

# GEOTERMOMETRÍA, COCIENTES METÁLICOS Y DIRECCIONES DE FLUJO EN LA VETA ESPERANZA, DISTRITO HUACHOCOLPA (PERÚ)

<sup>1</sup>Cosme Rafael Pérez-Puig, <sup>2</sup>Ricardo Castroviejo, <sup>3</sup>Domingo Alfonso Martín,  
<sup>4</sup>Jorge Luis Costafreda Mustelier

<sup>1</sup> Dpto. Ingeniería Geológica, Universidad Politécnica de Madrid. c/ Ríos Rosas 21 Madrid (España).  
(+34)677379561. cosmeperezpuig@gmail.com

<sup>2</sup> Dpto. Ingeniería Geológica, Universidad Politécnica de Madrid

<sup>3</sup> Dpto. Ingeniería Geológica, Universidad Politécnica de Madrid

<sup>4</sup> Dpto. Ingeniería Geológica, Universidad Politécnica de Madrid

## Resumen

El trabajo a continuación detalla los resultados más importantes de un estudio conjunto de: mineralogía de mena y ganga, distribuciones geoquímicas y microtermometría con el objetivo de caracterizar los flujos mineralizantes de la veta Esperanza.

La veta Esperanza es un yacimiento epitermal de baja sulfuración, actualmente en explotación en el distrito de Huachocolpa, Perú. La mineralización está compuesta por esfalerita, galena, tetraedrita, calcopirita y otros sulfuros y sulfosales en ganga de cuarzo, barita y carbonatos en una estructura E – W de corrida 1500 m y profundidad 350 m sin control estructural aparente para la deposición de los minerales.

Estudios de inclusiones fluidas indican que los fluidos mineralizantes eran moderadamente salinos (5 % a 7 % eq. NaCl), de temperatura baja (250 °C a 300 °C), con procesos de ebullición a 350 m de profundidad, que favoreció la deposición.

Las observaciones tanto macroscópicas como microscópicas de minerales, los estudios de distribución de leyes y especialmente los cocientes metálicos están conformes con las medidas microtermométricas, indicando un ascenso de fluidos desde el oeste y a su vez desde el este.

El estudio de cocientes metálicos con el cobre indican una lixiviación por aguas meteóricas que han percolado por la estructura creando minerales de neoformación como la changoita, un raro sulfato de zinc, que se ha hallado en el curso de este trabajo en la veta Esperanza como segundo yacimiento en el mundo.

**Palabras Clave:** *Metalogenia, inclusiones fluidas, cocientes metálicos, Huachocolpa, Perú.*

## 1. Introducción

La veta Esperanza es un yacimiento de Zn-Pb-Ag-(Cu) ubicado en la cordillera occidental de los Andes Centrales peruanos, entre los 4000 y 4650 m s.n.m. Se localiza en el extremo sureste del Distrito de Huachocolpa. La mina es operada por la peruana Cía. de Minas Buenaventura S.A.A.

---

Geotermometría, cocientes metálicos y direcciones de flujo de la veta Esperanza, distrito Huachocolpa (Perú).

© 2011 pp xx-xx ISBN XXX-XXX-XXX-X

Se trata de un depósito epitermal de baja sulfuración, con una orientación ~E-W y buzamientos hacia el sur de alto ángulo (80°). Tiene una corrida de 1500 m, potencias entre pocos mm y 4 m y, un desarrollo en profundidad, reconocido mediante labores de 350 m y 650 m con sondeos. De forma similar a otras vetas explotadas en el distrito minero (p.e. Teresita o Bienaventurada) se emplaza en volcanitas intermedias a félsicas (andesitas a dacitas) del Grupo Huachocolpa (edad comprendida entre el Mioceno Medio al Plioceno superior) [1].

El yacimiento presenta una morfología en rosario como producto del relleno de fracturas desarrolladas durante el evento Quechua III [2] [3]. La mineralización mena consiste en esfalerita, galena, tetraedrita, pirita, calcopirita y sulfosales de Ag y Pb en una ganga compuesta por cuarzo, barita y calcita, fundamentalmente [4]. Las leyes de producción son ~5% Zn, ~8Oz/t Ag y ~3% Pb, despreciándose el cobre (ley media ~0,04% Cu).

## 2. Deposición

Mediante estudios de campo y petrografía se han descrito 3 eventos deposicionales [4]:

- i. *Evento previo*: caracterizado por calcedonia, barita y pirita. Finaliza con brechificación y deposición de “cuarzo negro” (calcedonia y pirita de grano fino), cuarzo de grano fino y algo de esfalerita, galena, pirita y, en menor cantidad, calcita.
- ii. *Evento principal*: tras un nuevo brechamiento, se deposita cuarzo grueso, barita, esfalerita de grano grueso (con abundantes inclusiones de fluido), galena (con contenidos en Ag), pirita, calcopirita, tetraedrita, polibasita, marcasita, jamesonita, antimonita, rejalgar y bournonita. Se estima una deposición de minerales de mena superior al 95%. Finaliza con un episodio brechoide también.
- iii. *Evento póstumo*: se trata de una deposición tardía, de calcita rellenando huecos y pirita fina a través de fisuras.

Además, se reconoce un episodio de alteración supérgena posterior con la presencia de óxidos de Fe y sulfatos como la changoita.

## 3. Geotermometría de inclusiones de fluido

La petrografía de inclusiones de fluido (IF) ha revelado la presencia de inclusiones primarias (P), pseudo-primarias (o modificadas, PP), secundarias (S) y pseudo-secundarias (PS). La petrografía de IF, de la misma manera, ha demostrado que las mejores FIA's (familias de IF, según definición en [5]) para el objetivo propuesto son las IF primarias presentes en la esfalerita del evento principal.

También se han medido IF en el cuarzo y barita del mismo evento. Sin embargo, las IF del cuarzo eran demasiado pequeñas y con evidencias de recristalización (tipo PP). Por otro lado, las de la barita mostraron stretching y, en ciertos casos, decrepitación durante el calentamiento.

El estudio de IF ha permitido caracterizar los fluidos como acuosos y moderadamente salinos (5 a 7 % eq. NaCl); así como la temperatura de homogenización ( $T_h$ ), que varía en

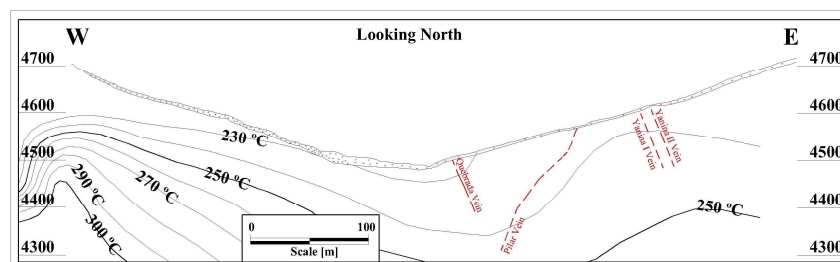
el rango 250 a 300 °C. Se han reconocido procesos de ebullición durante la precipitación (boiling) debido a:

- Coexistencia de IF ricas en fluido e IF ricas en vapor, con  $T_h$  similares.
- Además, las IF ricas en fluido presentan salinidades mayores que IF acuosas de otras zonas
- Calcita hojosa (bladed calcite) reemplazada por cuarzo.

Por tanto, la  $T_h$  se puede considerar como el valor real de la  $T^a$  de “trapping”, que es la  $T^a$  de deposición y encapsulamiento del fluido mineralizador.

Las (paleo)isotermas que se deducen del estudio de IF (figura 1) muestran 2 zonas de máximo termal, lo que correspondería a 2 focos calóricos diferentes:

1. El más importante (>300 °C) se encuentra en el extremo oeste de la veta, indicando la relación con el distrito de Huachocolpa.
2. El otro, de aproximadamente 250 °C, se localiza en el extremo opuesto de la veta, teniendo un carácter más local.



**Figura 1.** Distribución de (paleo)isotermas deducidas en el estudio de IF.

## 4. Distribución geoquímica y mineralógica

Durante el estudio litogeoquímico de la veta Esperanza se han descrito más de 40 muestras al microscopio y se han interpretado datos de más de 3000 muestras obtenidas de manera sistemática en labores y sondeos. De esta manera se obtiene un desarrollo espacio-temporal de la estructura descrita en el apartado 2. Deposición.

### 4.1 Cocientes metálicos

Siguiendo la metodología desarrollada por U. Petersen y aplicada al cercano yacimiento de Julcani [6]. Para ello, se ha seguido el procedimiento de trabajo aplicado en la mina Chonta (localizada también en el distrito de Huachocolpa) [7], que requiere asumir los siguientes aspectos:

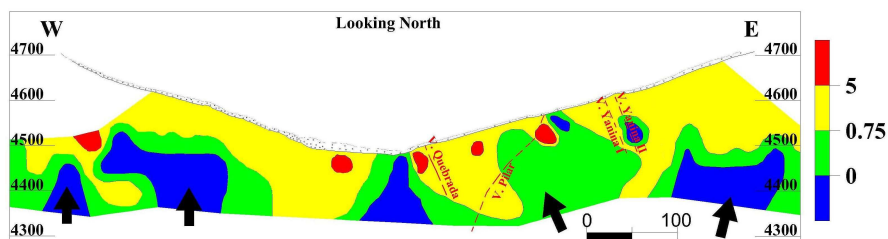
- No habrá precipitación de metales hasta que se alcance su solubilidad relativa en el fluido hidrotermal.
- La saturación y precipitación son consecuencia de un enfriamiento del fluido; debido a la migración hacia niveles más someros y/o flujos laterales que se alejan de la fuente. De la misma manera, el descenso de la presión y otros cambios

relacionados con la migración del fluido actuarán en el mismo sentido, favoreciendo la precipitación.

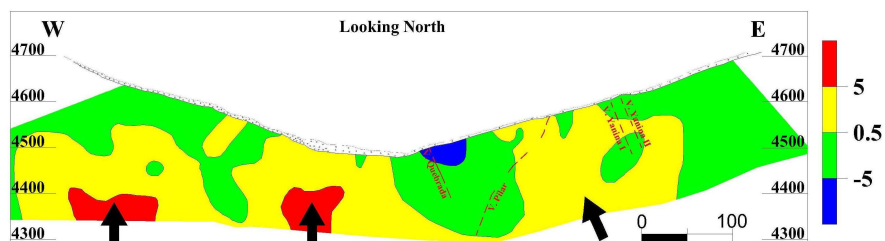
- La  $T^a$  y el instante de comienzo de precipitación para cierto metal no dependen únicamente de la solubilidad, sino también de la concentración: la precipitación de un metal en condiciones de disolución no saturada será inhibida, comparándose con las mismas condiciones físico-químicas para la disolución saturada.

La certeza de tratar con un yacimiento con un único evento mineralizador (el resto son despreciables por su bajo contenido metálico) permite la utilización de la herramienta de cocientes metálicos para conocer las variaciones en el quimismo de la veta y, por ende, el desarrollo espacial de la mineralización.

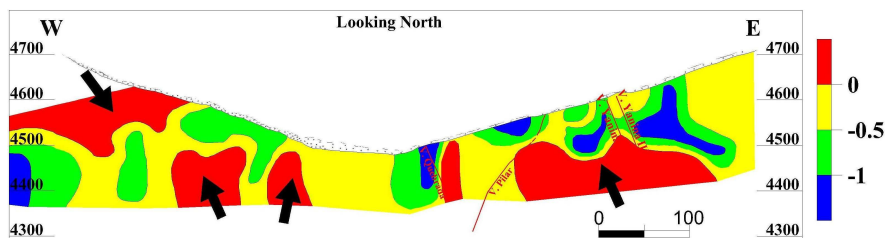
Mediante un estudio estadístico se ha confirmado la distribución log-normal de las leyes [4], con lo que se procede a trabajar con los cocientes metálicos de los ln de las leyes. La representación gráfica de los cocientes  $\ln(\%Pb)/\ln(\%Zn)$ ,  $\ln(Oz/tAg)/\ln(\%Pb)$  y  $\ln(Oz/tAg)/\ln(\%Cu)$  (figuras 2, 3 y 4) sugieren un flujo ascendente, accediendo por ambos lados (oeste y este) de la estructura, tal y como indican las flechas.



**Figura 2.** Cociente metálico  $\ln(\%Pb)/\ln(\%Zn)$ , el Zn (azul) domina en profundidad.



**Figura 3.** Cociente metálico  $\ln(Oz/t Ag)/\ln(\%Pb)$ , la Ag (rojo) domina ligeramente en profundidad en la zona oeste.



**Figura 4.** Cociente metálico  $\ln(Oz/t Ag)/\ln(\%Cu)$ , la Ag (rojo) domina en profundidad y en la esquina superior oeste.

Geotermometría, cocientes metálicos y direcciones de flujo de la veta Esperanza, distrito Huachocolpa (Perú).

© 2011 pp xx-xx ISBN XXX-XXX-XXX-X

La figura 2 muestra el predominio del Zn (esfalerita) en profundidad respecto al Pb (galena). La figura 3 indica un ligero predominio de la Ag en profundidad en la zona oeste respecto al Pb. Por último, en la figura 4 se observa la mayor presencia de Cu respecto de Ag en niveles superiores. Sin embargo, debido a procesos de alteración supérgena el Cu ha sido lixiviado en la mitad oeste.

Esta disposición del Cu en niveles más someros, similar al mostrado en [7] y [8], y opuesto al obtenido en [9] vendría explicada por el bajo contenido en dicho metal del fluido mineralizador (ley Cu = 0,04%; cocientes Zn/Cu y Pb/Cu > 15) y su precipitación en niveles superiores una vez se hubiera alcanzado el equilibrio de solubilidad.

#### **4.2 Distribución mineralógica**

La abundancia relativa de la esfalerita en profundidad y la galena en superficie apoyan distribución geoquímica reconocida mediante la aplicación de cocientes metálicos.

Además, minerales de ambientes distales en estos yacimientos como son la antimonita y rejalgar, se han encontrado en los niveles superiores de la zona este, junto con goethita, yeso y otros minerales supérgenos; lo cual es consistente con fluidos ascendentes descritos en este trabajo.

De igual manera, la presencia de changoita ( $\text{Na}_2\text{Zn}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), detectada a una cota ~4550 m en la zona oeste sugiere la presencia de un flujo de agua oxidante, hecho que apoya la lixiviación del Cu observada en la figura 4.

### **5. Conclusiones**

El estudio combinado mediante técnicas clásicas (en este caso IF y estudios litogeoquímicos) mantiene su vigencia y permite la correcta caracterización de la evolución de los fluidos hidrotermales en el estudio de yacimientos minerales. Se ha obtenido una serie de resultados consistentes todos ellos en el estudio de la veta Esperanza: flujos ascendentes y posterior alteración supérgena desde superficie.

Dicho estudio combinado es una herramienta fundamental en la exploración de nuevos yacimientos así como para la reinterpretación de antiguos criaderos: el mayor conocimiento del yacimiento permitirá enfocar adecuadamente las exploraciones en la veta estudiada y en otros prospectos cercanos.

De la misma manera, pone de relevancia la necesidad de tener en cuenta las características geológicas del yacimiento en cuestión. Así, se ha podido discernir y caracterizar adecuadamente, entre otros procesos, la anomalía en la deposición del Cu y su posterior removilización, equivalente a lo observado en otras vetas del distrito [7] [8].

Por último, hay que resaltar la detección de procesos supérgenos mediante la aplicación de cocientes metálicos; confirmado por análisis mineralógicos y observaciones detalladas.

### **6. Agradecimientos**

Se agradece el apoyo prestado por Cía de Minas Buenaventura S.A.A., el personal de la U.P. Recuperada y el staff de Lima.

Los estudios de laboratorio se han llevado a cabo en el Laboratorio de Microscopía Aplicada y Análisis Digital de Imágenes de la Universidad Politécnica de Madrid (rla207 de la Comunidad de Madrid) con instrumentación adquirida mediante los proyectos GR92-0135, UE95-0007, UE98-0027 y CGL2006-13688-C02-01 (Ministerio Educación y Ciencia de España).

## 7. Referencias Bibliográficas

- [1] Morche, W. La Torre, O. De la Cruz, N. Cerrón, F. "Geología del Cuadrángulo de Huachocolpa". *Carta Geológica Nacional 1:100.000*. Boletín nº 63. 1996. INGEMMET. Lima (Perú). pp. 1-132.
- [2] Soulas, J.P. "Las fases tectónicas jóvenes de los Andes Centrales del Perú". *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*. Tomo nº 50. 1975. SGP. Lima (Perú). pp 77-86.
- [3] Megard, F. "Estudio geológico de los Andes Centrales del Perú". *Boletín del INGEMMET*. Boletín nº 8, serie D. 1979. INGEMMET. Lima (Perú).
- [4] Pérez-Puig Obieta, C.R. *Investigación de los controles geológicos de la mineralización en veta Esperanza (Huachocolpa, Perú)*. 2008. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid (España). 309 p. 19/09/11: <http://oa.upm.es/1237>
- [5] Goldstein, R.H. Reynolds, T.J. *Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals*. 1994. Short Course 31. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Tulsa (Oklahoma, USA).
- [6] Petersen, U. Noble, D.C. Arenas, M.J. Goodell, P.C. "Geology of the Julcani mining district, Peru". *Economic Geology*. Volumen 72. 1977 pp. 931-949.
- [7] Castroviejo Bolibar, R. Yparraguirre Calderon, J.A. Chacón Oreja, E. "Lithogeochemistry and fluid flow in the epithermal Veta Rublo base metal-silver deposit, Chonta Mine (Huancavelica, Peru)". *23<sup>rd</sup> International Applied Geochemistry Symposium (IAGS)*. 2007. Universidad de Oviedo. Oviedo (España). pp. 159-160.
- [8] Yparraguirre Calderón, J.A. *Secuencias paragenéticas, alteraciones hidrotermales e inclusiones fluidas de la Veta Rublo, Mina Chonta, Huachocolpa*. 2008. Tesis MSc; Red DESIR, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid (España).
- [9] Goodell, P.C. Petersen, U. "Julcani mining district, Peru: a study of metal ratios". *Economic Geology*. Volumen 69. 1974 pp. 347-361.