

GEOCRONOLOGIA Y EVOLUCION DEL BATOLITO VICUÑA MACKENNA, CORDILLERA DE LA COSTA, SUR DE ANTOFAGASTA (24-25°S)

MIGUEL HERVE
NICOLAS MARINOVIC

Servicio Nacional de Geología y Minería, Casilla 10465, Santiago, Chile

RESUMEN

El análisis de las características geológicas y geocronológicas del Batolito Vicuña Mackenna, en la Cordillera de la Costa, al sur de Antofagasta, por los métodos K-Ar y Rb-Sr, permite definir seis eventos de intrusión en el Mesozoico medio-superior (192-98 Ma). Las unidades plutónicas producto de los diferentes eventos intrusivos, son: Unidad Barazarte (192-181 Ma); Unidad Paranal (ca. 170 Ma); Unidad Blanco Encalada (160 Ma); Unidad Ventarrones (149-138 Ma); Unidad Remiendos (133-128 Ma); y Unidad Herradura (108-98 Ma). Los gabros de la Unidad Paranal ocupan la mayor parte de la superficie actual del batolito, formando una franja de por lo menos 60 km de ancho. La Unidad Blanco Encalada se emplazó en la zona occidental de esta franja, mientras que las unidades posteriores lo hicieron sucesivamente hacia el este, siempre intruyendo a la Unidad Paranal. La repetición de eventos intrusivos en una misma posición explica los extensos fenómenos de rejuvenecimiento térmico, detectables en el Batolito Vicuña Mackenna. Rocas plutónicas del Cretácico Inferior (Unidad Remiendos; 133-128 Ma), intruyeron sintectónicamente con el movimiento transcurrente de la Zona de Falla Atacama, con la que tienen una estrecha relación espacial. El magmatismo anterior se considera de carácter pretectónico, mientras que el más joven sería postectónico, con relación al período de transcurrencia ya referido. Las razones iniciales $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ obtenidas en rocas de las diversas unidades plutónicas son bajas, con una media ponderada de $0,70344 \pm 0,00004$. No se ha logrado definir variaciones sistemáticas dentro de la evolución del arco magmático, razón por la cual se les asigna a todas un origen similar, en el manto superior, sin participación significativa de material cortical en su génesis.

Palabras claves: Arco magmático, Margen continental, Geocronología de plutones, Migración de focos, Rejuvenecimiento térmico, Mesozoico, Cordillera de la Costa, Norte de Chile

ABSTRACT

Six intrusive events have been identified during Middle to Upper Mesozoic time in the Coastal Cordillera south of Antofagasta, Northern Chile, by means of K-Ar and Rb-Sr geochronological studies, carried out during the geological survey of the area. The plutonic units, each due to a different intrusive event, are: Barazarte Unit (192-181 Ma); Paranal Unit (ca. 170 Ma); Blanco Encalada Unit (160 Ma); Ventarrones Unit (149-138 Ma); Remiendos Unit (133-128 Ma); and Herradura Unit (108-98 Ma). The Paranal Unit gabbros covered most of the present area of the batholith, in a strip at least 60 km wide. The Blanco Encalada Unit was emplaced into the western zone of the strip and the younger plutons successively intruded to the east, always within the Paranal Unit rocks. The repetition of intrusive events in the same position explain the widespread thermal resetting processes that occurred in the Vicuña Mackenna Batholith. Lower Cretaceous plutonic rocks (Remiendos Unit; 133-128 Ma), were emplaced syntectonically to the transcurrent activity in the Atacama Fault System, having a close spatial relationship with it. Previous magmatism is considered as pre-tectonic, while younger rocks are post-tectonic to this episode. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ initial ratios from the plutonic units are low, with a weighted mean of 0.70344 ± 0.00004 . No systematic variation has been detected in the geologic evolution of the arc, and all of them are thought to have a similar provenance, from the upper mantle, with no significant participation of cortical components in the magmas.

Key words: Magmatic arc, Continental margin, Pluton geochronology, Foci migration, Thermal resetting, Mesozoic, Cordillera de la Costa, Northern Chile.

INTRODUCCION

La Cordillera de la Costa, al sur de Antofagasta, entre los paralelos 24° y 25°S (Fig. 1), está formada, en su mayoría, por rocas plutónicas, emplazadas durante la evolución de un arco magmático en el Mesozoico. Se trata de plutonitas cuya composición mineralógica incluye desde gabros a granitos, con afinidades calcoalcalinas, que forman parte del Batolito Vicuña Mackenna, definido por Marinovic y Hervé (1988).

La región del presente estudio corresponde a la porción costera de la Hoja Aguas Blancas a escala 1:250.000 (Programa Carta Geológica de Chile del Servicio Nacional de Geología y Minería; Figs.1, 2). El levantamiento geológico del área se realizó como parte de este programa y en él se puso especial énfasis en el estudio de los diferentes tipos de rocas plutónicas y de sus relaciones de contacto. Junto a ello, se efectuó un muestreo sistemático de las rocas plutónicas con la finalidad de hacer dataciones radiométricas por el método K-Ar. Además, a través de ANDCHRON, proyecto conjunto entre el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, el British Geological Survey y el Servicio Nacional de Geología y Minería, se realizaron dataciones por el método Rb-Sr (Brook *et al.*, 1986). Se dispuso, también, de información inédita facilitada por los mismos autores.

Los únicos estudios geológicos regionales previos son los de Arabasz (1971) y Ferraris (1978), los que describen algunas de las rocas plutónicas e intentan establecer su cronología. La ausencia de rocas sedimentarias fosilíferas, en gran parte del área, así como la falta de edades radiométricas,

habían impedido, hasta la fecha, establecer la edad del plutonismo que caracteriza la zona.

El objetivo del presente estudio es establecer una cronología absoluta del plutonismo del Batolito Vicuña Mackenna, cuyas rocas afloran en la Cordillera de la Costa al sur de Antofagasta. Con este fin se presenta aquí toda la información cronológica obtenida, la que se distribuye en las distintas unidades plutónicas y se interpretan sus edades sobre la base de las observaciones de terreno. Se presentan, también, algunas ideas respecto a las características y evolución del magmatismo en cuanto a su fuente de origen, su relación con la Zona de Falla Atacama y la migración de los focos de intrusión a través del tiempo.

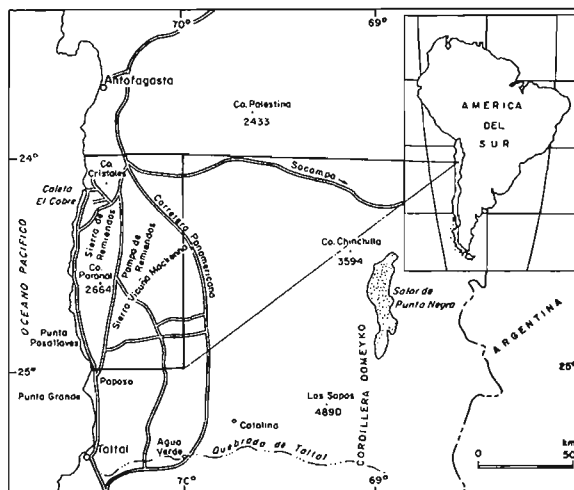


FIG. 1. Mapa de ubicación.

MÉTODOS ANALÍTICOS

K-Ar

Los análisis K-Ar se realizaron en el Laboratorio de Geocronología del Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Los minerales analizados, normalmente en una fracción entre 40 y 60 mallas, se concentraron con técnicas convencionales, utilizando bromoformo como líquido pesado.

La extracción de Ar se realizó en mesas de vidrio pyrex, y su volumen fue determinado usando las técnicas normales de Dilución Isotópica. El trazador, enriquecido en ^{36}Ar , fue incorporado al sistema mediante pipeta; el gas se purificó a través de

reacciones en hornos de cobre y titanio, y fue recolectado en ampollas de vidrio. Posteriormente, fue expandido y las razones $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ y $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ leídas en condiciones estáticas, en un espectrómetro de masas AEI, modelo MS-10S, con lectura digital automática adaptada.

El análisis químico del potasio se llevó a cabo en triplicado, utilizando un espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin Elmer 4.000, en su modo de emisión, con estándar interno de litio, en el Laboratorio Químico del SERNAGEOMIN.

Todas las edades se citan con un error calcula-

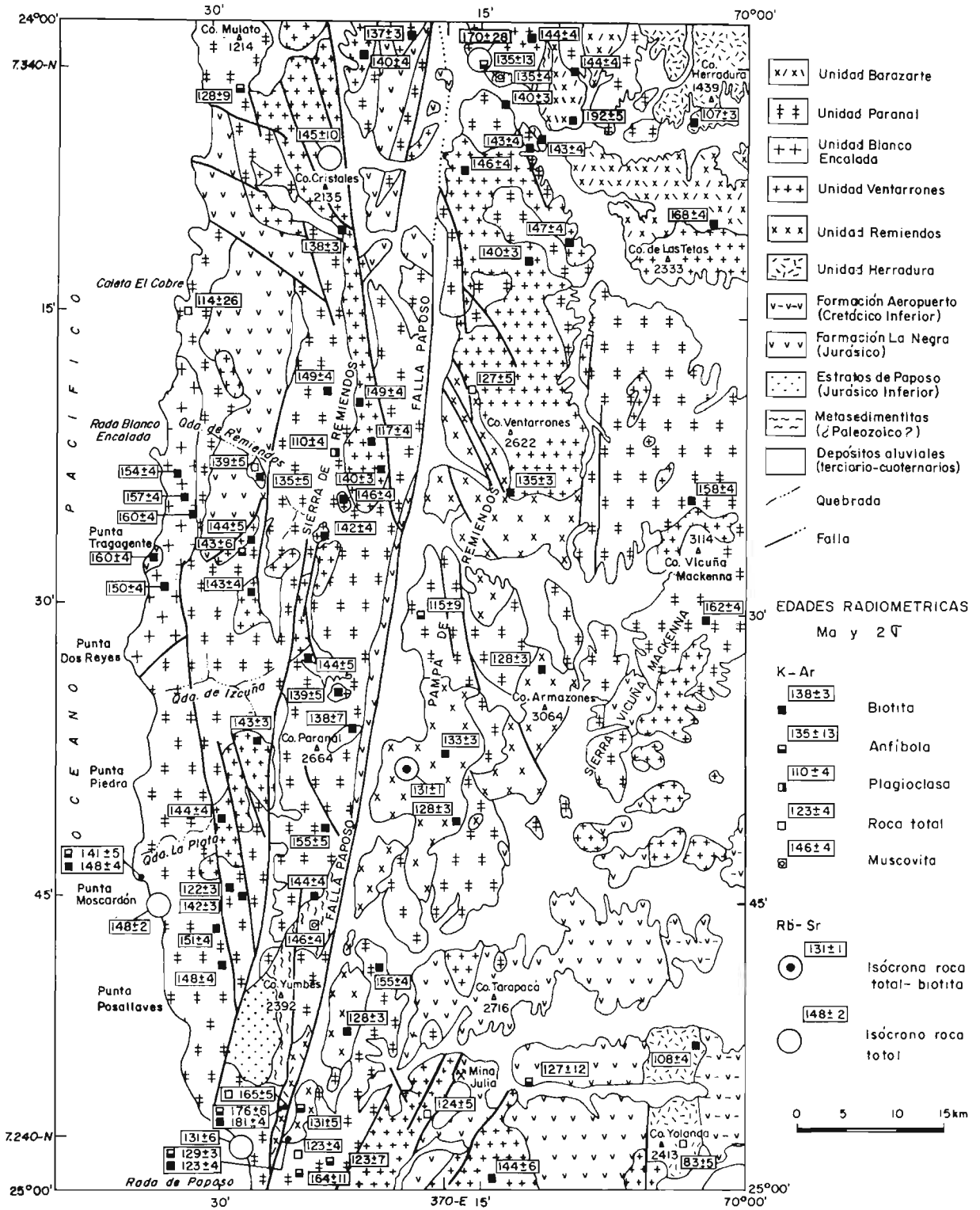


FIG. 2. Mapa geológico esquemático mostrando las principales unidades de rocas plutónicas y estratificadas.

do para un nivel de confianza de 2σ . Las constantes usadas son las recomendadas por Steiger y Jäger (1977; $\lambda_{\epsilon} = 0,581 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$; $\lambda_{\beta} = 4,96 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ y $^{40}\text{K}/\text{K}_{\text{total}} = 0,01167$).

Rb-Sr

Todas las muestras fueron analizadas por M. Brook en los Laboratorios del British Geological Survey, en Londres, según los procedimientos descritos en Brook *et al.*, 1986. Los resultados analíticos provienen de dichos autores y de M. Brook (comun. escrita, 1985), siendo algunos de ellos reinterpretados en este trabajo.

El muestreo para los análisis en roca total se hizo sobre la base de material fresco (entre 5 y 10

kg por muestra), sin superficies de alteración ni meteorización. Todas las muestras para una isócrona se recolectaron en afloramientos del mismo plutón, distantes no más de algunos centenares de metros entre sí.

Se consideran 'isócronas' aquellas rectas de regresión, con una MSWD (Mean Standard Weighted Deviation) < 2 . Una 'errorcrona' es aquella con una dispersión mayor, en la cual el error analítico obtenido se amplifica por la raíz cuadrada del MSWD respectivo. Las edades están citadas con errores calculados para un nivel de confianza de 2σ . La constante $\lambda^{87}\text{Rb}$ es $1,42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$.

La escala del tiempo geológico utilizada en este trabajo es la de Harland *et al.* (1982).

ROCAS PLUTONICAS

Constituyen la mayor parte de los afloramientos de la zona de estudio (Ferraris, 1978; Hervé *et al.*, 1985; Marinovic y Hervé, 1988). Sus relaciones de contacto con rocas estratificadas son escasas y

no permiten establecer su cronología relativa. Intruyen a rocas metasedimentarias de probable edad paleozoica, a los Estratos de Paposo del Jurásico Inferior (Ferraris, 1978), a la Formación La Ne-

TABLA 1. CUADRO RESUMEN. CARACTERISTICAS DE LAS UNIDADES INTRUSIVAS

Unidad Plutónica	Litología	Relaciones de Contacto	Edad de Cristalización; Razones Iniciales $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Unidad Barazarte	Granodioritas	Contactos tectónicos	Jurásico Inferior (192-181 Ma)
Unidad Paranal	Gabros, gabronoritas, dioritas. Variedades monzoníticas y cuarcíferas	Intruyen a rocas de la Formación La Negra, intruidos por plutones más jóvenes	Jurásico Medio (ζ Inferior?) (ca. 170 Ma); 0,70325; 0,70375
Unidad Blanco Encalada	Granodioritas y dioritas cuarcíferas	Intruyen a lavas de la Formación La Negra y a la Unidad Paranal	Jurásico Medio (160 Ma)
Unidad Ventarrones	Granodioritas y dioritas cuarcíferas	Intruyen a la Unidad Paranal y a rocas de la Formación La Negra	Jurásico Superior-Cretácico Inferior (149-138 Ma); 0,70326; 0,70339
Unidad Remiendos	Granodioritas, tonalitas, monzogranitos y monzodioritas cuarcíferas	Intruyen a la Unidad Paranal y a la Unidad Ventarrones	Cretácico Inferior bajo (133-128 Ma); 0,70338
Unidad Herradura	Dioritas, tonalitas, granodioritas y granitos	Intruyen a la Formación Aeropuerto y a la Unidad Paranal	Límite Cretácico Inferior-Superior (108-98 Ma)
Intrusivos menores	Filonés, pórfidos riolíticos, dacíticos y andesíticos	Intruyen a la Unidad Paranal	Cretácico Inferior (131-114 Ma); 0,70900 en pórfido riolítico
Diques	Diques andesíticos	Intruyen a todas las unidades	Cretácico (127-83 Ma)

gra del Jurásico (García, 1967) y a rocas de la Formación Aeropuerto del Cretácico Inferior (Ulriksen, 1979; Naranjo y Puig, 1984; Fig. 2).

En la zona, el Batolito Vicuña Mackenna está formado por seis unidades plutónicas (Fig. 2, Tabla 1) definidas sobre la base de sus relaciones de contacto, petrografía, distribución areal y edad (Marinovic y Hervé, 1988). Se trata de plutones con características epizonales, con excepción de aquéllos de la Unidad Paranal, los que pudieron haberse emplazado a mayor profundidad. A continuación, se describen, brevemente, estas unidades, se indican las dataciones efectuadas en ellas y se establecen sus "edades de cristalización"*, cuando ello es posible.

UNIDAD BARAZARTE

Está constituida, principalmente, por granodioritas de biotita (según la clasificación de Streckeisen, 1976) de grano medio a muy grueso, con algunas variedades tonalíticas y graníticas (Marinovic y Hervé, 1988; Fig. 2, Tabla 1). Sus contactos son exclusivamente tectónicos lo que no permite establecer su relación temporal con las rocas circundantes. El mineral ferromagnesiano más abundante es la biotita, la que, ocasionalmente, se presenta cloritizada. La hornblenda es escasa y está siempre subordinada a la biotita.

Geocronología. Se realizaron tres dataciones K-Ar en biotita y dos en un par mineral biotita-hornblenda, las que se distribuyen en el intervalo entre los 192 y los 165 Ma (Tabla 2, Fig. 2). Las edades

más antiguas, de 192 Ma en biotita y de 181/176 Ma en el par mineral, se interpretan como cercanas a los eventos de cristalización y emplazamiento, lo que habría ocurrido en el Jurásico Inferior-Medio. En efecto, si la muestra en la que se dató el par mineral hubiese sido afectada por un evento térmico posterior a su cristalización, los efectos de aquél se verían reflejados, al menos, en el rejuvenecimiento de la biotita, fenómeno no registrado. Estas edades más antiguas son, estadísticamente, discordantes entre sí, y se obtuvieron en localidades situadas a unos 90 km de distancia. Se desconoce el significado geológico de las edades más jóvenes (168 y 165 Ma), las que pueden corresponder a edades rejuvenecidas total o parcialmente así como a edades mínimas de cristalización.

UNIDAD PARANAL

Constituida por gabroides, incluye gabronoritas, gabros y dioritas con sus variedades monzoníticas (clasificación de Streckeisen, 1976), y corresponde a la unidad con mayor distribución areal en la zona de este estudio aflorando en una franja de al menos 60 km de ancho (Marinovic y Hervé, 1988; Fig. 2). Intruyen, a rocas metasedimentarias asignadas al Paleozoico, a sedimentitas marinas del Jurásico Inferior (Estratos de Paposo) y a rocas volcánico-sedimentarias de edad jurásica (Formación La Negra).

De acuerdo con observaciones de las diferentes asociaciones mineralógicas, la Unidad Paranal está formada por cuatro tipos litológicos principa-

TABLA 2. EDADES RADIOMETRICAS K-Ar DE LA UNIDAD BARAZARTE

Número Muestra	Coordenadas UTM	Tipo Litológico	Material	% K	Vol. ⁴⁰ Ar rad.(nl/g)	%Ar Atm.	Edad y Error Ma ± 2 σ
MO-925	7336,2/380,9	Granodiorita	Biotita	5,575	43,958	12	192 ± 5
MAB-12A	7241,9/355,3	Granodiorita	Biotita	5,769	42,653	11	181 ± 4
			Anfíbola	1,735	12,478	25	176 ± 6
MAB-376	7327,2/395,2	Granodiorita	Biotita	6,658	45,450	14	168 ± 4
MAB-12	7242,1/355,3	Granodiorita	Biotita	5,118	34,345	27	165 ± 5

* El término "edad de cristalización" se utiliza en este trabajo en el sentido descrito por Krummenacher (1975) (caso 1, p. 763). Se estima que, aunque se trata de edades de enfriamiento, el proceso de cristalización/emplazamiento/enfriamiento de los plutones por debajo de la temperatura de retención, se realizó en el lapso indicado en el error experimental de la edad, debido al carácter epizonal de los plutones.

les (Marinovic y Hervé, 1988; Cornejo, P.*):

Gabros y gabronoritas:

Pl, Cpx, Opx, con <5% de Hb, Cz y Ol

Monzogabros de dos piroxenos:

Pl, Cpx, Or, Cz y <5% de Opx, Bi y Hb

Dioritas y monzodioritas:

Pl, Cz, Hb, Bi, Or, con <5% de Cpx y Opx

Gabros y dioritas de hornblenda:

Pl, Hb, con <5% de Cpx y Bi

Geocronología. En muestras de la Unidad Paranal se determinaron 19 edades K-Ar en minerales y una isócrona Rb-Sr en roca total (Tabla 3). Se analiza a continuación la edad de los tipos litológicos principales de la unidad.

Gabros y gabronoritas. No se cuenta con edades radiométricas de estas rocas, ya que no ha sido posible obtener concentrados de minerales ricos en potasio para dataciones K-Ar, y la razón Rb/Sr en roca total es baja, entre 0,05 y 0,002, lo que ha impedido obtener buenos resultados por el método Rb-Sr. Algunas muestras han sido consideradas sólo para la obtención de razones iniciales $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Tabla 3).

Monzogabros de dos piroxenos. En rocas de esta litología se han obtenido tres edades K-Ar en biotita, distribuidas entre los 158 y 144 Ma (Tabla 3; Fig. 2). La edad de 144 Ma se considera como rejuvenecida por la intrusión de plutones de la Unidad Ventarrones (ver más adelante), que afloran en las cercanías (Fig. 2).

Dioritas y monzodioritas. Se cuenta con 12 edades K-Ar, 10 en biotita y 2 en anfíbola secundaria (Tabla 3). Las edades en biotita se distribuyen en el intervalo entre 162 y 138 Ma. Es difícil establecer el significado geológico de cada una de ellas, ya que casi todas cubren el lapso de intrusión de las rocas plutónicas más jóvenes emplazadas en los gabroides. Las edades más antiguas, entre 162 y 151 Ma son edades mínimas, probablemente rejuvenecidas parcial o totalmente. Las edades en biotita del orden 150-140 Ma, se estiman como rejuvenecidas por la intrusión de los plutones de la Unidad Ventarrones. La más joven, de 123 Ma en anfí-

bola secundaria (pseudomorfa de clinopiroxeno), indica procesos de anfibolitización, probablemente relacionados con la intrusión de plutones de la Unidad Remiendos o de pórfidos riolíticos (ver más adelante) (Fig. 2).

Una isócrona Rb-Sr en roca total de cuatro muestras dioríticas, indica una edad de 170 ± 28 Ma, con una razón inicial de 0,70315 (Fig. 3, Tabla 3). El error alto, de un 16%, se debe al poco enriquecimiento de ^{87}Sr radiogénico más que a una dispersión de los puntos, la que es escasa (MSWD = 0,0). Se sugiere así, que el sistema isotópico Rb-Sr ha permanecido cerrado con posterioridad a la cristalización de la roca. De esta forma, puede considerarse como una edad de cristalización, aunque de escaso valor cronológico, debido al error. Dos edades K-Ar en minerales de muestras de la isócrona indican edades de 135 Ma en anfíbola y de 138 Ma en biotita. Se consideran edades rejuvenecidas por el efecto térmico de la intrusión de rocas de la Unidad Ventarrones (150-140 Ma), aunque una de ellas es estadísticamente concordante con la edad obtenida en la isócrona Rb-Sr en roca total (135 ± 13 y 170 ± 28 Ma).

Gabros y dioritas de hornblenda. En estas rocas se han obtenido cuatro edades K-Ar, dos en hornblenda y dos en un par mineral biotita-hornblenda, que se distribuyen entre los 148 y 115 Ma (Tabla 3). Estas se consideran como edades rejuvenecidas por los mismos eventos mencionados

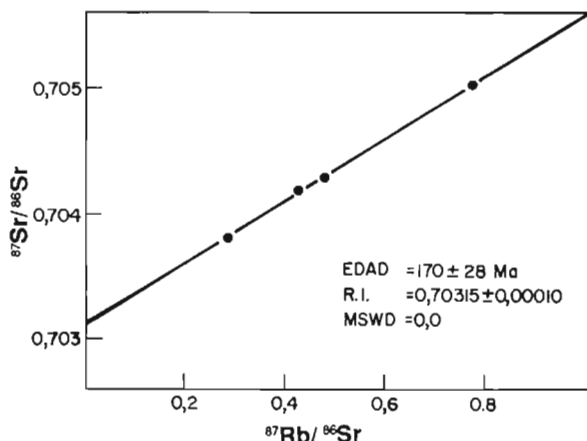


FIG. 3. Isócrona roca total, Unidad Paranal.

*1987: Gabros de la costa de Papos. Características petrográficas y geoquímicas. Proyecto Título II. Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica. Inédito. 28 p. En Archivo del Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago.

TABLA 3. EDADES RADIOMETRICAS Y RESULTADOS ANALITICOS K-Ar Y Rb-Sr DE LA UNIDAD PARANAL

K-Ar

Número Muestra	Coordenadas UTM	Tipo Litológico	Material	% K	Vol. ⁴⁰ Ar rad.(nl/g)	%Ar Atm.	Edad y Error Ma ± 2 σ
Monzogabros de Dos Piroxenos							
MAB-220	7300,6/393,4	Monzodiorita cuarcífera	Biotita	6,989	44,984	15	158 ± 4
HAB-518	7268,9/359,2	Leucogabro	Biotita	5,944	37,339	14	155 ± 4
HAB-134	7262,9/358,4	Monzogabro	Biotita	5,202	30,411	29	144 ± 4
Dioritas y Monzodioritas							
MAB-601	7288,3/395,5	Granodiorita	Biotita	6,626	43,622	14	162 ± 4
HAB-586	7256,1/364,0	Diorita cuarcífera	Biotita	3,219	20,222	21	155 ± 4
HAB-613	7258,5/348,9	Monzodiorita	Biotita	7,055	43,067	11	151 ± 4
HAB-769	7310,6/358,8	Diorita cuarcífera	Biotita	6,415	38,795	15	149 ± 4
HAB-617	7256,1/349,7	Monzodiorita cuarcífera	Biotita	5,404	32,296	23	148 ± 4
MAB-341A	7342,0/383,1	Monzodiorita	Biotita	7,603	44,336	20	144 ± 4
HAB-412	7286,1/357,6	Gabro cuarcífero	Biotita	3,736	21,785	26	144 ± 5
HAB-405	7333,6/370,7	Diorita cuarcífera	Biotita	7,367	42,565	15	143 ± 4
HAB-11A	7263,0/359,5	Diorita cuarcífera	Biotita	7,001	40,134	11	142 ± 3
MO-908*	7345,2/376,0	Monzodiorita cuarcífera	Biotita	7,607	42,490	14	138 ± 3
MO-911	7341,0/373,6	Diorita	Anfíbola sec.	0,504	2,751	67	135 ± 13
HAB-19A	7247,1/358,9	Monzogabro cuarcífero	Anfíbola sec.	0,633	3,159	47	123 ± 7
Gabros y Dioritas de Hornblenda							
HAB-10	7264,4/342,0	Gabro cuarcífero	Biotita	5,409	32,373	12	148 ± 4
			Anfíbola	0,546	3,105	31	141 ± 5
MO-912	7338,6/350,4	Gabro	Anfíbola	0,194	1,001	44	128 ± 9
HAB-209-B	7288,4/366,9	Gabro	Anfíbola sec.	0,283	1,312	62	115 ± 9
Veta Mina Mantos							
**FK-92R			Actinolita	0,145	0,969	59	164 ± 11

Rb-Sr (1)

Número Muestra	Coordenadas UTM	Tipo Litológico	Rb (ppm)	Sr (ppm)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Edad y Error Ma ± 2 σ
MO-908*	7345,2/376,0	Monzodiorita cuarcífera	72	483	0,4295	0,70420	
MO-911	7341,0/373,6	Diorita	60	606	0,2832	0,70383	
MO-909*	7345,2/376,0	Tonalita	75	448	0,4841	0,70431	170 ± 28
MO-902*	7344,0/373,0	Diorita	68	249	0,7833	0,70504	
							MSWD = 0,0
							Razón Inicial = 0,70315 ± 0,00010
Razones Iniciales							
MO-797	7260,0/342,8	Diorita			0,4392	0,70446	
MO-801	7260,0/342,8	Diorita			0,3309	0,70416	
MO-802	7260,0/342,8	Monzodiorita			0,2618	0,70433	
MO-803	7260,0/342,8	Diorita			0,0682	0,70395	
MO-804	7260,0/342,8	Diorita			0,2159	0,70373	
MO-805	7260,0/342,8	Gabronorita			0,3412	0,70398	
							MSWD = 0,1
							Razón Inicial = 0,70375 ± 0,00074

* Fuera del área.

** SERNAGEOMIN-MMAJ-JICA. 1986. Informe de estudios básicos sobre la exploración de recursos minerales del área al sur de Antofagasta. Fase 1. Inédito. 157 p. En Archivo del Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago.

(1) Material analizado: roca total.

más arriba.

Discusión. La edad de cristalización de la Unidad Paranal no queda definida con los análisis K-Ar, debido a que la unidad fue afectada por eventos térmicos relacionados con la intrusión de plutones más jóvenes. Las edades más antiguas (162 y 155 Ma; Tabla 3) pueden considerarse sólo como mínimas. Sin embargo, se cuenta con una edad de 164 Ma en actinolita proveniente de la ganga de Mina Mantos (veta de cobre de alta temperatura), emplazada en gabroides de la Unidad Paranal (SER-NAGEOMIN-MMAJ-JICA, 1986, *op. cit.*). Este valor, que corresponde a actividad hidrotermal tardimagmática, indica que la edad de cristalización de la unidad es más antigua. Algunas relaciones de contacto confirman esta situación. La Unidad Blanco Encalada (ver más adelante), con edad de cristalización estimada en 160 Ma, intruye a los gabroides.

Las isócronas Rb-Sr de la Unidad Paranal son de baja calidad y no son definitivas para la interpretación cronológica. La isócrona de 170 ± 28 Ma, en términos generales, avala los argumentos definidos por el análisis de las edades K-Ar, en el sentido que la edad de cristalización sería más antigua que 160/164 Ma.

La Unidad Paranal intruye a los Estratos de Paposo y a la Formación La Negra, con edades estimadas entre el Sinemuriano y el Jurásico Superior (Naranjo y Puig, 1984). Se estima que su cristalización tuvo lugar en el Jurásico Medio, aunque no se puede descartar una edad jurásica inferior.

Análisis Rb-Sr en roca total de gabros y gabronoritas, han sido considerados solamente para el estudio de razones en $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Tabla 3). Debido a los valores bajos de ^{87}Rb no es posible obtener una edad con significado geológico. Aún así, la dispersión de los puntos es escasa (MSWD = 0,1), por lo

que estadísticamente corresponde a una isócrona de 92 ± 208 Ma.

Esta 'edad' se debe a una razón Rb/Sr extremadamente baja de las muestras y no a que el sistema isotópico haya sido alterado. Se obtiene así una razón inicial de $0,70375 \pm 0,00074$, si se considera una pendiente más probable de ca. 170 Ma, la razón inicial es aún más baja.

La razón inicial de la isócrona de 170 ± 28 Ma en rocas dioríticas es 0,70315, valor concordante con 0,70375, obtenido en los gabros y gabronoritas. Estas razones iniciales son características de magmas provenientes directamente del manto, sin contaminación significativa de material cortical, de acuerdo con los criterios de Faure y Powell (1972) y Faure (1986).

UNIDAD BLANCO ENCALADA

La Unidad Blanco Encalada está constituida, principalmente, por granodioritas de biotita y hornblenda, que afloran en el sector costero, en los alrededores de Blanco Encalada (Marinovic y Hervé, 1988; Fig. 2). Al oriente, intruye a la Unidad Paranal y, probablemente, a lavas de la Formación La Negra. En el sector costero de Punta Tragagente (Fig. 2), afloran 'roof pendats' de lavas córneas asignadas a dicha formación.

Geocronología. Se realizaron cuatro dataciones K-Ar en biotita, que se distribuyen en el intervalo entre los 160 y 150 Ma (Tabla 4). Las más antiguas, de 157 y 160 Ma, se consideran como cercanas a la cristalización. Una biotita producto de metamorfismo de contacto en el 'roof pendant' ya mencionado, fue datada en 160 Ma (ver Tabla 8), lo que avala la edad de 160/157 Ma supuesta para la cristalización de la unidad, en el Jurásico Superior bajo.

TABLA 4. EDADES RADIOMETRICAS K-Ar DE LA UNIDAD BLANCO ENCALADA

Número Muestra	Coordenadas UTM	Tipo Litológico	Material	% K	Vol. ^{40}Ar rad.(nl/g)	%Ar Atm.	Edad y Error Ma $\pm 2 \sigma$
HAB-508A	7290,2/341,8	Granodiorita	Biotita	2,659	17,286	24	160 ± 4
HAB-507	7299,9/344,6	Diorita cuarcífera	Biotita	7,428	47,437	18	157 ± 4
HAB-243	7302,8/341,8	Granodiorita	Biotita	6,357	39,666	10	154 ± 4
HAB-650	7290,2/341,8	Granodiorita	Biotita	6,090	37,114	17	150 ± 4

TABLA 5a. EDADES RADIOMETRICAS K-Ar DE LA UNIDAD VENTARRONES

Número Muestra	Coordenadas UTM	Tipo Litológico	Material	% K	Vol. ⁴⁰ Ar rad.(nl/g)	%Ar Atm.	Edad y Error Ma ± 2 σ
Plutón Ventarrones							
MAB-430	7324,4/381,4	Monzogranito	Biotita	5,815	34,615	8	147 ± 4
MAB-333	7332,0/370,6	Monzogranito	Biotita	5,463	32,379	32	146 ± 4
MAB-608	7334,2/377,0	Granodiorita	Biotita	7,571	44,179	16	144 ± 4
MAB-606*	7347,0/373,5	Granodiorita	Biotita	6,135	35,420	24	143 ± 3
HAB-225A	7342,0/376,0	Tonalita	Biotita	7,478	42,439	8	140 ± 3
MAB-322	7343,0/361,0	Granodiorita	Biotita	6,985	39,554	10	140 ± 4
MAB-242	7322,4/378,1	Monzogranito	Biotita	7,029	39,640	15	140 ± 3
MAB-485A	7343,9/365,7	Granodiorita	Biotita	7,475	45,503	12	137 ± 3
MAB-271	7301,1/375,4	Monzogranito	Biotita	7,085	38,582	10	135 ± 3
Plutón Cristales							
HAB-464	7312,0/362,1	Monzodiorita cuarcífera	Biotita	6,577	39,669	20	149 ± 4
HAB-708	7299,9/360,5	Tonalita	Biotita	5,814	34,285	13	146 ± 3
HAB-1	7324,3/360,8	Monzodiorita cuarcífera	Biotita	7,342	40,789	11	138 ± 3
HAB-791	7305,2/363,4	Monzodiorita cuarcífera	Biotita	2,953	13,821	19	117 ± 4
Plutones No Individualizados							
MAB-505	7269,5/349,2	Granodiorita	Biotita	6,658	38,739	15	144 ± 4
HAB-707	7369,4/351,9	Sienogranito	Biotita	2,703	15,735	25	144 ± 5
HAB-604	7234,3/374,8	Monzodiorita	Biotita	2,056	12,014	25	144 ± 6
HAB-525	7275,5/353,1	Granodiorita	Biotita	7,376	42,567	11	143 ± 3
HAB-702	7295,9/351,2	Sienogranito	Anfíbola	0,829	4,813	41	143 ± 6
HAB-397	7290,9/351,7	Monzogranito	Biotita	5,567	32,137	30	143 ± 4
HAB-475	7297,9/358,2	Granodiorita	Biotita	6,265	35,937	17	142 ± 4
HAB-798	7302,7/364,0	Monzogranito	Biotita	5,636	31,965	16	140 ± 3
HAB-414	7281,2/359,6	Sienogranito	Biotita	2,902	16,330	32	139 ± 5
HAB-736	7276,4/361,6	Tonalita	Anfíbola	0,480	2,690	56	138 ± 7
HAB-937	7244,1/378,9	Diorita	Anfíbola	0,397	2,026	65	127 ± 12

* Fuera del área

UNIDAD VENTARRONES

Se ha agrupado bajo este nombre a una serie de plutones de diverso tamaño, que afloran en distintos lugares de la zona, al este de los afloramientos de la Unidad Blanco Encalada (Fig. 2). Entre ellos destacan los plutones Ventarrones, Cristales y los de Moscardón (Marinovic y Hervé, 1988; Fig. 2). Analizados en conjunto presentan características petrográficas similares, con una amplia mayoría de monzogranitos y granodioritas de biotita y anfíbola.

Las relaciones de contacto de las rocas de esta unidad, son similares, ya que la mayoría intruye a los gabroides de la Unidad Paranal. Están, a su vez, cortadas por la Unidad Remiendos.

Plutones de la Unidad Ventarrones están desplazadas sinistralmente por el sistema de Falla Izcuña, perteneciente a la Zona de Falla Atacama, indicando así el carácter pretectónico de estas rocas con respecto al movimiento transcurrente del Cretácico Inferior (Hervé, 1987b).

Geocronología. En muestras de la Unidad Ventarrones se determinaron 24 edades K-Ar en concentrados de minerales (21 en biotita y 3 en hornblenda; Tabla 5a) y dos isócronas Rb-Sr en roca

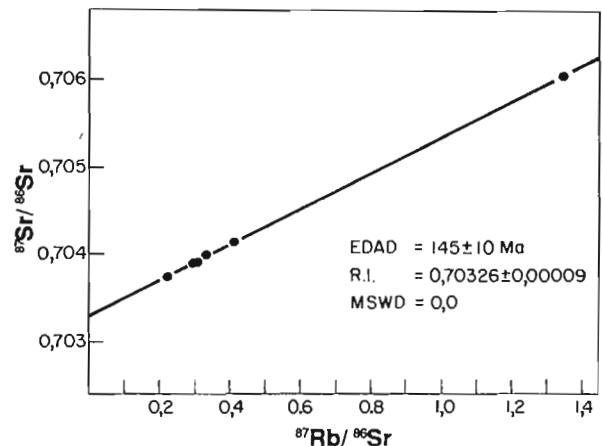


FIG. 4a. Isócrona roca total, Plutón Cristales.

TABLA 5b. EDADES RADIOMETRICAS Rb-Sr EN ROCA TOTAL DE LA UNIDAD VENTARRONES

Número Muestra	Coordenadas UTM	Tipo Litológico	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Edad y Error Ma $\pm 2\sigma$
Plutón Ventarrones							
MO-904*	7344,0/373,0	Granito	154	125	3,5688	0,71051	Ver isócrona general
MO-903*	7344,0/373,0	Granito	152	119	3,6549	0,71060	
MO-910	7340,8/373,8	Microgranito	130	101	3,7015	0,71063	
MO-905*	7345,2/376,0	Microgranito	131	99	3,8014	0,71127	
Plutón Cristales							
MO-918B	7331,1/359,8	Tonalita	38	482	0,2277	0,70373	145 \pm 10
MO-922	7331,1/359,8	Tonalita	48	455	0,3030	0,70389	
MO-918A	7331,1/359,8	Tonalita	49	450	0,3123	0,70389	
MO-921	7331,1/359,8	Monzodiorita cuarcífera	53	461	0,3321	0,70395	
MO-920	7331,1/359,8	Tonalita	63	427	0,4240	0,70414	
MO-923	7331,1/359,8	Monzodiorita cuarcífera	100	209	1,3771	0,70609	
Razón Inicial = 0,70326 \pm 0,00009							
Plutón Moscardón							
MO-800	7260,0/343,1	Tonalita			1,8290	0,70724	148 \pm 2
MO-798	7260,0/343,1	Monzogranito			6,9954	0,71812	
MO-799	7260,0/343,1	Monzogranito			9,8890	0,72420	
Razón Inicial = 0,70339 \pm 0,00009							MSWD = 0,1
Isócrona General							
Incluye:	4 Muestras Plutón Ventarrones						148 \pm 3
	5 Muestras Plutón Cristales						
	3 Muestras Plutón Moscardón						
Razón Inicial = 0,70321 \pm 0,00006							MSWD = 4,8

* Fuera del área

total (Tabla 5b). A continuación se analiza la edad de los plutones de los cuales se tiene información más completa.

Plutón Ventarrones. Nueve edades K-Ar en biotita, se distribuyen entre los 147 y 135 Ma (Tabla 5a). Las más antiguas se estiman como representativas de la edad de cristalización. Junto a ellas se efectuó el análisis Rb-Sr de cuatro muestras (Tabla 5b, Fig. 2), las cuales poseen razones

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ altas aunque escasa dispersión, razón por la cual no definen una isócrona con significado geológico.

Plutón Cristales. Se realizaron cuatro dataciones K-Ar en biotita (Tabla 5a, Fig. 2), tres de las cuales se distribuyen entre los 149 y 138 Ma. Una isócrona Rb-Sr con seis muestras en roca total (MSWD = 0,0) indica una edad de 145 \pm 10 Ma, con razón inicial de 0.70326 (Fig. 4a, Tabla 5b). Este

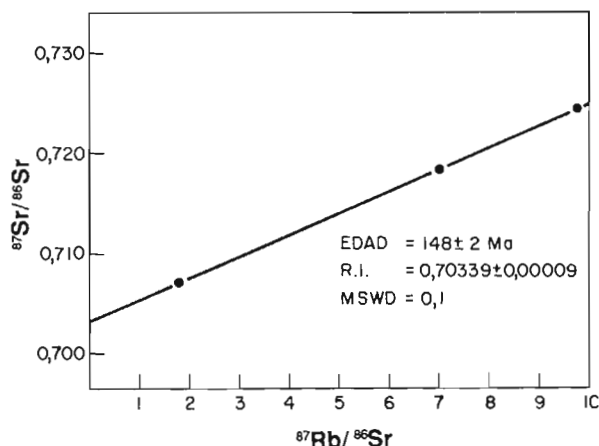


FIG. 4b. Isócrona roca total, Plutones Moscardón.

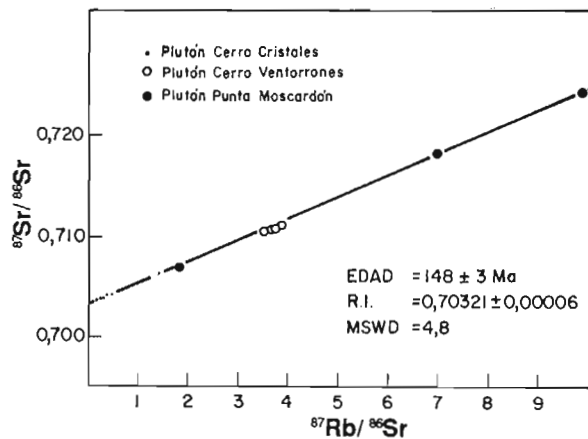


FIG. 4c. Isócrona general de la Unidad Ventarrones

TABLA 6. EDADES RADIOMETRICAS K-Ar Y Rb-Sr DE LA UNIDAD REMIENDOS

K-Ar

Número Muestra	Coordenadas UTM	Tipo Litológico	Material	% K	Vol. ⁴⁰ Ar rad.(nl/g)	%Ar Atm.	Edad y Error Ma ± 2σ
HAB-143	7273,6/370,5	Monzodiorita cuarcífera	Biotita	5,669	30,486	11	133 ± 3
MAB-9	7240,7/356,7	Tonalita	Anfibola	0,976	5,157	21	131 ± 5
HAB-16	7237,7/356,1	Tonalita	Biotita	5,188	26,869	14	129 ± 3
			Anfibola	1,294	6,399	36	123 ± 4
MAB-84	7248,3/360,5	Monzogranito	Biotita	6,604	34,099	14	128 ± 3
MAB-177	7284,1/379,7	Granodiorita	Biotita	6,918	35,642	16	128 ± 3
HAB-481A	7269,4/372,0	Granodiorita	Biotita	6,065	31,394	28	128 ± 3

Rb-Sr

Número Muestra	Coordenadas UTM	Tipo Litológico	Material	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Edad y Error Ma ± 2σ
MO-784	7273,8/365,9	Granodiorita	Roca total	0,3558	0,70400	131 ± 1
			Biotita	93,4041	0,87715	
MO-782	7273,8/365,9	Granodiorita	Roca total	0,5665	0,70447	MSWD = 0,3 Razón inicial = 0,70338 ± 0,00010
			Biotita	84,6594	0,86078	

valor es concordante con las tres edades K-Ar más antiguas, por lo cual se considera que la edad de cristalización del plutón se ubica en el límite Jurásico-Cretácico.

Plutones Moscardón. Corresponden a una serie de plutones de dimensiones reducidas, que intruyen a la Unidad Paranal en el sector de Punta Moscardón (Fig. 2). Con muestras de esos plutones se obtuvo una isócrona de tres puntos en roca total, con una edad de 148 ± 2 Ma (MSWD = 0,1) y una razón inicial de 0,70339 (Fig. 4b, Tabla 5b), la

cual se interpreta como edad de cristalización.

Discusión. Las edades K-Ar obtenidas en la Unidad Ventarrones, se distribuyen, mayoritariamente, en el intervalo 149-138 Ma, es decir, en el límite entre el Jurásico y Cretácico. La edad de 135 Ma, obtenida en las cercanías del contacto con rocas de la Unidad Remiendos, se considera como rejuvenecida parcialmente por la intrusión de esta última.

Las dos isócronas Rb-Sr son concordantes entre sí, con valores de 148 ± 2 y 145 ± 10 Ma respectivamente, estimándose que representan edades de cristalización.

El diagrama ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr versus ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr de la figura 4c muestra el análisis conjunto de las 13 muestras pertenecientes a la Unidad Ventarrones. El alineamiento de puntos genera una errorcrona (MSWD = 4,8) de 148 ± 3 Ma, con una razón inicial de 0,70321. Aunque este análisis no permite asegurar el carácter cogenético de los magmas de los diferentes plutones, posibilita, al menos, sugerir que los sistemas isotópicos tienen un origen y una evolución similar.

Las razones iniciales ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr obtenidas en las isócronas de esta unidad son semejantes: 0,70326 en el Plutón Cristales y 0,70339 en los plutones Moscardón. Estos valores bajos, son característicos de magmas provenientes del manto superior con escasa a nula contaminación cortical.

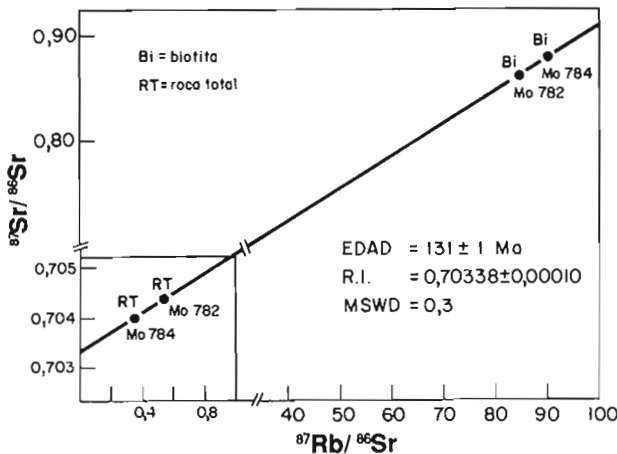


FIG. 5. Isócrona roca total y mineral (biotita), Unidad Remiendos.

TABLA 7. EDADES RADIOMETRICAS K-Ar DE LA UNIDAD HERRADURA

Número Muestra	Coordenadas UTM	Tipo Litológico	Material	% K	Vol. ^{40}Ar rad.(nl/g)	%Ar Atm.	Edad y Error Ma \pm 2 σ
HAB-266	7247,9/393,8	Diorita	Biotita	4,410	19,043	22	108 \pm 4
MAB-369	7336,4/393,1	Granodiorita	Biotita	7,355	31,619	22	107 \pm 3
MAB-698*	7334,0/401,7	Granodiorita	Biotita	6,318	25,328	22	100 \pm 3
MO-932*	7337,1/400,7	Monzodiorita cuarcífera	Biotita	7,285	28,473	29	98 \pm 3

* Fuera del área

UNIDAD REMIENDOS

Está formada por granodioritas de biotita y hornblenda, con algunas variedades tonalíticas y dioríticas, que afloran en una franja elongada en dirección norte-sur, adosadas al este de la Falla Paposo (Hervé, 1987a; Fig. 2). En las cercanías de la traza de la falla, las rocas se presentan intensamente foliadas y milonitizadas (Marinovic y Hervé, en prep.). Intruyen a las unidades Paranal y Ventarrones.

Geocronología. Siete edades K-Ar, cuatro en biotita, una en anfíbola y dos en un par mineral biotita-anfíbola, se distribuyen en el intervalo entre 133-123 Ma. Seis de las siete edades se agrupan entre los 133 y 128 Ma, con valores estadísticamente concordantes (Tabla 6) y se interpretan como representativos de la edad de cristalización de la unidad.

Los valores obtenidos del análisis Rb-Sr de 11 muestras de roca total, generan una isócrona (MSWD = 0,3) que indica una edad de 154 ± 26 Ma. Pese a la escasa dispersión que presentan los puntos, el error es alto debido al poco enriquecimiento en ^{87}Sr radiogénico que presenta el sistema. La razón inicial es de 0,70332. De dos muestras, cuyos análisis de roca total se utilizaron en la construcción de la isócrona, se concentraron biotitas, las que junto a sus respectivos análisis en roca total, se distribuyen en una isócrona roca total-biotita (MSWD = 0,3) con una edad de 131 ± 1 Ma (Tabla 6, Fig. 5). Esta es concordante con las edades K-Ar y se interpretan como la edad de cristalización, evento que tuvo lugar en el Cretácico Inferior, entre los 133 y 128 Ma.

La razón inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,70332, obtenida en la isócrona roca total, y 0,70338, de la isócrona roca total-biotita, son concordantes entre sí y corresponden a valores bajos, característicos de

magmas provenientes del manto superior, sin contaminación cortical significativa.

UNIDAD HERRADURA

La Unidad Herradura está constituida, principalmente, por granodioritas y granitos de biotita y anfíbola. Se exponen en los extremos suroriental y nororiental del área, donde intruyen a la Formación Aeropuerto del Cretácico Inferior y a la Unidad Paranal (Marinovic y Hervé, 1988; Fig. 2).

Geocronología. Cuatro dataciones K-Ar en concentrados de biotita se ubican entre los 108 y los 98 Ma (Tabla 7), es decir, en la parte media del Cretácico. Todas se interpretan como edades de enfriamiento cercanas a la cristalización.

CUERPOS INTRUSIVOS MENORES Y DIQUES

En la región estudiada afloran numerosos cuerpos intrusivos menores y diques, que, por sus dimensiones reducidas, escapan a la escala del ma-

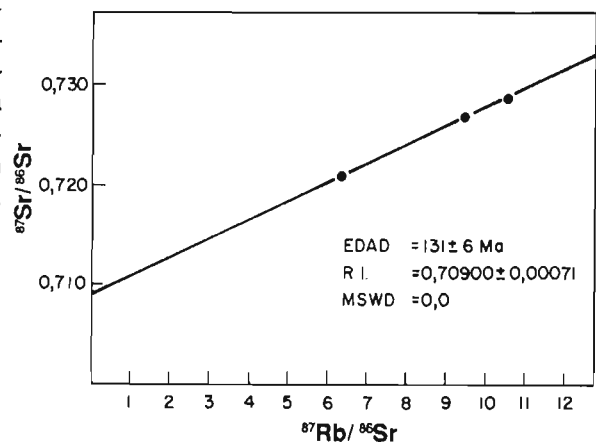


FIG. 6. Isócrona roca total, pórfidos riolíticos del norte de Paposo.

TABLA 8. EDADES RADIOMETRICAS K-Ar y Rb-Sr DE INTRUSIVOS MENORES Y DIQUES

K-Ar

Número Muestra	Coordenadas UTM	Tipo Litológico	Material	% K	Vol. ⁴⁰ Ar rad.(nl/g)	%Ar Atm.	Edad y Error Ma ± 2 σ
HAB-648B	7302,1/353,1	Monzogranito	Biotita	4,432	12,851	21	131 ± 5
HAB-11	7262,1/350,3	Leucomonzogranito	Biotita	4,218	20,612	22	122 ± 3
HAB-577B	7237,2/357,2	Pórfido dacítico	Roca total	4,908	24,294	28	123 ± 4
HAB-638	7317,2/346,0	Pórfido dacítico	Roca total	0,236	1,082	92	114 ± 26
MAB-590	7310,0/372,8	Dique diorítico	Roca total	1,278	6,534	53	127 ± 5
HAB-545	7241,2/369,8	Dique andesítico	Roca total	0,764	3,807	38	124 ± 5
HAB-808	7308,8/360,9	Dique andesítico	Plagioclasa	0,982	4,318	53	110 ± 4
HAB-878D	7239,7/392,3	Dique andesítico	Roca total	1,609	5,283	69	83 ± 5

Rb-Sr

Número Muestra	Coordenadas UTM	Tipo Litológico	Material	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Edad y Error Ma ± 2 σ
MO-794	7238,5/350,8	Pórfido riolítico	Roca total	6,3216	0,72073	131 ± 6 MSWD = 0,0 Razón Inicial = 0,70900 ± 0,00071
MO-795	7238,5/350,8	Pórfido riolítico	Roca total	9,5335	0,72670	
MO-796	7238,5/350,8	Pórfido riolítico	Roca total	10,5434	0,72856	

pa geológico de la figura 2. Corresponden principalmente a microgranitos, pórfidos riolíticos, dacíticos y andesíticos, y a numerosos diques andesíticos, aislados o en enjambres, espesor y orientación variables, que intruyen a la mayoría de las unidades de rocas plutónicas.

Geocronología. En afloramientos costeros de pórfidos riolíticos, ubicados unos 5 km al norte de Paposó, se obtuvo una isócrona Rb-Sr roca total de tres muestras, con una edad de 131 ± 6 Ma (MSWD = 0,0) y una razón inicial de 0,70900 (Tabla 8, Figs. 2, 6). La edad, cretácica inferior, se inter-

preta como de cristalización y la razón inicial, intermedia a alta, es característica de magmas en cuya génesis ha habido participación de material cortical.

Dos edades K-Ar en biotita de microgranitos indican 131 y 122 Ma (Tabla 8; Fig. 2). Dos pórfidos dacíticos han sido datados en roca total, con edades de 123 y 114 Ma. Cuatro análisis en roca total de diques andesíticos se distribuyen entre los 127 y 83 Ma. Todas estas edades K-Ar son del Cretácico Inferior, salvo la última, incluida en el Cretácico Superior bajo.

TABLA 9. EDADES RADIOMETRICAS K-Ar DE LAS ROCAS DE CAJA Y DE MILONITAS

Número Muestra	Coordenadas UTM	Tipo Litológico	Material	% K	Vol. ⁴⁰ Ar rad.(nl/g)	%Ar Atm.	Edad y Error Ma ± 2 σ
HAB-510	7294,2/342,2	Andesita córnea	Biotita	6,515	42,336	9	160 ± 4
HAB-125A	7260,1/358,1	Filita	Muscovita	6,022	35,674	25	146 ± 4
MAB-404	7334,0/377,1	Filita	Biotita	4,843	28,035	18	143 ± 4
MAB-401	7340,4/374,6	Filita	Muscovita	6,562	35,792	11	135 ± 4
Milonitas							
HAB-648A	7302,1/353,1	Pórfido andesítico milonitizado	Roca total	1,769	9,911	33	139 ± 5

**ROCAS DE CAJA DE LAS ROCAS
PLUTONICAS**

Se efectuaron cuatro dataciones K-Ar en concentrados de micas de las rocas encajadoras de los intrusivos ya descritos, tres en rocas metasedimentarias paleozoicas y una en lavas córneas,

pertenecientes a la Formación La Negra.

Las rocas metasedimentarias paleozoicas están formadas por filitas y cuarcitas, intensamente foliadas y plegadas (Ferraris, 1978; Marinovic y Hervé, en prep.). Dos dataciones K-Ar en muscovita indican edades de 146 y 135 Ma, y una en biotita de

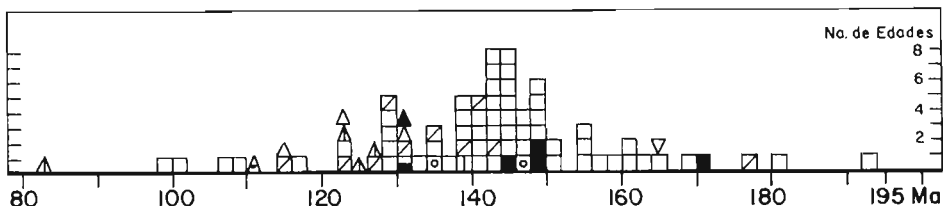


FIG. 7a. Histograma general de edades K-Ar y Rb-Sr.

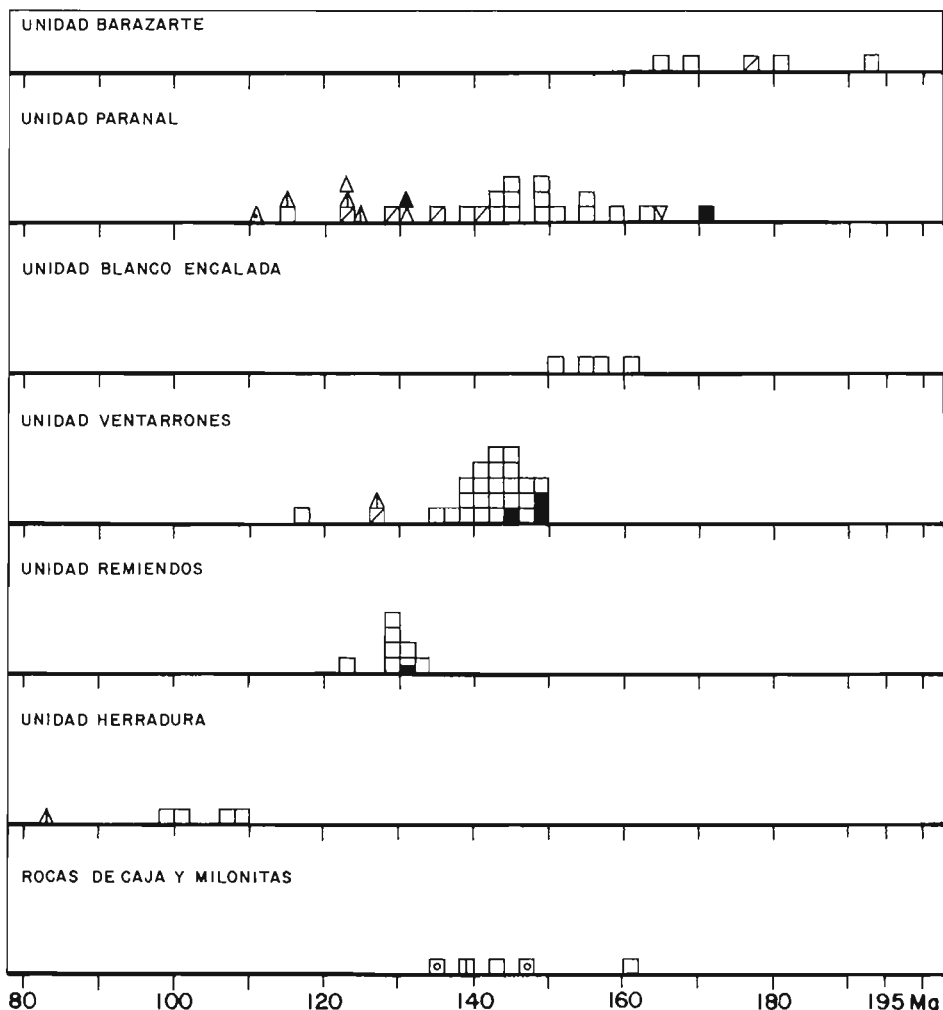


FIG. 7b. Edades por unidad geológica.

- | | | | |
|---------------|--------------|------------------------|-------------------------------|
| K-Ar | | Rb-Sr | |
| □ Biotita | ⊠ Muscovita | ■ Roca total | △ Intrusivos menores y diques |
| ▣ Anfíbola | ⊞ Roca total | ▣ Biotita / roca total | ▽ Veta |
| △ Plagioclaso | | | |

143 Ma (Tabla 9, Fig. 2). Estas edades, obtenidas en minerales producto de metamorfismo regional, se interpretan como el efecto de la intrusión de plutones de la Unidad Ventarrones, que afloran en las cercanías.

En el 'roof pendant' de lavas córneas, incluidas en la Unidad Blanco Encalada en Punta Tragagente (Fig. 2), se obtuvo una edad en biotita de 160 Ma (Tabla 9). Estas biotitas son producto de metamorfismo de contacto, por lo que su edad estaría controlada por la intrusión de las rocas plutónicas.

MILONITAS

En el sector medio de la quebrada Remiendos (Fig. 2), se analizó, por el método K-Ar en roca total, una milonita asociada a la Zona de Falla Atacama, generada a partir de pórfidos andesíticos de la Formación La Negra, y se obtuvo una edad de 139 Ma (Tabla 9). Esta se considera como una edad rejuvenecida con respecto a la edad original de la roca (jurásica) y representaría la edad de los eventos tectónicos que la generaron (Hervé, 1987b).

DISCUSION E INTERPRETACION

El Batolito Vicuña Mackenna está formado por dos asociaciones plutónicas mayores: una básica, de carácter primitivo, representada por los gabroides de la Unidad Paranal; y una ácida, de carácter más evolucionado, representada por los granitoides de las unidades Blanco Encalada, Ventarrones, Remiendos y Herradura (Marinovic y Hervé, 1988).

Los plutones se habrían emplazado en niveles altos de la corteza, a juzgar por los contactos tajantes y la ausencia de aureolas de contacto extensas. Es probable que la excepción la constituyan las rocas de la Unidad Paranal, que, por sus características texturales, quizás puedan haberse emplazado a una mayor profundidad.

Las edades radiométricas se distribuyen en un intervalo entre los 192 y 98 Ma, cubriendo la mayor parte del Jurásico y Cretácico Inferior. Si estas edades se analizan en conjunto, como en la figura 7a, se observa una mayor concentración en el intervalo 150-140 Ma. Con la información entregada por este diagrama se podría concluir que la actividad plutónica fue continua desde el Jurásico al Cretácico Inferior, con un máximo de actividad en el lapso 150-140 Ma. Sin embargo, esta inferencia es equívoca, puesto que, si las edades se analizan tomando en consideración el contexto geológico, se obtiene un esquema de evolución cronológica del magmatismo, definido por pulsos sucesivos en el tiempo que, al emplazarse en plutones más antiguos, producen en éstos un rejuvenecimiento de las edades radiométricas.

EDADES DE CRISTALIZACION Y DE REJUVENECIMIENTO

En la figura 7b se presentan las edades calculadas en cada una de las unidades plutónicas. Las edades obtenidas en rocas de la Unidad Paranal se distribuyen entre los 164 y 115 Ma. Es el intervalo de tiempo más amplio de todas las unidades plutónicas, y se considera que no representa edades de cristalización sino de rejuvenecimiento total o parcial. Esto se demuestra en los sectores en que la edad obtenida en los gabroides es la misma que la de algún plutón que lo intruye. Por ejemplo, en las cercanías del cerro Paranal (Fig. 2), una edad de 144 Ma en biotita de un gabro, se considera rejuvenecida por la intrusión de granitoides de rocas de la Unidad Ventarrones, las que también rejuvenecen el sistema isotópico K-Ar de otros gabroides de la Unidad Paranal, sin afectar su sistema Rb-Sr.

Esta es la relación más frecuente en el área y se produce debido a la amplia distribución de ambas unidades. Por esta razón, en el diagrama de la figura 7a, se observa una concentración de edades en torno al intervalo 150-140 Ma. Este representa no sólo las edades de cristalización de la Unidad Ventarrones, sino a las edades rejuvenecidas en las rocas más antiguas. Edades K-Ar en miccas de las rocas metasedimentarias asignadas al Paleozoico, indican edades entre 146 y 135 Ma, las que también están rejuvenecidas por la intrusión de esta unidad.

El emplazamiento de la Unidad Ventarrones produjo el evento térmico más importante con posterioridad a la intrusión de la Unidad Paranal, y, muy probablemente, enmascara procesos similares generados por las rocas plutónicas más antiguas. Se ha podido establecer, localmente, el rejuvenecimiento de edades por efecto de otros plutones más jóvenes, pero se trata de eventos sin trascendencia regional, limitados solamente a las zonas de contacto.

Una posibilidad de interpretación de las edades K-Ar es considerar que los sistemas isotópicos se cerraron solamente debido al enfriamiento producido por alzamiento regional muy posterior a la cristalización y emplazamiento de los plutones (Krummenacher *et al.*, 1975). De esta manera se genera un modelo de variación regional de las edades. La figura 8 muestra la distribución de las edades K-Ar, en las que se observa que dicho modelo de variación no existe en el área. Por el contrario, las curvas están nitidamente controladas por la ubicación de los plutones más jóvenes. El ejemplo más evidente es el del plutón Remiendos, cuyo contorno de afloramientos queda definido por la curva de los 135 Ma. Se destaca aquí, también, el hecho que la Unidad Blanco Encalada no experimentó un rejuvenecimiento completo debido, probablemente, a que sus afloramientos se ubican un tanto al oeste de la zona de influencia de los plutones más jóvenes. De igual forma, las rocas de la Unidad Paranal, en Sierra Vicuña Mackenna, al este de la zona de influencia térmica ya mencionada, presentan las edades K-Ar más antiguas de la unidad.

El bajo grado del metamorfismo de las rocas encajadoras de las plutonitas indica que ellas no han estado sometidas a condiciones de presión y temperatura altas como para permitir explicar el cierre de los sistemas isotópicos debido exclusivamente a alzamiento regional posterior a un emplazamiento y cristalización profundos.

RAZONES INICIALES Y PROVENIENCIA

Las razones iniciales $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, obtenidas en las isócronas de las diferentes unidades plutónicas, se distribuyen en el intervalo entre 0,70375 y 0,70315 y son todas analíticamente concordantes, con una media ponderada de $0,70344 \pm 0,00004$. No se ha detectado variación de los valo-

res según la litología, edad o ubicación geográfica (Tabla 1). Todas las razones iniciales obtenidas en las unidades plutónicas son bajas, lo que indica una proveniencia similar, del manto superior, sin contaminación significativa de material cortical. Escapa a esta situación el pórfido riolítico existente al norte de Paposo, con una razón inicial de 0,70900, característica de magmas en cuya generación ha habido participación de material cortical.

FOCOS DE INTRUSION Y MIGRACION

La migración de los focos de intrusión a partir del Jurásico en el norte de Chile ha sido ampliamente documentada (Farrar *et al.*, 1970; Rivano *et al.*, 1985; Parada *et al.*, 1988). Sin embargo, a mayor escala, al interior de la franja plutónica de la Cordillera de la Costa al sur de Antofagasta, los focos de intrusión se mantuvieron aproximadamente en

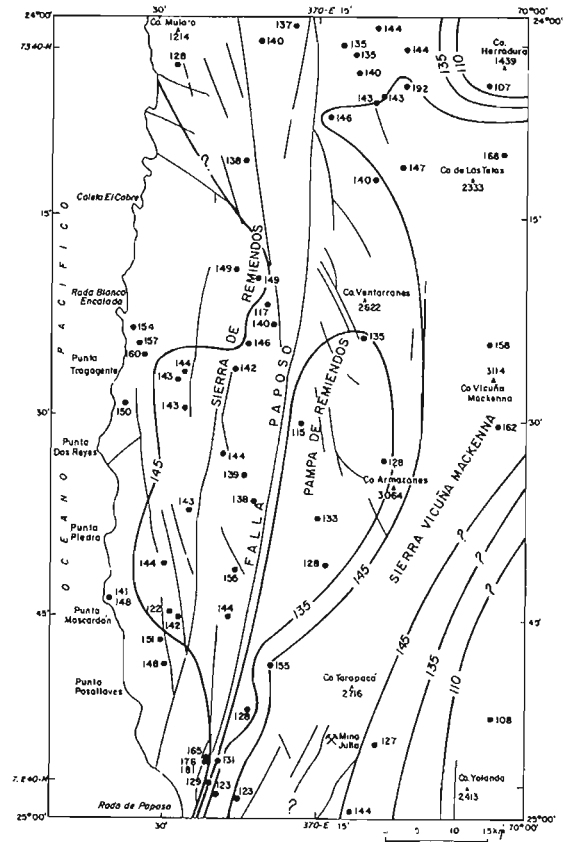


FIG. 8. Mapa de las curvas de 'igual edad'.

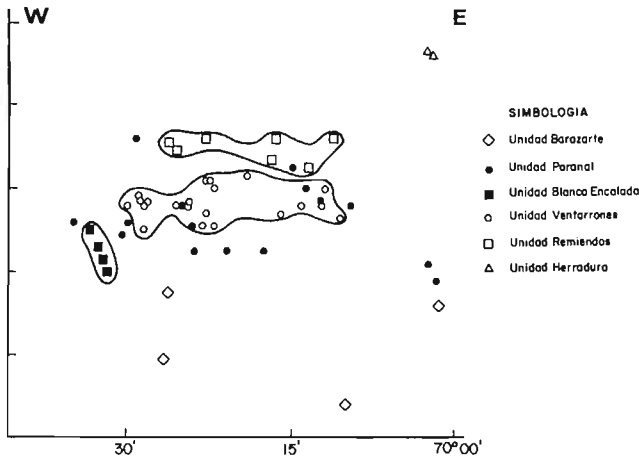


FIG. 9a. Diagrama longitud oeste versus edad K-Ar de las unidades plutónicas de toda el área.

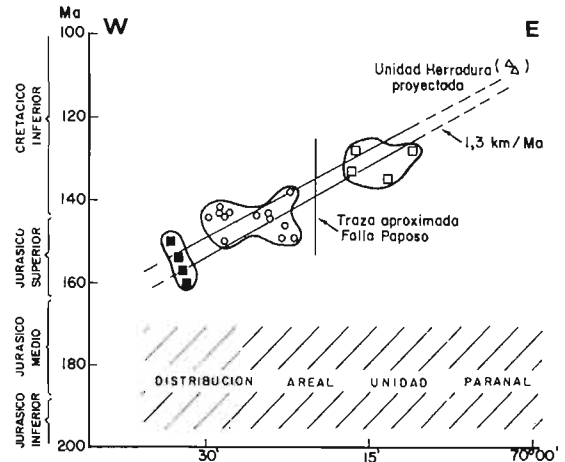


FIG. 9b. Diagrama longitud oeste versus edad K-Ar de las unidades plutónicas posteriores a la Unidad Paranal, entre los 24°15' y 24°45'S.

la misma posición durante el Jurásico Inferior(?)-Medio (Unidades Barazarte y Paranal), registrándose un salto al oeste con la intrusión de la Unidad Blanco Encalada (Figs. 8, 9a). Luego, el sentido de la migración al este es retomado, con el emplazamiento sucesivo de los granitoides de las unidades Ventarrones, Remiendos y Herradura.

La migración al este de los focos de intrusión queda mejor expresada en el sector central del área, aproximadamente entre los 24°15' y 24°45'S (Fig. 8). Las edades de cristalización de las rocas allí expuestas y su distribución este-oeste se presentan en la figura 9b, donde se grafica la migración al este de las unidades Blanco Encalada, Ventarrones y Remiendos en el tiempo. De acuerdo con este diagrama, la velocidad de migración sería de ca. 1,3 km/Ma (1,3 cm/año), entre los 160 y 130 Ma, sin considerar eventuales saltos al oeste. Si se proyecta la posición de la Unidad Herradura en aquél, es posible considerar que la migración se extendió, con velocidades similares, al menos hasta los 100 Ma.

PLUTONISMO Y ZONA DE FALLA ATACAMA

En el lapso entre el Jurásico y el comienzo del Cretácico Inferior, se intruyeron las unidades Ba-

zararte, Paranal, Blanco Encalada y Ventarrones. Todas ellas tienen un carácter pre-tectónico con respecto al movimiento transcurrente del Cretácico Inferior de la Zona de Falla Atacama. Algunas rocas de la Unidad Paranal presentan evidencias de haber experimentado deformación interna, debido a fenómenos tectónicos, plutónicos o combinados. Por el contrario, las rocas de la Unidad Ventarrones, que intruyen a los gabroides, no muestran deformación interna.

Las rocas de la Unidad Remiendos afloran en una franja de dirección norte-sur, exclusivamente al este de la Falla Paposó, en las cercanías de cuyo contacto, exhiben foliación sinmagmática y milonitización (Fig. 2). Tendrían un carácter sintectónico con respecto al episodio transcurrente del Cretácico Inferior, descrito por Hervé (1978b). La edad de cristalización de la unidad, entre 133 y 128 Ma, parece coincidir, entonces, con el período de transurrencia de la Falla Atacama. Se compara con la edad entre 143 y 131 Ma descrita para dicha actividad transcurrente sinistral en el Sistema de Falla Izcuña, que también pertenece a la Zona de Falla Atacama (Hervé, 1987b). Los plutones de la Unidad Herradura, emplazados a continuación, tienen un carácter post-tectónico con respecto al movimiento transcurrente.

CONCLUSIONES

- El plutonismo del arco magmático mesozoico de la Cordillera de la Costa, al sur de Antofagasta, se distribuye en seis eventos intrusivos entre el Jurásico y el límite del Cretácico Inferior-Superior (192-98 Ma).
- La posición de los focos de intrusión del plutonismo no varía en forma significativa antes del Jurásico Superior; a partir de esta época, se verifica una migración al este.
- Debido al emplazamiento de plutones dentro de otros más antiguos, se produjo el rejuvenecimiento de muchas de las edades radiométricas K-Ar. El evento térmico más importante fue aquel registrado en la Unidad Paranal, durante la intrusión de la Unidad Ventarrones entre los 149 y 138 Ma.
- Las razones iniciales $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de las rocas plutónicas evidencian que los magmas provienen del manto superior, sin participación significativa de material cortical en su génesis.
- La Unidad Remiendos se emplazó sintectónicamente, con la actividad transcurrenente cretácica de la Zona de Falla Atacama. Por lo tanto, es posible dividir las unidades plutónicas en pre o postectónicas, según su relación temporal con este evento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Alvaro Puig (CO-DELCO-División El Teniente) y Constantino Mpodozis (Servicio Nacional de Geología y Minería) por su cooperación durante el desarrollo del proyecto, así como por sus valiosas críticas y comentarios. Víctor Maksaev (Servicio Nacional de Geología y Minería), Carlos Huete (Sociedad Minera Pudahuel) y Francisco Hervé (Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile) aportaron importantes sugerencias que mejoraron y clarificaron el

trabajo.

En los Laboratorios del Servicio Nacional de Geología y Minería, Carlos Pérez de Arce realizó las extracciones de Ar; Sylvia Moraga, la separación y concentración de minerales; y Aída Acevedo, los análisis químicos de potasio. A todos ellos, nuestros agradecimientos.

Esta es una contribución a los Proyectos Nos. 120 y 249 del PICG, Evolución Magmática de los Andes y Magmatismo Andino, respectivamente

REFERENCIAS

- Arabasz, W. 1971. Geological and geophysical studies of the Atacama Fault Zone in northern Chile. Unpublished Ph.D Thesis. *California Institute of Technology*, 264 p, Pasadena.
- Brook, M.; Pankhurst, R.J.; Shepherd, T.J.; Spiro, B. 1986. Andchron: Andean geochronology and metallogenesis. *British Geological Survey/Overseas Development Agency, Open File Report*, 137 p.
- Farrar, E.; Clark, A.H.; Haynes, S.J.; Quirt, G.S.; Conn, H.; Zentilli, M. 1970. K-Ar evidence of the post-Paleozoic migration of granitic intrusion foci in the Andes of northern Chile. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 10, No. 1, p. 60-66.
- Faure, G. 1986. Principles of isotope Geology. John Wiley & Sons, 589 p. New York.
- Faure, G.; Powell, J.L. 1972. Strontium isotope Geology. Springer-Verlag, 188 p. New York.
- Ferrars, F. 1978. Geología de la Cordillera de la Costa entre los 24 y 25° Lat. S. Región de Antofagasta. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, No. 26, 15 p.
- García, F. 1967. Geología del Norte Grande de Chile. Sociedad Geológica de Chile. *In Simposium sobre el Geosinclinal Andino*, No. 3, 138 p. Santiago, 1962.
- Harland, W.B.; Cox, A.V.; Llewellyn, P.G.; Pickton, C.A.G.; Smith, A.G.; Walters, R. 1982. A geologic time scale. *Cambridge University Press*, 1 tabla.
- Hervé, M. 1987a. Actividad de carácter normal de la Falla Paposo (Zona de Falla Atacama) en el Mioceno. *Revista Geológica de Chile*, No. 31, p. 31-36.
- Hervé, M. 1987b. Movimiento sinistral en el Cretácico Inferior de la Zona de Falla Atacama al norte de Paposo (24°30' Lat. S). *Revista Geológica de Chile*, No. 31, p. 37-42.
- Hervé, M.; Marinovic, N.; Mpodozis, C. Pérez de Arce, C. 1985. Geocronología K-Ar de la Cordillera de la Costa al norte de Paposo. Antecedentes preliminares. *In Congreso Geológico Chileno*, No. 4, Resúmenes, p.158. Antofagasta.
- Krummenacher, N.; Gastil, R.G.; Bushee, J.; Dupont, J.

1975. K-Ar apparent ages. Peninsular Ranges Batholith, southern California and Baja California. *Geological Society of America, Bulletin*, No. 86, p. 760-768.
- Marinovic, N.; Hervé, M. 1988. El Batolito Vicuña Mackenna (Jurásico Inferior-Cretácico). Características petrográficas y geoquímicas. *In Congreso Geológico Chileno, No. 5, Actas*, Vol. 3, p. 1297-319. Santiago.
- Naranjo, J.A.; Puig, A. 1984. Hojas Taltal y Chañaral. Regiones de Antofagasta y Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile*, Nos.62-63, 140 p.
- Parada, M.A.; Rivano, S.; Sepúlveda, P.; Hervé, M.; Hervé, F.; Puig, A.; Munizaga, F.; Brook, M.; Punkhurst, R. 1985. Mesozoic and Cenozoic plutonic development in the Andes of Central Chile (30°30' Lat. S). *Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica, Comunicaciones*, No. 35, p. 185-188.
- Rivano, S.; Sepúlveda P.; Hervé, M.; Puig, A. 1985. Geocronología K-Ar de las rocas intrusivas entre los 31° y 32° Lat. S, Chile. *Revista Geológica de Chile*, No. 24, p. 63-74.
- Streckeisen, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Review*, Vol. 12, p. 1-33.
- Steiger, R.H.; Jaeger, E. 1977. Subcommittee on Geochronology; convention on the use of decay constants in Geo- and Cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 36, No. 3, p. 359-362.
- Ulriksen, C. 1979. Regional Geology, geochronology and metallogeny of the Coastal Cordillera of Chile between 25°30' and 26°00' south. Unpublished M.Sc. Thesis. *Dalhousie University*, 221 p. Canada.
- Uyeda, S. 1982. Subduction zones: An introduction to comparative subductology. *Tectonophysics*, Vol. 81, p. 133-159.