



CARACTERIZACION DE LA ALTERACION HIDROTHERMAL DE EL LACO MEDIANTE ANALISIS ESTADISTICO DE FACTORES

F. Michael Dobbs D.¹, Fernando Henríquez B.¹, Waldo Vivallo²

INTRODUCCIÓN

Desde la primera descripción de coladas de lavas de óxidos de fierro en El Laco¹, este yacimiento ha sido motivo de gran interés científico, siendo utilizado como evidencia de la existencia de magmas de mena de fierro. Sus características geológicas (estructurales y texturales) y geoquímicas han sido comparadas con otros yacimientos de magnetita-apatita (tipo Kiruna), en especial con los de Kirunavaara (Suecia) y los de la Franja Ferrífera Cretácica Chilena, permitiendo postular un origen similar para todos ellos, a partir de un magma de mena con un emplazamiento sub-volcánico a volcánico².

Asociado al edificio volcánico existe una extensa zona de alteración hidrotermal que constituye uno de los rasgos más distintivos del complejo volcánico El Laco. El propósito de este trabajo es caracterizar, desde un punto de vista geoquímico-estadístico, dicha alteración, usando para esto un análisis de factores, y además establecer las posibles relaciones genéticas de esta alteración con la mineralización de fierro asociada.

MARCO GEOLOGICO²

El complejo volcánico El Laco ocupa un área de 30 km² y se ubica a una altura de entre 4.700 a 5.300m en la Cordillera de los Andes. Formando parte de este complejo volcánico se encuentra un estrato volcán de composición andesítica-riodacítica, que en sus flancos presenta siete yacimientos de mena de fierro de magnetita-apatita (Laco Norte, Laco Sur, San vicente Alto, San Vicente Bajo, Rodados Negros, Laquito y Cristales Grandes) y zonas de fuerte alteración hidrotermal. Las andesitas y la mena han sido datadas en 2 Ma^{3,4}. La mena, principalmente magnetita, se presenta como flujos de lava y diques relacionados, material piroclástico, cuerpos sub-volcánicos y en depósitos hidrotermales. Apatita es localmente abundante en los cuerpos intrusivos, pero sólo es una fase accesoria en las lavas. Además, la mena contiene cantidades variables de piroxenos, parcial a completamente alterados a talco, ópalo, goethita y esmeclita. Hematita primaria es escasa y en forma más abundante se presenta como producto de oxidación de magnetita, tanto en la mena intrusiva como en la extrusiva.

1 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN MINAS. UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE, CASILLA 10.233 SANTIAGO, CHILE

2 SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA, CASILLA 1347 SANTIAGO, CHILE

ALTERACION^{5,6}

En el área del Complejo Volcánico El Laco se reconocen dos tipos de alteración^{5,6}. La primera corresponde a una angosta aureola metasomática (alrededor de 20 m) restringida a los márgenes de los cuerpos de mena intrusiva, afectando rocas andesíticas y como minerales simples depositados en espacios abiertos de la mena extrusiva. Las aureolas se presentan con un color rojizo y mineralógicamente consisten de cristales aciculares de clinopiroxeno (diópsido), cuarzo y magnetita. Cristales de plagioclasa, sanidina, tridimita baja, cuarzo, diópsido, rutilo, natroalunita y alunita se presentan en cavidades de la mena. Calcita y escapolita ocurren como incrustaciones delgadas, mientras que cuarzo, rutilo y alunitas están comunmente asociados con cristales de hematita primaria.

El segundo tipo de alteración es de distribución amplia, localmente muy intensa, presenta un color claro que contrasta con las andesitas frescas sin alteración y la mena de hierro. Estructuras de vetas silicificadas y brechas hidrotermales se presentan comunmente dentro de las zonas de rocas hidrotermalmente alteradas. Localmente existen depósitos exhalativos de yeso con cantidades subordinadas de alunita, jarosita, azufre, cristobalita, tridimita y calcita, acumulados en la superficie, los que están restringidos en extensión y espesor, depositados alrededor de varios centros discretos en el complejo volcánico.

La alteración hidrotermal que afecta a las rocas volcánicas no presenta una zonación clara y se distribuye dentro del complejo sugiriendo diferentes centros (o conductos) por los cuales habrían circulado y ascendido las soluciones. Ella presenta una intensidad y extensión que muestra una buena correlación con litología y permeabilidad, siendo las rocas piroclásticas las más fuertemente afectadas. Esta alteración consiste en silicificación, alteración arcílica avanzada y lixiviación ("blaqueado"), con destrucción de texturas originales. Mineralógicamente las rocas silicificadas están caracterizadas por la presencia de cuarzo, tridimita, cristobalita, alunita y jarosita, con cantidades menores de feldespato potásico, anatasa y algunos sulfatos de hierro y fosfatos no identificados. Yeso y azufre se presentan en vetillas en las rocas alteradas. Las rocas afectadas por alteración arcílica se caracterizan por la presencia de cuarzo, alunita, caolinita, yeso, cristobalita, esmectita, basanita, piritita y pirofilita. En las rocas volcánicas menos alteradas se observa reemplazo de piroxeno por clorita y de plagioclasa por sericita y minerales de arcilla. También es común la asociación hematita-epidota en las rocas menos alteradas.

Análisis de isótopos de azufre en yeso y de oxígeno en magnetitas, rocas alteradas y frescas y cuarzo hidrotermal, señalan que el azufre es de origen hipógeno derivado de una fuente magmática; la composición isotópica del oxígeno de la mena está empobrecida en ^{18}O con respecto a rocas frescas y las rocas alteradas y el cuarzo hidrotermal presentan enriquecimiento en ^{18}O , llegando a valores extremadamente altos⁵.

GEOQUÍMICA DE LA ALTERACIÓN

Generalidades

Considerando que la alteración hidrotermal que afecta al complejo volcánico El Laco no presenta una distribución zonal, y ocurre en centros discretos con un fuerte control de la litología y permeabilidad y que se superpone a las aureolas metasomáticas y depósitos exhalativos, se ha considerado que el análisis de factores constituye la mejor herramienta para estudiar la geoquímica de las rocas alteradas hidrotermalmente.

Para este propósito se hizo un muestreo semi-sistemático en dos perfiles, cubriendo las áreas con mayor intensidad de alteración en el complejo. Estos perfiles se realizaron en la zona de Pasos Blancos y Cerro Vicuña. De ellos se analizaron 71 muestras por elementos mayores, menores y trazas (con un total de 40 elementos), mediante diferentes técnicas analíticas, en los laboratorios de X-RAL (SGS) de Canadá. Los resultados analíticos fueron procesados mediante el programa Stat-view 4.1 (MacOS), para determinar valores estadísticos básicos, matrices de correlación y análisis factorial. Con este objeto se normalizaron las variables, se confeccionó la matriz de correlación (40X40), y en base a esta se extrajeron los factores usando componentes principales y una rotación varimax, para mejor definición de ellos.

Tabla N° 1. Resumen de análisis de factores para muestras de El Laco. El % representa el peso del factor, el (1) coeficientes positivos y el (2) coeficientes negativos. Entre paréntesis los elementos con correlación levemente inferior a 0,5 y los sin paréntesis presenta una correlación > 0,5. N = Número de muestras

GRUPO	FACTOR 1	FACTOR 2	FACTOR 3	FACTOR 4	FACTOR 5
TODAS LAS MUESTRAS N = 71	39%	9%	7%	6%	5%
	(1) RREE-Mg-Y-Be Na-Sr-Ca-Al-Ni-Co Mn-Fe ⁺³ -Cr-Th-Zn (P-Rb-Ga-Cu)	P-K-Al (Ga-Sr)	Ti-Nb-V-Fe ⁺³	(Cu-Co-Si-Mn Ba-Ni)	Fe ⁺² (Ga-Au)
	(2) (Si-Cl-Au-Ba)	Si (Y-Ba-Yb-Er-Lu-Dy)	(Ba-F-Cl)	(V-F-Cl-Er-Lu Dy-Yb)	(Zr-F)
FRESCAS N = 43	39%	9%	7%	6%	5%
	(1)RREE-Mg-Y-Be-Na Sr-Ca-Al-Ni-Co-Mn Fe ⁺³ -Cr-Th-Zn (P-Rb-Ga-Cu)	P-K-Al (Ga-Sr)	Ti-Nb-V-Fe ⁺³	(Cu-Co-Si-Mn Ba-Ni)	Fe ⁺² (Ga-Au)
	(2) (Si-Cl-Au-Ba)	Si (Y-Ba-Yb-Er-Lu-Dy)	(Ba-F-Cl)	(V-F-Cl-Er-Lu Dy-Yb)	(Zr-F)
ALTERADAS N = 28	39%	9%	7%	6%	5%
	(1)RREE-Mg-Y-Be-Na Sr-Ca-Al-Ni-Co-Mn Fe ⁺³ -Cr-Th-Zn (P-Rb-Ga-Cu)	P-K-Al (Ga-Sr)	Ti-Nb-V-Fe ⁺³	(Cu-Co-Si-Mn Ba-Ni)	Fe ⁺² (Ga-Au)
	(2) (Si-Cl-Au-Ba)	Si (Y-Ba-Yb-Er-Lu-Dy)	(Ba-F-Cl)	(V-F-Cl-Er-Lu Dy-Yb)	(Zr-F)
LAVAS N = 40	39%	9%	7%	6%	5%
	(1)RREE-Mg-Be-Y-Na Sr-Ca-Al-Co-Mn-Cr Fe ⁺³ -Zn (P-Rb-Ga-Cu)	P-K-Al-(Sr)	Ti-Nb-V-Fe ⁺³	(Co-Cu-Si-Mn-Ni Rb)	Fe ⁺² -(Ga)
	(2) (Si-Cl-F-Au-Ba)	Si(Ba-Yb- Y-Dy-Er-Lu)	(Ba)	(F-Er-Lu)	(Zr-F)
FRAGMENTALES N = 31	39%	9%	7%	6%	5%
	(1)RREE-Mg-Ce-Be- Na-Sr-Ca-Al-Co-Ni- Mn-Fe ⁺³ -Th-Cr-Zn (Rb-P)	P-K-Al (Ga-Sr)	Ti-Nb-V-Fe ⁺³	(Co-Si-Cu-Mn- Ba-Ni)	Fe ⁺² (Ga-Au)
	(2) (SI)	Si- (Y-Yb-Er-Lu-Dy)	(Ba)	(V)	(Zr-F)

Las muestras corresponden a andesitas, tobas y brechas andesíticas y una menor cantidad de dacitas, con distintos grados de alteración, desde rocas frescas a completamente silicificadas y arcillizadas. Los valores geoquímicos de las menos alteradas coinciden con los publicados para las rocas de El Laco y no muestran un comportamiento diferente a los de este tipo de volcanes.

Se analizaron siete situaciones muestrales, considerando subconjuntos que presentaban iguales características como litología y ubicación geográfica o zona de proveniencia de las muestras. El grupo 1 (Tabla 1) incluye todas las muestras analizadas (alteradas y no alteradas), el grupo 2 aquellas rocas con menor grado de alteración, las rocas alteradas conforman el tercer grupo incluyendo todos los tipos de alteración. El cuarto grupo esta constituido por lavas, con y sin alteración; y el quinto grupo incluye tobas y brechas. Los grupos seis y siete, que no se muestran en la tabla, corresponden a los dos zonas de toma de muestras.

Resultados

Los resultados se muestran en la Tabla 1, donde el 66% de la varianza total del sistema queda explicada por cinco factores. No se observan diferencias relevantes en las matrices de correlación y de factores de los distintos grupos considerados.

Discusión y conclusiones

El factor 1, que explica el 39% de la variabilidad del sistema, está constituido por: REE-Mg-Y-Be-Na-Sr-Ca, con una correlación positiva entre 80 y 97%; Al-Ni-Co-Mn-Fe⁺³-Cr-Th-Zn, entre 80 y 50%; y P-Rb-Ga-Cu, con una correlación muy poco menor de 50%, en oposición a los anteriores y con una correlación negativa inferior al 50%, se encuentran Si-Cl-Au-Ba. Este factor refleja, en primer lugar, una relación genética entre las variables que lo definen, la cual es el resultado del origen magmático de las muestras consideradas.

El segundo factor está definido por la posición de las variables P-K-Al (>50%) y Ga-Sr (<50%); en oposición a Si (>50%) e Y-Ba-Yb-Er-Lu-Dy (<50%). El factor 2, presenta una fuerte correlación negativa con la Si (-0,75) y una correlación positiva un poco menor con el P-K-Al, lo que se podría interpretar por la influencia de la silicificación, en la distribución de estos elementos.

El factor 3 tiene relación con los metales Ti-Nb-V-Fe⁺³ (>50%) en oposición a Ba-F-Cl (<50%). Este factor representa la mena de magnetita del sistema. Es sabido que Ti, V y Nb pueden sustituir al Fe⁺³ en la magnetita ocupando el sitio octaédrico², controlando de esta manera el comportamiento de dichos metales en las rocas alteradas.

Las variables que determinan el cuarto factor presentan coeficientes de correlación bajos con esta tendencia (<50%), por lo que su definición está menos lograda, estos son principalmente los elementos calcófilos Cu-Co-Ni, además de algunos otros de menor peso estadístico como Si-Mn-Ba, en tanto el V-F-Cl-Er-Lu-Dy-Yb muestran una suave correlación negativa. Esta correlación positiva de los elementos calcófilos con Si, Ba y Mn, refleja la alteración silícica y arcílica la que incorpora dichos elementos a las rocas. Por otro lado en este mismo factor se presentan con correlación negativa elementos constituyentes de la magnetita (V) y de la apatita (F, Cl, REE), los que representan la mena de magnetita-apatita del sistema.

Finalmente el quinto factor muestra una correlación positiva con el Fe⁺² (>50%) y Ga-Au (<50%); y una negativa con el Zr-F (<50%). En el factor 5 se presentan con correlación positiva Fe⁺² asociado a Au, lo cual sugiere una fuente primaria de este último elemento en la magnetita, el que se habría posteriormente removilizado por los procesos hidrotermales, de acuerdo a lo sugerido por los elementos que muestran correlación negativa en el primer factor y de acuerdo a lo sugerido para yacimientos de magnetita-apatita de la Cordillera de la Costa de Chile⁷.

Lo anteriormente expuesto permite concluir que la distribución y el comportamiento estadístico de los elementos geoquímicos considerados, en las rocas hidrotermalmente alteradas del complejo volcánico El Laco, está determinado fuertemente por el fenómeno magmático responsable de la formación primaria de estas rocas volcánicas, incluyendo en este a la mena de magnetita-apatita.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias al apoyo económico de FONDECYT (Proyectos N° 911218 y N°1950571) y de DICYT-USACH (Proyecto N° 05-97-15HB). Los autores agradecen, además, las facilidades y apoyo otorgado por la Compañía Minera del Pacífico S.A. (CMP).

REFERENCIAS

- 1.- Park, C.F. Jr., 1961. A magnetite "flow" in northern Chile, *Econ. Geol.* 56, 431-441.
- 2.- Nyström, J.O., Henríquez, F., 1994, Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: Ores textures and magnetite geochemistry. *Economic Geology*, v. 89, p. 820-839.
- 3.- Gardeweg, M., Ramírez, C.F., 1985, Hoja Río Zapaleri, II Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, N° 66, 89p.
- 4.- Maksaev, V., Gardeweg, M., Ramírez, C. F., Zentilli, M., 1988, Aplicación del método trazas de fisión (fission-track) a la datación de cuerpos de magnetita de El Laco e Incahuasi en el Altiplano de la Región de Antofagasta. V° Congreso Geológico Chileno, V. 1, p. B1 - B23
- 5.- Vivallo, W., Henríquez, F., & Espinoza, S. 1994c. Oxygen and Sulfur isotopes in hydrothermally altered rocks and gypsum deposits at El Laco mining district, northern Chile, *Revista Comunicaciones* 45, 93-100.
- 6.- Vivallo, W., Henríquez, F., & Espinoza, S., 1993. Hydrothermal alteration and related mineralization at El Laco mining district, northern Chile. *Low temperature Metamorphism, processes, Products and Economic Significance*, Symposium IGCP Project 294, 142-146.
- 7.- Vivallo, W., Espinoza, S., & Henríquez, F. 1993. Magnetite-apatite type iron ore and gold mineralization in the Cerro Negro Norte district, Chile. In Fenoll Hach-Alí, Torres-Ruiz & Gervilla (eds). *Current Research in Geology Applied to Ore Deposits*, University of Granada, Granada, Spain, 587-590