

# Tratamiento hidrometalúrgico del oro diseminado en pirita y arsenopirita del relave de flotación

Hydrometallurgic treatment of gold disseminated in pyrite and arsenopyrite from flotation tailing

**<sup>1</sup>Angel Azañero Ortiz, Vidal Aramburú Rojas, Janet Quiñones Lavado, Luis Puente Santibáñez, Manuel Cabrera Sandoval, Víctor Falconí Rosadio, Juan de Dios Quispe Valdivia,<sup>2</sup> Óscar Francisco Cardoza Ramos, Kelly Jaimes Mallqui, Alberto Medina**

## RESUMEN

El relave de flotación objeto de investigación proviene de un mineral que tiene valores metálicos de cobre, plata y oro, se recupera 90% de cobre, 55 % de plata y 10% de oro por flotación.

El estudio y caracterización mineralógica realizada al relave a 200 aumentos indica presencia de 54% de pirita y 43% de gangas, no detecta oro y los análisis químicos reportan 3.74 gr/tm de oro y 4.18 Oz/TC de plata.

Las pruebas de cianuración directa con remolienda a - 45 u de recuperaciones muy pobres, máximo 10%, reforzando la hipótesis que el metal precioso está en solución sólida en la pirita. En base a estos resultados se desarrollan pruebas de lixiviación con cianuro, previa oxidación con aire y oxidación pirometalúrgica, se obtiene 40% de disolución en cianuro a la muestra que se óxido con aire en medio alcalino y en el segundo caso, si se logra recuperar 90% de oro mediante pruebas de tostación a 600° C, lavado de la calcina para disminuir el consumo de reactivos y seguida de cianuración por agitación.

**Palabras clave:** Oxidación, lixiviación, relave flotación.

## ABSTRACT

Tailings come from a mineral containing copper, silver and gold and recovery percentages of 90% of copper, 55 % of silver and 10% of gold from flotation.

The study and mineralogic characteristic made to tail at 200 x magnification shows the presence of 54% of pyrite and 43% of gangue, does not detect gold, and has a chemical analysis of 3.74 gr/TM gold and 4.18 Oz/TC silver.

The cyanidation tests made to the reground tailings at - 45 u give poor recoveries, 10% at most, reinforcing the hypothesis that the precious metal is in solid solution in the pyrite. Based on these results, cyanide lixiviation tests are performed using air and pyrometallurgical oxidation, in the first case 40% of cyanide dissolution is obtained trough air oxidation in alkaline media, and in the second case, 90% of gold is recovered trough roasting tests at 600° C, calcine wash to diminish the consumption of reactivos followed by cyanidation by agitation.

**Keywords:** Oxidation, lixiviation, tailing flotation.

1 Profesores EAP Ing. Metalúrgica UNMSM. E-mail: aazanero@unmsm.edu.pe, vidalaramburu@hotmail.com, lourdesjanetq@yahoo.com, pablonunez@terra.com.pe, mcabrerar@unmsm.edu.pe, pecdiiazg@unmsm.edu.pe, lpuentes@unmsm.edu.pe, victorafalconi@hotmail.com, walterengifo@hotmail.com

2 Alumnos EAP Ing. Metalúrgica UNMSM. E-mail: oscarcardozar@hotmail.es, albertomedinau@gmail.com

## I. INTRODUCCIÓN

En las diferentes labores mineras del país, los relaves de flotación que tienen contenidos metálicos importantes, no reciben el tratamiento metalúrgico adecuado para poder recuperar los metales valiosos. que todavía lo acompañan, estos materiales ya han pasado por el proceso de reducción de tamaño que es la parte mas costosa del beneficio de minerales y para poder procesarlos a veces solo requiere una remolienda y en casos mas complicados, preconcentración, oxidación y cianuración para poder extraer exitosamente el metal o metales preciosos.

Si bien es cierto que el costo de tratamiento se eleva a medida que el tratamiento metalúrgico es mas complejo, sin embargo debido a que en algunos periodos de tiempo, como el actual el buen precio internacional de los metales, particularmente el oro, que sirve como respaldo y refugio de muchos ahorristas e inversionistas, el alto costo de tratamiento puede ser cubierto por los elevados precios de los metales, sin embargo conjuntamente con el estudio técnico, debe ir el informe económico, en paralelo acompañado por buenas políticas medioambientales(Quadrio, 1984) y sociales que mejoren la calidad de vida de la zona de impacto.

## II. EXPERIMENTO

### 2.1. Objetivos

Identificación y cuantificación de los valores metálicos mediante estudio mineralógico y análisis químico de la muestra.

Recuperar metales preciosos principalmente oro de un relave de flotación de sulfuros de cobre plata, refractario a la cianuración directa

### 2.2. Equipos, materiales y reactivos

Molino de bolas

Celda de flotación Denver

Rot-up /tamices

Bomba peristáltica

Mufla

Bomba de vacío

Balanza electrónica

Bureta automática acaramelada

Potenciómetro digital

Cianuro de sodio

Cal, nitrato de plata

Ioduro de potasio.

### 2.3. Relave aurífero

El Mineral original tenía valores de Cu – Ag – Au, primero se flotó un concentrado de Cu – Ag, el relave con abundante presencia de sulfuros, principalmente pirita, escasos contenidos de tetrahedrita (Ammen C.W., 1984 Betejtin, 1981), esfalerita y goetita; en trazas covelita, enargita y luzonita, el estudio mineralógico no detecta oro libre ni adsorbido en la superficies de los sulfuros, el análisis químico reporta (Ammen C.W, 1984) contenido interesante de oro y plata, lo que indica que deben estar en intercrecimientos atómicos(Doung Halbe, 1988) dentro de la pirita, el relave de flotación donde se encuentra el mayor contenido de oro es objeto de nuestra investigación.

### 2.4. Hipótesis

El 90 % del oro contenido en el mineral, permanece en el relave de flotación, mayormente constituido por sulfuros de fierro, no responde a la cianuración directa aun con remolienda fina, planteamos la hipótesis que el oro debe estar en solución sólida (Ministerio de Energía y Minas 1996) en la pirita y requiere procesos de oxidación para liberar al oro y hacerlo soluble en un reactivo lixivante.

### 2.5. Metodología

La investigación realizada está basada en el diseño y desarrollo de pruebas experimentales a escala de laboratorio, el mineral pertenece a la zona norte del Perú y fueron utilizadas las instalaciones de los laboratorios de metalurgia extractiva de Ingeniería Metalúrgica e Ingeniería geológica de la UNMSM

### 2.6. Análisis químico del mineral

El mineral en estudio tiene el siguiente análisis. Ver Tabla N.º 1.

Tabla N.º 1. Análisis Químico Cabeza Experimental.

Leyes %		Au: gr/TM		Ag: OZ/TC	
Cu	Au	Ag	As	Fe	S
0.09	3.74	4.18	0.16	16.5	37.0

### 2.7. Resumen análisis mineralógico: vol. %

Se muestra el análisis mineralógico en las siguiente tabla.

Tabla N.º 2. Estudio Mineralógico del mineral de cabeza % Volumen

PIRITA	GANGA	TETRAEDRITA	ESFALERITA	ENARGITA
53.65	43.34	2.33	0.34	Trz

## 2.8. Caracterización mineralógica

La muestra correspondiente se ha estudiado mediante el microcopio de luz polarizada por el método de reflexión, para lo cual previamente se ha confeccionado la sección pulida y sobre la base de ésta se han determinado sus respectivos integrantes mineralógicos, es decir, se hizo su caracterización, a partir de ésta se procedió a ejecutar el análisis modal, los resultados se encuentran especificados a continuación. Ver Tabla N.º 3.

## 2.9. Mineralogía

La caracterización mineralógica indica todos los minerales que han sido observados, de los cuales algunos no han intervenido en el análisis modal, el motivo de esta no intervención es porque están en el orden de trazas.

### Minerales auríferos:

En esta muestra no se han observado minerales auríferos, lo que indica que el oro se podría encontrar encapsulado ó en solución sólida

### Minerales argentíferos

No se han observado minerales de plata.

### Minerales de Fierro

Como minerales ferríferos están la pirita, la magnetita y la goetita.

### Minerales cupríferos

Las especies minerales mas importantes son: Tetraedrita, covelita, enargita, luzonita y bornita.

### Otros minerales

En este grupo se encuentran las gangas, silicatos, carbonatos y otros).

Tabla N.º 3

Estudio mineralógico de la muestra y volumen porcentual de las diferentes especies mineralógicas.

Minerales	Volumen Porcentual
Gangas	43,34
Pirita	53,65
Tetraedrita	2,33
Esfalerita	0,34
Goetita	0,34
Hematita	Trz
Magnetita	Trz
Galena	Trz
Bornita	Trz
Covelita	Trz
Enargita	Trz
Luzonita	Trz

## 2.10. Distribución volumétrica

La distribución volumétrica realizada en esta muestra se ha hecho sobre la base de los minerales que han intervenido en el análisis modal:

### 2.11. Grados de liberación

Los grados de liberación que presentan los minerales que han intervenido en el análisis modal de la muestra, son proporcionados en porcentajes: Ver Tabla N.º 4.

Tabla N.º 4

Especies minerales y sus grados de liberación

Minerales	Grados de Liberación Porcentual
Gangas	97,00
Pirita	96,00
Tetraedrita	80,00
Esfalerita	100,00
Goetita	94,00

### 2.12. Interpretación de los grados de liberación

53,65% del volumen total de la muestra es pirita, de este volumen el 96,00% está libre, mientras que el 4,0% restante se encuentra aún entrelazada.

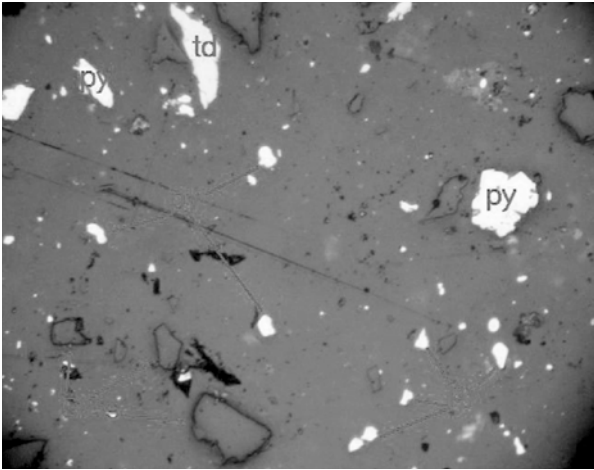
La tetraedrita ocupa el 2,33 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 80% se encuentra libre, mientras que el 20,0% restante se encuentra aún no liberada.

La esfalerita ocupa el 0,34% del volumen total de la muestra, de este volumen el 100% se halla libre, lo que indica que la totalidad de las partículas están libres.

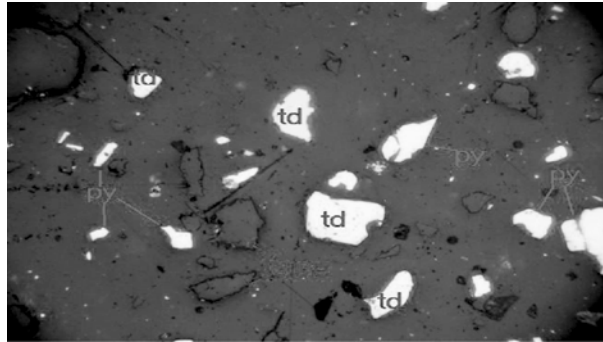
43,34% del volumen total de la muestra ocupa las gangas, de este volumen el 97,00% está libre, mientras que el 3,00% restante se encuentra entrelazada,

### 2.13. Micrografías

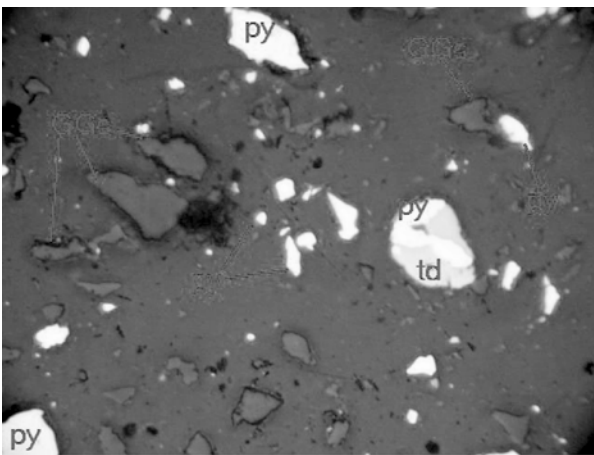
A continuación se muestran las micrografías tomadas durante el estudio que son testigos fehacientes de lo observado en la muestra. Ver Figuras N.º 1, 2, 3, 4,5 y 6.



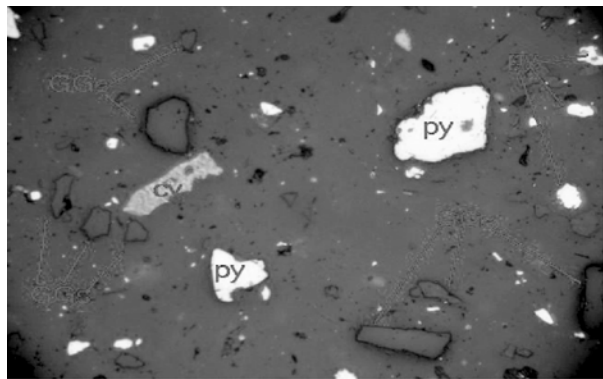
**Figura N.º 1.** Partículas libres de pirita (py), de tetrahedrita(td), y de gangas(GGS). Magnificación: 200X



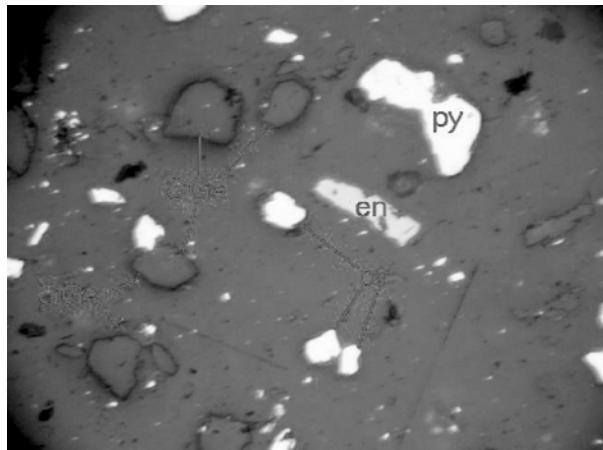
**Figura N.º 4.** Partículas libres de tetrahedrita (td), pirita (py), y de gangas(GGS). Magnificación: 200X



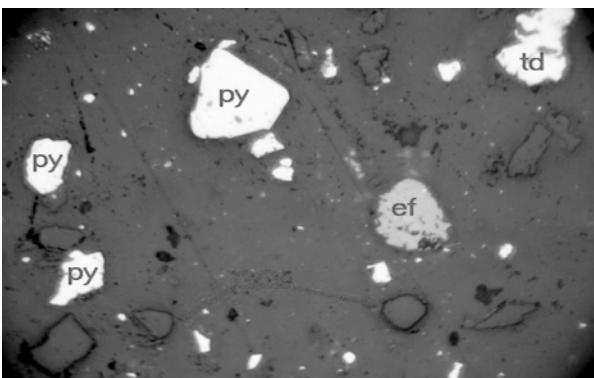
**Figura N.º 2.** Partículas libres de pirita (py), Gangas (GGs) y un entrelazamiento de tetrahedrita(td) con pirita(py) Magnificación: 200X



**Figura N.º 5.** Partículas libres de pirita (py), covelita(cv) y de gangas (GGS). Magnificación: 200X



**Figura N.º 6.** Partículas libres de pirita (py), enargita(en) y de gangas (GGS). Magnificación: 200X



**Figura N.º 3.** Partículas libres de pirita (py), de esfalerita(ef), y de gangas (GGS). Magnificación: 200X

#### 2.14. Pruebas oxidación con aire

Las pruebas de oxidación con aire tienen por objeto oxidar algunas especies minerales sulfuradas de hierro como son marcasita y pirrotina y liberar el oro que pueda tener estas especies.

### Condiciones de trabajo

Muestra:	50 gr
Dilución:	3/1
Tiempo:	24 horas
Agitación:	300 rpm
	Agitador de velocidad variable
Equipo de oxidación:	Bomba peristáltica
Alimentación de aire:	50 rpm
Variable:	pH

### RESULTADOS

Las variaciones del pH se muestran en la siguiente tabla

Tabla N.º 5. Pruebas metalúrgicas de oxidación variando el pH

Prueba	pH	Cal Kg/TM
1	5.30*	--
2	9.00	2.0
3	11.0	4.0

\* pH Natural del relave

### 2.15. Pruebas oxidación pirometalúrgica

Las pruebas de oxidación pirometalúrgica se realizó previo al proceso de lixiviación. Ver Tabla N.º 6.

#### Condiciones de trabajo

Muestra	:	50 gr
Tiempo	:	90'
Equipo	:	mufila
Temperatura	:	variable

Tabla N.º 6. Pruebas de oxidación a diferentes temperaturas y el grado de oxidación alcanzado en %

Prueba	Temp.	Calcina	Pérdida P	Azufre	oxidación
N.º	°C	gr.	%	S	%
4	500	39.13	21.70	3.55	90.40
5	600	37.39	25.20	1.76	95.24
6	700	36.72	26.60	1.28	96.54
7	600	37.4	25.2	1.71	95.38
8	600	37.6	24.8	1.70	95.40

### 2.16 Pruebas de cianuración por agitación

#### Condiciones comunes de trabajo

Fuerza de cianuro:	0.10%
Dilución:	4/1
Tiempo:	24 horas
pH:	11
Agitación:	400 rpm
Control de reactivos:	cada 2 horas primeras 8 horas de trabajo y un control al final. Ver Tabla N.º 7.
Pruebas 1, 2 y 3:	Oxidación con aire
Pruebas 4, 5 y 6:	Oxidación pirometalúrgica

Tabla N.º 7. Resultados de cianuración por agitación

Prueba	Peso	Leyes	Au:gr/ TM	Recuperación %	Reactivos: Kg/TM		
N.º	Gr	Au	Ag*	Au	Ag	Cianuro	Cal
1	48.5	2.42	3.67	35.29	12.2	6.9	4.0
2	49.5	2.25	3.41	39.84	18.42	6.5	4.5
3	49.4	1.92	3.28	48.66	21.15	6.1	5.5
4	38.6	0.82	2.22	78.07	46.89	6.8	10.8
5	37.0	0.47	2.61	87.43	37.56	7.7	12.1
6	36.1	0.68	1.39	81.82	66.75	8.5	13.6
7	37.4	0.34	2.38	90.90	43.06	1.26	1.83
8	37.6	0.39	2.69	89.57	35.64	1.12	1.97

Pruebas 7 y 8: Oxidación pirometalúrgica 6000, lavado de la calcina

### III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se trata de un relave con especies mineralógicas (Betejtin, 1977, Dana Edward, 1981): Pirita ( $Fe_2S$ ), covelita ( $CuS$ ), tetraedrita ( $Cu Fe$ )<sub>12</sub>Sb<sub>4</sub>S<sub>13</sub>, enargita ( $Cu_3AsS_4$ ) y luzonita, el oro está en intercrecimientos atómicos en la pirita.

El 53,65% del volumen total de la muestra es pirita, de este volumen el 96,00% está libre, mientras que el 4,0% restante se encuentra aún entrelazada.

El relave de flotación (Doung Halbe, 1988) ensaya 3.74 gr Au/TM y 4.18 OZ Ag /TC tiene un valor económico de \$ 112.0 y \$ 54.0, por oro y plata respectivamente.

Las pruebas de oxidación (Cole J.A, 1995) (P-1) y

oxidación en medio alcalino (P-2, P-3) con aire, reporta una extracción promedio de 40% para el oro y 20% la plata, el consumo de reactivos, cal y cianuro son relativamente altos. (Marsden, 1993, 1996)

Los resultados obtenidos al cianurar (Contreras Castro, 1967) previa oxidación con aire nos indicarían que parte de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) podría estar bajo la forma de marcasita ( $\text{FeS}_2$ ) que es isomórfica con la pirita y tiene la propiedad de oxidarse dos veces más rápida que la pirita y liberar el oro más fácilmente, sin embargo, en este caso es insuficiente la oxidación con aire.

Oxidación pirometalúrgica y lixiviación de la calcina tiene consumo de reactivos más altos que la oxidación con aire, pero el porcentaje de extracción para el oro y plata son mejores.

Después de un tratamiento de oxidación a minerales auríferos sulfurados refractarios, el consumo de cal y cianuro es usualmente alto; esto se debe a que durante la oxidación se forman una serie de compuestos complejos, sales solubles y iones metálicos diversos causantes de excesivo consumo de reactivos.

Mediante tostación, lavado de la calcina seguida de cianuración por agitación es posible mejorar la recuperación de oro y también disminuir el consumo de reactivos.

#### IV.- CONCLUSIONES

El relave tiene abundante contenido de sulfuros de fierro (55%) y el oro está en solución sólida principalmente en la pirita.

Por cianuración directa solo se puede disolver 10 % del oro total.

Cianuración de la muestra, previa oxidación directa y alcalina con aire, no es una opción importante sólo se extrae 48.66 y 21.15% del oro y plata respectivamente.

Oxidación pirometalúrgica a  $600^\circ\text{C}$  y  $700^\circ\text{C}$  seguida de cianuración (P-5) se recupera 87.43% de oro y (P-6) 66.75% de plata.

Los mejores resultados se obtiene con oxidación pirometalúrgica a  $600^\circ\text{C}$ , lavado de la calcina, seguida de cianuración por agitación (P7 Y P8) se recupera 90 % de oro, 40 % de plata y se logra una disminución substancial del consumo de cal y cianuro.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Superior de Investigaciones, al Instituto de Investigaciones de la facultad de Geología, Minas,

Metalurgia y Geográfica, a la Dirección y Coordinación de la EAP de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM, por las facilidades prestadas a través de los laboratorios de metalurgia extractiva así como a Profesores y Estudiantes que colaboraron con el desarrollo del Proyecto de Investigación No. 081601061.

#### VI. REFERENCIAS

1. Ammen C.W. "Recovery and Refining of Precious Metals" Publicado por Van Nostrand Reinhold, New York, 1984.
2. Betejtin "Curso de Mineralogía" Tercera edición, Editorial Mir, Moscú 1977.
3. Dana Edward S., Ford William E. "Tratado de Mineralogía", 8va. Edición - 1981, Editorial Continental México S.A., México, Págs. 496-506.
4. Contreras Castro, David. "Experimentación de Minerales de Oro y Plata por el Proceso de Cianuración". Segunda Edición. Pág. 1 - 27, Marzo 1967.
5. Cole J.A., Janhunem W.J. y Lenz J.C. Santa Fe Pacific Golds First Pressure Oxidation Circuit, Year one at lone tree". Presentation at the SME Annual Meeting - Denver Colorado - March 6-9, 1995 - USA.
6. Doung Halbe, File "The Roze of copper sulphate in pyrita flotación" Mineral Engineering. Vol. 1 N.º3 - Great Britain 1988.
7. Marsden John O. "The chemistry of gold extraction", 1º Edición por Ellis Norwood Limited, Great Britain, 1993, Cap. V, Págs. 177-257.
8. Marsden John O. "The chemistry of gold extraction", 2º Edición por Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Colorado - USA 1996.
9. Ministerio de Energía y Minas. Guía Ambiental para el Manejo del Cianuro. Volumen XIV - 1996.
10. Quadrio A.J. y K. R. Kellett. "Recovery of gold from lancefield arsenical sulphide ore" - Regional Conference on "Gold Mining Metallurgy and Geology". Oct. 1984.