miguel, J.M. (1990): Mineralogía, paragénesis y sucesión de los sulfuros masivos de la Faja Piritica en el suroeste de la Península Ibérica. *Bol. Geol. Min.* 101: 73-105.
- García Palomero, F. (1977): Caracteres geológicos y relaciones morfológicas y genéticas de los yacimientos del "Anticlinal de Riotinto". Tesis Univ. Salamanca.
- Gaspar, O.C. (2002): Mineralogy and sulfide mineral chemistry of the Neves-Corvo ores, Portugal: insight into their genesis. *Can. Min.* 40:611-636
- Gaspar, O.C. y Pinto, A. (1994): Mineralogy applied to metallogenesis and beneficiation of the Neves-Corvo ores. *Estudos, Notas e Trabalhos do SFM*, 36: 67-75.
- Giese, U y Bühn, B. (1993): Early Paleozoic rifting and bimodal volcanism in the Ossa-Morena Zone of south-west Sapin. *Geol. Rundschau*, 83: 143-160.

- Kase, K., Yamamoto, M., Nakamura, T. y Mitsuno, C. (1990b): Ore mineralogy and sulfur isotope study of the massive sulfide deposit of Filon Norte, Tharsis Mine, Spain. *Mineral. Deposita* 25: 289-296.
- Lécolle, M. (1972): Successions lithologiques et stratigraphiques dans la province de Huelva (Espagne); position des minéralisations manganésifères et pyriteuses. *C.R. Acad. Sci. París* 274: 505-508.
- Lécolle, M. (1977) : La ceinture sud-ibérique: un exemple de province à amas sulfurés volcano-sedimentaires. Thèse, Univ. P. et M. Curie, Paris, 609 pp.
- Leistel J.M., Marcoux, E. Deschamps, Y (1998b): Chert in the Iberian Pyrite Belt. *Mineral. Deposita*, 33, 59-81
- Leistel J.M., Marcoux, E., Thiéblemont, D., Quesada, C., Sánchez, A., Almodóvar, G.R., Pascual, E. y Sáez R. (1998a) The volcanic-hosted massive sulphide deposits of the Iberian Pyrite Belt, Review and preface to the Thematic Issue. *Mineral. Deposita*, 33, 2-30.
- Leistel, J.M., Bonijoly, D., Braux, C., Freyssinet, P., Kosakevitch, A., Leca, X., Lescuyer, J.L., Marcoux, E., Milési, J.P., Piantone, P., Sobol, F., Tegye, M., Thiéblemont, D. y Viallefond, L. (1994): The massive sulphide deposits of the South Iberian Pyrite Province: geological setting and exploration criteria. *Doc. BRGM*, 234, 236 pp.
- Lindsley, D.H. The crystal chemistry and structure of oxide minerals and exemplified by the Fe-Ti oxides *Mineralogical society of America*, volume 3 (1976) pp. L-1 – L60.
- Marcoux, E. y Moelo, Y. (1993) Comparative mineralogy of massive and stringer sulphide ore deposits in Southern Spain. In: Fenoll, P., Torres-Ruiz, J., Gervilla, F. (Eds) *Current Research in Geology Applied to Ore Deposits*. Univ. Granada, pp. 343-345.
- Marcoux, E., Moelo, Y. y Leistel, J.M. (1996): Bismuth and cobalt minerals as indicators of stringers zones to massive sulphide deposits, Iberian Pyrite Belt. *Mineral. Deposita* 31: 1-26.
- Melgarejo, J.C. *Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada, Volumen 1*. Editor: Edicions UB, 1997, Barcelona.
- Mitsuno, C., Nakamura, T., Yamamoto, M., Kase, K., Oho, M., Suzuki, S., Thadeu, D., Carvalho, D. y Arribas, A. (1988): Geological studies of the "Iberian Pyrite Belt" with special reference to its genetical correlation of the Yanahara ore deposits and others in the inner zone of southwest Japan. Univ. Okayama, Japan, 300 pp.
- Moreno, C. (1987): Las facies Culm del anticlinorio de la Puebla de Guzmán (Huelva, España). Tesis Doctoral, Univ. Granada.
- Moreno, C. (1988): Dispositivos turbidíticos sincrónicos en el Carbonífero inferior de la Faja Pirítica Ibérica (Zona Surportuguesa). *Estudios Geol.* 44: 233-242.
- Moreno, C. (1993): Postvolcanic Paleozoic of the Iberian Pyrite Belt: an example of basin morphologic control on sediment distribution in a turbidite basin. *Jour. Sed. Petrol.* 63: 1118-1128.
- Moreno C, Sierra S, Sáez R (1996) Evidence for catastrophism at the Famennian-Dinantian boundary in the Iberian Pyrite Belt. In: Strogon P, Somerville D, Jones GL (eds) *Recent advances in Lower Carboniferous geology*, *Geol Soc Spec. Pub* 107:153-162.

- Moreno, C. y Sáez, R. (1989): Petrología y procedencia de las areniscas del Culm de la parte occidental de la Faja Pirítica Ibérica (Zona Sur-Portuguesa). Bol. Geol. Min. 100: 134-147.
- Moreno, C. y Sáez, R. (1990): Sedimentación marina somera en el Devónico del Anticlinorio de Puebla de Guzmán, Faja Pirítica Ibérica. Geogaceta, 8: 62-64.
- Moreno, C. y Sequeiros, L. (1989): The Basal Shaly Fm of Iberian Pyrite Belt (South Portuguese Zone): Early Carboniferous bituminous deposits. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology 73: 233-241.
- Munhá, J. (1983a): Hercynian magmatism in the Iberian Pyrite Belt. En: Sousa M.J.L, Oliveira, J.T. (Eds) The Carboniferous of Portugal. Mem. Serv. Geol. Portugal, 29: 39-81.
- Munhá, J. y Kerrich, R. (1981): Sea water-basalt interaction in spilites from the Iberian Pyrite Belt. Contrib. Mineral. Petrol. 73: 191-200.
- Munhá, J., Oliveira, J.T., Ribeiro, A., Oliveira, V., Quesada, C. y Kerrich, R. (1986): Beja-Acebuches Ophiolite: characterization and geodynamic significance. Maleo (Abstr), 2: 31.
- Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J.L., French D., Walshe J. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review; Ore Geology Reviews 61 (2014) 1-32.
- Oliveira, J. T. (1990): The South Portuguese Zone. Stratigraphy and Synsedimentary Tectonism. En: Dallmeyer, R.D. y Martínez, E. (Eds) Pre-Mesozoic Geology of Iberia, Springer-Verlag, Berlin, 334-347.
- Oliveira, J.T. y Wagner-Gentis C.H.T. (1983): The Mértola and Mira Formation boundary between Dugueno and Almada de Ouro, marine Carboniferous of south Portugal. En: Contributions to the Carboniferous geology and palaeontology of the Iberian Peninsula (Ed. M.J.Lemos de Sousa), Porto, 1-39.
- Oliveira, J.T., Horn, M. y Paproth, E. (1979): Preliminary note on the stratigraphy of the Baixo Alentejo Flash Group, Carboniferous of Portugal, and on the paleogeographic development compared to corresponding units in northwest Germany. Comun. Serv. Geol. Portugal, 65:151-168.
- Pascual, E., Maestre, A., Pons, J., Sáez, R., Almodóvar, G.R. y Toscano, M. (1996): Geoquímica de los halos de alteración hidrotermal relacionados con los yacimientos de sulfuros masivos de Aznalcóllar- Los Frailes: criterios de evaluación de la intensidad de la alteración. Bol. Geol. Min. 107: 551-557.
- Pascual, E., Toscano, M., Almodóvar, G.R. y Sáez, R. (1997a): Zirconium mobility in footwall hydrothermal haloes in the Iberian Pyrite Belt: geochemical and textural evidences. Neves Corvo Field Conference Abstracts, Society of Economic Geologists, Lisbon, 81.
- Peter J.M., Kjarsgaard, I.M., Goodfellow, W.D. Hydrothermal Sedimentary Rocks of the Heath Steele Belt, Bathurst Mining Camp, New Brunswick: Part 1. Mineralogy and Mineral Chemistry; Economic Geology. Monograph 11, 2003, pp. 361-390.
- Peter J.M., Kjarsgaard, I.M., Goodfellow, W.D. Hydrothermal Sedimentary Rocks of the Heath Steele Belt, Bathurst Mining Camp, New Brunswick: Part 2. Bulk and Rare Earth element geochemistry and implications for origin; Economic Geology. Monograph 11, 2003, pp. 391-415.

- Plimer, I.R. y Carvalho, D. (1982): The geochemistry of hydrothermal alteration at the Salgadinho copper deposit, Portugal. *Mineral. Deposita*, 17: 193-211.
- Quesada, C., Fonseca, P.E., Munhá, J., Oliveira, J.T. y Ribeiro, A. (1994): The Beja-Acebuches Ophiolite (Southern Iberia Variscan Fol. Belt): Geological characterization and geodynamic significance. *Bol. Geol. Min.* 105: 3-49.
- Relvas, J.M.R.S., Barriga, F.J.A.S., Ferreira, A. y Noiva, P.C. (2000): Ore geology, hydrothermal alteration and replacement ore-forming mechanisms in the Corvo orebody, Neves Corvo, Portugal. In: J.B. Gemmel and J. Pongratz (eds). *Programs and Abstracts, CODES*, Hobart, Australia, 169-171.
- Relvas, J.M.R.S., Barriga, F.J.A.S., Pinto, A., Ferreira, A., Pacheco, N., Barriga, G., Baptista, R., Carvalho, D., Oliveira, V., Munhá, J. y Hutchinson, R.W. (2002): The Neves-Corvo deposit, Iberian Pyrite Belt, Portugal: Impact and future, 25 years after the discovery. *Soc. Econ. Geol. Spec. Publ.*, 9: 155-176.
- Robardet, M. (1976): L'originalité du segment hercynien sud-ibérique au Paléozoïque inférieur: Ordovicien, Silurien et Devonien dans le Nord de la province de Seville (Espagne). *C.R. Acad. Sc. Paris*, 283, D, pp 999-1002.
- Routhier, P., Aye, F., Boyer, C., Lécolle, M., Moliere, E.P., Picot, P., Roger, G. (1980) La Ceinture Sud-Ibérique à amas sulfurés dans sa partie espagnole mediane. *Mém. BRGM*, 94, 265 pp.
- Ruiz, C., Arribas, A. Jr., Arribas, A. (2001): Mineralogy and geochemistry of the Masa Valverde blind massive sulphide deposit, Iberian Pyrite belt (Spain). *Ore Geol. Rev.* 19:1-22.
- Ruiz de Almodóvar G, Sáez R (1992) Los yacimientos de sulfuros masivos de la Faja Pirítica Sur-Ibérica. In: García Guinea J, Martínez Frías J (eds) *Recursos Minerales de España*. CSIC, Madrid, pp 1309-1324
- Sáez R, Almodóvar GR, Pascual E (1996) Geological constraints on the massive sulphide genesis in the Iberian Pyrite Belt. *Ore Geol Rev*, 11: 429-451.
- Sáez, R. y Moreno, C. (1997): Geology of the Puebla de Guzmán Anticlinorium. En: Barriga, F. y Carvalho, D. (Eds) *Geology and VMS Deposits of the Iberian Pyrite Belt*. Society of Economic Geologists, Guidebook Series, Littleton (Colorado) 27: 131-136.
- Sáez, R., Pascual, E., Toscano, M. y Almodóvar, G.R. (1999): The Iberian Type of volcano-sedimentary massive sulphide deposits. *Mineral. Deposita*, 34: 549-570.
- Sánchez-España, J., Velasco, F. y Yusta, I. (2000): Hydrothermal alteration of felsic volcanic rocks associated with massive sulphide deposition in the northern Iberian pyrite belt (SW Spain) *Appl. Geochem.* 15: 1265-1290.
- Sánchez-España, J., Velasco, F., Boyce, A.J. y Fallick, A.E. (2003): Source and evolution of ore-forming hydrothermal fluids in the northern Iberian Pyrite Belt massive sulphide deposits (SW Spain): evidence from fluid inclusions and stable isotopes. *Mineral. Deposita*, 38: 519-537.
- Santos, A., Prada, J.M. y Rosales, F. (1993): Aspectos geológicos y geofísicos del yacimiento Migollas. *Symposium on the Polymetallic Sulphides of the Iberian Pyrite Belt*, Evora, Portugal, pp. 1.8.1.-1.8.20.
- Schemerhorn, L.J.G. (1971): An outline stratigraphy of the Iberian Pyrite Belt. *Bol. Geol. Min. Madrid*, vol.82-84, pp. 239-268.

- Silva, J.B., Oliveira, J.T. y Ribeiro, A. (1990): The South Portuguese Zone. Structural Outline. En: Dallmeyer, R.D. y Martínez, E. (Eds) Pre-Mesozoic Geology of Iberia, Springer-Verlag, Berlin, 334-362.
- Sociedad Geológica de España, *Geología de España*, Editor: IGME, 2004, Madrid.
- Strauss, G.K. (1970): Sobre la geología de la provincia piritífera del suroeste de la Península Ibérica y de sus yacimientos, en especial sobre la mina de pirita de Lousal (Portugal). Mem. IGME 77, 266 pp.
- Strauss GK, Madel J (1974) Geology of massive sulphide deposits in the Spanish-Portuguese Pyrite Belt. Geol Rundsch 63: 191-211
- Strauss GK, Madel J, Fernández Alonso F (1974) La Faja Pirítica Hispano-Portuguesa y el papel de la Geología en su prospección minera. Ind Mineral 16: 25-38.
- Strauss GK, Madel J, Fernández Alonso F (1977) Exploration practice for strata-bound volcanogenic sulphide deposits in the Spanish-Portuguese Pyrite Belt. In: Klemm DD, Schneider HJ (eds) Time and strata-bound ore deposits. Springer-Verlag, Berlõ Heidelberg New York, pp 55-93
- Tornos F., E. González Clavijo y B. Spiro (1998): The Filon Norte orebody (Tharsis, Iberian Pyrite Belt): a proximal low-temperature shale-hosted massive sulphide in a thin-skinned tectonic belt. Mineral. Deposita, 33, 150-169.
- Tornos F (2006): Environment of formation and styles of volcanogenic massive sulfides: the Iberian Pyrite Belt. Ore Geol Rev 28: 259–307
- Toscano, M., Ruiz de Almodóvar, G., Pascual, E. y Sáez, R. (1993): Hydrothermal alteration related to the "Masa Valverde" massive sulphide deposit, Iberian Pyrite Belt, Spain. In: Fenoll, P., Torres-Ruiz, J., Gervilla, F. (eds.) Current Research in Geology applied to Ore Deposits. Univ. Granada, pp. 389-392.
- Toscano, M.; Sáez, R., Almodóvar, G.R. (2000) Carbonatos hidrotermales asociados al depósito de sulfuros masivos "Masa Valverde" (Faja Pirítica Ibérica): características texturales y geoquímicas. Cuad. Lab. Xeol. Laxe, 25:42.



