

Metamorfismo de muy bajo grado asociado a un sistema geotermal en rocas volcánicas básicas del Jurásico Medio, Formación Lonco Trapial, Paso Berwin, Chubut extra-andino

P. MONTECINOS¹, C. FUENTEALBA¹, L. AGUIRRE¹, F. HERVÉ¹, E. FONSECA² y M. J. HALLER³

¹Departamento de Geología, Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile.

²Servicio Nacional de Geología y Minería, Casilla 10465, Santiago, Chile

³Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco y Centro Nacional Patagónico - CONICET, Bvard. Brown 3700, 9120 Puerto Madryn, Argentina.

E-mails: pmonteci@ing.uchile.cl, clfuente@ing.uchile.cl, luaguirr@cec.uchile.cl, fherve@cec.uchile.cl, efonseca@sermageomin.cl, haller@cenpat.edu.ar

RESUMEN. Las rocas volcánicas básicas de la Formación Lonco Trapial, poseen una mineralogía primaria compuesta principalmente por olivino, plagioclasa cálcica y piroxeno, presentando además gran cantidad de amígdalas. La mineralogía metamórfica de muy bajo grado en estas rocas está caracterizada por ceolitas, minerales arcillosos y micáceos. La asociación mineral más característica está compuesta por celadonita, montmorillonita, heulandita, analcima, gonnardita y, además, por levyna y minerales de la serie analcima-wairakita en forma subordinada. Esta asociación pertenece a la facies ceolita y tuvo un origen asociado a un sistema geotermal. La analogía establecida con las zonas de ceolitas conocidas para sistemas geotermales equivalentes y el uso de la grilla petrogénica para paragénesis ceolíticas, en el sistema An-Ab-SiO₂-H₂O, permiten establecer un rango de temperatura entre 80°-180°C. En este contexto habría ocurrido un único evento metamórfico hidrotermal en presencia de una fase fluida, muy pobre en CO₂, cuya composición química habría cambiado desde un carácter neutro con baja a(SiO₂) y a(K₂O) moderada (permitiendo la precipitación de esmectitas y celadonita) a un carácter neutro-alcálico con a(SiO₂) que posibilita la estabilidad de la heulandita.

Palabras clave: Chubut extrandino, Sistemas geotermales, Facies ceolita, Metamorfismo hidrotermal, Metamorfismo de muy bajo grado

ABSTRACT. Very low grade metamorphism associated with a geothermal system in basic volcanic rocks of the Middle Jurassic, Lonco Trapial Formation, Paso Berwin, Extra-Andean Chubut. The basic volcanic rocks of the Lonco Trapial Formation, have a primary mineralogy mainly composed of olivine, calcic plagioclase and pyroxene, and present a large quantity of amygdals. Their metamorphic mineralogy is characterized by zeolites, clay and micaceous minerals. The main mineral association includes celadonite, montmorillonite, heulandite, analcime, gonnardite and subordinate levynite and minerals of the wairakite-analcime series. This association belongs to the zeolite facies and its origin was associated with a geothermal system. The analogy with known zeolite zones in equivalent geothermal systems and the use of the petrogenetic grid for zeolite parageneses, in the system An-Ab-SiO₂-H₂O, permits to establish a range of temperature between 80°-180°C. A single metamorphic hydrothermal event would have taken place in presence of a CO₂ very poor fluid phase, whose chemical composition possibly changed from a neutral character with low a(SiO₂) and moderate a(K₂O) (allowing precipitation of smectites and celadonite) to a neutral-alkaline character with high a(SiO₂) that allows heulandite to be stable.

Key words: Chubut extrandino, Geothermal system, Zeolite facies, Hydrothermal metamorphism, Very low grade metamorphism

Introducción

En el ámbito del Chubut Extrandino, en el valle del río Chubut (Fig. 1), afloran rocas de la Formación Lonco Trapial (Lesta y Ferello 1972) constituida por depósitos de origen volcánico (principalmente basaltos, andesitas y rocas piroclásticas) y sedimentario que han sido interpretados como provenientes de estrato volcanes de arcos magmáticos del Jurásico medio (Haller *et al.* 1990, Page y Page 1993). Dentro de un contexto extensional jurásico, de

manera local, se desarrollaron cuencas sedimentarias interiores, con depositación de basaltos intercalados, como la de la Formación Cañadón Asfalto (Stipanovic *et al.* 1968; Nullo 1983, Cortiñas 1996), que sobryace en discordancia a la Formación Lonco Trapial.

Las lavas de la Formación Lonco Trapial, poseen composición básica a mesosilíceas (Lesta y Ferello 1972) siendo levemente más básicas que el promedio de las rocas volcánicas del Jurásico (Page y Page 1993) de la provincia del Chubut.

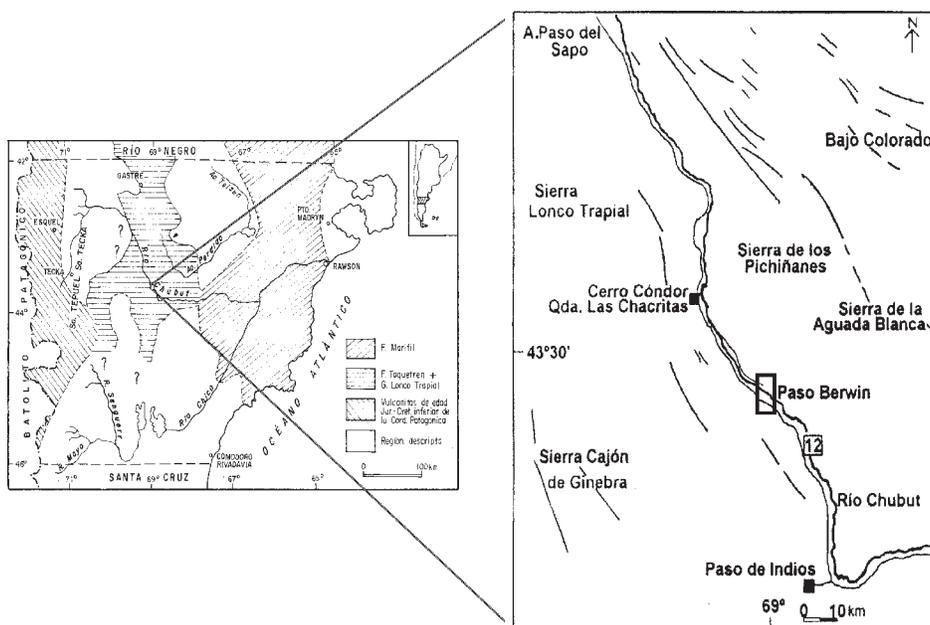


Figura 1: Esquema regional de unidades volcánicas de edad jurásica en la provincia de Chubut (modificado de Page y Page 1993). El rectángulo indica el área de recolección de las muestras.

El análisis de elementos mayores de las rocas volcánicas jurásicas (Page y Page 1993) indican que ellas pertenecen a una secuencia de andesitas orogénicas, de afinidad calcoalcalina medianamente potásicas (Gill 1981) o a una asociación intermedia entre calcoalcalina con alto contenido en potasio y alcalino-cálcica, posible de relacionar con un mayor espesor cortical.

Los elementos traza sugieren una impronta relacionada con la subducción (Page y Page 1993). El grado de enriquecimiento en elementos incompatibles (elementos LIL y Tierras Raras livianas) sugiere una importante contribución cortical.

La presencia de ceolitas en rocas volcánicas jurásicas, aflorantes en la provincia de Chubut, han sido descritas anteriormente por Vattuone *et al.* (2000) quienes establecieron la presencia de laumontita, barrerita, yugawaralita y wairakita, y también por Estrada y Nillni (2003), quienes citaron la presencia de heulandita cálcica, mesolita y estilbita, acompañados de analcima.

Objetivo del estudio

El objetivo de este trabajo es determinar las condiciones físicas y el ambiente en que se originaron las asociaciones mineralógicas de bajo grado encontradas en las amígdalas de las lavas de la Formación Lonco Trapial.

Petrografía

Macroscópicamente las rocas son de color morado-rojo evidenciando la intensa oxidación de la masa fundamental. El estudio petrográfico de secciones transparentes

determinó que estas corresponden, en el diagrama QAPF, al rango de andesitas basálticas a basaltos.

Las lavas presentan texturas porfíricas a glomeroporfíricas con fenocristales de plagioclasa, piroxeno, relictos de olivino, biotita y anfíbol, con tamaños variables entre 0,05 y 0,8 mm de largo. La masa fundamental está constituida por estos mismos minerales con predominio de plagioclasa y piroxeno que forman una textura intersertal donde el vidrio ha sido reemplazado casi totalmente por óxidos de Fe.

Los fenocristales de plagioclasa se presentan como individuos euhedrales, con un grado de albitización incipiente a moderado y en muchos lugares forman agregados glomeroporfíricos con clinopiroxeno. Este último mineral muestra colores anómalos relacionados a minerales de alteración (arcillas y óxidos de Fe) que lo reemplazan completamente. Los olivinos están totalmente alterados a iddingsita y arcillas.

Dentro de la masa fundamental se encuentran numerosas amígdalas cuyo tamaño varía entre 0,1 mm hasta dimensiones centimétricas, estando rellenas por ceolitas, celadonita y minerales arcillosos y micáceos. En las amígdalas de menor tamaño domina la presencia de arcillas, mientras que en las mayores, los bordes están ocupados por arcillas y en el centro por ceolitas.

Métodos analíticos

Se realizaron estudios petrográficos en cortes transparentes en los cuales posteriormente se analizó la mineralogía secundaria. Las ceolitas, minerales arcillosos y micáceos fueron analizados químicamente en la microsonda electrónica Camebax SU-30, del Laboratorio de

Cuadro 1: Principales valores de intensidad y espaciamento de ceolitas y minerales micáceos y arcillosos de Lonco Trapial.

Gonnardita		Analcima-C		Heulandita	
d Å	INT %(I/I0)	d Å	INT %(I/I0)	d Å	INT %(I/I0)
6.64	100	5.596	30	8.95	100
5.968	36	3.425	100	7.896	5
4.672	70	2.685	11	5.066	5
4.408	44	2.503	14	4.648	8
Levina		Celadonita 1M		Montmorillonita 15A	
d Å	INT %(I/I0)	d Å	INT %(I/I0)	d Å	INT %(I/I0)
10.445	31	10.026	64	15	100
8.153	47	4.547	100	5,01	82
4.084	100	3.67	74	3,8	94
3.865	19	3.332	83	2	77

Microscopía Electrónica del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, e identificados por difracción de rayos X, mediante el difractómetro Phillips 1130/90 del Laboratorio del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN-Chile).

Microsonda Electrónica: Todos los elementos fueron medidos usando espectrometría por dispersión de longitud de onda de rayos-X (WDS). Los análisis cuantitativos fueron realizados con el *software* Cameca SX-50 y corrección ZAF, adicionalmente fueron obtenidas imágenes de electrones retrodispersados (BSE). Las condiciones analíticas utilizadas fueron corriente de 10nA, aceleración de voltaje de 15kV y, para prevenir el daño de las especies ceolíticas, el área de barrido fue aproximadamente de 15 mm².

Los estándares utilizados fueron: para el Si y el Ca wollastonita, para el Al ortoclasa, para el Mg dióxido, para el Na albita, para el K ortoclasa, para el Mn rodonita, para el Ti rutilo y para el Fe andradita.

Los análisis de ceolitas fueron seleccionados en base a un error de balance químico (Passaglia 1970) pequeño. El error de balance (E%) está expresado por la siguiente fórmula:

$$E\% = 100 * \frac{[(Al+Fe)-(Na+K)-2*(Ca+Mg+Ba+Sr+Mn)]}{[(Na+K)+2*(Ca+Mg+Ba+Sr+Mn)]}$$

Los contenidos de Sr, Ba y H₂O estructural fueron determinados en dos muestras de heulandita (previamente identificada por difracción de rayos X) por el método ICP-AES en el Laboratorio de Química del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

Difracción de Rayos X: Se utilizó un difractómetro Phillips 1130/90, con ánodo de cobre 40 KV-20MA, filtro de Ni y escala de registro 1000 c por seg. La constante de tiempo utilizada es de 1 segundo con la velocidad de registro de 2° por minuto. Para la identificación de cada mineral se compararon los valores de intensidades relativas y espaciamento interplanares de las especies con sus

respectivos estándares, los cuales están expuestos en el *Search Mineral Powder Diffraction File Databook* (Bayliss *et al.* 1993).

Mineralogía metamórfica

Las especies ceolíticas identificadas (XRD, EPMA) corresponden a heulandita, analcima-C, gonnardita y levyna. Las especies arcillosas y micáceas, en amígdalas de las lavas de la Formación Lonco Trapial, aflorantes en Paso Berwin, identificadas (XRD) son celadonita 1M y montmorillonita 15A. Los principales valores de intensidad relativa y espaciamento interplanar ordenados, en forma decreciente, para cada mineral, son expuestos en el cuadro 1.

En el cuadro 2 se disponen análisis de microsonda promedio de gonnarditas (9 análisis), de heulanditas (7 análisis), minerales de la serie wairakita-analcima (3 análisis) y de analcimas (5 análisis). Los análisis de microsonda para cada especie ceolítica, y las especies arcillosas y micáceas, se encuentran en el cuadro 5, en esta se incluye un análisis químico de levyna (identificada por rayos X).

Ceolitas

Se pueden apreciar (Fig. 2) dos grupos de análisis de ceolitas que reflejan un comportamiento químico diferente. El primer grupo identificado por sus patrones XRD como heulandita es caracterizado por una predominancia del catión Si. En el segundo grupo se puede apreciar el predominio de los cationes monovalentes (M); a su vez se observa la existencia de dos subgrupos de química diferente. El primero, identificado por sus patrones XRD como gonnardita, muestra un mayor contenido de cationes divalentes. En tanto que el segundo, identificado por sus patrones XRD como analcima, muestra una escasa o nula presencia de esos cationes.

Cuadro 2: Análisis promedios de ceolitas en amígdalas de rocas de la Formación Lonco Trapial.

	Gonnarditas	Heulanditas	Analcimas	Analcimas-Wairakitas
	Ox. 80	Ox. 72	Ox.96	Ox.96
	n⁽¹⁾=9	n=7	n=5	n=3
SiO₂	41,74	66,27	57,45	48,12
TiO₂	0,01	0,01	0,04	0,01
Al₂O₃	29,04	14,98	21,36	26,61
Fe₂O₃	0,03	0,05	0,07	0,07
MnO	0,02	0,08	0,01	0,00
MgO	0,01	0,03	0,01	0,01
CaO	11,01	5,28	0,05	3,71
Na₂O	5,75	0,66	13,74	12,12
K₂O	0,03	1,38	0,03	0,01
SUMA	87,64	88,74	92,78	90,66
Si	21,925	28,646	33,179	29,029
Ti	0,004	0,005	0,019	0,004
Al	17,980	7,644	14,538	18,922
Fe³⁺	0,012	0,015	0,031	0,031
Mn²⁺	0,009	0,029	0,007	0,001
Mg	0,007	0,021	0,013	0,007
Ca	6,199	2,442	0,029	2,389
Na	5,856	0,563	15,375	14,203
K	0,018	0,774	0,025	0,011
Total	52,011	40,028	63,217	64,598
Si/Al	1,220	3,82	2,282	1,534
%E⁽²⁾	-1,570	12,101	-5,842	-0,149
Ca/Ca+Na	0,514	0,821	0,002	0,154
D⁽³⁾	6,215	2,492	2,396	0,152
M	5,874	1,338	14,214	0,888
R⁽⁴⁾	0,549	0,789	0,605	0,605

(1) n indica el número de análisis empleados en el cálculo del promedio y Ox. indica el número de óxidos empleado en el cálculo de las abundancias catiónicas.

(2) El error de balance (E%) para la heulandita representativa fue calculado considerando el contenido de Ba y Sr determinado por vía húmeda utilizando del método ICP-AES. Los valores determinados de Sr y Ba están incluidos en el cuadro 5.

(3) D= Ca+Mg+Mn, M=Na+K

Las especies ceolíticas con algún contenido catiónico de K corresponden a heulandita. El resto de las especies ceolíticas presenta tendencia sódica o cálcico-magnésica.

Heulandita

Esta ceolita se presenta como agregado de cristales generalmente tabulares ocupando el centro de las amígdalas mayores. Al microscopio se aprecian cristales tabulares con una dirección de clivaje perfecta, en su mayoría con signo de elongación largo lento y baja birefringencia.

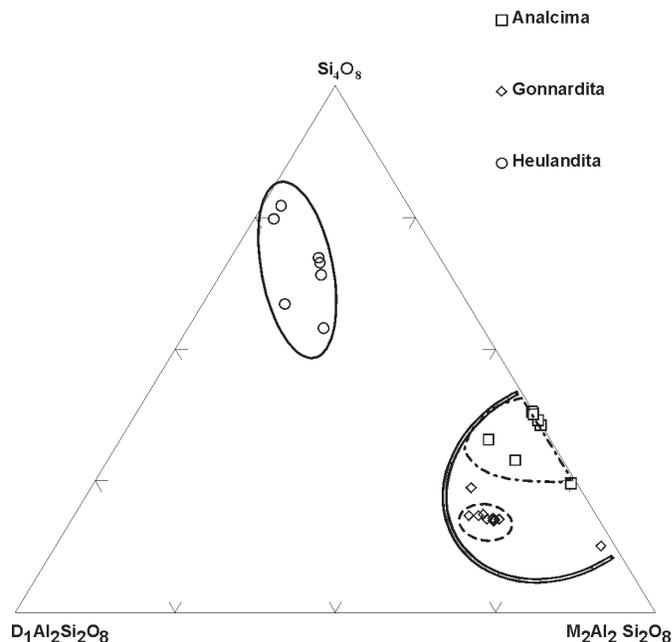


Figura 2: Proyección molar de ceolitas en basaltos y andesitas basálticas de la Formación Lonco Trapial en el diagrama Si_4O_8 - $D_1Al_2Si_2O_8$ - $M_2Al_2Si_2O_8$ de Nativel *et al.* 1994. D: cationes divalentes, M: cationes monovalentes. En línea continua delgada se señala el campo donde predomina el catión Si, en línea continua gruesa se señala el grupo donde predominan los cationes monovalentes. En este último en línea segmentada se señala el subgrupo de tendencia divalente y en línea segmento-punto se señala el subgrupo de tendencia sódica.

Química: Los análisis de microsonda muestran una amplia variabilidad composicional (Fig.2). Cinco de los siete análisis caen en el campo Heulandita I (Fig. 3). Se puede constatar (Fig. 4) que estos mismos análisis poseen los valores típicos del parámetro químico Si/Al para la heulandita. La razón Si/Al propuesta por Boles (1972) es considerada como parámetro discriminante entre clinoptilolita ($Si/Al > 4$) y heulandita ($Si/Al < 4$). Sin embargo, anteriormente se ha considerado que no es posible discriminar entre clinoptilolita y heulandita en base solamente a su composición química. Los análisis 11 y 12 (ver Cuadro 5), poseen razón $Si/Al > 4$ (Fig. 4), errores de balance menores a 10% y ambos son proyectados fuera del campo Heulandita I (Fig. 3). Estos análisis de acuerdo al esquema de clasificación de Bish y Boak (2001, Fig. 5) corresponderían a especies minerales intermedias entre la heulandita y la clinoptilolita.

Particularmente, Boak *et al.* (1991) proponen la existencia de dos tendencias composicionales distintas entre la clinoptilolita y la heulandita. La primera corresponde al *trend clinoptilolítico* con la fórmula estructural $M_6Al_6Si_{30}O_{72} \cdot 12H_2O$ donde $M = (Na, K, Ca_{0,5}, Mg_{0,5})$ y la razón $Si/(Al+Fe+3)$ variando entre 4 y 5,8. En tanto el *trend heulandítico* sigue la fórmula $M_6(MAl,Si)_6Al_6Si_{24}O_{72} \cdot 12H_2O$ con la razón $Si/(Al+Fe+3)$ variando entre 2,7 a 5,0 y $(Ca+Mg)/(Na+K) > 1$.

El análisis 11 presenta razón $Si/(Al+Fe+3)$ igual a 4,51, $(Ca+Mg)/(Na+K)=7,1$, en su fórmula estructural posee

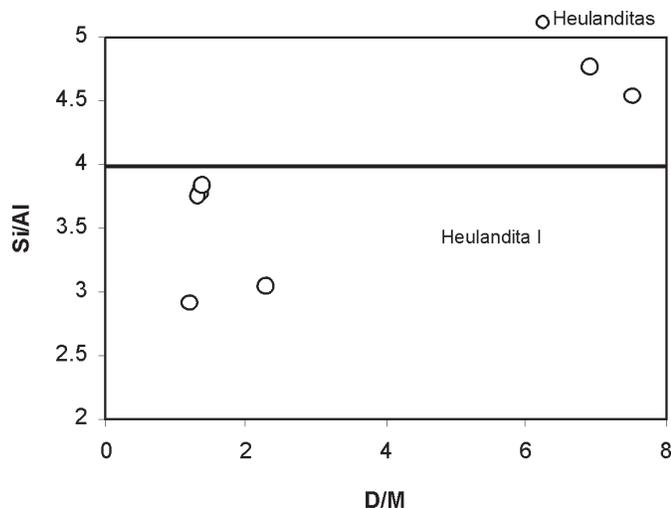


Figura 3: Proyección de análisis químicos de heulandita de Lonco Trapial en el diagrama D/M v/s Si/Al de Nativel *et al.* (1994).

$M=(Na_{0,292}, K_{0,068}, Ca_{2,585}, Mg_{0,008}), Al_{6,035}$ y el sitio tetraedral está ocupado por $Si_{29,547}$ y $Al_{0,453}$. Con estos antecedentes no es claro que esta composición pertenezca a algún trend como los propuestos por Boak *et al.* (1991). Algo similar ocurre con el análisis 12 con una razón $Si/(Al+Fe^{+3})$ igual a 4,78 y $(Ca+Mg)/(Na+K)=6,7$, su fórmula estructural es similar a la del análisis 11.

Gonnardita

La gonnardita se presenta como un agregado de cristales fibroso-radiales, de brillo sedoso, como relleno de amígdalas y, escasamente, en contacto con minerales arcillosos e interstratificados del tipo arcilla-celadonita. Al microscopio los cristales se presentan incoloros.

Química: La fórmula general de la gonnardita corresponde a $(Na,Ca)_{6-8}[(Al,Si)_{20}O_{40}] \cdot 12H_2O$ (Coombs *et al.* 1998), donde los cationes como Fe^{+3} , Mg, Ba, Sr, y K, se presentan en cantidades menores. Su estructura es similar a la de las otras ceolitas del grupo NAT (natrolita, esolecita, paranatrolita, tetranatrolita y mesolita) con Si y Al desordenados (Ross *et al.* 1992). Coombs *et al.* (1998) dan a la tetranatrolita y a la paranatrolita un estatus dudoso. Sin embargo, de acuerdo a Evans *et al.* (2000) esas especies minerales no han sido desacreditadas por el Comité de Nuevos Minerales y Nuevos Nombres de Minerales de la Asociación Mineralógica Internacional (IMA).

En el cuadro 3 se presentan algunos análisis químicos de especies clasificadas como gonnardita, tomados de la literatura, y una comparación con los resultados obtenidos en este trabajo para las muestras de Lonco Trapial. Se puede apreciar que las especies encontradas en Lonco Trapial presentan diferencias químicas con las gonnarditas tomadas de la literatura.

La proyección molar en el sistema $Si_4O_8-Na_{10}Al_{10}$

Cuadro 3: Comparación de distintos análisis químicos de gonnarditas.

	(A)	(B)	(C)	Lonco Trapial
SiO₂	43,45	43,20	44,58	41,74
Al₂O₃	27,91	27,90	25,22	29,04
CaO	6,95	3,61	6,94	11,01
Na₂O	8,69	13,16	7,66	5,75
H₂O	13,00	11,74	15,60	12,36
Total	100,00	99,61	100,00	99,90

(A) Chauv de Bergonne, Francia (H₂O por diferencia) correspondiendo a $Na_{2,22}Ca_{0,98}Al_{4,32}Si_{5,71}O_{20} \cdot 5,70H_2O$; (B) Aci Trezza, Sicilia, Italia; correspondiente a $Na_{3,5}Ca_{0,5}Al_{4,5}Si_{5,9}O_{20,8} \cdot 5,35H_2O$; (C) ¿? $Na_2CaAl_4Si_6O_{20} \cdot 7H_2O$. Los datos químicos de las gonnarditas de Lonco Trapial se obtuvieron en base al promedio de los análisis que caen dentro del campo (Fig. 6) de gonnarditas (9 datos) definido por Nawaz (1988).

$Si_{10}O_{40}-Ca_5Al_{10}Si_{10}O_{40}$ de los análisis químicos de las gonnarditas muestra (Fig. 6) que estos se agrupan en torno al campo delimitado por $Si/Al=1,5$ y la línea de tendencia entre la natrolita y la thomsonita (línea B en Fig. 6). Además se aprecia que las proyecciones de los análisis obtenidos en este estudio no se aproximan a la línea de tendencia entre NAT y TET. En consecuencia, no se puede argumentar que los datos presenten una dispersión y por tanto las composiciones de estas gonnarditas no pueden ser confundidas químicamente con la tetranatrolita.

Es necesario mencionar que Artioli y Galli (1999) proyectaron, en el mismo sistema aquí usado, 13 análisis de gonnardita obteniendo una nube de puntos entre las líneas de tendencia A y B. En base a esa dispersión estos autores argumentaron que la composición química de la tetranatrolita no puede distinguirse de la composición de la gonnardita y recomendaron su desacreditación. Empero se muestra aquí un grupo de análisis de composición química definida, no confundible con otra especie ceolítica del grupo NAT, cuyas características cristalinas (XRD) corresponden a gonnardita.

La composición química de la gonnardita, estudiada en este trabajo, es intermedia entre la de la natrolita ideal (NAT) y la de la thomsonita ideal (THO). Este resultado es concordante con la proyección de la gonnardita propuesta por Evans *et al.* (2000), la cual permite diferenciar químicamente a la gonnardita de la tetranatrolita. Además estos autores establecen que la thomsonita cristalizaría a partir de la gonnardita en soluciones progresivamente más ricas en el ión Ca. La gonnardita, según estos autores, cristaliza a temperaturas menores a 200°C.

Levyna

Esta es una ceolita poco común siendo escasas las referencias disponibles en la literatura. En Argentina, en particular, se reconoció su existencia en rocas del cerro China Muerta, en la provincia de Neuquén (Cortezzi 1973), asociadas a basaltos olivinícos de la Formación La Amarca del Cretácico inferior.

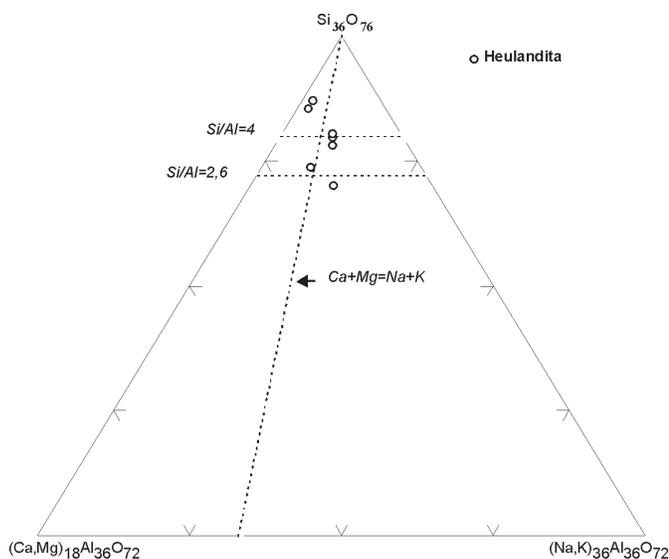


Figura 4: Proyección molar de análisis de heulandita de Lonco Trapial en el sistema $\text{Si}_{36}\text{O}_{76}$ - $(\text{Ca},\text{Mg})_{18}\text{Al}_{36}\text{O}_{72}$ - $(\text{Na},\text{K})_{36}\text{Al}_{36}\text{O}_{72}$ de Alietti *et al.* (1977).

En las amígdalas de las lavas de la Formación Lonco Trapial se presenta como parches, con formas tabulares irregulares, y en el interior de las plagioclasas (observaciones SEM). Es incoloro en sección transparente y presenta baja birrefringencia. Posee un bajo relieve y un hábito pseudo tabular dado por su carácter de reemplazo de plagioclasas.

Química: La fórmula general según Coombs *et al.* (1998) es $(\text{Ca}_{0,5}\text{Na},\text{K})_6[\text{Al}_6\text{Si}_{12}\text{O}_{36}] \cdot \sim 17\text{H}_2\text{O}$. Los cationes extra estructurales dominantes son Ca-Na, con menor K y, en algunos casos, cantidades menores de Sr o Ba. La relación Si:Al es también variable (Galli *et al.* 1981).

Se distinguen dos miembros extremos: levyna cálcica (R entre 0.62–0.70), de fórmula dada por $\text{Ca}_3[\text{Al}_6\text{Si}_{12}\text{O}_{36}] \cdot 17\text{H}_2\text{O}$, y levyna sódica (R entre 0.65–0.68) en la cual el Na es el catión extra estructural más importante.

El análisis de microsonda obtenido en esta especie (análisis 17, ver cuadro 5) indica un valor para la razón R de 0,68 lo cual es coherente con los valores típicos expuestos más arriba, aunque no es posible establecer si esta es una variedad cálcica o sódica.

Analcima

Esta ceolita fue encontrada en las cavidades de las lavas, aislada o en asociación con heulandita. Al microscopio los cristales se presentan incoloros apareciendo extinguidos o casi extintos con luz polarizada. Poseen un marcado clivaje unidireccional.

Química: Su fórmula ideal corresponde a $\text{Na}[\text{AlSi}_2\text{O}_6] \cdot \text{H}_2\text{O}$, pero si bien en muchos casos el Na es el catión predominante, es posible que la analcima forme una serie

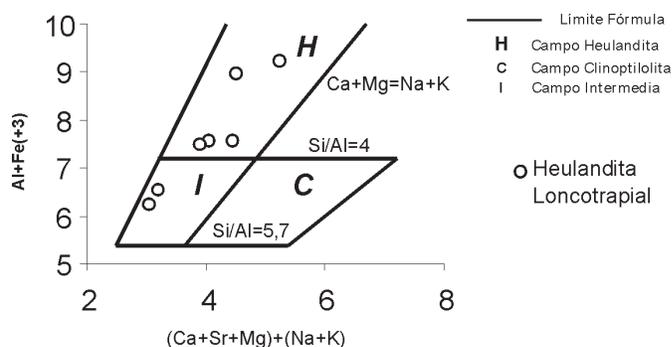


Figura 5: Proyección de análisis químicos de heulanditas en amígdalas de lavas de la Formación Lonco Trapial, en el diagrama $(\text{Ca}+\text{Sr}+\text{Mg})+(\text{Na}+\text{K})$ v/s $(\text{Al}+\text{Fe}^{+3})$ de Bish y Boak (2001). En este diagrama los campos denominados como H, I y C fueron determinados a partir de análisis químicos y estudios de estabilidad termal en heulanditas de diversos ambientes geológicos.

continua con pollucita y con wairakita (Seki y Oki 1969; Seki 1971; Cho y Liou 1987). En muchos casos varía ampliamente entre 0.59 y 0.73 (e.g., Coombs y Whetten 1967).

Al graficar los datos de las analcimas de Lonco Trapial, en el diagrama de Seki y Oki (1969) se observa la presencia de dos grupos (Fig. 7). Este diagrama muestra la posible solución sólida entre analcima y wairakita, aunque los datos de estos autores no son suficientes para validar la hipótesis de una solución sólida completa.

El grupo de analcimas de Lonco Trapial se agrupa en el extremo sódico del diagrama entre analcima ideal (Am) y albíta hidratada (Ab'). Las analcimas – wairakita de Seki y Oki (1969), se ubican entre los extremos wairakita (Wa) y Ab' , mientras que las analcimas-wairakita de Lonco Trapial se ubican entre los extremos natrolita (Nat) y Wa. Las especies denominadas en este estudio analcima-wairakita corresponden a analcima en las cuales la presencia de wairakita se expresa como proporción molecular con valor variable, obtenidos por comparación con T-1, T-2 y T-3, entre Wa_{10} a Wa_{40} .

Minerales Micáceos y Arcillosos

Los metadominios de estos filosilicatos son principalmente bordes de amígdalas y reemplazos en cristales primarios como olivino y ortopiroxeno. Al microscopio se reconocieron preliminarmente celadonita y esmectita, en tanto que las observaciones BSE (Fig. 8) muestra el paso gradual desde un borde claro (esmectita), pasando por una franja grisácea, a uno más oscuro (celadonita) ubicada hacia el centro de las amígdalas.

Los análisis de microsonda de las distintas especies micáceas y arcillosas se pueden ver en el cuadro 5. En el cuadro 4 se presentan análisis promedio.

Al proyectar los análisis de microsonda en el diagrama de cationes no interfoliares (NIC) *versus* Al total (Schiffman y Fridleifsson 1991) se puede apreciar (Fig. 9) que la gran mayoría de los análisis corresponden a celadonita posiblemente con algún contenido menor de

Cuadro 4: Análisis de microsonda promedio de minerales micáceos y arcillosos de Lonco Trapial.

	Celadonita	Montmorillonita
	Ox ⁽¹⁾ .22	Ox.22
	n ⁽²⁾ =13	n=6
SiO₂	55,17	46,03
TiO₂	0,14	0,22
Al₂O₃	5,91	8,72
FeO	13,78	14,66
MnO	0,09	0,07
MgO	7,44	16,96
CaO	0,39	2,06
Na₂O	0,15	0,1
K₂O	8,14	1,25
Total	91,2	90,09
Si	8,119	6,807
Ti	0,015	0,028
Al	1,026	1,524
Fe	1,696	1,87
Mn	0,011	0,009
Mg	1,636	3,705
Ca	0,063	0,327
Na	0,043	0,028
K	1,528	0,241
Total	14,138	14,538

(1) Ox. indica el número de óxidos empleado en el cálculo de las abundancias catiónicas.

(2) n indica el número de análisis usados en el promedio.

montmorillonita (análisis 26 a 38, Cuadro 5). A su vez los análisis 39 a 44 (Cuadro 5) se acercan a la trayectoria saponita-beidellita (esmetitas dioctaédricas).

Los análisis 39 a 44 (ver Cuadro 5) muestran que sus fórmulas estructurales presentan ocupancias catiónicas variables. El catión Si presenta ocupancia Si_{7,3-6,4}, el catión Al^{IV} presenta ocupancia (Al^{IV})_{1,48-0,69}, el catión Al^{VI} presenta ocupancia (Al^{VI})_{0,63-0,00} y el catión Mg presenta ocupancia Mg_{4,82-2,47}. Estos valores indican que estos análisis representan a minerales arcillosos dioctaédricos pertenecientes a la serie montmorillonita-beidellita la cual, según Deer *et al.* (1992), presenta fórmula estructural variable con ocupancias catiónicas entre Si₈(Al^{VI})_{3,3}Mg_{0,7} y Si_{7,3}(Al^{IV})_{0,7}(Al^{VI})₄.

La ocupancia del catión Mg (entre 4.28-2.47) no corresponde con lo común para la serie montmorillonita-beidellita, lo cual se debería a la posible presencia de algún mineral arcilloso trioctaédrico (los cuales presentan ocupancias Mg₆) o la posible presencia, en los minerales arcillosos dioctaédricos, de alguna proporción de capas trioctaédricas.

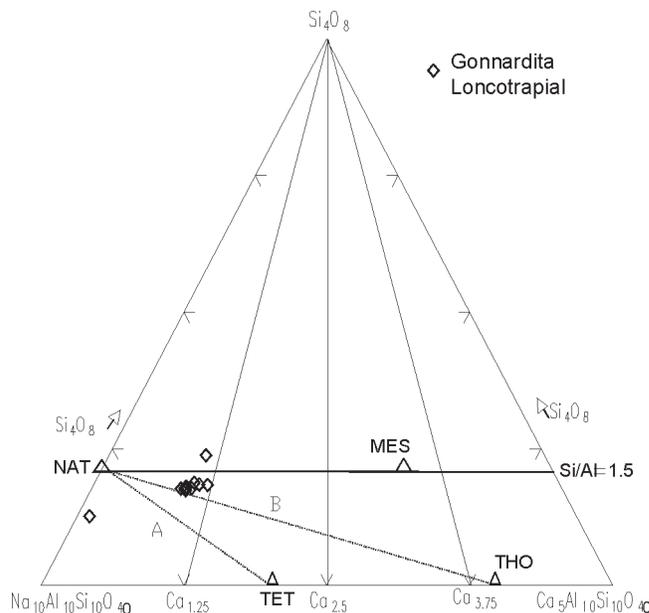


Figura 6: Proyección molar de análisis químicos de gonnarditas en el sistema Si₄O₈-Na₁₀Al₁₀Si₁₀O₄₀-Ca₅Al₁₀Si₁₀O₄₀ de Ross *et al.* (1992). NAT: proyección fórmula ideal de natrolita, TET: proyección fórmula ideal tetranatrolita, THO: proyección fórmula ideal de thomsonita, MES: proyección fórmula ideal de mesolita. Las líneas finamente puntuadas A y B corresponden a líneas de tendencia entre composiciones ideales de natrolita y tetranatrolita, y natrolita y thomsonita respectivamente.

Asociación mineralógica y facies metamórfica

Las especies determinadas permiten establecer una asociación mineralógica compuesta por ceolitas calco-sódicas (gonnardita, levyna), sódicas (analcima) y de la serie analcima-wairakita, calco-potásicas (heulandita) y minerales micáceos (celadonita) y arcillosos (montmorillonita). Esta asociación mineralógica pertenece a la facies ceolita, asociaciones similares han sido descritas anteriormente por diversos investigadores. Así, por ejemplo, Wise and Eugster (1964) mencionan que la celadonita es ampliamente reconocida en la facies ceolita y en algunas asociaciones con prehnita. A su vez Boles y Coombs (1975) describen la asociación celadonita-clorita-heulandita en tobas síliceas triásicas de Hokonui (Nueva Zelanda). Por último, Li *et al.* (1997) proponen la asociación celadonita-minerales arcillo aluminosos ± ceolita cálcica como asociación alternativa para la facies ceolita. Diversos estudios han identificado a esta facies metamórfica en rocas jurásicas de la Provincia de Chubut (Vattuone *et al.* 2000, Estrada y Nilni, 2003).

Discusión

La falta de evidencias que indiquen alguna relación temporal, por ejemplo ceolitas reaccionando con otros minerales, permite inferir un único evento metamórfico

Cuadro 5: Análisis de Microsonda de minerales metamórficos hallados en Lonco Trapial.

Análisis N°	Gonnarditas									Heulanditas									Levina	Analcimas					Analcimas-Wairakitas		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	19		19	20	21	22	23	24	25	
SiO ₂	40,85	42,35	42,35	41,53	41,77	41,66	41,93	41,63	41,57	63,00	70,33	72,56	57,80	66,45	65,84	67,95	55,64	58,04	57,98	57,03	57,18	57,03	47,46	47,88	49,02		
TiO ₂	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,02	0,13	0,02	0,00	0,00		
Al ₂ O ₃	29,07	28,79	29,22	29,40	29,19	28,64	28,81	29,04	29,24	17,46	13,10	12,87	16,76	14,88	14,81	14,97	22,20	21,97	21,85	21,09	20,72	21,19	26,32	26,66	26,85		
Fe ₂ O ₃	0,09	0,00	0,04	0,00	0,00	0,08	0,06	0,00	0,02	0,09	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,11	0,09	0,09	0,08	0,05	0,05	0,04	0,00	0,17		
MnO	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,08	0,16	0,01	0,03	0,08	0,06	0,13	0,02	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,01	0,00	0,00		
MgO	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,03	0,00	0,01	0,06	0,01	0,00	0,00	0,05	0,07	0,05	0,00	0,00	0,00	0,03	0,02	0,02	0,00	0,00	0,03		
CaO	12,13	11,09	10,65	11,33	10,77	10,20	10,71	11,01	11,23	6,21	5,74	5,55	4,98	4,52	4,52	4,52	10,06	0,06	0,02	0,00	0,03	0,12	0,61	4,91	5,63		
Na ₂ O	5,21	5,58	5,87	5,32	5,99	6,04	5,99	6,02	5,72	1,38	0,36	0,37	0,82	0,45	0,65	0,62	0,60	14,73	14,18	13,25	13,34	13,19	15,60	11,39	9,37		
K ₂ O	0,00	0,01	0,05	0,06	0,00	0,02	0,03	0,03	0,04	0,28	0,13	0,12	2,56	2,27	2,32	1,95	1,72	0,02	0,00	0,00	0,08	0,07	0,00	0,04	0,00		
BaO										0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17										
SiO										0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90										
SUMA	87,43	87,84	88,19	87,68	87,75	86,67	87,63	87,74	87,85	88,57	90,03	91,47	83,39	88,77	88,73	90,25	90,35	94,99	94,12	91,48	91,51	91,79	90,05	90,88	91,06		
Si	21,595	22,155	22,066	21,799	21,910	22,091	22,029	21,874	21,808	27,441	29,649	29,982	27,108	28,796	28,650	28,896	12,279	32,873	33,042	33,318	33,433	33,229	28,962	28,867	29,257		
Ti	0,010	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,010	0,000	0,008	0,000	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,032	0,000	0,000	0,007	0,058	0,011	0,000	0,000		
Al	18,112	17,748	17,938	18,189	18,041	17,896	17,841	17,980	18,077	8,962	6,510	6,266	9,265	7,599	7,504	7,504	5,744	14,666	14,673	14,520	14,282	14,551	18,932	18,947	18,888		
Fe ³⁺	0,037	0,000	0,015	0,000	0,000	0,030	0,022	0,000	0,007	0,031	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000	0,018	0,019	0,040	0,040	0,036	0,020	0,020	0,017	0,000	0,076		
Mn ²⁺	0,021	0,000	0,000	0,021	0,000	0,000	0,040	0,000	0,000	0,030	0,057	0,002	0,013	0,030	0,023	0,047	0,004	0,000	0,000	0,000	0,033	0,000	0,004	0,000	0,000		
Mg	0,000	0,000	0,016	0,000	0,020	0,021	0,000	0,005	0,000	0,040	0,008	0,000	0,000	0,029	0,043	0,032	0,000	0,000	0,000	0,024	0,021	0,017	0,000	0,000	0,022		
Ca	6,872	6,214	5,943	6,373	6,051	5,796	6,199	6,314	2,898	2,898	2,594	2,456	2,689	2,131	2,324	2,061	2,378	16,038	16,013	15,012	15,119	14,900	18,457	13,315	10,837		
Na	5,345	5,661	5,924	5,410	6,095	6,207	6,102	6,136	5,821	1,165	0,293	0,293	0,747	0,381	0,548	0,514	0,257	16,176	15,666	15,012	15,119	14,900	0,398	3,170	3,599		
K	0,000	0,007	0,035	0,039	0,000	0,016	0,021	0,021	0,026	0,157	0,068	0,063	1,529	1,257	1,289	1,058	0,484	0,012	0,000	0,000	0,063	0,050	0,000	0,033	0,000		
Ba										0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029										
Sr										0,226	0,226	0,226	0,226	0,226	0,226	0,226	0,226										
Total	51,993	51,795	51,937	51,831	52,117	52,057	52,091	52,215	52,063	40,978	39,496	39,318	41,630	40,479	40,726	40,384	21,195	63,837	63,435	62,911	62,999	62,902	66,781	64,333	62,679		
Si/Al	1,192	1,248	1,230	1,198	1,214	1,234	1,235	1,217	1,206	3,062	4,554	4,785	2,926	3,789	3,773	3,851	2,127	2,241	2,252	2,295	2,341	2,284	1,530	1,524	1,549		
%E	-4,920	-1,916	0,423	-0,036	-1,074	0,385	-1,724	-3,154	-2,113	15,749	6,316	8,794	12,535	16,379	6,531	18,404	5,380	-9,577	-6,247	-3,353	-6,298	-3,735	-1,578	-3,764	4,895		
Ca/Ca+Na	0,563	0,523	0,501	0,541	0,498	0,483	0,497	0,503	0,520	0,713	0,898	0,893	0,782	0,848	0,809	0,801	0,900	0,002	0,001	0,000	0,001	0,005	0,021	0,192	0,249		
D	6,894	6,214	5,959	6,395	6,071	5,817	6,066	6,204	6,314	2,957	2,650	2,450	2,693	2,183	2,381	2,133	2,639	0,038	0,013	0,024	0,074	0,094	0,026	0,198	0,231		
M	5,345	5,667	5,959	5,449	6,095	6,223	6,124	6,157	5,847	1,317	0,361	0,356	2,288	1,633	1,831	1,566	0,741	16,188	15,666	15,012	15,182	14,950	1,154	0,834	0,677		
R	0,544	0,555	0,552	0,548	0,548	0,552	0,553	0,549	0,547	0,754	0,820	0,827	0,745	0,791	0,790	0,794	0,68	0,691	0,692	0,696	0,701	0,695	0,605	0,604	0,608		

Análisis N°	Celadonitas																	Montmorillonita-Celadonita									
	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	43	44						
SiO ₂	59,20	59,99	57,93	51,81	56,48	52,11	54,16	52,35	55,55	50,18	55,38	55,67	48,90	47,31	43,36	50,98	48,70	36,95	48,70	36,95	48,70	36,95					
TiO ₂	0,14	0,12	0,07	0,12	0,24	0,17	0,17	0,19	0,10	0,13	0,21	0,02	0,00	0,15	0,00	0,17	0,10	0,92	0,10	0,92	0,10	0,92					
Al ₂ O ₃	7,47	7,30	5,27	10,42	3,09	4,17	8,01	4,05	5,81	5,25	4,86	6,58	4,49	9,00	8,83	10,15	7,88	9,47	7,06	9,47	7,06	9,47					
FeO	11,59	12,34	13,29	8,86	16,64	18,75	11,47	15,66	13,24	15,06	12,77	14,15	15,28	12,04	10,19	15,75	13,48	12,74	23,73	12,74	23,73	12,74					
MnO	0,19	0,13	0,25	0,03	0,13	0,00	0,08	0,06	0,06	0,13	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,24	0,01	0,17	0,01	0,17	0,01	0,17					
MgO	7,52	7,59	7,68	5,98	7,70	6,15	8,92	7,94	6,96	7,19	8,15	6,96	8,00	20,59	21,53	18,98	14,73	16,50	9,43	16,50	9,43	16,50					
CaO	0,31	0,29	0,31	0,90	0,33	0,51	0,93	0,26	0,27	0,24	0,31	0,35	0,10	2,76	1,95	1,86	1,65	2,34	1,83	2,34	1,83	2,34					
Na ₂ O	0,02	0,00	0,09	0,08	0,00	0,08	0,00	0,00	0,60	0,19	0,16	0,63	0,00	0,08	0,05	0,05	0,01	0,40	0,02	0,40	0,02	0,40					
K ₂ O	5,36	8,84	9,80	5,23	9,13	8,23	6,57	9,41	8,23	9,07	7,55	8,82	9,53	0,07	0,08	0,51	3,70	1,44	1,72	1,44	1,72	1,44					
Total	91,80	96,61	94,69	83,43	93,75	94,51	88,35	91,74	87,62	92,80	84,11	93,07	93,14	93,44	90,08	90,90	92,60	91,85	81,65	91,85	81,65	91,85					
Si	8,314	8,209	8,236	7,974	8,258	8,213	7,806	8,103	8,068	8,136	8,041	8,041	8,153	6,829	6,792	6,416	7,306	6,981	6,517	6,981	6,517	6,981					
Ti	0,015	0,012	0,008	0,014	0,026	0,018	0,019	0,022	0,011	0,012	0,015	0,023	0,002	0,000	0,016	0,000	0,018	0,010	0,121	0,010	0,121	0,010					
Al	1,236	1,177	0,884	1,889	0,533	0,714	1,414	0,714	1,055	0,906	0,919	1,125	0,775	1,481	1,494	1,770	1,332	1,599	1,467	1,599	1,467	1,599					
Fe	1,360	1,412	1,580	1,140	2,034	2,281	1,437	1,960	1,706	1,845	1,711	1,718	1,871	1,406	1,223	1,949	1,615	1,527	3,500	1,527	3,500	1,527					
Mn	0,022	0,015	0,030	0,004	0,017	0,000	0,010	0,011	0,008	0,016	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,030	0,001	0,021	0,001	0,021	0,001	0,021					
Mg	1,575	1,549	1,628	1,373	1,678	1,333	1,993	1,770	1,600	1,569	1,946	1,506	1,745	4,286	4,608	4,185	3,147	3,525	2,480	3,525	2,480	3,525					
Ca	0,047	0,043	0,047	0,148	0,051	0,079	0,150	0,041	0,040	0,038	0,054	0,055	0,015	0,413	0,299	0,295	0,253	0,359	0,345	0,359	0,345	0,359					
Na	0,006	0,000	0,025	0,025	0,000	0,021	0,024	0,000	0,180	0,055	0,050	0,178	0,000	0,020	0,014	0,014	0,003	0,110	0,005	0,110	0,005	0,110					
K	0,961	1,544	1,778	1,026	1,704	1,52																					

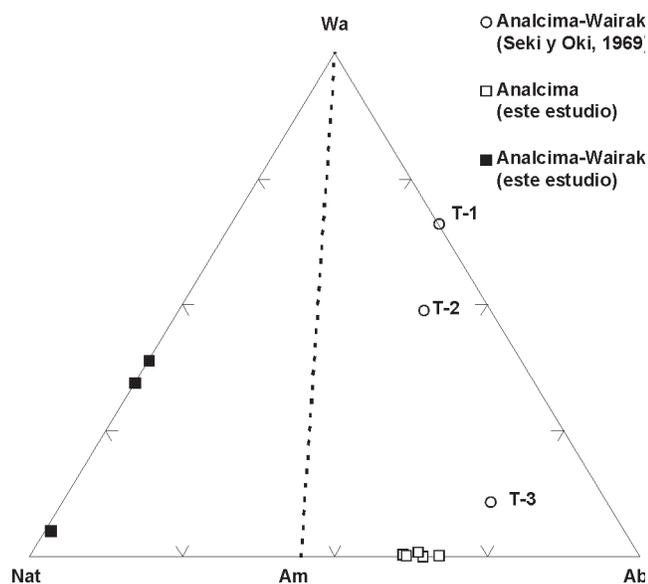


Figura 7: Proyección Molar de análisis químicos de analcimas y analcimas-wairakitas en el sistema $Ca_8Al_{16}Si_{32}O_{96} \cdot pH_2O - Na_{19.2}Al_{19.2}Si_{28.8}O_{96} \cdot mH_2O - Na_{12}Al_{12}Si_{36}O_{96} \cdot nH_2O$ de Seki y Oki (1969). Wairakita (Wa)- Natrolita (Nat)-Albita Hidratada (Ab) y Am: analcima ideal ($Na_{16}Al_{16}Si_{32}O_{96} \cdot qH_2O$). Se incluyen los análisis químicos T-1, T-2, T-3 de analcimas-wairakitas obtenidas por estos autores en tobas basálticas y tobas andesíticas de las Montañas Tanzawa (Japón). T-1 posee un 66% de wairakita molecular (Wa_{66}), T-2 corresponde a Wa_{49} y T-3 corresponde a Wa_{11} . No se incluyen los distintos campos de vacancia propuestos por aquellos autores.

con un carácter pervasivo como lo indica la completa alteración de olivinos y piroxenos.

Las ceolitas identificadas indican que estas se han formado en los niveles de baja temperatura de un sistema geotermal. Kristmannsdóttir y Tómasson (1978), en sistemas geotermales de Islandia, ubican la asociación mineralógica que caracteriza la zona mesolita-escolecita (zona 1, Fig. 10) en el rango de temperatura entre 70° y 90°C, mientras que la zona de la estilbita la ubican en el rango de temperaturas entre 90° y 110°C.

A su vez Ijima (1995, en Utada 2001), en sistema geotermales de Japón, ubica la zona de la heulandita-analcima (zona III, Fig. 11) en un rango de temperaturas entre 84° y 123°C.

En consideración a la ausencia de laumontita y wairakita en la asociación mineralógica, las ceolitas de Lonco Trapial pueden ser asignadas a la zona 2, y parte de la zona 3, del esquema de zonas ceolíticas de áreas geotermales de Islandia (Kristmannsdóttir y Tómasson 1978), y a la parte superior de la zona III propuesta por Ijima (1995, en Utada 2001). Ello ubicaría la temperatura de formación de estas ceolitas en un rango entre 80° y 100°C. Este dato concuerda con el rango de temperatura de formación propuesto por Estrada y Nillni (2003), para las ceolitas muestreadas por estos autores en Paso de Indios (Fig. 1).

La grilla petrogénica de Liou *et al.* (1991, fig.1) indica que la asociación ceolítica pudo haber sido generada a

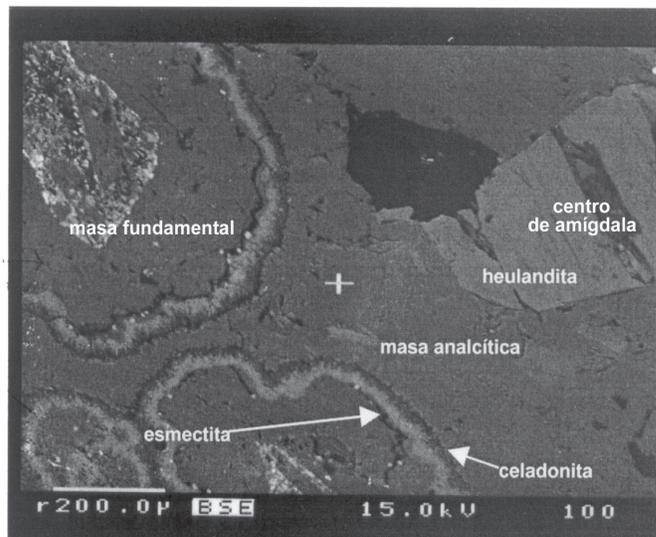


Figura 8: Imagen electrones retrodispersados (BSE) de amígdala rellena con esmectita (borde claro)-celadonita (borde oscuro). En el centro de la amígdala se aprecia un cristal de heulandita rodeado por masa analcítica (de composición equivalente al de las analcimas presentadas en este trabajo). La barra en la imagen mide 200 micrones (= 0.2mm).

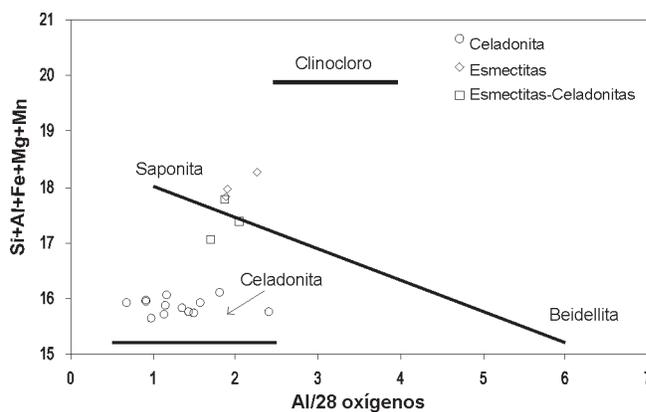


Figura 9: Proyección de análisis de microsonda de minerales micáceos y arcillosos en el diagrama NIC v/s Al (Schiffman y Fridleifsson, 1991).

una presión sobre los 500 bars y una temperatura máxima de ca. 180°C. En consecuencia, esto permite considerar condiciones máximas de temperatura mayores a la temperatura máxima determinada a través de los esquemas de zonas ceolíticas utilizados en este trabajo.

El fluido que participó en el evento metamórfico hidrotermal fue posiblemente muy pobre en CO₂ como lo sugiere la escasa presencia de calcita, alojada principalmente en plagioclasa y en algunos bordes de amígdalas. El rol del CO₂ en el metamorfismo de bajo grado, ha sido objeto de diversos estudios (Zen, 1961; Thompson 1971; Digel y Ghent 1994), los cuales concuerdan en señalar que la pérdida de la estabilidad de las ceolitas cálcicas y los silicatos cálcico-aluminosos hidratados a expensas de los minerales arcillosos y carbonatados, en rocas metamórficas de muy bajo grado, se debería a fluidos con algún contenido de CO₂.

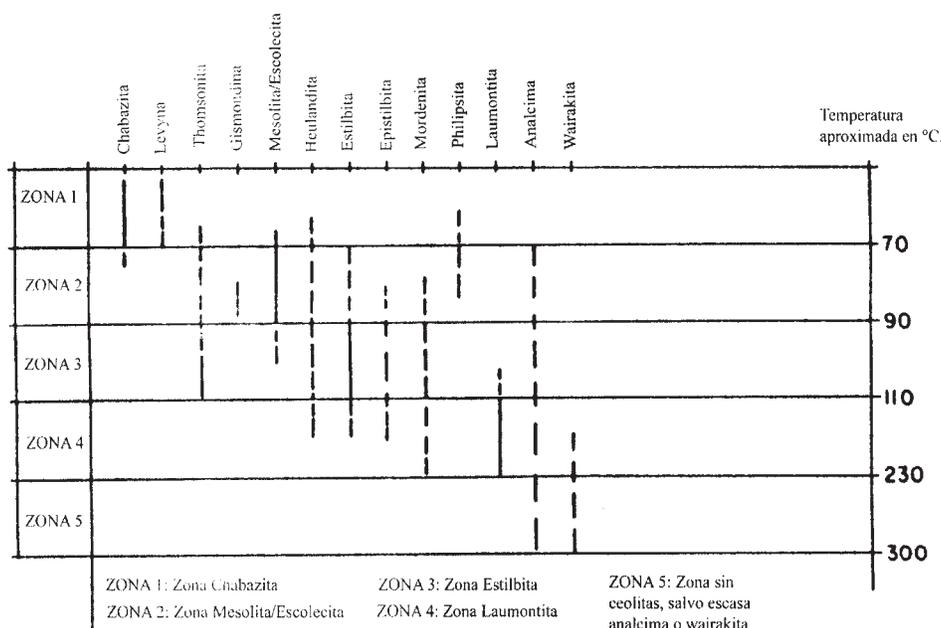


Figura 10: Esquema de distribución de zonas ceolíticas encontradas en áreas geotermales de Islandia (modificado de Kristmannsdóttir y Tómasson 1978).

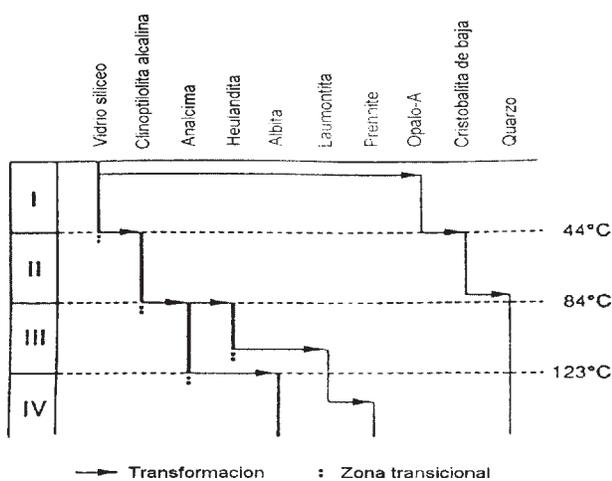


Figura 11: Zonas minerales asociadas a la variación de temperatura definidas por Ijima (1995, en Utada 2001), para campos geotermales en Japón.

La zonación observada en las amígdalas de mayor tamaño permite inferir la variación composicional del fluido que intervino en el evento metamórfico hidrotermal. En estas amígdalas se aprecia la zonación caracterizada (Fig. 8) por heulandita, en el centro, rodeada por una masa de analcita, estas ceolitas están rodeadas en los bordes de las amígdalas por una franja de celadonita, montmorillonita y una mezcla de estas fases minerales.

Un fluido primario de carácter neutro, elevada $a(K_2O)$ y elevada $a(MgO)$, condicionado por la composición de las lavas de afinidad calcoalcalina ricas en potasio y magnesio, podría explicar la precipitación en la etapa 1 de celadonita y montmorillonita en los márgenes de las amígdalas (Fig. 12).

Luego de la precipitación de estos minerales micáceos y arcillosos, el magnesio y el potasio se habrían agotado así, el resultante (Fig. 12) es un fluido alcalino de moderada $a(SiO_2)$ y alta $a(Na_2O)$, el cual en la etapa 2 explicaría la precipitación de la masa de analcita que las rodea. En este contexto la precipitación de gonnardita se explicaría en la etapa 3, por un aumento progresivo del contenido de Ca^{+2} , obtenido de la albitización de la plagioclasa primaria cálcica y la alteración del piroxeno.

En la etapa 4, más tardía, en presencia de un fluido empobrecido en calcio, sodio y magnesio se produciría la formación de heulandita en el centro de las amígdalas, de mayor tamaño, posiblemente favorecida por fluido de alta $a(SiO_2)$ y pH alcalino a neutro (Bowers y Burns 1990). Esta hipotética evolución química de la fase fluida, es expuesta en un esquema de etapas, en esta etapa 1 es la más antigua y la etapa 4 la más joven (Fig. 12).

Conclusiones

1. La asociación mineral compuesta por ceolitas cálcico-sódicas, cálcicas, sódicas y minerales micáceos y arcillosos dioctaédricos presente en las amígdalas, de lavas de la Formación Lonco Trapial, pertenece a la facies ceolita y su origen estaría asociado a un sistema geotermal de baja temperatura.

2. La asociación mineralógica establecida permite acotar su temperatura de formación en un rango comprendido entre 80° y 180°C.

3. La asociación mineralógica habría sido generada en un único evento metamórfico hidrotermal que afectó a las rocas de la Formación Lonco Trapial. Bajo condiciones oxidantes en un comienzo, este evento, se caracterizó por la presencia de una fase fluida, de muy bajo contenido de

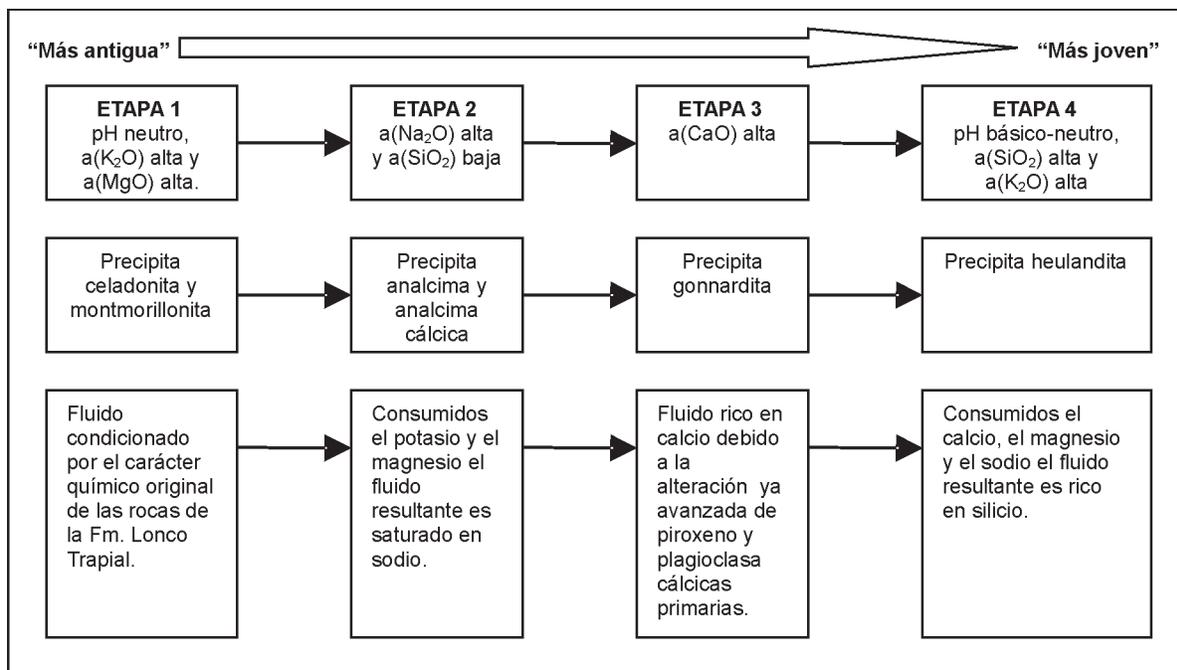


Figura 12: Diagrama propuesto en este trabajo para la evolución química de la fase fluida.

X_{CO_2} , la cual posiblemente varió desde un carácter neutro con baja $a(SiO_2)$ y $a(K_2O)$ moderada que permitió la precipitación de montmorillonita, celadonita y analcima a un carácter neutro-alcálico con $a(SiO_2)$ alta que posibilitó la formación de heulandita.

Agradecimientos

Los autores agradecen las facilidades otorgadas por el Laboratorio de Microscopía Electrónica del Departamento de Geología (U. de Chile) y por el Laboratorio de Difracción de Rayos X del Servicio Nacional de Geología y Minería-Chile. Agradecen también a la Dra. M.E. Vattuone y a una revisora anónima por sus valiosos comentarios y sugerencias. El Sr. Jaime Martínez (Dpto. Geología, U. de Chile) realizó los análisis químicos de zeolitas por vía húmeda. Este trabajo se enmarca en el Proyecto de Cooperación Internacional SETCIP-CONICYT, N°1999-2-197.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aiotti, A., Brigatti, M.F., Poppi, L., 1977. Natural Ca-rich clinoptilolites (heulandite group 3): new data and review. *Neues Jahrbuch Mineralogie Monatsheft*, 11: 493-501.
- Artioli, G. y Galli, E., 1999. Gonnardite: Re-examination of holotype material and discreditation of tetranatrolite. *American Mineralogist*, 84: 1445-1450.
- Bayliss, P., Erd, R., Mrose, M., Roberts, A., Sabina, A., 1993. *Search Manual Mineral Powder Diffraction Databook*, sets 1-42. International Center for Diffraction Data, 781pp., Pennsylvania.
- Bish, D.L. y Boak J.M., 2001. Clinoptilolite-Heulandite Nomenclature. In: Bish, D.L. and Ming, D.W. (Eds.): *Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Applications*. Mineralogical Society of America. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 45: 207-216.
- Boak, J.M., Cloke, P., Broxton D., 1991. Mineral chemistry of clinoptilolite and heulandite in diagenetically altered tuffs from Yucca Mountain, Nye County, Nevada. *Geological Society American. Program with Abstracts*, 23A: 186.
- Boles, J.R., 1972. Composition, optical properties, cell dimensions and thermal stability of some heulandite group zeolites. *American Mineralogist*, 2: 1463-1493.
- Boles, J.R. y Coombs, D.S., 1975. Mineral Reactions in Zeolitic Triassic Tuff, Holonui Hills, New Zealand. *Geological Society of America Bulletin*, 86: 163-173.
- Bowers, T.S. y Burns, R.J., 1990. Activity diagrams for clinoptilolite: susceptibility of this zeolite to further diagenetic reactions. *American Mineralogist*, 75: 601-619.
- Cho, M. y Liou, J. G., 1987. Prehnite-pumpellyite to greenschist facies transition in the Karmutsen metabasites, Vancouver Island, B. C. *Journal of Petrology*, 28: 417-443.
- Coombs, D.S., Alberti, A., Armbruster, T., Artioli, G., Colella, C., Galli, E., Grice, J., Liebau, F., Mandarino, J., Minato, H., Nickel, E., Passaglia, E., Peacor, R., Quartieri, S., Rinaldi, R., Ross, M., Sheppard, R., Tillmanns, E., and Vezzalini G., 1998. Recommended nomenclature for zeolite minerals: Report of the subcommittee on zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *American Mineralogist Special Feature* (version 2; uploaded 10/15/98; very slight differences): 1-28.
- Coombs, D. S. y Whetten, J. T., 1967. Composition of analcima from sedimentary and burial metamorphic rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 78: 269-282.
- Cortelezzi, C., 1973. Estudio de Wairakita y Levynita en las rocas Cerro China Muerta, Provincia de Neuquen, Republica Argentina. *Revista del Museo de la Plata*, Tomo 9: 1-6.
- Cortíñas, J.S., 1996. La cuenca de Somuncurá-Cañadón Asfalto: sus límites, ciclos evolutivos del relleno sedimentario y posibilidades exploratorias. *Actas 13° Congreso Geológico Argentino y 3°*

- Congreso de Exploración de Hidrocarburos, 1: 147-163, Buenos Aires.
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1992. An introduction to the Rock-forming mineral, second edition. Longman Scientific & Technical, 696 pp., London.
- Digel, S. y Ghent, E.D., 1994. Fluid-mineral equilibria in prehnite-pumpellyite to greenschist facies metabasites near Flin-Flon, Manitoba, Canada: implications for petrogenetic grids. *Journal of Metamorphic Geology*, 12: 467-477.
- Estrada, E. y Nillni, A., 2003. Mineralogía de ceolitas de los basaltos de la Formación Cañadón Asfalto, Paso de Indios, Chubut. *Naturalia Patagónica* (en prensa).
- Evans, H., Konner, J., Ross, M., 2000. The crystal structure of tetranatrolite from Mont Saint-Hilaire, Québec, and its chemical and structural relationship to paranatrolite and gonnardite. *American Mineralogist*, 85: 1805-1815.
- Galli, E., Rinaldi, R. and Modena, C., 1981. Crystal chemistry of levynes. *Zeolites*, 1: 157-160.
- Gill, J.B., 1981. Orogenic andesites and plate tectonics. Springer Verlag, 358 pp., Berlín.
- Haller, M.J., Demichelis, A.H., Cabreros, J.B., Pardo, M.I., 1990. Litología y geoquímica del vulcanismo Triásico-Jurásico en la Patagonia extrandina y su relación con el rifting gondwánico. *Actas 11º Congreso Geológico Argentino*, 1: 56-59, San Juan.
- Kristmannsdóttir, H. y Tómasson, J., 1978. Zeolites zones in geothermal areas in Iceland. In: Sand L.B. and Mumpton F.A. (Eds.): *Natural Zeolites*: 277-284, Oxford.
- Lesta, P.J. y Ferello, R., 1972. Región extraandina de Chubut y norte de Santa Cruz. En: Leanza A. F. (Ed.): *Geología Regional Argentina*: 601-653. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.
- Li, G., Peacor, D., Coombs, D.S., Kawachi, Y., 1997. Solid solution in the celadonite family: The new minerals ferroceldonite, $K_2Fe_2+2Fe_2+3Si_8O_{20}(OH)_4$ and ferroaluminoceldonite $K_2Fe_2+2Al_2Si_8O_{20}(OH)_4$. *American Mineralogist*, 82: 503-511.
- Liou, J.G., De Capitani, C., Frey, M., 1991. Zeolite Equilibria in the system $CaAl_2Si_2O_8 - NaAlSi_3O_8 - SiO_2 - H_2O$. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 34: 293-301.
- Nativel, P., Verdier, O., Giret, A., 1994. Nature et diversité des Zeolites de Kerguelen. *Memoire de la Societé Géologique de France*, 166: 31-45.
- Nullo, F.E., 1983. Descripción geológica de la Hoja 45c, Pampa de Agnia. Servicio Geológico Nacional, Boletín 199, 94 pp., Buenos Aires.
- Page, R. y Page, S., 1993. Petrología y significado tectónico del Jurásico volcánico del Chubut Central. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 48 (1): 41-58.
- Passaglia, E., 1970. The crystal chemistry of chabazites. *American Mineralogist*, 55: 1278-1301.
- Ross, M., Flohr, M. J. K. and Ross, D. R., 1992. Crystalline solution series and order-disorder within the natrolite mineral group. *American Mineralogist*, 77: 685-703.
- Seki, Y., 1971. Wairakite-analcime solid solution as an indicator of water pressures in low-grade metamorphism. *Journal of the Geological Society of Japan*, 77: 667-674.
- Seki, Y. y Oki, Y., 1969. Wairakite-Analcime solid solutions from low-grade metamorphic rocks of the Tanzawa Mountains, Central Japan. *American Mineralogist*, 6 (1-2): 36-45.
- Schiffman, P. y Fridleifsson, G.O., 1991. The smectite-chlorite transition in drillhole NJ-15, Nesjavellir geothermal field, Iceland: XRD and electronic microprobe investigations. In: Merriman, R.J. (Ed.): *Very Low Grade Metamorphism*. *Journal of Metamorphic Geology*, 9 (6): 679-696.
- Stipanovic, P.N., Rodrigo, F., Baulies, O.L. y Martínez, C.G., 1968. Las formaciones prenesonianas en el denominado Macizo Nordpatagónico y regiones adyacentes. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 13(2): 67-98.
- Thompson, A. B., 1971. P-CO₂ in low grade metamorphism, Zeolite, Carbonate, Clay Mineral, Prehnite relations in the System CaO-Al₂O₃-SiO₂-CO₂-H₂O. *Contributions in Mineralogy and Petrology*, 33: 145-161.
- Utada, M., 2001. Zeolites in Burial Diagenesis and Low-grade Metamorphic Rocks. In: Bish, D.L. and Ming, D.W. (Eds.): *Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Applications*. Mineralogical Society of America. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 45: 277-301.
- Vattuone, M.E., Latorre, C.O. y Leal, P.R., 2000. Metamorfismo de muy bajo grado en volcánitas mesozoicas de la cordillera patagónica (42°-43°S), Chubut, República Argentina. *Actas 9º Congreso Geológico Chileno*, 2: 545-547, Puerto Varas.
- Wise, W.S. y Eugster, H.P., 1964. Celadonite: Synthesis, thermal stability and occurrence. *American Mineralogist*, 49 (2): 1031-1083.
- Zen E-An, 1961. The zeolite facies: An interpretation. *American Journal of Science*, 259: 401-409.

Recibido: 3 de julio, 2003

Aceptado: 6 de abril, 2004