

GEOQUIMICA Y PETROGENESIS DE ROCAS GRANODIORITICAS ASOCIADAS CON EL YACIMIENTO CUPRIFERO RIO BLANCO - LOS BRONCES

LEOPOLDO LOPEZ E.
MARIO VERGARA M.

Univ. Chile, Depto. Geol. y Geofís., Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile.

RESUMEN

El yacimiento Río Blanco-Los Bronces (Chile Central) es un depósito tipo pórfido cuprífero, asociado con brechas de turmalina. El intrusivo relacionado con la mineralización (Plutón Río Blanco-San Francisco) es de composición granodiorítica y en él se han reconocido, al menos, tres eventos magmáticos temporalmente distintos (12-13 m.a., 8,3-8,5 m.a. y 5,2 m.a.). Este plutón está intruyendo a la Formación Farellones (17-19 m.a.), compuesta de lavas y rocas volcánoclasticas continentales de composición intermedia. Tanto esta formación como el Plutón Río Blanco-San Francisco subyacen a la Formación Colorado-La Parva (4-5 m.a.), consistente de rocas de composición dacítica a riolítica, cuyo modo de emplazamiento es típico de diatremas volcánicas.

Las rocas granodioríticas más frescas de Plutón Río Blanco-San Francisco tienen características geoquímicas, tales como abundancia de tierras raras y razones isotópicas de Sr y Nd, semejantes a las de rocas granodioríticas de intrusivos no productivos del Terciario Superior y andesitas plio-cuaternarias de la zona, sugiriendo, por una parte, una historia genética y evolutiva similar para todas ellas y, por otra, que el depósito cuprífero Río Blanco-Los Bronces, más que reflejar la existencia de una fuente rica en metal, sería el resultado de un proceso de concentración metálica llevado a cabo, principalmente, por fluidos hidrotermales, durante las fases finales de la evolución magmática.

ABSTRACT

The Río Blanco-Los Bronces ore deposit (Central Chile) is a porphyry copper type deposit associated with tourmaline breccias. The ore related intrusive (Río Blanco-San Francisco Pluton) is of granodioritic composition, and at least three magmatic intrusive events, dated 12-13 m.y., 8.3-8.5 m.y., and 5.2 m.y., can be recognized in it. This pluton is intruding the 17-19 m.y. Farellones Formation consisting of continental lavas and volcanoclastic rocks of andesitic composition. Both the Farellones Formation and the Río Blanco-San Francisco Pluton underlie the Colorado-La Parva Formation (4-5 m.y.), characterized by rocks of dacitic to rhyolitic composition, whose mode of emplacement is typical of volcanic diatremes.

The least altered granodioritic rocks from the Río Blanco-San Francisco Pluton have geochemical features, such as rare-earth element abundances and Sr and Nd isotopic ratios, similar to those of nearby non-productive Upper Tertiary granodioritic and Pliocene-Quaternary andesitic rocks, suggesting a similar genetic and evolutive history for all of them, and that the Río Blanco-Los Bronces copper deposit, more than the result of a metal-rich source, would be mainly the consequence of a concentration process carried out by hydrothermal fluids, during the final stages of the magmatic evolution.

INTRODUCCION

Las minas cupríferas Río Blanco y Los Bronces se ubican en la Cordillera de los Andes, cercanas a la latitud 33°S y a una altura de 3.400 m s.n.m. Estudios geológicos (Bassi, 1976; Ambrus, 1979; Cepeda, 1981) indican que ambas minas explotan

un solo yacimiento cuyas reservas se estiman en más de 10⁹ toneladas (Bassi, 1976) con una ley promedio de Cu del 0,8%.

El yacimiento Río Blanco-Los Bronces es un depósito tipo pórfido cuprífero, asociado con bre-

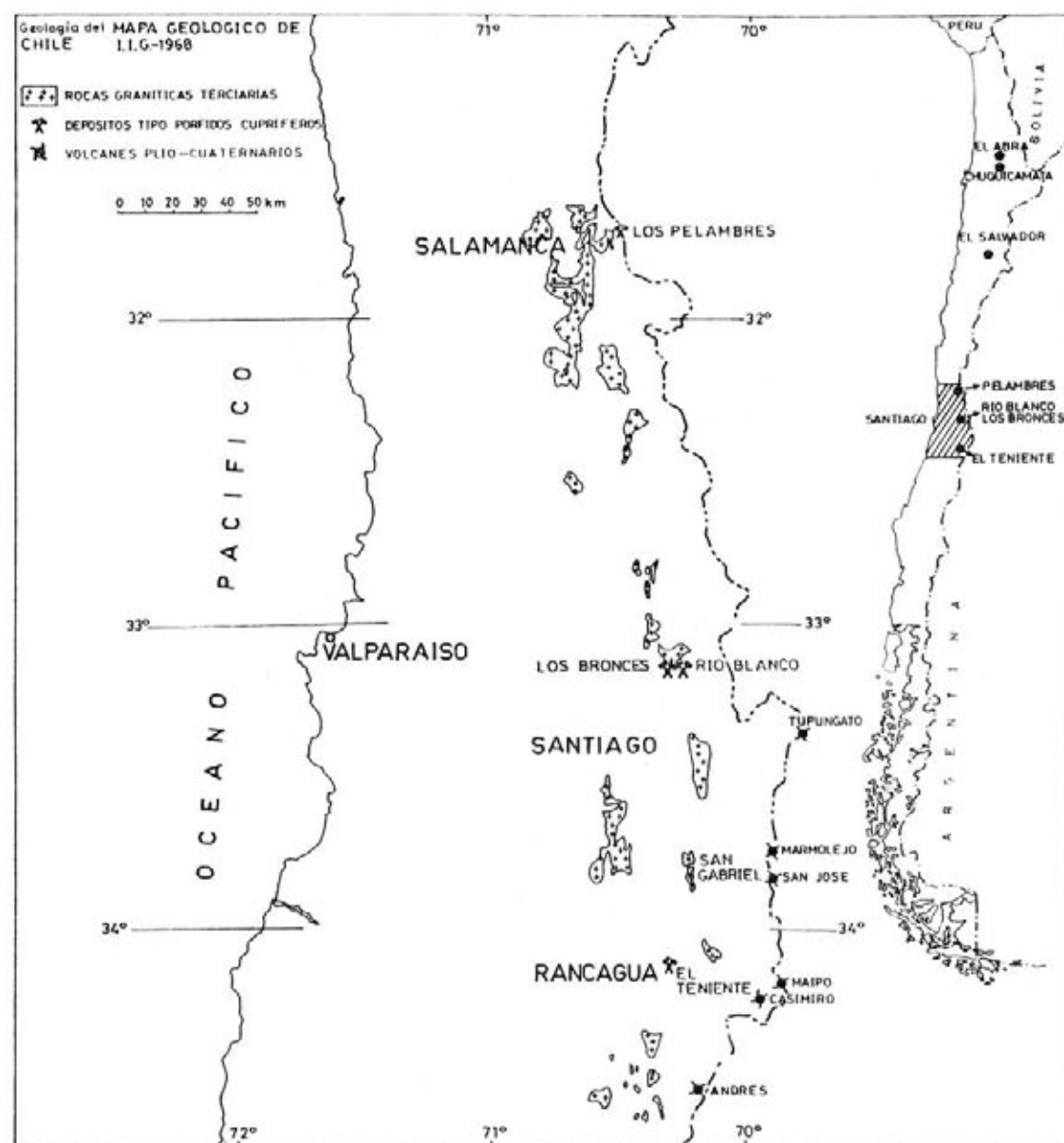


FIG. 1. Distribución geográfica de los principales depósitos tipo pórfidos cupríferos, rocas graníticas del Terciario superior y volcanes plio-cuaternarios de Chile entre las latitudes $31^{\circ}50'S$ y $34^{\circ}50'S$.

chas de turmalina (Cuadra, 1980; Warnaars, 1980). Forma parte de una franja de pórfidos cupríferos, de orientación aproximada N-S, que se ubica entre los $31^{\circ}S$ y los $34^{\circ}S$ (Fig. 1), siendo los intrusivos asociados con la mineralización de composición predominantemente granodiorítica. Las brechas a-

sociadas con estos intrusivos presentan una alteración fílica marcada en sus niveles superficiales y propílica en sus zonas marginales (Cepeda, 1981); alteración potásica, en la forma de feldespato de potasio y biotita secundaria, es observada en la mina Río Blanco. Los sulfuros principales corres-

penden a pirita, calcopirita, bornita y molibdenita. En los intrusivos, estos sulfuros se presentan en forma diseminada o en vetillas; en las brechas están confinados a la matriz de cuarzo-turmalina (Warnaars, 1980).

Aunque existen ideas contradictorias acerca de la posible relación entre los procesos de subducción y la generación de pórfidos cupríferos (Lowell, 1980; Oyarzún y Frutos, 1980), en Sudamérica en general y, en Chile en particular, parece existir una estrecha correlación entre la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental Sudamericana y la génesis de tales depósitos (Sillitoe, 1972a y b; Oyarzún y Frutos, 1974, 1980; Gustaf-

son, 1979; Halpern, 1979). El transporte del metal habría sido llevado a cabo por soluciones hidrotermales de origen magmático. La participación de aguas meteóricas se habría efectuado en las etapas finales del proceso, pero ha sido difícil evaluar, cuantitativamente, su contribución a la formación de los pórfidos cupríferos (Sheppard y Gustafson, 1976).

El objetivo básico de esta comunicación es discutir algunos datos geoquímicos, relativos al distrito minero Río Blanco-Los Bronces, con el fin de alcanzar una mejor comprensión de la historia genética y evolutiva de los intrusivos asociados con la mineralización cuprífera de dicho yacimiento.

MARCO GEOLOGICO

En el distrito minero Río Blanco-Los Bronces se distinguen tres unidades litológicas: La Formación Farellones, el Plutón Río Blanco-San Francisco y la Formación Colorado-La Parva.

La Formación Farellones es una secuencia voluminosa de lavas y rocas volcánoclasticas, de composición intermedia (Aguirre, 1960). En el distrito minero Río Blanco-Los Bronces, esta secuencia está reducida a un "roof pendant" (Fig. 2). La Formación Farellones, definida en la localidad homónima, ubicada unos 10 km al sur del distrito Río Blanco-Los Bronces, es la unidad más antigua del área, presentando edades K-Ar en el rango 17-19 m.a. (Drake *et al.*, 1976). La mayoría de las rocas de esta formación son, petrográficamente, meta-andesitas que pueden contener biotita, cuarzo, sericita, clorita, epidota, calcita, caolinita y minerales sulfurados hipógenos. La abundancia de los elementos mayores, en diez muestras provenientes de la localidad tipo, y en tres del "roof pendant", es mostrada en la Tabla 1. Aunque no es materia de este trabajo discutir las características químicas de las lavas de la Formación Farellones, llama la atención la notable diferencia en CaO, Na₂O y K₂O existentes entre las andesitas del "roof pendant" y las de la localidad tipo. Los altos contenidos de K y los bajos de Ca y Na, mostrados por las lavas del "roof pendant", parecen reflejar, respectivamente, la adición y remoción de estos elementos por fluidos hidrotermales que reaccionaron, principalmente, con los feldspatos (Urqueta, 1969).

El Plutón Río Blanco-San Francisco consiste, principalmente, en rocas de composición granodiorítica que intruyen a la Formación Farellones. Su

relación con la mineralización es directa y su pertenencia a un cordón plutónico del Terciario superior, ubicado en la alta cordillera andina entre las latitudes 31°S y 34°S, está dada sobre la base de estudios geocronológicos (Vergara y Drake, 1979). Determinaciones K-Ar (Blondel, 1980; Vergara *et al.*, 1980) permiten distinguir, en este plutón, al menos tres eventos magmáticos temporalmente distintos. Los dos primeros, de 12-13 m.a. y de 8,3-8,5 m.a., respectivamente, están representados principalmente por intrusiones de monzonita cuarcífera, y el tercero, de 5,2 m.a., está representado, fundamentalmente, por filones de monzodiorita cuarcífera que intruyen tanto a las rocas de la Formación Farellones como a las rocas granodioríticas de los eventos magmáticos previos.

La Formación Colorado-La Parva (Thiele, 1980) consiste en pórfidos dacíticos, tobas soldadas riolíticas, y riolitas que sobreyacen tanto a la Formación Farellones como al Plutón Río Blanco-San Francisco. Las características estructurales y el modo de emplazamiento de esta formación son similares a las de diatremas volcánicas (Latorre, 1981). En muchos lugares, los conductos alimentadores de esta formación cortan a rocas mineralizadas hidrotermalmente, pero la formación misma carece de mineralización. Determinaciones radiométricas K-Ar en biotitas y plagioclasas (Vergara y Drake, 1979) dan, respectivamente, edades de $4,1 \pm 0,1$ y $4,9 \pm 0,2$ m.a. Estos valores, que concuerdan con los obtenidos por Quirt *et al.*, (1971), confirman una edad pliocena para esta formación, que representaría el último evento magmático en el distrito minero Río Blanco-Los Bronces.

PETROGENESIS Y DISCUSION

En un estudio sobre depósitos cupríferos y metalogénesis andina, Oyarzún (1979) concluyó que el problema del origen de los depósitos porfíricos era, esencialmente, de naturaleza petrológica, y era necesario considerarlo en el marco de la génesis de los magmas calcoalcalinos. Sobre esta base deseamos discutir algunos antecedentes geoquímicos, que nos pueden conducir a una mejor comprensión de la génesis de los intrusivos asociados con la mineralización cuprífera del distrito Río Blanco-Los Bronces, paso que creemos importante para enfrentar, *a posteriori*, el problema de la génesis de la mineralización misma.

Mientras datos sísmicos (Stauder, 1973; Swift y Carr, 1974; Barazangi e Isacks, 1976) señalan que el depósito porfírico Río Blanco-Los Bronces se ubica en una zona de margen continental activo, caracterizada por presentar un ángulo de subducción superior a 25° , datos gravimétricos (Kausel y Lomnitz, 1969) indican que el grosor de la corteza continental, en esta zona, es inferior a 50 km. Estos antecedentes geofísicos permiten visualizar la existencia actual de una cuña de manto entre la corteza continental y la corteza oceánica subducida. Como antecedentes magnéticos y paleontológicos (Sillitoe, 1972a) permiten suponer que esta situación se ha mantenido durante todo el Cenozoico, dicha porción de manto podría haber jugado un rol clave en la génesis de los magmas calcoalcalinos cenozoicos de esta región. Al menos, la existencia de un manto de naturaleza astenosférica parece estar íntimamente relacionada con la existencia del volcanismo cuaternario andino. Por otro lado, los estudios de Hanus y Vanek (1978) señalan la carencia de actividad sísmica en un sector de la zona de Benioff intermedia entre la de los sismos profundos y la de los superficiales. Esta laguna sísmica, ubicada justamente bajo la cadena volcánica cuaternaria, podría interpretarse, también, como una zona de fusión y una fuente potencial de magmas primarios para los volcanes andinos.

Las razones isotópicas de Sr de las rocas granodioríticas del Plutón Río Blanco-San Francisco fluctúan entre 0,7037 y 0,7044 (Halpern, 1979). Estos valores, similares a los obtenidos en rocas volcánicas plio-cuaternarias de los Andes del Sur (Munizaga y Mantovani, 1976; Klerkx *et al.*, 1977;

Drake, 1981) avalan, también, un origen subcortical para el magma primario del cual derivaron. Desgraciadamente, estos datos isotópicos son incapaces, por sí solos, de discriminar si la fuente magmática tuvo su ubicación en el manto o en la litósfera oceánica subducida.

Las razones isotópicas de plomo ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,600-18,636$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,608-15,624$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38,527-38,545$) y de neodimio ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512860-0,512890$) obtenidas en rocas granodioríticas del Plutón Río Blanco-San Francisco (Tilton *in* Drake, 1981) son similares a las de lavas oceánicas de algunos arcos de islas del Pacífico occidental, indicando que el magma, del cual derivaron, se emplazó en la corteza continental sin sufrir contaminación, o si la hubo, el contaminante consistió en un material, geológicamente joven, de composición isotópica similar.

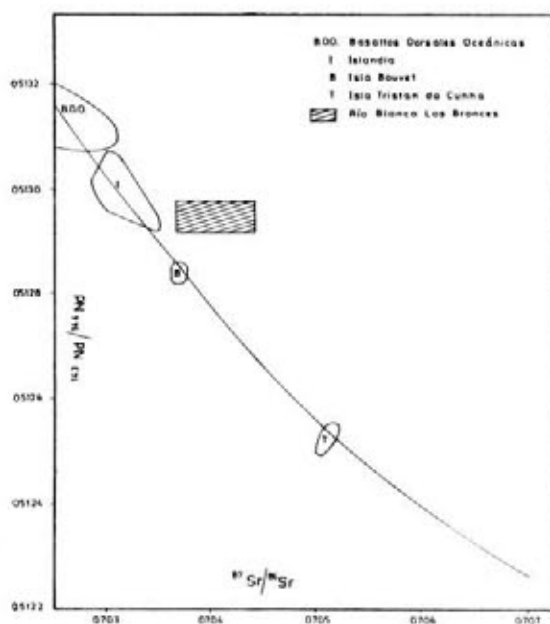


FIG. 3. Diagrama $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mostrando la tendencia seguida por rocas volcánicas derivadas de magmas originados en el manto (Hawkesworth *et al.*, 1979) y la ubicación de rocas granodioríticas del plutón Río Blanco-San Francisco.

Al combinar las razones isotópicas de Nd obtenidas por Tilton con las de Sr obtenidas por Halpern (Fig. 3) se observa que, para una razón $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ dada, las rocas granodioríticas del Plutón Río Blanco-San Francisco están enriquecidas en Sr radiogénico, en relación con la tendencia exhibida por rocas derivadas de magmas originados en el manto. Tendencias de esta naturaleza han sido interpretadas como evidencia de que los magmas, que han dado lugar a tales rocas, han tenido su origen en una zona del manto contaminada con material proveniente de la litósfera oceánica subducada (Hawkesworth *et al.*, 1979). Este material podría consistir en fluidos, producidos por deshidratación de minerales hidratados, o en líquidos magmáticos, generados por fusión de dicha litósfera.

En relación a la magnitud y complejidad del

Plutón Río Blanco-San Francisco, el número de muestras analizadas por elementos mayores (Oyarzún, 1971; Blondel, 1980; Tabla 2) es escaso y tan sólo dos muestras, provenientes de la zona más fresca del plutón, cuentan con análisis de elementos trazas que incluyen tierras raras (López, 1978; López *et al.*, 1979; Tabla 3; Fig. 4). Las muestras estudiadas exhiben diferencias notables en la abundancia de sus elementos mayores (Tabla 2). Sin embargo, su escaso número y la falta de sistematización en el muestreo impiden diagnosticar, en forma precisa, la o las causas de tales diferencias. Estudios en progreso (Valenzuela y López, en prep.) están orientados, en parte, a solucionar este problema. Diferencias importantes se observan, también, en los contenidos de Rb y Sr. Así, Armbrust *et al.* (1977) y Blondel (1980) analizaron por K, Rb y Sr, muestras provenientes de zonas

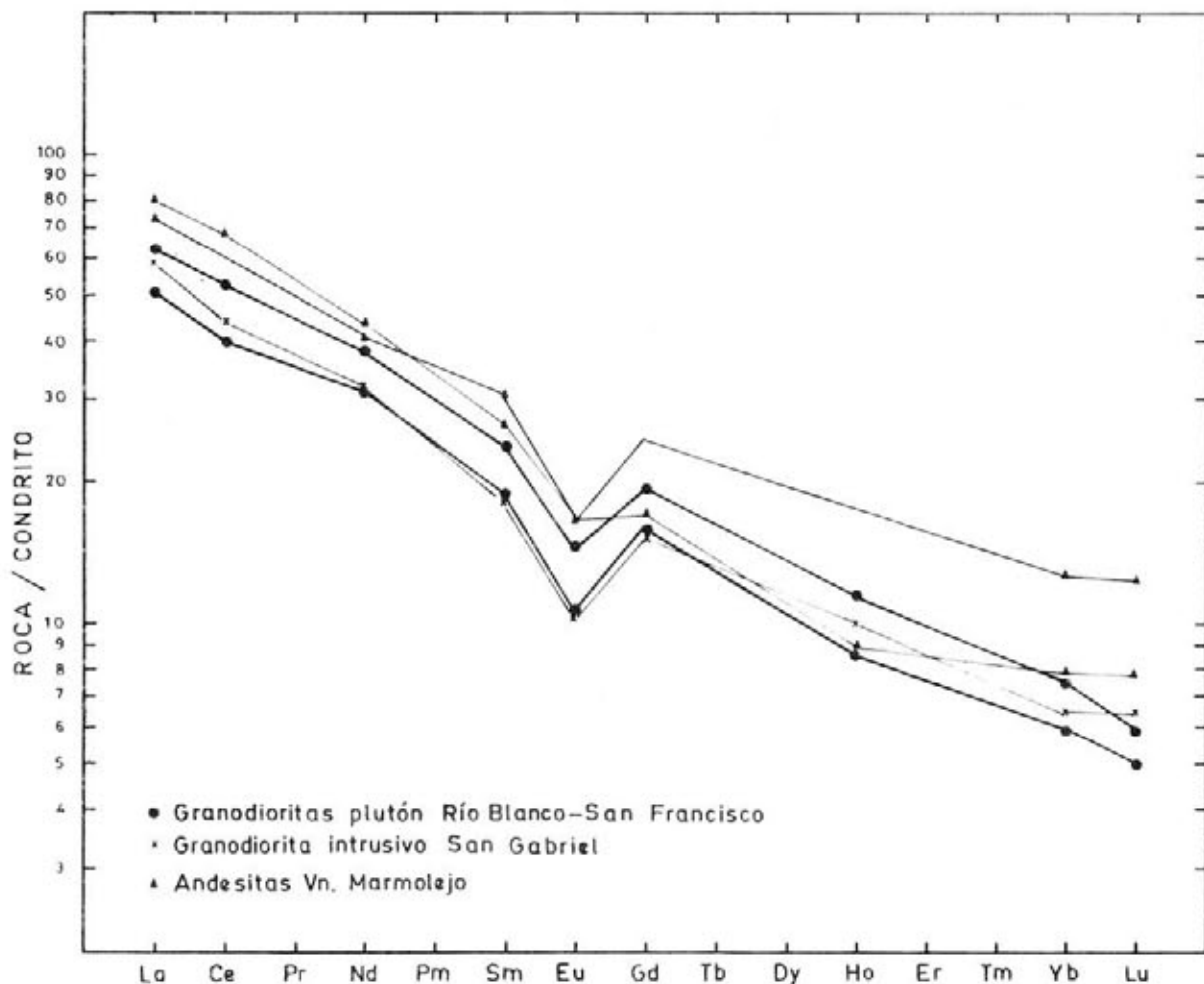


FIG. 4. Patrones de tierras raras de rocas granodioríticas del plutón Río Blanco-San Francisco, normalizados respecto al patrón condritico promedio. Por comparación, se muestran los patrones normalizados de tierras raras de rocas volcánicas y plutónicas, no productivas, asociadas geográficamente

TABLA 1. ELEMENTOS MAYORES EN ROCAS VOLCANICAS DE LA FORMACION FARELLONES

	Localidad Tipo													"Roof Pendant" (*)		
	A 1	A 9	A 11	A 17	A 6	A 7	A 15	A 14	A 16	A 5	U 932	U 940	U 922			
SiO ₂	47,34	54,21	55,20	56,42	56,66	58,57	58,78	58,84	59,25	61,24	48,29	52,83	53,76			
TiO ₂	0,98	1,12	1,14	0,95	1,26	1,16	0,95	0,94	0,88	1,05	1,01	0,79	0,73			
Al ₂ O ₃	18,12	17,02	17,18	15,99	17,43	16,40	15,88	15,47	15,70	15,75	20,06	17,30	20,25			
Fe ₂ O ₃	4,28	5,99	6,95	2,82	5,81	5,36	5,20	4,22	5,12	5,23	6,20	6,40	2,12			
FeO	5,13	3,57	2,77	5,07	2,48	2,92	2,50	3,54	3,41	2,24	8,12	7,18	4,68			
MnO	0,14	0,26	0,16	0,17	0,12	0,16	0,13	0,15	0,15	0,17	0,06	0,02	0,07			
MgO	3,24	2,61	2,11	2,30	1,68	1,76	1,96	2,51	1,80	1,40	4,59	4,74	3,61			
CaO	10,27	6,51	6,06	7,08	5,44	5,23	5,28	5,61	5,70	3,42	0,29	0,36	0,24			
Na ₂ O	2,94	3,91	3,83	3,55	4,56	4,46	4,06	3,80	3,70	4,85	0,32	1,47	2,42			
K ₂ O	0,24	1,68	1,81	0,49	1,91	1,83	2,12	2,09	2,17	2,30	5,46	4,76	7,80			
P ₂ O ₅	0,19	0,25	0,25	0,22	0,32	0,31	0,24	0,23	0,23	0,40	0,33	0,36	0,30			
H ₂ O + CO ₂	6,56	2,27	2,03	4,36	1,79	1,31	2,35	1,71	1,46	1,39	4,85	3,10	3,69			
Total	99,43	99,40	99,49	99,42	99,46	99,47	99,45	99,11	99,57	99,44	99,58	99,31	99,67			

Notas: a) (*) Datos de Urqueta (1969).

b) Todos los datos están expresados en "% en peso".

con alteración cuarzo-sericitica a filico-potásica, encontrando en ellas valores altos de K_2O (3,0-6,7%) y Rb (125-190 ppm) y bajos de Sr (60-340 ppm). Estos valores difieren, notoriamente, de los presentados por las muestras G30 y G29 ($K_2O = 2,74-2,87\%$; Rb = 50-90 ppm; Sr = 600-690 ppm) provenientes, como antes se señaló, de la zona más fresca del plutón. Algo similar fué observado por Armbrust *et al.* (1977) en el yacimiento El Teniente. En este yacimiento, cuya mineralización cuprífera está asociada con las andesitas de la Formación Farellones, los contenidos de Rb varían en un promedio de 43 ppm, en las andesitas frescas, a 155 ppm, en las andesitas con alteración potásica. Asimismo, las andesitas fuertemente lixiviadas muestran contenidos altos de Rb (154 ppm), al paso que sus contenidos de Sr son bajos (29 ppm) comparados con el de las andesitas frescas (494 ppm). De acuerdo con Armbrust y colaboradores, tanto los procesos de alteración hipógena como supérgena son responsables de la remoción del Sr y Ca, en tanto, el Rb se comporta como un elemento relativamente inmóvil, siendo retenido en minerales de arcilla y mica.

Los patrones de tierras raras de las rocas granodioríticas menos alteradas del plutón Río Blanco-San Francisco exhiben tendencias similares a las de rocas granodioríticas de plutones no productivos y de rocas volcánicas plio-cuaternarias de la zona (Tabla 3; Fig. 4). Estos patrones, junto con ser bastante fraccionados ($La = 50-60 \times$ condrito; $Yb = 5-7 \times$ condrito), presentan un empobrecimiento relativo en Eu ($Eu/Eu^* = 0,60-0,66$). La similitud composicional se extiende también a los elementos trazas ferromagnesianos (Sc, V, Cr, Co y Ni; Tabla 3). Los contenidos relativamente bajos de estos últimos elementos, unidos al empobrecimiento en Eu, evidencian que las rocas granodioríticas en cuestión son, a lo sumo, representativas de magmas secundarios derivados, al menos por fraccionamiento de plagioclasa y minerales máficos (olivino, clinopiroxeno, anfíbola y magnetita), de magmas primarios originados a niveles subcorticales. Los patrones de tierras raras sugieren, por lo menos, dos alternativas de origen para estos magmas primarios: un grado bajo de fusión ($\sim 5\%$) de una porción de manto, no contaminado, de peridotita de granate, actuando este último mineral como fase residual, o un grado más alto de fusión ($\sim 15\%$) de una porción de manto de la misma naturaleza, pero contaminado con líquidos magmáticos, generados por grados bajos de fusión ($\sim 5\%$) de basaltos oceánicos subductados de la placa de Nazca, en la

TABLA 2. ELEMENTOS MAYORES EN ROCAS INTRUSIVAS TERCIARIAS Y VOLCÁNICAS PLIO-CUATERNARIAS DE LOS ANDES DEL SUR ENTRE LOS 33°-34° S

	Plutón Río Blanco - San Francisco					Intrusivos No Productivos				Andesitas	
	G30 (1)	GdRb (2)	Rb-47 (2)	G29 (1)	G22 (1)	G25 (1)	G26 (1)	G27 (1)	Tupungato (3)	Marmolejo (3)	Marmolejo (4)
SiO ₂	61,35	64,99	66,52	66,83	66,06	66,17	67,52	69,74	61,23	60,82	60,42
TiO ₂	0,92	0,27	0,20	0,67	0,57	0,67	0,70	0,53	0,79	0,65	0,79
Al ₂ O ₃	16,88	14,72	15,33	16,08	15,40	15,99	16,50	14,84	16,61	18,04	17,47
FeO*	4,60	5,54	2,52	5,13	4,18	3,91	4,69	3,70	4,71	4,93	5,61
MnO	0,09	0,05	0,04	0,08	0,06	0,06	0,06	0,12	0,09	0,11	—
MgO	2,47	0,53	0,52	1,31	1,73	1,76	0,80	0,98	3,25	1,84	2,49
CaO	4,51	2,87	2,03	1,95	3,16	3,26	1,37	2,83	4,48	5,19	5,57
Na ₂ O	5,85	2,79	3,69	4,50	5,16	4,81	4,97	3,75	5,05	4,27	3,67
K ₂ O	2,74	4,22	5,48	2,87	3,31	3,13	2,66	3,11	2,11	2,45	2,38
P ₂ O ₅	0,27	0,19	0,12	0,25	0,21	0,21	0,23	0,11	0,21	0,32	0,23

FeO* es Fe total expresado como FeO.

Todos los datos están expresados en "% en peso" y fueron extraídos de los siguientes trabajos:

1. Oyarzún (1971); 2. Blondel (1980); 3. Thiele y Katsui (1969); 4. López (inédito).

TABLA 3. ELEMENTOS TRAZAS EN ROCAS INTRUSIVAS TERCIARIAS Y VOLCANICAS PLIO-CUATERNARIAS DE LOS ANDES DEL SUR ENTRE LOS 33°-34°S

	Plutón Río Blanco-San Francisco			Intrusivos No Productivos			Andesitas			
	G30 (1)	G29 (1)		G22 (1)	G25 (1)	G26 (1)	G27 (1)	Tupungato (1)	Marmolejo (1)	Marmolejo (2)
Sc	12,3	10,3		7,5	8,1	8,2	8,7	10,4	9,0	-
V	130	135		100	100	120	70	-	-	-
Cr	30	33		41	22	18	17	104	12	-
Co	8,1	14,8		7,6	9,8	10,0	6,6	16,6	11	-
Ni	15	20		14	14	10	9	-	27	-
Cu	25	200		22	45	35	16	-	-	-
Rb	50	90		115	120	115	120	-	68	-
Cs	1,3	2,8		3,2	8,9	3,9	7,0	-	-	-
Sr	600	690		600	575	590	265	-	630	-
Ba	650	500		650	600	540	505	590	350	500
La	20,7	16,8		25,4	19,5	18,3	17,6	19,1	27	24,6
Ce	46,7	35,1		40,6	39,1	37,0	33,4	43,7	61,5	74,3
Nd	23,0	18,4		18,9	18,7	18,2	16,8	17,9	26,2	24,4
Sm	4,33	3,44		3,52	3,34	3,16	3,26	3,51	4,9	5,59
Eu	1,00	0,73		0,66	0,71	0,78	0,62	1,10	1,16	1,14
Ho	0,8	0,6		0,6	0,7	0,6	0,8	0,3	0,6	1,39
Yb	1,5	1,2		1,2	1,3	1,2	2,2	0,7	1,5	2,56
Lu	0,20	0,17		0,18	0,22	0,22	0,35	0,12	0,27	0,42
Eu/Eu*	0,66	0,60		0,50	0,60	0,69	0,48	1,0	0,79	0,61
Hf	6,3	4,7		4,1	5,3	5,9	5,0	3,9	6,0	-
Th	10,0	6,8		12,1	14,4	11,4	10,0	4,0	6,1	-
U	4,4	2,0		3,8	4,2	2,9	3,0	1,6	2,0	-

Todos los datos, exceptuando los correspondiente a la razón Eu/Eu*, están expresados en ppm y fueron extraídos de los siguientes trabajos:

1. López (1978); López *et al.* (1979).
2. López (inédito).

facie eclogita (López, 1978). Este último modelo petrogenético es el que mejor concuerda con lo sugerido por los datos isotópicos de Sr y Nd y, aunque conlleva muchas simplificaciones, sugiere que los magmas primarios, que derivaron luego en las rocas granodioríticas del Plutón Río Blanco-San Francisco, serían el resultado de la fusión de una fuente compuesta, principalmente, de material del manto y, en menor proporción, de material proveniente de la litósfera oceánica subductada.

La presencia de granate, como fase residual en la fuente magmática, fue sugerida para explicar los contenidos relativamente bajos de Sc e Yb presentados por las rocas en discusión (López, 1978). Sin embargo, la presencia ubicua de anfíbola en las rocas ígneas de esta área, unida a la afinidad que este mineral tiene con el Sc y las tierras raras pesadas, nos hace pensar en la posibilidad que los patrones de tierras raras de las rocas granodioríticas más frescas del plutón Río Blanco-San Francisco no reflejen tan sólo una característica de la fuente magmática, sino que también la de un proceso que se realiza a niveles superficiales, cual es el fraccionamiento de anfíbola.

Aunque no es el objetivo de este trabajo discutir la génesis de la mineralización misma, estimamos conveniente hacer algunos comentarios relativos al tema. En primer lugar, si la fuente del metal fuese la corteza oceánica subductada, tal como lo propone Sillitoe (1972a), el modelo petrogenético arriba expuesto ofrece un mecanismo de transporte del metal desde dicha fuente al manto. Los procesos que continuarían: fusión parcial de una porción de manto contaminado y cristalización fraccionada, contribuirían a enriquecer los magmas residuales en Cu. Sin embargo, de acuerdo con los datos de tierras raras disponibles, un mecanismo similar habría actuado en la generación de las rocas granodioríticas de intrusivos no productivos de la zona. Esto nos mueve a pensar que el requisito "fuente rica en metal" no es tan fundamental, y que otros factores, probablemente más efectivos, intervendrían en la concentración cuprífera. La

presencia ubicua de anfíbola, en las rocas ígneas cenozoicas de esta área, estaría indicando que los fluidos acuosos habrían jugado un rol importante en su historia evolutiva. Al respecto, los estudios de Gustafson (1979) señalan que los magmas calcoalcalinos que mayor probabilidad tienen de ser productivos son aquéllos que, por originarse en una fuente pobre en H_2O y CO_2 , alcanzan la saturación en estos componentes sólo a niveles superficiales.

Estas ideas concuerdan con el modelo petrogenético antes expuesto, en el sentido que el contaminante del manto sería un magma generado por fusión parcial de la litósfera oceánica subductada, y no fluidos producidos por deshidratación de minerales hidratados, como es la otra alternativa deducible de los datos isotópicos combinados de Sr y Nd. Burnham y Ohmoto (1980) enfatizaron el rol de los complejos clorurados, como factor concentrador del Cu. Pero, es aún una incógnita el rol desempeñado por el boro en todo este proceso. Este problema adquiere relevancia si se piensa que gran parte de la mineralización cuprífera del distrito Río Blanco-Los Bronces se presenta en las brechas de turmalina (Cuadra 1980; Warnars, 1980).

Relaciones de terreno evidencian que las brechas son posteriores a los intrusivos. Esto sería consistente con la hipótesis que sostiene que la formación de los depósitos hidrotermales del tipo pórfidos cupríferos dependería, fundamentalmente, de los procesos que operan en las etapas finales del magmatismo (Burnham y Ohmoto, 1980; Burnham, 1981). Uno de estos procesos sería el conocido como "segunda ebullición", el cual, junto con ser capaz de liberar la cantidad de energía necesaria para producir brechización, genera una fase acuosa que tiene gran afinidad con los cloruros y con el azufre. El potencial mineralizante de esta fase depende, según Burnham y Ohmoto, del contenido de cloruros y de la razón "fugacidad SO_2 / fugacidad H_2S ", razón que depende, a su vez, de la fugacidad del oxígeno en el sistema.

CONCLUSIONES

Datos geoquímicos, como abundancia de tierras raras y razones isotópicas de Sr y Nd apoyan, dentro de sus limitaciones, la hipótesis que los magmas primarios, de los cuales derivaron las rocas granodioríticas más frescas del distrito minero Río

Blanco-Los Bronces, se generaron por fusión parcial de una zona del manto contaminada con líquidos magmáticos generados, a su vez, por fusión parcial de la litósfera oceánica subductada. La semejanza que los patrones de tierras raras de estas

rocas presentan con los patrones de rocas granodioríticas de intrusivos no productivos y de rocas volcánicas plio-cuaternarias de la región apoya, a nuestro entender, la idea que la alta concentración cuprífera del distrito Río Blanco-Los Bronces, más

que reflejar la existencia de una fuente anómalamente rica en Cu, sería el fruto de la acción de fluidos hidrotermales, tanto magmáticos como metecóricos, durante las etapas finales de la formación del intrusivo Río Blanco-San Francisco.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a las siguientes personas e instituciones que, de un modo u otro, hicieron posible la realización de este trabajo: A la Comisión Chilena de Energía Nuclear, por habernos otorgado las facilidades necesarias para obtener datos de elementos trazas por activación neutrónica. A los geólogos Sres. E. Klohn, C. Walker y C. Holgrem de la Cía. Minera Disputada de Las Condes S.A. y a los geólogos Sres. V. Stambuck y L. Serrano de CO-

DELCO, por las facilidades brindadas durante las campañas de terreno. A los geólogos Profs. F. Henríquez, F. Peebles, C. Mpodozis y al geólogo Sr F. Díaz por la revisión crítica del manuscrito. Al Servicio de Desarrollo Científico, Artístico y de Cooperación Internacional de la Universidad de Chile, por el Grant E410-8244 y al Programa de Cooperación Internacional CONICYT/NSF, por el Grant NSF 78/21364. Finalmente, a la Srta. Gilda Morales por su abnegada labor dactilográfica.

REFERENCIAS

- AGUIRRE, L. 1960.** Geología de los Andes de Chile Central, provincia de Aconcagua. Inst. Invest. Geol. (Chile), Bol., No. 9, 70 p.
- AMBRUS, J. 1979.** Emplazamiento y mineralización de los pórfidos cupríferos de Chile. Tesis de Doctorado, Univ. Salamanca, Fac. Cienc., Depto. Cristalogr. Mineral., 314 p. España.
- ARMBRUST, G.A.; OYARZUN, J.; ARIAS, J. 1977.** Rubidium as a guide to ore in Chilean porphyry copper deposits. *Econ. Geol.*, Vol. 72, No. 6, p. 1086-1100.
- BARANZANGI, M.; ISACKS, B.L. 1976.** Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology (Boulder)*, Vol. 4, No. 11, p. 686-692.
- BASSI, H. 1976.** Geología y potencialidad minera del grupo cuprífero Bronces, Provincia de Santiago, Chile. *In Congr. Geol. Chileno*, No. 1, Actas, Vol. 2, p. E209. Santiago.
- BLONDEL, J.R. 1980.** Pórfido de composición granodiorítica de la mina Río Blanco. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 88 p. Santiago.
- BURNHAM, C.W. 1981.** Convergence and mineralization - Is there a relation? *Geol. Soc. Am., Mem.*, No. 154, p. 761-768.
- BURNHAM, C.W.; OHMOTO, H. 1980.** Late-stage processes of felsic magmatism. *In Granitic magmatism and related mineralization (Ishihara, S.; et al., eds.)*. *Min. Geol., Spec. Issue*, No. 8, p. 1-11. Tokyo, Meeting 1979.
- CEPEDA, A. 1981.** Geología económica del área Andina-Disputada. Inst. Invest. Geol. (Chile), Bol., No. 36, 43 p.
- CUADRA, W.A. 1980.** Geología y petrogénesis de la brecha Donoso, mina Los Bronces, Cía. Minera Disputada de Las Condes, Región Metropolitana. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 148 p. Santiago.
- DRAKE, R.E. 1981.** Sr and Pb isotopic data bearing on the origin of Late Cenozoic igneous rocks and associated Cu ore deposits from the Chilean Andes, Lat. 33° and 36°S. *Geol. Soc. Am., Cordilleran Sect. Meeting*, Vol. 13, p. 52.
- DRAKE, R.E.; CURTIS, G.; VERGARA, M. 1976.** Potassium-argon dating of igneous activity in the central Chilean Andes; latitude 33°S. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 1, No. 3, p. 285-295.
- GUSTAFSON, L. 1979.** Porphyry copper deposits and calc-alkaline volcanism. *In The Earth; its origin, structure and evolution (McElhinny, M.W.; ed.)*, p. 427-468, Acad. Press., London, U.K.
- HALPERN, M. 1979.** Strontium isotope composition of rocks from the Disputada copper mine, Chile. *Econ. Geol.*, Vol. 74, No. 1, p. 129-130.
- HANUS, V.; VANEK, J. 1978.** Morphology of the Andean Wadati-Benioff zone, andesitic volcanism, and tectonic features of the Nazca plate. *Tectonophysics*, Vol. 44, No. 1-4, p. 65-77.
- HAWKESWORTH, C.; NORRY, M.; RODDICK, J.; et al. 1979.** ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and incompatible element variations in calc-alkaline andesites and plateau lavas from South America. *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 42, No. 1, p. 45-57.
- KAUSEL, E.; LOMNITZ, C. 1969.** Tectonics of Chile. *Int. Upper Mantle Symp., Proc.*, 22B, Vol. 2, p. 47-67.
- KLERKX, J.; DEUTSCH, S.; PICHLER, H.; et al. 1977.** Strontium isotopic composition and trace element data bearing on the origin of Cenozoic volcanic rocks of the central and southern Andes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 2, No. 1, p. 49-71.

- LATORRE, J. 1981. Geología y petrología de la Formación Río Blanco, mina Andina. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 108 p. Santiago.
- LOPEZ-ESCOBAR, L. 1978. Consideraciones petrogenéticas sobre las granodioritas terciarias de los Andes del sur entre los 33° y 34°S (Chile Central), Univ. Chile, Depto. Geol., Ser. Comun., No. 22, p. 1-31.
- LOPEZ-ESCOBAR, L.; FREY, F.A.; OYARZUN, J. 1979. Geochemical characteristics of Central Chile (33°-34°S) granitoids. *Contrib. Mineral. Petrol.*, Vol. 70, No. 4, 439-450.
- LOWELL, J.D. 1980. Metallogensis and porphyry deposits of North America and the Pacific region. *In* *Resources Minerales* (Guillemin, C.; *et al.*; eds.), Fr., Bur. Rech. Geol. Minieres, Mem., No. 106, p. 40-47. Colloquium C1; Int. Geol. Congr., No. 26, Paris, France, 1980.
- MUNIZAGA, F.; MANTOVANI, M. 1976. Razones iniciales Sr⁸⁷-Sr⁸⁶ de rocas volcánicas pertenecientes al Complejo Laguna del Maule, Chile central. *In* *Congr. Geol. Chileno*, No. 1, Actas, Vol. 2, p. F145-F152. Santiago.
- OYARZUN, J. 1971. Contribution a l'étude géochimique des roches volcaniques et plutoniques du Chili. Tesis de Doctorado, Univ. Paris-Sud, Fac. Sci. d'Orsay, 195 p. Paris.
- OYARZUN, J. 1979. Depósitos porfíricos y metalogénesis andina. *In* *Congr. Geol. Chileno*, No. 2, Actas, Vol. 2, p. C161-C179. Arica, Chile.
- OYARZUN, J.; FRUTOS, J. 1974. Porphyry copper and tin-bearing porphyries: a discussion of genetic models. *Phys. Earth Planet. Int.*, Vol. 9, No. 3, p. 259-263.
- OYARZUN, J.; FRUTOS, J. 1980. Metallogensis and porphyry deposits of the Andes (southeastern Pacific region). *In* *Ressources Minerales* (Guillemin, C.; *et al.*; eds.), Fr., Bur. Rech. Geol. Minieres, Mem., No. 106, p. 50-62. Colloquium C1; Int. Geol. Congr., No. 26, Paris, France, 1980.
- QUIRT, S.; CLARK, A.H.; FARRAR, E. 1971. Potassium-argon ages of porphyry copper deposits in northern and central Chile. [Abstr.] *Geol. Soc. Am., Abstr.*, Vol. 3, No. 7, p. 676-677.
- SHEPPARD, S.M.F.; GUSTAFSON, L.B. 1976. Oxygen and hydrogen isotopes in the porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Econ. Geol.*, Vol. 71, No. 8, p.1549-1559.
- SILLITOE, R.H. 1972a. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. *Econ. Geol.*, Vol. 67, No. 2, p. 184-197.
- SILLITOE, R.H. 1972b. Relation of metal provinces in western America to subduction of oceanic lithosphere. *Geol. Soc. Am., Bull.*, Vol. 83, No. 3, p. 813-818.
- STAUDER, W. 1973. Mechanism and spatial distribution of Chilean earthquakes with relation to subduction of the oceanic plate. *J. Geophys. Res.*, Vol. 78, p. 5033-5061.
- SWIFT, S.A.; CARR, M.J. 1974. The segmented nature of Chilean seismic zone. *Phys. Earth Planet. Int.*, Vol. 9, No. 3, p. 183-191.
- THIELE, R. 1980. Hoja Santiago, Región Metropolitana. *Inst. Invest. Geol., Carta Geol. Chile*, No. 39, 51 p.
- URQUETA, I. 1969. Antecedentes de alteración hidrotermal y de génesis del yacimiento cuprífero Río Blanco. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 68 p. Santiago.
- VERGARA, M.; DRAKE, R.E. 1979. Edades K-Ar en secuencias volcánicas continentales post-neocomianas de Chile Central; su depositación en cuencas intermontanas restringidas. *Asoc. Geol. Argent., Rev.*, Vol. 34, No. 1 p. 42-52.
- VERGARA, M.; MUNIZAGA, F.; DRAKE, R.; *et al.* 1980. Mesozoic-Cenozoic magmatism of central Chile. [Abstr.] *In* *Congr. Geol. Int.*, No. 26, Resumes, Vol. 1, p. 98. Paris, France, 1980.
- WARNAARS, F.W. 1980. Copper and turmaline breccias in Los Bronces, Chile. *Simp. Minería Cobres Porfíricos*, *Inst. Ing. Minas (Chile)*, Actas, p. 38-39. Santiago, Chile.