

LOS SISTEMAS DE TIPO IOCG – LECCIONES DE LOS ANDES

Fernando Tornos¹ y Francisco Velasco²

¹ Consejo Superior de Investigaciones Científicas. CAB – Ctra Ajalvir km. 4.5, 28850 Torrejon de Ardoz, Madrid, España.
f.tornos@csic.es

² Depto. Petrología y Mineralogía, Universidad del País Vasco, Leioa, España

INTRODUCCIÓN

Los depósitos de tipo IOCG (Iron Oxide-Copper-Gold) forman un grupo de significado y origen debatido que globalmente se encuentran concentrados en provincias de distribución global irregular y edad variable. El modelo IOCG es de gran interés actual por su importancia económica como potencial fuente de hierro, cobre, oro, cobalto, tierras raras y uranio, su facilidad de exploración, e impacto ambiental relativamente menor. A este grupo pertenecen depósitos del tamaño de Olympic Dam (Australia), Marcona (Perú) Candelaria y Mantoverde (Chile) o Kiruna (Suecia). Dentro de este grupo se incluyen mineralizaciones relativamente ricas en magnetita/hematites con proporciones variables de calcopirita y a veces oro que se asuelen asociar a una alteración hidrotermal característica rica en feldespatos alcalinos (adularia o albita) y silicatos cálcicos con hierro reducido (actinolita y/o diopsido-hedenbergita), generalmente ricos en escapolita pero pobres en cuarzo; en este grupo se incluyen también mineralizaciones ricas en hematites y asociadas a sericita y clorita que se interpretan como los equivalentes epizonales de las anteriores, depósitos de magnetita ± apatito y skarns ricos en grandita desarrollados sobre rocas carbonatadas (Williams et al., 2005). Todas estas mineralizaciones están sistemáticamente empobrecidas en Pb y Ag pero enriquecidas en un conjunto de metales inusuales tales como U, REE o Co; también suelen tener concentraciones anómalas en P, F y/o B. La relación genética entre este amplio grupo de mineralizaciones es poco clara a pesar de que siempre aparecen asociados espacialmente. La definición poco clara del tipo IOCG ha motivado que también se incluyan otras mineralizaciones poco o nada relacionadas entre sí, de génesis diversa y que incluso no contienen cantidades significativas de estos metales.

De entre todos los distritos existentes, los Andes Centrales destacan por la abundancia y tamaño de las mineralizaciones y su relativamente poca deformación y metamorfismo – por ello, son un lugar clave para comprender sus relaciones y génesis y proponer modelos globales de exploración.

CARACTERÍSTICAS Y ENCUADRE GEOLOGICO

Los depósitos de óxidos de hierro-(cobre-oro) de la Cordillera de la Costa de los Andes Centrales (CCAC) se encuentran en una estrecha franja de unos 3000 km de longitud y hasta 30 de ancho paralela a la costa del Pacífico y situada entre Lima y Santiago de Chile. En ella coexisten muy diversos tipos de mineralización de edad Jurásico-Cretácico encajados en rocas volcánicas calcoalcalinas de composición andesítica y geoquímica primitiva y rocas plutónicas subcontemporáneas – todas ellas están situadas en las cercanías de la Falla de Atacama y sus extensiones septentrionales. En conjunto parecen haberse formado durante los primeros estadios de subducción andina.

Su estudio global muestra que, aunque aparentemente relacionadas con un evento geológico común, la mineralización se encuentra en una gran variedad de estilos o modelos de mineralización que responden a la precipitación de los metales en diversas trampas geoquímicas – de hecho, se han reconocido hasta catorce estilos de mineralización dentro del grupo IOCG (Tabla 1); estos estilos comparten paragénesis y alteraciones hidrotermales y parecen representar un continuum dentro de grandes sistemas magmático-hidrotermales. La geoquímica isotópica, la geocronología, las inclusiones fluidas y, sobre todo, las relaciones espaciales indican una afiliación magmática para estos depósitos.

Tabla 1. Estilos de mineralización de depósitos IOCG de la Cordillera de Costa

	Tipo	Alteración hidr.	Morfología	Mineralización	Ejemplos
	Venas		Filonos	Cu-(Au)	
IOCG	IOCG (hm)	ser-chl-kf	Cizallas	hm-(Cu-Au)	Mantoverde, Carmen de Cobre
	Skarn cálcico	gr-hd / act	Estratoide, remplazando caliza	mt-(Cu)	Marcona, Las Pintadas
	Skarn magnésico	fo - di/ serp	Estratoide, remplazando dolomía	mt	Pampa del Pongo
	IOCG (mt)	kf-act-chl-di	Estratoide, controlado por fracturas	mt-(Cu-Au)	Punta del Cobre, Mina Justa
	IOCG proximal (mt)	kf-act-bt	Zonas apicales intrusiones	Cu-Mo	Tropezón
	IOCG mt (cizallas)	kf-act	Cizallas	mt-Cu	Tigresa
	IOCG (solo mt)	act	Estratoide	mt	Cerro Negro, Cerro Imán
	Pórfidos de cobre	Q-kf-ser	Zonas apicales intrusiones	Cu	Retaguardia
Magnetita-Apatito	Brechas apatito	kf-(act)	Brechas en andesita	ap	Maria Isidra
	Filonos actinolita-apatito	act	Filonos en andesita	ap	California
	Coladas magnetita	?	Cuerpos estratiformes en andesita	mt	Pleito-Melón
	Diques mt-ap	act-kf	Diques verticales	mt	Carmen de Fierro, Acarí
	mt-ap masivo	act-kf	Cuerpos tabulares	mt	Romeral, Algarrobo

act: actinolita; ap: apatito; bt: biotita; chl: clorita; di: diopsido; fo: forsterita; gr: grandita; hd: hedenbergita; kf: feldespato K/adularia; mt: magnetita; Q: cuarzo; ser: sericita; serp: serpentina.

En detalle, existen dos grandes grupos de depósitos, los de tipo Magnetita-Apatito y los IOCG s.s. Los sistemas de magnetita-apatito se interpretan como cuerpos magmáticos de magnetita – (apatito – actinolita) a los que se asocian extensos sistemas magmático-hidrotermales ligados a la degasificación de esos magmas. Este origen magmático es debatido, pero la propia estructura de la mineralización, la geoquímica isotópica y la presencia de inclusiones vítreas parecen confirmarlo (Tornos et al., 2011). Los estudios experimentales muestran que estos magmas de Fe-P-(Ca-Mg-Ti) inmiscibles en un magma silicatado fraccionan fuertemente el agua y volátiles y su cristalización produce grandes sistemas hidrotermales con formación de actinolita ± magnetita. Sin embargo, la ausencia de cristalización fraccionada y el carácter oxidante inhiben la formación de sulfuros.

Estos sistemas parecen formar un continuum vertical desde depósitos profundos masivos a cuerpos más epizonales con texturas pegmatíticas y cuerpos extrusivos, que llegan a formar coladas. Localmente hay venas y brechas de magnetita/hematites o de apatito±actinolita que se interpretan como derivados de fluidos residuales.

El segundo grupo de depósitos son los de tipo IOCG s.s. Estos depósitos son inequívocamente hidrotermales y se encuentran generalmente formando mantos estratoides (Punta del Cobre, Condestable, Mina Justa; (Haller et al., 2006; Marschik and Fontbote, 2001) siempre encajados en andesita volcanoclástica del Jurásico Superior-Cretácico Inferior y generalmente en relación con fracturas tensionales verticales de segundo orden y direcciones variables. Estas mineralizaciones

tienen contenidos muy variables en metales, que varían desde depósitos de magnetita con pocos sulfuros hasta depósitos de cobre-oro con magnetita accesoria. Estos depósitos están generalmente relacionados con una alteración hidrotermal potásico (+feldespato potásico \pm biotita) - cálcica (actinolita \pm diopsido y a veces grandita) con escapolita y anhidrita en cantidades variables.

Cuando la secuencia incluye potentes niveles carbonatados pueden formarse skarns de gran tamaño. Así, en la caliza de la Fm Chañarcillo de la Unidad Punta del Cobre se desarrollan skarns cálcicos de Fe-Cu (Las Pintadas, Farola) (Marschik and Fontbote, 2001) mientras que en la Fm Marcona se desarrollan skarns gigantes de hierro de carácter cálcico (Marcona?; (Chen et al., 2010) y magnésico (Pampa del Pongo; (Calvo et al., 2013). Todas estas mineralizaciones tienen relaciones poco claras con rocas ígneas. Sin embargo, es muy probable que están relacionados con intrusivos sub-aflorantes; de hecho, ha encontrado en Raul-Condostable diques de composición intermedia en estructuras asociadas a sistemas IOCG (Haller et al., 2006). El único punto en el que se ha observado la relación directa entre un sistema IOCG y rocas intrusivas es en Tropezón (Tornos et al., 2010) donde hay una mineralización de Cu-Mo asociada a una alteración potásico-cálcica ocupando la zona de cúpula de una intrusión diorítica cortada por brechas de turmalina.

Otro grupo de depósitos de tipo IOCG está caracterizado por la presencia de hematites en lugar de magnetita, estar encajados en estructuras de cizalla y asociados a una alteración hidrotermal rica en sericita-clorita (Mantoverde, Carmen de Cobre; (Benavides et al., 2007). En profundidad evolucionan a sistemas de magnetita-clinoanfíbol sugiriendo una relación espacial entre ambos; no se sabe si los sistemas ricos en hematites se localizan encima de los de magnetita o son producto de su removilización posterior.

UN MODELO GLOBAL PARA LOS ANDES

Los sistemas de tipo IOCG de los Andes forman dos grandes grupos que, aunque relacionados espacial y probablemente genéticamente, evolucionan de distinta manera; el modelo propuesto es más complejo que el planteado por (Sillitoe, 2003). Los sistemas de magnetita-apatito están predominantemente formados por cuerpos magmáticos con esta asociación. En conjunto, parecen formar un continuum desde intrusiones meso(?)-zonales a extrusiones.

Los sistemas de tipo IOCG no están enraizados en cuerpos de magnetita-apatito pero en intrusivos silicatados, posiblemente de composición intermedia. Datos geoquímicos preliminares sugieren que son rocas calcoalcalinas pero que, a diferencia del conjunto del magmatismo Jurásico-Cretácico que es muy primitivo, tiene una apreciable contaminación crustal. Su cristalización fraccionada permite el enriquecimiento en cobre-oro. Las rocas trampa favorables son las rocas volcanoclásticas y carbonatadas y es probable que estos sistemas estén conectados con los intrusivos a favor de estructuras tensionales. La reacción con la andesita no parece ser mecanismo suficiente para la precipitación de la mineralización y quizás sea necesaria la mezcla con fluidos exóticos para su precipitación. De hecho, la baja proporción de sulfuros se interpreta como debida a la elevada relación SO_4/H_2S de los fluidos magmáticos; los sulfuros presentes se asocian a la presencia de azufre reducido contenido en la propia roca de caja o introducido por los fluidos externos.

La relativamente poca importancia de brechas y stockworks y la mineralogía sugiere que los sistemas magmático-hidrotermales responsables de estos sistemas IOCG son más profundos, máficos y oxidados que los ligados a los pórfidos cupríferos; hipotéticamente, las rocas intrusivas asociadas se formaron durante un evento específico de la evolución andina.

Finalmente, la coexistencia de sistemas magnetita-apatito e IOCG en el mismo ambiente geológico ha sido interpretada por (Tornos, 2011) como condicionado por el grado y tipo de contaminación crustal. Magmas contaminados con rocas evaporíticas, silicásticas o evaporíticas darían lugar a la separación de un magma inmiscible de Fe-P y sistemas de tipo magnetita-apatito. Menores grados de contaminación no permitirían la separación de estos magmas inmiscibles y darían lugar a sistemas IOCG.

CONCLUSIONES

La variabilidad de los depósitos de óxidos de hierro-(cobre-oro) de la Cordillera de la Costa de los Andes se interpreta como debida a la existencia de un continuum vertical y distintas trampas geoquímicas para los depósitos de tipo magnetita-apatito e IOCG. La exploración de estos sistemas desde un punto de vista global planteando las posibles trampas geoquímicas desde el punto de vista dinámico y asociadas a sistemas magmático-hidrotermales del cinturón Jurásico-Cretácico permite ampliar los objetivos de exploración ya que los depósitos IOCG tienen una gran variabilidad y no puede usarse un modelo de exploración único.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin la inestimable ayuda de Gustavo Calvo (BISA) y Omar Rodriguez (BISA), Mario Rojo y Rodrigo Muñizaga (CMP), Nicolae Popp (Minera Carola), Noel White y Taofa Zheng (Universidad de Hefei). Trabajo financiado parcialmente por el proyecto DGI CGL2006-03078 (España).

REFERENCIAS

1. Benavides, J., Kyser, T. K., Clark, A. H., Oates, C. J., Zamora, R., Tarnovschi, R., and Castillo, B., 2007, The Mantoverde iron oxide-copper-gold district, III region, Chile: The role of regionally derived, nonmagmatic fluids in chalcopyrite mineralization: *Economic Geology*, v. 102, p. 415-440.
2. Calvo, G., Tornos, F., and Velasco, F., 2013, The geology of the giant Pampa del Pongo magnetite skarn (S Peru) and its relationship with IOCG systems, *Mineral deposit research for a high Tech World -12 th SGA Biennial Meeting 2013*, 3: Uppsala, SGA, p. 1355-1358.
3. Chen, H., Clark, A. H., and Kyser, T. K., 2010, The Marcona Magnetite Deposit, Ica, South-Central Peru: A Product of Hydrous, Iron Oxide-Rich Melts?: *Economic Geology*, v. 105, p. 1441-1456.
4. Haller, A. d., Corfu, F., Fontbote, L., Schaltegger, U., Barra, F., Chiaradia, M., Frank, M., and Alvarado, J. Z., 2006, Geology, geochronology, and Hf and Pb isotope data of the Raul-Condestable iron oxide-copper-gold deposit, central coast of Peru: *Economic Geology*, v. 101, p. 281-310.
5. Marschik, R., and Fontbote, L., 2001, The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au(-Zn-Ag) deposits, Chile: *Economic Geology*, v. 96, p. 1799-1828.
6. Sillitoe, R. H., 2003, Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view: *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 787-812.
7. Tornos, F., 2011, Magnetite-Apatite and IOCG deposits formed by magmatic-hydrothermal evolution of complex calc-alkaline melts, *in Barra, F., Reich, M., Campos, E., and Tornos, F., eds., SGA Biennial Meeting Proceedings: Let's talk Ore Deposits*, p. 26-28.
8. Tornos, F., Velasco, F., Barra, F., and Morata, D., 2010, The Tropezon Cu-Mo-(Au) deposit, Northern Chile: the missing link between IOCG and porphyry copper systems?: *Mineralium Deposita*, v. 45, p. 313-321.
9. Tornos, F., Velasco, F., Morata, D., Barra, F., and Rojo, M., 2011, The magmatic hydrothermal evolution of the El Laco deposit as tracked by melt inclusions and isotope data, *in Barra, F., Reich, M., Campos, E., and Tornos, F., eds., SGA Biennial Meeting Proceedings: Let's talk Ore Deposits*, p. 443-445.
10. Williams, P., Barton, M. D., Johnson, D. A., Fontboté, L., Haller, A. d., Mark, G., Oliver, N. H. S., and Marschik, R., 2005, Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Geology, Space-Time Distribution, and Possible Modes of Origin, *in Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., and Richards, J. P., eds., Economic Geology - One hundredth anniversary Volume: Littleton, Society of Economic Geologists*, p. 371-406.