

# Evidencias de movilidad de las REE en depósitos tipo pórfido de cobre durante la alteración hidrotermal

Osvaldo M. Rabbia<sup>1</sup>, Laura B. Hernandez<sup>1</sup>, José M. Cabrera<sup>1</sup>, Thomas Ulrich<sup>2</sup>, Thomas Bissig<sup>3</sup>, y Alfredo Parra<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geología Económica Aplicada, Universidad de Concepción, Barrio Universitario s/n, Concepción, Chile

<sup>2</sup>Department of Geoscience, Aarhus University, Nordre Ringgade 1, DK-8000, Aarhus C, Denmark

<sup>3</sup>Mineral Research Unit, Department of Earth and Ocean Sciences, The University of British Columbia, Vancouver, Canada

<sup>4</sup>Superintendencia de Geología, División Radomiro Tomic, CODELCO-Norte, Calama, Chile

\* E-mail: [rabbia@udec.cl](mailto:rabbia@udec.cl)

**Resumen.** Para evaluar la estabilidad de las REE en sistemas hidrotermales de tipo pórfido de cobre, se estudiaron 16 muestras correspondientes a los complejos intrusivos Chuquicamata y Fortuna, y a la unidad triásica Elena, aflorantes en la mina Radomiro Tomic y alrededores. Se estableció la composición modal y química de las rocas, y además, la química de sus fases minerales. Los resultados muestran que el reemplazo de hornblenda y esfeno por minerales pobres en REE durante la etapa de alteración potásica, produce a escala de la roca, una disminución general de las REE, y un aumento de la razón La/Yb y de la concavidad del patrón de REE. Sin embargo, mientras menor es el índice de color y la razón Hb/Bt de un pórfido, menor será el efecto de la alteración potásica sobre las REE. La evidencia permite afirmar, además, que aun cuando el hidrotermalismo puede contribuir en algunos casos a aumentar la razón La/Yb, la señal geoquímica adakítica documentada en los pórfidos de cobre de clase mundial no es el resultado de la alteración hidrotermal de las rocas, sino una característica intrínseca de los magmas que refleja su ambiente de formación. Otros tipos de alteración pueden tener efectos diferentes a los aquí expuestos.

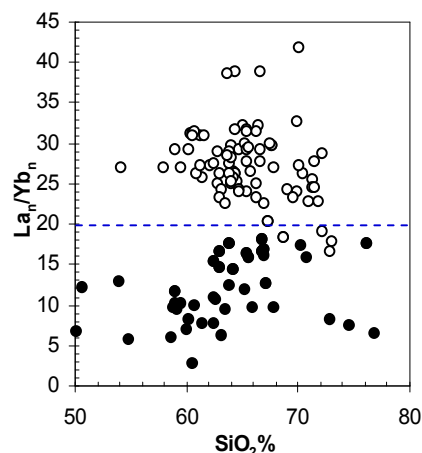
**Palabras Claves:** Tierras raras, pórfidos de cobre, señal adakítica, orógeno andino.

## 1 Introducción

La alteración hidrotermal asociada a depósitos tipo pórfido de cobre (PCD) es, en esencia, un proceso metasomático con una alta razón fluido/roca, que induce profundas transformaciones mineralógicas y químicas en las rocas afectadas. La litología y las condiciones físico-químicas en que dichos cambios tienen lugar, determinan las asociaciones minerales resultantes (p. ej: Fk/Phl-Qz±Anh ±Rt; Ser-Qz-Py±Chl; Chl-Ab-Cc-Ep; etc.), las que a su vez son usadas para clasificar el tipo de alteración hidrotermal (p. ej: alteración potásica, filica, propilitica).

Si bien los cambios lito-geoquímicos producto de la alteración hidrotermal en PCD son bien conocidos y están ampliamente documentados, e incluso modelados a nivel de balance de masa, el detalle de los procesos que los controlan, particularmente aquellos vinculados con las variaciones de los elementos traza a escala mineral, son menos conocidos.

Los elementos traza del grupo de las tierras raras (REE) constituyen una valiosa herramienta petrotextónica comúnmente usada para establecer la evolución tectono-magmática de una región. Precisamente por esta razón, su uso se extendió también al campo de la exploración mineral (ej: Kay y Mpodozis 2001, Bissig et al., 2003). En el orógeno andino, la regla empírica indica que los intrusivos asociados a pórfidos de cobre de clase mundial (WC-PCD) presentan señal geoquímica adakítica (p. ej: Sr/Y ≥ 50; La<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub> ≥ 20 y patrones de REE normalizado a condrito en forma de “palo de hockey” ( ) para rocas con ~60% > SiO<sub>2</sub> > 70%; Fig. 1); aunque no todo los intrusivos con estas características geoquímicas están mineralizados.



**Figura 1. (La/Yb)<sub>n</sub> vs SiO<sub>2</sub>.** Muestra que los intrusivos asociados a mineralización tipo WC-PCD del orógeno Andino tienen una relación La/ Yb ≥ 15 (p.ej: Los Pe-lambres, Río Blanco, El Teniente, Zaldivar, Radomiro Tomic, El Salvador; Rabbia y Hernández, 2000; Rabbia et al., 2000; Rabbia inédito).

Debido a la mayor movilidad del Sr (baja razón carga/radio→LILE→alta solubilidad) respecto de las REE (alta razón carga/radio→HFSE→baja solubilidad) en fluidos ácuos, la razón Sr/Y es, en principio, más susceptible de ser modificada por la alteración hidrotermal que la relación La/Yb. En otros términos, el potencial de preservación de la señal prospectiva adakítica es mayor en las REE que en la razón Sr/Y. Sin embargo, el escaso conocimiento sobre la estabilidad de las REE durante los eventos hidrotermales relacionados con los PCD impide, *prima facie*, establecer si

la forma de los patrones y/o relaciones de REE en rocas alteradas hidrotermalmente, son el reflejo de la evolución magmática durante un determinado régimen tectónico, o si son solo el resultado de la lixiviación selectiva debido a la circulación de fluidos hidrotermales. Las implicancias en la prospección de WC-PCD son obvias.

Con la finalidad de evaluar los aspectos básicos de la estabilidad/movilidad de las REE a escala mineral en estos ambientes hidrotermales, discutir su impacto en las interpretaciones petro-tectónicas y plantear los desafíos pendientes, se estudiaron 16 muestras de intrusivos provenientes de la mina Radomiro Tomic (RT) y sus alrededores.

## 2 Área de estudio: Radomiro Tomic PCD

La mina RT se encuentra en el norte de Chile sobre la traza del Sistema de Falla de Domeyko, inmediatamente al norte de Chuquicamata. En RT se reconocen al menos 4 eventos intrusivos de edad Eocena tardía a Oligocena temprana, pertenecientes al Complejo Intrusivo Chuquicamata (CIC) (Cabrera et al., 2010). La unidad “Pórfido Este” actúa como caja de los demás intrusivos: el “Pórfido Oeste” y el “Pórfido Fino” dentro del rajo y el “Pórfido Banco” fuera del rajo. El CIC es más joven que el Complejo Intrusivo Fortuna (CIF). La tabla 1 resume el muestreo realizado en RT. Todas las muestras tomadas dentro del rajo de RT tienen algún grado de alteración potásica.

**Tabla 1.** Resumen del muestreo en el área de la mina RT.

| Complejo | Unidad (número de muestras)             | Ubicación      |
|----------|---|----------------|
| CIF      | Antena (1), Fiesta (1), San Lorenzo (1) | Distrital      |
| CIC      | Este (3), Fino (3), Oeste (3)           | En el rajo     |
| CIC      | Este (1), Banco (2)                     | Cerca del rajo |
| Triásico | Granodiorita Elena (1)                  | En el rajo     |

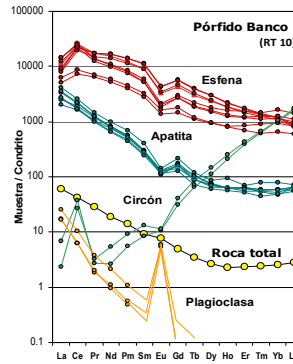
## 3 Análisis y Resultados

Se determinó la composición modal (QEMSCAN) y química (INAA-ICPMS) de las 16 muestras y se analizaron los contenidos de REE (LA-ICPMS) de los minerales formadores de roca (plagioclasa, Pl; hornblenda, Hb y biotita, Bt) y minerales accesorios, tanto magmáticos (esfeno, Sph; apatita, Ap y circón Zrn) como hidrotermales (rutilo, Rt).

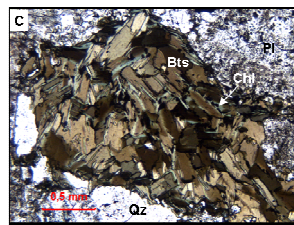
El estudio petrográfico reveló, como era de esperar, que la Hb y el Sph en muestras tomadas dentro del rajo no sobrevivieron a la alteración potásica. La Hb pasó a Bt secundaria y el Sph a Rt ± cuarzo (Qz). Cuando queda ocluida en fenocristales anhidros, la Ap magmática tiende a preservar su composición original. Expuesta a los fluidos de la etapa potásica la Ap reajusta su contenido de REE, apreciándose en general una disminución la razón La/Yb.

El Sph solo se preserva en pórfidos fuera del rajo, en el halo propilítico, mientras que la Hb los hace solo en las muestras distritales (CIF). El Zrn permanece esencialmente estable, preservando su contenido de HREE. Los contenidos de

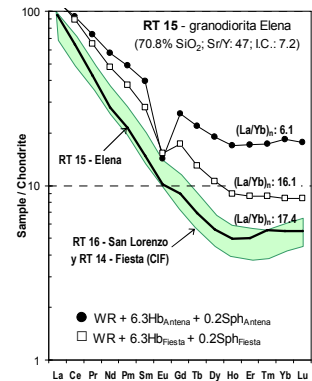
REE de los Rt y de la mayoría de las Bt analizadas, están bajo el límite de detección de la técnica usada.



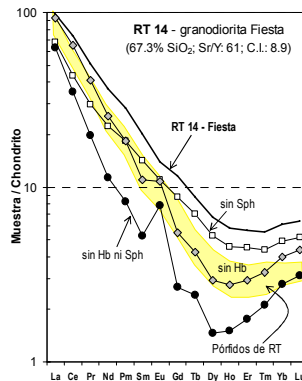
**Figura 2.** REE en minerales. Análisis de las principales fases portadoras de REE en los pórfidos. La muestra no presenta Hb primaria ni pseudomorfos, solo tiene Bt con contenidos de REE por debajo del límite de detección de la técnica empleada. Note que solo los minerales accesorios tienen contenidos de REE mayores a los del pórfido hospedante (roca total).



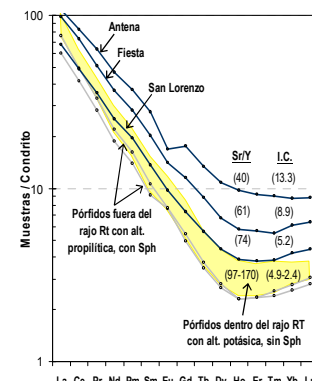
**Figura 3.** Biotita shreddy.



**Figura 4.** REE de la unidad Elena.



**Figura 5.** REE unidad Fiesta.



**Figura 6.** REE de CIF y CIC.

El orden general de abundancia de REE en las fases analizadas, incluida la roca huésped (WR), es: Sph >> Ap > Zrn > Hb > WR > Pl > Bt (Fig. 2). Esto sugiere que la estabilidad de fases como el Sph, Ap, Zrn y Hb durante la alteración hidrotermal es un factor central a considerar en la evaluación de la movilidad de las REE en los pórfidos.

## 4 Discusión

El reemplazo de fases portadoras de REE (Sph y Hb) por fases pobres en REE (Bt, Fk, Rt y Qz) durante la alteración potásica sugeriría la pérdida de REE hacia el fluido, asumiendo que no se forman fases minoritarias ricas en REE.

Si bien no se observó, como en otros casos, la presencia de granos discretos de monacita (Mz) asociados a apatita reequilibrada hidrotermalmente (p. ej: Hernández, 2009), el contenido total de REE de éstas sugiere que no hubo una pérdida neta, sino más bien una variación en abundancia relativa de LREE respecto de HREE (razón La/Yb).

Para evaluar el efecto que la pérdida de Hb y Sph tiene sobre las REE en roca total, durante la alteración potásica, se adicionó a la grano-diorita Elena, los contenidos de REE correspondientes a estas 2 fases, considerando un 6.3% de Hb alterada a Bt hidrotermal “shreddy” (Fig. 3) y un 0.2% Sph. La granodiorita Elena alterada (RT15 en Fig. 4) presenta un patrón de REE muy similar al de los pórfidos Eocenos más jóvenes del CIF. Sin embargo, cuando toda la Bt shreddy es recalculada como Hb y el Rt como Sph, usando las composiciones de Hb y Sph de rocas no alteradas (Fiesta y Antena; CIF), los patrones de REE reconstituidos cambian notoriamente: disminuye su razón La/Yb y aparece una marcada anomalía negativa de Eu (Fig. 4).

A la inversa, si se resta de una roca fresca, como la granodiorita Fiesta, el aporte de REE de la Hb y Sph, los nuevos patrones de REE se deprimen, su forma se hace más cóncava, aparece una anomalía positiva de Eu y aumenta la razón La/Yb. Estos nuevos patrones son comparables al de los pórfidos de la mina RT (Fig. 5).

Estos ejemplos muestran cómo la pérdida de Hb y Sph pueden afectar tanto los contenidos como la forma de los patrones de REE de los pórfidos. La alteración de la Hb de una roca con anomalía negativa de Eu genera un patrón “residual” de REE sin anomalía en la roca alterada (Fig. 4), y a la inversa para una roca sin anomalía de Eu (Fig. 5).

Aplicando a los pórfidos de la mina RT el mismo procedimiento que a la granodiorita Elena, los nuevos patrones de REE no difieren mucho de los iniciales, debido a los bajos porcentajes de Hb original en estas rocas (0-2%). Los fenocristales de Bt en forma de *books*, son el ferromagnesiano dominante en estos pórfidos.

El carácter leucocrático de los pórfidos asociados a WC-PCD minimiza el efecto de pérdida de REE causado por alteración de la Hb; más aún cuando la Bt es la fase máfica dominante, como ocurre en RT. En estos casos, la destrucción del Sph es la principal causa de pérdida de REE durante la alteración potásica. Esta pérdida, sin embargo, produce modificaciones comparativamente menores tanto en la razón La/Yb como en la forma del patrón de REE (ej: Fig. 5).

En la Fig. 6 se muestra la evolución gradual con la edad, de las razones La/Yb y Sr/Y y del IC de las muestras de los CIF y CIC en el área de RT. Note que los pórfidos fuera del rajo, con Sph preservada, tienen básicamente el mismo patrón de REE que los pórfidos alterados y sin Sph del rajo. Incluso el contenido de REE en los pórfidos con Sph es sensiblemente menor que en aquellos sin Sph. Por lo tanto, las interpretaciones petroec-tónicas basadas en muestras de pórfidos leucocráticos si-guen siendo válidas, aún cuando la alteración potásica pudo haber modificado parcialmente su composición química.

## 5 Conclusiones

Los resultados muestran cómo la alteración potásica puede modificar el contenido de REE de los pórfidos. El impacto, sin embargo, depende de la abundancia modal de Hb en la roca original. Los pórfidos con bajo índice de color (IC) y con Bt>Hb son menos susceptibles de sufrir cambios importantes en la razón La/Yb durante la alteración hidrotermal. La concavidad de los patrones de REE puede acentuarse por la alteración (Fig.5), pero las muestras tomadas con criterio petrológico, aún con algo de alteración potásica, tienen todo el potencial de preservar la señal geoquímica prospectiva adakítica, como lo demuestran los pórfidos de RT (Fig.6).

El efecto más destructivo de fluidos más ácidos (alteración filica y/o argílica), por ejemplo, capaces de disolver completamente la Ap, podría diferir del aquí descrito para la alteración potásica y requiere de estudios adicionales.

## Referencias

- Bissig, T., Clark, A.H., Lee, J.K.W. and von Quadt, A., 2003. Petrogenetic and metallogenetic responses to Miocene slab flattening; new constraints from the El Indio-Pascua Au-Ag-Cu belt, Chile/ Argentina: Mineralium Deposita, v. 38, p. 844-862.
- Cabrera, J., Rabbia, O. y Parra, A. 2010. Caracterización Petroológica de la Fuente Magmática del Depósito Radomiro Tomic. Jornadas Bianuales de Geociencias de CODELCO Norte. Calama,
- Hernández, L., 2009. Apatita magmatica como monitor de la evolución de volátiles en intrusivos félsicos del área La Huifa-La Negra, Distrito El Teniente. Tesis de MSc, Geología, Univ. de Chile. 227 pp.
- Kay, S.M., and Mpodozis, C., 2001. Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust. GSA Today, v. 11, p. 4-9
- Rabbia, O., Hernández, L. 2000. Quartz diorite trend in porphyry copper deposits: Underlying petrological processes and implications in copper metalogenesis. Mineralogía y Metalogénia, n° 6, pag. 416-423
- Rabbia, O., Reich, M., Hernández, L., King, R. López-Escobar, L. 2000. High-Al TTG-like suite at the El Teniente porphyry copper deposit, Chile. Resumen extendido, IX Congreso Geológico Chileno, Puerto Varas, vol. 5, pag. 326-329.