

**LIXIVIACIÓN POR CIANURACIÓN DE MINERALES PRECIOSOS DE UN YACIMIENTO EN LA ZONA ORIENTAL DE CUBA./**  
**LEACHING CYANIDATION PRECIOUS MINERALS OF A DEPOSIT IN THE EASTERN AREA OF CUBA.**

Marcela Figueredo Frías <sup>(1)</sup>, Fátima Bugallo Davis <sup>(1)</sup>, José Castellanos Suárez <sup>(1)</sup>, Emilio Montejo Serrano <sup>(1)</sup>, Rubén Alcalá Fariñas <sup>(1)</sup>, Yania Cabaleiro Piedra <sup>(1)</sup>, Martha Velázquez Garrido <sup>(1)</sup>, Ileana Cabrera Díaz <sup>(1)</sup>, José Antonio Alonso <sup>(1)</sup>, Eliezer Hidalgo Liriano <sup>(1)</sup>.

En este trabajo se presenta el estudio de la cinética de lixiviación de oro y plata por cianuración, de una mena cuarzosa de origen epitermal, con un contenido de oro de 6,5 g/t. Las variables experimentales ensayadas fueron el grado de molienda (70, 80 y 90%-0,074mm) y la concentración de cianuro (0,5; 1; 2 g/L). El método empleado para la determinación del contenido de oro y plata en el mineral de alimentación y las colas fue fusión – copelación, la concentración de metales (Au y Ag) e impurezas en las soluciones de lixiviación se determinaron por técnicas de análisis químico elemental como (ICP) Espectroscopia de Masa de Plasma Acoplada Inductivamente. Las pruebas de lixiviación se realizaron en botellas agitadas a temperatura ambiente durante 24 horas. Las menas respondieron satisfactoriamente al proceso de cianuración y los mejores índices tecnológicos obtenidos para la extracción de oro y plata fueron: grado de molienda: 90 %-0,074 mm, concentración de NaCN de 1,0 g/L, y el tiempo de lixiviación fue de 12 horas. El consumo de cianuro y cal fue de 1,64 kg/t y 2,2 kg/t respectivamente, valores aceptables para el procesamiento industrial de las menas.

**Palabras clave:** Cinética de lixiviación, oro, cianuración, mena cuarzosa.

In this work the study of the kinetics of leaching of gold and silver by cyanidation occurs, a source epithermal quartz ore with a gold content of 6.5 g/t. Experimental variables tested were the grinding (70, 80 and 90 % -0,074 mm) and the cyanide concentration (0,5; 1, 2 g/L). The method used for the determination of gold and silver in the ore feed and tails was melting - fire assay, the concentration of metals (Au and Ag) and impurities in leach solutions were determined by techniques of elemental chemical analysis as (ICP) mass spectroscopy Inductively Coupled Plasma. The tests were conducted in heavy bottles at room temperature for 24 hours leaching. Ores responded with the cyanide process and the best technology indices obtained for the extraction of gold and silver were milling degree: 90 % -0.074 mm NaCN concentration of 1,0 g/L, and the leaching time was 12 hours. The cyanide and lime consumption was 1,64kg/t and 2,2 kg/t respectively, acceptable for industrial processing of ores values.

**Keywords:** Kinetics of leaching, gold cyanidation, quartz ore

**Recibido:** 14 de abril del 2014

**Aprobado en su forma original:** 19 de noviembre del 2014

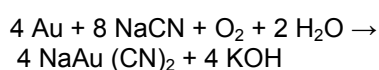
(1) Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), Varona 12028 Km<sup>1/2</sup> Boyeros, La Habana, Cuba, CP-10800 Correo electrónico: [marcela@cipimm.minem.cu](mailto:marcela@cipimm.minem.cu)

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la minería del oro ha experimentado un gran impulso ante el significativo aumento del precio del metal, desde alrededor de 600 USD /Oz (promedio 2006) hasta cerca de 1300 USD/Oz actualmente (primer trimestre del 2014), situación que ha favorecido la investigación tecnológica de nuevos depósitos para la recuperación del metal precioso.

En la actualidad el proceso más utilizado a escala industrial para la disolución de oro es la lixiviación con cianuro [C. Abbruzzese, 1995 y 1999]. Esto se debe a su alta eficiencia de extracción a partir de una gran variedad de menas y concentrados, bajo costo, química de reacción simple y estabilidad del complejo formado.

La solubilidad del oro en soluciones cianuradas fue reconocida en 1783 por Scheele (Suecia) y fue estudiada en los años 1840 y 1850 por Elkington y Bagration (Rusia), Elsner (Alemania) y Faraday (Inglaterra). La disolución de oro en soluciones aireadas de cianuro y el papel del oxígeno en el mecanismo de la reacción fue investigada por Elsner en 1846 y la reacción fue escrita como sigue [Linares, N, 2011]:



La disolución de la plata se representa por una ecuación similar; sin embargo, su aplicación al tratamiento de minerales no

fue propuesta hasta mucho después, cuando los científicos Stewart y Forrest (1887) patentaron el proceso de obtención de oro y plata.

Los factores que afectan la disolución del oro incluyen la concentración de cianuro y oxígeno disuelto, el pH, la temperatura, el grado de agitación y las características del mineral, como el tamaño de partícula y la presencia de impurezas en solución [Linares, N, 2011]. Estudiar el comportamiento de estos factores nos permite establecer la compatibilidad de las menas con el proceso de cianuración, así como obtener los índices tecnológicos para la extracción eficiente de oro y plata contenidos en las mismas.

En este trabajo se presenta el estudio a escala de laboratorio de la cinética de lixiviación de oro y plata por cianuración, de una mena cuarzosa de origen epitermal, con un contenido de oro de 6,5 g/t. Las variables experimentales ensayadas fueron el grado de molienda (70, 80 y 90%-0,074mm) y la concentración de cianuro (0,3; 0,5; 1; 2 g/L). Las pruebas de lixiviación se realizaron en botellas agitadas a temperatura ambiente, durante 24 horas.

## MATERIALES Y METODOS

Los métodos físico-químicos empleados para la caracterización de la muestra estudiada (Tabla 1) y los ensayos metalúrgicos fueron los siguientes:

**Tabla 1.** Métodos físico-químicos empleados para la caracterización de la muestra estudiada.

Parámetros	Método	Lugar de realización
pH	Potenciométrico con electrodo combinado	In situ
Cianuro de sodio y cianuro libre	Método Volumétrico, Standard Methods, 4500-CN -D, 1995.	Laboratorio
Au y Ag	Docimasia	Laboratorio
Metales (Au, Ag, Fe, Cu, Zn, Pb, As, Sb, Ca, Mg y Al)	ICP y AA	Laboratorio
S <sub>T</sub> y SiO <sub>2</sub>	Gravimétrico	Laboratorio

Los difractogramas se realizaron por el método de polvo y se registraron en un equipo Philips PW – 1710, de acuerdo a la variante de medición punto a punto; paso angular de 0,050 y tiempo de medición en cada posición de 3 segundos. Los resultados numéricos de intensidades relativas y ángulos de difracción se convirtieron en difractogramas continuos con el empleo del programa "Origin 7.0". Las distancias interplanares se determinaron con el programa Ttod para PC. El análisis cualitativo de fases se realizó con la utilización de la base de datos PCPDFWIN; versión 1.30, JCPDS-ICDD / 2002, compatible con Windows 98 para Office 2000.

Para la ejecución de las pruebas de cianuración en botella agitadas se siguió el siguiente procedimiento:

- ✓ En cada prueba se ensayó 1 kg de mineral en base seca, se preparó la pulpa al por ciento de sólido establecido (42%) y se calculó la adición del cianuro en función de la concentración a estudiar.
- ✓ Se realizaron muestreos en los siguientes intervalos de tiempos: 2, 4, 6,

8, 10 y 24 horas, se filtraron y titularon con solución de nitrato de plata (**AgNO<sub>3</sub>**) **0,001N** para determinar el consumo de NaCN.

- ✓ Durante las pruebas se mantuvo constante el **pH alrededor de (10,5-11,0)** anotando el consumo de cal. Al término de las 24 horas la pulpa final (el lixiviado) se filtró, y el sólido se lavó con una relación L/S (3:1), la torta fue secada, pesada, pulverizada y preparada para análisis químico por ensayo al fuego (fusión –copelación).

Para la evaluación de la influencia del grado de molienda se determinó a partir de la curva de molienda del mineral, el tiempo de molienda requerido para obtener el corte granulométrico estudiado en cada prueba.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- **Caracterización química, mineralógica y granulométrica de la muestra ensayada.**

La caracterización química de la muestra ensayada aparece en la Tabla 2.

**Tabla 2. Caracterización química de la muestra ensayada.**

Muestra Tecnológica	Au (g/t)	Ag (g/t)	(%)							
			S <sub>T</sub>	Cu	Pb	Zn	Sb	Fe	As	SiO <sub>2</sub>
(6,0-6,46)	<5,0	0,02	2,9x10 <sup>-3</sup>	<1x10 <sup>-2</sup>	1,3x10 <sup>-2</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	2,8	<4x10 <sup>-4</sup>	65,72	

La caracterización mineralógica de la muestra reportó como fase mayoritaria el cuarzo presente en forma de cristales y en agregados granulares con algunas inclusiones de mineral metálico como pirita, calcopirita, raros cristales de hematita [Cabrera, I, 2010]. La presencia de feldespatos, se observó en los máximos de

difracción cuyas distancias interplanares: d= 3.18 Å, 4.02 Å, 3.76 Å se correspondieron con la plagioclasa sódica (variedad albita), en reflexiones menos intensas se observó la ortoclasa potásica (variedad adularia), que presenta sus máximos de difracción en valores de distancia interplanar: d= 3.32 Å, 3.23 Å y 3.78 Å (Figura 1)

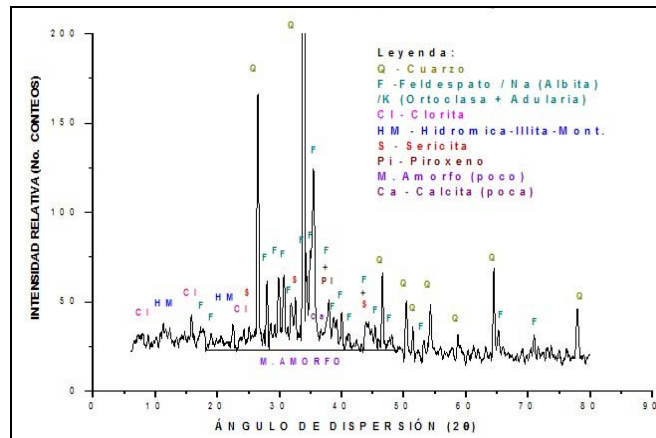


Figura 1. Diffractograma de la muestra estudiada.

El mineral de oro se observó como inclusiones muy finas en el cuarzo y el feldespato, con una granulometría que oscila entre 3 y 10 μm (ver imagen 1,2,3) considerado disperso.

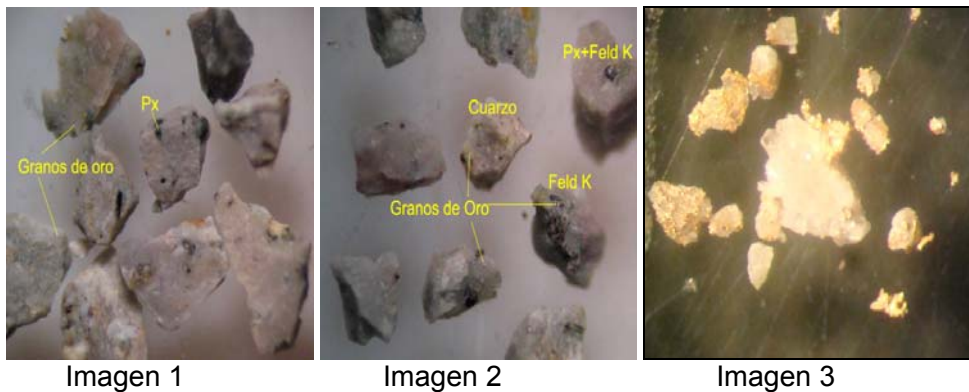


Tabla 3. Caracterización granulométrica de la muestra tecnológica.

Fracción (mm)	γ (%)	Au	
		β(g/t)	€ (%)
-1+0,63	22,75	6,91	24,1
-0,63+0,15	43,10	6,40	42,3
-0,15+0,074	10,40	5,73	9,14
-0,074	23,75	6,73	24,5
Total	100	6,52	100

En los análisis granulométricos realizados a la muestra se pudo observar que la distribución del Au es casi uniforme. Los resultados obtenidos indicaron que el 66,7% del oro se encontraba en la fracción -1,0+0,15mm y el 33,6% en la fracción -0,15+0,074mm y -0,074mm

➤ **Ensayos metalúrgicos en botellas.**

En la tabla 4 que se muestra a continuación aparecen las condiciones establecidas para evaluar la influencia de la concentración de NaCN en las menas estudiadas.

**Tabla 4. Condiciones establecidas para evaluar la concentración de NaCN.**

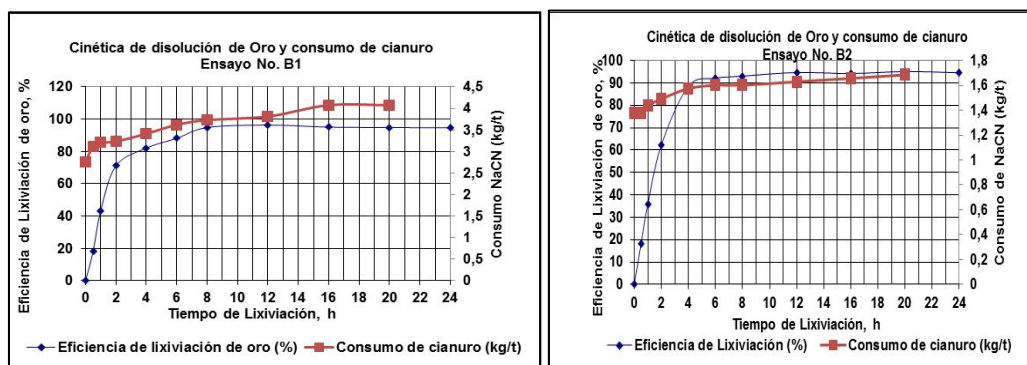
Ensayo No.	Grado de Molienda	C(NaCN) g/L	% de sólidos
B-1	90%- 0,074mm	2,0	42
B-2		1,0	
B-3		0,5	

**Tabla 5. Comportamiento de los índices tecnológicos en las pruebas B-1 a B-3.**

Ensayo No.	Consumo de NaCN (kg/t)	Consumo de cal(kg/t)	Concentración de Au (mg/L)	Ley de Au en cola (g/t)	Extracción (%) Au
<b>B-1</b>	4,07	2,5	4,24	0,36	94,7
<b>B-2</b>	1,68	2,0	4,25	0,34	95,03
<b>B-3</b>	1,05	2,5	4,22	0,35	94,6

Los índices tecnológicos alcanzados en las pruebas indicaron que la recuperación de oro fue del orden de hasta un 95% para las distintas concentraciones de cianuro de sodio empleada, se observa que el consumo de cianuro oscilo entre (1,05 – 4,07 kg/t) en 20 horas de lixiviación. El comportamiento de la ley de Au en las colas estuvo entre (0,35-0,36 g/t) y el consumo de cal fue de 2,5 kg/t.

En las Figuras 2 y 3 se muestran las curvas de la cinética de disolución de de oro y el consumo de cianuro obtenido en cada prueba, se observa que a partir de las 12 horas de lixiviación la recuperación de oro se hace prácticamente constante sin incrementos significativos, por lo cual continuar añadiendo cianuro solo traería como consecuencia un aumento de las impurezas en los licores finales y un mayor consumo del reactivo (Domic M. E, 2001).



**Figura 2. Cinética de disolución de oro y consumo de cianuro en los ensayos de B-1 y B-2.**

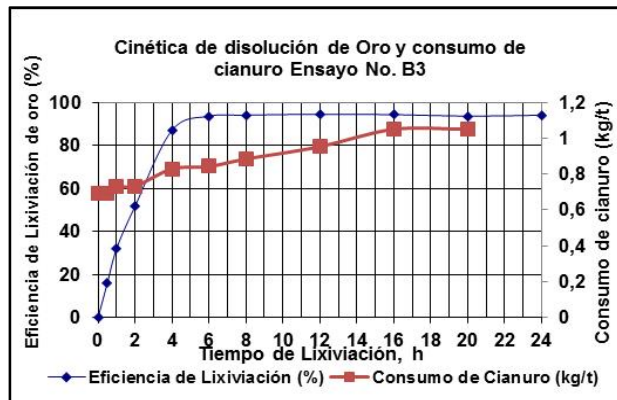


Figura 3. Cinética de disolución de oro y consumo de cianuro en el ensayo B-3.

La cinética de disolución de las impurezas se muestra en la Tabla 6 donde se resumen las concentraciones obtenidas en los licores finales y la composición química de las colas.

El comportamiento obtenido para las impurezas favorece el proceso de cianuración, ya que las concentraciones son muy bajas y facilita la disolución de oro, al mismo tiempo que no se incrementa el consumo de cianuro.

Tabla 6. Resultados del comportamiento de las impurezas en el proceso de cianuración de los test en botellas (B-1 a B-3) y las colas finales del proceso.

Ensayo No.	mg/L							
	C(Au)	C(Fe)	C(Cu)	C(As)	C(Pb)	C(Zn)	C(Sb)	C(Ag)
B-1	4,24	5,81	7,65	<0,02	<0,51	1,56	<0,02	0,45
B-2	4,25	5,13	7,59	<0,02	<0,51	1,69	<0,02	0,55
B-3	4,22	1,52	7,77	<0,02	<0,51	1,05	<0,02	0,52

Ensayo No.	Colas finales (%)						
	Fe	Pb	Cu	Zn	As	Sb	Ag(g/t)
B-1	2,7	<1,0x10 <sup>-2</sup>	3,1x10 <sup>-3</sup>	2,5x10 <sup>-2</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<5,0
B-2	2,5	<1,0x10 <sup>-2</sup>	2,6x10 <sup>-3</sup>	2,6x10 <sup>-2</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<5,0
B-3	2,5	<1,0x10 <sup>-2</sup>	2,6x10 <sup>-3</sup>	2,3x10 <sup>-2</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<5,0

Los resultados obtenidos en los ensayos en botellas B-1 a B-3, para un grado de molienda de 90%-0,074mm y un 42% de sólidos, a distintas concentraciones de cianuro de sodio indicaron que es posible operar a concentraciones bajas y alcanzar altas recuperaciones del metal precioso. También se observó que un tiempo de lixiviación de 12 horas es suficiente para el procesamiento de las menas estudiadas.

Para evaluar la influencia del grado de molienda en la recuperación de oro, se realizó un segundo grupo de pruebas (B-4 a B-9) con un tiempo de lixiviación de 24 horas. Las concentraciones de NaCN empleadas se seleccionaron teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos anteriores (B-1 a B-3), las condiciones de las pruebas fueron las siguientes:

**Tabla 7. Condiciones estudiadas para evaluar la influencia del grado de molienda en la recuperación de oro.**

Ensayo No.	Grado de Molienda	C(NaCN) g/L	% de sólidos
B-4	75%-0,074mm	1,0	42
B-5	80%-0,074mm		
B-6	85%-0,074mm		
B-7	90%-0,074mm	0,5	42
B-8	85%-0,074mm		
B-9	90%-0,074mm		

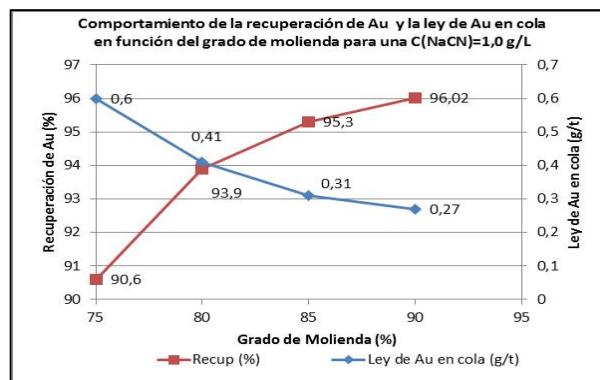
**Tabla 8. Comportamiento de los índices tecnológicos en las pruebas B-4 a B-9.**

Ensayo No.	Consumo de NaCN (kg/t)	Consumo de cal(kg/t)	Concentración de Au (mg/L)	Ley de Au en cola (g/t)	Extracción (%) Au por sólidos
B-4	2,04	2,0	3,87	0,6	90,6
B-5	1,78	2,3	3,98	0,41	93,9
B-6	2,03	2,5	4,19	0,31	95,3
B-7	2,14	2,2	4,2	0,27	96,0
B-8	1,01	2,6	4,18	0,41	93,9
B-9	0,95	2,2	4,22	0,3	95,4

Los índices alcanzados en las pruebas indicaron que un aumento del grado de molienda incrementa la extracción del oro. Los consumos de cianuro oscilaron entre (0,95-2,14 kg/t) en 20 horas de lixiviación y el consumo de cal fue del orden de (2,0-2,6 kg/t). La mayor concentración de oro se alcanzó con un grado de molienda de 90%

-0,074mm y una concentración de cianuro de 1,0 g/L.

En la Figura 4 se muestra el comportamiento de la recuperación de oro en función del grado de molienda obtenidos en las pruebas B-4 a B-9.



**Figura 4. Comportamiento de la recuperación de oro en función del grado de molienda a una concentración de NaCN de 1,0 g/L (B-4 a B-9).**

Los mejores índices tecnológicos alcanzados fueron: grado de molienda 90% -0,074mm, concentración de cianuro 1,0 g/L, tiempo de lixiviación de 12 horas y un consumo de cianuro 1,64 kg/t.

La recuperación de Au fue de hasta un 95 % con concentraciones promedios en los licores de hasta 4,5 mg/L. El comportamiento de los cianicidas (Cu, As,

Pb, Zn, Sb, Fe) en las menas reportó concentraciones muy bajas, que favorecen las etapas posteriores del procesamiento industrial de las menas

A continuación se muestra en la Tabla 9 el comportamiento de las impurezas en el proceso de lixiviación de las pruebas (B-4 a B-9).

**Tabla 9. Resultados del comportamiento de las impurezas en el proceso de cianuración y las colas finales de los test en botellas (B-4 a B-9).**

Ensayo No.	mg/L							
	C(Au)	C(Fe)	C(Cu)	C(As)	C(Pb)	C(Zn)	C(Sb)	C(Ag)
B-4	3,87	4,3	10,7	<0,0244	<0,513	1,9	<0,0243	0,02
B-5	3,98	3,3	8,8	<0,0244	<0,513	1,7	<0,0243	0,02
B-6	4,19	3,4	8,9	<0,0244	<0,513	1,8	<0,0243	0,02
B-7	4,2	5,7	7,6	<0,0244	<0,513	1,5	<0,0243	0,02
B-8	4,18	2,3	8,3	<0,0244	<0,513	2,0	<0,0243	0,02
B-9	4,22	3,2	8,4	<0,0244	<0,513	2,1	<0,0243	0,02

Ensayo No.	Colas finales (%)						
	Fe	Pb	Cu	Zn	As	Sb	Ag(g/t)
B-4	2,7	<1,0x10 <sup>-2</sup>	3,0x10 <sup>-3</sup>	1,8x10 <sup>-2</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<5,0
B-5	2,6	<1,0x10 <sup>-2</sup>	3,3x10 <sup>-3</sup>	1,1x10 <sup>-2</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<5,0
B-6	2,7	<1,0x10 <sup>-2</sup>	2,6x10 <sup>-3</sup>	1,2x10 <sup>-2</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<5,0
B-7	2,5	<1,0x10 <sup>-2</sup>	2,9x10 <sup>-3</sup>	1,1x10 <sup>-3</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<5,0
B-8	2,6	<1,0x10 <sup>-2</sup>	3,1x10 <sup>-3</sup>	7,7x10 <sup>-3</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<5,0
B-9	2,7	<1,0x10 <sup>-2</sup>	2,7x10 <sup>-3</sup>	6,4x10 <sup>-3</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<2x10 <sup>-4</sup>	<5,0

Con los mejores índices alcanzados en las pruebas en botellas se realizaron pruebas de banco ampliada, los resultados obtenidos reportaron una recuperación de oro de un 95,5% y concentraciones de oro

en el licor de 3,5 ppm. El consumo de cal fue de 2,5 kg/t y el consumo de cianuro fue de 1,55 kg/t en 4 horas de lixiviación. En la tabla 10 se presentan los resultados del balance metalúrgico.

**Tabla 10. Balance metalúrgico de la prueba de lixiviación a escala de banco.**

Metal	Peso de mineral seco (Kg)		Volumen de licor (L)	Ley de metal en cabeza	Concentración de metal en el licor (mg/L)	Ley de metal en cola	Extracción por sólido (%)
	Inicial	Final					
Au (g/t)	85,4	82,4	118	5,1	3,5	0,24	95,5
Cu (%)				4x10 <sup>-3</sup>	6,1	2,7x10 <sup>-3</sup>	-
Zn (%)				1,2x10 <sup>-2</sup>	1,9	1,1x10 <sup>-2</sup>	-
Ag (g/t)				<5,0	0,02	<5,0	-

A continuación en la Figura 5 se muestra la cinética del consumo de cianuro y la recuperación de Au.

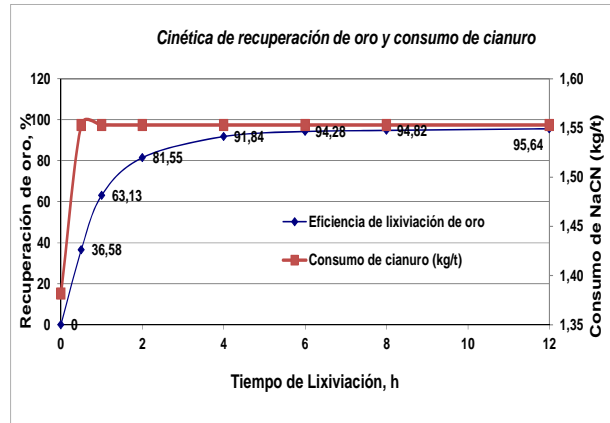


Figura 5. Cinética de recuperación de Au y consumo de cianuro en las pruebas a escala de banco.

Los mejores índices tecnológicos para llevar a cabo la extracción de oro de la muestra tecnológica estudiada fueron los siguientes:

- ✓ Grado de Molienda: 90 %-0,074 mm
- ✓ Concentración de NaCN: 1,0 g/L
- ✓ Porcentaje de sólidos en la pulpa: 42%
- ✓ Tiempo de lixiviación 12 horas

Con relación al tiempo de lixiviación los estudios indicaron que 12 horas es suficiente para alcanzar la máxima recuperación de oro. El comportamiento observado en la cinética de consumo de cianuro en las pruebas, indicó la necesidad de definir una **estrategia de cianuración** que permita una alta eficiencia y un consumo aceptable de este índice en planta.

## CONCLUSIONES

1. Se demostró la compatibilidad de las menas con el proceso de lixiviación con cianuro de sodio, alcanzándose una alta eficiencia de extracción para el oro

de hasta un 95% y un tiempo de lixiviación óptimo de 12 horas.

2. El análisis mineralógico reportó que los contenidos de SiO<sub>2</sub> en la muestra estudiada son significativos (≈ 66%), confirmando la presencia de las fases mayoritarias como el cuarzo (53%) y el feldespato.
3. El mineral de oro se observó como inclusiones muy finas en el cuarzo y el feldespato, con una granulometría que oscila entre 3 y 10 μm.
4. Un aumento del grado de molienda hasta un 90%-0,074mm, incrementó en un 2% la extracción de oro con respecto a moler a un 80%-0,074mm.
5. El comportamiento de los cianicidas (Cu, As, Pb, Zn, Sb, Fe) en las menas reportó concentraciones muy bajas, que favorecen el proceso de lixiviación y fundición.
6. Los consumos obtenidos para el cianuro (1,64kg/t) y la cal (2,2kg/t) son aceptables para el procesamiento industrial de las menas.

---

**BIBLIOGRAFÍA**

- C. Abbruzzese, P. Fornari, R. Massida, F. Veglio and S. Ubaldini. 1995. *Hydrometallurgy* 39: 265-276
- C. Abbruzzese., Proc. EPD Congress, 1999-Extraction and Processing Division, B. Mishra (Ed.) San Diego USA, 441-455p.
- Linares, N. 2011. *Procesamiento Hidrometalúrgico del Oro*. Capítulo III. Docente ESME/FAIN-UNJBG. Tacna.
- Cabrera I.et.al. 2010. Informe del estudio mineralógico realizado a muestras de pozos criollos y trincheras.
- Domic M. Esteban. 2001. Hidrometalurgia, Fundamentos, procesos y aplicaciones.