

4-21 GEOCROLOGIA Rb-Sr y K-Ar DEL BASAMENTO CRISTALINO DE SIERRA LIMON VERDE, ANTOFAGASTA, CHILE.

F.Hervé⁺, F.Munizaga⁺, N.Marinovic[°], M.Hervé[°], K.Kawashita^{*}, M.Brook[#], N.Snelling[#].

+ Depto. de Geología, Universidad de Chile

° Servicio Nacional de Geología y Minería

* Centro de Pesquisas Geocronológicas, Univ. Sao Paulo, Brasil

British Geological Survey

RESUMEN

En el basamento cristalino pre-triásico de la Sierra de Limón Verde se distingue el Complejo Metamórfico de Limón Verde (CMLV), compuesto principalmente por anfibolitas y esquistos micáceos en la facies anfibolita y el Complejo Intrusivo de Limón Verde (CILM) compuesto por granitoides.

El método de isócrona Rb-Sr en roca total en las metamorfitas permite construir errórcronas razonables de edad carbonífera, con razones iniciales $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ relativamente bajas del orden de 0.707. Estas errórcronas podrían indicar la edad del metamorfismo de las rocas. Edades K-Ar en hornblenda, muscovita y biotita indican valores decrecientes comprendidos entre 312 y 239 Ma, compatibles con un enfriamiento, probablemente debido a un alzamiento regional del complejo metamórfico.

Edades K-Ar en biotita del Complejo Intrusivo de Limón Verde de 293 Ma y de 218 Ma, indican una edad mínima de intrusión pérmica inferior.

Se analizan las implicaciones geológicas regionales que tendría el considerar una edad de metamorfismo paleozoico superior en lugar de precámbrico, como ha sido sugerido con anterioridad por diversos autores.

ABSTRACT

The pre-triassic crystalline basement of Sierra de Limón Verde is composed by a metamorphic complex which consists mainly in amphibolite and micaschist in the amphibolite facies and a granitoid plutonic complex.

Whole rock Rb-Sr analyses of suites of metamorphic rocks allow to build a reasonable errorchron of Carboniferous age, with rather low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios around 0.707. These errorchrons could indicate the age of metamorphism of the rocks. K-Ar ages in hornblende, muscovite and biotite range from 312 Ma to 239 Ma, and are interpreted as indicative of a slow cooling of the metamorphics, related to regional uplift and erosion during a late Palaeozoic orogenic phase. The granitoid complex was dated 293 to 218 Ma by K-Ar.

The metamorphic complex is considered to form part of the deeper levels of a Late Palaeozoic accretionary prism, and not of precambrian block related to the Arequipa Massif a previously considered.

INTRODUCCION

En la Sierra de Limón Verde, ubicada 30 km al S de Calama (Fig. 1) afloran metamorfitas y granitoides pre-triásicos.

HARRINGTON (1961) en base a comparaciones litológicas con rocas de las Sierras Pampeanas de Argentina, le asignó a las metamorfitas una edad precámbrica. Los granitoides se consideran de edad paleozoica superior en GARCIA (1967), y en base a ellos BAEZA (1984) supone una edad Paleozoico inferior para las metamorfitas. MARINOVIC y LAHSEN (1984) publi-

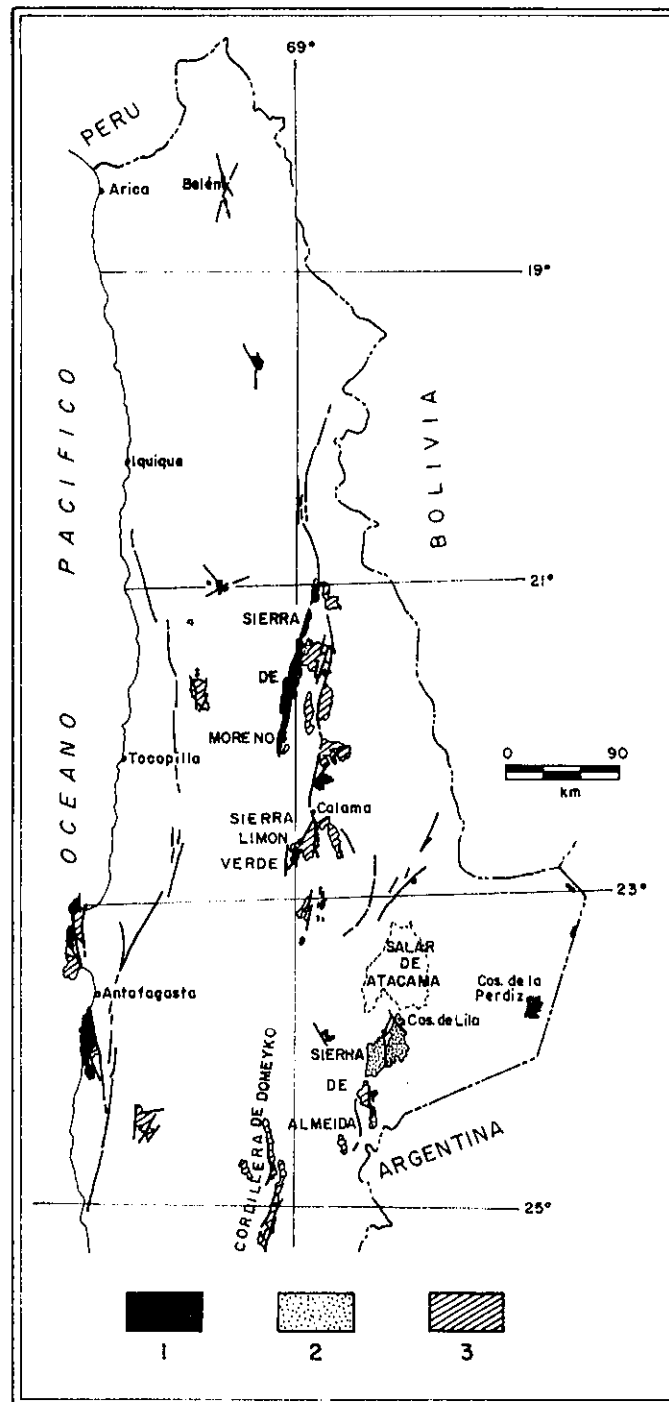


Fig. 1: Mapa de ubicación del área de Sierra Limón Verde. 1) Rocas metamórficas y sedimentarias paleozoico inferior; 2) Granitoides del Paleozoico Inferior; 3) Granitoides del Paleozoico superior (según MPODOZIS *et al.*, 1983, ligeramente modificado).

can la Hoja Calama escala 1:250.000, en que denominan a las metamorfitas Complejo Metamórfico Limón Verde (CMLV) y a los granitoides Complejo Intrusivo Limón Verde (CILV), nomenclatura que se usará en este trabajo.

La edad de estas rocas tiene una manifiesta importancia en la interpretación de la historia geológica de la región. Modelos geotectónicos para el paleozoico del norte grande de Chile, como los presentados por COIRTA et al., (1982) y MPODOZIS et al., (1983) incluyen la colisión durante el ordovícico-silúrico de un microcontinente o microplaca de Arequipa, con el borde occidental de Gondwana. Esta microplaca estaría constituida por rocas precámbricas. Como las rocas metamórficas de Limón Verde se consideran posibles constituyentes de este cratón de Arequipa (DAVIDSON, et al., 1984), la datación de ellas reviste considerable importancia.

En este trabajo se presentan dataciones K-Ar y Rb-Sr tanto de las rocas metamórficas como graníticas de la Sierra Limón Verde.

El Complejo Metamórfico de Limón Verde (CMLV)

Aflora en el flanco occidental de la Sierra de Limón Verde, constituyendo una franja discontinua de unos 12 km de largo por 2 km de ancho, según extracto del mapa geológico de BAEZA (1976) que se presenta en la Fig. 2. Los tipos litológicos predominantes son las anfibolitas y los esquistos micáceos, las cuarcitas son subordinadas. Las anfibolitas son de grano medio a grueso, con texturas nematoblásticas a granoblásticas. Los esquistos micáceos, intercalados con las metabasitas, tienen texturas lepidoblásticas, con porfiroblastos de granate. Las asociaciones mineralógicas de las rocas analizadas se presentan en la Tabla I.

Según BAEZA (1984), el metamorfismo de estas rocas se habría realizado bajo condiciones físicas cercanas al límite de la facies esquistos verdes y de la facies anfibolita. Las condiciones de formación serían de aproximadamente 4 a 5 kb y 510 a 550°C, profundidad del orden de 15 km y una gradiente P/T intermedia. Esto último ya había sido sugerido por

HERVE (1982), en base a la composición química de las anfíbolitas de las metabasitas. Las anfíbolitas se derivarían de rocas basálticas de dos protolitos diferentes: uno con composición química similar a la de los basaltos alcalinos intraplaca y otro a aquella de las toleitas de bajo K. En el Paleozoico superior, el Complejo Intrusivo de Sierra Limón Verde (CILV), calcoalcalino, intruyó a las rocas metamórficas generando una angosta aureola de metamorfismo de contacto de la facies de rocas córneas de hornblenda.

GEOCRONOLOGIA

Se realizaron 8 determinaciones K-Ar en el Laboratorio del British Geological Survey, Inglaterra, 3 en el Laboratorio del CPGE0 de la Universidad de Sao Pulo y 2 en el Laboratorio de Geocronología de la Universidad de Berkeley. Los datos aparecen en la Tabla II. 10 de ellos corresponden al CMLV y 3 al CILV.

También se analizaron 18 muestras del CMLV por el método Rb-Sr, 7 en CPGE0 y 11 en el BGS. Los resultados de estos análisis aparecen en la Tabla III. El error en la determinación de la razón Rb/Sr por XRF es de 0.5% y en la razón $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ es de 0.01% en BGS. En CPGE0 las concentraciones de Rb y Sr sobre 40 ppm fueron analizadas por XRF en un equipo Phillips de 2 KW. Los valores menores fueron determinados por dilución isotópica en el mismo espectrómetro Varian MAT TH5 en el cual se midieron las razones isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ siguiendo los procedimientos indicados por KAWASHITA (1972). La precisión analítica es de 2% por XRF y de 1% por dilución isotópica. Las razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ fueron normalizadas a $\text{Sr}^{86}/\text{Sr}^{88} = 0.1194$. La razón $\text{Sr}^{87}/^{86}\text{Sr}$ promedio del laboratorio es 0.7083 ± 0.0008 (1 σ). La constante de decaimiento del Rb^{87} utilizada en los cálculos es $1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$. El método de YORK (1969) se utilizó en el cálculo de las isócronas.

Con los valores obtenidos puede calcularse diversas errócronas, como se presenta en la Tabla IV. La errócrona 1 ($322 \pm 5 \text{ Ma}$; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ inicial = 0.7071) fue calculada con muestras ANT que provienen de 6 lo

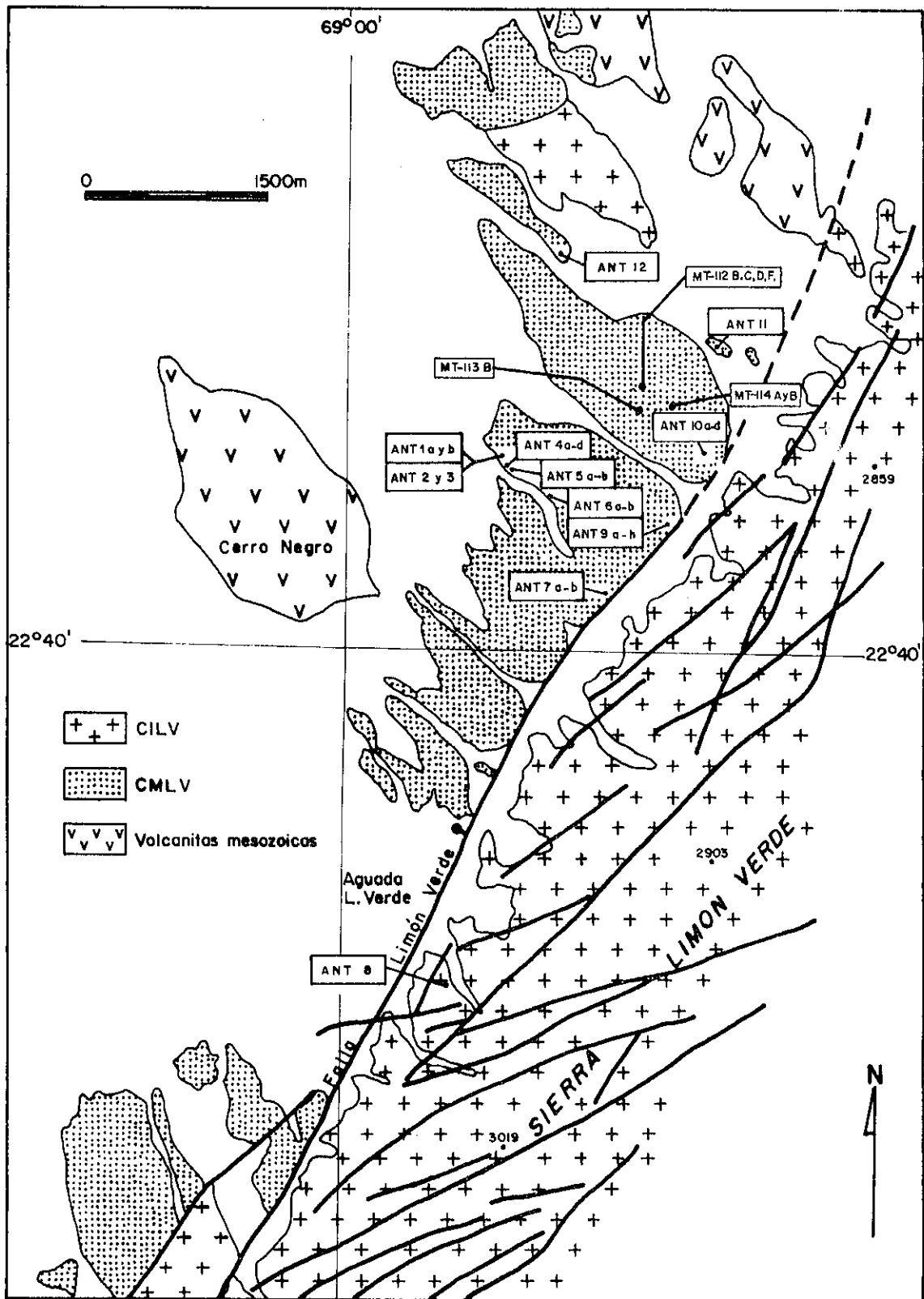


Fig. 2 : Mapa Geológico, según BAEZA (1984) del área de proveniencia de las muestras.

calidades dispersas en una superficie de varios km^2 , como lo indica la figura 2. La errórcrona 2 (309 ± 5 Ma; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ inicial = 0.7069), fue calculada con las 7 muestras que provienen de dos localidades vecinas, separadas por unos 500 m, y presenta un alineamiento de los puntos (MSWD = 4.6), considerablemente mejor que la anterior. Esto podría indicar que el equilibrio isotópico se realizó sólo a escala local dentro del complejo durante el metamorfismo o bien que fue perturbado localmente con posterioridad a él.

Las errórcronas 3 a 6, calculadas usando diversas combinaciones de las 7 muestras MT que provienen de localidades situadas un km al NW de las ANT10, tienen un factor MSWD muy alto. Estas muestras tienen algunos valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mucho más elevados que las ANT, y algunos valores muy bajos de Sr. Además, presentan evidencias texturales de intensa cataclasis de los cristales de cuarzo, proceso que ocurrió probablemente después del metamorfismo principal de las rocas y que pudo modificar el eventual equilibrio isotópico de ellas.

La Fig.3 corresponde a la errórcrona 2, que se considera como la más representativa de la edad del metamorfismo (ver más adelante).

La información geocronológica acerca del CILV indica edades K-Ar en biotita (293 ± 11 Ma y 267 ± 6 Ma en las vecindades de los afloramientos de metamorfitas aquí estudiadas, y de 218 ± 30 Ma en el flanco SE del cerro Limón Verde (Tabla II). MARINOVIC y LAHSEN (1984) mencionan edades K-Ar en biotita de 305 ± 4 y 291 ± 4 para el CILV, en localidades situadas entre 15 y 40 km hacia el E del área estudiada. Además existe una isócrona Rb-Sr en roca total de 256 ± 42 Ma (G. ROGERS, inédito).

DISCUSION DE LOS RESULTADOS GEOCRONOLOGICOS

Los resultados geocronológicos presentan una consistencia en que se pueden destacar los siguientes aspectos:

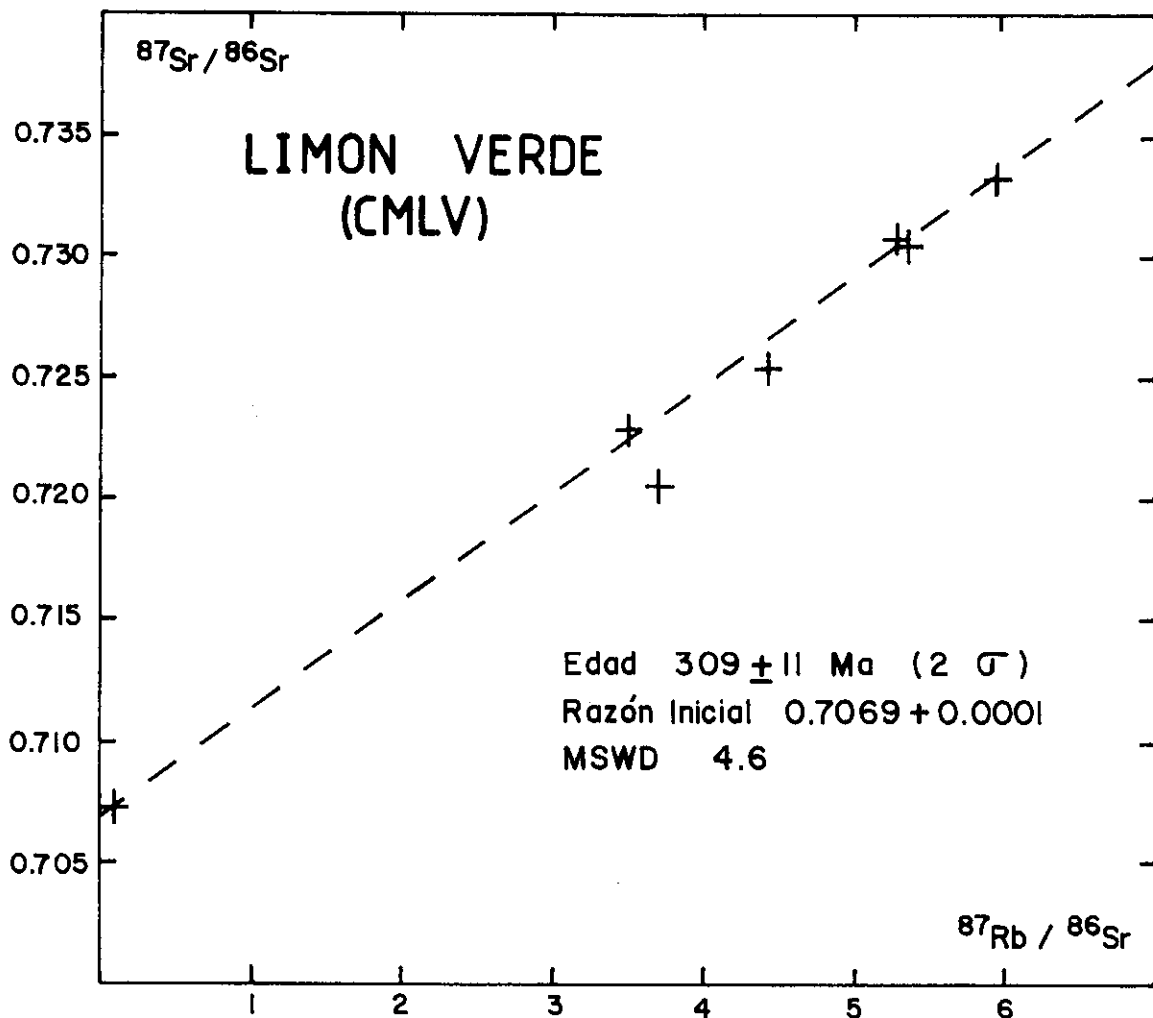


Fig. 3 : Diagrama isocrónico Rb-Sr en roca total construido con las muestras ANT 9 y ANT 10 del Complejo metamórfico de Limón Verde (CMLV).

- las "errórcronas" de las rocas metamórficas indican "edades" Carbonífero inferior, que podrían corresponder al episodio de metamorfismo principal en el área. Se considera como edad más adecuada aquella de la errórcrona 2, por su bajo valor de MSWD y por provenir las muestras de un área restringida. El error que debe asignarse a la edad se obtiene al multiplicar el que resulta del cálculo de la errórcrona, por la raíz cuadrada del MSWD correspondiente. Así, el valor que da la errórcrona 2 es de 309 ± 11 Ma, con una razón inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0.7071 ± 0.0002 .

- un cálculo estimativo del "tiempo de residencia" en la corteza del material constitutivo del CMLV, considerando para él una razón $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ promedio* de 4.6888 y $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0.72709, da una edad de ca. 405 Ma para una razón inicial mínima de 0.701. En consecuencia, se puede descartar una edad pre-cámbrica para el protolito del complejo metamórfico de Limón Verde.

- las edades K-Ar en minerales del CMLV son variables, y directamente proporcionales a la T crítica de retención de Ar en ellos (T_c). En el histograma de la Fig. 4a se observa que las edades mayores (282-312 Ma) corresponden a hornblenda, la muscovita da edades entre 270 y 280 Ma y la biotita entre 230 y 250 Ma. Si se considera temperaturas críticas de retención de Argón de 500°C, 350°C y 300°C respectivamente para hornblenda, muscovita y biotita (GALE, 1982), se puede construir la Fig. 4b, un diagrama T-t para el Complejo Metamórfico Limón Verde.

La temperatura de metamorfismo (BAEZA, 1984) fue probablemente, muy poco mayor que la T_c hornblenda, y por lo tanto si extrapolamos la curva de enfriamiento de 3.5°C/Ma determinada por las edades en hornblenda y biotita entre 300 y 240 Ma, podemos imaginar una edad de metamorfismo ligeramente (10 Ma?) superior a la edad K-Ar de las hornblendas, concordando con las errórcronas Rb-Sr que se encuentran también en este rango de edad.

* Los promedios no incluyen la muestra N°18 de Tabla III.

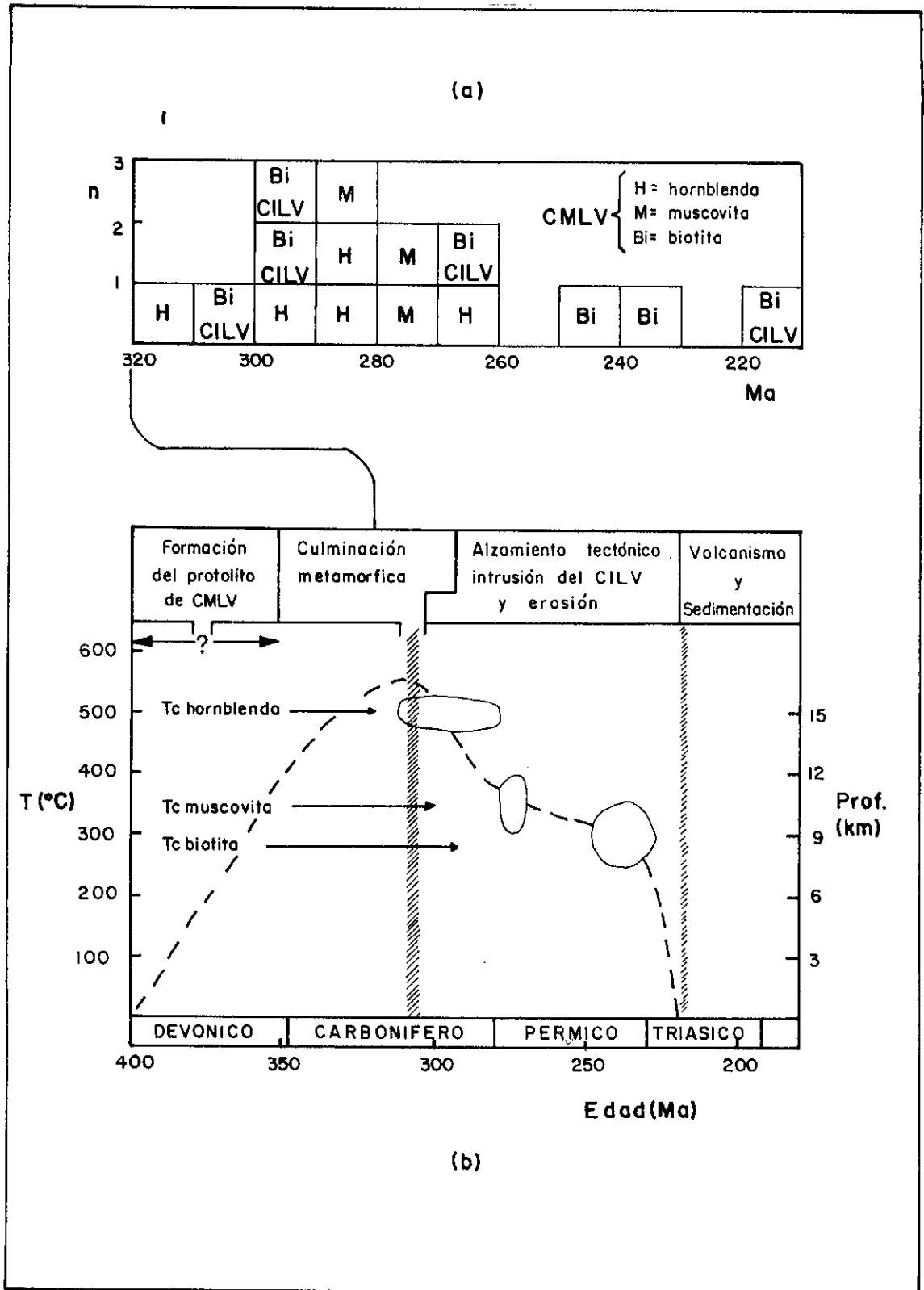


Fig. 4a : Histograma con las edades K-Ar de minerales del Complejo Metamórfico de Limón Verde (CMLV).

Fig. 4b : Trayectoria temperatura-tiempo para el Complejo Metamórfico de Limón Verde (CMLV).

Las metamorfitas estaban expuestas a la erosión durante el Triásico. Si suponemos una edad de 220 Ma para la Fm. Agua Dulce, Triásica, el enfriamiento entre los 240 Ma y los 220 Ma debe haber sido bastante rápido, del orden de $15^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$.

Esta razón de enfriamiento, para gradientes P-T intermedias como las que se supone existieron en el área, implican una velocidad de alzamiento promedio de 200 m/Ma entre el Carbonífero inferior y el Triásico inferior y de aproximadamente el doble en los últimos 20 Ma.

El Complejo Intrusivo de Limón Verde intruye a las metamorfitas, en un tiempo posterior al del metamorfismo regional, como lo demuestra BAEZA (1984), quien observa que se genera una delgada aureola de metamorfismo de contacto en las metamorfitas. La edad de intrusión está por lo tanto acotada entre la edad del metamorfismo regional y el Triásico. Las edades obtenidas en este trabajo concuerdan con las relaciones geológicas de terreno del CILV e indican probablemente que este se emplazó en el lapso Carbonífero-Pérmico. El hecho que las biotitas del CILV den sistemáticamente edades mayores que las biotitas del CMLV, es indicativo de trayectorias den enfriamiento diferentes, tal vez, resultado de alzamiento tectónico diferencial a ambos lados de la Falla Limón Verde.

Interpretación geológica de los resultados

Los datos geocronológicos presentados en este trabajo, no son consistentes con la suposición que el Complejo de Limón Verde forma parte del Macizo de Arequipa, cratonizado hace 2 Ga. No existen en las áreas de afloramientos del Macizo de Arequipa rocas metamórficas con características petrológicas y geocronológicas similares a las del Complejo Metamórfico de Limón Verde.

Esto no puede interpretarse sin embargo como una demostración que no existe en el Norte Grande de Chile un macizo precámbrico que hubiera entrado en colisión con Gondwana como han supuesto COIRA *et al* (1983), ya que existen otras áreas de afloramiento de rocas metamórficas que podrían ser parte de él, o quizás este no aflora en la actualidad.

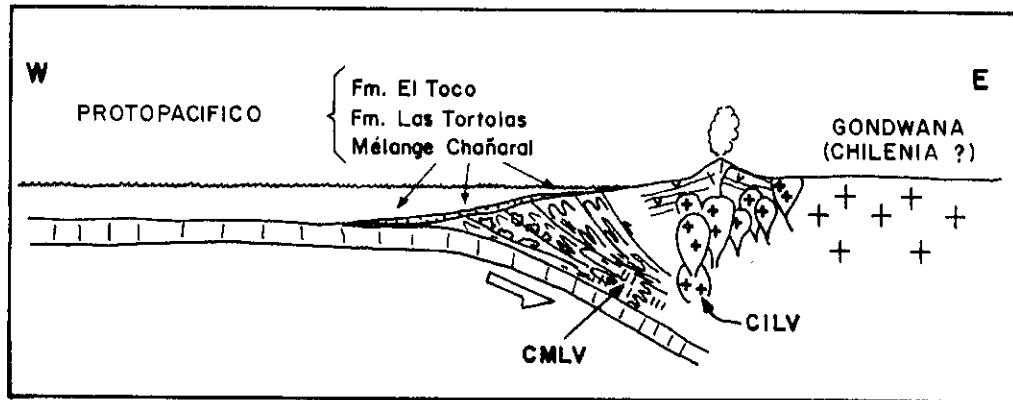


Fig. 5 : Esquema geotectónico para la región de estudio durante el Devónico sup - Carbonífero.

Sin embargo, existen muchas afinidades entre las rocas del CMLV y aquellas del Complejo Metamórfico de Río Tránsito (CMRT) estudiadas por RIBBA (1984), tanto en sus características geoquímicas, geocronológicas y petrológicas. Ambos complejos tienen litologías similares, incluyendo metabasitas provenientes de metamorfismo de basaltos, edades radiométricas Rb-Sr y K-Ar comprendidas entre 320 y 240 Ma y su metamorfismo parece haberse realizado en condiciones de gradiente de P-T intermedio (HERVE, 1982). Estos datos parecen indicar que ambos complejos tuvieron protolitos e historias geológicas similares. El CMRT ha sido interpretado como formando parte de las zonas profundas de un complejo de acreción metamorfizado en el Carbonífero inferior, en una zona de subducción en el borde del continente de Gondwana y afectado por alzamiento y erosión durante el resto del paleozoico y comienzos del mesozoico. El CMLV podría pertenecer al mismo complejo. Partes más exteriores del complejo de subducción serían las series epimetamórficas de la Cordillera de la Costa, e.g. Formación El Toco, Formación Las Tórtolas y Melange de Chañaral (BELL, 1983). Hacia el oriente habría que situar el margen continental de la época y eventuales complejos ígneos calcoalcalinos asociados al proceso subductivo, de los cuales el CILV podría formar parte.

Un esquema del marco geotectónico regional que habría existido en el área durante el paleozoico superior se presenta en la Fig.5.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado en su parte de terreno por el Grant E1300 del DIB de la Universidad de Chile. Las determinaciones geocronológicas en Londres fueron realizadas con ayuda de grants de J.S. Guggenheim Foundation y Royal Society of London durante 1982. Los Prof. Estanislao Godoy, John Davidson y Constantino Mpodozis hicieron valiosos comentarios a versiones iniciales del manuscrito. Este trabajo forma parte del proyecto ANDCHRON y es una contribución a los proyectos 192 y 193 del PICG.

TABLA I

Asociaciones mineralógicas de las rocas del CMLV analizadas

ANT 1A	Qz	Bi	Ms	Gt		
ANT 3	Qz	Bi	Ms	Gt	Ep	
ANT 4A	Qz	Plag	Hb	Gt	Ep	Bi
ANT 5A	Qz	Plag	Hb	Gt	Ru	
ANT 6A	Qz	Plag	Bi	Ms	Gt	Ep
ANT 6B	Qz	Hb	Zo	Esf		
ANT 7A	Qz	Plag	Bi	Ms	Gt	
ANT 7B	Qz	Hb	Zo	Esf		
ANT 9	Qz	Plag	Bi	Ms	Gt	Zo
ANT 9i	Qz	Plag	Bi	Gt		
ANT 9h	Qz	Plag	Hb	Gt	Ep	
ANT 10a	Qz	Ms	Bi	Gt		
ANT 10b	Qz	Ms	Bi	Gt		
ANT 10c	Qz	Ms	Bi	Gt		
MT 112B	Hb	Ep	Esf			
MT 112C	Qz	Ms	Bi	Gt		
MT 112D	Qz	Bi	Ms	Gt		
MT 112F	Qz	Bi	Ms	Gt		
MT 113B	Qz	Bi	Hb	Gt	Ru	

Abreviaciones: Qz=cuarzo; Bi=biotita; Ms=muscovita;
 Plag=plagioclasa; Hb=hornblenda;
 Gt= granate; Esf=esfeno; Ru=rutilo;
 Zo=zoicita; Ep=epidota.

TABLA II

RESULTADOS ANALITICOS K-Ar DE MUESTRAS DEL COMPLEJO
METAMORFICO Y DEL COMPLEJO IGNEO DE LIMON VERDE

N°MUESTRA	MATERIAL ANALIZADO	%K	%Ar atm.	⁴⁰ Ar rad. (nl/g)	Edad (Ma)+ 2σ
COMPLEJO METAMORFICO LIMON VERDE (CMLV)					
ANT 3	Muscovita	7.439	2.43	86.3325	276 _± 11
ANT 10c	Muscovita	6.701	2.42	77.3679	275 _± 11
ANT 5A	Hornblenda	0.414	49.26	5.4685	312 _± 15
ANT 3	Biotita	5.451	14.27	54.9325	242 _± 8
ANT 9i	Biotita	6.625	11.38	65.6900	239 _± 7
ANT 6 _B	Hornblenda	0.545	27.34	6.4654	282 _± 8
ANT 7 _B	Hornblenda	0.555	26.57	6.6052	283 _± 8
MT 112 _B	Hornblenda	0.380	17.42	4.7567	297 _± 13
ANT 7 _B *	Hornblenda	0.553	14.52	6.228	269 _± 9
ANT 6 _A *	Muscovita	2.32	12.1	27.50	283 _± 19
COMPLEJO INTRUSIVO LIMON VERDE (CILV)					
ANT 8°	Biotita	5.903	9.4	65.997	267 _± 6
ANT 63°	Biotita	7.00	4.2	63.173	218 _± 30
ANT 8*	Biotita	6.32	9.6	78.000	293 _± 11

* CPGEO

° Berkeley

Constantes utilizadas: $\lambda_{\epsilon} = 0.581 \times 10^{-10} \text{ x años}^{-1}$ $\lambda_{\beta} = 4.96 \times 10^{-10} \text{ x años}^{-1}$ $^{40}\text{K}/\text{K total} = 0.01167$

TABLA III

	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Rb ⁸⁷ /Sr ⁸⁶	Sr ⁸⁷ /Sr ⁸⁶
1. ANT 1A*	36.9	29.4°	3.63	0.72320
2. ANT 4A*	11.3	157.8	0.21	0.71080
3. ANT 6A*	100.5	157.3	1.85	0.72000
4. ANT 7A	75.8	92.7	2.37	0.71941
5. ANT 9C*	109.8	85.4	3.73	0.72050
6. ANT 9I	48.1	31.3°	4.46	0.72530
7. ANT 9H	8.2	269.7	0.09	0.70731
8. ANT 10	25.6	21.0	3.53	0.72282
9. ANT 10A*	33.1	17.8°	5.40	0.73030
10. ANT 10B*	33.4	18.2°	5.32	0.73060
11. ANT 10C	139.0	67.0	5.99	0.73310
12. MT 112B	3.6	197.5	0.05	0.70553
13. MT 112C	76.9	44.7	4.99	0.73024
14. MT 112D	53.8	24.2	6.46	0.73524
15. MT 112F	57.7	30.9	5.41	0.73243
16. MT 113B	88.4	16.2	15.89	0.76464
17. MT 114A	46.4	13.0	10.33	0.74911
18. MT 114B	73.1	4.7	45.88	0.86366

*Análisis realizados en CPGEO

°Análisis realizados por el método de dilución isotópica en CPGEO

$$\lambda^{87} \text{Rb} = 1.42 \times 10^{-11} \text{ años}^{-1}$$

TABLA IV

N° ERRORCRONA	MTAS.USADAS EN CALC. DE LA ERRORCRONA	EDAD (Ma) <u>+2σ</u>	RAZON INICIAL <u>±2σ</u>	MSWD	ERROR AMPLIADO*
1	Todas las mtas ANT.	322 <u>+5</u>	0.707145 <u>+0.000143</u>	29	27
2	Mtas.ANT9 y ANT 10	309 <u>+5</u>	0.706938 <u>+0.000143</u>	4.6	11
3	Las 7 mtas. MT	291 <u>+2</u>	0.70684 <u>+0.000140</u>	681	52
4	Sin considerar MT114B	310 <u>+2</u>	0.706063 <u>+0.000142</u>	468	43
5	Sin considerar MT113 y MT 114B	328 <u>+3</u>	0.705570 <u>+0.000142</u>	198	42
6	Sin considerar MT112B	228 <u>+2</u>	0.71445 <u>+0.00012</u>	23	10

Errórcronas calculadas con diversas combinaciones de muestras de CMLV

* Obtenido multiplicando el error calculado por $MSWD^{\frac{1}{2}}$

REFERENCIAS

- BAEZA, L. (1976). Geología de Cerritos Bayos y áreas adyacentes entre los 22°30'-22°45' Lat. Sur y los 68°55'-69°25' Long. W, II Región, Antofagasta, Chile. Memoria de Título, Univ. del Norte, Depto. Geociencias, 155 p., Antofagasta.
- BAEZA, L. (1984). Petrography and Tectonics of the Plutonic and Metamorphic complexes of Limon Verde and Mejillones Peninsula, northern Chile. Tesis de Doctorado, Univ. de Tübingen, Alemania Federal, 205 p.
- BELL, M. (1983). The lower Paleozoic metasedimentary basement of the coastal Ranges of Chile between 25°30' and 27°S. Rev. Geo. Chile, 17, 21-29.
- COIRA, B.; DAVIDSON, J.; MPODOZIS, C. & RAMOS, V. (1982). Tectonic and Magmatic Evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. Earth Sci. Rev., 18, 303-332.
- DAVIDSON, J.; MPODOZIS, C. y SKARMETA, J. (1984). Paleozoico y Precámbrico del Norte de Chile. In, Seminario Actualización de la Geología de Chile, Apuntes, S.N.G.M., CHI-CH6, Santiago.
- GALE, N.H. (1982). The dating of plutonic events. In, Numerical Dating in Stratigraphy, G.S. Odin Ed., 440-450, John Wiley & Sons.
- GARCIA, F. (1967). Geología del Norte Grande de Chile. Simp. Geosincl. Andino, 1962. Soc. Geol. Chile, Publ. 3, 138 p.
- HARRINGTON, H. (1961). Geology of parts of Antofagasta and Atacama provinces of Northern Chile. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull., 45 (2): 169-197.

- HERVE, F. (1982). Condiciones de formación de complejos metamórficos chilenos a partir de la química de anfíbolos en metabasitas. Actas, III Congr. Geol. Chileno, T1, D93-D115.
- KAWASHITA, K. (1972). O método Rb-Sr en rochas sedimentares. Aplicacao para as bacias de Paraná e Amazonas. Tesis inédita, Univ. Sao Paulo.
- MARINOVIC, N. y LAHSEN, A. (1984). Hoja Calama, Serv.Nac. Geol. Miner., Carta Geol.Chile, N°58, Stgo.
- MPODOZIS, C.; HERVE, F.; DAVIDSON, J. y RIVANO, S.(1983). Los granitoides de cerros de Lila, manifestaciones de un episodio intrusivo y termal del Paleozoico inferior en los Andes del Norte de Chile. Revista Geológica de Chile, 18, 3-14.
- RIBBA, L. (1984). Geología y Petrología de rocas metamórficas e intrusivas del Cuadrángulo El Tránsito, precordillera de Vallenar. Taller de Título II, Depto. Geología U. de Chile, inédito, 99 p.
- YORK, D. (1969). Least squares fitting of a straight line with correlated errors. Earth Plan. Sci. Lett., 5, 320-4.