

Recibido: 07 / 09 / 2009, aceptado en versión final: 28 / 10 / 2009

Factores que afectan la selección del proceso metalúrgico para beneficiar minerales complejos de oro

Factors affecting the selection process to treatment gold complex minerals

Angel Azañero Ortiz¹, Pablo Antonio Núñez Jara¹, Vidal Sixto Aramburú Rojas¹, Elard Felipe León Delgado¹, Lourdes Janet Quiñones Lavado¹, Manuel Cabrera Sandoval, Luis Puente Santibañez César Díaz Gonzales¹, Jesús Angel Cerrón Inga², Juan Néstor Alarcón Guizado²

RESUMEN

La necesidad de desarrollar y conocer métodos de tratamiento metalúrgico para beneficiar minerales auríferos refractarios o difíciles de tratar por presentar contenidos de carbón, telurios, antimonio, arsénico, carbonatos y oro en solución sólida en sulfuros, nos obliga a estudiar los diversos métodos de oxidación específica que se deben aplicar a cada mineral previo a lixiviar para alcanzar altas recuperaciones en metales preciosos.

Por gravimetría seguida de cianuración, se obtiene 94.74% de extracción de oro en el mineral estudiado.

Palabras clave: Selección, Procesos Minerales Complejos Oro.

ABSTRACT

The need to develop and know methods for metallurgical treatment to process gold-bearing refractory minerals or hard to treat because of carbon contents, tellurium, antimony, arsenic, carbonates and gold in solution solid sulfides, forces us to study the different methods of specific oxidation that should be applied in each mineral before to leach ore to reach high recoveries into precious metals. Through Gravimetrically followed by cyanidation is obtained 94.74% of gold extract in the studied mineral.

Keywords: Complex gold selection process minerals.

1 Docentes de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
Correo electrónico: aazanero@unmsm.edu.pe

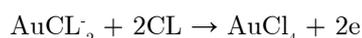
2 Alumnos de la E.A.P. de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

I. INTRODUCCIÓN

Los minerales auríferos se encuentran en la naturaleza en diversas formas; en algunos casos, la recuperación de oro por métodos convencionales es limitada y pobre, debido a que algunos constituyentes que acompañan al metal precioso hacen difícil o imposible el beneficio metalúrgico.

El oro es muy estable en todo el rango de pH y no lo ataca ni un ácido o base fuerte; sin embargo, en condiciones medianamente oxidantes, la gran estabilidad del oro es reducida y puede ser disuelta o lixiviada por algunos reactivos que forman complejos auríferos; estos reactivos son: cianuro (CN⁻), thiourea CS(HH₂)²⁺, tiocianato (SCN⁻) y thiosulfato (S₂O₃)²⁻ que prefieren iones metálicos de valencia baja; por ejemplo, Au(I); mientras que el cloro (Cl⁻), bromo (Br⁻) y yodo (I⁻) prefieren iones metálicos de valencia alta; por ejemplo, Au (III).

Las reacciones químicas para el caso del cianuro y cloro son:



Entre los factores que afectan la selección del proceso metalúrgico son: contenido medio o alto de carbón,

oro diseminado o en solución sólida en los sulfuros de hierro como pirita, arsenopirita y pirrotita, carbonatos, telurios, arsénico, antimonio y/o sulfuros básicos de Pb, Cu y Zn, en estos minerales ya no es posible aplicar lixiviación directa, requieren procesos de oxidación (Marsden, 1993 y 1996) que son costosos y complicados de llevar a la práctica, entre estos procesos disponibles tenemos: Preaireación, oxidación a alta presión y temperatura en medio ácido, oxidación a alta presión y temperatura en medio alcalino, clorinación, oxidación biológica, nítrica y pirometalúrgica (esta última en declive por razones de salud y medioambientales).

II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El diseño experimental (Contreras, 1967) para el mineral en estudio se ha realizado en función de los contenidos mineralógicos y químicos de la muestra, para obtener resultados satisfactorios.

Procesos metalúrgicos para tratar minerales auríferos complejos

En seguida, mostramos un cuadro donde observamos el oro en asociación con otros minerales y el proceso o procesos que se pueden aplicar para recuperar el metal precioso.

Tabla N.º 1. Minerales Auríferos/Procesos

Mineral aurífero con:	Proceso (s)
Sulfuros de cobre	SART
Oro libre o nativo	Gravimetría – cianuración intensiva
Sulfuros de Cu, Pb y Zn	Flot – tostación – fundición – Ref.
Teluros	Lixiviación HCl + Fe ³⁺
Antimonio	Lixiviación NaCl + HCl + Fe ³⁺ + Preaireación con Pb NO ₃ Cianuración
Arsénico	Oxidación biológica cianuración
Carbón	Oxidación con cloro cianuración
Marcasita/pirrotita	Aireación – Cianuración / Aireación alcalina - Cianuración
Pirita	Oxidación alta temperatura (autoclaves) - Cianuración
Sulfuros consumidores de CN ⁻	Thiourea
Refractarios carbonosos de baja ley	Oxidación biológica Heap – Lix. Thiosulfato

Objetivos

1. Estudiar un mineral aurífero y recuperar eficientemente los metales preciosos.
2. Determinar los factores principales para la selección de diagramas de flujo para beneficiar minerales complejos de oro.

Hipótesis

El mineral requiere un diagrama de flujo de tratamiento metalúrgico complicado y combinación de métodos de tratamiento para llegar a obtener resultados satisfactorios

Equipamiento

El laboratorio de Metalurgia Extractiva está equipado con:

- Chancadora de quijada
- Trituradora de cono
- Molino de bolas
- Celdas de flotación
- Potenciómetro digital
- Agitador de rodillos
- Balanzas electrónicas
- Ro-tap y mallas.

Estudio mineralógico del mineral

Tabla N.º 2. Minerales observados

Minerales	Fórmula	Abreviatura
Pirita	FeS ₂	Py
Manganita	Mn ₃ O(OH)	Man
Goetita	Fe ₃ O(OH)	Gt
Lepidocrocita	g - Fe ₃ O(OH)	Lp
Calcopirita	CuFeS ₂	Cp
Magnetita	(Fe ₃ O ₄)	Mt
Covelita	ZnS	Ef
Galena	PbS	Gn
Electrum	(Au, Ag)	El
Gangas		GGs

Minerales Auríferos

Se han observado minerales auríferos tales como el electrum. Asimismo, tenemos la calcopirita, arsenopirita y pirita, que por lo común presentan oro (Au) en estado submicroscópico (Dana, 1981).

Minerales Argentíferos

No se han observado minerales de plata.

Otros Minerales

En este grupo se encuentran las gangas.

Tabla N.º 3. Distribución Volumétrica y Grados de Liberación

Minerales	Volumen	Grado de liberación %
Pirita	21.39	99.02
Manganita	1.29	100.00
Goetita	1.36	79.60
Calcopirita	0.59	68.97
Lepidocrocita	0.54	100.00
Magnetita	0.41	100.00
Covelita	0.07	90.91
Esfalerita	0.01	0.00
Electrum	0.04	0.00
Gangas	74.19	99.52



Figura 1. Partículas libres de pirita (py), de manganita (man), de calcopirita (cp) y de gangas (GGs). Nícoles paralelos - 200x.



Figura 2. Partículas libres de gangas (GGs), y una partícula entrelazada de electrum (el) con goetita (gt) - Nícoles Paralelos – 500x.



Figura 3. Partículas libres de pirita (py) y de gangas (GGs). También una partícula entrelazada de electrum (el) con goetita (gt) - Nícoles Paralelos – 500x.

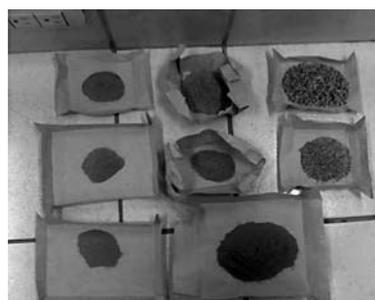
Tabla N.º4: Análisis Químico del Mineral de Cabeza

ANÁLISIS QUÍMICO DEL MINERAL DE CABEZA							
Leyes	%			Ag y Au Gr/TM			
	Ag	Cu	Au	Fe	S	pH	% H
	3.9	0.09	24.7	7.49	3.21	5.5	2.1

III. PRUEBAS EXPERIMENTALES

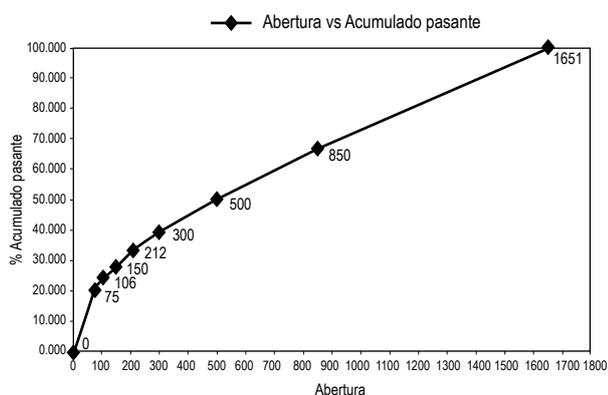
Análisis Granulométrico

Tabla N.º 5. Resultados De Análisis Granulométrico



Intervalo de tamaño	Malla Tyler	Abertura	Peso retenido gr.	Retenido parcial %	Retenido acumulado %	Pasante acumulado %
	i	m (di)	Mi	fi	Ri	Fi
0	6	3327	0.00	0.000	0.000	100.000
1	8	2362	0.00	0.000	0.000	100.000
2	10	1651	0.00	0.000	0.000	100.000
3	20	850	98.80	33.244	33.244	66.756
4	35	500	48.6	16.353	49.596	50.404
5	50	300	32.3	10.868	60.464	39.536
6	70	212	17.5	5.888	66.353	33.647
7	100	150	16	5.384	71.736	28.264
8	140	106	12	4.038	75.774	24.226
9	200	75	11.3	3.802	79.576	20.424
10	-200	-75	60.7	20.424	100.000	0.000
Total			297.2	100.000		

Tabla N.º 6. Resultados de análisis granulométrico



Abertura	Pasante Acumulado %
µm (di)	Fi
3327	100.000
2362	100.000
1651	100.000
850	66.756
500	50.404
300	39.536
212	33.647
150	28.264
106	24.226
75	20.424
0	0.000

Concentración Gravimétrica

Mineral : 200 gr
 Granulometría : 80% - 200 m
 Gravedades : 60
 Presión agua : 3 psi
 Equipo : Concentrador Falcón

Tabla N.º 6. Resultados de concentración gravimétrica en concentrador Falcon

Producto	Peso %	Ley: gr/TM Au	% Distribución Au
Conc. Au	10	180.4	73.04
Relave	90	7.4	26.96
Cabeza	100	24.7	100



Cianuración Directa

Condiciones del trabajo

Mineral : 250 gr.
 Agua : 750 cc.
 pH : 11.5 -10.5
 NaCN : 0.10 %
 Tiempo : 24 hrs.
 Variable : Granulometría
 Prueba 1 : 100% - 75 µm
 Prueba 2 : 100% -100 µm



Tabla N.º 7. Resultados de Cianuración Directa

PRUEBA N.º 1 : 100% - 75 µ					
Producto	Vol. Peso	Ley: gr/TM Au	Recuperación % Au	Consumo reactivos Kg/TM	
Sol. Rica	750 ml	7.436 mg/l	90.32	NaCH	Cal
Res. Cian.	2490 gr	2.4	9.68	3.14	1.200
Cab. Calc.	250 gr	24.7	100.00		

Tabla N.º 8. Resultados de Cianuración Directa

PRUEBA N.º 2 : 100 % - 100 µ					
Producto	Vol. Peso	Ley: gr/TM Au	Recuperación n% Au	Consumo reactivos Kg/TM	
Sol. Rica	750 ml	7.336 mg/l	89.09	NaCH	Cal
Res. Cian.	249.5 gr	2.7	10.91	3.160	0.900
Cab. Calc.	250.0 gr	24.7	100.00		

Amalgamación

Condiciones de trabajo

Molienda

Mineral

Agua

Reactivos

NaOH

1000 gr – 10 m

500 cc

Kg/TMS

1.000

Mercurio Metálico

Tiempo

Granulometría

pH

Separación de Amalgama (Au⁰ + Ag⁰) / ganga

Equipo concentrador gravimétrico de oro

10.000

15 minutos

61% - 200 m

9.5

Tabla N.º 9. Resultados de Amalgamación

Producto	Peso Gr	Ley:gr/TM Au	Recuperación % Au
Au (amalgama)	17.89 mg	920 ppm	67.98
Residuo Amalgamación	980.0	7.91	32.02
Cab. Calc.	980.0	24.7	100.00

Cianuración del Relave de Amalgamación

Condiciones de trabajo

Muestra

Dilución

: 250 gr

: 311

pH : 11 - 10.2

Tiempo : 24 horas

Granulometría : 61% - 200 m

Tabla N.º 10. Resultados de Cianuración del Relave de Amalgamación

Producto	Vol. Peso	Ley: gr/TM Au	Recuperación % Au	Consumo reactivos Kg/TM	
Sol. Rica	750 ml	2.1918 mg/l	83.57	NaCN	Cal
Res. Cian.	248.7 gr	1.30	16.43	1.850	0.680
Cab. Calc.	248.7 gr	7.91	100.00		

Tabla N.º 11: Resultado Global de Recuperación de Oro. Amalgamación - Cianuración

Producto	Peso Vol.	Ley: gr/TM Au	Recuperación % Au
Au (amalgama)	17.89 mg.	920 ppm	67.98
Sol. Rica	750 ml	2.1918 mg/l	26.76
Res. Cian.	248.7 gr.	1.30	5.26
Cab. Calc.	248.7 gr.	24.70	100.00

Flotación de Oro		Granulometría	61 % - 200 m
Condiciones de trabajo		Acondicionamiento Au	
Molienda		XZ - 14	0.050
Mineral	: 1000 gr – 10 m	Aceite de Pino	0.010
Agua	: 500 cc.	Tiempo	5 minutos
Reactivos	Kg/TMS	Flotación de oro	
NaOH	0.500	Tiempo	6 minutos
CuSO ₄ ^(3,6)	0.100	Limpieza de oro	
Aerofloat 208	0.010	pH	7.2
Tiempo	15 minutos	Tiempo	2 minutos
pH	6.9		

Tabla N.º 12. Resultados de Flotación del Oro

Producto	Vol. Peso	Ley: gr/TM Au	Recuperación % Au	R.C.
Conc. Au	4.52	390.2	71.41	22.12
Medios Au	9.05	21.7	7.95	
Relave	86.43	5.9	20.64	
Cab. Calc.	100.00	24.7	100.00	

Cianuración del Relave de Flotación

Condiciones de trabajo		pH	: 11 – 10
Muestra :	250 gr de relave	NaCN	: 0.10 %
Agua :	750 cc	Tiempo	: 24 horas

Tabla N.º 13. Resultados de Cianuración del Relave de Flotación

Producto	Vol. Peso	Ley: gr/TM Au	Recuperación % Au	Consumo reactivos Kg/TM
Sol. Rica	750 ml	1.565 mg/l	79.66	NaCN Cal
Res. Cian.	249.8 gr	1.2	20.34	1.630 0.920
Cab. Calc.	249.8 gr	5.9	100.00	

Tabla N.º 14. Resultado Global de Recuperación de Oro Flotación - Cianuración

Producto	Vol. Peso	Ley: gr/TM Au	Recuperación % Au
Conc. Au	4.52	390.2	71.41
Medios Au	9.05	21.7	7.95
Sol. Rica	750 cc	1.565 mg/l	16.44
Res. Cian.	249.8 gr	1.2	4.20
Cab. Calc	249.8 gr	24.7	100.00

IV. RESULTADOS

Análisis/Procesos	Resultados/Recuperación Au	Gravimetría (falcon)	73.04%
Minerográfico	Electrum	Amalgamación	67.98%
(Microscopía óptica)	(Au ⁺ -Ag ⁺) Cp, Py	Amalg./cianuración	94.74%
Químico	Au 24.7 gr/TM	Flotación	71.41%
Granulométrico	1170 u 80% passing	Flotación/cianuración	87.85%

V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- El oro se encuentra en los minerales en diversas formas, desde muy dóciles para el tratamiento por gravimetría, flotación o lixiviación hasta complejos y muy difíciles de beneficiar; por ejemplo, cuando el oro está en solución sólida en los sulfuros, requiere oxidación previa a cianuración convencional.
- Los métodos de oxidación son muy caros y requieren equipos especiales, los minerales o concentrados deben tener alta ley para poder compensar el alto costo de tratamiento.
- El alto precio del oro puede justificar un proceso de oxidación y motivar el aprovechamiento de minerales auríferos refractarios.
- Para lixiviar el oro se requiere además del reactivo acompanyante un oxidante como es el O_2 para el caso de la cianuración.
- El mineral investigado tiene oro libre, electrum; el estudio mineralográfico y los resultados de amalgamación lo confirman.
- Concentración gravimétrica en Falcón, amalgamación, cianuración y flotación solos son insuficientes para alcanzar buena extracción; se requiere combinar dos procesos, gravimetría y cianuración, para obtener alta recuperación de oro en este mineral.

VI. CONCLUSIONES

- Los factores principales para la selección de diagramas de flujo en minerales complejos auríferos son: Oro en solución sólida en los sulfuros de hierro, oro en sulfuros básicos, telurios, arsénico, antimonio, carbonatos y carbón orgánico.
- El mineral investigado tiene buena ley de oro: 24.7 gr/TM, o 0.794 Oz/TC representa un valor económico de US\$ 850.00 por TMM.
- Hay oro libre en forma de electrum; 68% del total, el otro 32% debe estar asociado con la calcopirita y pirita.

- Por gravimetría y amalgamación, se recupera 73.04 y 67.98% del oro, respectivamente.
- Flotar y cianurar el relave de flotación se recupera 87.85% Au.
- Amalgamar y cianurar el relave de amalgamación da una extracción total de 94.74% del oro total.
- De acuerdo a los resultados obtenidos el mineral se procesará por gravimetría para captar el oro libre y electrum, este concentrado será tratado por cianuración intensiva o fusión directa, para evitar la contaminación del mercurio, seguida de cianuración convencional del relave gravimétrico

VII. AGRADECIMIENTO

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 N.º 091601021.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dana Edward S., Ford William E. "Tratado de Mineralogía". 8va ed., 1981, México: Editorial Continental México S.A., 496 - 506.
2. Contreras Castro, David. "Experimentación de Minerales de Oro y Plata por el Proceso de Cianuración". 2da ed., Mz 1967; 1 - 27.
3. Marsden John O. "The chemistry of gold extraction", 1º ed., Ellis Norwood Limited, Great Britain, 1993, Cap. V, pp. 177 - 257.
4. Marsden John O. "The chemistry of gold extraction". 2da. Ed., Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., Colorado - USA 1996.
5. 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.