

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN-TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**EVALUACIÓN DEL REACTIVO GOLDMAX EN
MINERALES AURÍFEROS REFRACTARIOS**

TESIS

Presentada por:

Bach. DARIO FREDDY PARI TICONA

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA - PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN-TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

TESIS

**EVALUACIÓN DEL REACTIVO GOLDMAX EN
MINERALES AURÍFEROS REFRACTARIOS**

Tesis sustentada, y aprobada el 20 de enero del 2017,
estando integrado el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE:



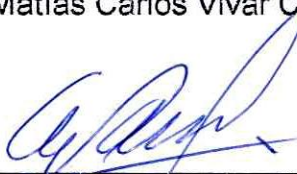
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

1er MIEMBRO:



MSc. Matías Carlos Vivar Colquicocha

2do MIEMBRO:



Ing. Zoilo Edgardo Valdivia Infantas

ASESOR:



Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

DEDICATORIA

A dios, por darle un sentido a mi vida.

Dedicado con cariño y mucho amor para mis hermanos, Franklin y Rosmery, por haberme inculcado los valores en mi formación como persona y por brindarme todo su apoyo y comprensión.

Dedicado con especial cariño a mis padres, por el inmenso amor que me dan. Y por siempre guiar mis pasos.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, debo manifestar mi eterna gratitud a mis hermanos, por haber influido en todo momento de mí desarrollo académico. Ellos me mostraron el mundo de las ciencias exactas y son los responsables últimos de que pudiera realizar mis estudios.

Mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron en la realización de este trabajo, entregándome conocimientos, apoyo o simplemente cariño y comprensión.

A mis padres por darme la vida, una maravillosa formación, por su ternura y todo su amor, y por contagiarme de sus fortalezas, y esas fuerzas para seguir adelante y no flaquear, y hoy que me siguen ayudando en todo.

A mi casa de estudios, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, en especial a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por su contribución en mi formación profesional.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1 Descripción del problema	3
1.1.1 Antecedentes del problema	3
1.1.2 Problemática de la investigación	4

1.2	Formulación del problema	4
1.2.1	Problema principal	4
1.2.2	Problema específico	4
1.2.3	Justificación e importancia del problema	5
1.3	Alcances y limitaciones	6
1.3.1	Limitaciones	6
1.3.2	Alcances de la investigación	6
1.4	Objetivos	7
1.4.1	Objetivo principal	7
1.4.2	Objetivos específicos	7
1.5	Hipótesis general	8
1.5.1	Hipótesis específica	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO DE INVESTIGACIÓN		9
2.1	Antecedentes del problema	9

2.2	Fundamentos teóricos y definiciones generales	10
2.2.1	Fundamento de la cianuración	10
2.3	Complejos cianurados	32
2.4	Tipos de procesos de cianuración	34
2.5	Lixiviante GOLDMAX	35
2.6	La pirita	44
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO		49
3.1	Tipo y diseño de la investigación	49
3.2	Población y muestra	50
3.3	Operacionalización de variables	50
3.4	Técnicas e instrumentos para recolección de datos	52
3.4.1	Técnicas	52
3.4.2	Instrumentos	53
3.4.3	Reactivos	53

3.4.4	Gabinete	54
3.4.5	Equipos del sistema electrolítico	54
3.5	Procedimiento y análisis de datos	55
3.5.1	Proceso de extracción de muestras	55
3.5.2	Comparación de resultados entre el cianuro y GOLDMAX	57
3.5.3	Tratamiento de datos	57
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS		58
4.1	Características del análisis de las muestras de la zona	58
4.1.1	Pruebas de lixiviación con cianuro de sodio	60
4.1.2	Pruebas de lixiviación con GOLDMAX	61
4.2	Resultados de pruebas de lixiviación con cianuro de sodio	65
4.3	Resultados de pruebas de lixiviación con GOLDMAX.	65
4.3.1	Resultados de prueba de lixiviación con GOLDMAX en 4 horas	65

4.3.2	Resultados de prueba de lixiviación con GOLDMAX en 8 horas	66
4.3.3	Resultados de prueba de lixiviación con GOLDMAX en 12 horas	66
4.3.4	Resultados de prueba de lixiviación con GOLDMAX en 24 horas	67
4.3.5	Resultado Final de pruebas de lixiviación con GOLDMAX	67
4.4	Resultados de pruebas de lixiviación con GOLDMAX y cianuro	68
	CONCLUSIONES	69
	RECOMENDACIONES	70
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
	ANEXOS	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sales de cianuro empleadas en cianuración	14
Tabla 2. Contenido de HCN en función del pH	15
Tabla 3. Recuperación de oro en solución a diferentes concentraciones de cianuro	19
Tabla 4. Efecto de la inyección de aire en la recuperación de oro en solución	23
Tabla 5. Influencia del pH en la recuperación de oro por cianuración	26
Tabla 6. Influencia del tamaño de partícula en la recuperación de oro por cianuración para un mineral refractario del norte de Perú	29
Tabla 7. Influencia del deslamado en la recuperación de oro	30
Tabla 8. Complejos de cianuro frecuentes	33
Tabla 9. Principales parámetros de los métodos de cianuración de minerales auríferos	35
Tabla 10. Composición de los contenidos del reactivo GOLDMAX	39

Tabla 11. Variables estadísticas	51
Tabla 12. Composición de la muestra	59
Tabla 13. Densidad real y aparente del concentrado	59
Tabla 14. Pruebas # 1 lixiviación con cianuro	60
Tabla 15. Pruebas # 2 lixiviación con GOLDMAX	61
Tabla 16. Pruebas # 3 lixiviación con GOLDMAX	62
Tabla 17. Pruebas # 4 lixiviación con GOLDMAX	63
Tabla 18. Pruebas # 5 lixiviación con GOLDMAX	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Reacciones de oxidación–reducción en el proceso de cianuración	12
Figura 2. Equilibrio entre HCN y CN ⁻ en función del pH	16
Figura 3. Contenido de Cu, Fe, Zn en solución a diferentes concentraciones de cianuro	20
Figura 4. Muestras de relave Piritas Auríferas	58
Figura 5. Disolución del oro con reactivos GOLDMAX	68
Figura 6. Comparación de la disolución del oro con cianuro y GOLDMAX	68

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.Cianuración agitada de mineral aurífero	76
Anexo 2.Procedimiento del método Chiddey para determinación de oro de soluciones cianuradas de la planta	83
Anexo 3.Procedimiento de oro rápido en soluciones barren	89
Anexo 4.Procedimiento de contenido de cal libre para el consumo de reactivos	91

RESUMEN

El presente trabajo de tesis fue realizado en los ambientes del Laboratorio de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería-UNJBG. El trabajo de investigación se consideró en hacer pruebas de lixiviación con cianuro de sodio y con GOLDMAX, llegando a los siguientes resultados, el reactivo GOLDMAX muestra su mejor resultado a las 24 horas, llegando a una recuperación de 87,5 % de extracción de oro, considerando el mismo tiempo con el cianuro de sodio la recuperación es de 70,83 % de oro. Otra ventaja GOLDMAX, consume menor cantidad de reactivo, siendo más eficientes sobre todo con el menor impacto ambiental, considerado un producto de muy baja toxicidad.

Palabras clave: Cianuración, recuperación de oro, relaves de piritas auríferas, sulfuros, lixiviación con cianuro de sodio.

ABSTRACT

The present thesis was carried out in the environments of the Metallurgy Laboratory of the Faculty of Engineering-UNJBG. The research work was considered in making leaching tests with sodium cyanide and GOLDMAX, reaching the following results, the GOLDMAX reagent shows its best result at 24 hours, reaching a recovery of 87,5% of gold extraction , considering the same time with sodium cyanide, the recovery is 70,83% gold. Another advantage GOLDMAX, consumes less amount of reagent, being more efficient especially with the lowest environmental impact, considered a product of very low toxicity.

Keywords: Cyanidation, gold recovery, tailings of auriferous pyrites, sulfides, leaching with sodium cyanide.

INTRODUCCIÓN

El cianuro de sodio ha sido el reactivo de lixiviación preponderante para el oro, debido a su excelente extracción de una gran variedad de menas y su bajo costo. Si bien el cianuro es un lixivante poderoso para oro y plata, no es selectivo y forma compuestos complejos con una variedad de iones metálicos y minerales. La innovación es muy importante por la industria minera en el Perú, porque permite la aplicación de nuevas técnicas, productos y procedimientos que elevan la productividad y aminoran el impacto en el ambiente, se trata del reactivo GOLDMAX que, además de reemplazar al cianuro, ofrece una mejor cinética y puede acortar los tiempos de lixiviación con recuperaciones iguales o similares. Incluso se han registrado casos donde se logró disminuir el consumo de agente lixivante hasta en un 45 %.

El objetivo del presente trabajo de tesis es la aplicación del reactivo GOLDMAX y el cianuro de sodio a los relaves de piritas auríferas producto de la flotación que tienen contenidos metálicos importantes, y no reciben el tratamiento metalúrgico adecuado para poder recuperar los metales valiosos. Estos materiales ya han pasado por el proceso de reducción de tamaño que es la parte más costosa del beneficio de

minerales y para poder procesarlos a veces solo requiere una remolienda y en casos más complicados, preconcentración, oxidación y lixiviación para poder extraer exitosamente el metal o metales preciosos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción del problema

1.1.1 Antecedentes del problema

La necesidad de procesar minerales auríferos cada vez más complejos ha generado el desarrollo y la aplicación de nuevos reactivos que permitan mejorar la recuperación de metales preciosos.

En los últimos tiempos se ha tratado de desplazar el cianuro en diversas plantas de proceso en el mundo, tomado conciencia acerca de la importancia del cuidado del medio ambiente y esto se manifiesta como un nuevo concepto de vida: “El Desarrollo Sustentable”; en este aspecto, el presente trabajo de investigación propone el estudio a nivel de laboratorio de la acción de un nuevo reactivo para disolución del oro, para mejorar la recuperación de los minerales, en esta ocasión con las piritas auríferas.

1.1.2 Problemática de la investigación

En el país, por la exigencia de las comunidades de que sus tierras y el agua no sean contaminadas; hacen que los proyectos mineros se detengan por el uso del cianuro. Entonces promover el uso de otros reactivos no contaminantes, amigables con el medio ambiente para la recuperación del oro, hace que el presente trabajo sea de importancia.

Partiendo de distintos procesos para el tratamiento de minerales auríferos refractarios, se concluye en la necesidad de evaluar el nuevo reactivo GOLDMAX en el tratamiento de minerales auríferos de la Región. El presente proyecto contribuye a tal impulso.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema principal

¿Cómo influye el uso del reactivo GOLDMAX y qué resultados presenta en la lixiviación de minerales auríferos refractarios?

1.2.2 Problema específico

¿Cómo determinar el consumo de reactivos, el GOLDMAX y el cianuro?

¿Cómo evaluar el reactivo GOLDMAX en minerales auríferos refractarios?

¿Qué resultados se obtienen al comparar el nuevo lixiviante GOLDMAX con el cianuro?

1.2.3 Justificación e importancia del problema

La minería moderna demanda un mayor cuidado del ambiente y el aumento de la productividad. Para atender esa necesidad aparece GOLDMAX, el reactivo que desplazará al temido cianuro en los procesos para obtener oro y otros metales valiosos.

GOLDMAX representa una evolución para la minería aurífera porque permite realizar procesos de lixiviación más eficientes pero con un menor impacto ambiental pues se trata de un producto de muy baja toxicidad. Este novedoso reactivo, que fue desarrollado y es producido por **ROYAL CHEMICAL DEL PERÚ**, ofrece ventajas muy superiores al cianuro y a otros productos similares que han aparecido en los últimos años.

En el país, por la exigencia de las comunidades de que sus tierras y el agua no sean contaminadas; hacen que los proyectos mineros se detengan por el uso del cianuro. Entonces promover el uso de otros reactivos no contaminantes, amigables con el medio ambiente para la recuperación del oro, hace que el presente trabajo sea de importancia.

1.3 Alcances y limitaciones

1.3.1 Limitaciones

No hay mucho conocimiento sobre los beneficios del nuevo reactivo GOLDMAX. La investigación fue autofinanciada.

La principal limitación de la presente investigación era la dificultad de conseguir información nacional sobre el uso actual del reactivo GOLDMAX comparado con el cianuro.

1.3.2 Alcances de la investigación

- **Delimitación espacial**

El trabajo de investigación se realizó en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, ubicado en el distrito de Tacna en la ciudad de Tacna, Ciudad Universitaria: Avenida Miraflores S/N.

- **Delimitación temporal**

La investigación se desarrolló durante los meses de junio a diciembre de 2016.

Por la naturaleza de los minerales auríferos refractarios, se trató el mineral con el método de lixiviación con el reactivo GOLDMAX comparándolo con el cianuro.

Esta investigación tiene por finalidad permitir e identificar los beneficios como lixiviante al nuevo reactivo GOLDMAX. Esto con la finalidad de contribuir a una mejor recuperación de oro por parte de la industria minera en el Perú.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo principal

Evaluar el nuevo reactivo lixiviante GOLDMAX en el tratamiento de minerales refractarios auríferos.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Determinar el consumo de reactivos, el GOLDMAX y el cianuro.
- b) Evaluar del nuevo reactivo GOLDMAX en minerales refractarios auríferos.
- c) Ver los resultados de los dos lixiviantes, el GOLDMAX y el cianuro.

1.5 Hipótesis general

Es posible el empleo de GOLDMAX que no contamina y mejora la disolución del oro, considerado como único parámetro dependiente la recuperación de oro.

1.5.1 Hipótesis específica

- a) Con la aplicación del lixivante GOLDMAX se logrará tener un menor consumo de reactivos comparado con el cianuro.
- b) Con el lixivante GOLDMAX se logrará una mejor disolución y recuperación del oro en minerales refractarios auríferos.
- c) Con el lixivante GOLDMAX se obtendrá mejores resultados comparado con el cianuro.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO DE INVESTIGACIÓN

2.1 Antecedentes del problema

La innovación es muy cotizada por la industria minera porque permite la aparición de nuevas técnicas, productos y procedimientos que elevan la productividad y aminoran el impacto en el ambiente. En este nicho lo común es encontrar desarrollos de los llamados países “desarrollados” que invierten gigantes sumas en sus investigaciones, pero hay importantes ejemplos que muestran que lo preponderante es el conocimiento, ingenio y un trabajo arduo. Un interesante ejemplo es el de Royal Chemical del Perú, empresa peruana que viene impulsando una revolución como su gama de reactivos químicos para procesos mineros como la flotación y la lixiviación. Royal Chemical del Perú busca reemplazar los reactivos “tradicionales” que vienen siendo utilizados en la minería por décadas y siglos como es el caso del nocivo cianuro que puede ser totalmente reemplazado con sus productos estrella: GOLDMAX -agente ecológico de bajo consumo y precio competitivo, para la lixiviación.

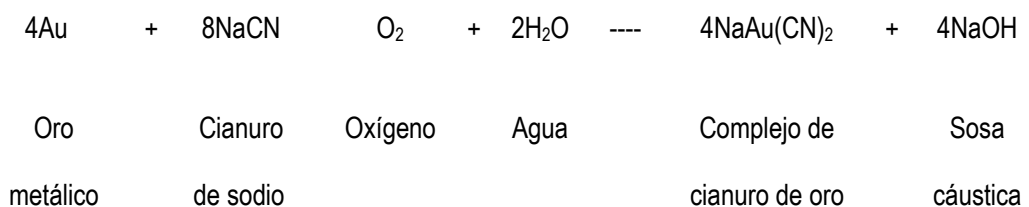
El laboratorio de metalurgia de nuestra universidad iniciará la aplicación del nuevo reactivo para disolución del oro en minerales refractarios, tarea de esta investigación.

2.2 Fundamentos teóricos y definiciones generales

2.2.1 Fundamento de la cianuración

La cianuración es el proceso electroquímico de disolución del oro, plata y algunos otros componentes que se pueden encontrar en un mineral aurífero, mediante el uso de una solución alcalina de cianuro, que forma aniones complejos de oro, estables en condiciones acuosas. Este proceso implica una serie de reacciones que ocurren en la superficie del sólido.

Elsner (1846) propuso la reacción global de disolución del oro mediante una solución acuosa de cianuro, en presencia de oxígeno:



La reacción global corresponde a una reacción heterogénea que incluye tres fases diferentes: Fase sólida (oro metálico), líquida (agua, sales disueltas de cianuro), gas (oxígeno).

La cianuración está controlada por la difusión del cianuro y oxígeno hacia la superficie del oro, como se esquematiza en la Figura 1. El mecanismo de disolución de oro en la solución de cianuro es el siguiente:

- Absorción de oxígeno en la solución.
- Transporte de cianuro disuelto y oxígeno a la interface sólido líquido.
- Transporte de los reactantes al interior del sólido por poros o canales.
- Adsorción del cianuro y oxígeno en la superficie del sólido.
- Reacción electroquímica en la superficie.
- Desorción del complejo soluble oro-cianuro y otros productos de la reacción.
- Transporte de los productos desde los sitios de reacción hacia la superficie del sólido por poros o canales.
- Transporte de los productos desde la interface fluido-sólido hacia la solución.

En las plantas que utilizan el proceso de cianuración, las concentraciones normales de cianuro utilizadas están entre 0,3 y 2 g/l

(0,03 % a 0,2 % de cianuro libre). Estos valores se pueden incrementar, en algunos casos hasta valores prohibitivos económicamente, si en las menas se encuentran presentes minerales consumidores de cianuro, como algunos minerales de cobre, hierro, zinc, entre otros.

El otro elemento, imprescindible para el desarrollo de la reacción, es la presencia de oxígeno y puesto que la cianuración es un proceso controlado principalmente por fenómenos de transporte de masa, la concentración de oxígeno está limitada por la solubilidad del oxígeno en agua, que es de 8,2 mg O₂/L a nivel del mar y 298 K (25 °C). Minerales de arsénico y antimonio, son consumidores de oxígeno, causando un efecto retardante en la solubilización del oro.

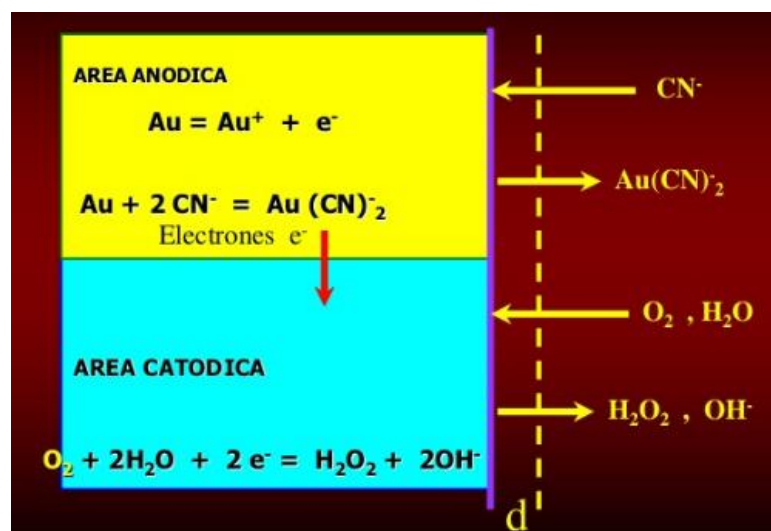


Figura 1. Reacciones de oxidación–reducción en el proceso de cianuración.

Fuente: Mamani M., Vidal; Alvarado C., Edgar. Setiembre ,1999.

Sales de cianuro utilizadas

El cianuro es un término al que se lo relaciona con envenenamiento y muerte y tiene su razón de ser, al haber sido utilizado justamente para suicidios, asesinatos y muertes masivas en los campos de concentración nazis. Sin embargo, hay que recordar que el cianuro se presenta de manera natural; hay microorganismos que lo producen y se lo encuentra en 2 650 especies de plantas y vegetales, como parte de su metabolismo normal. Ejemplos de especies comestibles que contienen cianuro, son: yuca, nabo, brócoli, alfalfa, rábanos, repollos, col, coliflor, frutas como el durazno, cerezas, almendras.

El cianuro se encuentra también en emisiones por la combustión de productos naturales o sintéticos como la lana, seda, acrílicos, poliuretanos; emisiones en la producción de hierro y acero, en la combustión del carbón, refinerías de petróleo, incineradores de basura, gases de combustión de vehículos. Los niveles de cianuro en el humo del cigarrillo, son altos y representan un peligro latente.

Los compuestos de cianuro son muy beneficiosos en un gran número de industrias, por lo que tiene mucha aplicación industrial. En el beneficio del oro, la cianuración tiene más de 100 años de uso y a pesar de su alta toxicidad, es muy raro que se produzcan intoxicaciones o

accidentes fatales. Debe ser manejado con cuidado, respetando su peligrosidad, pero como disolvente del oro, no tiene competidores, tanto por simplicidad de uso, alta eficiencia de extracción, relativo bajo costo y seguridad, si se lo emplea con las precauciones debidas.

La utilización de las sales de cianuro en el proceso de cianuración, dependen de su solubilidad en agua y la disponibilidad en el medio. La más usada a nivel mundial es el cianuro de sodio (NaCN)

Tabla 1
Sales de cianuro empleadas en cianuración

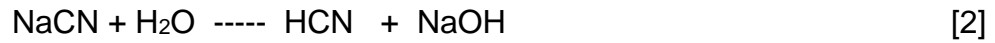
Compuesto	Nombre	Cianuro disponible (%)	Solubilidad en agua a 25°C (g/100cc)
NaCN	Cianuro de sodio	53,1	48
KCN	Cianuro de potasio	40,0	50
Ca(CN) ₂	Cianuro de calcio	56,5	Se descompone

Fuente: Habashi, F. 1966.

Hidrólisis del ácido cianhídrico (HCN) y ion cianuro (CN⁻)

Las sales de cianuro se descomponen en ácido cianhídrico (HCN) y en ion cianuro (CN⁻). El grado de descomposición en estos dos compuestos, depende del pH. Una solución acuosa de cianuro alcalino se hidroliza de acuerdo a las reacciones siguientes:





La razón por la cual se da esta hidrólisis depende de la cantidad de álcali libre. Si la cantidad de álcali es grande la descomposición de cianuro puede ser despreciable, pero en ausencia de este la hidrólisis puede ser retardada por la adición de cal.

En la práctica, la adición de cal a la pulpa cianurada es universal, y no solamente previene las pérdidas de cianuro por hidrólisis, sino también neutraliza algún constituyente ácido de la mena que podría causar liberación de ácido cianhídrico. La proporción de ácido cianhídrico e ion cianuro presentes en la solución de cianuración, depende del pH, de la forma siguiente:

Tabla 2
Contenido de HCN en función del pH

pH	HCN (%)	CN ⁻ (%)
8,4	90	10
9,3	50	50
10,2	10	90

Fuente: Fidel Sergio Misari, 1993 "Metalurgia del Oro" Primera edición

Gráficamente, el equilibrio entre ácido cianhídrico (HCN) e ion cianuro (CN) en función del pH, se presenta en la Figura 2.

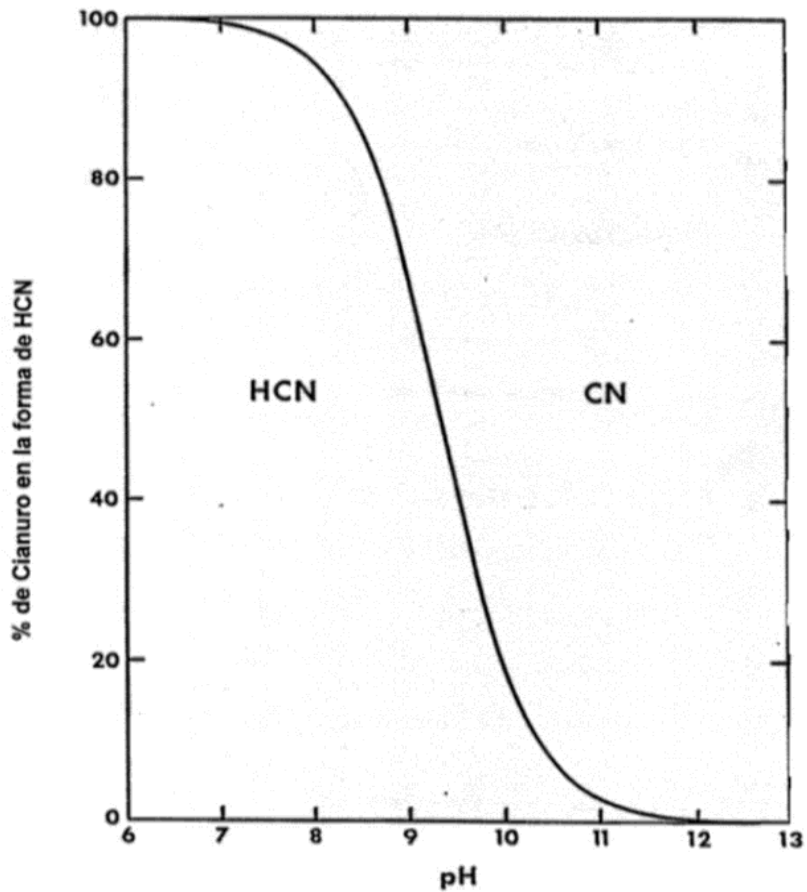


Figura 2. Equilibrio entre HCN y CN^- en función del pH

Fuente: Scoot, J.S y J.C. Inglés, 1981

Factores que afectan la disolución de oro

Dado que la concentración de oro en el mineral es baja (entre 0,1 - 20 g/t en minerales y 300 - 1000 g/t en concentrados), se debe señalar que el consumo del cianuro y oxígeno en la lixiviación de minerales auríferos, depende de las reacciones secundarias de disolución de otros

minerales portadores de cobre, cinc, hierro, arsénico, antimonio, que se presentan en valores superiores a 5000 g/ton en minerales. Entre los minerales cianicidas (consumidores de cianuro) más importantes se debe mencionar; la pirrotina, la marcasita, minerales oxidados de cobre, óxidos de cinc, esfalerita, smithsonita.

Un exceso en la concentración de cianuro aumenta la disolución de elementos indeseables (cobre, cinc, hierro) los cuales además de formar complejos estables que dificultan la recuperación posterior del oro, causan serios problemas de envenenamiento de la solución, que no permiten su recirculación. Producen, además, mayor contaminación de elementos pesados en suelos y ríos, al ser desechada la solución al ambiente.

Por lo tanto, es indispensable conocer las condiciones óptimas de cianuración, que dependerán de la mineralogía de cada material.

Los principales factores que se deben tener en cuenta en el proceso de cianuración son:

a) Concentración de cianuro

La razón de disolución del oro en soluciones cianuradas aumenta linealmente con la concentración de cianuro, hasta que se alcanza o se

produce un máximo, más allá del cual, un incremento adicional en la concentración de cianuro no aumenta la cantidad de oro disuelto, sino por el contrario tiene un ligero efecto retardante.

De acuerdo con la reacción global de cianuración, estequiométricamente, 1 mol de oro (Au) requiere 2 mol de ion cianuro (CN⁻) y 0,5 mol de oxígeno (O₂), esto es: 19,3 g Au ---> 98 g NaCN⁻ y 16 g O₂, sin embargo, la cantidad de cianuro que se añade es mayor a la requerida por la presencia de compuestos que compiten con el oro por el consumo de cianuro (cianicidas).

En la práctica la mayoría de plantas tratan las menas de oro usando soluciones que contienen menas de 0,05 % de NaCN (0,5 g/l); el promedio general está probablemente del 0,02 % al 0,03 % de NaCN (0,2 a 0,3 g/L).

En minerales que contienen cianicidas es usual mantener la concentración de cianuro, incluso superior a aquella donde se observa que la velocidad de disolución de oro empieza a disminuir, el valor de concentración de cianuro que se ha generalizado en los procesos a menor escala es de 1 g/L.

Para determinar la influencia de la concentración de cianuro en minerales auríferos polisulfurados se ha realizado un estudio del mineral

denominado “Agua Dulce” que pertenece a la zona minera de Portovelo, ubicada al sur del Ecuador, este contiene pirita (20 %), calcopirita (2 %), esfalerita (1 %) y cuarzo (77 %). El mineral contiene 10 g/ton de oro y 15 g/t de plata.

Se realizan ensayos de cianuración a diferentes concentraciones de cianuro que van de 0,1 a 15 g/L, con el mineral a un tamaño inferior a las 100 micras, a pH=11. Los resultados obtenidos se resumen a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3
Recuperación de oro en solución a diferentes concentraciones de cianuro

[CNNa]	Recuperación de oro en solución	Consumo CNNa	Consumo Cal
(g/L)	(%)	(kg/t)	(kg/t)
0,10	39,47	1,01	9,85
0,50	80,04	3,67	8,85
1,00	82,56	1,95	9,65
5,00	72,13	9,00	10,70
10,00	70,60	12,45	10,70
15,00	70,45	12,90	10,70

Fuente: Manangón Perugachi, Lucía E., (25, febrero de 2015)

En este caso la mayor recuperación de oro en solución se obtiene cuando se trabaja a concentraciones de cianuro de 0,5 - 1 g/L, se observa que conforme se incrementa la concentración de cianuro disminuye la recuperación del metal precioso, probablemente por la disolución de otros

elementos que generan reacciones que consumen cianuro, retardando la disolución de oro. Es importante resaltar que el consumo de cal es alto, llegando incluso a 10,7 kg/t.

Se realiza un análisis del contenido de metales como cobre, hierro y zinc, en las soluciones de cianuración obtenidas a partir del análisis a diferentes concentraciones de cianuro. Los resultados obtenidos se observan en la Figura 3.

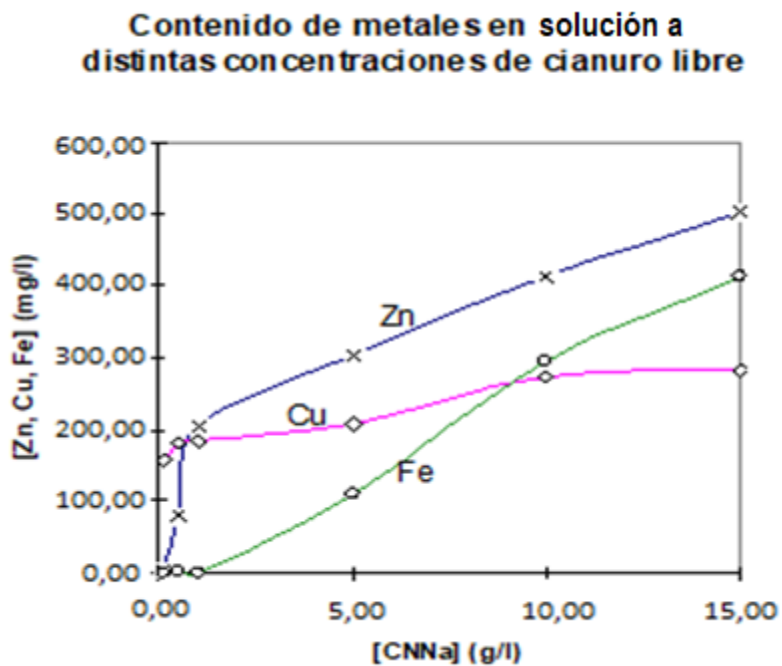


Figura 3. Contenido de Cu, Fe, Zn en solución a diferentes concentraciones de cianuro

Fuente: Manangón Perugachi, Lucía E., (25, febrero de 2015)

A medida que se incrementa la concentración de cianuro el contenido de metales en solución también aumenta en forma significativa, lo que explica la disminución de la recuperación de oro, ya que se generan reacciones que compiten con el metal precioso para formar complejos cianurados. En el ensayo que se realiza a 15 g/L se obtienen contenidos de zinc superiores a los 500 ppm que generan problemas para la determinación de la concentración de cianuro libre, lo mismo sucede con el contenido de cobre, que llega a 250 ppm, mientras que el hierro alcanza los 400 ppm.

b) Concentración de oxígeno

La concentración de cianuro es relativamente fácil de controlar, no así la del oxígeno, debido a su escasa solubilidad en agua bajo condiciones atmosféricas, a nivel del mar y 298 K (25°C) se puede tener en solución 8,2 mg O₂/litro (0,082 g/L). Por esta razón se dice que la cianuración está controlada por fenómenos de transporte. El cianuro es fácil de adicionar, pero el oxígeno es difícil de controlar en solución.

Se ha determinado, con valores experimentales y prácticos, que es adecuado tener una relación [CN⁻]/ [O₂] cercana a 6, para tener la máxima velocidad de disolución de oro.

La máxima concentración de oxígeno en la solución podrá ser de 8 mg/l, entonces la máxima razón de disolución del oro sobre condiciones ideales de agitación y aireación pueden tener lugar en soluciones que contengan 0,0098 % NaCN (0,098 g/L).

Existen dos métodos para incrementar $[O_2]$ disuelto:

1. Inyección de aire en el proceso de lixiviación bajo presión.
2. Inyección de O_2 puro, aire enriquecido con O_2 , H_2O_2 u otra fuente de O_2

Para determinar la influencia de la concentración de oxígeno sobre la recuperación de oro, se realiza un ensayo de cianuración con el mineral de Agua Dulce a las condiciones descrita anteriormente, usando 1 g/l de cianuro, además se emplea inyección de aire por medio de un compresor, a un caudal de $30 \text{ cm}^3/\text{s}$. El aire se inyecta tanto en la fase de preaireación como en la cianuración misma.

Tabla 4

Efecto de la inyección de aire en la recuperación de oro en solución

[Oxígeno]	Recuperación de oro en solución	Consumo CNNa	Consumo Cal
(g/L)	(%)	(kg/t)	(kg/t)
Sin inyección de aire	80,0	2,0	9,8
Con inyección de aire	75,0	1,0	10,0

Fuente: Manangón Perugachi, Lucía E., (25, febrero de 2015)

Con la inyección de aire se ha logrado la reducción del consumo de cianuro, en un 50 por ciento, esto se debe probablemente a la formación de óxidos no consumidores de cianuro o a que la superficie de algunos sulfuros se cubre de una capa de óxido férrico que los recubre, impidiendo el consumo de cianuro por parte de estas especies, pero probablemente se recubre también la superficie del oro y debido a ello baja su recuperación en la solución. En este caso la inyección de aire no beneficia la recuperación de oro y no sería conveniente aplicarlo en este caso.

c) pH y alcalinidad

Para prevenir pérdidas excesivas de cianuro por hidrólisis, el proceso de cianuración se lleva a cabo a valores de pH superiores a 9,4. El efecto del pH en la disolución de oro a valores mayores a 9,5 depende de los minerales que se encuentren como constituyentes de la mena, así como también del álcali empleado para su regulación.

En algunos casos la velocidad de disolución del oro puede disminuir con el incremento del pH, ya que se aumenta la velocidad de las reacciones que interfieren en el proceso.

En el proceso de cianuración es muy importante considerar que para disolución del oro, se requiere tener en solución, el ion CN^- . Si se opera a un valor de pH menor que 10, el cianuro libre estará en mayor proporción como HCN, que es muy volátil a temperatura ambiente, y genera problemas de salud por inhalación, ya que este es un gas venenoso. En la práctica se debe trabajar con valores de pH superiores a 10,5 para evitar la formación de HCN y favorecer la presencia del ion CN^- .

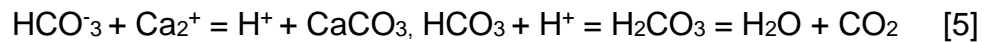
Con respecto a la alcalinidad, el compuesto universalmente usado para regular el pH y mantener una alcalinidad protectora en el proceso de cianuración, es la cal (CaO).

Las funciones del hidróxido de calcio en cianuración son las siguientes:

- Previene las pérdidas de cianuro por hidrólisis.
- Previene las pérdidas de cianuro por acción del dióxido de carbono del aire.



- Descompone bicarbonatos en el agua antes de que entre al proceso de cianuración.



- Neutraliza componentes ácidos como sales férricas y sulfato de magnesio en agua antes de añadir al circuito de cianuración.
- Neutraliza los componentes ácidos de la mena.
- Neutraliza los componentes ácidos que resultan de la descomposición de varios minerales en la mena, en soluciones cianuradas.
- Ayuda a la sedimentación de pequeñas partículas de la mena, es decir clarifica la solución fuerte.
- Mejora la extracción cuando se tratan menas que contienen, por ejemplo, telururos los cuales se descomponen más rápido en alta alcalinidad.

Se ha encontrado que la velocidad de disolución de oro disminuye si el pH alcanza valores superiores a 11 y esta disminución puede ser significativa con valores superiores a 12,2.

Probablemente esta disminución se debe a la formación de peróxido de calcio en la superficie del metal. El peróxido de calcio se forma por la reacción de la cal con el peróxido de hidrógeno que se produce de la

reducción del oxígeno en el área catódica de la superficie del oro durante la lixiviación.

Para ver la influencia del pH en la disolución de oro para mineral aurífero refractario de los “Tres Ranchos”, mina Ponce Enríquez, ubicada al sur del Ecuador, este mineral contiene pirita (44 %), arsenopirita (13 %) calcopirita (1,5 %) y cuarzo (41,5 %), su contenido de oro es de 30 g/t y el de plata de 25 g/t. Se realizaron ensayos de cianuración a distintos valores de pH que van de 9,5 a 12, se emplea 1 g/L de cianuro. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5

Influencia del pH en la recuperación de oro por cianuración

pH	Recuperación de oro en solución (%)	Consumo CNNa (kg/ton)	Consumo Cal (kg/ton)
9,5	67,9	12,5	3,1
10	71,0	1,7	1,5
11	74,3	2,1	3,5
12	71,1	1,5	11,5

Fuente: Manangón Perugachi, Lucía E., (25, febrero de 2015)

Se observa que a pH= 9,5 la recuperación de oro obtenida es la más baja, esto debido a que si se opera a un valor de pH menor que 10, el cianuro libre estará en mayor proporción como HCN, que es muy volátil a

temperatura ambiente, y no reacciona con el material, el consumo de cianuro además se incrementa sustancialmente en este caso (12,5 kg/t).

El mayor valor de recuperación se obtiene a pH = 11, con consumos de cianuro de 2,1 kg/t, a pH = 12 la recuperación de oro disminuye nuevamente probablemente por la presencia de peróxido de calcio.

d) Temperatura

Cuando se incrementa la temperatura en soluciones cianuradas que contienen oro metálico, se espera que también se incremente la actividad de la solución, y de este modo aumente la razón de disolución del oro. Sin embargo, se debe considerar que la cantidad de oxígeno en la solución puede disminuir porque la solubilidad de los gases disminuye con el incremento de temperatura.

Julian y Smart determinaron la solubilidad del oro en solución de 0,25 % de KCN a temperaturas entre 0 y 373 K y encontraron que la razón de disolución del metal precioso se incrementa hasta un máximo a 358 K, sobre esta temperatura la solubilidad del oxígeno en la solución disminuye y la velocidad de disolución del oro también.

e) Área superficial y tamaño del oro

La velocidad de disolución del oro es proporcional a la superficie expuesta del oro, la misma que depende del tamaño de la partícula mineral y del grado de liberación del metal precioso. En general, la velocidad de disolución aumenta con el menor tamaño de partícula (mayor liberación de oro). Sin embargo, al decrecer el tamaño de la partícula, se incrementan también las reacciones de competencia de otros elementos, por tanto, se debe encontrar un compromiso entre el tamaño de la partícula, el porcentaje de extracción del oro y el consumo de cianuro.

Se ha establecido que para una relación $[\text{CN}^-] / [\text{O}_2] = 6$, la máxima velocidad de disolución del oro es de $3,4 \mu\text{m/h}$, requiriéndose por tanto, un tiempo de 44 horas para disolver partículas de oro de $150 \mu\text{m}$ (malla #100) y 13 horas para granos de $45 \mu\text{m}$ (malla #325).

Para establecer la influencia del tamaño de partícula se efectúan pruebas de cianuración a diferentes tiempos de molienda, para un mineral aurífero refractario originario de un yacimiento ubicado al norte de Perú, que posee cuarzo (50 %), sulfuros como pirita (5 %), esfalerita (2 %), calcopirita (2 %) y óxidos de hierro como hematita, goetita, limonita (35 %), material arcilloso (3 %). El mineral posee un contenido de oro de

70 g/t, el proceso de cianuración se realiza a 1 g/L de cianuro y pH = 11, empleando materiales que han sido sometidos a diferentes tiempos de molienda (15 – 60 minutos). Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 6
Influencia del tamaño de partícula en la recuperación de oro por cianuración para un mineral refractario del norte de Perú

Tiempo de molienda	d ₈₀	Recuperación Au solución.	Contenido Au en el relave	Consumo CNNa	Consumo Cal
Minutos	Micras	%	g/ton	kg/ton	kg/ton
15	250	68,3	22,2	1,8	1,0
20	195	75,9	18,8	2,1	1,0
30	177	80,3	14,1	2,4	1,0
40	106	84,1	11,8	5,6	0,8
60	90	70,6	20,7	8,1	1,2

Fuente: Manangón Perugachi, Lucía E., (25, febrero de 2015)

Se puede observar que a mayor tiempo de molienda la recuperación de oro se incrementa hasta que se alcanza un máximo a los 60 minutos. El consumo de cianuro se incrementa a medida que aumenta el tiempo de molienda debido a la liberación de elementos cianicidas.

El máximo de recuperación de oro se obtiene a tiempos de molienda de entre 30 y 40 minutos, a tamaños de partícula que van de 177 a 106 micras, sin embargo se genera gran cantidad de material fino (30 %

inferior a 38 micras). El contenido de material arcilloso dificulta el proceso de cianuración, y para eliminarlo se realiza un proceso de deslamado del mineral molido 30 y 40 minutos, para eliminar el mineral fino antes de realizar el proceso de cianuración. Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

Tabla 7

Influencia del deslamado en la recuperación de oro

Tiempo de molienda	d ₈₀	Deslamado previo	Tiempo Ensayo	Recuperación A u solución.	Contenido Au en el relave	Consumo CNNa	Consumo cal
Minutos	Micras		Horas	%	g/ton	kg/ton	kg/ton
30	177	NO	48	80,3	14,1	2,45	1,0
30	177	SI	24	69,9	21,3	0,40	0,58
40	106	NO	48	84,1	11,8	5,59	0,8
40	106	SI	24	71,2	20,4	0,40	0,55

Fuente: Manangón Perugachi, Lucía E., (25, febrero de 2015)

En ambos casos el deslamado del material disminuye la recuperación de oro disuelto, prácticamente el 30 % del material lo constituyen las lamas eliminadas en el ensayo respectivo. Adicionalmente se analizó el contenido de oro en las lamas y se encontraron contenidos de 15 – 20 g/t de oro asociado al material fino.

La refractariedad del material en este caso se debe a la cantidad de oro fino presente, que se encuentra asociado al material arcilloso.

f) Efecto de la agitación

La disolución de oro está usualmente controlada por el transporte de masa y depende del espesor de la capa de difusión, es por esto que si se incrementa la agitación, aumenta la velocidad de disolución, hasta un máximo sobre el cual este efecto ya no tendrá mayores beneficios.

g) Constituyentes de la mena o procedentes de otros procesos

Ciertos constituyentes de la mena o reactivos de operaciones anteriores, pueden ejercer un efecto positivo o negativo sobre las reacciones de cianuración. Así, los reactivos de flotación ejercen un efecto inhibitor sobre dichas reacciones.

Compuestos minerales de la mena, donde se incluyen algunas especies de cobre, hierro, zinc, plomo, arsénico, antimonio, entre otros, consumen cianuro y oxígeno, requiriéndose por consiguiente, mayor concentración en solución para lograr tasas aceptables de extracción.

Las sustancias carbonáceas adsorben el oro disuelto, disminuyendo la extracción del metal precioso y el material arcilloso genera problemas de recuperación si el oro está asociado directamente a las arcillas en tamaños similares al de ellas, como se ha señalado anteriormente.

2.3 Complejos cianurados

Para la cianuración, se cuenta con la presencia del denominado “cianuro libre” que corresponde a las formas hidrolizadas de la sal de cianuro usada, generalmente cianuro de sodio (NaCN). El “cianuro libre” está formado por tanto por las especies HCN y CN^- . Mientras mayor sea la concentración de CN^- en solución, mayor será la posibilidad de formar complejos con muchas especies metálicas (oro, plata, cobre, hierro).

Hay complejos que son estables en solución hasta un pH de 4,5. Con un pH más bajo a ese valor, se descomponen en HCN y el hidróxido del metal, a estos complejos se los denomina, cianuros disociables en ácido débil o cianuros WAD, en los que se incluye también el cianuro libre, pues se descompone bajo pH 8.

Hay complejos cianurados, que se mantienen estables, incluso a pH bajos, y solamente se descomponen a pH inferiores a 2, a estos se los denomina, complejos fuertes.

La determinación de cianuro total, comprenderá toda la gama de compuestos cianurados presentes (cianuro libre, cianuro WAD y complejos fuertes).

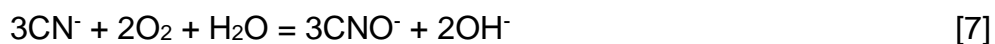
En la tabla siguiente se dan ejemplos de los tipos de cianuros que se puede encontrar en el proceso de cianuración de una mena aurífera.

Tabla 8
Complejos de cianuro frecuentes

Sales de cianuro	Cianuro libre	Cianuros disociables en ácido débil (WAD)	Complejos fuertes
NaCN KCN Ca(CN) ₂	HCN, CN ⁻	Cianuro libre & Zn(CN) ₂ (s) Ag(CN) ₂ Fe ₂ [Fe(CN) ₆](s) Cu(CN) ₄ ³⁻ Cu(CN) ₂	Au(CN) ₂ Fe(CN) ₆ ³⁻ (s) K ₄ Ni ₄ [Fe(CN) ₆] ₃

Fuente: Manangón Perugachi , Lucía Ely., (25, febrero ,2015)

Además de los complejos cianurados, el cianuro libre puede formar cianatos y tiocianatos. Los cianatos (CNO⁻) son compuestos que se forman por la presencia de oxígeno o especies carbonatadas en solución.



Los tiocianatos (SCN⁻) son compuestos de cianuro, que se forman por la presencia de compuestos sulfurados en el proceso (menas polisulfuradas)



Estas reacciones son inevitables, debido a que se requiere oxígeno en el medio y a que se trabaja con minerales sulfurados. Son reacciones indeseables, pues consumen cianuro y oxígeno en el proceso de cianuración.

2.4 Tipos de procesos de cianuración

La cianuración de los minerales auríferos puede realizarse mediante dos métodos: dinámicos y estáticos.

El método más apropiado a aplicar a un determinado mineral dependerá de diversos factores tanto económicos como técnicos, entre los que se puede mencionar el tonelaje a tratar, las características físicas y mineralógicas de la mena, la leyes y reservas del yacimiento, tipo y cantidad de minerales acompañantes y costos de instalación y operación.

Tabla 9

Principales parámetros de los métodos de cianuración de minerales auríferos

Parámetros	Métodos de lixiviación por cianuro		
	Estáticos		Dinámicos
	En pilas	En piscinas	Por agitación
Ley del mineral	Baja – media. Ej. 0,03 oz/t	Baja – media	Alta
Tonelaje	Grande. Ej. 5000 t a 2000 t	Mediano (100 t –2 000 t)	Amplio rango
Inversión	Media	Media a alta	Alta
Granulometría	Trituración gruesa a media	Trituración media a fina	Molienda fina
Concentración de cianuro (NaCN)	0,5 – 1,0 g/L	0,3 – 1,0 g/L	0,5 – 1,0 g/L
Flujo de solución	0,1 - 1 L/m ² /min	Ciclos de inundación	
Recuperación típica	50 – 75 %	75 – 92 %	90 – 99 %
Tiempo de tratamiento	Días - semanas	Días - semanas	Horas - días
Soluciones	Diluidas, 0,34-3,4 mgAu/L	Diluidas	Concentrada
Procesos de recuperación	Merrill Crowe CIC	Merrill Crowe CIC	Merrill Crowe CIP, CIL
Problemas principales	Recuperación incompleta Requiere grandes áreas Canalizaciones Bloqueo por finos Precipitaciones Evaporación Soluciones diluidas	Molienda Recuperación incompleta Soluciones diluidas Costo de capital y operación	Molienda Lavado en contracorriente Sedimentación y filtración Inversión alta

Fuente: Adaptado de Domic, 1985; Subrahmanyam et al, 1988; Marsden et al, 1992, Yannopoulos, 1991; Cope, 1999

2.5 Lixiviante GOLDMAX

La minería moderna debe cumplir con estándares ambientales cada vez más elevados y trabajar con mayor ahínco sus relaciones con sus comunidades vecinas. Para cumplir ambos retos es necesario promover la

innovación de aquellos procesos mineros que generan residuos altamente contaminantes.

En este contexto aparece **GOLDMAX**, un nuevo y revolucionario lixiviante ecológico para el oro y otros metales que desplazará al tradicional y nocivo cianuro de sodio (NaCN) cuyo uso es complejo y temido por las poblaciones aledañas.

GOLDMAX representa una evolución para la minería aurífera porque permite realizar procesos de lixiviación más eficientes pero con un menor impacto ambiental pues se trata de un producto de muy baja toxicidad. Este novedoso reactivo, que fue desarrollado y es producido por ROYAL CHEMICAL DEL PERÚ, ofrece ventajas muy superiores al cianuro y a otros productos similares que han aparecido en los últimos años.

ROYAL CHEMICAL DEL PERÚ ha lanzado GOLDMAX, inicialmente al mercado sudamericano y está logrando una gran acogida por parte de grandes empresas. En un corto plazo se espera que la mayoría de mineras acojan esta innovación que abre las puertas a una minería que sea realmente “amigable con el ambiente” y a la producción “ecológica” del oro.

GOLDMAX es un producto de innovadora fórmula, fabricado con materias primas exentas de impurezas y que se utilizan en la manufactura

de fertilizantes, siendo por ello un reactivo lixivante ecológico y además favorable al medio ambiente. Este agente de extracción de oro puede reemplazar al tradicional uso de cianuro de sodio (NaCN), el cual es altamente tóxico y que por lo general se considera como único lixivante de Au-Ag, lo cual se verá de un enfoque distinto con este nuevo producto. Este producto representa un logro científico y tecnológico, realizado a través de ardua labor y años de investigación por expertos e instituciones de investigación científica. El producto GOLDMAX es de muy baja toxicidad y contribuye a preservar el medio ambiente. GOLDMAX puede aplicarse desde la molienda, además de la lixiviación en tanque y el proceso de lixiviación del tipo CIP y CIL, sin mayor inconveniente, además de su total aplicación en el proceso Merrill Crowe.

Como es sabido, actualmente el 85 % del oro producido en el mundo se extrae mediante el uso de procesos de cianuración. Para hacer frente a la contaminación de productos altamente tóxicos como el cianuro, expertos investigadores de prestigiosas entidades del extranjero han llevado a cabo un gran número de experimentos e investigaciones para buscar productos de extracción de oro sin el uso de cianuro en los últimos años, buscando baja toxicidad o de ser posible toxicidad nula, pero ningún avance se ha hecho hasta el momento. Actualmente GOLDMAX, agente de extracción de oro, se plantea como la solución definitiva a esta

problemática ofreciendo al rubro minero, un lixiviante eficaz, de bajo consumo, que ofrece alta recuperación de oro muy similar a la que se obtiene con el cianuro, y a un precio razonable para hacer viable cualquier operación basada en el costo – beneficio.

Características de GOLDMAX

Protección del Medio Ambiente, Análisis Ambiental y Centro de Pruebas de Protección Ambiental, Consulting Co. Ltd realizaron análisis y pruebas sobre la toxicidad de lixiviación de los residuos después del uso de los productos, el resultado mostró que los relaves mineros, después de la pulverización, satisfacen el requisito de la protección del medio ambiente, y reducen el envenenamiento del medio ambiente significativamente.

Conveniente para el transporte, este producto puede ser transportado con seguridad por aire, ferrocarril, carretera y mar.

Tabla 10

Composición de los contenidos del reactivo GOLDMAX

Descripción: mezcla formada por las sustancias especificadas a continuación con adiciones		
Componentes	CAS número	Aproximado (%) por peso
Óxido de sodio (Na ₂ O)	1313-59-3	35-50 %
Nitrógeno (N)	7727-37-9	12-20 %
Amonio(NH ₄)	14798-03-9	7-12 %
Humedad (H ₂ O)	7732-18-5	1-4 %
Calcio (Ca)	7440-70-2	1-5 %
Hierro (Fe)	7439-89-6	1-5 %
Substancia insoluble en agua	-----	3-8 %

Fuente: ROYAL CHEMICAL DEL PERU. 2014

Aplicación del GOLDMAX en minería

GOLDMAX agente de extracción de oro, ha sido sometido a todas las pruebas pertinentes y que garantizan la total funcionalidad y eficacia del producto, realizándose pruebas exhaustivas con todo tipo de mineral y en todas las condiciones garantizando altas recuperaciones Au-Ag, tanto en minerales oxidados, sulfuros y mixtos. Funcionamiento – Lixiviante GOLDMAX: La lixiviación con GOLDMAX, se desarrolla en forma eficiente en pH =11-12 es muy estable y mejor en el rendimiento, con una mayor tasa de lixiviación por unidad de tiempo, lo que proporciona rapidez en el tiempo de extracción (cinética), es decir, estable en eficiencia y rendimiento. Exhibiendo marcadas ventajas técnico-económicas, cuando se le compara con otros productos similares que se ofrecen en el

mercado, ya que estos no actúan eficientemente con todo tipo de mineral, muy por el contrario presentan consumos elevadísimos, reportándose en los estudios realizados hasta 7 a 12 veces consumos más altos, que cuando se usa GOLDMAX.

GOLDMAX también presenta un mejor precio de venta, costo por kg, Ton, etc. y la disponibilidad de este reactivo es inmediata. Es decir, se trata de un producto muy superior, sumado a la seguridad, facilidad de uso y preservación del medio ambiente que ofrece su aplicación, en comparación con el NaCN (cianuro). Es un producto que lixivia en forma selectiva discriminando Fe y Cu, lo cual no ocurre con NaCN y otros productos, además su costo es muy competitivo frente a cianuro, haciendo fácil tomar una decisión de rápido cambio de reactivo.

Este producto no contiene ninguna forma de NaCN. El producto ha pasado las pruebas y evaluación de los servicios técnicos interesados.

Resumen:

Uso del producto: GOLDMAX, agente de extracción de oro, es aplicable en minerales de óxido de oro y plata, mineral de sulfuro, relaves de mineral, puede aplicarse en lixiviación en pilas (Heap Leaching, Vat Leaching), lixiviación en pozas – estanque de inmersión, (lixiviación

agitación CIP – CIL) y el proceso es idéntico a la producción cuando se usa cianuro de sodio .

Consideraciones en prueba industrial

1: Prueba industrial en tanques

Si las pruebas son a escala industrial no será necesario moler el reactivo, ya que bastará con alimentar el producto en solución al molino, junto con el mineral.

1. Debe prepararse GOLDMAX en solución agitando hasta disolver bien y completamente. Para esta preparación se sugiere adicionar (30 kg GOLDMAX / 500 litros de agua en un tanque especialmente para esto), esta será la solución a alimentar al molino en forma continua, el pH más adecuado será de 12.
2. Los controles de consumo de reactivo GOLDMAX, y del pH deben ser en la salida del molino, en el rebose del hidrociclón y en la salida de cada tanque. La densidad de pulpa en tanque según lo acostumbrado (1300 – 1350 g/ L pulpa), revoluciones – rpm según su sistema de siempre, ayudará mucho la aireación para aprovechar el oxígeno del aire tal y cual como se suele aplicar en sistema de cianuración–CIP

3. La titulación con AgNO_3 (4,33 g/L), como indicador ioduro de potasio al 5 % (3 gotas para alícuota de 25 ml), viraje amarillo- lechoso.

Es muy importante mantener el pH = 12 en todo el proceso.

2: Prueba industrial – minero artesanal (Sistema de Pozas)

Procedimiento válido para mineral y relaves de cualquier mineral aurífero (Au-Ag). Proceder al chancado de mineral según lo acostumbrado.

1. Moler mineral en seco según lo acostumbrado, hasta obtener finos.
2. Proceder a aglomerar mecánicamente o manualmente, el mineral usando cal y cemento, agregando también GOLDMAX pero disuelto previamente a razón de 0,5 g/L, a pH de solución = 12, luego de terminada esta operación, colocar el mineral aglomerado fresco en su poza de cemento o geo-membrana (puede utilizar plástico), dejar fraguar hasta que los pellets tengan consistencia (dureza).
3. Luego enjuagar por inundación o regar, con fuerza más baja de 0,5 g/L, y obtener solución rica según lo acostumbrado.
4. Finalmente, recuperar por método de carbón o bien con polvo de zinc.

Consideraciones:

Es importante la etapa de aglomerado y curado, ya que si se usa el producto simplemente echándolo en poza, junto con el mineral no se lixiviara bien y las recuperaciones serán bajas, para tener éxito la clave es aglomerar y curar.

Se sugiere mezclar 18 kg de cemento con 12 kg de cal, por cada ton de mineral molido la humedad es 20 % (solución de GOLDMAX al 0,5 g/L).

Almacenamiento:

GOLDMAX es un producto altamente estable y puede almacenarse largos periodos sin sufrir efecto de descomposición siempre que se le proteja de los elementos, como luz solar y lluvias.

Transporte y manejo:

Este reactivo no está sujeto a la fiscalización, ni control de ninguna índole, ante algún control policial y SUNAT el procedimiento es como se aplica a cualquier químico común y corriente. Lo que no ocurre con productos fiscalizados o controlados como el NaCN, que sí está sujeto a controles.

2.6 La pirita

La pirita es uno de los minerales más comunes en la naturaleza. Su parecido con el oro dio lugar a que se le diera en llamar el “oro de los tontos”. Muchas veces a los geólogos les toca atender en la Universidad a personas que bajan ilusionadas de alguna montaña de la zona convencidos de que encontraron oro y se llevan la desilusión de que se trata de simple pirita. Incluso muchos incautos fueron estafados por mineros inescrupulosos confundiéndolos sobre la verdadera naturaleza del mineral que no es otra cosa que una mezcla de hierro con azufre, o sea un sulfuro de hierro.

Sin embargo, a veces el asunto no está tan lejos de la realidad ya que hay muchos casos de piritas auríferas. En este caso la pirita es portadora de oro, aunque el mismo sea allí invisible. Como tal, se puede encontrar en vetas y también en enormes masas rocosas en las que viene acompañada por calcopirita; este último, un sulfuro de hierro y cobre. Forman esas masas los llamados “pórfidos de cobre”, famosos en Perú, Bolivia y Chile por dar lugar a grandes yacimientos. Muchos de esos pórfidos de cobre son también ricos en oro y molibdeno. La mayor parte del cobre, renio y molibdeno del mundo se extrae de los pórfidos.

La pirita cristaliza en cubos y esos cubitos desprendidos de las rocas pueden rodar en los aluviones y concentrarse junto al oro. Los nativos llaman “binches” y dicen que donde estos están, también está allí el oro. La pirita se forma no solamente en el mundo subterráneo asociada con los fluidos mineralizantes que dan lugar a vetas y otras formas de depósitos, sino también en un sinnúmero de variadas condiciones. Una de ellas es en lugares donde se deposita abundante materia orgánica, esto es en ambientes sin oxígeno (anóxicos). Muchas rocas bituminosas que dieron origen a la generación de hidrocarburos tienen a la pirita como un acompañante común al igual que algunos carbones y calizas. Puede estar formando los clásicos cubos dorados y también otras formas como discos, soles, nódulos, etcétera. El nombre de pirita viene de “pyros”, fuego, y ello en razón de despedir chispas al ser golpeada con un hierro. De allí que se la usó en armas antiguas, en las que al gatillar una rueda percutora martillaba la pirita que desprendía chispas que a su vez encendían la pólvora y se efectuaba el disparo. Entre los yacimientos importantes de pirita se encuentran los depósitos masivos en cuencas marinas como los de Río Tinto en España. Precisamente Río Tinto recibe el nombre del color que toman las aguas que corren sobre esos depósitos piríticos. La pirita en superficie, al ser atacada con agua y oxígeno, forma ácido sulfúrico natural. Esto es lo que se conoce como drenaje ácido y muchos

ríos de montaña que atraviesan por filones de sulfuros lo tienen. Los grandes yacimientos de pirita se han explotado para la fabricación de ácido sulfúrico por un lado y para la obtención del hierro por el otro. Cristales cúbicos dorados perfectos de pirita provienen de Navajún en España, donde han crecido en una arcilla calcárea blanca. En el norte argentino existen cientos de manifestaciones de pirita. Prácticamente, todas las vetas metalíferas de la Puna la tienen como mineral acompañante asociada a minerales de plomo, zinc, cobre, antimonio, estaño, plata, entre otros. Cuerpos masivos de pirita yacen en profundidad intercalados con rocas marinas en la localidad de Cobres.

Ahora bien, adonde se la encuentra formando grandes acumulaciones es en los ya mencionados pórfidos de cobre, donde está finamente diseminada junto a calcopirita en un gran volumen de roca ígnea que ha sido atravesada por fluidos mineralizados calientes. Cuando la erosión destapa esos depósitos magmáticos originados muchos millones de años atrás a un par de kilómetros de profundidad y altas temperaturas, los minerales que estaban en equilibrio ya no lo están al quedar expuestos a la presión y temperatura ambiente. El ambiente oxidante y las aguas circulantes atacan a la pirita y la calcopirita y va a dar lugar en superficie a una serie de óxidos, hidróxidos, sulfatos, carbonatos y otras sales minerales de hierro y cobre. El lavado y el

descenso de las aguas cargadas en metales van a ir hacia la profundidad en donde van a precipitar dando nuevos minerales y cuerpos más enriquecidos que los originales ya que concentran el metal propio más el que reciben del lavado o lixiviado de las rocas superiores. Cuando este proceso es exitoso se puede formar un yacimiento explotable económicamente. En todos ellos la pirita está presente en grandes cantidades.

Según lo expuesto, la pirita se confunde con el oro, aunque son bien diferentes. Si bien tiene un color amarillo claro y un brillo metálico, cuando se golpea con un martillo se ve que es quebradiza y que puede reducirse a un polvo negruzco grisáceo oscuro donde desaparece el brillo. Lo mismo ocurre si se raspa en la parte de atrás de un azulejo donde va a dejar una raya negruzca. El oro en cambio tiene un color amarillo que no lo pierde y si se golpea con un martillo es maleable o sea que se deja reducir en láminas muy finas. Si se raspa el oro en la parte posterior del azulejo va a dar una raya amarilla dorada clásica. Por otro lado, se tiene el peso específico y mientras que la pirita es 5 veces más pesada que un volumen igual de agua, el oro es 19 veces más pesado. Lo mismo ocurre con la dureza en donde en una escala de 1 a 10 el oro tiene 2,5 a 3 mientras que la pirita tiene 6,5 demostrando así ser mucho más dura que el oro. Se espera que estas reglas básicas ayuden a muchos que tienen

atesoradas piritas pensando que es oro y a muchos que tienen oro pensando que es pirita, aun cuando estos sean los menos.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y diseño de la investigación

- Tipo de estudio: exploratorio

El trabajo de investigación se enmarca en la investigación exploratoria porque abordan campos poco conocidos donde el problema, que solo se vislumbra, necesita ser aclarado y delimitado. Los resultados de estos estudios incluyen generalmente la delimitación de uno o varios problemas científicos en el área que se investiga y que requieren de estudio posterior.

- Diseño de investigación

El diseño es experimental porque es aquella que permite con más seguridad establecer relaciones de causa y efecto.

3.2 Población y muestra

- Universo

Se consideró a la Mina Inti Raymi – Bolivia.

- Población

La población considerada es la recuperación de oro.

- Tamaño de muestra

Se tomó en cuenta la cantidad de relave “Piritas Auríferas”.

3.3 Operacionalización de variables

El presente trabajo está enmarcado dentro de la metalurgia extractiva y es un trabajo de investigación aplicado. Cuyo diseño de investigación es un esquema basado a las evoluciones realizadas en planta, donde las colas o relaves en la flotación son sometidos a lixiviación aplicando nuevo reactivo que reemplace al NaCN.

La lixiviación, o extracción sólido-líquido, es un proceso en el que un disolvente líquido pasa a través de un sólido pulverizado para que se produzca la disolución de uno o más de los componentes solubles del sólido.

Tener un menor consumo de reactivos por parte del reactivo GOLDMAX comparado con el cianuro.

Una mejor disolución y recuperación de oro por parte del nuevo reactivo GOLDMAX en relaves de piritas auríferas.

Obtener mejores resultados por parte del lixivante GOLDMAX comparado con el cianuro.

Tabla 11
Variables estadísticas

Variables	Indicadores
Variable Independiente X Reactivo GOLDMAX	% solidos , granulometría, temperatura, pH, reactivos, % de Dosificación de GOLDMAX
Variable Dependiente Y % de Recuperación de Minerales Auríferos Refractarios	% de recuperación de Au

Fuente: elaboración propia

Métodos estadísticos

Se efectuó mediante la hoja electrónica de Excel, así como también la estadística descriptiva, para establecer la relación entre las variables.

X= Variable independiente

Y= Variable dependiente

3.4 Técnicas e instrumentos para recolección de datos

3.4.1 Técnicas

a) Trabajo de gabinete

A continuación se realizaron las siguientes acciones:

- Análisis estadístico de muestras tomadas de campo.
- Análisis granulométrico.
- Elección de instrumentos de laboratorio a utilizar.
- Cálculo de costos.
- Estadística descriptiva.

b) Trabajo de campo

A continuación se realizaron las siguientes acciones:

- Toma de muestras.
- Recolección y transporte de muestras.

- Homogenización (cuarteo de muestra).
- Determinación de la densidad real y aparente.

3.4.2 Instrumentos

- 06 plásticos impermeable
- 03 envases de 12 litros con regulador de flujo de salida
- 01 probeta de 10 ml
- 01 probeta de 50 ml
- 01 probeta de 1 L
- Varios envases para la recepción de la solución
- 01 bureta
- 01 pipeta volumétrica

3.4.3 Reactivos

- Cal
- Cianuro de sodio
- Carbón activado
- Rodamina
- Ácido sulfúrico
- Ácido clorhídrico
- Ácido nítrico
- Nitrato de plata

- Polvo de cinc
- Hidróxido de amonio
- Hidróxido de sodio
- Fluoruro de sodio
- Litargirio
- Acetato de plomo
- Carbonato de sodio
- Ioduro de potasio
- Crisoles refractarios
- Copelas

3.4.4 Gabinete

- Microsoft office (Excel)

3.4.5 Equipos del sistema electrolítico

- Horno de secado
- Horno de calcinación
- TK de agitación
- Columnas de adsorción y elución
- Balanza digital
- pH digital

- Pirómetro óptico
- Microscopio electrónico de barrido
- pHmetro
- Balanza analítica 4 dígitos

3.5 Procedimiento y análisis de datos

3.5.1 Proceso de extracción de muestras

- Toma de muestras de campo

Las muestras consideradas para el presente trabajo de investigación son relaves “piritas auríferas” provenientes de la flotación de piritas auríferas obtenidas de la mina Inti Raymi – Bolivia.

- Análisis de laboratorio

Las muestras de relave obtenidas de la mina Inti Raymi – Bolivia, fueron mandadas al laboratorio de la Universidad Jorge Basadre Grohmann, laboratorio que realizó el análisis del ensayo para oro utilizando el método de digestión específica – volumetría y absorción atómica para determinar la ley de cabeza de las muestras, al igual que el concentrado.

- **Análisis de laboratorio (granulométrico)**

Las pruebas que se realizaron fueron cuatro, mediante tamizado hasta obtener cuatro muestras de 500 g de relave “piritas auríferas”, en el laboratorio de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

- **Análisis de laboratorio (densidad real y densidad aparente)**

Las pruebas que se realizaron fueron cuatro, en el laboratorio metalúrgico de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann para poder determinar la densidad real y densidad aparente del relave “piritas auríferas” de la mina Inti Raymi como también el concentrado, si la muestra del mineral se toma sin disturbar se obtiene la densidad aparente; si se elimina el espacio poroso, se obtiene la densidad real o de partículas. La relación entre las densidades aparente y real sirve para estimar la porosidad de mineral en cuestión.

- **Análisis en laboratorio de metalurgia (análisis químico semicuantitativo)**

Se realizó un análisis químico semicuantitativo del relave “piritas auríferas” para poder determinar los minerales existentes en las muestras.

3.5.2 Comparación de resultados entre el cianuro y GOLDMAX

Se comparó los resultados obtenidos con GOLDMAX respecto al cianuro, las 4 muestras con tiempos de 4, 8, 12 y 24 horas, dando como resultado una mayor recuperación y un menor consumo de reactivos a partir de 12 y 24 horas por parte de GOLDMAX respecto al cianuro, estos resultados ayudaron a determinar que este nuevo lixiviante es favorable, tanto en recuperación de minerales valiosos como el oro, como en la disminución de la contaminación que hay en las mineras.

3.5.3 Tratamiento de datos

Se evaluaron los beneficios tanto en el consumo de reactivos, como también en el tiempo de recuperación de los minerales auríferos.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Características del análisis de las muestras de la zona

Estos fueron los resultados de las muestras que se analizaron en el “Laboratorio de la Universidad Jorge Basadre Grohmann”, provenientes de la flotación de piritas auríferas de la mina Inti Raymi -Bolivia. Ver Figura 4.



Figura 4. Muestras de relave Piritas Auríferas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12

Composición de la muestra

Componente	Concentración
Oro	2 g/t
Plata	5 g/t
Plomo	2 %
Arsénico	1,2 %
Antimonio	0,9 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13

Densidad real y aparente del concentrado.

Propiedades Física	Valores
Densidad real (g/ml)	2,95
Densidad aparente (g/ml)	0,7
Análisis granulométrico	80 % - m200

Fuente: Elaboración propia

4.1.1 Pruebas de Lixiviación con cianuro de sodio

Los relaves o colas de piritas auríferas han sido cuarteadas y secadas, para ser distribuidas en peso de 500 gramos cada muestra.

Tabla 14

Pruebas # 1 lixiviación con cianuro

PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN N° 01		
Ley de cabeza del relave	2,4	g/t
Peso de relave	1000	g
Agua en proceso	3000	mL
Dilución	3	
pH natural del relave	6,4	
pH de cianuración	11	
G.e.	2,8	
Densidad aparente	0,7	
% malla - 200	80	
Tiempo de cianuración	24	h
PRUEBAS DE CONSUMO		
Cianuro de sodio	4,3	kg/t
Cal	3,0	kg/t
RESULTADOS		
Ley de los ripios	0,7	g/t
Recuperación de oro	70,83	%

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Pruebas de lixiviación con GOLDMAX

De los relaves o colas cuarteadas y secadas anteriormente se tomaron cuatro bolsas de ½ kilo cada una para las pruebas de laboratorio. El reactivo lixivante GOLDMAX antes de usarlo fue molida la muestra en un mortero, ya que el reactivo presenta aspectos de pequeñas rocas, una vez molido fue secado por 10 minutos en plancha esto es importante ya que el reactivo GOLDMAX, posee alta higroscopia o afinidad por el agua y luego se procedió a pesar en la balanza analítica la cantidad que se va a usar. Seguidamente se detalla las condiciones de las cuatro pruebas realizadas a diferentes tiempos (4, 8, 12 y 24 horas) y sus resultados.

Tabla 15

Pruebas # 2 lixiviación con GOLDMAX

PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN N° 02		
Ley de cabeza del relave	2,4	g/t
Peso de relave	1000	g
Agua en proceso	3000	mL
Dilución	3	
pH natural del relave	6,4	
pH solución	11	
G.e.	2,8	
Densidad aparente		
% malla - 200	80	
Tiempo de lixiviación	4	h
PRUEBAS DE CONSUMO		
GOLDMAX	1,1	kg/t

Cal	3	kg/t
-----	---	------

RESULTADOS

Ley de los rípios	1,9	g/t
Recuperación de oro	20,83	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16

Pruebas # 3 lixiviación con GOLDMAX

PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN N° 03

Ley de cabeza del relave	2,4	g/t
Peso de relave	1000	g
Agua en proceso	3000	mL
Dilución	3	
pH natural del relave	6,4	
pH solución	11	
G.e.	2,8	
Densidad aparente		
% malla - 200	80	
Tiempo de lixiviación	8	h

PRUEBAS DE CONSUMO

GOLDMAX	2,8	kg/t
Cal	3,0	kg/t

RESULTADOS

Ley de los rípios	1,4	g/t
Recuperación de oro	41,67	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17

Pruebas # 4 lixiviación con GOLDMAX

PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN N° 04		
Ley de cabeza del relave	2,4	g/t
Peso de relave	1000	g
Agua en proceso	3000	mL
Dilución	3	
pH natural del relave	6,4	
pH solución	11	
G.e.	2,8	
Densidad aparente		
% malla - 200	80	
Tiempo de lixiviación	12	h
PRUEBAS DE CONSUMO		
GOLDMAX	2,5	kg/t
Cal	3,0	kg/t
RESULTADOS		
Ley de los rípios	0,82	g/t
Recuperación de oro	65,83	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18

Pruebas # 5 lixiviación con GOLDMAX

PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN N° 05		
Ley de cabeza del relave	2,4	g/t
Peso de relave	1000	g
Agua en proceso	3000	ml
Dilución	3	
pH natural del relave	6,4	
pH solución	11	

G.e.	2,8	
Densidad aparente		
% malla - 200	80	
Tiempo de lixiviación	24	h

PRUEBAS DE CONSUMO

GOLDMAX	2,6	kg/t
Cal	3,0	kg/t

RESULTADOS

Ley de los ripios	0,3	g/t
Recuperación de oro	87,50	%

Fuente: Elaboración propia

4.2 Resultados de pruebas de lixiviación con cianuro de sodio

Analizando la Tabla 14, se obtiene que el consumo de reactivos fue el siguiente:

- Cianuro de sodio 4,3 kg/t
- Cal 3,0 kg/t

Se puede apreciar que los consumos de cal y cianuro no son los adecuados dentro del proceso convencional, debido a las impurezas que presentan los relaves, en cuanto a la ley de los rípios los resultados fueron de 0,7 g/t y logrando recuperaciones hasta 70,83 % de oro.

4.3 Resultados de pruebas de lixiviación con GOLDMAX.

4.3.1 Resultados de prueba de lixiviación con GOLDMAX en 4 horas

Analizando la Tabla 15, se obtiene que el consumo de reactivos fue el siguiente:

- Cianuro de sodio 1,1 kg/t
- Cal 3,0 kg/t

En cuanto a la ley de los rípios los resultados fueron de 1,9 g/t y logrando recuperaciones hasta 20,83 % de oro.

4.3.2 Resultados de prueba de lixiviación con GOLDMAX en 8 horas

Analizando la Tabla 16, se obtiene que el consumo de reactivos fue el siguiente:

- Cianuro de sodio 2,8 kg/t
- Cal 3,0 kg/t

En cuanto a la ley de los ripios los resultados fueron de 1,4 g/t y logrando recuperaciones hasta 41,67 % de oro.

4.3.3 Resultados de prueba de lixiviación con GOLDMAX en 12 horas

Analizando la Tabla 17, se obtiene que el consumo de reactivos fue el siguiente:

- Cianuro de sodio 2,5 kg/t
- Cal 3,0 kg/t

En cuanto a la ley de los ripios los resultados fueron de 0,82 g/t y logrando recuperaciones hasta 65,83 % de oro.

4.3.4 Resultados de prueba de lixiviación con GOLDMAX en 24 horas

Analizando la Tabla 18, se obtiene que el consumo de reactivos fue el siguiente:

- Cianuro de sodio 2,6 kg/t
- Cal 3,0 kg/t

En cuanto a la ley de los ripios los resultados fueron de 0,3 g/t y logrando recuperaciones hasta 87,50 % de oro.

4.3.5 Resultado Final de pruebas de lixiviación con GOLDMAX

Analizando la Tabla 15, 16, 17 y 18, donde se logra ver los resultados a diferentes tiempos de lixiviación entre 4 - 24 horas, se logran disminuir el consumo de reactivo y la recuperación se incrementa hasta 87,5 %. Lo que da a indicar que el producto: GOLDMAX, Agente de extracción de oro, es aplicable en minerales de óxido de oro y plata, mineral de sulfuro, relaves de mineral, puede aplicarse en lixiviación en pilas (Heap Leaching, Vat Leaching), lixiviación en pozas – estanque de inmersión, (lixiviación agitación CIP – CIL) y el proceso es idéntico a la producción cuando se usa cianuro de sodio.

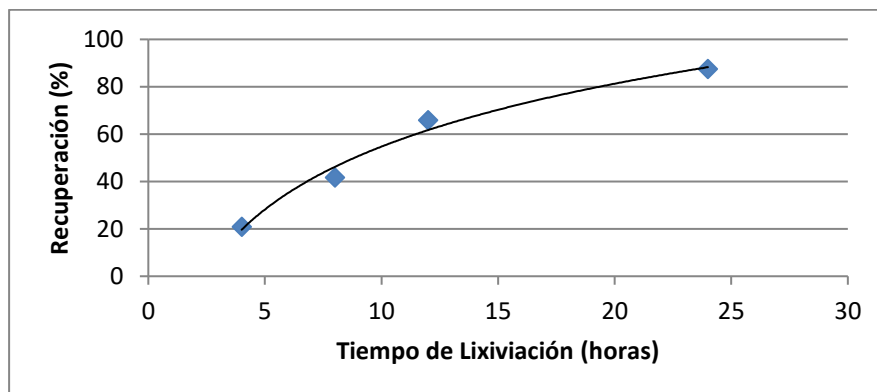


Figura 5. Disolución del oro con reactivos GOLDMAX

Fuente: Tabla 14, 16, 17, 18

4.4 Resultados de pruebas de lixiviación con GOLDMAX y cianuro

Comparando la lixiviación con cianuro y GOLDMAX hasta 24 horas finalizadas la lixiviación, la extracción de oro GOLDMAX supera la diferencia en la recuperación hasta 16,67 %, esto indica que pueden ser utilizados estos reactivos en la lixiviación de sulfuros.

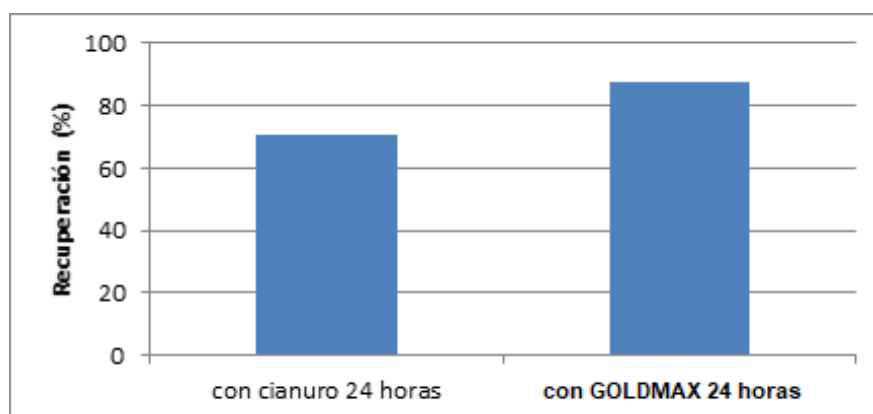


Figura 6. Comparación de la disolución del oro con cianuro y GOLDMAX

Fuente: Tabla 15, 16, 17, 18

CONCLUSIONES

El consumo de reactivo es mayor utilizando el cianuro de sodio consumiendo hasta 4,3 kg/t mineral, con respecto a GOLDMAX su consumo en piritas auríferas es de 1,1 kg/t.

La recuperación con el reactivo de cianuro de sodio es de 70,83 % de oro, es probable por la presencia de otros elementos cianicidas debido a su baja selectividad. El proceso de lixiviación con GOLDMAX muestra su mejor resultado a las 24 horas, llegando a una recuperación de 87,5 % de extracción de oro, siendo más eficientes. Asimismo, se obtiene mayor tasa de lixiviación por unidad de tiempo, lo que proporciona rapidez en el tiempo de extracción (cinética), es decir estable en eficiencia y rendimiento.

Comparando los resultados de los dos lixiviantes, tanto de cianuro como GOLDMAX, se determinó que la recuperación de oro con el lixivante GOLDMAX supera a la recuperación que presenta el cianuro en un 16,67 %, esto indica que este reactivo puede ser utilizado en la lixiviación de sulfuros.

RECOMENDACIONES

Las mineras del Perú deben abrir las puertas al uso del lixiviante GOLDMAX, ya que es un producto de innovación que es realmente “amigable con el ambiente” y a la producción ecológica del oro. Es un producto que lixivia en forma selectiva discriminando Fe y Cu, lo cual no ocurre con NaCN y otros productos.

Este tipo de operación que fue realizado con el reactivo GOLDMAX debe ser más viable dentro de las mineras, ya que los resultados fueron óptimos basados en el costo–beneficio, lo cual determina que es un lixiviante eficaz, de bajo consumo de reactivos y que ofrece alta recuperación de oro muy similar a la que se obtiene con el cianuro, y a un precio razonable para hacer viable cualquier operación basada en el costo–beneficio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afenya, P., (1991). Treatment of Carbonaceous Refractory Gold Ores. Mineral Engineering 4 (7-11), (pp.1043-1055).

Brooy, H., Linge, H., Wolker, G., (1994). Review of Gold Extraction from Ores, Minerals Engineering, 7 (10), (pp.1213-1241).

Chaves, A.P., (1985). Metodos de Concentracao e extracao de Ouro, Brasil Mineral 14, (pp.26-36).

Davidson, R. y N. Schoeman, (1991). The Management of Carbon in a high tonnage CIP Operation, Journal of the African Institute of Mining and Metallurgy 91(6), (pp.195-208).

Deventer, J. y P. Van der Merwe, (1994). Factor Affecting the Elution of Gold Cianide from Activate Carbon, Mineral Engineering 7(1), (pp.71-86).

Ellis, S. y G. Senanayake, (2004). The effects of dissolved oxygen and cyanide dosage on gold extraction from a pyrrhotiterich ore. Hydro-metallurgy 72, (1-2), (pp.39-50).

Finkelstein, N. y Adamson, R.J. (1972). "The Chemistry of the Extration of Gold from its Ores" In Gold Metallurgy in South Africa by S. L. Chambers of Mines of South Africa

Fivaz, C., (1988). How the MacArthur-Forrest Cyanidation Process Ensured South Africa`s Golden Future. Journal of the South African Institute of Mining an Metallurgy 88 (9), (pp.309-318).

Fleming, C., (1992). Hidrometallurgy of Precious Metals Recovery, Hidrometallurgy 30, (pp.127-162)

Hausen, D y C. Bucknam, (1985). "Study of Preg Robbing in the Cyanidation of Carbonaceous Gold Ores from Carlin, Nevada". International Conference of Applied Mineralogy (ICAM) 84. Proceedings TMS-AIME, (pp.833-857), New York

J.S.Scott, (1997).State of the Art Processes for the treatment of Gold Mill effluents: Industrial Programs Branch, Environment Canada, Ottawa, ON.

Marsden J. y I. House, (1992). T22he Chemistry of Gold Extraction, Ellis Horwood, New York

Mathre, O. Y F. DeVries, (1981). "Destruction of Cyanide in Gold and Silver Mine Process Water" In Gold and Silver Leaching, Recovery

and Economics, by Larsom, W. y Hiskey, (pp 77-82) ed. Schlitt. W,
AIME

Nicol, M., Fleming, C, Paul, R. (1987). The Chemistry of the extraction of Gold. The Extractive Metallurgy of gold in South Africa. The South African Institute of Mining and Metallurgy, (pp.831-901).

Olivieri, C, Mas, M.A., Canjialosi, R., Olivares, L., (1997). Recuperación en Planta Piloto de Minerales Auríferos Mediante el Proceso CIP-Carbon in Pulp. CONICET PID BID 194. Tomo I y II. UNSJ-UNLAR

Pizarro, R. y F. Antonio, (1981). "The Carbon in Pulp Plant of the Masbate Gold Operations Philippines" in Gold and Silver, Leaching, Recovery and Economics AIME, (pp 65-75) ed. Schlitt. W.; Larsom, W. and Hiskey

Rees K. y J. Van Deventer, (2001). Gold process modelling. I. Batch modelling of the processes of leaching, preg-robbing and adsorption onto activated carbon. Mineral Engineering 14 (7), (pp.753-773).

Slideshare. (8 de enero del 2017). "Cianuración por Agitación", de Mamani M., Vidal; Alvarado C., Edgar. Setiembre ,1999. Recuperado de:

<https://es.slideshare.net/victor15091982/231225-cianuracionporagitacion>

Slideshare. (21 de noviembre de 2016). "Variables que influyen en el proceso de cianuración", de Manangón Perugachi, Lucía E., (25, febrero de 2015).(pp.5-27), Recuperado de: <https://es.slideshare.net/ElyLucia/variables-cianuracion>

Scribd. (14 de septiembre de 2016). (GoldMax, reactive lixivante) "FICHA TÉCNICA DEL REACTIVO GOLDMAX", de ROYAL CHEMICAL DEL PERÚ. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/289412240/Goldmax-Ficha-Tecnica>

Udupa, A. R., and Kawatra, S. K., (1990) "Developments in Gold Leaching," Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, Vol. 7, (pp. 115-135).

ANEXOS

Anexo 1. Cianuración agitada de mineral aurífero

1. OBJETIVO

Lixiviar con solución de cianuro el oro contenido en un mineral aurífero refractario empleando el método de cianuración convencional agitada, determinar la cinética de disolución del metal precioso y su recuperación en solución tanto para el mineral original como para el mineral tostado previamente

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. Pesar 1 kg de mineral molido original.
2. Colocar el mineral molido en el reactor de agitación y adicionar la cantidad de agua necesaria para completar el porcentaje de sólidos requerido (25 – 40 %).

$$\% \text{ Sólidos} = \frac{\text{Peso de mineral}}{\text{Peso de mineral} + \text{Peso de agua}} \times 1000$$

3. Registrar el peso del recipiente con pulpa.
4. Determinar el pH inicial de la pulpa.

5. Ir adicionando la cal necesaria para tener un pH superior a 10,5. Registrar la cantidad de cal adicionada.
6. Dejar la pulpa en agitación por lo menos 30 minutos (aireación), hasta que el pH se estabilice, registrar el valor del pH de trabajo.
7. Adicionar la cantidad de cianuro de sodio necesaria, la concentración de cianuro de sodio utilizada generalmente es de 1 g/l. Esta concentración se mantendrá constante durante toda la experimentación.
8. Realizar controles periódicos de la concentración de cianuro (Ver 3.1), cal libre y pH. Adicionar la cantidad necesaria de cianuro de sodio para que la concentración inicial permanezca constante. Adicionar cal, si hay deficiencia de esta, o el pH desciende de 10,5. Tomar una muestra de 10 ml para análisis de cinética de oro. Reponer el volumen de solución manteniendo constante el peso de la pulpa.
9. El control de la cinética del proceso se realiza a los siguientes tiempos: 0,5; 1; 2; 4; 8 y 24 horas.
10. Una vez concluida la prueba, filtrar la pulpa en filtro a presión, de preferencia recoger la solución, determinar el volumen y tomar una

muestra para análisis de oro. Esta primera solución corresponde a la “solución fuerte” en el balance metalúrgico.

11. Lavar la torta, adicionando 1 litro de agua al filtro, y filtrándolo al vacío. Recoger la solución, determinar el volumen y tomar una muestra para análisis de oro. Esta solución corresponde a la “solución de lavado” en el balance metalúrgico.

12. Secar la torta, pesar y homogeneizar. Tomar una muestra por cuarteo para el análisis de oro en el relave, por ensayo al fuego. Con estos datos, se realiza el balance metalúrgico.

13. Realizar el mismo procedimiento descrito pero empleando el material calcinado.

3. CÁLCULOS

3.1 Determinación del contenido de cianuro libre

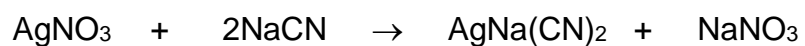
Se prepara una solución estándar de nitrato de plata (AgNO_3) disolviendo 4,33 g de AgNO_3 en agua destilada y completando a un litro.

Se toma una alícuota de la solución de cianuro, generalmente 25 ml. Se titula utilizando la solución estándar de nitrato de plata. El punto de final de titulación está indicado por la formación de una opacidad marcada

que enturbia el brillo y transparencia original de la solución, es preciso trabajar contra un fondo oscuro.

En ciertas ocasiones debido a la inexistencia de una total transparencia de la solución, es difícil detectar el punto de viraje. En este caso se utilizan 2 a 3 gotas de yoduro de potasio al 10 % como indicador. Aquí el punto de viraje se produce con el apareamiento de un precipitado amarillo debido a la formación de yoduro de plata.

La reacción que se produce en la titulación es:



169,87 g 98 g

4,33 g 2,5 g

(1000 ml)

1 ml 0,0025 g (0,0025 g / 25 ml = 0,1 g/l)

La estequiometria de la reacción anterior indica que 169,87 g de AgNO_3 consumen 98 g de NaCN . Para 1 litro (1000 ml) de solución de AgNO_3 donde existen 4,33 g de AgNO_3 que reaccionarán con 2,5 g de NaCN , por tanto se tiene que: 1 ml de solución titulante consumirá 0,0025

g de NaCN, cada mililitro de solución de nitrato de plata consumido equivale a una concentración de 0,1 g de NaCN/L.

Ejemplo: para una alícuota de 25 ml de solución de NaCN cuya concentración se quiere determinar, se consumen 3,2 ml de solución de nitrato de plata en la titulación, entonces se tiene:

$$[\text{NaCN}] = 3,2 \text{ (ml de solución titulante)} * 0,1 \text{ (gr NaCN/L)} / 1 \text{ (ml de solución titulante)}$$

$$= 0,32 \text{ (g NaCN/L)}$$

La solución de cianuro contiene 0,32 g NaCN/L

Es decir, cuando se toma una alícuota de 25 ml de muestra, la concentración de cianuro libre resultante es igual a la cantidad de nitrato de plata empleada en la titulación dividida para un factor igual a 10, así en el ejemplo anterior se tiene que se consumen 3,2 ml de solución de nitrato de plata, que dividido entre 10 da 0,32 que es la cantidad de cianuro libre presente en la muestra.

Si se toman distintas cantidades de muestra, cuya concentración de cianuro libre se quiere determinar, se deberá dividir para un factor diferente, en cada caso, el gasto de nitrato de plata para obtener directamente el valor de concentración de cianuro libre.

A continuación se presentan algunos factores para facilitar el cálculo:

Cantidad de muestra tomada (ml)	Factor de división
100	40
25	10
10	4
5	2

En los ensayos de cianuración que se realizan a nivel de laboratorio, generalmente se toma una alícuota de 5 ml de muestra, por tanto, el factor de división será igual a 2.

Ejemplo:

- Alícuota de solución cianurada clarificada = 5 ml,
- Gasto de AgNO_3 (4,33 g/l) empleado para titulación = 1,2 ml
- Concentración de cianuro libre de la muestra = $1,2 \text{ ml} / 2 = 0,6 \text{ g/l}$
- Si la concentración de cianuro libre de trabajo 1 g/l

Diferencia de concentración de cianuro libre = $(1 - 0,6) \text{ g/l} = 0,4 \text{ g/l}$

Cantidad de cianuro a adicionar = $0,4 \text{ g/l} * (\text{volumen de solución en l})$

Volumen de la solución = 2 litros

Peso de cianuro de sodio a adicionar = $0,4 \text{ g/L} * 2 \text{ L} = 0,8 \text{ g}$.

4. CONDICIONES DE OPERACIÓN

Para este ensayo se empleará:

Mineral: Mineral Aurífero refractario de la zona de San Gerardo

Peso del mineral = 1 kg.

Volumen de agua = 2 litros

Tiempo de aireación = 0,5 horas

pH = 10,5 – 11

Concentración de cianuro = 1 g/L

Tiempo de ensayo 24 horas.

Anexo 2. Procedimiento del método Chiddey para determinación de oro de soluciones cianuradas de la planta

1. OBJETIVOS

Este método es utilizado para determinar oro en los compósitos de las soluciones Rica y Barren provenientes de la planta Merrill Crowe que serán utilizadas para el balance metalúrgico del día o circuito de carbón activado.

2. ALCANCES

Este procedimiento se aplica a los operadores y jefe del área de Laboratorio Químico de Procesos.

3. DOCUMENTOS O NORMAS DE REFERENCIA

Manual de procedimientos de Laboratorio Químico.

4. RESPONSABILIDADES

Del Operador

- Seguir el procedimiento definido en el presente documento.
- Utilizar el equipo de seguridad apropiado para realizar el trabajo en forma eficiente y segura.

Del Supervisor o Jefe Inmediato

- Coordinar el trabajo a realizar con los operadores de Laboratorio Químico.
- Verificar que los operadores se encuentren utilizando su equipo de seguridad.

5. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

5.1. IMPLEMENTOS DE SEGURIDAD

- Guantes de látex
- Respirador contra gases
- Lentes de seguridad
- Guardapolvos o mameluco

5.2. EQUIPOS

- Vaso de 1000 ml.
- Pipeta volumétrica de 100 ml
- Probeta de 1000 ml
- Copelas N° 8
- Crisol de porcelana
- Tubo de ensayo
- Plancha
- Horno de copelación

- Bagueta de vidrio
- Microbalanza

5.3. NORMAS DE SEGURIDAD

- Tener conocimiento y comprensión de las hojas de información técnica de los reactivos (MSDS) como el ácido clorhídrico, cianuro de sodio, nitrato de plata, acetato de plomo y aluminio.
- Usar equipo de protección respiratorio cuando se pesa acetato de plomo.
- Uso obligatorio de lentes de seguridad, zapatos de seguridad, respiradores para ácidos, guantes de látex, mandil de laboratorio cuando se manipule los ácidos y soluciones cáusticas.
- Tener conocimiento y comprensión en la manipulación de materiales y equipos en el área de partición. Es imperativo que se realice este procedimiento debajo de campana extractora debido a la formación de gas HCN (venenoso) cuando acidifique la muestra.

5.4. PROCEDIMIENTO

PREPARACIÓN DE REACTIVOS

SOLUCIÓN DE ACETATO DE PLOMO AL 37 %

- Pesar 350 gr de acetato de plomo en un vaso de 2000 ml.
- Disolver con agua destilada, calentando y agitando en una plancha caliente.
- Después de disolver enrazar a 1000 ml.

SOLUCIÓN DE NITRATO DE PLATA

- Pesar 3,2616 gr de nitrato de plata en vaso.
- Disolver con agua destilada, luego traspasar a una fiola de 1000 ml, lavando el vaso, luego enrazar la fiola y agitar.
- Tomar un volumen de 100 ml. de solución rica utilizando una pipeta volumétrica o una fiola de 100 ml y 300 ml de solución barren con una probeta de 500 ml en un vaso de 1000 ml, adicionar agua de caño caliente hasta 500 ml.
- Adicionar 35 ml HCl, 35 ml de solución de acetato de plomo al 35 % y 1 ml de solución de nitrato de plata y homogenizar utilizando una bagueta de vidrio.

- Adicionar una plancha de aluminio de 5,08 cm x 5,08 cm y hervir por aproximadamente 1 hora hasta que la solución se encuentre cristalina y la esponja de plomo se desprenda de la plancha de aluminio.
- Remover la lámina de aluminio, y enjuagar con agua de caño.
- Decantar la solución y recolectar la esponja de plomo, exprimir la esponja para eliminar el agua.
- Colocar el plomo sobre una lámina de plomo de 7,62 cm x 10,16 cm.
- Poner a secar la esponja en una plancha caliente.
- Una vez que esté seca la esponja de plomo, cerrar la lámina de plomo de manera que se pueda colocar en la copela N° 8.
- Copelar a 1193,15K por una hora aproximadamente.
- Una vez copelado hacer la digestión; para la solución rica se realizará por gravimetría y para la solución Barren se digestarán para ser analizado por AA.

EXPRESIÓN DE RESULTADOS

DETERMINACIÓN DE AU DE LA SOLUCIÓN RICA

El análisis de oro termina en gravimetría

$$\text{Cálculo: Au ppm} = \frac{\text{vol 1000 ml}}{\text{vol de muestra}} * \text{peso botón}$$

$$\text{Ejemplo: } (1000/100) * 0,542 \text{ mg} = 10 * 0,542 = 5,42$$

DETERMINACIÓN DE Au DE LA SOLUCIÓN BARREN

El análisis de oro termina en Absorción Atómica.

$$\text{Cálculo: Au ppm} = \frac{\text{Vol de Digestión}}{\text{Vol de muestra}} * \text{Lectura Au ppm}$$

Ejemplo:

$$10/300 * 1,52 = 0,0506 \text{ ppm}$$

Anexo 3. Procedimiento de oro rápido en soluciones barren

1. POLITICA

Es política de toda minera realizar procedimientos de trabajo para que el empleado realice su trabajo en forma eficiente y segura.

2. OBJETIVOS

Determinar la concentración de oro en forma rápida en soluciones Barren.

3. ALCANCES

Este procedimiento se aplica a los operadores y jefe del área de Laboratorio Químico de Procesos.

4. DOCUMENTOS O NORMAS DE REFERENCIA

Manual de Procedimientos de Laboratorio Químico.

5. RESPONSABILIDADES

Del Operador

- Seguir el procedimiento definido en el presente documento.

- Utilizar el equipo de seguridad apropiado para realizar el trabajo en forma eficiente y segura.

Del Supervisor o Jefe Inmediato

- Coordinar el trabajo a realizar con los operadores de Laboratorio Químico.
- Verificar que los operadores se encuentren utilizando su equipo de seguridad.

6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

6.1. IMPLEMENTOS DE SEGURIDAD

- Equipo de protección personal básico
- Guantes de látex
- Respiradores contra gases
- Caretas

6.2. PROCEDIMIENTO

- Medir 500 ml de solución Barren en una botella de 1 litro.
- Añadir 20 ml de acetato de plomo al 20 %, 20 ml de NaCN al 10 % y agitar.
- Añadir aproximadamente 0,5 g de polvo de zinc cerrar la botella y agitar por 30 segundos.

- Invertir la botella en una cacerola de porcelana, permitir que la esponja de zinc sedimente y luego decantar la solución.

Anexo 4. Procedimiento de contenido de cal libre para el consumo de reactivos

1. POLITICA

Es política de Minera Barrick Misquichilca realizar procedimientos de trabajo para que el empleado realice su trabajo en forma eficiente y segura.

2. OBJETIVOS

Determinar el contenido de cal libre que se encuentra en la cal que se le agrega al mineral para efectos de cálculos de consumo de reactivos.

3. ALCANCES

Este procedimiento se aplica a los operadores y jefe del área de Laboratorio Químico de Procesos.

4. DOCUMENTOS O NORMAS DE REFERENCIA

Manual de Procedimientos de Laboratorio Químico.

5. RESPONSABILIDADES

Del Operador

- Seguir el procedimiento definido en el presente documento.
- Utilizar el equipo de seguridad apropiado para realizar el trabajo en forma eficiente y segura.

Del Supervisor o Jefe Inmediato

- Coordinar el trabajo a realizar con los operadores de Laboratorio Químico.
- Verificar que los operadores se encuentren utilizando su equipo de seguridad.

6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

6.1 IMPLEMENTOS DE SEGURIDAD

- Guantes descartables (quirúrgicos)
- Respiradores contra polvos y gases
- Guardapolvos
- Lentes de seguridad.

6.2 EQUIPOS

- Balanza con precisión de 0,1 mg
- Matraz, Erlenmeyer de 500 ml
- Equipo de filtración al vacío

- Bureta de 100 ml
- Agitador mecánico
- Bureta de 25 ml

6.3 PROCEDIMIENTO

MÉTODO

El hidróxido de calcio de la muestra se disuelve en una solución sacarosa y se titula con una solución de ácido clorhídrico usando fenolftaleína como indicador.

REACTIVOS

- HCl: Ácido clorhídrico p.a. Art. 317 Merck. E.I. 14A00005
- Azúcar
- Na_2CO_3
- Anaranjado de metilo
- Alcohol etílico: Alcohol etílico p.a. Art. 983 Merck
- Fenolftaleína

OPERACIÓN

- Pesar con una precisión de 0,1 mg, 0,5 g de muestra y transferir a matraz Erlenmeyer de 250 ml que contenga 20 ml de agua.
- Calentar a ebullición por 3 minutos.
- Adicionar 20 g de azúcar y 100 ml de agua caliente.

- Tapar herméticamente y agitar durante 5 minutos en agitador mecánico.
- Dejar en reposo durante 20 minutos.
- Filtrar al vacío con filtro Whatman 2.
- Lavar 6 veces con agua destilada caliente.
- En el matraz kitasato efectuar la titulación adicionando en forma rápida el HCl hasta cerca del punto final en presencia de 5 gotas de fenolftaleína. El punto final corresponde al vire de color a incoloro.