

MINERALOGÍA DE SULFATOS EN SIERRA ALMAGRERA (ALMERÍA)

ARANA, R. Y GUILLÉN MONDEJAR, F.

Dpto. de Q^o Agrícola, Geología y Edafología. Fac. de Química. Univ. de Murcia. Murcia.

RESUMEN

El distrito minero de Sierra Almagrera ha sido explotado desde las primeras épocas para obtener Pb, Zn, Fe y Ag y posteriormente barita, estando abandonados en la actualidad todos los trabajos mineros.

Los procesos de alteración están muy avanzados en este área y se pueden estudiar en dos grupos diferentes, el primero desarrollado en los filones y rocas encajantes y el segundo, relacionado con las escombreras y otros depósitos artificiales. En estos materiales los sulfatos hidratados son muy característicos y están representados principalmente por los grupos de la alunita y jarosita junto a un gran número de fases solubles como alunógeno, halotrichita, melanterita, kieserita, etc.

Palabras clave: *Sulfuros y sulfosales, Alteración supergénica, Sulfatos hidratados, Sierra Almagrera.*

ABSTRACT

The ore mining district of Sierra Almagrera has been exploited since early times to obtain Pb, Zn, Fe and Ag and subsequently baryte, being at the present all the mining works abandoned.

The weathering processes are very advanced in this area and can be studied in two different groups. The first one, developed over the veins and wall-rocks and the second one, related to the dumps and other artificial deposits. In these materials sulphate hydrate minerals are very characteristic and represented mainly by jarosite and alunite groups together a great number of soluble salts, as alunogen, halotrichite, melanterite, kieserite, etc.

Key words: *Sulphide and sulphosalts, Supergene alteration, Hydrate sulphates, Sierra Almagrera.*

INTRODUCCIÓN

Sierra Almagrera está situada en el extremo oriental de la provincia de Almería, con un desarrollo de unos 10 km en la dirección de las alineaciones (NNE-SSO) y de

unos 3 km en la transversal, presenta una altura máxima de 367 m en el vértice Tenerife y pertenece al término municipal de Cuevas del Almanzora. Los yacimientos han sido explotados desde las primeras civilizaciones para el beneficio de Pb y Ag y se calcula que han llegado a extraerse unas 200.000 t de Pb y unas 1.300 de Ag. Las explotaciones cesaron hace varias décadas como consecuencia de los graves problemas planteados para eliminar grandes cantidades de aguas de elevada salinidad (entre 29 y 66 por mil) a una temperatura entre 50 y 60 °C; se llegó a una cota negativa de 95 m y para continuar las explotaciones era necesario desaguar casi 8.000 m³ diarios. No obstante, durante varios años se han recuperado la mayor parte de las escombreras para beneficiar Pb y Ag. Se trata de uno de los distritos mineros con mayor número de especies en toda España y a mediados del pasado siglo se describieron aquí por primera vez tres nuevos minerales: jarosita, almagerita (=zinkosita) y ferberita. En este trabajo se pretende destacar la riqueza mineralógica de este distrito en el grupo de los sulfatos, uno de los más diversificados en especies a nivel nacional debido al gran desarrollo alcanzado por los procesos finales de la alteración supergénica, que han afectado tanto a la mineralización primaria como a las rocas encajantes.

CARACTERÍSTICAS DE LAS MINERALIZACIONES

Se trata de yacimientos filonianos hidrotermales de Pb-Zn-Fe (Cu-Ag) que arman en esquistos grafitosos del complejo Alpujárride aunque varios autores asignan estos materiales al Nevado-filábride. Las principales características de la mineralización primaria se han abordado en trabajos previos (Arana, 1973, Martínez Frías, et al., 1989 y Martínez Frías, 1991), considerando en el mismo contexto al yacimiento de Las Herre-rías, situado junto a esta localidad, al oeste de Sierra Almagrera. Para Martínez Frías et al. (1989) las mineralizaciones se forman como consecuencia de una actividad epitermal miocena relacionada con el volcanismo shoshonítico, con una variación mineralógica y textural al avanzar en profundidad. Posteriormente Martínez Frías (1991) define las etapas mineralizantes y la secuencia paragenética de Sierra Almagrera estableciendo cuatro fases hipogénicas y una última correspondiente a los minerales supergénicos. La mineralización primaria está constituida por pirita, galena, arsenopirita, esfalerita, calcopirita, marcasi-ta y sulfosales de Pb y Cu (bournonita, boulangerita y tetraedrita), con siderita, cerusita, cuarzo, barita, hematites y goethita como principales acompañantes. El estudio de los productos de alteración supergénica se ha abordado en trabajos específicos como los de Hueso (1981), Hueso et al. (1981, 1987), López Aguayo et al. (1983, 1986), Arana et al. (1988) y López Aguayo y Arana (1987), que ponen de manifiesto el complejo quimismo en el que se desarrollan estos procesos y la diversidad de variables implicadas. También se destaca el papel desempeñado por las aguas ácidas de lixiviación que finalmente se acumulan en pequeñas balsas de las que precipitan gran número de sulfatos. López Aguayo y Arana (1992) estudian las etapas finales de la alteración supergénica de sulfuros incidiendo tanto en el quimismo global del sistema como en las fases mine- rales desarrolladas y en los parámetros físico-químicos implicados, aplicándolo a los

distritos mineros de Sierra Almagrera y Mazarrón. Se comprueba que existe una gran semejanza tanto desde el punto de vista químico como mineralógico entre los productos de alteración originados en escombreras y rocas encajantes de los dos distritos, pese a un contexto geológico claramente distinto.

Recientemente, Ruano Ramos (1994) aborda el estudio de las mineralizaciones hidrotermales del sector Aguilas-Sierra Almagrera mediante inclusiones líquidas y geoquímica isotópica, aportando datos significativos sobre el origen de las soluciones y las secuencias de cristalización, aunque no estudia las etapas finales de la alteración supergénica de sulfuros, que constituyen en Sierra Almagrera precisamente uno de los ejemplos más complejos a nivel de la metalogía española.

MINERALOGÍA DE SULFATOS

Aparte de la barita, que va estrechamente ligada a la paragénesis primaria y que junto con cuarzo y siderita es el principal mineral de la ganga, los sulfatos representados en Sierra Almagrera se originan por interacción en un medio ácido procedente de la oxidación de los sulfuros de los diferentes cationes liberados en la alteración de las menas primarias y de las rocas de caja adyacentes. La transformación avanzada de estas rocas ha movilizadado un buen número de elementos a los que se unen los procedentes de la oxidación de sulfuros y sulfosales, creando un ambiente químico de elevada complejidad. Los principales elementos mayoritarios que entran en juego son Si, Al, K, S, Fe, Pb, Zn, Mn, Ca, Mg, Ba y Cu, mientras que los minoritarios más comunes son Cd, Cr, Ti y As. Los elementos traza identificados en varias muestras son Rb, V, Ni, Ag, Ge, Bi, Sb, Sn y Th. Tras el estudio mineralógico y químico de los materiales de alteración, estos elementos se pueden agrupar según las fases solubles y/o insolubles en las que se concentran principalmente y según su abundancia relativa. En este sentido existe un primer grupo de mayoritarios concentrados en fases insolubles (K, Pb, Ba, Si), en fases solubles (Ca, Mn, Zn, Mg, Cu) o en ambas (Fe, Al y S). Los elementos minoritarios se concentran en fases insolubles, bien sea en silicatos (Cr, Ti) o en sulfatos (As) y los elementos traza aparecen esencialmente en fases insolubles, como silicatos (Rb, V, Ni, Th) o en sulfatos (Ag, Ge, Sn, Bi y Sb). Como indican López Aguayo y Arana (1987), en estos procesos de alteración supergénica se pueden establecer dos etapas que se solapan en tiempo y espacio, una formada por las fases insolubles en agua, con minerales del grupo de la alunita y jarosita, oxihidróxidos de hierro, minerales de la arcilla, anglesita y otros y una segunda formada por sulfatos solubles con distinto grado de oxidación e hidratación. El estudio por difracción de rayos X revela que los más comunes son los de Fe^{2+} : rozenita ($4\text{H}_2\text{O}$), ferrohexitita ($6\text{H}_2\text{O}$), melanterita ($7\text{H}_2\text{O}$), Fe^{2+} - Fe^{3+} : römmerita ($12\text{H}_2\text{O}$), voltaita ($18\text{H}_2\text{O}$), copiapita ($20\text{H}_2\text{O}$) o bien de Fe^{3+} : amarantita ($3\text{H}_2\text{O}$), hohmannita ($3\text{H}_{1/2}\text{O}$), fibroferrita ($5\text{H}_2\text{O}$), coquimbita ($9\text{H}_2\text{O}$) y quenstedtita ($10\text{H}_2\text{O}$). También son importantes los sulfatos de Mg kieserita (H_2O) y epsomitita ($7\text{H}_2\text{O}$), de Zn: gunningita (H_2O), bianchita ($6\text{H}_2\text{O}$) y goslarita ($7\text{H}_2\text{O}$), Mn: szmikita (H_2O) e ilesita ($4\text{H}_2\text{O}$), Al: basaluminita ($5\text{H}_2\text{O}$), aluminita ($7\text{H}_2\text{O}$) y alunógeno ($18\text{H}_2\text{O}$), así como

otros sulfatos complejos de varios elementos. En conjunto destacan dos asociaciones de sulfatos: a) fibroferrita-copiapita-goslarita-halotrichita-szmikita y b) coquimbíta-fibroferrita-copiapita-botriógono-melanterita-goslarita y halotrichita. Se deduce de ello que los diferentes sulfatos suelen aparecer agrupados constituyendo la mayor parte de las costras de alteración sobre escombreras y sobre las rocas encajantes. El proceso global de formación debe contemplarse a partir de la oxidación de las menas primarias y la alteración de los silicatos de las rocas encajantes, liberándose numerosos elementos que se fijan después en fases insolubles o forman parte de una cadena compleja en la que hay transición de unas fases a otras por un cambio en el grado de oxidación e hidratación o por sustitución parcial entre elementos equivalentes en la estructura. Todo ello conduce a una mineralogía extremadamente diversificada y con un quimismo complejo.

FORMAS DE APARICIÓN

La barita es el sulfato más abundante de Sierra Almagrera y ha sido objeto de explotación en las últimas décadas. También en la actualidad se extrae en las mineralizaciones filonianas del sector de las Herrerías en potentes masas filonianas ligadas a los yacimientos de sulfuros. La barita forma parte de la paragénesis primaria de forma que la geoquímica del bario se restringe prácticamente a este sulfato, quedando por tanto inmovilizado en los procesos de alteración supergénica. Por el contrario, el resto de los sulfatos reseñados se encuentra tanto en las proximidades de las áreas mineralizadas como en los diversos vertidos de estériles y otros restos de explotaciones en forma de costras, eflorescencias y pátinas de coloraciones muy variadas, con predominio de las amarillentas, pardas y rojizas. Las manchas que recubren los fragmentos de esquistos y diversas obras de infraestructura como canalizaciones y desagües están formadas por sulfatos hidratados de hierro, aluminio y otros elementos. El más característico de este área es la jarosita, que fue descubierta por primera vez en las mineralizaciones del barranco Jaroso y del que toma su nombre. Presenta unas tonalidades pardo-amarillentas a amarillo intenso y aparece tanto en costras como en masas compactas y nodulares de tamaño de grano muy fino. El estudio detallado de numerosas muestras pone de relieve la presencia de los diversos términos de esta serie, con predominio de la hidroniojarosita. Íntimamente ligada se encuentra la alunita, aunque menos abundante y también diferenciada en sus distintos términos, con mayor predominio de natrojarosita. Formas masas compactas y concrecionadas de coloración muy blanca y tamaño de grano muy fino. Son muy frecuentes las formas nodulares con una gran pureza, particularmente en las escombreras al pie de las explotaciones y como cantos sueltos a lo largo del cauce del Jaroso.

También se encuentran otros sulfatos secundarios íntimamente asociados en las acumulaciones artificiales de estériles en las proximidades de los diversos barrancos, que alcanzan capas de gran espesor y desarrollo lateral. Finalmente, aparecen diversos sulfatos secundarios como producto de evaporación de las aguas ácidas que lixivian las escombreras y otros restos de explotaciones mineras, particularmente tras las lluvias

ocasionales, que suelen ser de escasa duración pero muy intensas. Estas aguas contienen una elevada concentración en metales disueltos llegando a valores de pH entre 1.5 y 2.9, por lo que su poder agresivo es muy alto. Tienen una coloración parda a rojiza y de ellas precipitan diversos sulfatos en función de su producto de solubilidad dando lugar a costras y eflorescencias que se van disponiendo en forma concéntrica a medida que progresa la evaporación. Se acumulan en pequeñas charcas y balsas de colores muy vivos y llegan a alcanzar una concentración en sales entre 11 y 130 g/l. El estudio difractométrico de las sales disueltas ha revelado la presencia de copiapita, halotrichita, bianchita, alunógeno, coquimbita y paracoquimbita como fases más comunes, de forma muy similar a lo que ocurre en el sector de Mazarrón (López Aguayo et al., 1992).

En la tabla I se indican los principales minerales insolubles en agua característicos de la alteración supergénica de sulfuros, todos ellos representados en el sector de Sierra Almagrera.

Tabla I. Principales minerales insolubles en agua en la alteración supergénica de sulfuros.

Esp. mineral	Clase o grupo mineral	Fórmula teórica
Ortoclasa	Tectosilicato	$KAlSi_3O_8$
Biotita	Filosilicato	$(Mg,Fe)3[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$
Caolinita	Filosilicato	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Esmectitas	Filosilicato	$M_1^+(R^{3+}_{2-2x}R^{2+}_{2x})Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$
Cuarzo	Tectosilicato	SiO_2
Plagioclasa	Tectosilicato	$Na_{1-x}Ca_xAl_{1+x}Si_{3-x}O_8$
Goethita	Hidróxido	$FeO(OH)$
Hematites	Oxido	Fe_2O_3
Jarosita	Sulfato hidratado	$KFe_4(SO_4)_2(OH)_6$
Natrojarosita	Sulfato hidratado	$NaFe_4(SO_4)_2(OH)_6$
Plumbojarosita	Sulfato hidratado	$PbFe_4(SO_4)_2(OH)_6$
Argentojarosita	Sulfato hidratado	$AgFe_4(SO_4)_2(OH)_6$
Hidroníjarosita	Sulfato hidratado	$H_3OFe_4(SO_4)_2(OH)_6$
Alunita	Sulfato hidratado	$KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$
Natroalunita	Sulfato hidratado	$NaAl_3(SO_4)_2(OH)_6$
Yeso	Sulfato hidratado	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Anglesita	Sulfato anhidro	$PbSO_4$
Cerussita	Carbonato anhidro	$PbCO_3$
Smithsonita	Carbonato anhidro	$ZnCO_3$
Azurita	Carbonato hidratado	$Cu_2(CO_3)_2(OH)_2$
Malaquita	Carbonato hidratado	$Cu_2CO_3(OH)_2$
Azufre	Elemento	S

El grupo más numeroso y complejo es el formado por las fases solubles en agua y está constituido fundamentalmente por sulfatos hidratados con una gran variación en cuanto al número de especies que pueden encontrarse con carácter paragenético en una muestra, como en el grado de hidratación, que está afectado por las variaciones estacionales, encontrándose secuencias completas en sulfatos de un elemento dado que varían solo en el número de moléculas de agua. Para facilitar la comprensión, la tabla II los agrupa por elementos, comenzando por los sulfatos simples y terminando con los

dobles. En dicha tabla figuran tanto los sulfatos representados en Sierra Almagrera como otros comunes en la alteración supergénica de sulfuros.

Tabla II. Principales minerales solubles en agua en la alteración supergénica de sulfuros.

Elemento	Especie Mineral	Fórmula teórica	
Fe(II)	Szomolnokita	$\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	
	Rozenita	$\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
	Siderotilo	$\text{FeSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	
	Ferrohexahidrita	$\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
	Melanterita	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	
Cu(II)	Brochantita	$\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$	
	Calcantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	
Mg	Kieserita	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	
	Starkeyita	$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
Zn	Epsomita	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	
	Gunningita	$(\text{Zn},\text{Mn})\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	
	Zinkosita	ZnSO_4	
Zn-Mg-Mn	Bianchita	$\text{ZnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
	Goslarita	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	
	Mooreita	$(\text{Zn},\text{Mg},\text{Mn})_8(\text{SO}_4)(\text{OH})_{14} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
Fe(III)	Romboclava	$\text{FeH}(\text{SO}_4) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
	Coquimbita	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	
	Amarantita	$\text{FeSO}_4(\text{OH}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	
	Hohmannita	$\text{FeSO}_4(\text{OH}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	
	Queenstedtita	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	
	Butlerita	$\text{FeSO}_4(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
	Parabutlerita	$\text{FeSO}_4(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
	Fibroferrita	$\text{FeSO}_4(\text{OH}) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	
	Al	Basaluminita	$\text{Al}_4\text{SO}_4(\text{OH})_{10} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
		Alumbre sódico	$\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
		Alumbre potásico	$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Aluminita		$\text{Al}_2\text{SO}_4(\text{OH})_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	
Alunógeno	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$		
Fe(III)-Mg	Botriógeno	$\text{MgFe}(\text{SO}_4)_2(\text{OH}) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	
Fe(III)-Fe(II)	Römerita	$\text{FeFe}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	
	Copiapita	$\text{FeFe}_2(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$	
	Aluminocopiapita	$\text{Fe}(\text{Fe},\text{Al})_2(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$	
	Zincopiapita	$(\text{Zn},\text{Fe})\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$	
	Magnesiocopiapita	$(\text{Mg},\text{Fe})\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$	
	Cuprocopiapita	$(\text{Cu},\text{Fe})\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$	
	Voltaita	$\text{K}_2\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}(\text{SO}_4)_2 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	
	Zincobotriógeno	$\text{ZnFe}(\text{SO}_4)_2(\text{OH}) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	
	Fe(III)-Na	Ferrinatrita	$\text{Na}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
	Fe(III)-K	Goldichita	$\text{KFe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Al-Fe(II)	Halotrichita	$\text{FeAl}_3(\text{SO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$	
Al-Mg	Pickeringita	$\text{MgAl}_3(\text{SO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$	
Al-Cu	Cianotrichita	$\text{Cu}_3\text{Al}_3\text{SO}_4(\text{OH})_{12} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
Al-K	Kalinita	$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$	
Zn-Mg-Mn	Mooreita	$(\text{Zn},\text{Mg},\text{Mn})_8(\text{SO}_4)(\text{OH})_{14} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
K-Mg	Leonita	$\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	

DISCUSIÓN

La oxidación experimentada por los minerales de la paragénesis primaria (sulfuros de Pb-Fe-Zn-Cu, sulfoarseniuros de Fe-Ni, sulfosales de Bi-Ag-Pb, cobres grises, etc.), ha proporcionado un medio químico de elevada complejidad tanto por la diversidad de elementos que entran en juego como por la interacción con los procedentes de la alteración de las rocas encajantes (esquistos y micaesquistos grafitosos) en un ambiente de temperaturas medias a altas y escasa pluviosidad. El principal proceso que afecta a las rocas encajantes es la hidrólisis de los silicatos, que pone en solución concentraciones importantes de Al, Na, K y Ca y que conduce por una parte a la formación de minerales de la arcilla (principalmente caolinita y esmectitas) y por otra a la de minerales del grupo de la alunita.

Paralelamente, la oxidación de sulfuros y sulfosales favorece el aumento de la concentración de SO_4^{2-} en el medio y moviliza cantidades significativas de Fe, Cu, Zn, Mn y Pb en distintos grados de oxidación. De esta forma, parte de la siderita aparece transformada en hematites y goethita aunque conserva la forma externa de los cristales.

La contaminación producida por soluciones salinas ascendentes, ricas en Cl, SO_4^{2-} , Na, K, Mg y Ca, Na y K aumenta la actividad química del sistema, dando lugar a una cadena de reacciones que va a favorecer la formación de fases insolubles (principalmente silicatos, sulfatos anhidros, alunita y jarosita) y solubles (cloruros y sulfatos hidratados). Dentro de estos últimos y desde un punto de vista químico se pueden diferenciar varios grupos bien definidos: sulfatos de Mn, con el grupo de la szmikita; sulfatos de Zn con el grupo de la goslarita; sulfatos de Fe^{2+} , con el grupo de la melanterita; sulfatos de Fe^{3+} , con los grupos de la coquimbita y fibroferrita; sulfatos de Al, con el grupo del alunógeno, así como otros grupos más complejos Fe-Al, Fe-Mg, Al-Mg, etc.

En conjunto y tras el análisis de las fases minerales representadas en los materiales de alteración se pueden establecer las dos asociaciones de sulfatos solubles más frecuentes en Sierra Almagrera:

- 1) Fibroferrita-copiapita-goslarita-halotrichita y szmikita y
- 2) Coquimbita-fibroferrita-copiapita-botriógeno-melanterita-goslarita y halotrichita.

Al estudiar la abundancia relativa de los diversos sulfatos identificados, se puede observar una distribución zonal de acuerdo con la altitud, pudiéndose diferenciar hasta siete sectores entre las cotas de 120 y 320 m. Algunos minerales aparecen en todos ellos como copiapita y halita, aunque con distinta abundancia, mientras que otros solo se encuentran en sectores concretos, por lo que la altura topográfica es un nuevo parámetro a tener en cuenta. De los sulfatos en que el Fe^{3+} es el catión fundamental, el grupo de la copiapita es el más abundante y mejor distribuido. Su porcentaje disminuye con la altura, apareciendo simultáneamente minerales de los grupos de la coquimbita y fibroferrita, lo que sugiere que estos minerales aparezcan por transformación de la copiapita debido a procesos de oxidación y pérdida de agua (López Aguayo et al., 1983).

En relación a las aguas ácidas, se puede observar que la secuencia de cristalización de las fases disueltas está controlada por la composición química y las relaciones molares entre los diversos elementos presentes. En una primera etapa cristalizan minerales del

grupo de la bianchita, lo que está influido por la concentración relativa de Mg y Zn, mientras que el Fe(II) no parece influir en esta precipitación, probablemente por la existencia de procesos de oxidación. Efectivamente, la aparición de sulfatos simples de elementos trivalentes está controlada por los contenidos totales de Fe y Al, respectivamente. Esta etapa de cristalización provoca cambios en las relaciones estequiométricas entre cationes y condiciona la aparición de los sulfatos dobles.

BIBLIOGRAFÍA

- ARANA, R. (1973). «Investigaciones mineralógicas en Sierra Nevada (Cordilleras Béticas, España)». Tesis. *Secr. Publ. Univ. Granada*, 2 vols., 683 p.
- ARANA, R., LÓPEZ AGUAYO, F., RUIZ GÓMEZ, J.M., PÉREZ SIRVENT, C. Y RODRÍGUEZ GORDILLO, J. (1988). «Quimismo de los productos de alteración supergénica en los distritos mineros de Mazarrón y Sierra Almagrera (SE de España): Aproximación estadística». *Bol. Soc. Esp. Mineralogía*, 11: 36-37.
- HUESO, R. (1981). «Alteraciones supergénicas en Sierra Almagrera (Almería)». Tesis Lic. Univ. Granada, 132 p.
- HUESO, R., RODRÍGUEZ GORDILLO, J. Y LÓPEZ AGUAYO, F. (1981). «Las jarositas de Sierra Almagrera (Almería): «Mineralogía y génesis»». *Bol. Soc. Esp. Miner.*, 4: 29-36.
- HUESO, R., PÉREZ SIRVENT, C., RODRÍGUEZ GORDILLO, J., SÁNCHEZ VIÑAS, M. Y VELILLA, N. (1987). «Aspectos químicos y mineralógicos de las alteraciones supergénicas en yacimientos de sulfuros del SE de España». *Bol. Soc. Esp. Miner.*, 10-1:53-54.
- LÓPEZ AGUAYO, F., HUESO, R. Y RODRÍGUEZ GORDILLO, J. (1983). «Procesos de alteración supergénica en Sierra Almagrera (Almería). «Los sulfatos solubles»». *Bol. Soc. Esp. Miner.* 7:101-110.
- LÓPEZ AGUAYO, F., ORTEGA HUERTAS, M. Y VELILLA, N. (1986). «Procesos de alteración supergénica en Sierra Almagrera. Mineralogía de las rocas encajantes». *Bol. Soc. Esp. Miner.*, 9: 291-297.
- LÓPEZ AGUAYO, F. Y ARANA, R. (1987). «Alteración supergénica de sulfuros en algunos yacimientos del SE de España. Nota Preliminar». *Estudios geol.*, 43: 117-125.
- LÓPEZ AGUAYO, F. Y ARANA, R. (1992). «Las etapas finales de la alteración supergénica de sulfuros». En «Recursos minerales de España», (G^a Guinea, J. y Martínez Frías, J. Coords). C.S.I.C. Madrid, 1277-1305.
- LÓPEZ AGUAYO, F., PÉREZ SIRVENT, C., ORTIZ GONZÁLEZ, R. Y ARANA, R. (1992). «Composición química de las aguas de lixiviación minera en el Cabez de San Cristóbal (Mazarrón, Murcia)». *Rev. Soc. Geol. España*, 5, (3-4), 73-79.
- LÓPEZ GUTIÉRREZ, J., MARTÍNEZ FRÍAS, J., LUNAR, R. Y LÓPEZ GARCÍA, J. (1993). «El rombohorst mineralizado de las Herrerías: un caso de «doming» e hidrotermalismo submarino mioceno en el SE Ibérico». *Estudios geol.*, 49: 13-19.
- MARTÍNEZ FRÍAS, J., GARCÍA GUINEA, J., LÓPEZ RUIZ, J., LÓPEZ GARCÍA, J. Y BENITO, R. (1989). «Las mineralizaciones epitermales de Sierra Almagrera y de la cuenca de Herrerías (Cordilleras Béticas)». *Bol. Soc. Esp. Miner.*, 12: 261-271.
- MARTÍNEZ FRÍAS, J. (1991). «Sulphide and sulfosal mineralogy and paragenesis from the Sierra Almagrera veins (SE Spain)». *Estudios geol.*, 47: 271-279.
- MORALES RUANO, S. (1994). «Mineralogía, Geoquímica y Metalogía de los Yacimientos Hidrotermales del Sureste de España (Aguilas-Sierra Almagrera)». *Resumen Tesis Doctoral. Bol. Soc. Esp. Mineralogía*, 17, 259-260.