

## NOTA PETROGRAFICA

# FACIES DE ALTERACION REGIONAL EN LAS SECUENCIAS VOLCANICAS MESOZOICAS Y CENOZOICAS DE CHILE CENTRAL

BEATRIZ LEVI  
JAN OLOV NYSTRÖM  
HUMBERTO PADILLA  
MARIO VERGARA

Department of Geology, University of Stockholm, S-10691 Stockholm, Suecia  
Swedish Museum of Natural History, S-10405, Stockholm, Suecia  
Empresa Nacional del Petróleo, Ahumada 341, Santiago, Chile  
Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile, Casilla 13518, Santiago, Chile

## RESUMEN

Las rocas volcánicas mesozoicas y cenozoicas de Chile central, excepto las del Reciente, han sido afectadas por episodios de alteración regional. Las asociaciones mineralógicas secundarias son, en general, metaestables y comprenden las siguientes facies diagenéticas a metamórficas: ceolita (subfacies de mordenita, laumontita y wairakita), prehnita-pumpellyita, pumpellyita-actinolita y esquistos verdes.

*Palabras claves:* Alteración, Metamorfismo de enterramiento, Diagénesis, Ceolita, Prehnita-pumpellyita, Pumpellyita-actinolita, Esquistos verdes, Mesozoico, Cenozoico, Chile central.

## ABSTRACT

The Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks of central Chile, except Recent ones, have been affected by episodes of regional alteration. The alteration, which is characterized by low-grade metastable mineral associations, comprises the following diagenetic to metamorphic facies: zeolite (mordenite, laumontite and wairakite subfacies), prehnite-pumpellyite, pumpellyite-actinolite and greenschist.

*Key words:* Alteration, Burial metamorphism, Diagenesis, Zeolite, Prehnite-pumpellyite, Pumpellyite-actinolite, Greenschist, Mesozoic, Cenozoic, Central Chile.

## INTRODUCCION

El propósito de esta nota es presentar la distribución de las diferentes facies de alteración regional, diagenéticas a metamórficas, en las secuencias volcánicas mesozoico-cenozoicas, en cinco secciones transversales de Chile central. Todas las rocas volcánicas mesozoicas y cenozoicas de esta región, excepto las del Reciente, han sido afectadas por episodios de alteración regional. En cada ciclo que caracteriza la historia geológica de Chile central, la alteración tuvo lugar durante e inmediatamente después de los episodios volcánicos y antes de las intrusiones graníticas. La naturaleza episódica de la alteración produce cambios de grado metamórfico, que coinciden con discordancias estructurales, y una repetición de las series de facies, de manera que estratos de más alto

grado metamórfico pueden sobreyacer a estratos de menor grado. La distribución de los minerales secundarios en coladas de lavas individuales muestra que, durante la alteración regional, además de la temperatura y la presión total, existían gradientes de actividad química, velocidad de reacción y presión de fluidos controladas por la permeabilidad original de las rocas (Levi, 1970; Aguirre *et al.*, 1978; Levi *et al.*, 1982).

La alteración regional puede ser clasificada como de tipo de enterramiento, ya que existe la tendencia a un aumento del grado diagenético/metamórfico hacia las partes más bajas de cada unidad estratigráfico-estructural. Localmente, existen cambios laterales de facies metamórficas, que coinciden con cambios en el ambiente de deposita-

ción o tectónico y/o con la cercanía de centros volcánicos (Levi, 1970; Padilla y Vergara, 1985;

Thiele, Nyström y Levi, en prep.).

### FACIES DE ALTERACION REGIONAL

Exceptuando una desvitrificación incipiente, con formación de tridimita y cristobalita, encontrada en rocas pliocenas y pleistocenas, la alteración regional de grado más bajo de las secuencias volcánicas mesozoico-cenozoicas de Chile central corresponde a la *subfacies de mordenita* de la facies de ceolita. Esta subfacies sólo se ha hallado en rocas terciarias (Fig. 1; Tabla 1) y en ellas, la alteración consiste en desvitrificación de vidrio volcánico a cristobalita, tridimita, montmorillonita y mordenita ( $\pm$  heulandita, analcita, chabacita y epistilbita). Dichos minerales también se disponen en amígdalas y, además, forman el cemento en rocas volcanoclásticas. Los fenocristales de olivino están parcialmente reemplazados por montmorillonita, pero los de plagioclasa no presentan alteración, exceptuando la desvitrificación de sus inclusiones vítreas. Constituye un problema de semántica el designar la alteración de subfacies de mordenita como diagénesis regional de enterramiento o metamorfismo regional de muy bajo grado.

La *subfacies de laumontita* (facies de ceolita),

correspondiente a una alteración de grado un poco más alto, está ampliamente distribuida en las rocas volcánicas terciarias, pero también se presenta en rocas cretácicas e incluso jurásicas (Fig. 1). La masa fundamental de las rocas volcánicas (o la matriz en el caso de rocas volcanoclásticas), afectadas por este tipo de alteración, generalmente contiene clorita expandible y otros minerales de arcilla interestratificados, celadonita, laumontita y/o estilbita ( $\pm$  heulandita, epistilbita y calcita). Las vesículas de las rocas volcánicas se presentan rellenas con algunos o todos los minerales mencionados. Los fenocristales de plagioclasa están parcialmente alterados a oligoclasa-albita cálcica de estado estructural alto a intermedio, laumontita, sericita y calcita. Los fenocristales de feldespato potásico, se han transformado en sanidina de bajo estado estructural y los fenocristales de olivino y piroxeno están parcialmente reemplazados por clorita expandible. En las partes no amigdalóideas de lavas básicas, es común encontrar sectores sólo

TABLA 1. UNIDADES ESTRATIGRAFICAS (GRUPOS, FORMACIONES Y MIEMBROS) REPRESENTADAS DE OESTE A ESTE PARA CADA PERFIL DE CHILE

Perfil Copiapó	Perfil Vallenar	Perfil La Serena	Perfil Santiago	Perfil Curicó				
J	La Negra	TR-Ji	Canto del	Js? (Tongoy)	TR	Pichidangui	TR	Cruces de
Ki	Bandurrias		Agua	Ki	Tamaya	Ji	Ajial	Los Sauces
Ks-Ti	Venado	Ki	Bandurrias		El Reloj		Cerro Calera	Js
	Cerrillos	Ks	Cerrillos		Arqueros	Js	Horqueta	Altos de Hualmapu
Ts	(Aeropuerto de El Salvador)				Quebrada Marquesa	Ki	Lo Prado	Ki
							Veta Negra	Ki-Ks
J	Quebrada			Ks	Vifita	Ks*	Las Chilcas	Ti
	Asientos			Ti	Los Elquinos	Ks <sup>o</sup>	Lo Valle	Ts
	El Escorial			Ks	Vifita	Tm	(San Cristobal)	Ti-Ks
Ki	Pedernales			Ki	Pucalume	Ti	Abanico (oeste)	Ts
				Js	Algarrobal	Tm	Farellones	Q
						Ki <sup>oo</sup>	Colimapu	Ki
						Ks?	Abanico (este)	Js
						Ki <sup>oo</sup>	Colimapu	Js
						Ki-Js	Lo Valdés	
						Js	Río Damas	
						Q	(Marmolejo)	

Nota: Se han designado con nombres geográficos (dados entre paréntesis cuadrados) a las unidades sin nombres formales. Las abreviaturas usadas son las mismas que en la figura 1. Los nombres de edades están basados en SERNAGEOMIN (1982, 1984), Aguirre (1985), Beccar *et al.* (1986), Beck *et al.* (1986), Malbrán (1986); referencias citadas en estos trabajos e información verbal de diversos geólogos, principalmente, Ricardo Thiele y Sergio Rivano. \* Cretácico Inferior (Ki) según Rivano *et al.* (1986); <sup>o</sup> Intruido por cuellos volcánicos del Mioceno, de acuerdo con Padilla (1981); <sup>oo</sup> En opinión de E. Godoy (comun. verbal, 1988) podría alcanzar al Paleógeno.

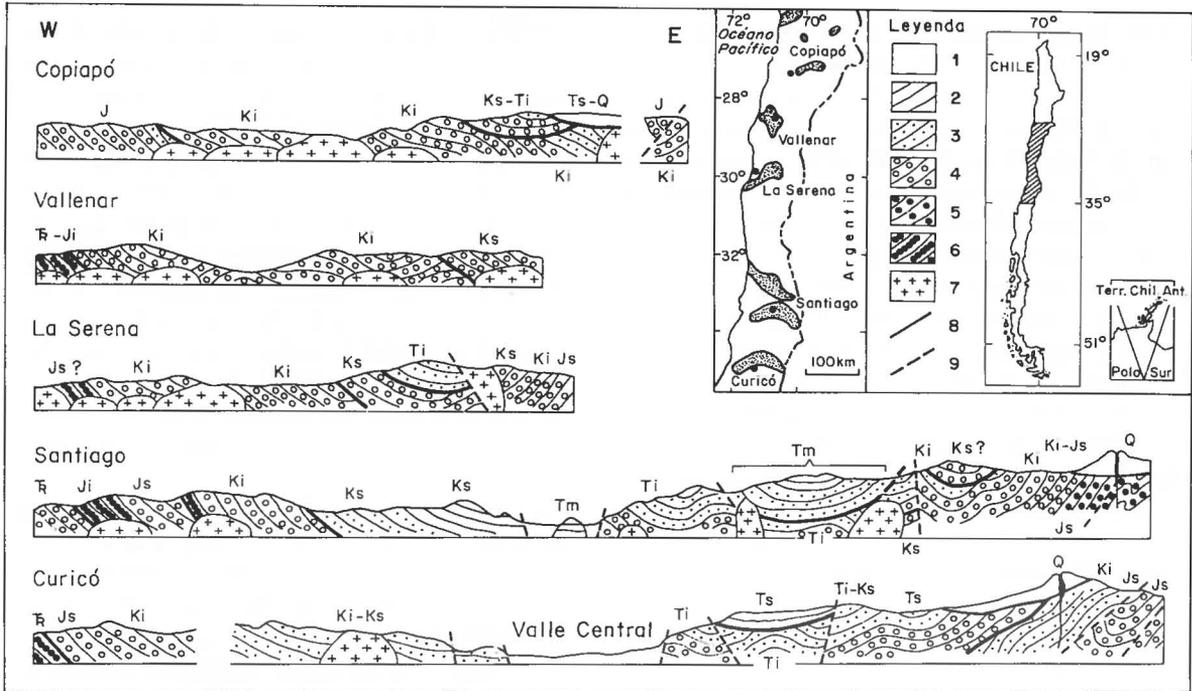


FIG. 1. Distribución de facies de metamorfismo regional de bajo grado en secciones transversales de Chile central. Las secciones son *esquemáticas*, basadas en Levi *et al.* (1988, Fig. 2, y referencias citadas en el texto). En la tabla 1 se da la lista de las unidades estratigráficas de las secciones. Hay diferencias de opiniones acerca de las relaciones estructurales y edades para algunas de las formaciones que, sin embargo, no son de relevancia para el propósito de este trabajo. Las facies fueron asignadas de acuerdo con datos de difracción de rayos X y cortes transparentes de 847 muestras, e información de numerosos geólogos, que a continuación se detallan, para cada sección: Copiapó: Espinoza (1984), Pérez d'A. (1982); Vallenar: Espinoza (1984); La Serena: Chávez (1974), Espinoza (1984), Palmer *et al.* (1980); Santiago: Levi (1969, 1970), Padilla (1981), Padilla y Vergara (1985), Thompson (1971), Vergara (1971), Vergara *et al.* (1987); Curicó: Charrier (1981), Vergara (1969). Las abreviaturas utilizadas son las siguientes: TR: Triásico; J: Jurásico; Ji: Jurásico Inferior (y Medio); Js: Jurásico Superior; Ki: Cretácico Inferior (y medio); Ks: Cretácico Superior; Ti: Terciario inferior (Paleógeno); Tm: Terciario medio (Oligoceno-Mioceno Inferior); Ts: Terciario superior (Mioceno Medio-Plioceno); Q: Cuaternario. Las edades están referidas a la escala del tiempo geológico de Palmer (1983). 1. No alteradas ( $\pm$  cristobalita y tridimita). Facies de ceolita. 2. Subfacies de mordenita; 3. Subfacies de laumontita. 4. Facies de prehnita-pumpellyita. 5. Facies de pumpellyita-actinolita. 6. Facies de esquistos verdes. 7. Granitoides jurásico-terciarios. 8. Discordancias regionales. 9. Fallas mayores.

con trazas de minerales secundarios. Las rocas volcanoclásticas ácidas presentan una tendencia a estar más alteradas.

La *subfacies de wairakita* (subfacies de alta temperatura de la facies de ceolita) se caracteriza por asociaciones con wairakita, cuarzo, clorita, sericita ( $\pm$  calcita, prehnita y epidota) y es de ocurrencia limitada. Se presenta en unidades de poco espesor sobre discordancias y, estratigráficamente, por debajo de secuencias más gruesas, afectadas por la subfacies de laumontita, y es por esto que se la ha incluido con dicha subfacies en la figura 1.

También se han encontrado asociaciones mineralógicas correspondientes a la subfacies de wairakita (Thiele, Nyström y Levi, en prep.), en zonas de falla o aún cerca de ellas, como por ejemplo cerca de bordes de un graben o de una caldera, tal como sucede en la base del Terciario medio en el perfil de Santiago (Fig. 1).

En este caso, a medida que se avanza hacia la falla, primero se presenta prehnita y, luego, epidota como los constituyentes mayores. De la misma manera, se han encontrado asociaciones con wairakita transicionales a la facies de prehnita-pumpe-

llyita. En este último caso, se las ha incluido en las facies de prehnita-pumpellyita de la figura 1.

En las secuencias mesozoicas, predomina la *facies de prehnita-pumpellyita*, que es poco común en las formaciones terciarias (Fig. 1). La mayoría de las descripciones de metamorfismo regional de bajo grado en Chile central, tanto mineralógicas como químicas, están referidas a rocas de esta facies. Las secuencias con facies de prehnita-pumpellyita, a menudo, alcanzan un espesor considerable. La extensión de la alteración regional, generalmente, es mayor en rocas que presentan esta facies, que en aquellas alteradas a facies de ceolita. Sólo en las partes no amigdalóideas de lavas básicas se pueden encontrar sectores relativamente desprovistos de alteración, con relictos de fenocristales de plagioclasa y piroxeno y, también, pero menos comúnmente, en cristales de la masa fundamental.

Las partes estratigráficamente más bajas de muchas secuencias mesozoicas presentan, a menudo, asociaciones de minerales de la *facies de esquistos verdes*, en que predominan albita sódica de estado estructural bajo, epidota y actinolita (tanto en dominios secundarios como primarios). Estas asociaciones están notoriamente ausentes en rocas volcánicas terciarias (Fig. 1). La alteración es generalmente intensa y sólo se encuentran relictos de minerales primarios en las partes no amigdalóideas de las lavas básicas a intermedias. Estos relictos corresponden a fenocristales de piroxeno y a restos de fenocristales de plagioclasa volcánica. Las rocas volcánicas de la parte externa de las aureolas de metamorfismo de contacto, producidas por las intrusiones graníticas

cretácicas, carecen, a menudo, de texturas grano-blásticas y contienen asociaciones mineralógicas secundarias similares a aquéllas de la facies de esquistos verdes (Chávez, 1974). Por lo tanto, es posible que parte de lo que se ha representado como facies de esquistos verdes en la figura 1, sea un efecto de metamorfismo de contacto de largo alcance. Además, en la vecindad de los depósitos de hierro de edad cretácica, las asociaciones características de la facies de prehnita-pumpellyita de alteración regional, gradan a asociaciones similares a aquéllas de la facies de esquistos verdes hacia los cuerpos mineralizados (Galatzán y Henríquez, 1979; Espinoza, 1984; Nyström y Henríquez, en prep.).

La *facies de pumpellyita-actinolita*, no descrita hasta ahora en los Andes, fue descubierta en rocas ubicadas 80 km al sureste de Santiago (Fig. 1), asignadas con anterioridad a facies de esquistos verdes. Estas rocas son volcanoclásticas y lavas básicas a intermedias, correspondientes a la Formación Río Damas del Jurásico Superior, y contienen los siguientes minerales secundarios: epidota, clorita, albita sódica de estado estructural bajo, cuarzo, sericita, actinolita y pumpellyita ( $\pm$  calcita, feldespato potásico y prehnita). La actinolita, además de reemplazar al piroxeno, se presenta como prismas en la masa fundamental o en la matriz, en amígdalas y en vetillas. La presencia de la facies de pumpellyita-actinolita, conformando una serie de facies de presión relativamente alta en la parte este de Chile central (Fig. 1; Perfil de Santiago), sugeriría la existencia de una subducción *de este a oeste* (en lo que ahora es el oeste de Argentina) durante el Jurásico-Cretácico Inferior.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la revisión crítica del manuscrito, llevada a cabo por Luis Aguirre (Laboratoire de Pétrologie, Université d'Aix-Marseille III), Estanislao Godoy (Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile), Fernando Henríquez (Departamento de Minas, Universidad de Santiago), Jorge Muñoz y Sergio Rivano (Servicio Nacional de Geología y Minería), y Waldo Vivallo (Department of Geology, University of Stockholm). También se agradece la generosa contribución de información geológica regional inédita de varios co-

legas, especialmente I. Beccar, C. Mpodozis, J. Naranjo, H. Niemeyer, A. Puig, L. Ribba, S. Rivano y R. Thiele.

J. Cano y F. Escobar (Cemento Melón), P. Elissetche (Mina El Cerrado), S. Jorquera (ENAMI), E. Klohn (Cía. Minera Disputada de las Condes), A. Meléndez (CODELCO) y E. von Baer (Universidad de La Serena), pusieron amablemente a nuestra disposición las facilidades de alojamiento de sus instituciones durante el trabajo de terreno.

El apoyo financiero provino de la Agencia

Sueca de Cooperación para la Investigación de los Países en Desarrollo (SAREC), Grant 86/199 (B.L. y J.O.N.) y de los Proyectos 1316-86, FONDECYT

(M.V.) y E-2834 de la Dirección Técnica de Investigación, Universidad de Chile.

## REFERENCIAS

- Aguirre, L.** 1985. The Southern Andes. In Ocean basins and trenches: The Pacific Ocean (Nairn, A.E.M.; Stehli, F.G.; editors). *Plenum Press*, Vol. 7A, p. 265-376. New York, U.S.A.
- Aguirre, L.; Levi, B.; Offler, R.** 1978. Unconformities as mineralogical breaks in the burial metamorphism of the Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 66, p. 361-366.
- Beck, M.; Drake, R.; Butler, R.** 1986. Paleomagnetism of Cretaceous volcanic rocks from Central Chile and implications for the tectonics of the Andes. *Geology*, Vol. 14, p. 132-136.
- Beccar, I.; Vergara M.; Munizaga, F.** 1986. Edades K-Ar de la Formación Farellones en el Cordón del Cerro La Parva, Cordillera de los Andes de Santiago, Chile. *Revista Geológica de Chile*, Nos. 28-29, p. 109-113.
- Charrler, R.** 1981. Geologie der chilenischen Hauptkordillere zwischen 34° und 34°30' südlicher Breite und ihre tektonische, magmatische und paläogeographische Entwicklung. *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen*, Vol. A, No. 36, 270 p.
- Chávez, L.** 1974. Metamorfismo de contacto y alteración regional de rocas volcánicas andesíticas en Santa Gracia. *Universidad de Chile, Departamento de Geología, Publicación*, No. 41, p. 139-196.
- Espinoza, S. T.** 1984. Le rôle du volcanisme du Crétacé Inférieur dans la métallogénese de la ceinture férifère d'Atacama-Coquimbo, Chili. Thèse de Doctorat. *Université de Paris VI, Laboratoire de Géologie Appliquée*, 152 p. Paris, France.
- Galatzán, R.; Henríquez, F.** 1979. Zonas de alteración adyacentes a los cuerpos de magnetita de Cerro Negro, área de Cristales, III Región. In *Congreso Geológico Chileno*, No. 2, Actas, Vol. 2, p. C265-C283. Arica, Chile.
- Levi, B.** 1969. Burial metamorphism of a Cretaceous volcanic sequence west from Santiago, Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 24, p. 30-49.
- Levi, B.** 1970. Burial metamorphic episodes in the Andean Geosyncline, Central Chile. *Geologische Rundschau*, Vol. 59, p. 994-1013.
- Levi, B.; Aguirre, L.; Nyström, J.O.** 1982. Metamorphic gradients in burial metamorphosed vesicular lavas: comparison of basalt and spilite in Cretaceous basic flows from central Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 80, p. 49-58.
- Levi, B.; Nyström J.O.; Thiele, R.; Åberg, G.** 1988. Geochemical trends in Mesozoic-Tertiary volcanic rocks from the Andes in central Chile, and tectonic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 1, No. 1, p. 63-74.
- Malbrán, F.** 1986. Estudio geológico-estructural del área del río Clarillo con énfasis en la Formación Coya-Machalí, hoy del río Tinguiririca. Memoria de Título (Inédito). *Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica*, 221 p. Santiago, Chile.
- Padilla, H.** 1981. Contribución a la geología y petrografía de las rocas volcánicas e intrusivas de los Andes Chilenos entre las latitudes 33°45' y 33°00'S. Memoria de Título (Inédito). *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, 329 p. Santiago, Chile.
- Padilla, H.; Vergara, M.** 1985. Control estructural y alteración tipo campo geotérmico en los intrusivos subvolcánicos miocénicos del área Cuesta de Chacabuco-Baños El Corazón, Chile Central. *Revista Geológica de Chile*, No. 24, p. 3-17.
- Palmer, A.R.** 1983. The decade of Northamerican Geology. 1983 Geologic Time Scale. *Geology*, Vol. 11, No. 1, p. 503.
- Palmer, H.C.; Hayatsu, A.; MacDonald, W.D.** 1980. Paleomagnetic and K-Ar age studies of a 6 km-thick Cretaceous section from the Chilean Andes. *Geophysical Journal (Royal Astronomic Society)*, Vol. 62, No. 1, p. 133-153.
- Pérez d'A., E.** 1982. Bioestratigrafía del Jurásico de Quebrada Asientos, norte de Potrerillos, Región de Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Boletín*, No. 37, 149 p.
- Rivano, S.; Sepúlveda, P.; Boric R.; Hervé, M.; Puig, A.** 1986. Antecedentes radiométricos para una edad cretácica inferior de la Formación Las Chillas. *Revista Geológica de Chile*, No. 27, p. 27-32.
- SERNAGEOMIN, 1982.** Mapa geológico de Chile 1:1.000.000. *Instituto Geográfico Militar*, 6 hojas. Santiago, Chile.
- SERNAGEOMIN, 1984.** Seminario de actualización de la geología de Chile (Apuntes). *Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Miscelánea*, No. 4, 391 p.
- Thomas, H.** 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de La Ligua y la cuesta de Barriga. *Instituto de Investigaciones Geológicas (Chile), Boletín*, No. 2, 86 p.
- Thompson, A.B.** 1971. Studies in low-grade metamor-

- phism in Central Chile, South America. Unpublished Ph.D. Thesis. *Manchester University*, 195 p. Manchester, U.K.
- Vergara, M. 1969.** Rocas volcánicas y sedimentario-volcánicas, mesozoicas y cenozoicas, en la latitud 34°30'S, Chile. *Universidad de Chile, Departamento de Geología, Publicación No. 32*, 36 p.
- Vergara, M. 1971.** Antecedentes petrográficos y petrológicos del cordón del cerro Manquehue, Santiago. *Universidad de Chile, Departamento de Geología, Comunicaciones*, No. 19, 27 p.
- Vergara, M.; Padilla, H.; Levi, B.; Castelli, J. C. 1987.** Burial metamorphism in the Abanico Formation: the Aconcagua and Mapocho valleys of the Chilean central Andes. *In Congreso Geológico Argentino*, No. 10, Actas, Vol. IV, p. 254-255. Tucumán, Argentina.