

Edad y geoquímica isotópica Rb-Sr del yacimiento de cobre Mantos Blancos: relación temporal con el magmatismo jurásico

Colombo C.G. Tassinari

Centro de Pesquisas Geocronológicas, Instituto de Geociências, Universidad de São Paulo, Caixa Postal 20899, São Paulo, Brasil

Francisco Munizaga

Departamento de Geología, Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21, Santiago

Rubén Ramírez

Compañía Minera Mantos Blancos S.A., Casilla 570, Antofagasta, Chile

RESUMEN

La secuencia volcánica de Mantos Blancos, donde se emplaza el yacimiento estratoligado de Cu(-Ag) Mantos Blancos fue objeto de un estudio de geoquímica isotópica Rb-Sr con el fin de aportar evidencias respecto a la edad y génesis de este importante yacimiento. Edades obtenidas por el método de roca total en diferentes conjuntos de rocas, definidos de acuerdo a características particulares como tipo de alteración y relación con la mineralización de mena, permiten señalar lo siguiente: a- la errorcrona obtenida en las secuencias NK (rocas con contenidos normales de K_2O y alteración sódica menos intensa) indican una edad en torno a los 175 Ma, que se interpretan como indicativa de la edad de la secuencia volcánica de Mantos Blancos; b- la errorcrona obtenida en la secuencia alterada sódica ANa (rocas con alteración sódica) en torno de 150 Ma se interpreta como la edad de la alteración hidrotermal que produce metasomatismo sódico y mineralización de mena; c- los intrusivos que afectan a la Formación La Negra y la secuencia volcánica de Mantos Blancos habrían sido los responsables del fenómeno térmico que generó el proceso de alteración hidrotermal relacionado a la mineralización de mena. Razones isotópicas $^{87}Sr/^{86}Sr$ iniciales, tanto en los conjuntos NK y ANa, como en calcitas asociadas espacialmente a la mineralización permiten afirmar que las soluciones que dieron origen a la mineralización no habrían sido generadas sólo por fluidos de origen magmático o de agua de mar. Ellos habrían tenido una evolución diferente, producto de mezcla con fluidos meteóricos y/o con aquéllos generados durante el proceso de equilibrio parcial con las rocas de caja.

Palabras claves: Cobre, Edades absolutas, Rb-Sr, Razones $^{87}Sr/^{86}Sr$, Estratoligados, Mantos Blancos, Magmatismo Jurásico, Norte de Chile.

ABSTRACT

Rb-Sr isotopic age and geochemistry of the Mantos Blancos copper deposit: temporal relation of the Jurassic magmatism. The Mantos Blancos volcanic sequence, host of the stratabound Cu (-Ag) deposit of the same name, has been studied for its Rb-Sr isotope geochemistry, to provide insights into the age and genesis of this important mineral deposit. Whole rock Rb-Sr ages of rock units characterized for their alteration pattern, allow the following generalizations: a- errorchrons from the NK unit (rocks with normal K_2O contents and with little sodic alteration), yield ages of ca. 175 Ma, interpreted as the age of the host Mantos Blancos volcanic sequence; b- the ages of about 150 Ma obtained for the strongly altered ANa unit (sodic alteration), are interpreted to represent the age of hydrothermal alteration responsible for sodium metasomatism and its associated copper mineralization; c- intrusives emplaced into La Negra Formation and Mantos Blancos volcanic sequence may have been responsible for the thermal event causing the hydrothermal alteration process related to the ore mineralization. The initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ of both NK and ANa units, and in calcite, which crystallized late in the paragenetic sequence of the ores, suggests that the hydrothermal fluids could not have been purely magmatic, nor of seawater origin, but could represent meteoric waters that have partially equilibrated with the host formations, or mixtures of different fluids.

Key words: Copper, Absolute ages, Rb-Sr, $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios, Stratabounds, Mantos Blancos, Magmatism, Jurassic, Norte de Chile.

INTRODUCCION

El yacimiento de Mantos Blancos ubicado ca. 45 km al noreste de la ciudad de Antofagasta, Región II (Fig. 1), es el representante más importante de un grupo de yacimientos estratoligados de cobre, con plata subordinada, conocidos como 'tipo manto' y explotados en Chile desde el siglo pasado. En general, en estos yacimientos los sulfuros de cobre se distribuyen en forma diseminada en estratos volcánicos y volcanoclasticos sin que se haya podido determinar hasta la fecha su asociación genética o temporal con cuerpos intrusivos. El problema mayor reside en la carencia, en estos yacimientos, de un mineral que permita obtener dataciones radioisotópicas y así, discriminar entre los varios modelos genéticos conceptuales propuestos hasta ahora, dificultando tanto la evaluación de su potencial económico como su exploración.

La datación de un evento mineralizador es uno de los problemas más difíciles en la formulación de modelos metalogénicos, lo que lleva a tener en cuenta la siguiente reflexión: "Determination of the age of ore deposition is so difficult in many cases that all possible ways of doing so need to be explored" (Doe in Ruiz *et al.*, 1984, nota al pie de página).

En el presente trabajo se utiliza el método Rb-Sr,

y el conocimiento teórico de su comportamiento geoquímico en sistemas fisicoquímicos de temperatura relativamente baja, como una herramienta para atacar el problema de la edad relativa y absoluta de la mineralización en estratoligados y rocas asociadas. También se hacen consideraciones sobre la caracterización de las posibles fuentes de los fluidos y restringir grados de libertad de los modelos geológicos para la génesis de los depósitos estratoligados, conocidos en Chile como tipo manto.

El yacimiento estudiado, perteneciente a la Compañía Minera Mantos Blancos, explota minerales de cobre (bornita, calcosina) y plata, y está emplazado en rocas de la secuencia volcánica Mantos Blancos. Regionalmente, este yacimiento ha sido incluido dentro de la franja de yacimientos de Cu que se distribuye en la Cordillera de la Costa de la Región de Antofagasta (Fig. 1) y emplazados en rocas volcánicas predominantemente jurásicas (Boric *et al.*, 1990).

La secuencia volcánica de Mantos Blancos (en adelante SVMB), es un nombre informal aplicado a un conjunto de rocas estratificadas, de tipo intermedio a ácido, aparentemente restringido a las inmediaciones del distrito minero de Mantos Blancos. Esta secuencia volcánica tiene una potencia mínima de 500 m, su base no aparece expuesta y la parte

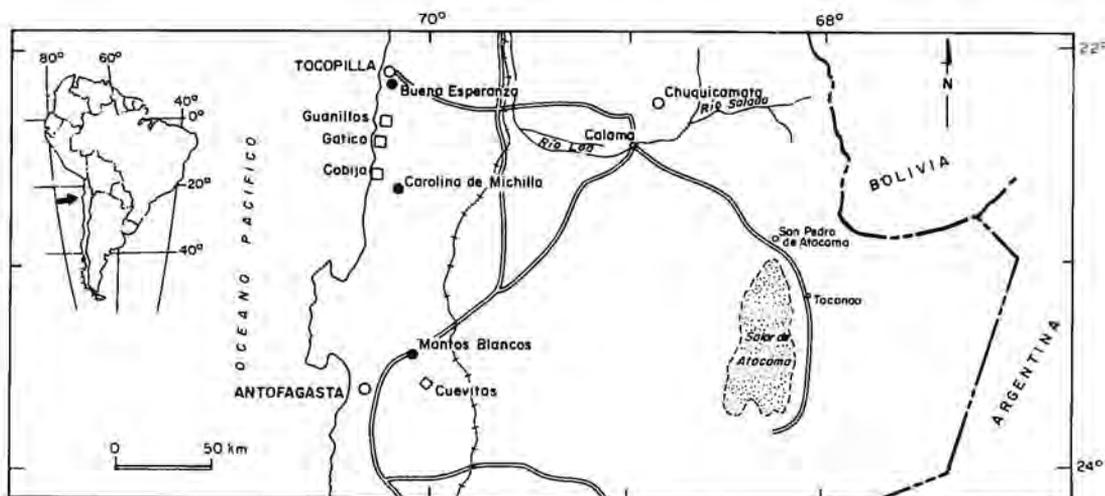


FIG. 1. Ubicación del yacimiento Mantos Blancos y otros yacimientos tipo manto emplazados en la Formación La Negra: ○ ciudades; ● yacimientos de Cu tipo manto; □ localidades de intrusivos en la Formación La Negra; ◊ localidad geológica (modificada de Boric *et al.*, 1990).

superior corresponde a la superficie actual de erosión (Chávez, 1985).

El yacimiento se emplaza en una secuencia estratificada de rocas volcánicas ácidas a intermedias, de rumbo general N40°W y manteo de 25°SW, que están intruidas por un cuerpo subvolcánico andesítico, interpretado como 'sill', además de filones mantos dacíticos y abundantes diques andesíticos que cortan las unidades anteriores.

La alteración hidrotermal relacionada a la mineralización de Cu en la mina de Mantos Blancos, ha sido descrita por Chávez (1985) y Ramírez (1991), como moderada, dejando evidencias de la textura de la roca original. Esta se presenta en cuatro tipos principales: a- sódica, representada por albitización de los feldspatos y albita en venillas; b- cloritización; c- una intensa hematización que se presenta como especularita diseminada o como hematita roja; d- silicificación generalizada que se manifiesta en agregados microcristalinos de cuarzo en la masa fundamental de las rocas. Además, existe calcita concentrada en algunas áreas del distrito minero, reemplazando fenocristales y como vetillas en la masa fundamental.

El yacimiento de Mantos Blancos cuenta con abundante información de subsuperficie y un mapeo adecuado de sus unidades litológicas operacionales,

condiciones indispensables para hacer un estudio detallado del comportamiento del sistema isotópico $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$. Esto permite aportar nuevos antecedentes respecto a su edad y génesis, al mismo tiempo definir un modelo que lleve a entender mejor el comportamiento isotópico y su valor geocronológico en otros yacimientos del mismo tipo.

Se efectuó un muestreo en las rocas obtenidas de un sondaje profundo de exploración, y se analizaron calcitas de tamaño centimétricos recolectadas de muestras con minerales de mana (Tabla 1); paragenéticamente estas calcitas pertenecerían a la etapa más tardía de la mineralización (Chávez, 1985).

En sentido estricto, no existen rocas frescas en la SVMB; sin embargo, de acuerdo a la alteración en las unidades operacionales (Ramírez, 1991), se muestrearon dos tipos, uno que petrográficamente corresponde, en su mayor parte, a andesitas, considerado no alterado por presentar, en general, valores de $\%K_2O$ entre 1,26 y 3,14 (en adelante NK); y otro, que petrográficamente corresponde, principalmente, a dacitas cuarcíferas con alteración sódica las que presentan valores de concentración de Na_2O en general superiores a 6,2% y concentraciones de K_2O predominantemente inferiores a 1% (en adelante ANa). En la figura 2 se proyectaron estos conjuntos de rocas alteradas en función de razones $Na_2O/$

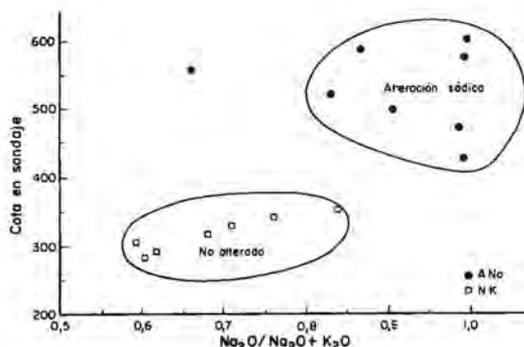
TABLA 1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DE SONDAJE PROFUNDO DE EXPLORACIÓN. CONTENIDOS DE SiO_2 , Na_2O , K_2O , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Cota en sondaje	Muestra No.	Roca	Alteración	$\%SiO_2$	$\%Na_2O$	$\%K_2O$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
599	SP-2	Dacita cuarcífera	ANa	69,5	6,78	0,02	0,70530
574	SP-5	"	"	55,05	6,69	0,04	0,70571
586	SP-7	"	"	50,5	6,24	0,94	0,71452
556	SP-10	"	"	73,02	5,23	2,66	0,70632
520	SP-16	"	"	75,5	6,20	1,46	0,70975
496	SP-20	"	"	67,45	6,96	0,71	0,70730
472	SP-24	"	"	76,29	7,01	0,10	0,70636
424	SP-34	Andesita basal	"	54,20	7,37	0,06	0,70515
352	SP-44	"	NK	41,84	6,78	1,26	0,70659
340	SP-46	"	"	40,16	6,47	2,0	0,71374
328	SP-48	"	"	40,89	6,74	2,56	0,71119
316	SP-56	"	"	53,02	5,11	2,39	0,70870
304	SP-58	"	"	51,70	5,06	3,43	0,71132
292	SP-60	"	"	56,99	4,66	2,84	0,71061
280	SP-62	"	"	53,09	4,84	3,14	0,71169

NK: muestras con contenido normal de potasio; ANa: muestras con alteración sódica.

Na_2O+K_2O versus cota en el sondaje de exploración profundo, observándose, claramente, dos poblaciones diferentes con un cierto traslape, debido, probablemente, a algún tipo de inhomogeneidad de las muestras.

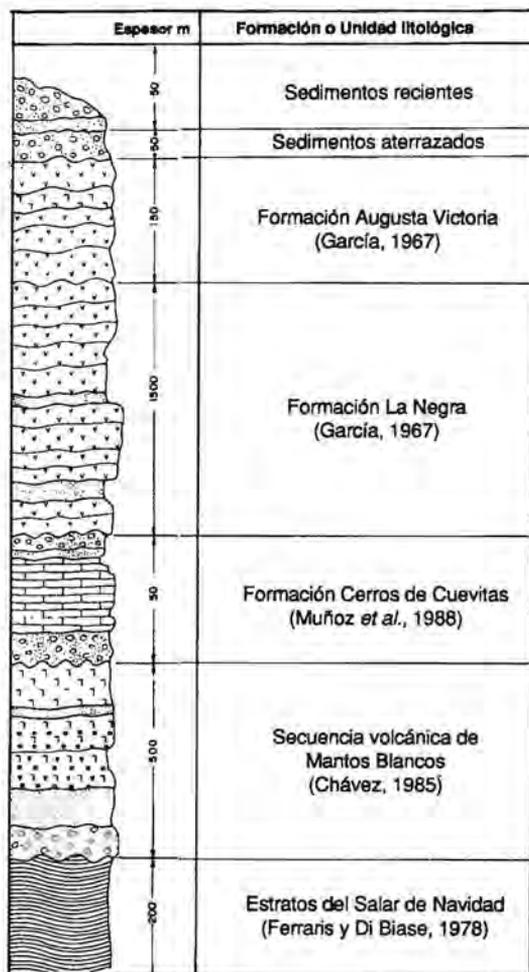
FIG. 2. $Na_2O/Na_2O + K_2O$ versus cota, dentro del sondaje de exploración profunda, de las rocas recolectadas (datos en tabla 1).



ASIGNACION ESTRATIGRAFICA DE LA SECUENCIA VOLCANICA DE MANTOS BLANCOS

Las correlaciones de la secuencia volcánica de Mantos Blancos (SVMB) son tentativas y se basan, principalmente, en similitudes litológicas. Chávez

(1985), obtuvo edades K-Ar de 147 a 149 Ma en diques que cortan la secuencia volcánica permitiendo asignar a éstas una edad mínima jurásica media. Con este antecedente, Chávez (1985) las correlacionó con rocas queratofídicas asignadas al Triásico Inferior que habían sido descritas en el norte de Chile por Harrington (1961) y Chong (1973). En consecuencia, de acuerdo a los datos radioisotópicos, la posición de esta secuencia, en la columna estratigráfica integrada de la región, es bajo los Estratos de Rencoret, asignados al Hettangiano por Tobar (1966) y sobre los estratos de Navidad asignados al Permo-Carbonífero por Chong y Cecioni (1976). De acuerdo a este esquema la edad de la SVMB estaría comprendida entre el Pérmico y el Jurásico Inferior.



Boric et al. (1990) afirmaron que el yacimiento de Mantos Blancos está emplazado en la Formación La Negra. El contraste litológico, sin embargo ha impedido que esta idea prospere. Muñoz et al. (1988) llamaron la atención indicando que existen litologías semejantes a la SVMB en la base de la Formación La Negra. Sin embargo, Ramírez (1991) propuso intercalar la secuencia de Mantos Blancos bajo la Formación Cerros de Cuevitas y sobre los estratos de Salar de Navidad (Fig. 3).

Rogers (1985), en un estudio geocronológico de la Formación La Negra, presentó una edad Rb-Sr isócrona roca total, de 186 ± 14 Ma y señaló, además, que está intruida por cuerpos de granitoides con edades Rb-Sr isócrona roca total, en torno a 150 Ma. Maksiyev (1990) también presentó datos K-Ar y Ar-Ar

FIG. 3. Columna estratigráfica interpretativa e integrada (no a escala) de las principales unidades reconocidas en el área (Ramírez, 1991)

para intrusivos que cortan la Formación La Negra, obteniendo valores semejantes.

De acuerdo con estos antecedentes geológicos y

radioisotópicos tanto la SVMB como la Formación La Negra serían más antiguas que el Jurásico Medio y más joven que el basamento permo-carbonífero.

PROCEDIMIENTOS ANALITICOS

Los análisis isotópicos de Sr se efectuaron en laboratorios del Centro de Pesquisas Geocronológicas del Instituto de Geociencias de la Universidad de São Paulo. Las muestras colectadas para determinar Rb-Sr fueron analizadas mediante fluorescencia de rayos X, bajo las condiciones expuestas previamente por Kawashita (1972), usando un instrumento marca Philips con tubo de W y utilizando como estándares de referencia las muestras PCC-1, GSP-1 y DTS-1. Los errores de acuerdo a este método se estiman en un 2% para concentraciones entre 50 y 500 ppm; para concentraciones menores, se utilizó el método de dilución isotópica con trazadores enriquecidos en Rb y Sr.

La separación de Sr para el análisis isotópico, se realizó en columnas intercambiadoras de iones, constituidas por resinas Dowex- 50V-X8 de granulometría de 200 y 400 mallas en ambiente

ácido (HCl) (Kawashita, 1972). La composición isotópica de Sr fue medida en un espectrómetro de masa Micromass VG-354 con multicolelector, permitiendo una reproductibilidad variable en la quinta cifra decimal. Todos los valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ se normalizaron para un valor de $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$ igual a 0,1194.

En el período de análisis de estas muestras se efectuaron 24 medidas de la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la muestra estándar internacional NBS-987, obteniéndose un valor de $0,71025 \pm 0,00004$. Los cálculos de las edades se hicieron mediante el método de ajuste de curvas desarrollado por Williamson (1968). Las constantes empleadas para el cálculo de edades son las recomendadas por Steiger y Jäger (1977): $\lambda^{87}\text{Rb} = 1,42 \times 10^{-11}$ años $^{-1}$. Para el cálculo de dilución isotópica se utilizó el valor $2,5962 \pm 0,0037$ para la razón $^{85}\text{Rb}/^{87}\text{Rb}$.

GEOQUIMICA ISOTOPICA DE Sr

El método de datación Rb-Sr por medio de isócronas está descrito en detalle en Faure and Powell (1972). La aplicación geocronológica de este método considera dos premisas básicas: a- todas las muestras forman parte de un mismo sistema isotópico homogéneo de Sr, y por lo tanto, tienen inicialmente el mismo valor $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, y b- el sistema en que se encuentran es cerrado, no habiéndose producido más cambios isotópicos que el decaimiento de ^{87}Rb a ^{87}Sr . Si se cumplen estas dos condiciones, se obtiene una correlación perfecta entre $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (Dodson, 1982).

La realización de estudios geocronológicos en los yacimientos de cobre tipo manto, presentan dificultades de interpretación, debido a la baja intensidad de la alteración (Munizaga *et al.* 1988). Esto se traduce en sistemas isotópicos perturbados y/o parcialmente abiertos, cuya composición isotópica resultante será una mezcla entre la composición

isotópica de las rocas originales y la composición isotópica de las soluciones que participan del proceso de alteración y mineralización. Este tipo de problemas ha dificultado la interpretación de la edad de la mineralización en el yacimiento de Mantos Blancos ya que no existen minerales de mena que puedan ser datados.

Debido a la falta de minerales ideales para datación por otros métodos, se usó el método Rb-Sr de isócrona roca total. Las muestras recolectadas se proyectaron e interpretaron en diagramas isocronicos; en ellos se definieron rectas que deberían ser consideradas isócronas de acuerdo al programa de Williamson (1968), pero debido a su alto MSWD, son consideradas más bien errorcronas (Brooks *et al.*, 1972). El MSWD corresponde a la medida del grado de dispersión que tienen los valores de las razones isotópicas respecto a una recta de correlación perfecta según el método de Williamson (1968). La

diferencia entre isócrona y errorcrona está dada de acuerdo al valor del MSWD. Valores del MSWD mayores que 2.5 son considerados errorcronas de acuerdo a Brocks *et al.* (1972). Sin embargo, este parámetro depende de la incerteza de las medidas de las razones isotópicas; en otras palabras, aquellos que trabajan con razones isotópicas medidas con mayor error, tendrán más posibilidad de obtener isócronas (Kullerud, 1991).

Es muy importante enfatizar, que debido a la intensidad y grado de la alteración que afecta a los yacimientos tipo manto, es probable que éstos no fueron sistemas fisicoquímicos cerrados, ya que la mineralogía de estos yacimientos corresponde a un ejemplo de sistemas abiertos no en equilibrio. Por esta razón, es improbable que se pueda haber llegado a la homogenización isotópica total, lo que podría explicar las errorcronas obtenidas.

RESULTADOS ISOTOPICOS

Se presentan 22 análisis isotópicos de Sr, en roca total y en calcitas asociada a la mineralización de mena. Las muestras provienen de: a- la zona mineralizada en el interior de yacimiento (en adelante llamadas IMIN) y b- del sondaje profundo, donde se separaron dos conjuntos de rocas uno con alteración sódica (ANa) y otro considerado no alterado (NK) (Tabla 2; Fig. 2).

El tratamiento de las razones isotópicas de Sr y Rb mediante diagramas isocrónicos e interpretados según el método de Williamson (1968), produjo sólo errorcronas con un alto valor del MSWD; por esta razón, no es aconsejable usar los errores, tanto en las edades como en las razones iniciales. Sin embargo, en algunos diagramas, debido a la disposición

espacial de las razones isotópicas en el diagrama isocrónico, se indican los errores analíticos.

A pesar de la dispersión de los datos en los diagramas isocrónicos, los resultados obtenidos son coherentes con la geología y coinciden con otros datos radioisotópicos previamente obtenidos por otros métodos (Munizaga *et al.*, 1991).

TABLA 2. CONTENIDOS DE Sr Y Rb, RAZONES ISOTOPICAS $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Y $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ DE MUESTRAS DE MANTOS BLANCOS.

Muestra No.	Sr	Rb ppm	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ ppm	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
MB-13210	261	51	14,8	0,74184
MB-13210	221	63	10,1	0,72783
MB-13226	12	109	0,33	0,70595
MB-13227	32	53	1,72	0,70877
MB-13230	163	42	11,1	0,72856
MB-20	31	78	1,13	0,70730
MB-10	7,9	148	0,15	0,70532
MB-2	1,4	127	0,03	0,70530
MB-7	88	52	4,94	0,71452
MB-05	2,0	83	0,07	0,70571
MB-16	41	69	1,72	0,70975
MB-24	3,5	75	0,12	0,70636
MB-34	2,4	120	0,05	0,70515
MB-46	100	71	4,04	0,71374
MB-44	34	141	0,69	0,70659
MB-58	108	147	2,13	0,71132
MB-62	97	118	2,38	0,71169
MB-48	77	77	2,91	0,71119
MB-56	86	223	1,12	0,70870
MB-60	101	120	2,42	0,71061
MB-13233*	151			0,70555
MB-13232*	47			0,70567

*Calcita

DIAGRAMAS ISOCRONICOS

El conjunto de muestras NK, proyectadas en un diagrama isocrónico Rb-Sr, se dispone próximo a una recta con una inclinación que representa una edad cercana a 175 Ma con una razón inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,7052 (Fig.4).

Los análisis Rb-Sr de las dacitas cuarcíferas, pertenecientes al conjunto ANa en el diagrama isocrónico, definen una recta de edad 150 Ma y con una razón inicial de Sr de $0,7056 \pm 0,0001$ (Fig 5).

Aunque los datos no se presentan como puntos bien alineados, la correlación entre ellos se considera confiable en vista a que los puntos tienen buena distribución espacial. El valor de la razón inicial es bastante preciso debido a la existencia de cinco puntos muy cercanos al origen. De una forma análoga, las rocas recolectadas en el interior de la mina pertenecientes al conjunto IMIN son consistentes con una edad por roca total Rb-Sr de 158 ± 6 Ma con

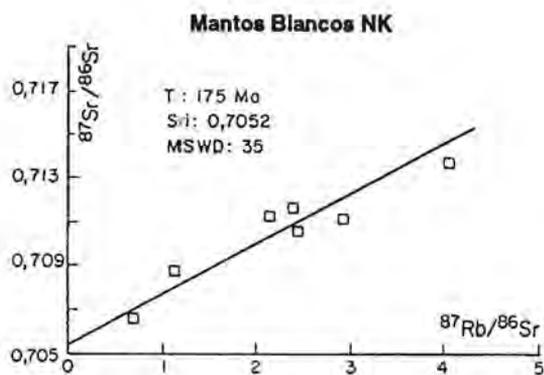


FIG. 4. Diagrama isocrónico en secuencia volcánica NK de Mantos Blancos.

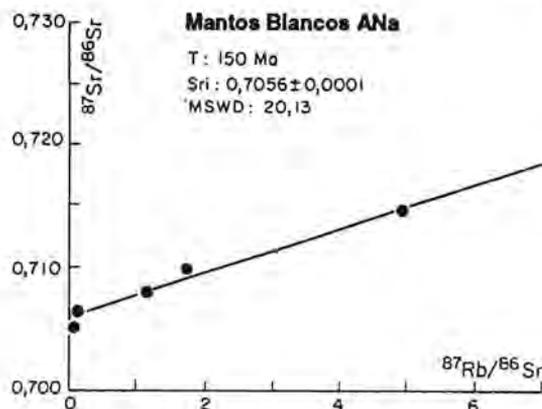


FIG. 5. Diagrama isocrónico de rocas con alteración sódica de Mantos Blancos.

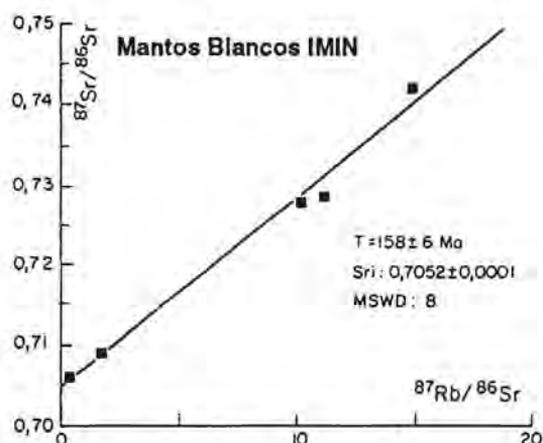


FIG. 6. Diagrama isocrónico Rb-Sr roca total interior mina Mantos Blancos.

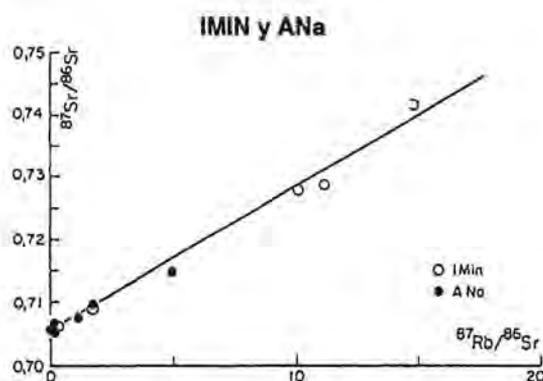


FIG. 7. Diagrama isocrónico de muestras IMIN y ANa.

razón inicial de Sr de $0,7052 \pm 0,0001$ (Fig. 6).

Las edades y las razones iniciales de estos dos conjuntos (IMIN y ANa) son semejantes y, al ser

proyectados juntos en un mismo diagrama isocrónico, definen una recta con una inclinación cercana a una edad de 155 Ma y una razón inicial de 0,7050 (Fig. 7).

DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Al observar los valores de K_2O y Na_2O versus cota de la muestra en el sondaje de exploración profunda se puede apreciar que el contenido de K es mayor en la parte profunda del sondaje, mientras que en la parte superior existe una mayor cantidad de Na. Esto ha sido interpretado como producto de una alteración sódica de mayor intensidad en la parte superior de las secuencias atravesadas por el son-

daje de exploración profunda (Fig. 2).

La influencia de los cambios químicos en las razones isotópicas actuales de $^{87}Sr/^{86}Sr$, se manifiesta en el aumento del valor de ellas hacia la parte profunda del sondaje que es la más rica en K (Fig. 8). Como estos valores de K_2O son semejantes a los encontrados regionalmente en las rocas volcánicas de las zonas aledañas (Chávez, 1985), significaría

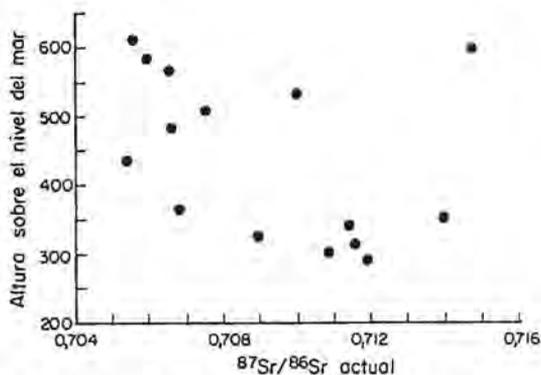


FIG. 8. Razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus cota de las muestras en sondeo de exploración profunda.

que la alteración hidrotermal fue incipiente en estas cotas de la secuencia, aumentando el Na_2O , pero no alcanzó a removilizar el K_2O , lo que se manifiesta en la preservación de razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ originales de las rocas. Mientras que aquellas rocas pertenecientes al conjunto ANa, con más cantidad de Na_2O y menos K_2O , habrían experimentado una lixiviación del K al producirse el aporte de Na.

De acuerdo a lo anterior, una interpretación geocronológica posible de las edades obtenidas sería que: a- las rocas del conjunto NK definen, en el diagrama isocrónico, una recta cuyo valor representaría la edad de la secuencia volcánica de Mantos Blancos, ya que preservan las razones isotópicas, y b- el conjunto ANa habría lixiviado su K al producirse la entrada de Na. La edad obtenida para este conjunto de rocas ANa, sería la correspondiente a la albitización que acompaña la mineralización de mena, ya que la albitización puede provocar homogenización isotópica de Sr, en las rocas afectadas por ese proceso.

Las edades obtenidas en las rocas del sondeo de exploración profunda, a pesar de ser errorcronas, que reflejan la perturbación del sistema isotópico Rb-Sr, pueden ser comparadas con los datos preexistentes en el área, especialmente con los obtenidos por Rogers (1985) y Maksaev (1990) en la Formación La Negra e intrusivos que la afectan.

Con el fin de observar la influencia de la diferencia en los errores analíticos de las razones isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre Rogers (1985) y este trabajo (2% y 1%, respectivamente), se han analizado los datos Rb-Sr de Mantos Blancos, con un error de 2% en el programa de Williamson (1968), lo que produce algunos

cambios menores en las edades, pero lo más importante es que ninguna de las errorcronas aquí obtenidas presentó un MSWD mayor que 8,8, hecho que permite comparar los resultados.

La edad Rb-Sr de 175 Ma (Fig. 4) obtenida en las rocas de la unidad operativa andesita basal del sondeo de exploración profunda, correspondiente al conjunto NK, es comparable con la isócrona Rb-Sr roca total de 186 ± 13 Ma de la Formación La Negra obtenida por Rogers (1985) (Fig.9).

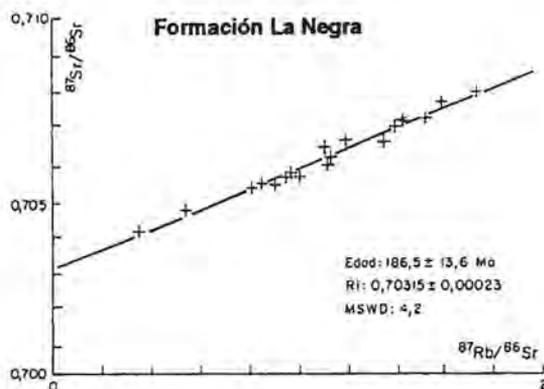


Fig. 9. Isócrona de la Formación La Negra de acuerdo a Rogers (1985).

La edad de esta última puede ser interpretada como correspondiente al emplazamiento de las lavas. Una posible objeción a esta interpretación, sería que el metamorfismo de carga o alteración regional, podría haber distorsionado la composición isotópica; sin embargo, los estudios de geoquímica de elementos mayoritarios de las rocas seleccionadas para análisis isotópico, muestran tendencias de variación coherentes con rocas no alteradas por procesos de metamorfismo de carga y no presentan fenocristales de plagioclasas albitizadas (Rogers, 1985).

Si se comparan los valores de las isócronas obtenidas en la Formación La Negra (186 ± 13 Ma) y las NK de Mantos Blancos (175 Ma), no es posible diferenciarlas analíticamente y podrían corresponder al mismo evento; su diferencia es la razón inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, que es de $0,7031 \pm 0,0002$ para La Formación La Negra y de $0,7052$ para las NK.

Si se acepta que la razón inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ es la principal diferencia entre la Formación La Negra y la SVMB, se puede calcular una edad Rb-Sr modelo

usando la razón inicial de la Formación La Negra. La edad modelo así obtenida de 195 Ma, permite pensar que si la SVMB hubiera tenido, antes de la alteración, la misma razón inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la Formación La Negra, su edad sería también concordante con la edad de la Formación La Negra.

Al observar lo que sucede en otros yacimientos emplazados en la Formación La Negra, como la mina Susana, distrito de Carolina de Michilla, donde también se han obtenido datos radioisotópicos de la secuencia volcánica alterada, asociada a mineralización, ésta presenta una isócrona Rb-Sr de 173 ± 19 Ma (Venegas *et al.*, 1991), que es comparable a la obtenida en Mantos Blancos. Además, se han obtenido edades ^{40}Ar - ^{39}Ar en granos de minerales aislados, constituidos por albitas de alteración hidrotermal, indicando edades de 142 ± 2 Ma (Venegas *et al.* 1991), semejante a lo que se observa en Mantos Blancos donde se obtienen edades de 146 ± 1 Ma en albitas de la andesita basal (Munizaga *et al.*, 1991).

Regionalmente, las secuencias de la Formación La Negra han sido afectadas por intrusiones, en que se han obtenido edades Rb-Sr isócrona roca total de los plutones de Gatico (158 ± 6 Ma), Tocopilla (155 ± 14 Ma) y Sierra de la Cruz (156 ± 31 Ma) (Rogers 1985). Además, edades ^{40}Ar - ^{39}Ar en biotitas de los intrusivos de Gatico, Guanillos y Cobija presentan espectros de Ar liberado por 'steps' que permiten interpretar edades de plateau que varían entre los $161 \pm 0,4$ y 165 ± 1 Ma (Maksaev *et al.*, 1988; Maksaev, 1990). Esto permite observar que existe coherencia entre la edad obtenida para las volcanitas de la Formación La Negra y las edades obtenidas por diferentes métodos radioisotópicos para los plutones que intruyen a esta formación.

La SVMB está intruida por granodioritas que se disponen al NNE y suroeste del yacimiento. En algunos de ellos se obtuvieron edades K-Ar de 147-149 Ma. También se han obtenido valores semejantes en diques anfibólicos dentro de la mina que presentan edades de $147-149 \pm 13$ Ma (Chávez, 1985). En resumen, se puede afirmar que los intrusivos que afectan la Formación La Negra y la SVMB, presentan edades semejantes así como también las albitas de alteración hidrotermal recolectadas en ambas secuencias.

Las rocas alteradas de la SVMB, correspondiente a las ANa producen una isócrona Rb-Sr de 150 Ma, y las IMIN de 158 Ma. Estos valores difieren de los obtenidos en las rocas no alteradas y, probable-

mente, están influidos por procesos relacionados a su alteración.

Otra forma indirecta de estimar la edad de la alteración hidrotermal es aplicar el método de Ruiz *et al.* (1984) para calcular la edad de la mineralización, usando la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de las calcitas que acompañan la mineralización como razón inicial y que representaría la razón inicial de los fluidos que dieron origen a la calcita, y usar el valor de la razón actual $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de las rocas de caja, representadas en este caso por la muestra MB-48. Se obtiene, de este modo, una edad Rb-Sr modelo, de 140 Ma, edad que está en el intervalo de la edad de alteración sódica, y que debe ser considerada como una aproximación debido a la incertidumbre del método.

Otra evidencia de procesos hidrotermales en el área es la observada por Maksaev (1990). Al referirse a la mineralización de la Cordillera de la Costa, en la Región II, expresó que los datos radioisotópicos muestran que las vetas de cobre se formaron en el Jurásico Medio a Superior durante el enfriamiento de plutones de dimensiones batolíticas, emplazados en las secuencias del arco volcánico jurásico de la costa. Se observa, así, que la edad Rb-Sr de las rocas NK e IMIN, la edad modelo según el método de Ruiz *et al.* (1984) y las edades obtenidas por el método Ar-Ar en albitas de alteración hidrotermal en Mantos Blancos como en Carolina de Michilla y las vetas de cobre descritas por Maksaev (1990), están dentro de un mismo intervalo de valores en torno a 150 Ma.

Estas coincidencias entre edades Rb-Sr de las rocas alteradas y las Ar-Ar de albitas de alteración hidrotermal, las hace compatibles con una génesis asociada al proceso térmico que producen los intrusivos graníticos que afectan a la Formación La Negra y la SVMB. Sin embargo, con los datos obtenidos en este trabajo, no es posible afirmar ni excluir la posibilidad que antes del plutonismo de tipo batolítico no existiera alguna forma de mineralización de cobre en la Formación La Negra o en la SVMB.

Un intento de correlacionar la evolución de ^{87}Sr con los procesos de alteración, en el área de Mantos Blancos, se entrega en la figura 10. En ella, el valor próximo a los 150 Ma, representaría la época de alteración hidrotermal que afectó a esas rocas, porque procesos de este tipo abren el sistema Rb-Sr provocando un empobrecimiento de Rb y rápidamente el sistema vuelve a cerrarse evolucionando como un nuevo sistema.

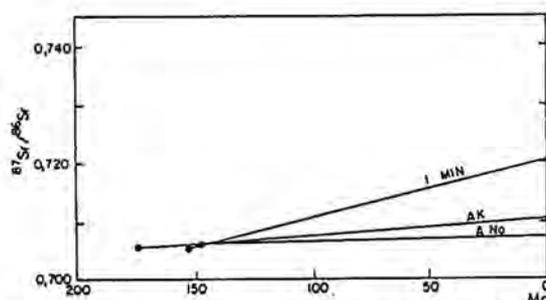


Fig. 10. Diagrama de evolución isotópica de Sr en función del tiempo para los conjuntos NK, ANa e IMIN.

Lo anterior puede ser observado con facilidad en el diagrama de evolución isotópica de Sr en función del tiempo geológico correspondiente a los conjuntos de ANa y NK (Fig. 10). Es posible deducir que cuando ocurrió el proceso de mineralización asocia-

do a la alteración hidrotermal, que aporta Na y moviliza K y Rb, el nuevo sistema se cierra con una razón Rb/Sr más baja, produciendo una evolución de la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ más lenta y, de acuerdo a eso, una línea evolutiva con menor pendiente. Además, esta hipótesis es corroborada por las edades Ar-Ar y K-Ar en plagioclasas con valores en torno a 146 Ma de rocas de las secuencias alteradas de Mantos Blancos presentadas por Munizaga *et al.* (1991), y que ellos sugirieron como la época del último evento térmico importante que ocurrió en el área, relacionado al proceso responsable de la mineralización de mena.

El hecho de que el punto inicial de recta ANa se sitúe sobre la curva de evolución isotópica NK (Fig. 10), sugiere que las rocas del conjunto ANa se originaron a partir de rocas del conjunto NK debido a los procesos de alteración hidrotermal.

GENESIS DE FLUIDOS

Las características del ambiente de arco volcánico donde se emplaza el yacimiento de Mantos Blancos, permiten suponer que los tipos de soluciones involucrados en la mineralización de Mantos Blancos podrían ser: a- fluidos magmáticos, b- aguas meteóricas, c- fluidos generados por metamorfismo de carga y d- agua de mar. Estos fluidos, independiente del valor de la razón isotópica que tengan desde su fuente, pueden haber sido modificados de acuerdo al tipo de roca con que interactuaron durante su recorrido o debido a posibles mezclas con otro tipo de fluido.

El estudio de isótopos de Sr, aplicados en minerales de ganga que no poseen Rb en su retículo cristalino, como en el caso de las calcitas, han demostrado ser útiles para obtener la razón inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de los fluidos mineralizadores, debido a que la composición isotópica de Sr no se alteró, o experimentó cambios menores desde su formación hasta hoy día (Kessen *et al.*, 1981).

Las razones iniciales $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ permiten restringir las posibles fuentes de los fluidos que dieron origen a la mineralización de mena. Los posibles fluidos participantes serían: magmáticos asociados al emplazamiento de la Formación La Negra, que presentan valores de $0,7031 \pm 0,0002$, y los asociados a los

plutones graníticos, que intruyen la Formación La Negra y que presentan valores entre $0,7033 \pm 0,0001$ y $0,7041 \pm 0,0005$ (Rogers, 1985). Las rocas de la SVMB presentan valores de $0,7052 \pm 0,0001$ para las 'no alteradas' (NK) y $0,7056 \pm 0,0001$ para las que presentan alteración sódica (ANa).

Las razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de calcitas asociadas a la mineralización de mena presentan valores de 0,7056, que representan la razón inicial de los fluidos que precipitaron los carbonatos durante la mineralización. Esto significa que los fluidos que dieron origen a la mineralización en Mantos Blancos, no pueden explicarse como provenientes sólo de soluciones magmáticas, sino que han tenido una evolución producto de mezcla con fluidos de distintos orígenes, que probablemente sean meteóricas, y/o de la interacción que han experimentado las soluciones con las rocas de caja durante su camino previo a la mineralización en el yacimiento de Mantos Blancos.

Tassinari *et al.* (1990) mostraron que la relación entre la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en soluciones hidrotermales debido a procesos de interacción agua - roca, reflejan la composición isotópica de las rocas de caja con que interactuó al momento de la cristalización. En este sentido, se calculó la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la Formación La Negra hace 150 Ma atrás, para comparar-

lo con la razón inicial que presentan las rocas mineralizadas, obteniéndose un valor de 0,7041, que es más bajo que la razón de las calcitas y las rocas alteradas. En resumen, para explicar la razón inicial de las rocas y minerales asociados a la mineralización de mena es necesario que los fluidos se hayan mezclado con otros fluidos con razones isotópicas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mayores que los asociados al volcanismo durante el emplazamiento de la Formación La Negra, y también mayores que los asociados al plutonismo que afecta a la Formación La Negra.

Chávez (1985), basado en los estudios paleogeográficos de Frutos y Tobar (1973), propuso que el agua de mar sería el responsable de la albitización y cloritización en el yacimiento, y a que la litoestratigrafía de la mina sugiere que Mantos Blancos estuvo al o cerca del nivel del mar mientras se producía el volcanismo. Posteriormente, Chávez (1986) propuso que la mineralización habría estado relacionada con los con los intrusivos subvolcánicos y/o, alternativamente, con los fluidos generados durante el metamorfismo de carga de la SVMB. Sin embargo, las razones isotópicas de las calcitas presentan

valores menores que el valor de agua de mar dado para el Jurásico, que sería de ca. 0,7078 (Burke *et al.*, 1982), lo cual no impide la participación de agua de mar, pero indica que su influencia sería menor. Estudios de isótopos de C en calcitas no favorecen la hipótesis de agua de mar (Munizaga *et al.* en prep.)

La naturaleza de los fluidos mineralizantes es sugerida por la composición isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ inicial de las rocas alteradas hidrotermalmente. La razón inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la isócrona de rocas alteradas ANa, que correspondería a la edad de la mineralización, es de $0,7056 \pm 0,0001$, valor que coincide con el obtenido en las calcitas asociadas a la mineralización que presentan razones de $0,7057 \pm 0,0001$ y $0,7059 \pm 0,0001$. Si se acepta que los valores obtenidos en las calcitas representan la composición isotópica de Sr en el momento de la cristalización (calcita fase mineralógica que no contiene Rb), se puede concluir que los fluidos hidrotermales se homogeneizarán, isotópicamente, con las rocas de caja al momento de producirse la mineralización durante el proceso hidrotermal.

CONCLUSIONES

La edad del emplazamiento de la secuencia informal volcánica de Mantos Blancos, estaría representada por la edad de 175 Ma de las rocas 'no alteradas' NK, y que analíticamente sería la misma para las rocas de la Formación La Negra. Esta edad podría llegar a 190 Ma si se considera la edad Rb-Sr modelo de esas rocas al considerar una razón inicial semejante a la de la Formación La Negra.

Los intrusivos que rodean la SVMB presentan edades entre 147 y 149 Ma y son semejantes a los diques que aparecen dentro de la mina que tienen edades de $147-149 \pm 13$ Ma, y que se supone relacionados genéticamente con los intrusivos periféricos de acuerdo a lo sugerido por Chávez (1985).

Los intrusivos produjeron un efecto térmico que estaría relacionado con los procesos de alteración hidrotermal que afectan el yacimiento de Mantos Blancos. La isócrona roca total Rb-Sr obtenida en las rocas con alteración sódica, entrega una edad de 150 Ma, y los 140 Ma obtenidos para la edad de la mineralización según el método de Ruiz *et al.* (1984).

Ambas edades son similares a la edad del evento térmico generalizado producido por los granitoides que intruyen claramente la Formación La Negra y que estarían produciendo el mismo evento térmico en la SVMB. Esto es también concordante con las edades de 146 ± 2 Ma, Ar-Ar gas total, de las albitas de Mantos Blancos obtenidas por Munizaga *et al.* (1991).

Se concluye, entonces, que el yacimiento de Mantos Blancos se habría formado a partir de una mezcla de fluidos que interactuaron con las secuencias volcánicas que conforman las rocas de caja.

Con estos resultados, sólo se puede afirmar que la actual distribución y concentración de Cu, en el yacimiento de Mantos Blancos, se habría generado alrededor de los 150 Ma. Sin embargo, los datos isotópicos presentados no permiten excluir la existencia previa de una concentración anómala de cobre que pudo haber estado relacionada con el emplazamiento de la SVMB.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución al proyecto PIGG No. 342 'Age and Isotopes of South American Ores'. Los autores agradecen al personal del Centro de Pesquisas Geocronológicas de San Pablo, Brasil, por la ayuda recibida durante el análisis de las muestras. A los colegas de Mantos Blancos, Jorge Pizarro, Andrés Molina, por su ayuda en la recolección de las muestras; a Marcos Zentilli (Universidad de Dalhousie, Canadá) por sus importantes sugerencias y motivación para escribir este trabajo, a V.

Maksaev (Servicio Nacional Geología y Minería), A. Puig (Corporación Nacional del Cobre de Chile, Santiago); K. Kawashita (Instituto de Geociencias de San Pablo) y R. Sillitoe, quienes hicieron valiosas sugerencias que fueron incorporadas al texto. Esta investigación fue financiada por el proyecto FONDECYT No. 1240-91 y el Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Brasil).

REFERENCIAS

- Boric, R.; Díaz, F.; Maksaev, V. 1990. Geología y yacimientos metalíferos de la Región de Antofagasta. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín*, No. 40, 246 p.
- Brooks, C.; Hart S. R.; Wendt, I. 1972. Realistic use of two-error regression treatment as applied to Rb-Sr data. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol. 10, No. 2, p. 551-577.
- Burke, W.H.; Deninson, R.E.; Hetherington, E.A.; Koepnick, R.B.; Nelson, H.F.; Otto, J.B. 1982. Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time. *Geology*, Vol. 10, p. 516-519.
- Chávez, W. 1985. Geological setting and the nature and distribution of disseminated copper mineralization of the Mantos Blancos District, Antofagasta Province, Chile. Ph.D. Thesis (Unpublished), *University of California*, 142 p. Berkeley.
- Chávez, W. 1986. Geologic characteristic of volcanic hosted 'Manto-Type' Cu(-Ag) deposit, Coastal Range, Northern Chile: the Mantos Blancos District as a type example. *Geological Society of America, Annual Meeting, Abstracts with Programs*, p. 563.
- Chong, G. 1973. Reconocimiento geológico del área de Catalina, Sierra de Varas y estratigrafía del Jurásico del Profeta. Memoria de Título (Inédito), *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, 294 p.
- Chong, G.; Cecioni, A. 1976. Presencia de una secuencia marina de probable edad paleozoica en la Provincia de Antofagasta. *Congreso Geológico Chileno, No. 1, Actas*, Vol. 1, p. A11-A20, Santiago.
- Dodson, M.H. 1982. On spurious correlations in Rb-Sr isochron diagrams. *Lithos*, Vol. 15, p. 215-219.
- Faure, G.; Powell, J.L. 1972. Strontium isotope Geology. *Springer Verlag*, 188 p.
- Ferraris, F.; Di Biase, F. 1978. Hoja Antofagasta, Región de Antofagasta. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile*, No. 30, 48 p.
- Frutos, J.; Tobar, A. 1973. Evolution of the Southwestern continental margin of South America. *Gondwana Symposium*, p. 565-578. Canberra.
- García, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. In *Seminario sobre el Geosinclinal Andino*, No. 3, *Sociedad Geológica de Chile*, 138 p. Santiago.
- Harrington, H. 1961. Geology of parts of Antofagasta and Atacama Provinces, Northern Chile. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, No. 45, p. 169-197.
- Kawashita, K. 1972. O método Rb-Sr em rochas sedimentares. Aplicación para as bacias do Paraná e Amazonas. Tese de Doutorado (No publicado), *Universidade de Sao Paulo*, 111 p.
- Kessen, K.M.; Woodruff, M.S.; Grant, N.K. 1981. Gangue mineral $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios and the origin of Mississippi Valley-type mineralization. *Economic Geology*, Vol. 76, p. 913-920.
- Kullerød, L. 1991. On the calculations of isochrons. *Chemical Geology (Isotope geoscience section)*, Vol. 87, p. 115-124.
- Maksaev, V. 1990. Metallogeny, geological evolution, and thermochronology of the Chilean Andes between latitudes 21 and 26 South and the origin of major porphyry copper deposits. Ph.D. Thesis (Unpublished), *Dalhousie University*, 554 p. Canadá.
- Maksaev, V.; Boric, R.; Zentilli, M.; Reynolds, P.H. 1988. Significado metalogénico de dataciones K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y trazas de fisión de zonas mineralizadas en el norte grande de Chile. In *Congreso Geológico Chileno, No. 5, Actas*, Vol. 1, p. B65-B86. Santiago.
- Munizaga, F.; Holmgren, C.; Huete, C.; Kawashita, K. 1988. Geocronología de los yacimientos de cobre El Soldado y Lo Aguirre, Chile Central. In *Congreso Geológico Chileno, No. 5, Actas*, Vol. 3, p. G177-G193. Santiago.
- Munizaga, F.; Ramírez, R.; Drake, R.; Tassinari, C.; Zentilli, M. 1991. Nuevos antecedentes geocronológicos del

- yacimiento Mantos Blancos, Región de Antofagasta, Chile. Resumen expandido. *In Congreso Geológico de Chile, No. 6, Actas, Vol. 1, p. 221-224.* Viña del Mar.
- Muñoz, N.; Venegas, R.; Téllez, C. 1988. La Formación La Negra: nuevos antecedentes estratigráficos en la Cordillera de la Costa de Antofagasta. *In Congreso Geológico Chileno, No. 5, Actas, Vol. 1, p. A283-A311.* Santiago.
- Ramírez, R. 1991. Diseño, desarrollo e implementación del sistema computacional para el manejo de datos geológicos en el yacimiento de Mantos Blancos. Memoria de Título (Inédito), *Universidad de Chile, Departamento de Geología, 275 p.*
- Rogers, G. 1985. A geochemical traverse across the North Chilean Andes. Ph.D. Thesis (Unpublished), *The Open University, 333 p.*
- Ruiz, J.; Jones L.M.; Kelly, W.C. 1984. Rubidium - Strontium dating of cres deposits hosted by Rb-rich rocks using calcite and other common Sr-bearing minerals. *Geology, Vol. 12, p. 259-262.*
- Steiger, R.H.; Jaeger, E. 1977. Subcommission on geochronology IUGS: Convention on the use of decay constant in geo and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters, Vol. 36, No. 3, p. 359-367.*
- Tassinari, C.G.; Lahren, A.; Munizaga, F.; Sato, K.; Mori, P.E. 1990. Srisotopic composition in fluid-rock systems in El Tatio and Puchuldiza Geothermal fields, Northern Chile. Abstract Volume. *In International Conference on Geochronology, No. 7, Cosmochronology and Isotope Geology, Canberra, p. 99.*
- Tobar, A. 1966. Estratigrafía del área Baquedano-Rencoret, Provincia de Antofagasta. Memoria de Título (Inédito), *Universidad de Chile, Departamento de Geología, 69 p.*
- Venegas, R.; Munizaga, F.; Tassinari, C. 1991. Los yacimientos de Cu-Ag del Distrito de Carolina de Michilla, Región de Antofagasta, Chile: nuevos antecedentes geocronológicos. *In Congreso Geológico Chileno, No. 6, Actas, Vol. 1, p. 452-455.* Viña del Mar.
- Williamson, J.H. 1968. Least-squares fitting of a straight line. *Canadian Journal of Physics, Vol. 46, p. 1845-1847.*