

EL YACIMIENTO VOLCANOGÉNICO DE Cu-Zn-Pb (Au + Ag) EL COBRE: INCLUSIONES FLUIDAS

THE CU-ZN-PB (AU + AG) VOLCANOGENIC DEPOSIT EL COBRE: FLUID INCLUSIONS

XIOMARA CAZAÑAS
JOAN CHARLES MELGAREJO
MARÍA PILAR ALFONSO

E-mail: igpcnig@ceniai.inf.cu
Instituto de Geología y Paleontología

Universidad de Barcelona

RESUMEN: El depósito El Cobre se localiza al NO de Santiago de Cuba y encaja en la Secuencia Media del Grupo El Cobre, en el arco del Paleógeno. Se estudiaron inclusiones fluidas primarias y pseudosecundarias en cristales de cuarzo, anhidrita, esfalerita y calcita, correspondientes a los principales tipos de mineralización: stockwork silíceo, filones silíceos, filones anhidrítico-epidóticos y mineralizaciones estratoligadas superior, intermedia e inferior. También se estudiaron inclusiones secundarias en cristales de barita pertenecientes a la mineralización estratiforme de barita. Las inclusiones se clasificaron en bifásicas L-V, que presentan tamaño entre 5 y 40 micras, y el grado de relleno es de 0,7 a 0,8. Se obtuvieron temperaturas de fusión del hielo entre $-1,1$ y $-6,7^{\circ}\text{C}$, y les correspondieron salinidades entre 1,9 y 10,1 % en peso de NaCl eq., mientras que la temperatura de homogenización oscila entre 150 y 299°C . Durante los ensayos microtermométricos no se observó la formación de clatratos y las investigaciones mediante Raman no detectaron otros gases en la fase vapor, lo que indica un componente mayoritario de vapor de agua. La homogenización a líquido de las inclusiones con promedio entre 165 y 281°C , y su grado de relleno uniforme, sugieren que no ocurrió la ebullición durante la deposición de estas mineralizaciones. Estos valores promedios de temperatura mencionados, así como los valores promedios de salinidad entre 2,3 y 5,7 % en peso de NaCl eq. están dentro del rango de salinidad y temperatura reportado en numerosos depósitos VMS, como los tipo Kuroko.

Palabras clave: inclusiones fluidas, volcanogénico, yacimiento Cu-Pb-Zn (Au-Ag).

ABSTRACT: El Cobre ore deposit, located at the northwest side of Santiago de Cuba city, is hosted by the Middle Sequence of the El Cobre Group, in the Paleogenic Island Arc. Some fluid inclusions (primary & pseudosecondary) were studied in quartz, anhydrite, sphalerite and calcite samples from typical mineralization types: siliceous stockwork, silicic veins, anhydrite-epidotic vein as well as lower, middle and upper stratabound mineralization. Secondary inclusions were also tested in barite due to the stratiform barite mineralization. The two-phase L-V inclusions type, have a particular size ranging from 5 to 40 microns and a filling degree about 0,7 to 0,8. Ice melting temperatures were obtained in a range between $-1,1$ and $-6,7^{\circ}\text{C}$, and a corresponding salinity from 1,9 up to 10,1 % in NaCl eq. weight, in the meantime homogenization temperature oscillate between 150 and 299°C . No clatratos formation was observed during the microtermometrics test, in the same way experiments using Raman cant not shown any other gas evidence in the vapor phase, revealing a majoritary component of water vapor. Liquid homogenization on inclusions with average between 165 and 281°C and their uniform filling degree, suggest that boiling didn't happen during the deposition of these mineralizations. The above mentioned averages values of temperature, as well as the salinity averages values between 2,3 and 5,7 % in the weight of NaCl eq are within the range of salinity and temperature reported in numerous VMS deposits, as the Kuroko type.

Key words: fluid inclusions, volcanogenic, Cu-Pb-Zn (Au-Ag) deposit.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el yacimiento El Cobre es la única mina activa en la Sierra Maestra. Este yacimiento se descubrió alrededor de 1530 y sobre 1544 comenzó a explotarse (Ansted, 1856). En América sólo se conoce un depósito más antiguo, la mina de oro de Pueblo Viejo, en República Dominicana, que comenzó a operar en 1505 (Russell *et al.*, 1981), pero la mina El Cobre es la primera de Cu y la mayor fuente de aporte de este metal a España durante el período colonial (Lawrence, 1910).

Por otra parte, el yacimiento El Cobre durante siglos ha sido aprovechado como un depósito cuprífero, pero las investigaciones de los últimos años (Ushakov y otros,

1986; Luna y otros, 1989; Ramírez y otros, 1994) revelan la existencia en este yacimiento de una mineralización polimetálica (Zn-Cu-Pb), asociada a la de cobre tradicionalmente explotada, con concentraciones locales de Au y Ag, que se ubica al norte de la mineralización cuprífera.

Pese a la importancia económica de este depósito, se ha realizado poca investigación detallada sobre el mismo; en cambio, existe un gran volumen de información gráfica y descriptiva (Cazañas y otros, 1998), y de testigos de pozos, que aporta nuevos elementos acerca de la mineralización la cual es muy compleja en cuanto a estructura y mineralogía (Fig. 1). El depósito presenta diferentes estilos de mineralización: estratiforme de anhidrita, barita y óxidos de manganeso; estratoligada,

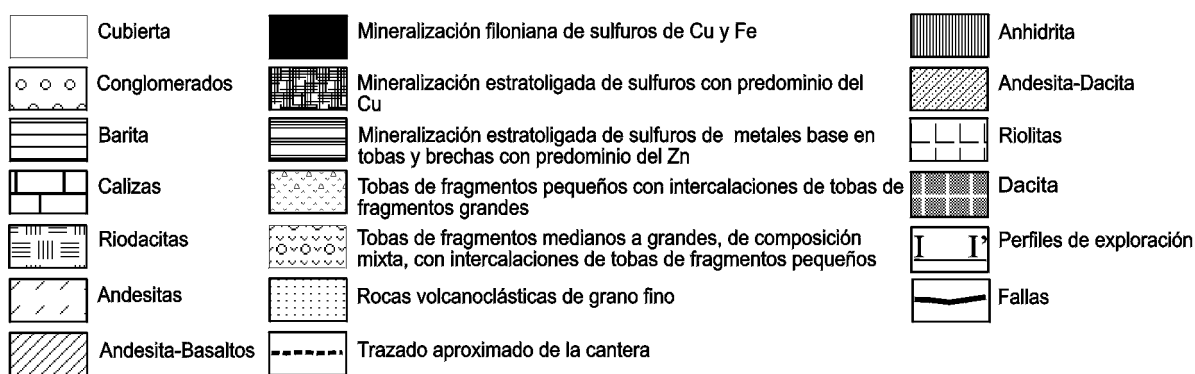
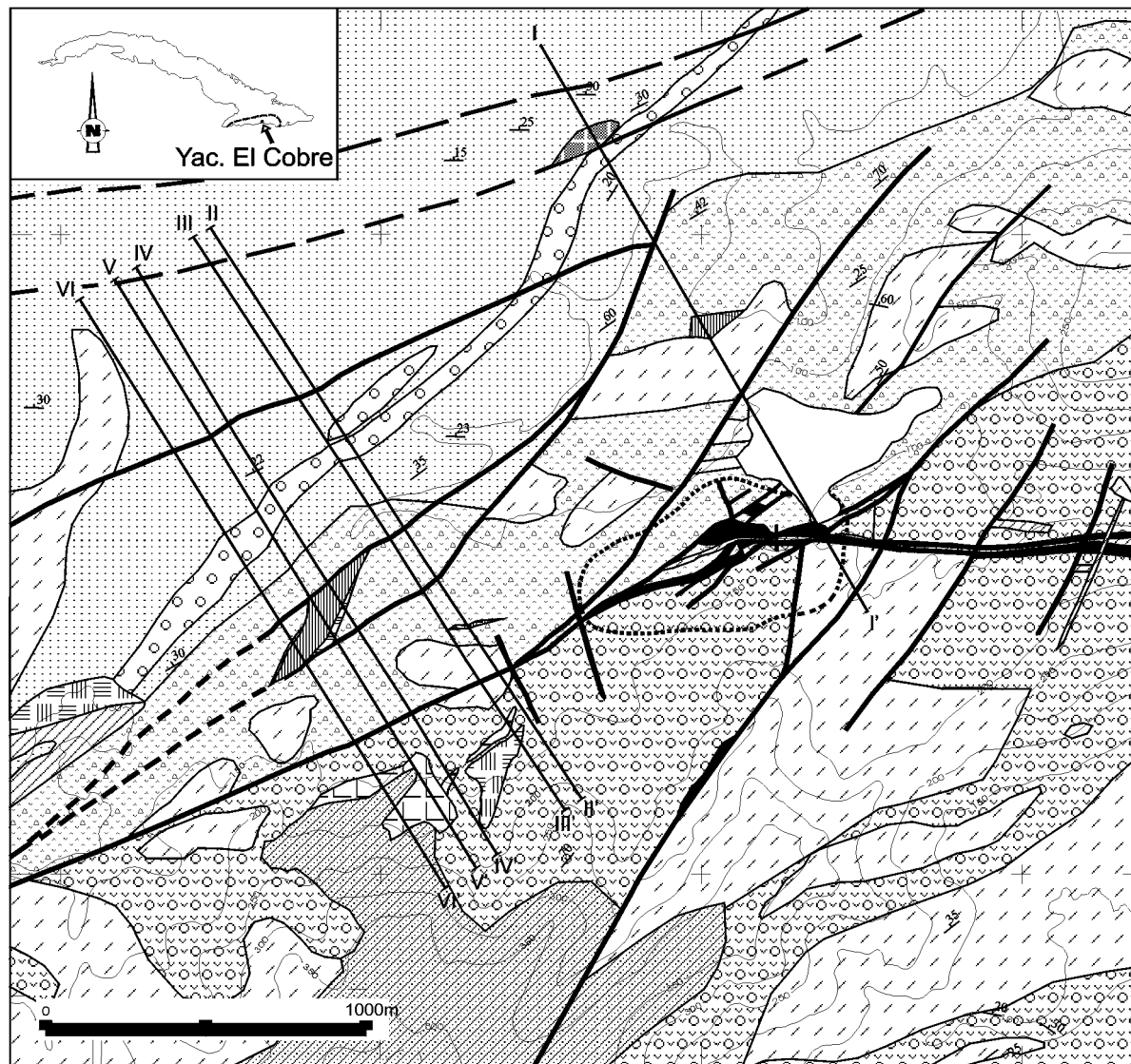


Figura 1. Mapa geológico a escala 1:10 000 de la región del yacimiento El Cobre, donde aparece ubicado este depósito.

desarrollada a partir de sulfatos, carbonatos y brechas (de carácter polimetálico, con Cu-Zn-Pb-Au), y filoniana, con desarrollo de *stockwork* en sectores superficiales y filones en profundidad, esencialmente cuprífera.

El presente trabajo ofrece un estudio de las inclusiones de fluidos atrapados durante la formación de los diferentes tipos de mineralización existentes en el yaci-

miento, que permite reconstruir la evolución espacio temporal de los fluidos que las formaron y precisar el modelo genético del mismo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este estudio se dispuso en sus inicios de 52 láminas gruesas doblemente pulidas, más

otras cuatro muestras obtenidas exfoliando manualmente cristales espáticos de calcita y anhidrita. Aunque solo se encontraron inclusiones de calidad suficiente para ser estudiadas en 16 de estas muestras, la población de muestras con inclusiones válidas se considera representativa de los principales tipos de mineralización presentes en el depósito. En un principio se realizó la clasificación de las inclusiones a partir de su descripción petrográfica y se seleccionaron para su estudio aquéllas interpretadas como primarias o pseudosecundarias, cuya formación ocurrió durante la deposición del mineral que las contiene. En algunos casos se estudiaron inclusiones secundarias, pero en los mismos existieron evidencias del posible origen de estos fluidos atrapados.

La petrografía se realizó en un microscopio óptico con luz transmitida y reflejada. Las inclusiones fueron clasificadas en primarias, pseudosecundarias y secundarias, utilizando los criterios definidos por Roedder (1984) y Bodnar (1993). El análisis de las inclusiones se llevó a cabo mediante el uso de las técnicas microtermométricas, la Raman y la Espectroscopía Infrarrojo. Debido al tamaño de las inclusiones no se pudo aplicar la criogenia en SEM-EDS o técnicas de *crush-leach*.

La observación y medición de las inclusiones se realizaron mediante un microscopio petrográfico Nikon y una platina calentable-enfriable Linkam THMSG 600. La clasificación de los tipos de inclusiones fluidas se basa en la cantidad de fases observadas a temperatura ambiente (+ 21°C). La salinidad de las inclusiones fue estimada a partir de la temperatura de fusión del hielo y fue calculada para la solución binaria simple H₂O-NaCl de acuerdo con la ecuación de regresión de Bodnar (1993). Las isocoras de las inclusiones se calcularon con el programa FLINCOR versión 1.2.3 para Windows, utilizando la ecuación de estado de Brown y Lamb (1989) para el sistema H₂O-NaCl.

RESULTADOS

En los filones silíceos en haces subparalelos se encontraron inclusiones fluidas interpretadas como primarias en muestras de esfalerita II. Estas inclusiones se disponen en grupos hacia el centro del cristal y no parecen estar afectadas por estrangulamiento o pérdida de fluidos. Son bifásicas, constituidas por una solución salina y una burbuja de vapor. Presentan forma rectangular, y tamaño entre 20 y 40 micras con un grado de relleno de 0,7. Las temperaturas eutécticas de estas inclusiones no pudieron determinarse. La temperatura de fusión del hielo oscila entre -2,3 y -2,5 °C, lo que indica salinidades entre 3,9 y 4,2 % en peso de NaCl eq. No se formó clatratos. Se produjo la homogenización a líquido, la temperatura de homogenización varía entre 205 y 265 °C.

En el *stockwork* silíceo se encontraron inclusiones fluidas primarias en cristales de cuarzo. Las inclusiones primarias reconocidas han sido atrapadas en cristales, en los que se observan muy bien las bandas de crecimiento. Las inclusiones estudiadas se disponen siguiendo estas bandas o bien se ubican de forma aislada dentro del cris-

tal. Su tamaño es bastante uniforme, entre 10 y 20 micras, y presentan forma de cristal negativo. Estas inclusiones son bifásicas, representadas por una burbuja de vapor y una solución salina. La estimación visual del grado de relleno es de 0,75-0,8. En ocasiones presentan minerales atrapados, que por ser muy pequeños no pudieron ser identificados. Los datos obtenidos en casi todas las muestras sitúan al eutéctico entre -21 y -22 °C, lo que coincide con la fusión de la hidrohalita, e indica que la salinidad se debe mayoritariamente a la presencia de NaCl. La temperatura de fusión del hielo en estas muestras oscila entre -1,6 y -2,6 °C para una salinidad entre 2,7 y 4,3 % en peso de NaCl eq. No se observó clatratos. Las inclusiones han homogenizado a líquido y la temperatura de homogenización se sitúa entre 258 y 299 °C.

En los filones anhidrítico-epidóticos se estudiaron inclusiones fluidas primarias no afectadas por estrangulamiento o pérdida de fluidos, en cristales de anhidrita. En estos cristales las inclusiones se disponen al azar o en grupo de 3 o 4. El tamaño oscila entre 8 y 20 micras, y presentan forma regular. Estas inclusiones son acuosas bifásicas (L-V). El grado de relleno es de 0,8. El eutéctico del sistema se sitúa en estas inclusiones entre -22 y -22,4 °C, lo que indica un componente mayoritario de NaCl en la fase salina y en menor proporción CaCl₂. La temperatura de fusión del hielo oscila entre -2,0 y -2,9 °C, a lo cual corresponden salinidades entre 3,4 y 4,7 % en peso de NaCl eq.. No se observó clatratos y, por último, la temperatura de homogenización varía entre 156 y 246 °C.

En la mineralización estratoligada inferior se estudiaron inclusiones fluidas primarias en cristales de anhidrita y calcita. Los cristales de anhidrita son idiomórficos y no presentan evidencias de estrangulamiento. Las inclusiones en estos cristales se disponen al azar o siguiendo su dirección de crecimiento. El tamaño de las mismas oscila entre 15 y 30 micras. Presentan forma regular, son bifásicas acuosas (L-V) y el grado de relleno es de aproximadamente 0,8. Los datos obtenidos sitúan al eutéctico en -22,5 °C, lo que no coincide con la fusión de la hidrohalita e indica la presencia de, probablemente, CaCl₂ en adición al NaCl. La temperatura de fusión del hielo varía entre -2,9 y -3,1 °C, y le corresponde una salinidad que oscila entre 4,7 y 5,1 % en peso de NaCl eq. No se formó clatratos. Todas las inclusiones han homogenizado a líquido a temperaturas entre 196 y 280 °C.

En la mineralización estratoligada inferior se presentan dos tipos de calcita: un primer tipo es de hábito hojoso (calcita I) y le sigue una segunda generación de calcita esparítica (calcita II). Se encontraron inclusiones fluidas de calidad solamente en la calcita II. Las inclusiones encontradas son primarias y se ubican de forma aislada dentro de las placas de calcita. Las inclusiones son acuosas bifásicas (L-V) con tamaño de 15 micras, forma regular y grado de relleno del 0,8. La temperatura de fusión del hielo observada es de -3,5 °C, lo cual indica una salinidad de 5,7 % en peso de NaCl eq. No se vio clatratos. Se produjo la homogenización a líquido con temperatura de 262 °C.

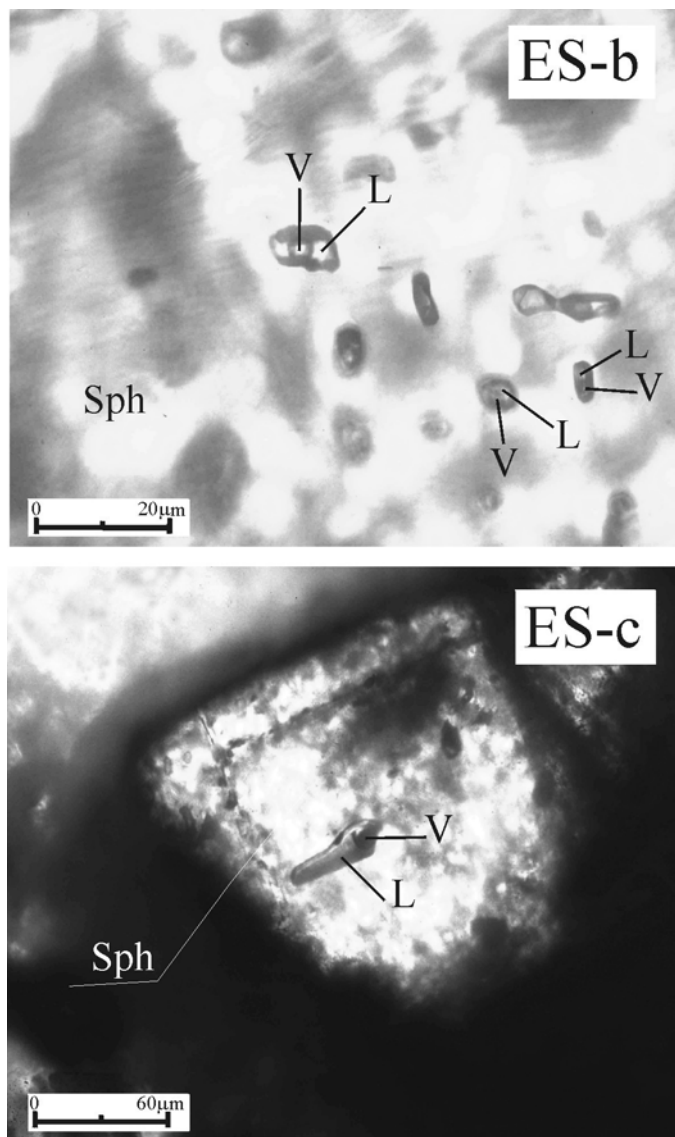


Figura 2 a. Microfotografías de las inclusiones fluidas en cristales de esfalerita II (sph), correspondientes a la mineralización estratoligada superior (ES): b) y c) son inclusiones primarias bifásicas Líquido (L) y Vapor (V). Luz transmitida sin analizador.

En la mineralización estratoligada intermedia se estudiaron inclusiones fluidas primarias en cristales de anhidrita y de calcita. Se trabajó sobre fragmentos de calcita esparítica, obtenidos exfoliando a mano muestras de calcita. Las inclusiones se disponen siguiendo la zonación de los cristales. Frecuentemente tienen forma de cristal negativo. El tamaño de las inclusiones oscila entre 8 y 15 micras. Las inclusiones son bifásicas (L-V) y el grado de relleno es de 0,7-0,8. Los datos obtenidos sitúan al eutéctico entre $-22,2$ y $-22,5$ °C, lo que sugiere la presencia de CaCl_2 en adición al NaCl. La temperatura de fusión del hielo varía entre -2 y $-3,7$ °C, en tanto que la salinidad correspondiente está entre 3,4 y 6,0 % en peso de Na Cl eq. No se observó clatratos. Las inclusiones han homogenizado a líquido con temperaturas entre 150 y 242 °C.

Las muestras de anhidrita en que se encontraron inclusiones en la mineralización estratoligada intermedia

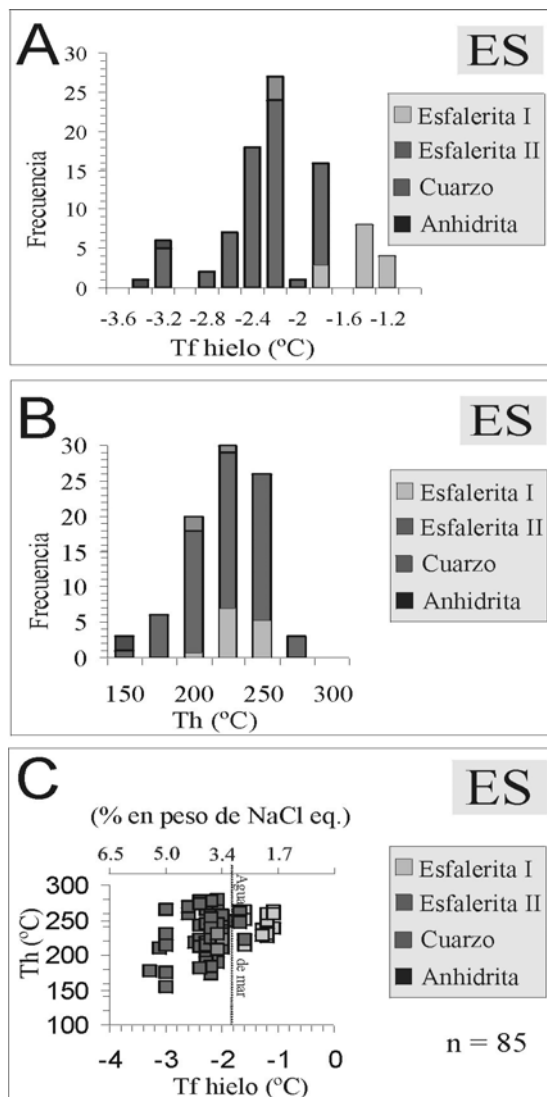


Figura 2 b. Datos microtermométricos de las inclusiones fluidas en la mineralización estratoligada superior (ES): A) Histograma de temperatura de fusión del hielo (Tf hielo); B) Histograma de temperatura de homogenización (Th); C) Diagrama de temperatura de fusión del hielo (Tf hielo) versus temperatura de homogenización (Th), y salinidad en la parte superior.

se presentan en forma de grandes placas, agrupadas en agregados radiales. Las inclusiones se disponen al azar o en las bandas de crecimiento del cristal. El tamaño de las inclusiones oscila entre 10 y 20 micras. Presentan forma prismática y son bifásicas (L-V). El grado de relleno es 0,7-0,8. Los datos obtenidos sitúan al eutéctico alrededor de $-22,5$ °C, lo cual indica la presencia de cantidades de CaCl_2 en adición al NaCl. La temperatura de fusión del hielo oscila entre $-2,1$ y $-3,2$ °C, y la salinidad varía entre 3,6 y 5,3 % en peso de NaCl eq. No se formó clatratos. La homogenización de todas las inclusiones se produjo a líquido, con temperaturas entre 178 y 226 °C.

En la mineralización estratoligada superior se estudiaron inclusiones fluidas primarias en cristales de cuarzo, esfalerita y anhidrita. Las inclusiones primarias en cuarzo son acuosas bifásicas (L-V), presentan un tamaño entre 10 y 15 micras, y el grado de relleno es de 0,7-0,8.

Estas inclusiones no están afectadas por pérdida de fluidos y se localizan aisladamente hacia la base de los cristales o en el centro de los mismos. Por el pequeño tamaño de estas inclusiones, el eutéctico no pudo determinarse. La temperatura de fusión del hielo oscila entre -2 y $-2,1$ °C, y la salinidad entre 3,4 y 3,6 % en peso de NaCl eq. No se observó clatratos. Se produjo la homogenización a líquido de estas inclusiones a temperaturas entre 207 y 230 °C.

Fueron reconocidas inclusiones fluidas primarias en dos tipos de esfalerita (I y II). La esfalerita I es de grano fino y se encuentra muy reemplazada por calcopirita; no obstante, se reconocieron inclusiones primarias localizadas en grupos de 4-5 o de forma aislada dentro de los cristales. Las inclusiones analizadas en la esfalerita (Fig. 2 a, b y c) son bifásicas (L-V) y presentan formas regulares, de cristal negativo. El tamaño de las mismas oscila entre 10 y 25 micras. El grado de relleno es 0,7-0,8. La esfalerita II es de grano más grueso que la esfalerita I y desarrolla cristales idiomórficos. El tamaño de estas inclusiones oscila entre 10 y 40 micras, y su grado de relleno es 0,7-0,8.

Los datos obtenidos en la esfalerita tipo I y tipo II sitúan al eutéctico entre -21 y -22 °C, esto coincide con la fusión de la hidrohalita e indica que la fase salina es NaCl. La temperatura de fusión del hielo en la esfalerita tipo I oscila entre $-1,1$ y $-1,7$ °C, a partir de donde se obtiene una salinidad entre 1,9 y 2,9 % en peso de NaCl eq. En la esfalerita tipo II la fusión del hielo ocurre a una temperatura entre $-1,6$ y $-3,1$ °C, lo que indica una salinidad que varía entre 2,7 y 5,1 % en peso de NaCl eq. No se observó clatratos. Las inclusiones han homogenizado a líquido. La temperatura de homogenización en la esfalerita I varía entre 215 y 264 °C, y en la tipo II entre 173 y 279 °C.

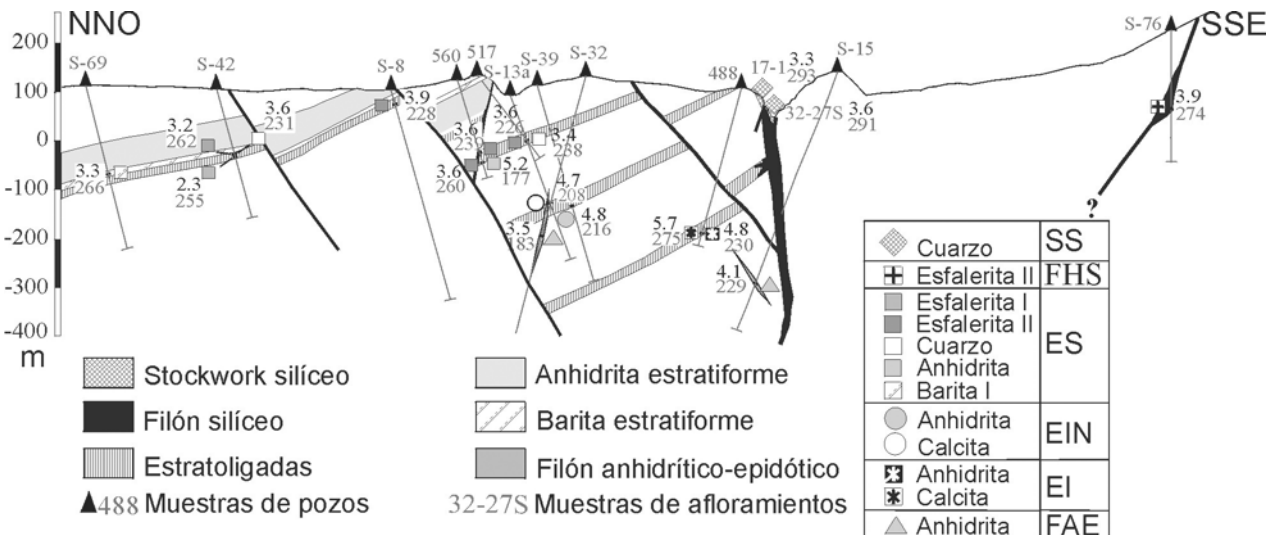
Los cristales de anhidrita en la mineralización estratoligada superior se presentan como placas hipidiomórficas. Las inclusiones primarias estudiadas se disponen al azar o según la zonación del cristal. El tamaño de las inclusio-

nes oscila entre 20 y 40 micras. Presentan formas prismáticas. Las inclusiones son bifásicas (L-V) y el grado de relleno es de 0,8. El eutéctico del sistema se sitúa entre -22 y -23 °C, por lo que la salinidad se debe principalmente a $CaCl_2$, además del NaCl. La temperatura de fusión del hielo oscila entre -3 y $-3,3$ °C, y corresponden salinidades entre 5,0 y 5,4 % en peso de NaCl eq. No se observó clatratos. Las inclusiones han homogenizado a líquido. La temperatura de homogenización varía entre 161 y 169 °C. En la figura 2 a se presentan los resultados del estudio microtermométrico en la mineralización estratoligada superior, mientras que la figura 2 b muestra los resultados del estudio de inclusiones fluidas en la mineralización estratoligada superior.

En la mineralización estratiforme de barita no se encontraron inclusiones primarias, sólo se estudiaron inclusiones secundarias atrapadas en los nódulos de barita, los que están afectados por reemplazamiento de vetas de cuarzo con piritita y sericita. Se estudiaron dos poblaciones de inclusiones secundarias. La primera población o barita I, está constituida por inclusiones que se disponen según planos de exfoliación, pero siempre cerca de las vetas de cuarzo+pirita+sericita. El tamaño de estas inclusiones varía entre 5 y 20 micras, y presentan forma elongada. Las inclusiones son acuosas bifásicas (L-V) y el grado de relleno es de 0,7-0,8. La segunda población o barita II, se dispone en planos de exfoliación pero corta a la población barita I, interpretándose como más tardía. El tamaño de estas inclusiones varía entre 15 y 25 micras, y son de forma irregular. Son acuosas bifásicas (L-V) y el grado de relleno es de 0,5-0,6.

Los datos obtenidos en la barita I sitúan al eutéctico entre -21 y -22 °C, lo cual coincide con la fusión de la hidrohalita, por lo que el NaCl es la fase salina dominante. En cambio, en la barita II el eutéctico es -36 °C, esto evidencia que la salinidad en estas inclusiones se debe además del NaCl al $CaCl_2$. La temperatura de fusión del

Figura 3. Perfil esquemático a través del yacimiento de El Cobre donde se muestra la distribución de valores promedio de Th en °C (inferior) y salinidad en % en peso de NaCl eq. (superior), según el estudio de inclusiones fluidas realizado en este depósito.



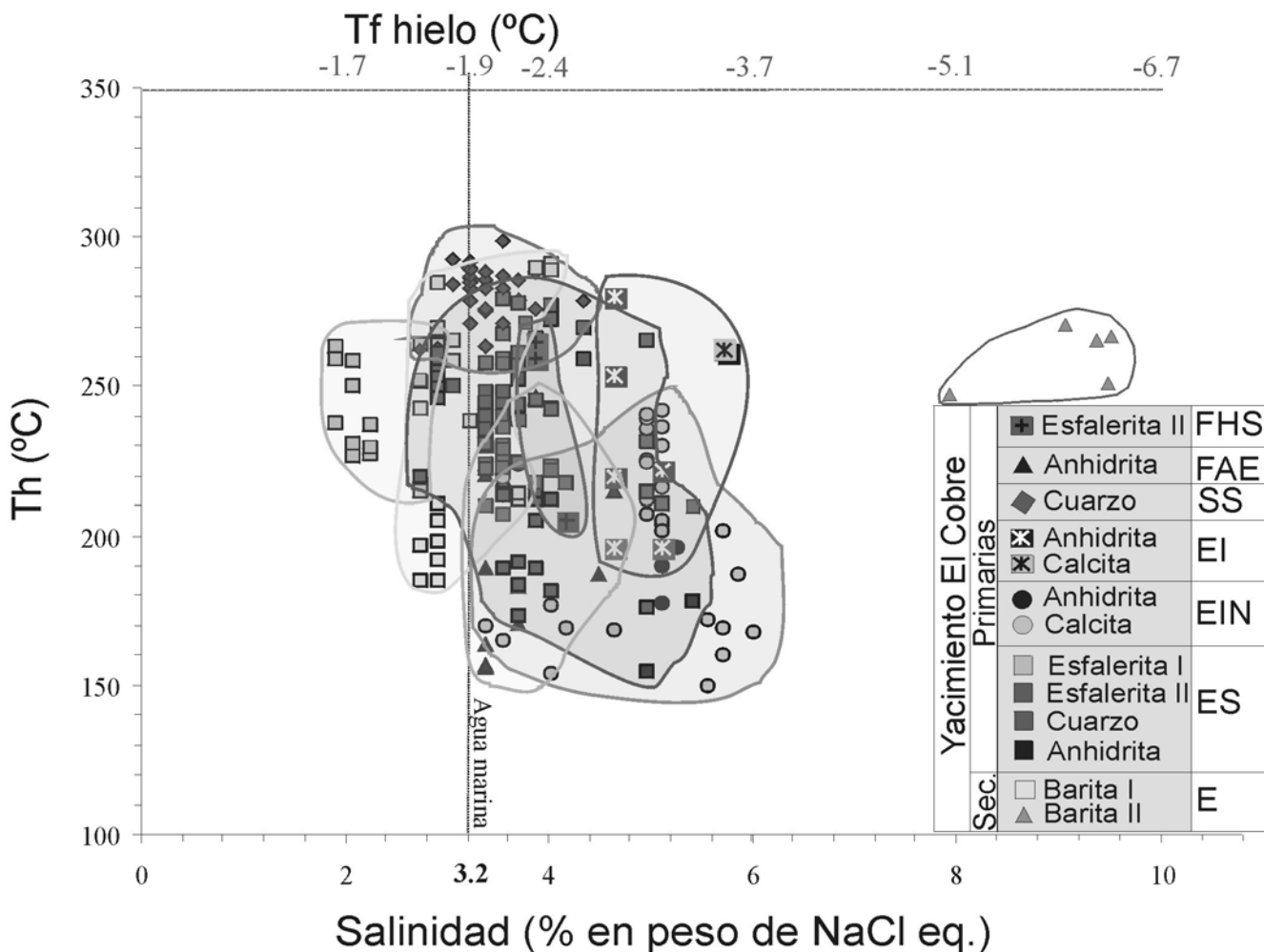


Figura 4. Diagrama general Th (°C versus salinidad (% en peso de NaCl eq.) de las inclusiones fluidas estudiadas en el depósito de El Cobre.

hielo en la barita I oscila entre $-1,6$ y $-2,4$ °C, y se obtiene un rango de salinidad entre 2,7 y 4,0 % en peso de Na Cl eq., en tanto que en la barita II la temperatura de fusión del hielo varía entre $-5,1$ y $-6,7$ °C, por lo que le corresponden salinidades entre 8,0 y 10,1 % en peso de Na Cl eq. No se observó clatratos. Las inclusiones han homogenizado a líquido. La temperatura de homogenización en la barita I oscila entre 185 y 291 °C, y entre 250 y 275 °C en la barita II.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados del estudio de inclusiones fluidas en las diferentes mineralizaciones del yacimiento El Cobre (Fig. 3 y Fig. 4) indican que la temperatura de fusión del hielo se encuentra entre $-1,1$ y $-6,7$ °C, para un rango de salinidad entre 1,9 y 10,1 % en peso de NaCl eq., en tanto que la temperatura de homogenización varía entre 150 y 299 °C. La no formación de clatratos y la ausencia de otros gases en la fase vapor por Raman, sugieren que esta fase está constituida de manera sistemática por vapor de agua en todas las zonas del depósito.

La esfalerita I muestra en la mineralización estratoligada superior los valores de salinidad más bajos del

yacimiento, con 1,9 % en peso de Na Cl eq. y promedio de 2,3. Las inclusiones secundarias en barita tipo barita I, presentan rangos de salinidad y temperatura de homogenización parecidos a las del cuarzo del *stockwork* silíceo o del cuarzo y esfalerita de la mineralización estratoligada superior. Si tomamos en consideración su localización, siempre cerca de las vetas de cuarzo con sericita y sulfuros, se infiere que estas inclusiones podrían ser representativas de, al menos, una parte de los fluidos que formaron las mineralizaciones en el *stockwork* y en el estratoligado superior. Para que ello se pueda constatar, en la figura 2 b se han incluido los resultados del estudio microtermométrico en la barita I; en cambio, las inclusiones secundarias en barita, tipo barita II, muestran salinidades elevadas, distintas a las obtenidas en las mineralizaciones estudiadas en el depósito. Puesto que estas inclusiones cortan a la barita I y son más tardías, creemos que los fluidos atrapados en estas inclusiones podrían corresponder a una circulación posterior, no relacionada con la formación del conjunto de mineralizaciones conocidas hasta ahora en el yacimiento.

Además de en la esfalerita I, inclusiones con baja salinidad se han localizado en cuarzo en el *stockwork*

TABLA. RESUMEN DEL ESTUDIO DE LAS INCLUSIONES FLUIDAS EN LAS MINERALIZACIONES DEL YACIMIENTO EL COBRE

Mineralización	Muestra	Mineral	N	Tamaño (μm)	Grado de relleno	T eutéctica ($^{\circ}\text{C}$)	Th ($^{\circ}\text{C}$)	Densidad (g/cm ³)	Salinidad (% peso NaCl)	T formación ($^{\circ}\text{C}$)	
SS	32-27 S	cuarzo	7	10 a 20	0,75-0,8	-21 a -22	299 / 279 / 258	0,81 / 0,78 / 0,71	4,3 / 3,6 / 3,2	291 + -6	
	17-1	cuarzo	24	10 a 20	0,75-0,8	-21 a -22	293 / 281 / 263	0,78 / 0,77 / 0,75	3,9 / 3,3 / 2,7	293 + -7	
FHS	S-76-158	esfalerita II	5	20 a 40	0,7	-	265 / 261 / 259	0,89 / 0,83 / 0,8	3,9 / 3,9 / 2,7	274 + -5	
	S-42-141,3	esfalerita I	15	10 a 25	0,7-0,8	-21,2 a -21,4	264 / 243 / 215	0,86 / 0,81 / 0,78	2,9 / 2,3 / 1,9	255 + -5	
ES	S-42-140	esfalerita II	26	10 a 40	0,7-0,8	-21 a -22	279 / 251 / 222	0,87 / 0,81 / 0,75	3,9 / 3,2 / 2,7	262 + -4	
	S-8-28	esfalerita II	20	20 a 40	0,7-0,8	-21 a -22	248 / 217 / 189	0,91 / 0,86 / 0,75	5,1 / 3,9 / 3,4	228 + -4	
	560-158	esfalerita II	8	10 a 15	0,7	-21 a -22	258 / 227 / 184	0,92 / 0,86 / 0,78	3,9 / 3,6 / 3,4	239 + -3	
	560-170,5	esfalerita II	12	20 a 25	0,7	-21 a -22	273 / 248 / 210	0,91 / 0,84 / 0,78	4,4 / 3,6 / 3,4	260 + -3	
	517-161	esfalerita II	1	10	0,7	-	214	0,88	3,6	226 + -3	
	S-42-140	cuarzo	2	12 a 15	0,8	-	230 / 219 / 210	0,88 / 0,87 / 0,85	3,6 / 3,6 / 3,6	231 + -4	
	517-161	cuarzo	1	10	0,7	-	225	0,86	3,4	238 + -2	
	517-170,5	anhidrita	2	25 a 40	0,7-0,8	-22,5	169 / 165 / 161	0,95 / 0,94 / 0,93	5,4 / 5,2 / 5,0	177 + -3	
	E	S-69-183	S-barita I	19	5 a 20	0,7-0,8	-21 a -22	291 / 253 / 205	0,91 / 0,83 / 0,75	4,0 / 3,3 / 2,7	266 + -4
		69-184	S-barita II	5	15 a 25	0,5-0,6	-35 a -36	275 / 264 / 250	0,88 / 0,87 / 0,84	10,1 / 9,5 / 8,0	276 + -5
EIN	S-13a-190	calcita	39	8 a 30	0,7-0,8	-22,2 a -22,5	242 / 204 / 150	0,95 / 0,89 / 0,81	6,0 / 4,7 / 2,7	208 + -3	
	S-39-285	anhidrita	5	10 a 20	0,7-0,8	-22,5	225 / 197 / 178	0,93 / 0,89 / 0,86	5,3 / 4,8 / 3,6	216 + -4	
EI	488-310	anhidrita	7	15 a 30	0,8	-22,4	254 / 218 / 196	0,91 / 0,85 / 0,78	5,1 / 4,8 / 4,7	230 + -4	
	488-310	calcita	1	15	0,8	-	262	0,83	*5,7	275 + -5	
FAE	S-32-344	anhidrita	5	8 a 10	0,8	-22 a -22,5	190 / 171 / 156	0,94 / 0,92 / 0,9	3,7 / 3,5 / 3,4	183 + -4	
	S-15-466	anhidrita	6	15 a 20	0,8	-22,4	246 / 217 / 187	0,93 / 0,88 / 0,83	4,7 / 4,1 / 3,4	229 + -4	

Nota: SS = stockwork silíceo, FHS = filón silíceo en haces subparalelos, ES = estratoligada superior, E = estratiforme, EIN = estratoligada intermedia, EI = estratoligada inferior, FAE = filón anhidritico-epidótico, N = número de medidas realizadas, TH = temperatura de homogenización, El número en negrita corresponde al valor promedio; el primer y último valor en la columna representa el rango de variación. La salinidad se calculó utilizando la temperatura de fusión del hielo.

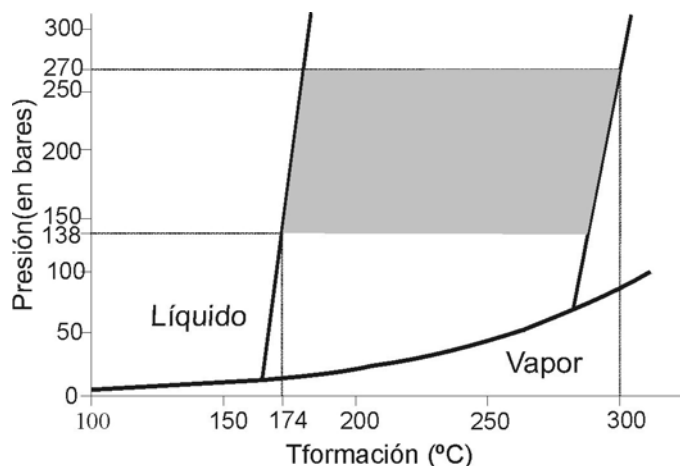


Figura 5. Diagrama de las condiciones P-T (curva líquido-vapor) en las inclusiones fluidas estudiadas. El área sombreada representa las condiciones P-T aproximadas para todo el yacimiento.

silíceo, en algunas inclusiones secundarias del tipo barita I en el estratiforme de barita y en algunas inclusiones en esfalerita II, en la mineralización estratoligada superior. No obstante, exceptuando la esfalerita I, que presenta un promedio de 2,3 % en peso de Na Cl eq., todos los valores promedios de salinidad obtenidos en los diferentes minerales y mineralizaciones estudiados en el yacimiento El Cobre están entre 3,2 y 5,7 % en peso de NaCl eq. y son superiores a los valores de salinidad que presenta el agua del mar (3,2 % en peso de Na Cl eq.). Por otra parte, estos valores se encuentran dentro de los rangos de salinidad reportados en depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos, como los de la región de Prince William Sound (Crowe *et al.*, 1992) y las menas de Kuroko (Pisutha-Arnond y Ohmoto, 1983), en los que la salinidad mayormente varía en rangos de 3,5 a 8 % en peso de Na Cl eq. Similares salinidades también han sido reportadas en sistemas hidrotermales actuales, como en los basaltos de elevaciones submarinas en 21° N, entre otros.

Se tuvieron en cuenta dos posibilidades en los depósitos Kuroko para explicar estas diferencias de salinidad: a) por ebullición y b) por mezcla del fluido hidrotermal con agua meteórica. En el caso del depósito El Cobre es poco factible que los valores de salinidad inferiores al agua del mar se puedan explicar por mezcla con aguas meteóricas, pues las condiciones eran submarinas y profundas. Por otra parte, las salinidades mayores a 3,2 % en peso de Na Cl eq. tampoco se pueden explicar a partir de un fluido constituido únicamente por agua de mar, y, por último, la ebullición es poco probable tomando en cuenta que todas las inclusiones homogenizan a líquido. Sin embargo, investigaciones recientes en los fondos oceánicos han podido demostrar que a 2 600 m de profundidad de la columna de agua, los fluidos pueden tener una salinidad más alta o más baja que la del agua del mar (Fouquet, 1997). Se ha comprobado que después de erupciones volcánicas se pueden formar dos flui-

dos, uno de los cuales es denso y salino y el otro es poco salino y enriquecido en volátiles, lo que lo hace más ligero. Por tanto, se puede valorar la posibilidad de que esta diferencia en la salinidad del depósito El Cobre se explique asumiendo una separación temprana de fases. Los valores de salinidad en El Cobre tienden a incrementarse en el tiempo: son bajos e incluso inferiores a los del agua del mar en los minerales precoces (esfalerita I, cuarzo y parte de esfalerita II), crecen con la esfalerita II y son máximos en las últimas fases en cristalizar (calcita y anhidrita). Por otra parte, las temperaturas de homogenización de las inclusiones también indican una tendencia al incremento desde los estadios iniciales (esfalerita I y parte de la II), por lo que se alcanza un máximo con la formación de cuarzo de cristales gruesos, calcopirita, pirita, barita I y parte de la esfalerita II, y decrece al final cuando se forman la anhidrita y calcita tardía.

Un incremento progresivo de la salinidad en el fluido podría reflejar mezcla con una solución de mayor salinidad, cuya influencia creció con el tiempo. Las oscilaciones que a nivel de muestra se observan en los valores de salinidad y temperatura de homogenización, podrían también sugerir mezcla con pequeñas cantidades de agua de mar fría, proveniente del fondo submarino, que dio lugar al enfriamiento del fluido y a la precipitación mineral.

En conclusión, la presencia de un fluido poco salino temprano y el incremento de la salinidad con el tiempo, indicarían la posible contribución de dos tipos de fluidos de origen magmático (uno salino y otro poco salino), además de un tercero que es el agua de mar. El fluido salino al ser más denso y pobre en volátiles, su ascenso es más lento, y por ello su contribución tiene lugar en etapas más tardías.

Por otra parte, como no se conoce con exactitud la profundidad a la que se formó el depósito, se han tenido en consideración diferentes factores con el objetivo de acotar en lo posible el rango de profundidad. Puesto que las inclusiones fluidas homogenizan a líquido, sugiere que no se llegó a ebullición y que el sistema se encontraba a una presión relativamente elevada. Si se asume que estas mineralizaciones se formaron en un fondo submarino o inmediatamente por debajo del mismo, se ha considerado que la presión necesaria para evitar la ebullición a esta temperatura requiere una profundidad mínima de la columna de agua de mar de alrededor de 1,1 km (Haas, 1971; Belkin, 1994).

Según las experiencias de Shikazono y Holland (1983) para que se forme un m de anhidrita por calentamiento de agua marina, se requiere una columna de agua de mar de aproximadamente 3,6 km de potencia, en un sistema cerrado. La composición del agua de mar usada, probablemente difiera poco de la presente en el Paleógeno. Tomando en consideración las experiencias de los autores antes referidos, es evidente que los 100 m de potencia de anhidrita no pueden explicarse por calentamiento de agua marina en un sistema cerrado, pero sí pueden explicarse si se considera un sistema abierto.

Para extrapolar las temperaturas de formación de los minerales a partir de las temperaturas de homogenización, debe realizarse la corrección de presión. En el caso del yacimiento El Cobre no se cuenta con determinaciones directas de la presión, y sólo se dispone de unos posibles rangos de presión. Por ello, se ha tratado de modelar la variación de la temperatura de formación en función de estos rangos de presión. Para lograrlo, hemos considerado un supuesto de profundidad mínima de 1,1 km y otra máxima de 2,5 km.

La primera profundidad es la que debemos asumir para que las inclusiones homogenicen a líquido; la segunda, se ha tomado como un promedio de las profundidades de los fondos submarinos actuales en que se han descrito mineralizaciones con anhidrita (Scott, 1996; Fouquet, 1997), así como la estimada para los depósitos del tipo Kuroko (Guber y Ohmoto, 1978).

Así pues, para establecer las condiciones de presión a las que se ha formado el depósito El Cobre, se ha calculado la presión hidrostática generada por una columna de agua de 1,1 km a la cual se ha añadido la presión litostática generada por los 100 m de anhidrita, con lo que se obtienen unas condiciones mínimas de presión total equivalente a 138 bares. Asumiendo una columna hidrostática de 2,5 km y una litostática de 100 m, se calcularon las condiciones máximas de presión total ascendente a 270 bares.

A partir de las isocoras de las inclusiones, suponiendo un rango de presión entre 138 y 270 bares, se calculó la temperatura de formación de las mineralizaciones estudiadas en $177 \pm 3^\circ\text{C}$ y $293 \pm 7^\circ\text{C}$ (Fig. 5).

AGRADECIMIENTOS

Las mediciones microtermométricas se realizaron en el Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona, en una platina Linkam THMS 600, donada a Cuba por la Fundación Solidaridad de dicha Universidad. La Raman y FRX se realizaron en los Serveis de la Universidad de Barcelona con el apoyo de los especialistas del área. La estancia de X. Cazañas en Barcelona fue costeada por una beca doctoral de la AECl, y de la Fundación Bosh y Gimpera.

BIBLIOGRAFÍA

ANSTED, D.T.: The El Cobre (copper) of Santiago de Cuba, *Proceedings of the Geological Society of London*, 12:145-153, 1856.
BELKIN, H. E.: "Microthermometric investigation: Th and Tm. Practical and theoretical aspects", en: B. de Vivo, M. L. Frezzotti, eds.: *Fluid*

- inclusions, minerals: Methods and Applications*. Short course of the working group (IMA) "Inclusions in minerals", 7-24, 1994.
BODNAR, R. J.: "Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions", *Geochim. Cosmochim. Acta* 57 (6): 684-688, 1993.
BROWN, P. E. & W. M. LAMB: "P-V-T properties of fluids in the system H₂O-CO₂-NaCl: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53:1209-1221, 1989.
CAZAÑAS, X., J. C. MELGAREJO, A. LUNA Y H. BARRABÍ: "El depósito volcanogénico de Cu-Zn-Pb-Au El Cobre, Cuba: estructura y mineralogía", en J. C. Melgarejo, J. Proenza, eds.: Una panorámica de la metalogénica de Cuba. *Acta Geológica Hispánica*, 33 (1-4):277-333, 1998.
CROWE, D., W. STEVEN, P. BROWN AND S. WAYNE: "Geology and Geochemistry of volcanogenic Sulfide deposits and related igneous rocks, Prince William Sound, South-Central Alaska", *Economic Geology*, 87 :1722-1746, 1992.
FOUQUET, Y.: "Where are the large hydrothermal sulphide deposits in the oceans?", *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 355: 427-441, 1997.
GUBER, A. L. & H. OHMOTO: "Deep sea environment of Kuroko formation as indicated by the benthic foraminifera from the Hokuroko district, Japan", *Mining Geology*, 28:245-256, 1978
HAAS, L., JR.: "The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure", *Economic Geology*, 66:940-946, 1971.
LAWRENCE, B. B.: "Two Cuban mines", *Jour. Can. Min. Inst.* 13: 91-106, 1910.
LUNA, J. A., T. PADRÓ, B. I. GELIS, I. SOSA, F. BATISTA, E. RODRÍGUEZ, L. ANANÍAS, A. FERNÁNDEZ, I. SOSA, M. GUTIÉRREZ Y M. ESTRUGO: "Informe geológico de prospección preliminar de los flancos y horizontes profundos del campo metalífero 'El Cobre' a escala 1:10 000", 218 pp., La Habana, archivos de la ONRM (inédito), 1989.
PISUTHA-ARNOND, V. & H. OHMOTO: "Thermal history and chemical and isotopic compositions of the ore-forming fluids responsible for the Kuroko massive sulfide deposits in the Hokuroku district of Japan", *Econ. Geol. Mon.* 5:523-558, 1983.
RAMÍREZ, M., A. FERNÁNDEZ Y A. QUINTANA: "Informe cancelado temático-productivo y metalogénico-experimental Oro-Barita Oriental", Santiago de Cuba, Archivo de la ONRM (inédito), 1994.
ROEDDER, E.: *Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy*, 644 pp., Mineralogy Society of America, vol. 12, 1984.
RUSSELL, N., M. SEAWARD, J. A RIVERA, K. MCCURDY, S. E. KESLER, P. L. CLOKE: "Geology and geochemistry of the Pueblo Viejo gold-silver oxide ore deposit", Dominican Republic. *Inst. Min. Metal. Trans., Sect. B*, 90, B153-B162, 1981.
SCOTT, S. D.: "Presently-forming hydrothermal deposits in the oceans and ancient ores on land. A comparison of modern and ancient massive sulfides and related deposits from a geological and geochemical point of view", 36 pp., Short course, Université de Bretagne Occidentale-Brest, *Les Séminaires De La Ecole doctorale des Sciences de la Mer*, 1996.
SHIKAZONO, N. & H.D HOLLAND: "The partitioning of strontium between anhydrite and aqueous solution from 150 °C to 250 °C", *Econ. Geol.*, 5 : 320-328, 1983.
USHAKOV, N., H. BARRABÍ, J. FERNÁNDEZ, F. J REBORIDO, A. FERNÁNDEZ Y M. GUERRA: "Informe de la Exploración Orientativa hasta el horizonte -300, en los sectores Mina Blanca, Mina Grande y Gitanilla del yacimiento El Cobre", 135 pp., La Habana, Archivo de la ONRM, 1986.