

GEOBAROMETRIA EN LOS SULFUROS MACIZOS DE LA FRANJA METAMORFICA DE ESQUISTOS VERDES, CHILE CENTRAL-SUR

SANTIAGO COLLAO

Universidad de Concepción, Departamento de Geociencias, Casilla 3-C, Concepción.

SHOJI KOJIMA

Institute of Mineralogy, Petrology and Economic Geology, Tohoku University, Japan.

ROBERTO OYARZUN

Universidad Complutense, Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias Geológicas, Madrid, España.

RESUMEN

En la franja costera de Chile Central-Sur, afloran mantos de sulfuros macizos, emplazados en esquistos verdes de edad paleozoica, en actitud concordante con la foliación penetrativa regional.

El uso de blenda como geobarómetro, en los cuerpos mineralizados de la Mina Vieja de Tirúa y de la mina Pirén Alto, ha sido factible de aplicar al ser comprobada en equilibrio con pirrotita y pirrotita + calcopirita, encapsuladas en cristales de pirita o intersticialmente a ellos. La blenda, en estas asociaciones, contiene las proporciones más altas de FeS (% molar) en relación a otras en contacto con galena o bornita, resultando un intervalo de presión de 4,4-9,0 kb con una media de 6,5 kb.

Estos valores son cercanos a aquéllos de 5-6 kb obtenidos a partir de la química de las anfíbolitas calcosódicas, presentes en la fase silicatada de los esquistos verdes.

Palabras claves: Geobarometría, Blenda, Sulfuros macizos, Franja metamórfica, Paleozoico, Chile.

ABSTRACT

Stratabound massive sulfide deposits crop out along the coastal belt of South-Central Chile. Host rocks for the ores are green schists of Paleozoic age.

The usage of sphalerite as geobarometer was possible in the Mina Vieja (Tirúa) and Pirén Alto mineralized bodies due to the fact that this mineral was in equilibrium with pyrrhotite and pyrrhotite + chalcopyrite which occur encapsulated or interstitially in pyrite crystals. The studied sphalerites occurring in such conditions show high values of FeS (% molar), indicating a pressure range from 4.4 kb to 9.0 kb with a mean value of 6.5 kb. This matches well with values of 5 kb to 6 kb obtained from the chemistry of Ca-Na amphiboles belonging to the green schists silicate phase.

Key words: Geobarometry, Sphalerite, Massive sulfides, Metamorphic belt, Paleozoic, Chile.

INTRODUCCION

Mineralizaciones de sulfuros macizos, emplazados en esquistos verdes, afloran a lo largo de la franja costera entre la localidad de Tirúa y la ciu-

dad de Valdivia. Los sectores mineralizados, de norte a sur, son: Mina Vieja, Casa de Piedra, Hueñalibén, Trovolhue y Pirén (Fig. 1). Parte o la totali-

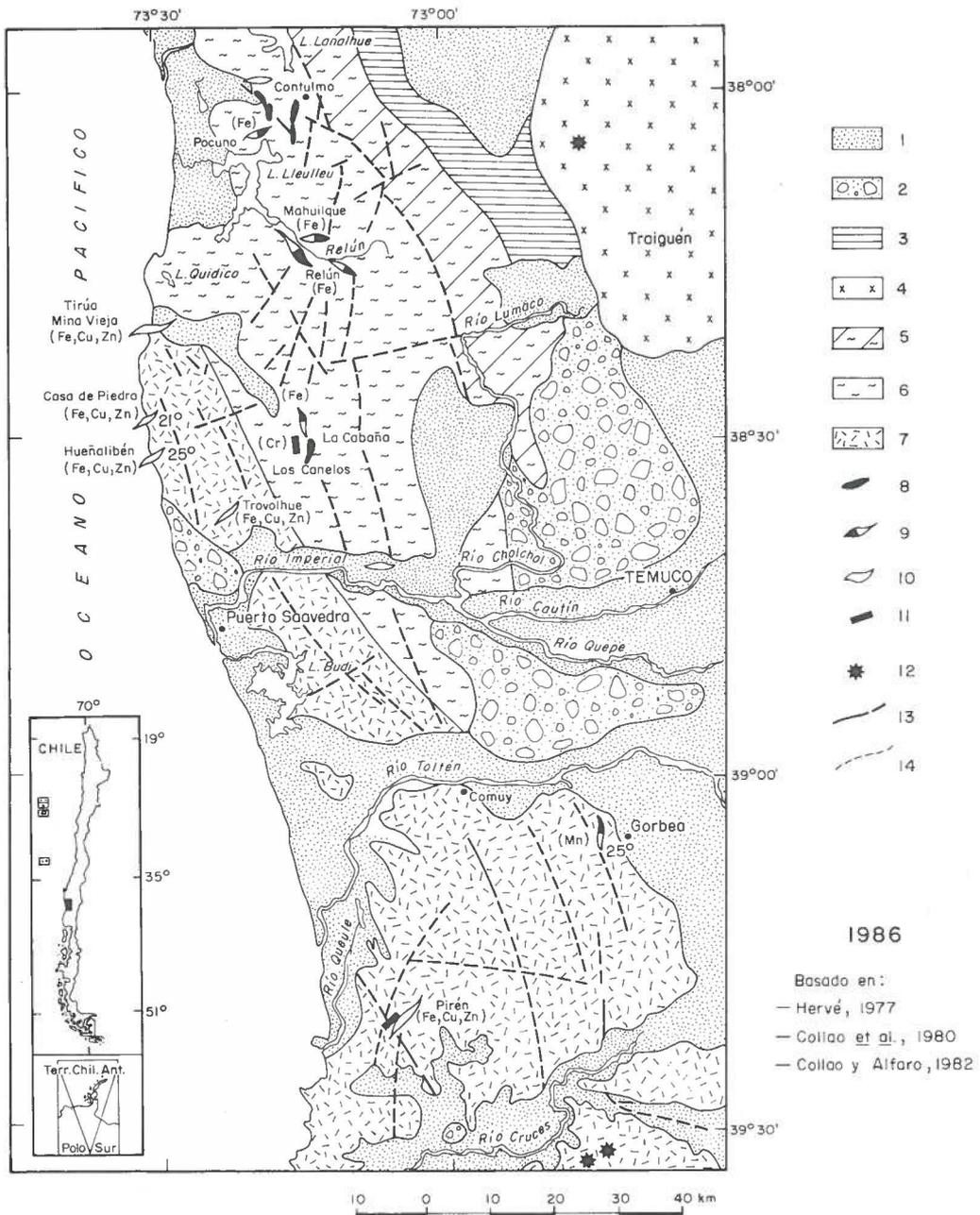


FIG. 1. Geología de la Cordillera de Nahuelbuta-Queule. 1. Cuaternario, dunas y gravas; 2. Terciario, areniscas, lutitas y conglomerados; 3. Triásico, areniscas y lutitas; 4. Paleozoico, granitoides; 5. Unidad Oriental, metagrauwacas, metapelitas; 6. Unidad Nahuelbuta, esquistos micáceos, "metacherts"; 7. Unidad Tirúa, esquistos verdes, esquistos micáceos, "pillow lavas"; 8. Serpentinita; 9. Depósito bandedado de hierro (Fe), manganeso (Mn); 10. Depósitos de sulfuro macizo (Fe, Cu, Zn). 11. Depósito podiforme de cromo (Cr). 12. Placer aurífero; 13. Fallas; 14. Contactos inferidos.

TABLA 1. COMPOSICION DE PORCENTAJE MOLAR DE FES EN BIENDAS DE LOS CUERPOS MINERALIZADOS MACIZOS, DE LA CORDILLERA DE NAHUELBUITA Y QUEJUE, CHILE CENTRAL - SUR

Localidad y Horizontes	Muestra	Fe	Zn	S	Cu	Cd	In	Mn	% Molar de Fes en biendas asociadas a diferentes minerales Encapsuladas en Pirita						Intersticiales		Presión (kb)		
									Sp+Po	Sp+Po+Cpy	Sp+Cpy	Sp+Cpy+Bo	Sp(*)	Sp+Po+Cpy	Sp+Cpy	A	B		
TIRUA HORIZONTE PRINCIPAL	C-3 ₁	7,7	58,1	33,5	0,4					13,3							6,2	6,3	
	C-3 ₄	7,8	58,8	33,8	0,4					13,3							6,2	6,3	
	C-3 ₅	8,0	58,0	33,4	0,2	0,5				13,8							5,8	5,9	
	C-3 ₂	7,8	57,4	33,3	0,7					13,5							6,0	6,1	
	C-3 ₃	7,5	58,1	34,0	0,6					13,0							6,6	6,7	
	C-3 ₁	4,2	63,3	33,1					0,1	7,3									
	C-3 ₂	4,0	62,8	33,6						7,0									
	C-8 ₁	2,8	65,1	33,1															
	C-8 ₂	2,4	64,4	32,4															
	C-8 ₃	2,6	64,6	32,7															
C-8 ₄	2,0	65,0	32,6																
C-8 ₅	1,6	65,8	32,7	0,1															
C-8 ₁	2,8	63,9	33,1	0,3															
C-8 ₂	2,6	64,0	33,2																
C-8 ₃	2,5	64,0	33,2																
CASA DE PIEDRA	H-7 ₁	8,8	57,4	33,5						15,2							4,3	4,4	
	H-7 ₂	8,5	57,4	33,6						14,7							4,8	4,9	
	H-7 ₁	7,4	58,4	33,3	0,9				0,2	12,7							6,9	7,0	
	H-7 ₂	7,6	58,2	33,7	0,7					13,1							6,4	6,5	
	H-7 ₃	8,1	59,1	33,2						13,8							5,7	5,8	
	H-7 ₄	7,6	59,3	33,1						13,1							6,5	6,6	
	H-7 ₅	8,1	57,9	33,4	0,3				0,2	13,9							5,8	5,9	
	H-6 ₁	7,3	59,0	33,8						12,6							7,0	7,1	
	H-6 ₂	6,4	60,1	33,7						11,1							8,7	8,8	
	H-6 ₃	6,4	60,6	33,1						11,0							8,9	9,0	
	H-6 ₄	6,3	61,1	33,1															
	H-6 ₅	6,7	59,7	33,4	0,2														
	H-6 ₆	6,8	60,4	33,3															
	H-6 ₁	7,0	59,1	33,4						12,2							7,4	7,5	
H-6 ₂	7,3	58,6	33,1						12,7							6,9	7,0		
H-6 ₃	6,8	59,4	32,8																
H-6 ₄	6,6	60,1	33,0																
H-6 ₅	6,6	59,5	33,2																
PIRENA ALTO	H-4 ₁	7,2	59,5	33,4	0,4					12,3							7,4	7,5	
	H-4 ₂	7,5	57,9	32,9	0,3					12,9							6,6	6,7	
	H-3 ₁	5,7	60,5	33,4															
	H-3 ₂	5,4	60,4	33,3	0,4														
	H-3 ₃	5,8	60,8	33,6															
	H-4 ₁	9,0	57,0	33,8						15,7									
	H-4 ₂	8,8	56,9	33,5	0,6					15,2									
	H-4 ₃	8,9	57,2	33,5	0,2					15,4									
	H-2 ₁	8,6	57,9	33,5	0,3														
	H-2 ₂	8,5	58,1	33,1	0,6														
	H-1m ₁	7,7	58,4	33,5	0,4														
	H-1m ₂	7,8	58,8	33,6															
H-1m ₃	6,9	59,0	33,6																
H-1m ₄	7,5	59,2	33,6																
H-1m ₅	7,6	58,9	33,9	0,4															
H-1m ₆	7,2	58,8	33,8	0,4															
H-1m ₇	7,6	58,4	33,8	0,5															
H-1m ₈	7,3	59,3	33,6																
H-1m ₉	7,2	58,8	32,2	0,6															
H-1m ₁₀	7,8	58,5	33,4																
H-1m ₁₁	7,9	58,3	33,6																
H-1m ₁₂	7,8	57,6	33,6	0,5															
H-1b ₁	8,0	57,2	33,4	0,6						13,8									
ROCA BASAL	C-05 ₁	3,2	63,3	32,4	0,8												5,5		
	C-05 ₂	1,7	65,3	32,5	0,3												3,0		
	C-05 ₃	1,7	68,4	32,5	0,6												3,0		
	C-05 ₄	1,7	65,2	32,9													2,9		
	C-05 ₅	1,4	65,2	33,0													2,5		
	C-05 ₆	1,4	64,8	33,1													2,5		

(*) Bienda distante de otras asociaciones minerales; A: Cálculo de presión según Hurchison y Scott (1981); B: Cálculos de presión según Lusk y Ford (1978).

dad de ellos han sido descritos en estudios anteriores (Alvarez, 1970; Vergara, 1970; Alvarez y Rivera, 1970; Collao *et al.*, 1980; Collao y Alfaro, 1982), en los que se exponen, principalmente, las características mineralógicas, indicando, a su vez, que la mineralización estaría asociada con el proceso volcánogénico, que dio origen a los esquistos verdes o metabasitas.

Los depósitos mineralizados son de pequeña magnitud (menores que 0,5 m de potencia y 30 m de corrida visible, en la dirección de la foliación penetrativa, S_2). Los contenidos de los elementos principales y trazas son relativamente variables, fluctuando entre: 1,0-1,8% Cu, 0,1 - 6,2% Zn, 29 - 115 ppm Ni, 14 - 78 ppm Co, 6 - 92 ppm Ag y 0,04 - 0,05 ppm Au (Alfaro *et al.*, 1983). Análisis posteriores han indicado que el contenido de Au en horizontes de Pirén alcanzan hasta 1,03 ppm (Oyarzún y Helle, 1984).

En los cuerpos mineralizados de Mina Vieja, Casa de Piedra y Pirén Alto, la existencia de blenda, en asociación o en equilibrio con pirrotita encapsulado en piritita, ha permitido realizar estudios de geobarometría.

La blenda como geobarómetro ha sido experimentalmente estudiada por Barton y Toulmin

(1966) y Scott y Barnes (1971), quienes han sido pioneros en la aplicación del contenido de FeS (% molar) en las relaciones de fases que involucran blenda, hierro, pirrotita, piritita y soluciones sólidas intermedias, en los sistemas Fe-Zn-S y Cu-Fe-Zn-S, en intervalos de presión de 2,0-7,7 kb y 300-750°C de temperatura. Estudios posteriores perfeccionaron la metodología con calibraciones experimentales de la blenda como geobarómetro (Scott, 1973) y extendieron las pruebas a 10 kb de presión (Lusk y Ford, 1978).

Las aplicaciones en cuerpos mineralizados han sido numerosas, y aunque la mayoría ha dado buenos resultados, otras han sido discutibles. En terrenos metamórficos, la composición de la blenda, en contacto con pirrotita totalmente encerrada en piritita, reflejaría una preservación de su equilibrio a alta presión y temperatura, y serían las más aconsejables para la estimación de la presión (Scott, 1983).

En este trabajo, los resultados más representativos corresponden al cuerpo principal de la Mina Vieja de Tirúa y a los horizontes 1, 4, 6 y 7 de la mina Pirén Alto (Tabla 1, Fig. 1) que, geográficamente, comprenden el margen norte y sur de los depósitos de sulfuros macizos.

METODOLOGIA

Alrededor de cien secciones pulidas de los diferentes cuerpos mineralizados fueron investigadas al microscopio de luz reflejada, para determinar los minerales, estructuras y relaciones texturales. En la investigación fueron utilizados un microscopio Zeiss Universal (con microfotómetro y monocromador para medidas de reflectividad) y un Microdúrmetro Vickers, marca Akashi, tipo D.

En algunos minerales, fue necesario el análisis de difracción de rayos X, para determinar pirrotita hexagonal (análisis con cámara de Guinier-Hägg) y producto de reemplazo intermedio de piritita por marcasita (análisis con cámara de Gandorfi). El equipo utilizado fue un difractómetro JEOL (DX-GE-509), con radiación monocromatizada $Cu K\alpha_1$, operado entre 30 y 35 kV y 10-14 mA.

Otros minerales (galena, molibdenita, mackinawita, etc.), en tamaños micrométricos (10-50 μ de diámetro), fueron reconocidos cualitativamente y analizados cuantitativamente (blenda), con una microsonda electrónica (Shimazu-ARL, tipo EMX-2)

en la Universidad de Tohoku, Sendai, Japón.

Para geobarometría se seleccionaron quince secciones pulidas a fin de medir el contenido de FeS (% molar) en 61 puntos de blenda (Tabla 1), asociada a diferentes minerales, que ocurren tanto en forma intersticial, como encapsuladas entre y en granos de piritita, respectivamente (Figs. 2-5). Para los cálculos de presión, sólo fueron consideradas aquellas asociaciones de blenda + pirrotita y blenda (con bajo contenido de Cu, Tabla 1) + pirrotita + calcopiritita, encapsuladas en pirititas, donde fueron medidos 19 puntos.

Las condiciones de operación de la microsonda electrónica fueron 220 kV de voltaje de aceleración y 0,02 mA. Los estándares utilizados fueron calcopiritita sintética (para la determinación de Cu, Fe y S), blenda sintética (para Zn), MnS sintético (para Mn), CdS sintético (para Cd) y roquesita ($CuIn S_2$) sintética (para In). El límite de detección es del orden de 0,1% en peso para estos elementos. La composición química de los minerales fue com-

putada según el método de Bence y Albee (1968) modificado por Sugaki *et al.* (1974), con un computador (Yokogawa-Hewlett-Packard 98255) conectado directamente al equipo.

En las rocas hospedadoras (esquistos verdes), se realizaron mediciones cuantitativas de presión, de-

terminando el componente crossítico (Na, M_4) y Al^{IV} , a partir de la composición catiónica de las anfíbolos (Tabla 2), mediante el método de Brown (1976). Estos valores corresponden sólo al sector de Casa de Piedra.

TABLA 2. DISTRIBUCION CATIONICA EN ACTINOLITAS, CASA DE PIEDRA

	1	2	3	4	5	6
Si	7,466	7,707	7,776	7,682	7,779	7,701
Al^{IV}	0,534	0,293	0,224	0,318	0,221	0,299
Al^{IV}	0,498	0,539	0,625	0,590	0,454	0,561
Ti	0,000	0,008	0,008	0,007	0,007	0,009
Mn	0,050	0,050	0,049	0,062	0,053	0,042
Fe, Mg	4,452	4,403	4,318	4,341	4,486	4,388
Fe, Mg	0,299	0,263	0,223	0,201	0,389	0,228
Ca	1,338	1,196	1,169	1,236	1,086	1,255
Na	0,363	0,541	0,608	0,563	0,525	0,517
Na	0,405	0,243	0,191	0,280	0,265	0,197
K	0,000	0,000	0,000	0,001	0,020	0,039

MARCO GEOLOGICO

El Basamento Metamórfico Paleozoico de Chile Central-Sur ha sido diferenciado en una Serie Oriental y una Serie Occidental (Aguirre *et al.*, 1972; Hervé, 1977), en consideración de las características litológicas, grado de metamorfismo y deformación que ellas presentan. La Serie Occidental consiste en metagrauwacas, metapelitas y rocas córneas, asociadas a granitoides de dimensiones batolíticas. La Serie Occidental comprende esquistos verdes, esquistos micáceos, "metacherts" y serpentinitas.

En este trabajo, la Serie Occidental ha sido dividida en dos unidades informales, denominadas Unidad Tirúa y Unidad Nahuelbuta. La Unidad Tirúa comprende la faja costera con esquistos verdes (metabasitas) dominantes, intercalaciones menores de esquistos micáceos y afloramientos esporádicos de "metacherts, serpentinitas, sulfuros macizos y "meta-pillow lavas". La Unidad Nahuel-

buta abarca, principalmente, los sectores altos de la Cordillera de la Costa y se caracteriza por la predominancia de esquistos micáceos e intercalaciones menores de "metacherts", "metacherts" ferruginosos (depósitos bandeados de hierro) y cuerpos serpentiniticos (con esporádicos cuerpos mineralizados con cromita) (Fig. 1).

La Unidad Tirúa es principalmente una unidad metamórfica, derivada de rocas volcánicas, cuyo quimismo es compatible con los basaltos toleíticos oceánicos (Hervé, 1977; Godoy, 1979; Collao *et al.*, 1980; Oyarzún, 1982). La unidad Nahuelbuta es principalmente una unidad metamórfica derivada de rocas sedimentarias, las cuales, en general, corresponden químicamente a grauwacas, lutitas y arcosas (Collao *et al.*, 1980; Oyarzún *et al.*, 1984). Ambas unidades, considerando las características mineralógicas (Hervé, 1977), estarían reflejando condiciones metamórficas de presión media a alta

y temperaturas más bien bajas. La característica estructural más notable de estas unidades está delimitada por la foliación penetrativa regional (S_2). En la Unidad Nahuelbuta la foliación muestra un mayor grado de deformación y, aunque la actitud es compleja, predominan los rumbos norte-sur y

noreste, con buzamiento subhorizontal ondulante (Collao *et al.*, 1979). En la Unidad Tirúa, la actitud de la foliación es menos variable y tiene una dirección general ENE-NE con 20° - 40° de manto al sureste.

DEPOSITOS DE SULFUROS MACIZOS

Los cuerpos mineralizados (principalmente con sulfuros de Fe, Cu y Zn) del tipo macizo (Alfaro *et al.*, 1983) ocurren en lentes y pequeños mantos tabulares, dispersos a lo largo de la Cordillera de la Costa de Nahuelbuta y Queule, alineados en una dirección general NNW (Fig. 1). Estos cuerpos, que afloran en Tirúa (Mina Vieja), Casa de Piedra, Hueñalibén, Trovolhue y Pirén, se intercalan invariablemente en los esquistos verdes, siguiendo megascópicamente la actitud general de la foliación penetrativa.

La Mina Vieja de Tirúa es el depósito de mayor magnitud, con un lente macizo de hasta 0,5 m de potencia y horizontes menores, de espesores centimétricos. Estos afloran en una corrida de unos 15 m en la dirección de S_2 , cuya actitud general es $N80^\circ E/40^\circ S$. En Casa de Piedra, Hueñalibén, Trovolhue y Pirén Alto, los cuerpos mineralizados son de menor magnitud y se disponen entre los esquistos verdes, con direcciones de rumbo entre $N30^\circ$ y $40^\circ E$, y con 20° - 35° de manto al sureste. Entre estos sectores, el más significativo es el de Pirén Alto, donde afloran siete mantos tabulares macizos, de entre 5 y 30 cm de potencia, intercalados en los esquistos verdes, en actitud concordante con la foliación, cuya dirección general es de $N40^\circ E$ con 33° de manto al sureste.

MINERALOGIA

La mineralogía esencial está caracterizada por pirita y, en segundo orden, por calcopirita, blenda y pirrotita, los cuales están ampliamente distribuidos en todos los cuerpos de mineralización maciza. Especies minerales menores, que ocurren en más baja frecuencia, consisten en bornita, calcosita, marcasita, covelita, magnetita, hematita, rutilo y limonita. Especies ocasionales, que han sido excepcionalmente detectadas en algunos horizontes y en contenidos a nivel de traza, corresponden a galena, arsenopirita, molibdenita y mackinawita. Otros

componentes consisten en productos de alteración intermedia, generados como reemplazo de pirita por marcasita y pirrotita por sustancias como marcasita ("Zwischenprodukt", Ramdohr, 1980).

La mineralogía de los componentes no metálicos, que ocurren dentro de los cuerpos macizos, son principalmente cuarzo, albita, clorita, epidota, esfeno y calcita. Estos son algunos de los componentes que caracterizan a las rocas encajadoras (esquistos verdes) de los depósitos, que, a nivel microscópico, presentan una alternancia de agregados de cuarzo, capas de albita-calcita, clorita-biotita-anfíbola (actinolita, ferroactinolita subcálcica)-epidota y esfeno. El conjunto presenta, comúnmente, un arreglo textural nematoblástico.

De interés para el estudio geobarométrico son las características estructurales y texturales de la blenda asociada a otros minerales, la cual puede ocurrir en forma intersticial o encapsulada con o en pirita. Cuando es intersticial en grandes cristales de pirita (tamaño promedio de 250 micrones), está frecuentemente asociada con calcopirita, pirrotita (Fig. 2) y, más raramente, y en muy baja proporción, con limonita, hematita y no metálicos (principalmente cuarzo). El empaquetamiento de los granos de pirita y los otros minerales es asignable al tipo de textura metamórfica, por recristalización de mosaico granoblástico con intersticios ("Annealed texture", Stanton, 1972), en que los ángulos interfaciales son variables entre 100° y 120° para los diedros obtusos. Como inclusiones, ocurren dentro de cristales de pirita, tanto en partículas monominerales como en diversas asociaciones mixtas, con uno o más componentes. Son comunes las asociaciones con calcopirita y/o pirrotita, no metálicos (principalmente cuarzo), calcopirita + bornita, calcopirita + mackinawita y, más raramente, con galena (Figs. 3, 4 y 5). Las inclusiones descritas pueden ser explicadas por reabsorción de granos más pequeños por parte de los mayores, durante la recristalización, o como fases remanen-

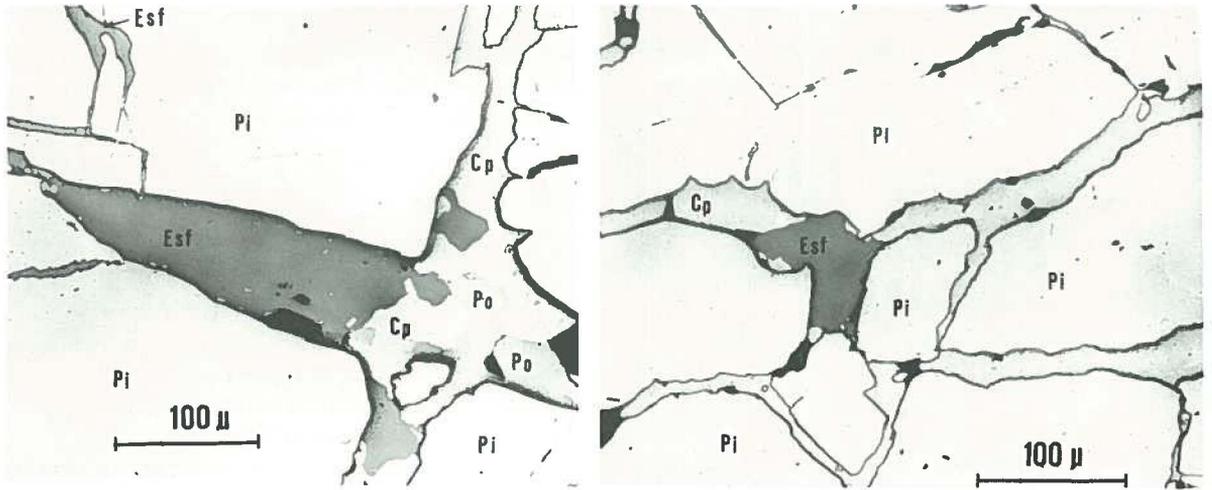


FIG. 2. Ocurrencia intersticial de blenda (Esf) entre granos de pirita (Pi) junto con pirrotita (Po) y/o calcopirita (Cp). Muestra COM, Pirén Alto. Luz reflejada, nícoles paralelos.

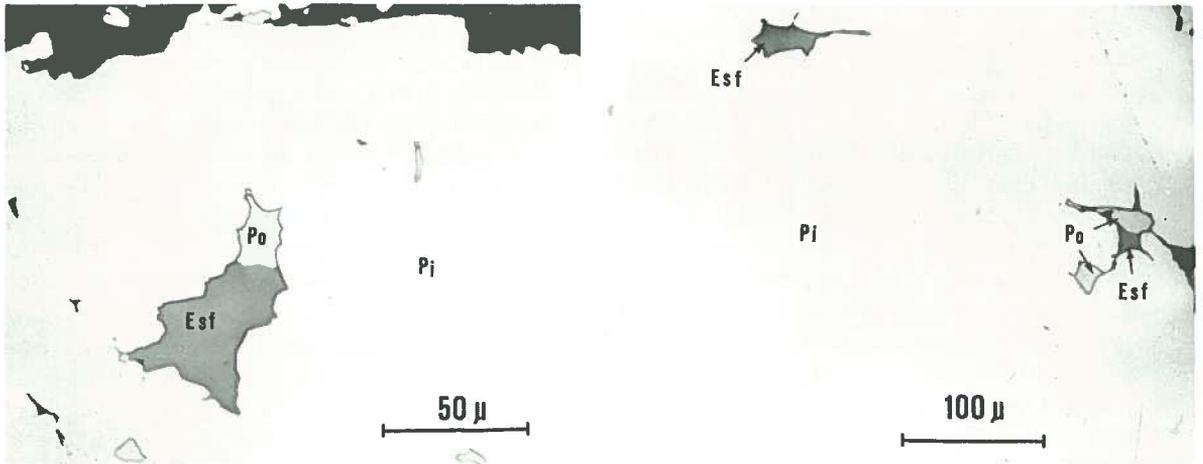


FIG. 3. Ocurrencia encapsulada de blenda (Esf) en pirita (Pi) junto a o distante de pirrotita (Po). Muestra H-3.5, Pirén Alto. Luz reflejada, nícoles paralelos.

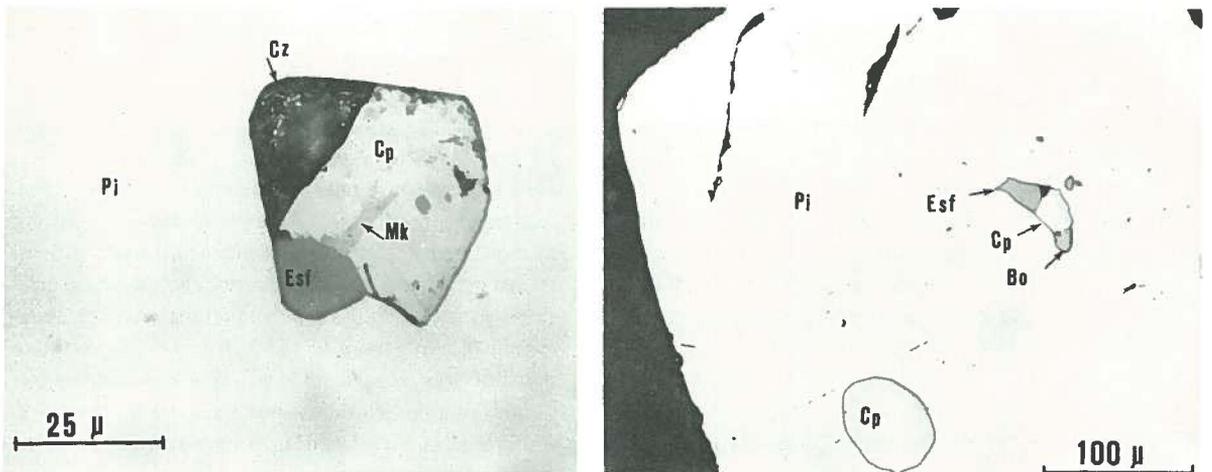


FIG. 4. Ocurrencia de unión triple, convergente o no convergente, de blendas (Esf) con pirrotita (Po) y calcopirita (Cp) encapsuladas en pirita (Pi). Muestra H-2 (a) y H-3.5 (b) de Pirén Alto. Luz reflejada, nícoles paralelos.

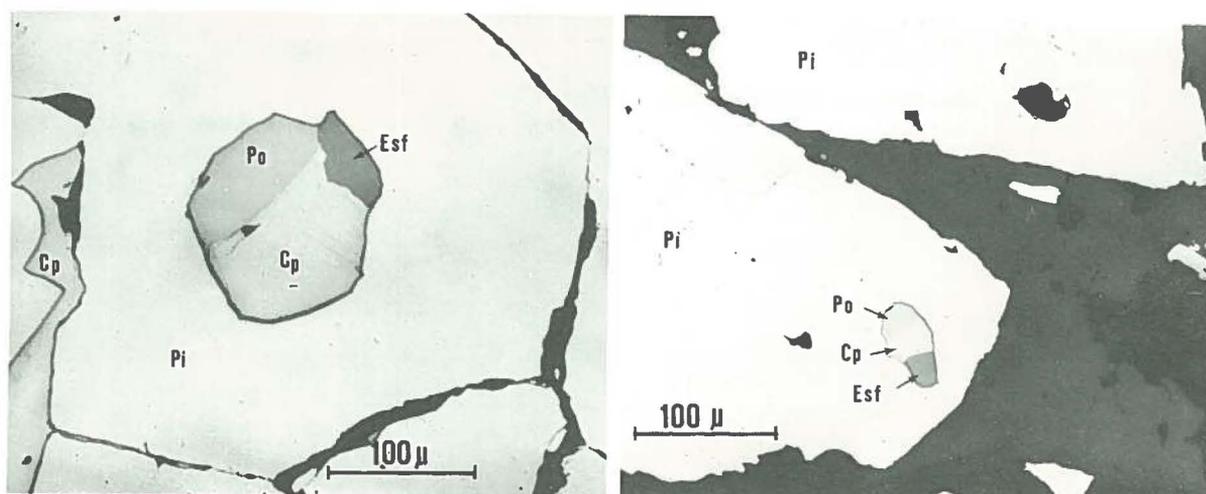


FIG. 5. Ocurrencia encapsulada de blenda (Esf) en pirita (Pi) junto con mackinawita (Mk), calcopirita (Cp) y cuarzo (Cz), o bornita (Bo), calcopirita (Cp). Muestras C-18 de Trovolhue (a) y C-8A de Casa de Piedra (b). Luz reflejada, nícoles paralelos.

tes, que se reequilibraron durante la recristalización por efecto del metamorfismo. Algunos valores de presión, determinados en blendas intersticiales, similares a las encapsuladas en piritas (Tabla 1)

y en equilibrio con las mismas fases (pirrotita y/o calcopirita), indican que ambas explicaciones pueden tener validez.

BLENDA APLICADA COMO GEOBAROMETRO

RESULTADOS ANALITICOS

En rasgos generales, los resultados analíticos en las blendas, que ocurren tanto intersticialmente como encapsuladas en pirita, revelan la existencia de una dependencia del contenido de Zn y Fe, según sea la asociación con diferentes minerales (Tabla 1, Fig. 6).

Las blendas, en contacto con calcopirita, galena o bornita + calcopirita, están empobrecidas en Fe (concentraciones de 1,4% - 4,2% en peso) y enriquecidas en Zn (62,8% - 68,4% en peso), en tanto que aquellas en asociación con pirrotita y pirrotita + calcopirita están enriquecidas en Fe (6,3% - 9%) y empobrecidas en Zn (57,2% - 60,6% en peso). Estas relaciones son visibles en la graficación del contenido de FeS (% molar) por número de puntos de blendas en contacto con otras especies minerales (Fig. 6) y consistentes con datos experimentales encontrados por Scott (1976), en relación con el hecho que, solamente la blenda en mutuo contacto con pirrotita, es más rica en FeS. La presencia de otros elementos (Cu, Cd, In y Mn) es poco significativa y en bajas concentraciones (me-

nor que 0,9% en peso; Tabla 1). De ellos, el contenido de Cu es de particular interés y restrictivo para la aplicación de la blenda como geobarómetro, puesto que, en proporciones superiores a 1%, limita su utilización (Scott y Barnes, 1971; Scott, 1973). Sin embargo, los valores determinados en esta investigación varían desde no detección (gran número de puntos) a 0,9% en peso (sólo un punto, Tabla 1). Esto ha llevado a considerar, también, la estabilidad de blenda + pirrotita + calcopirita encapsuladas como inclusiones en piritas, en los cálculos de presión, por la relativa homogeneidad composicional con aquellas asociaciones de blenda con pirrotita en pirita. Inclusive, existen pocas diferencias composicionales con aquellas blendas con pirrotita + calcopirita que ocurren en forma intersticial, como ha sido determinado en el Horizonte 1 de Pirén Alto, donde el contenido de Fe varía entre 6,9% y 8,0% en peso, el contenido de Zn entre 57,6% y 59,2% y el de Cu hasta 0,6% en peso (Tabla 1).

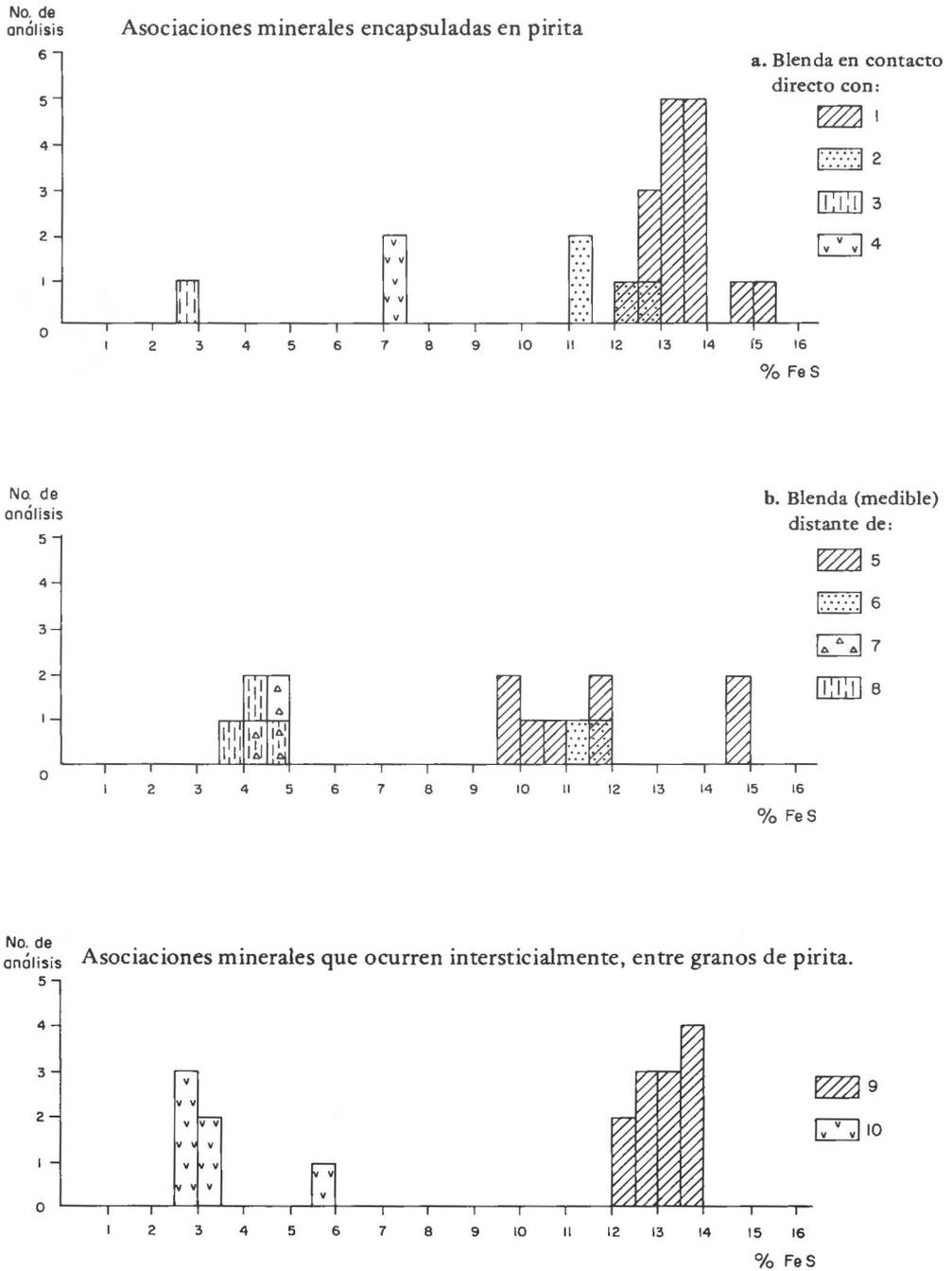


FIG. 6. Contenido de FeS(%) en blenda asociada a diferentes minerales, en cuerpos de sulfuros macizos, Chile Central-Sur. a. Blenda en contacto directo con: 1. Pirrotita + calcopirita; 2. pirrotita; 3. Calcopirita + bornita; 4. Calcopirita. b. Blenda (medible) distante de: 5. Blenda + pirrotita, calcopirita; 6. Blenda + pirrotita; 7. Calcopirita + bornita, galena; 8. Calcopirita + bornita. 9. Blenda + pirrotita + calcopirita. 10. Blenda.

CALCULOS GEOBAROMETRICOS

Para los cálculos de la presión se utilizan las ecuaciones:

$$P = 42,3 - 32,1 \times \log. \% \text{ molar FeS de Hutchison y Scott (1981) y}$$

$$P = 26,18 - 1,93 (\% \text{ molar FeS}) + 0,0309 (\% \text{ molar FeS})^2 \text{ de Lusk y Ford (1978).}$$

Los resultados obtenidos indican diferencias de los valores de presión de $\pm 0,1$ kb, según la ecuación aplicada (Tabla 1).

Tomando las concentraciones de FeS (% molar) para aquellas blendas asociadas a las fases más pertinentes ya mencionadas y condicionadas a un encapsulamiento en granos mayores de pirita, los cálculos de presión más representativos corresponderían al horizonte principal de la Mina Vieja de Tirúa y a los horizontes 1, 4, 6 y 7 de Pirén Alto. En la Mina Vieja de Tirúa, para un número de cinco puntos analizados en blendas en contacto con pirrotita + calcopirita, el contenido medio de

13,4% de FeS indica una presión media de 6,2 kb, con una desviación estándar de 0,2. En los horizontes de Pirén Alto, la media de FeS es de 13% molar para 15 puntos analizados, que incluyen fases de blenda + pirrotita + calcopirita y blenda + pirrotita (cuatro puntos). Ello implica una presión media de 6,7 kb, con una desviación estándar de 1,2. Las medias obtenidas, con una diferencia de 0,5 kb, reflejarían valores de presión del extremo norte (Tirúa) y sur (Pirén Alto) de afloramientos con sulfuros macizos. En el sector de Casa de Piedra no hubo fases adecuadas con blenda para estimar la presión (Tabla 1); sin embargo, se realizaron medidas cuantitativas mediante el método de Brown (1976), determinando el componente crossítico (NaM_4) y Al^{IV} a partir de la composición catiónica de las anfíbolos (Tabla 2). Los resultados (Fig. 7) indican un intervalo de presión de 5-6 kb.

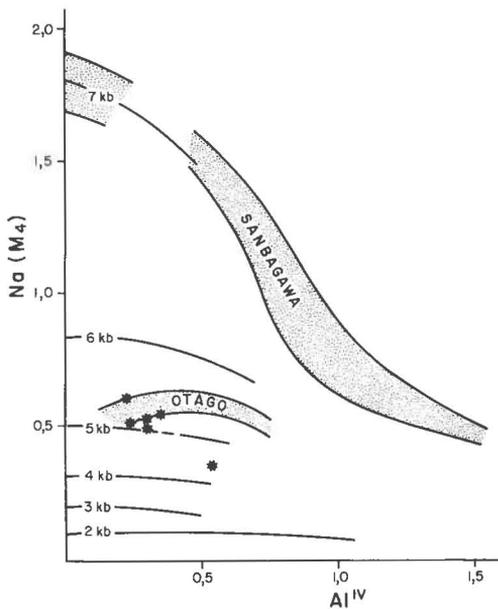


FIG. 7. Diagrama de Brown (1976) para estimación de presiones. Los asteriscos corresponden a anfíbolos calcosódicos de esquistos verdes del sector de Casa de Piedra. Las áreas punteadas comprenden datos de esquistos de Otago, Nueva Zelanda y del Cordón Metamórfico de Sanbagawa, Japón.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Desde que Scott y Barnes (1971) y Scott (1973) determinaron experimentalmente que el contenido de Fe en blendas, en equilibrio con pirita y pirrotita, está controlado por la presión en un intervalo de temperaturas de 300°C-750°C, se han realizado

varias investigaciones en depósitos metalíferos afectados por metamorfismo, en los que la blenda, como geobarómetro, ha sido aplicada con éxito (Scott, 1976; Brown *et al.*, 1978; Hutchinson, 1978; Sundblad *et al.*, 1984, etc.). Sin embargo,

en otros casos, la blenda, en diversas asociaciones minerales, ha mostrado un amplio intervalo del contenido de FeS y ha conducido a inferir altas presiones anómalas por el bajo contenido de Fe (Lusk *et al.*, 1975; Nesbitt y Essene, 1982; etc.). Barton y Skinner (1979) indicaron que, aunque la blenda es uno de los minerales más refractarios y puede preservar una presión original en equilibrio con pirrotita y pirita, a menudo experimenta un reemplazo parcial, lo cual resulta en un decrecimiento del contenido de Fe.

Craig y Vaughan (1981) indicaron que, para la aplicación de las blendas como geobarómetro, es importante considerar su coexistencia con pirrotita y pirita, escoger las más ricas en FeS y evitar las que coexistan con calcopirita.

En razón de las consideraciones mencionadas, Hutchinson y Scott (1981) y Scott (1983) han especificado que, en terrenos metamórficos, la presión de metamorfismo más aceptable debería ser aquella correspondiente a blendas en contacto con pirrotita, totalmente encapsuladas en pirita, ya que, cuando ocurre el reequilibrio parcial de la blenda + pirrotita, atrapada en la pirita durante la recristalización, la composición allí lograda no debería variar. Así, las condiciones retrógradas del metamorfismo no influirían por este encapsulamiento previo.

En la investigación de los cuerpos de sulfuros macizos de la Cordillera de la Costa de Chile Central-Sur, las presiones determinadas deben ser consideradas según sean las asociaciones minerales en

equilibrio con blendas y encapsuladas en pirita. De esta manera, si se toman estrictamente las fases de blenda + pirrotita encapsulada en pirita (cuatro puntos) se concluiría que la presión actuante en el sector de Pirén Alto habría estado en un intervalo de 7,0-9,0 kb, con una media de 8,0 kb. Si, adicionalmente a éstas, se suman los resultados de las fases de blenda + pirrotita + calcopirita (11 puntos), la presión actuante habría estado en un intervalo de 4,4-9,0 kb con una media de 6,7 kb y reflejarían la presión que habría actuado en los depósitos de sulfuros macizos más australes de Cordillera de Nahuelbuta-Queule. En los depósitos de sulfuros macizos más septentrionales (sector de Tirúa), la presión media determinada en blendas en equilibrio con pirrotita + calcopirita habría estado en un intervalo de 6,0-6,7 kb, con una media de 6,5 kb.

Regionalmente, si se consideran los valores de presión, obtenidos utilizando blenda como geobarómetro y la anfíbola de las rocas hospedadoras de la mineralización de Casa de Piedra, la presión de metamorfismo, que habría actuado en la faja de esquistos verdes de la Cordillera de Nahuelbuta-Queule, tendría un promedio de 6,2 kb.

Estos valores podrían ser consistentes con estimaciones de presión media a alta indicados por Hervé (1977) para rocas de esta unidad, pero serían altos comparados con una media de $2,4 \pm 0,5$ kb determinada por Alfaro (1985) en blenda de la Mina Vieja de Tirúa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Profesores Drs. A. Sugaki y K. Hayashi del Institute of Mineralogy, Petrology and Economic Geology de la Universidad de Tohoku, por las facilidades otorgadas en los análisis y al Profesor Fernando Henríquez, del Departamento de Minas de la Universidad de Santiago de Chile, por las valiosas observaciones hechas a es-

te trabajo.

Esta investigación fue realizada gracias a los proyectos No. 20.34.22 y 20.34.07, patrocinados por la Dirección de Investigación de la Universidad de Concepción y a una beca otorgada por la International Cooperation Agency (JICA) del Gobierno de Japón.

REFERENCIAS

- AGUIRRE, L.; HERVE, F.; GODOY, E. 1972. Distribution of metamorphic facies in Chile. An outline. *Krystalinikum*, No. 9, p. 7-19.
- ALFARO, G. 1985. La esfalerita como geobarómetro; antecedentes preliminares de los sulfuros polimetálicos al sur de Chile. *In* Congreso Geológico Chileno, No. 4, Actas (Universidad del Norte, Depto. Geociencias) Vol. 2, p. 1-15. Antofagasta, Chile.

- ALFARO, G.; FRUTOS, J.; COLLAO, S.; HELLE, S. 1983.** Los sulfuros masivos de la Cadena Andina Paleozoica en la Cordillera de la Costa, sur de Chile. *In* Congreso Nacional de Geología Económica, No. 2, Actas, Vol. 2, p. 337-360. San Juan, Argentina.
- ALVAREZ, O. 1970.** Estudio geológico de los yacimientos de hierro de la Cordillera de Nahuelbuta, provincias de Arauco, Malleco y Cautín. Memoria de Título, Universidad de Chile, Depto. Geología, 2 Vols., 162 p. Santiago.
- ALVAREZ, O.; RIVERA, A. 1970.** Informe preliminar de la primera etapa de estudios de anomalías magnéticas y radiométricas detectadas en la región de la Cordillera de la Costa, entre el río Imperial y el extremo sur de la isla de Chiloé. Instituto de Investigaciones Geológicas (inédito), 25 p. Santiago.
- BATON, P.B.; TOULMIN, P. 1966.** Phase relations involving sphalerite in the Fe-Zn-S system. *Economic Geology*, Vol. 61, No. 5, p. 815-849.
- BARTON, P.B.; SKINNER, B.J. 1979.** Sulfide mineral stabilities. *In* Geochemistry of hydrothermal ore deposits (Barnes, H.L.; ed.). John Wiley & Sons, p. 278-403. New York.
- BENCE, E.E.; ALBEE, A.L. 1968.** Empirical correction factors for the electron microanalysis of silicates and oxides. *Journal of Geology*, Vol. 76, No. 4, p. 382-403.
- BROWN, E.H. 1976.** The crossite content of Ca-amphibole as a guide to pressure of metamorphism. *Journal of Petrology*, Vol. 18, No. 1, p. 53-72.
- BROWN, P.E.; ESSENE, E.J.; KELLY, W.C. 1978.** Sphalerite geobarometry in the Balmar Edwards District, New York. *American Mineralogist*, Vol. 63, No. 3-4, p. 250-257.
- COLLAO, S.; MONTECINOS, P.; OVIEDO, L.; OYARZUN, R. 1979.** Nuevos antecedentes estructurales en la Serie Metamórfica Occidental de la Cordillera de Nahuelbuta, Chile. *In* Congreso Geológico Chileno, No. 2, Actas, Vol. 1, p. B99-B110. Arica, Chile.
- COLLAO, S.; MONTECINOS, P.; OYARZUN, R.; OVIEDO, L. 1980.** Estudio genético de las mineralizaciones de hierro de Mahuilque. Univ. Concepción, Depto. Geociencias. Contribución, No. 4, 160 p.
- COLLAO, S.; ALFARO, G. 1982.** Mineralización sulfurada de hierro, cobre y zinc en la Cordillera de la Costa, sur de Chile. *Revista Geológica de Chile*, No. 15, p. 41-47.
- CRAIG, J.R.; VAUGHAN, D.J. 1981.** Ore microscopy and ore petrography. John Wiley & Sons, 406 p. New York.
- GODOY, E. 1979.** Metabasitas del Basamento Metamórfico: nuevos datos geoquímicos. *In* Congr. Geológico Chileno, No. 2, Actas, Vol. 3, p. E133-E148. Arica, Chile.
- HERVE, F. 1977.** Petrology of the crystalline basement of the Nahuelbuta Mountains, south-central Chile. *In* Comparative studies on the geology of the Circum-Pacific orogenic belt in Japan and Chile (Ichikawa, T.; Aguirre, L.; eds.), Jap. Soc. Promot. Sci., p. 1-51, Tokyo, Japan.
- HUTCHISON, M.N. 1978.** Refinement and amplification of the sphalerite geobarometer. Ph.D. Thesis. University of Toronto, 158 p. Toronto, Canada.
- HUTCHISON, M.N.; SCOTT, S.D. 1981.** Sphalerite geobarometry in the Cu-Fe-Zn-S system. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, Vol. 76, No. 1, p. 143-153.
- LUSK, J.F.; CAMPBELL, F.A.; KROUSE, H.R. 1975.** Application of sphalerite geobarometry and sulfur isotope geothermometry to ores of Quemont Mine, Noranda, Quebec. *Economic Geology*, Vol. 70, No. 6, p. 1070-1083.
- LUSK, J.F.; FORD, C.E. 1978.** Experimental extension of the sphalerite geobarometer to 10 kbar. *American Mineralogist*, Vol. 63, No. 5-6, p. 516-519.
- NESBITT, B.E.; ESSENE, E.J. 1982.** Metamorphic thermometry and barometry of the portion of the southern Blue Ridge Province. *American Journal of Science*, Vol. 282, No. 5, p. 701-729.
- OYARZUN, R. 1982.** Geology and geochemistry of the banded iron formation in the Nahuelbuta Mountains, Chile. Ph.D. Thesis. University of Leeds, Earth Sciences Dept., 226 p. United Kingdom.
- OYARZUN, R.; CLEMMY, H.; COLLAO, S. 1984.** Chemical characteristics of the Nahuelbuta Mountains banded iron formations, southern central Chile. *Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists*, Vol. 79, No. 4, p. 146-156.
- OYARZUN, R.; HELLE, S. 1984.** Una posible guía de prospección aurífera en rocas del basamento metamórfico de Chile Central-Sur. *Minerales*, Vol. 39, No. 168, p. 19-25.
- RAMDOHR, P. 1980.** The ore minerals and their intergrowths. *In* International series in earth sciences. 2nd edition. Pergamon Press, Vol. 35, 1205 p. Oxford, United Kingdom.
- SCOTT, S.D. 1973.** Experimental calibration of the sphalerite geobarometer. *Economic Geology*, Vol. 68, No. 4 p. 466-474.
- SCOTT, S.D. 1976.** Application of the sphalerite geobarometer to regionally metamorphosed terrains. *American Mineralogist*, Vol. 61, No. 7-8, p. 661-670.
- SCOTT, S.D. 1983.** Chemical behaviour of sphalerite and arsenopyrite in hydrothermal and metamorphic environments. *Mineralogical Magazine*, Vol. 47, No. 344, p. 427-435.
- SCOTT, S.D.; BARNES, H.L. 1971.** Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Economic Geology*, Vol. 66, No. 4, p. 653-669.
- STANTON, R.L. 1972.** Ore petrology. McGraw-Hill Publ. Co. 733 p. New York.
- SUGAKI, A.; SHIMA, H.; KITAKAZE, A. 1974.** Fundamental study on the quantitative analysis of sulfide minerals by electron probe microanalyser. Ube, Yamaguchi Univ., Fac. Eng., Mem., Vol. 24, p. 225-230.

SUNDBLAD, K.; ZACHRISSON, E.; SMEDS, S.A.; BERGLUND, S.; ÅLINDER, C. 1984. Sphalerite geobarometry and arsenopyrite geothermometry applied to metamorphosed sulfide ores in the Swedish Caledonides. *In* A special issue devoted to massive sulfide deposits of the Appalachian-Caledo-

nian Orogen (Gair, J.E.; *et al.*; eds.). Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, Vol. 79, No. 7, p. 1660-1668.

VERGARA, L. 1970. Prospección de yacimientos de cromo y hierro en La Cabaña, Cautín. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 96 p. Santiago.