

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN EN COLUMNAS DE  
MINERALES DE PLATA EN BOTADEROS DE  
LA MINA DE PACUANI - BOLIVIA

**TESIS**

Presentada por:

**Bach. Bernardo Condori Limache**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO METALURGISTA**

TACNA - PERÚ

2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN EN COLUMNAS DE**

**MINERALES DE PLATA EN BOTADEROS DE LA**

**MINA DE PACUANI-BOLIVIA**

**TESIS**

Tesis sustentada el día 13 de Octubre de dos mil diecisiete por el Bachiller Bernardo Condori Limache, siendo el Jurado Calificador integrado por:

PRESIDENTE

  
.....  
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

SECRETARIO

  
.....  
Ing. Julián Nieto Quispe

VOCAL

  
.....  
Ing. Zoilo Edgardo Valdivia Infantas

ASESOR

  
.....  
Mgr. Raúl Del Pozo Tello

## **DEDICATORIA**

A Dios por haberme permitido llegar hasta este escalón en mi vida,  
a mis padres, Miguel y Rosa por su apoyo y paciencia incondicional en mi  
desarrollo profesional y por haberme dado la oportunidad de estudiar y  
ser alguien en la vida.

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Nacional de Jorge Basadre Grohmann y a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, por mi formación profesional. A todos mis maestros, ya que ellos me enseñaron a valorar los estudios y a superarme cada día. A mis padres, porque ellos estuvieron en los días más difíciles de mi vida como estudiante.

## CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Descripción del problema	2
1.1.1 Antecedentes del problema.	2
1.1.2 Problemática de la investigación.	2
1.2 Formulación del problema.	4
1.3 Justificación e importancia.	5
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivo general.	7
1.4.2 Objetivo específico.	7
1.5 Hipótesis	7

1.5.1	Objetivo general.	7
1.5.2	Hipótesis específico.	7
1.6	Variables	8
1.6.1	Variable Independiente “X”.	8
1.6.2	Variable Dependiente “Y”.	8
1.7	Operacionalización de variables	8
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO		9
2.1	Antecedentes del estudio	9
2.2	Bases teóricas	12
2.2.1	Lixiviación.	12
2.2.2	Química del cianuro.	13
2.2.3	Uso del cianuro en la producción de oro y plata.	14
2.2.4	Lixiviación con cianuro.	14
2.2.5	Lixiviación cianurante de minerales de Au y Ag.	15
2.2.6	Solubilidad del oro y plata en soluciones acuosas de cianuro.	16
2.2.7	Química del proceso.	18
2.2.8	Mecanismo de disolución.	19
2.2.9	Variables del proceso de cianuración.	21
2.2.10	Proceso merril crowe-recuperar Ag y Au.	26
2.2.11	Optimización del proceso de cianuración.	29

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	34
3.1 Diseño de investigación	34
3.2 Población y muestra de estudio	34
3.3 Técnicas e instrumentos para recolección de datos	35
3.4 Procedimiento y análisis de datos	35
3.4.1 Instrumentos y equipos.	36
3.4.2 Procedimiento experimental.	37
3.4.3 Muestreo y medición.	47
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1 Resultados	49
4.1.1 Resultado granulométrico del mineral.	49
4.1.2 Lixiviación en botella.	50
4.1.3 Resultados de extracción en columna a los 15 días de lixiviación.	53
4.2 Discusión	55
4.2.1 Lixiviación en botella.	55
4.2.2 Lixiviación en columna.	56
CONCLUSIONES	57
RECOMENDACIONES	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS	60

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Operacionalización de variables	8
Tabla 2. Minerales más comunes de oro y plata	19
Tabla 3. Composición química de los botaderos de Pacuani	34
Tabla 4. Parámetros de la lixiviación en botella	40
Tabla 5. Datos metalúrgicos	40
Tabla 6. Propiedades físicas del mineral de (Ag)	43
Tabla 7. Análisis granulométrico del mineral de desmonte	49
Tabla 8. Análisis granulométrico del mineral para las pruebas en columna 100 % menos malla 1"	50
Tabla 9 . Resumen: Lixiviación en botella	52
Tabla 10. Propiedades del mineral y los reactivos	53
Tabla 11. Resultados de extracción en columna a los 15 días de lixiviación	55



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Representación de la celda de corrosión local en una superficie de oro en contacto con una solución cianurada conteniendo oxígeno:	18
Figura 2. Diagrama Eh – pH para el sistema Ag – CN.	20
Figura 3. Mineral de desmonte de Pacuani retenido y pasante, Malla 1”	38
Figura 4. Parámetros de diseño.	41
Figura 5. Mineral de desmonte de Pacuani 100 % malla -1	45
Figura 6. Mineral de desmonte de Pacuani aglomerado y curado dentro de la columna	45
Figura 7. Columna de lixiviación	46
Figura 8. Recipiente para recibir soluciones cianuradas	47
Figura 9. Muestras de soluciones cianuradas	48
Figura 10. Disolución de la plata en soluciones cianuradas.	51
Figura 11. Disolución de la plata en soluciones cianuradas en botella.	55
Figura 12. Extracción de la plata en soluciones cianuradas en columna	56

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Página
Anexo 1. Informe de ensayo	60

## RESUMEN

Con la presente investigación se estudia la recuperación de la plata en columnas de lixiviación mediante el proceso de cianuración, basados en la baja ley de la plata en botaderos de la mina Pacuani. Para el procedimiento de la lixiviación en columna se debe tener en cuenta un buen aglomerado, ya que de ella dependerán los resultados finales, curado y la dosificación de reactivos. El objetivo de esta prueba extraer los metales valiosos por percolación y el tiempo óptimo de extracción de plata por días. La velocidad de disolución de la plata se incrementa de manera significativa durante las primeras 150 horas de lixiviación mediante el proceso de cianuración. Luego de este lapso la velocidad se hace constante. En el presente trabajo, la recuperación de plata es buena ya que aproximadamente un 70 % de este metal se recupera. Los botaderos o desmontes de Pacuani - La Paz, Bolivia, se encuentra ligeramente dócil a la cianuración, debido que gran parte de este mineral de plata se ha oxidado durante 40 años de permanecía sobre la superficie de la mina.

***Palabras clave: Lixiviación en columna***

## INTRODUCCIÓN

La hidrometalurgia es una rama de la metalurgia extractiva, la cual se basa en la extracción de metales desde sus minerales que los contienen, mediante métodos físico-químicos acuosos. El departamento de La Paz (Bolivia), es el segundo territorio del país que tiene mayor actividad minera, según muestra un estudio del Servicio Geológico y Técnico de Minas (Sergeotecmin) y la Corporación Minera de Bolivia (Comibol). Pero los botaderos no son aprovechados adecuadamente por su baja ley de diferentes minerales, como la plata (Ag); es por este motivo que amerita evaluar la recuperación de la plata en lixiviación en columnas mediante el proceso de cianuración. El proceso de lixiviación por cianuración permitirá recuperar plata (Ag) en los botaderos de la mina Pacuani, los niveles de dilución permiten conocer el rango de dilución de la plata (Ag) y la determinación de los parámetros de aglomeración permitirá un adecuado proceso de cianuración del mineral de plata. Para la obtención de la plata a partir de minerales dispuestos en botaderos no requiere tecnología sofisticada o de punta, existen tecnologías que permitirán extraer la plata en forma eficiente y segura.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1 Descripción del problema**

##### **1.1.1 Antecedentes del problema.**

El país de Bolivia tiene muchos botaderos de mineral de plata de baja ley, y no son explotados en diferentes lugares de Bolivia, no solo por cantidad, sino también por la gran variedad de recursos mineros, lo que permite a las empresas compensar con otro producto cuando exista baja de precio en un determinado metal. Debido a que a lo largo y ancho del país existe mucha actividad que se dedica a la pequeña y mediana minería, que en muchos casos procesa su mineral en plantas convencionales propios de la zona o realizan procesos no adecuados obteniéndose bajas recuperaciones en oro y plata, no resulta rentable el proceso de extracción. Por lo cual, varios botaderos mineros se encuentran abandonados y desaprovechamos estos recursos minerales. El departamento de La Paz (Bolivia), es el segundo territorio del país que tiene mayor actividad minera, según muestra un estudio del Servicio Geológico y Técnico de Minas (Sergeotecmin) y la Corporación Minera de Bolivia (Comibol). Pero los botaderos no son aprovechados por su baja ley.

### **1.1.2 Problemática de la investigación.**

La plata es el elemento que acompaña con frecuencia a la mineralogía del oro; el arsénico, antimonio, bismuto, hierro, plomo y cinc están generalmente asociados. Los filones que contienen oro, sometidos a la acción del tiempo y meteorizados, liberan el oro que, o bien quedan en el manto del suelo, arenas eluviales o es arrastrado a los arroyos vecinos para formar placeres.

La mayor parte de la plata y el oro está concentrada en la mena estratiforme masiva compuesta de pirita y calcopirita con valores máximos de 162 g/t Ag y 8,25 g/t Au. La distribución del oro es errática. Correlaciones claras con los otros metales se observan solamente en la mena primaria.

Actualmente, La Paz cuenta con una serie de prospectos y proyectos mineros y la explotación de las minas Corocoro, Matilde, Bolsa Negra, Cascabel, Milluni, Rosario de Araca, Los Machos, Caracato, Pacuani-Laurani, Chacarilla y Colquiri, entre otras. Al tratar botaderos da ciertas ventajas respecto a los minerales que involucran desarrollo y exploración de minas como:

- Menor costo de procesamiento, ya que el mineral valioso se encuentra en gran porcentaje liberado, dando como consecuencia la eliminación de la etapa de exploración, chancado y molienda.
- Menor costo de extracción como el acarreo de mineral.
- La mayor demanda de gasto es en la planta de procesamiento.

## **1.2 Formulación del problema**

Con la presente investigación se estudia la recuperación de la plata en columnas de lixiviación mediante el proceso de cianuración, basados en la baja ley de la plata en botaderos de la mina Pacuani. La formulación del problema está referido a la investigación metalúrgica, en base a minimizar los costos de producción de tratamiento de minerales de botaderos. La velocidad de disolución de mineral de plata de baja ley y la preparación de la aglomeración de los finos permitiendo elevar la resistencia del material mientras se mantiene una buena permeabilidad del lecho mineral con el fin de alcanzar alturas si se considera la lixiviación en pilas

La investigación debe dar respuestas a las siguientes interrogantes:

**¿De qué manera mejorar la recuperación de la plata en columnas de lixiviación mediante el proceso de cianuración?**

**¿Qué cuidados se debe tener en cuenta para conseguir resultados satisfactorios?**

### **1.3 Justificación e importancia**

Este proyecto se justifica en los siguientes puntos:

- **Justificación técnica**

Para la obtención de la plata a partir de minerales dispuestos en botaderos no requiere tecnología sofisticada o de punta, existen tecnologías que permiten extraer la plata en forma eficiente y segura. Se aplican operaciones y procesos químicos convencionales a condiciones ambientales de la zona de Pacuani.

La tecnología a utilizarse servirá de base para un futuro estudio de pre-factibilidad y factibilidad económica y técnica.



- **Justificación económica**

El mineral acumulado durante varios años en zona, contiene valor económico, debido a la presencia de plata y oro. La plata tiene importancia económica debido a múltiples aplicaciones en el campo industrial y el resto se utiliza para joyería e inversión. Además, por su gran potencialidad de reserva de mineral, ofrece ventajas económicas para su explotación.

- **Justificación social**

La presencia de miles de toneladas de mineral acumulado durante de más de 20 años en la zona de Pacuani contribuye al desarrollo económico y social, generando fuentes de trabajo para los pobladores que habitan en lugares más inhóspitas del país. Habrá más capacidad de producción, lo que permite una mejoría en las condiciones laborales y aspectos de seguridad en la mina; además de requerir más personal por lo que activaría económicamente a los pueblos de la región. Al tratarse el mineral de plata o desmontes de mina que son considerados un material estéril o mineral de baja ley (con una ley de mineral que se encuentra por debajo del nivel económico que hoy es tratable) contribuirá en el desarrollo industrial de la zona.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

- Evaluar la recuperación de la plata en columnas de lixiviación mediante el proceso de cianuración.

### **1.4.2 Objetivo específico**

- Evaluar los valores de dilución rica a través de los niveles de percolación.
- Determinar los parámetros del proceso de aglomeración para su posterior cianuración.

## **1.5 Hipótesis**

### **1.5.1 Hipótesis general.**

- El proceso de lixiviación por cianuración permitirá recuperar Plata (Ag) en los botaderos de la mina Pacuani.

### **1.5.2 Hipótesis específico.**

- Los niveles de dilución permiten conocer el rango de dilución de la plata (Ag).
- La determinación de los parámetros de aglomeración permitirá un adecuado proceso de cianuración del mineral de plata.

## 1.6 Variables

### 1.6.1 Variable Independiente “X”.

- X: Cianuración de minerales de plata de botaderos de la mina Pacuani –Bolivia.

### 1.6.2 Variable Dependiente “Y”.

- Y: Recuperación de la plata (Ag)

## 1.7 Operacionalización de variables

Tabla 1.

Operacionalización de variables.

<b>Variables</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Dependiente:</b> Recuperación de la plata (Ag).	<ul style="list-style-type: none"><li>•% de plata en la dilución de la solución cianurada</li><li>•% de plata después del proceso</li></ul>
<b>Independiente:</b> Cianuración de minerales de plata de botaderos de la mina Pacuani –Bolivia	<ul style="list-style-type: none"><li>•% de cianuro en la solución</li><li>•% Concentración de plata</li><li>•Tamaño de partícula en micrones</li></ul>

Fuente: Elaboración propia.

## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTO TEÓRICO**

#### **2.1 Antecedentes del estudio**

La metalurgia extractiva es la rama de la ingeniería que involucra las operaciones asociadas al beneficio, concentración y extracción de metales y/o compuestos, aplicando las leyes de la mecánica y la termodinámica a las operaciones de reducción de tamaño, separación sólido/sólido, sólido/líquido. En general, la metalurgia extractiva se define como el arte de extracción mediante métodos físico - químicos; cuando estos métodos se desarrollan en medio acuoso, se define como hidrometalurgia; cuando se desarrollan a altas temperaturas, tenemos a la pirometalurgia y, por último la electrometalurgia, corresponde a los métodos electrolíticos; aunque esta última se ubica generalmente integrada con la hidro y piro – metalurgia. La hidrometalurgia es una rama de la metalurgia extractiva la cual se basa en la extracción de metales desde sus minerales que los contienen, mediante métodos físico-químicos acuosos. Son necesarias en todo proceso hidrometalúrgico. Donde se distinguen 3 etapas físico-químicas distintivas y secuenciales:

- Una etapa de disolución selectiva del metal desde los sólidos que lo contienen mediante una solución acuosa.
- Una etapa de procesamiento y transformación del metal disueltos en el medio acuoso de lixiviación mediante agentes externos que permiten la purificación y/o concentración de estos metales. (métodos merril crown, carbón activado, etc.).
- Una etapa de recuperación selectiva de los valores metálicos disueltos en el medio acuoso en la forma de un producto final sólido.

En la lixiviación intervienen además del material sólido de origen, un agente lixivante (disolvente NaCN) que normalmente está disuelta en la solución acuosa y un agente externo que actúa como oxidante o reductor y participa en la disolución del metal de interés mediante un cambio en los potenciales de óxido-reducción (potencial redox), de la solución lixivante.

La lixiviación también puede realizarse con participación de presiones altas o bajas, temperaturas inferiores o superiores a las del ambiente; manteniendo el único requisito de desarrollarse en medio acuoso.

La extracción de plata y oro es un conjunto de etapas las cuales tienen diferente velocidad. Por lo tanto, el tiempo en el cual se lleva a efecto la reacción de extracción de plata y oro, estará controlada por la etapa de menor velocidad (llamada entonces etapa o fase controlante), es importante identificarla para incrementar su rapidez. La reacción de lixiviación de plata es una reacción físico-química en la cual se hallan involucradas una fase sólida y otra líquida.

Lixiviación en botaderos se aplica al mineral estéril que debido a su baja ley, no clasifica para pasar a planta de beneficio; sin embargo, es llevado a superficie después de haber sido minado; también se aplica a las colas de procesos antiguos. El material es cargado por buldózer o camiones formando capas de 5 o 10 metros de alto, después de ser lixiviada se desgarran o "ripean", empleando un buldózer, antes de colocar una nueva capa de mineral. La solución se riega sobre la superficie usando aspersores o goteos en movimiento, esto depende del lugar en donde se realice la lixiviación pues se deben considerar parámetros tales como la disponibilidad de líquido (agua) y de la altura sobre el nivel del mar para controlar la evaporación. El terreno para realizar la lixiviación debe ser

preparado con el fin de poder coleccionar las soluciones lixiviadas con el mínimo de pérdidas. Normalmente se prepara empleando membranas plásticas de baja o media densidad o bien emplear protección de PVC, este tipo de material es similar a los materiales empleados para el manejo y control de residuos sólidos, por los ingenieros ambientales. El tiempo del proceso es largo puede tomar más de un año y la mayor eficiencia reportada solo alcanza el 40 o 60 % de extracción; sin embargo, esto se ve compensado por los bajos costos de operación.

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Lixiviación.**

Hoy la palabra lixiviación se usa para describir el proceso mediante el cual se lava una sustancia con el objetivo de extraer de ella las partes que resulten solubles. Es así, que en minería el término lixiviación se define como un proceso hidro-metalúrgico. Esto significa que, con la ayuda del agua como medio de transporte, se usan químicos específicos para separar los minerales valiosos (y solubles en dichos líquidos) de los no valiosos. Este proceso permite trabajar yacimientos que suelen ser calificados de baja ley (y por tanto de más alto costo de producción por tonelada) siempre que la

operación minera involucre una actividad a gran escala. Es decir, que la lixiviación es un proceso de recuperación que hará económico un proyecto conforme se trabajen mayores volúmenes de material.

### **2.2.2 Química del cianuro.**

El término cianuro se refiere a muchos compuestos químicos, ya sean naturales o de laboratorio. Estos compuestos siempre tienen un átomo de carbono y uno de nitrógeno. El cianuro se presta a formar mezclas con la mayoría de los principales metales para formar compuestos o complejos químicos, por lo que es de gran utilidad para la extracción de metales de una mena. El cianuro también tiende a reaccionar químicamente con la mayoría de otros elementos químicos, produciendo una gran variedad de compuestos tóxicos y no tóxicos. Además, el cianuro (que contiene carbono, lo que significa que es un compuesto orgánico) reacciona fácilmente con otros compuestos orgánicos, inclusive organismos vivos. A diferencia del mercurio y otros metales, el cianuro en su forma pura no se acumula en la cadena alimenticia. La luz del sol, los ambientes con pH neutral y los microorganismos del suelo causan la desintegración rápida del cianuro en partículas no tóxicas. Pero es probable que esta desintegración se vea disminuida cuando no hay



suficientes microorganismos que contribuyan a este proceso o en aguas subterráneas, o bajo capas de hielo, en donde el cianuro no está expuesto a la luz solar.

### **2.2.3 Uso del cianuro en la producción de oro y plata.**

Una de las razones para el alto valor adjudicado al oro y plata es su resistencia al ataque de la mayoría de los químicos. Una excepción es el cianuro o, más específicamente, una solución que contiene cianuro y que disuelve el metal precioso. El cianuro se utiliza en minería para extraer oro y plata del mineral, en particular mineral de baja ley.

### **2.2.4 Lixiviación con cianuro.**

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico, el cual consiste en la obtención de diversos metales que se encuentra en minerales oxidados, en este caso será en búsqueda de la obtención de los metales preciosos oro y plata. Dichos metales preciosos se separan a través de la aplicación de una solución de cianuro de sodio. La reacción química primordial en la lixiviación del oro y plata es la disolución de los mismos en la solución acuosa. Para esto es necesario de un compuesto que sea disolvente y oxidante para

obtener una tasa de lixiviación aceptable. El cianuro de sodio es utilizado debido a su relativamente bajo costo, su gran efectividad para disolver oro y plata, y su selectividad hacia los mismos por sobre otros metales. El agente oxidante más comúnmente utilizado en la lixiviación de oro y plata con cianuro es el oxígeno disuelto en la solución, el cual proviene del aire, provisionando a esta técnica mayor atractivo al momento de decidirse por un proceso económico. El mineral que se extrae de la mina a tajo abierto es fragmentado mediante las quebradoras primaria, secundaria y terciaria respectivamente y cuyo objetivo es obtener un material mineralizado de un tamaño de menos un cuarto de pulgada.

#### **2.2.5 Lixiviación cianurante de minerales de Au y Ag.**

El oro y la plata se disuelven fácilmente en soluciones diluidas del ion cianuro, lo cual era conocido desde por lo menos 200 años, aunque el fundamento de este ataque ha permanecido sin aclarar hasta hace relativamente poco tiempo. Por ejemplo: no se sabía por qué los metales nobles se lixivaban sin dificultad en cianuro diluido y por qué las velocidades de lixiviación eran dependientes de la concentración del lixivante, pero solo hasta una determinada concentración crítica. Esto puede incorporar las operaciones típicas

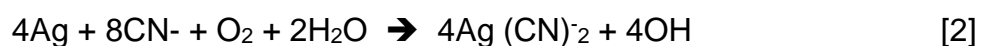
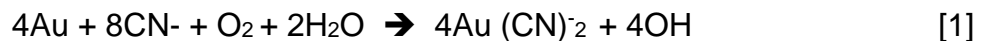
de trituración y molienda, sin embargo, necesita minimizar la producción de finos antes de la etapa de concentración gravimétrica. No se necesita que la partícula del mineral sea liberada completamente, sólo se necesita un grado de liberación suficiente que permita obtener un concentrado bueno o una lixiviación adecuada.

#### **2.2.6 Solubilidad del oro y plata en soluciones acuosas de cianuro.**

Se han propuesto varias teorías para explicar el mecanismo de la disolución de oro y plata en solución acuosa de cianuro. Entre ellas están las siguientes:

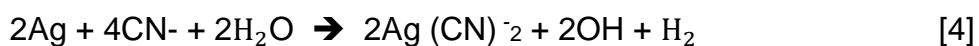
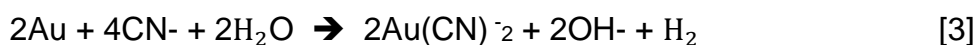
- **Teoría del oxígeno.**

Propuesta en 1846 por Elsner, determinó que el oxígeno era vital para la disolución del oro en soluciones de cianuro. La reacción es la siguiente: (Elsner 1846)



- **Teoría del hidrógeno.**

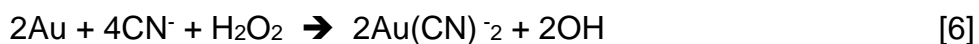
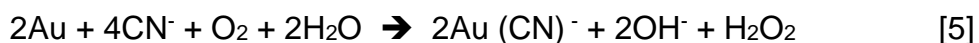
Propuesta entre 1888 y 1892 por Janin. Sugirió que la disolución de estos metales tienen lugar no con reducción del oxígeno, sino con desprendimiento de hidrógeno. La reacción es la siguiente: (Janin 1888 y 1892)



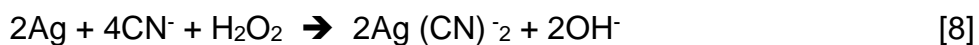
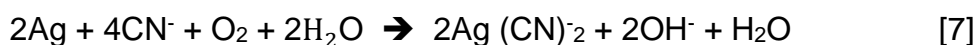
- **Teoría del peróxido de hidrógeno.**

La confirmación y justificación de la reacción [1] se produjo más tarde de la mano de Bodlander quien señaló que transcurre en dos partes, tanto para el oro como para la plata: la reacción es la siguiente: (Bodlander 1896)

Para el oro (Au).



Para la plata (Ag).



### 2.2.7 Química del proceso.

Detrás de todas estas reacciones hay un mecanismo electroquímico de disolución con las correspondientes etapas de oxidación (anódica) y de reducción (catódica):

Reacción anódica:



Reacción catódica:

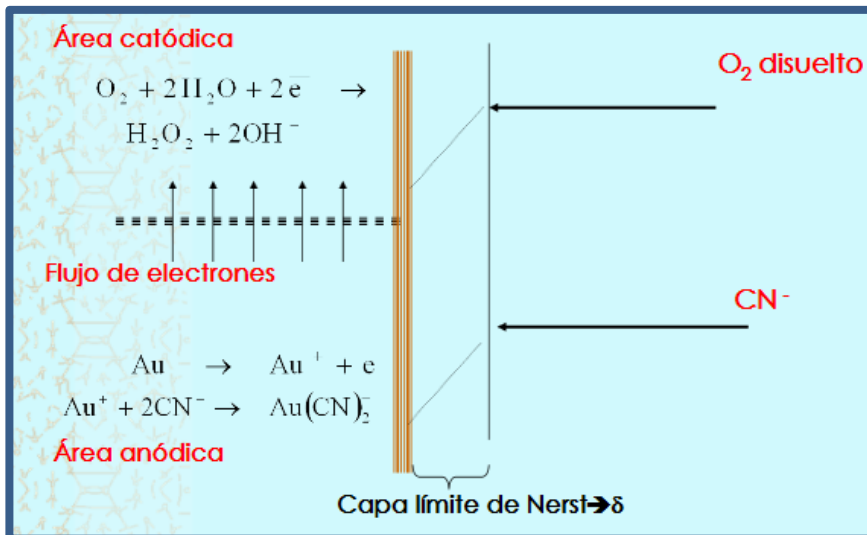
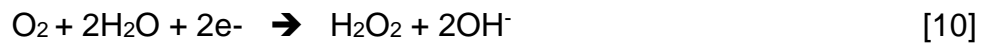


Figura 1. Representación de la celda de corrosión local en una superficie de oro en contacto con una solución cianurada conteniendo oxígeno:

Fuente: Walther Hermann Nernst.

### 2.2.8 Mecanismo de disolución.

Este metal noble (se llama noble, por su poca afinidad para reaccionar), tiene pocos solventes para su disolución verdadera. Estos sistemas contienen usualmente un agente oxidante y reductor en solución. El cianuro es capaz de formar un complejo termodinámicamente favorable con la plata. En el caso de cianuración, el oxidante es oxígeno y el agente complejo es cianuro, Los minerales más comunes de oro y plata son los siguientes:

Tabla 2.

Minerales más comunes de oro y plata.

Elemento	Mineral	Formula
Au	Nativo	Au
	Electrum	Au, Ag
	Calaverita	AuTe <sub>2</sub>
	Petzita	Ag <sub>3</sub> AuTe <sub>2</sub>
	Sylvanita	(Au,Ag)Te <sub>4</sub>
	Auroestibina	AuSb <sub>2</sub>
Elemento	Mineral	Formula
Ag	Nativo	Ag
	Argentita	Ag <sub>2</sub> S
	Pirargirita	Ag <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub>
	Cerargirita	AgCl
	Proustita	Ag <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub>
	Polibasita	(Ag, Cu) <sub>16</sub> Sb <sub>2</sub> S <sub>11</sub>

Fuente: CORNELIUS Klein. & CORNELUIS Hurlbt. (1996).

Como se puede observar el oro y la plata se presentan en pocos minerales comunes, siendo el estado nativo o metálico, el más importante y esto se debe a la alta estabilidad química de estos elementos en nuestro medio ambiente. En algunos casos se encuentran asociados a minerales sulfurados tales como: Pirita, Arsenopirita, galena, blenda, etc.

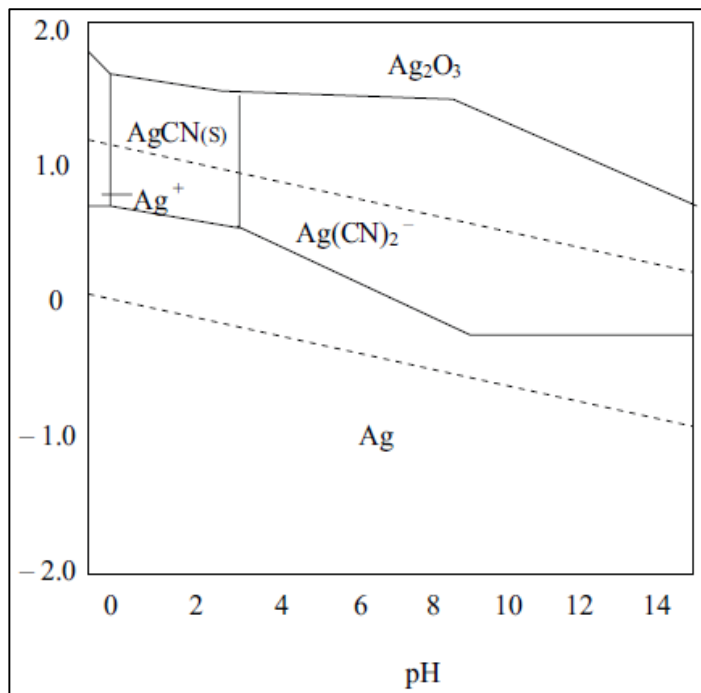


Figura 2. Diagrama Eh – pH para el sistema Ag – CN – H<sub>2</sub>O a 19,625 0 grados K (25 °C). Concentración de todas las especies de plata solubles = 10<sup>-4</sup> M, [CN<sup>-</sup>] = 10<sup>-3</sup> M, P<sub>(O<sub>2</sub>)</sub> = 1 atm 1 atm<sup>[25]</sup>.

Fuente: (Xue & Osseo-Asare, 1985).

Bajo las condiciones típicamente aplicadas para la disolución de plata óptima, la proporción de disolución de plata es significativamente más lenta que oro, por ejemplo, a una concentración de cianuro de 0,002 5 M NaCN y de aire para proporcionar oxígeno, la disolución de plata es aproximadamente la mitad que para el oro.

Por consiguiente, menas que contienen una cantidad significativa de plata pueden emplear las concentraciones de cianuro elevado para mejorar la extracción de plata, y para superar cualquier retardo por la competencia para el cianuro.

### **2.2.9 Variables del proceso de Cianuración.**

#### **a. Efecto de la concentración del cianuro.**

La velocidad de disolución de la plata aumenta rápidamente siguiendo un comportamiento casi lineal con el aumento de la concentración del cianuro, hasta que se alcanza un máximo. Más allá de este valor al aumentar la concentración del cianuro, ya no aumenta la cantidad de plata disuelto; mas por el contrario tiene un leve efecto retardador y aumenta el consumo. La concentración del cianuro disminuye debido al aumento del pH de la solución, es decir,



el ion cianuro es sometido a hidrólisis. En las condiciones ordinarias de trabajo las soluciones no están saturadas de oxígeno; por consiguiente la potencia disolvente del cianuro puede resultar disminuida, y reducir la velocidad del ataque del plata. En conclusión:

**Conclusiones:**

- Una alta concentración de oxígeno en la solución incrementa la disolución de la plata con incremento en la concentración de cianuro.
- Una alta concentración de cianuro incrementará la reacción con el incremento de la concentración de oxígeno.
- El ratio de disolución de plata dependerá del área de la superficie total expuesta en la solución.
- Se incrementará el ratio de disolución de plata como la velocidad de remoción.

**b. Efecto de la temperatura.**

Cuando se aplica calor a una solución de cianuro que contiene oro o plata metálico, dos factores opuestos influyen en la velocidad de disolución. El aumento de la temperatura agiliza la actividad de la solución y consiguientemente acelera la velocidad de disolución del

oro y la plata. Al mismo tiempo, la cantidad de oxígeno en la solución disminuye porque la solubilidad de los gases decrece con el aumento de la temperatura. Adicionalmente, otras de las desventajas del incremento de temperatura son: el costo de calentamiento, el aumento de la descomposición del cianuro debido al calor y el consumo excesivo de cianuro a causa de la reacción acelerada entre los cianicidas (sulfuros de Fe, Cu, etc.) de la mena y el cianuro.

**c. Efecto del tiempo de cianuración.**

Es muy variable y depende de factores tales como:

- La composición mineralógica
- El tamaño de las partículas de plata
- El grado de liberación
- Porosidad de la mena
- Concentración de cianuro en la solución
- La temperatura del medio ambiente

**d. Efecto de la alcalinidad.**

Una alta alcalinidad, disminuye la velocidad de disolución en forma lineal en el rango de pH entre 11 y 13. La alcalinidad de la

solución de cianuro debe controlarse con mucho cuidado, con el objeto de alcanzar velocidades altas de disolución de oro y plata.

Las funciones del hidróxido de calcio (incremento de pH), en la cianuración son las siguientes:

- Evitar pérdidas de cianuro por hidrólisis.
- Prevenir pérdidas de cianuro por la acción del anhídrido carbónico del aire.
- Neutralizar los componentes ácidos tales como sales ferrosas, férricas y el sulfato de magnesio.
- Descomponer los bicarbonatos del agua antes de su uso en la cianuración.
- Neutralizar los constituyentes de la mena.
- Facilitar el asentamiento de las partículas finas de modo que puedan separarse, la solución rica clara de la mena cianurada.

En la práctica se usa soda cáustica o cal, pero por su bajo costo se prefiere la cal para neutralizar la acidez de la mena y contrarrestar los efectos dañinos de los cianicidas. La acción de la cal en la neutralización de los productos de descomposición

**e. Efecto del oxígeno en la solución.**

El uso de oxígeno es como agente oxidante y es esencial para la disolución del oro y plata bajo condiciones normales de cianuración. Los agentes oxidantes, tales como el permanganato de potasio, peróxido de sodio, bromo y cloro fueron usados en el pasado con relativo éxito pero debido al costo de estos reactivos y las complicaciones que su uso implicaba, actualmente ya no se utilizan. El oxígeno se une al hidrógeno que podría ser liberado y disminuye las pérdidas de cianuro en la forma de ácido cianhídrico gaseoso. La proporción de la disolución del oro en el cianuro crece con la cantidad de oxígeno presente. De aquí la necesidad de airear las soluciones.

**f. Efectos del ácido cianhídrico (HCN) sobre el organismo humano.**

El ácido cianhídrico (HCN) puede entrar al cuerpo a través de los pulmones por inhalación de aire contaminado, también puede ser absorbido del tracto gastrointestinal, cuando se ha tragado en estado líquido y puede ser absorbido a través de la piel sana, ya sea en fase líquida o gaseosa. Por cualquier ruta que haya entrado al organismo, el cianuro ejerce su acción tóxica con extrema rapidez.

La exposición a concentraciones pequeñas puede producir síntomas tales como dolor de cabeza, fatiga, desvanecimiento, pérdida de apetito y náuseas.

#### **2.2.10 Proceso merrill crowe-recuperar Ag y Au.**

En la lixiviación con NaCN las soluciones ricas (pregnant, preñadas) provenientes de las pilas de lixiviación con contenidos de oro, plata y mercurio son procesados en la planta merrill-crowe. La reacción de dilución que tiene lugar durante la lixiviación de estos elementos con soluciones de NaCN, son de tipo electroquímico: El O<sub>2</sub> que actúa como oxidante está presente en la lixiviación sin costo, pero cinéticamente no es muy favorable dada su baja solubilidad y consumos laterales, controlando la velocidad de disolución.

##### **a. Cementación con zinc.**

El método se caracterizaba por:

- Utilizar trozos de zinc (virutas, placas, etc.)
- Contacto en bateas o cajones.
- Alto consumo de zinc, 10 kg de zinc /1 kg de Au.
- Dificultad para cosechar y remover el oro adherido al zinc.
- Rendimientos medianos.

Alrededor de 26 años, se lograron mejoras y avances en el proceso que permitieron resultados metalúrgicos y económicos muy superiores. Entre las innovaciones introducidas resaltan las siguientes:

- Dosificación de sales solubles de plomo para inhibir la pasivación del zinc.
- Uso de polvo de zinc, para acelerar la velocidad del proceso.
- Aplicaciones de filtros prensas para colectar los cementos y agotar el zinc.
- Desaireación de las soluciones a menos de 1 ppm de oxígeno, para reducir el consumo del zinc (torre crowe).

El aporte de merrill y crowe dio origen al proceso actual de cementación con Zn en polvo conocido como proceso merrill crowe, que consiste en las siguientes etapas:

- Clarificación de la solución rica en oro y plata
- Desoxigenación de la solución
- Adición de polvo de zinc a la solución rica (y sales de plomo)
- Recuperación de precipitado Zn/AU-Ag por filtración

La fuerza inductora suficiente para la precipitación del metal contenido en una solución se encuentra expresada cualitativamente por la siguiente ecuación. (Nernst 1889)

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{n} \cdot \ln \left( \frac{M^{\circ}}{M^{+}} \right) \quad (1)$$

Donde:

R = Constante de los gases = 8,314 joules / K \* mol

T = Temperatura absoluta (escala K)

E° = Potencial estándar de reducción (referido al hidrogeno)

De esta ecuación se puede deducir fácilmente que la tendencia de los cationes M<sup>+</sup> a ser reducidos a M<sup>0</sup> dependen de su potencial, mientras mayor sea esta mayor, será la posibilidad de precipitar el metal. Al contrario, con un menor potencial E mayor será la tendencia a encontrarse los cationes M<sup>+</sup> en solución. Potenciales estándares principales para los elementos que intervienen en una precipitación.

E° Au = 1,730 voltios. E°

Ag = 0,792 voltios.

**b. Pasivación del zinc.**

La pasivación de la superficie anódica activa del zinc, provoca una menor velocidad de reacción y en el caso extremo cesa totalmente la precipitación. La pasivación se presenta debido al aislamiento de la superficie del zinc como consecuencia del recubrimiento de:

- Capa densa y compacta de metales precipitados.
- Recubrimiento con ZnS
- Recubrimientos con lamas, geles y durezas.

**2.2.11 Optimización del proceso de cianuración.**

Los cambios constantes en el mercado de metales, la fluctuación en el precio del oro y la complejidad mineralógica de los minerales, deben mantener en expectativa a los metalurgistas, a fin de desarrollar nuevas tecnologías u optimizar las existentes. En el tratamiento de minerales auríferos no se puede plantear condiciones estándares de operación para su beneficio. Es necesario realizar pruebas de laboratorio con el mineral problema, evaluar la posibilidad de efectuar pre-tratamiento y la adición de reactivos químicos. Una evaluación económica deberá definir el mayor beneficio debido a la disolución versus el mayor costo que implica la adición del reactivo.



Con respecto al punto anterior, en el caso de decidir el empleo de algún reactivo químico adicional durante la cianuración, se deberá estudiar el efecto del mismo sobre el proceso siguiente, observando la aparición de reacciones colaterales. Una correcta decisión de aplicar reactivos químicos en la cianuración estará basada en un profundo conocimiento de la materia prima, por lo que es recomendable, recurrir a la asistencia de un mineralogista.

**a. Efecto de pirrotita en la cianuración.**

La pirrotita es cianicida (aunque en menor grado que cualquier mineral de cobre) y consume el oxígeno necesario para la disolución del oro; además, los productos ácidos que se forman contribuyen a un mayor consumo de cianuro, lo cual no siempre puede prevenirse con un incremento en la alcalinidad de la solución, pues los agentes utilizados para este fin (cal o soda). El hidróxido férrico es insoluble y no consume cianuro, pero la oxidación de ferroso a férrico consume el oxígeno de la solución, indispensable para la disolución del oro.

**b. Precipitación de mercurio con sulfuro de calcio.**

En varias minas del sur se practica la cianuración de relaves de amalgamación, material que se obtiene como subproducto de las operaciones mineras y de beneficio de pequeños mineros. Los relaves de amalgamación, en promedio contienen 12-18 g Au/t y 500-1000 ppm de mercurio, son sometidos a procesos de cianuración siguiendo diversos esquemas de tratamiento. En la cianuración, el mercurio es acelerante del proceso y se disuelve junto con el oro, pasando luego al circuito de recuperación con los problemas. Para minimizar el efecto del mercurio en el circuito de recuperación, consiste en reducir su solubilidad empleando sulfuro de calcio como reactivo precipitante.

**c. Empleo de litargirio.**

La descomposición de los sulfuros de hierro en soluciones acuosas alcalinas ha sido objeto de amplia investigación; el mecanismo no es muy claro pero aparentemente se libera el ión  $S^{2-}$ . En la práctica, la pirita en contacto con el agua y en presencia del oxígeno del aire se oxida produciendo sales ácidas (sulfatos, sulfitos, tiosulfatos) que disminuyen el pH de la solución. Una alternativa para contrarrestar el efecto negativo de los sulfuros de fierro consiste en

añadir litargirio (PbO) para acelerar la disolución de oro; adiciones de hasta 0,25 kg/t son usuales, existiendo la ventaja de disminuir también el consumo de reactivos. La efectividad de este reactivo es limitada.

**d. Empleo de sales de talio.**

El efecto positivo de la presencia del ión talio ( $Ta^+$ ) para eliminar la pasivación durante la disolución del Plata, permitiendo incrementar la velocidad de cianuración. Los estudios sólo han sido probados hasta el nivel de soluciones sintéticas. Los cambios constantes en el mercado de metales, la fluctuación en el precio del oro y la complejidad mineralógica de los minerales deben mantener en expectativa a los metalurgistas, a fin de desarrollar nuevas tecnologías u optimizar las existentes. En el tratamiento de minerales de plata no se puede plantear condiciones estándares de operación para su beneficio. Es necesario realizar pruebas de laboratorio con el mineral problema, evaluar la posibilidad de efectuar pre-tratamiento y la adición de reactivos químicos. Una evaluación económica deberá definir el mayor beneficio debido a la disolución versus el mayor costo que implica la adición del reactivo.

Con respecto al punto anterior, en el caso de decidir el empleo de algún reactivo químico adicional durante la cianuración, se deberá estudiar el efecto del mismo sobre el proceso siguiente, observando la aparición de reacciones colaterales. Una correcta decisión de aplicar reactivos químicos en la cianuración estará basada en un profundo conocimiento de la materia prima. Por lo que es recomendable, en todos los casos, recurrir a la asistencia de un mineralogista experimentado. Las reacciones que tienen lugar durante la disolución del oro en las soluciones de cianuro, bajo condiciones normales, han sido establecidas en forma suficientemente definidas

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Diseño de investigación

Se realizará la parte aplicada experimental y desarrollo del presente trabajo, mediante los pasos:

- Recolección de datos
- Análisis de datos

#### 3.2 Población y muestra de estudio

En este caso la población y muestreo de estudio se va realizar de acuerdo a la composición química de los botaderos de Pacuani.

Tabla 3.

Composición química de los botaderos de Pacuani.

Botadero	Au	Ag	SiO <sub>2</sub>	S	Pb	Ba	Fe	Zn	Cu	Otros
	g/t	g/t	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
B1	0,14	179	39,7	5,20	6,20	2,80	21,30	0,10	6,60	18,10

Fuente: Empresa Minera Solitario S.A. (2015)

La composición química promedio aparece reportada en la Tabla No.3. El análisis químico se realizó en los laboratorios de análisis químico de la “Empresa Minera Solitario S.A. EL contenido de las impurezas en general, fue alto en los cuatro depósitos.

### **3.3 Técnicas e instrumentos para recolección de datos**

Se obtendrán datos de la investigación de composición química de los botaderos de Pacuani en los últimos años.

### **3.4 Procedimiento y análisis de datos**

El presente trabajo de investigación se realizó en la planta de tratamientos de minerales de la “empresa minera Solitario S.A.” “Viacha - La Paz Bolivia. El objetivo principal de estudio de investigación es evaluar la recuperación de la plata en columnas de lixiviación mediante el proceso de cianuración. El presente capítulo describe las pruebas experimentales y opciones de nuevas alternativas de procesamiento y aplicación de la teoría en la práctica. Se tomaron 300 kilos de muestras de la cancha de gruesos, este mineral fueron transportados de los desmontes acumulados durante más de 50 años en zona de Pacuani. El mineral expuesto a la

intemperie por décadas de años presenta una zona de oxidación aproximada del 70 %, la diferencia está aún en sulfuros.

### **3.4.1 Instrumentos y equipos.**

#### **Reactivos**

- Cal
- NaCN
- Cemento

#### **Materiales**

- 01 columna de tubo de PVC de 203,2 mm (8") de diámetro x 1,9 m de altura
- 01 estructura metálica
- 01 envase de 20 litros.
- 01 probeta de 10 ml
- 01 probeta de 1 litro
- 01 caja de papel pH
- Envases para la recepción de la solución
- Plástico impermeable.

## **Equipos**

- Balanza analítica.
- Agitador
- Juego de mallas
- Ro Tap
- Chancadora de quijada 19,5 mm ( $\frac{3}{4}$ "

### **3.4.2 Procedimiento experimental.**

En coordinación con la empresa minera Solitario S.A. de Bolivia, se presentan las pruebas de lixiviación en columna de los desmontes de Pacuani, los 300 Kilos de mineral muestreados tiene una ley promedio del 179 gramos de plata/tonelada de mineral.

#### **a. Preparación del mineral.**

Primero se procedió a tomar muestras de mineral de diferentes zonas del desmonte (300 kg), luego se homogenizó y se clasificó, pasando por –malla 1" el 100 %. El pasante se homogenizó y se cuarteo, obteniendo muestras de mineral para el análisis químico, densidad aparente, análisis granulométrico y para lixiviación en columna.





Figura 3. Mineral de desmonte de Pacuani retenido y pasante, malla 1”

Fuente: Elaboración propia.

#### **b. Lixiviación en botella**

Antes de que un mineral sea sometido a pruebas de docilidad al proceso de cianuración debería ser sometido a un examen preliminar con el fin de conocer sus características físicas y químicas.

El conocimiento así obtenido será de un valor importante para preparar un buen programa de pruebas y poder bosquejar métodos especiales de ataque.

El desarrollo de estas pruebas permite definir la lixiviabilidad de un determinado mineral. Procedimiento que se usa en laboratorio

desarrollado por encargados del mismo. Esta prueba determina en forma rápida el consumo de reactivos de cal y cianuro, y el porcentaje de recuperación de plata en función del tiempo expresado en horas.

Las botellas se ponen a agitar en el equipo, en forma continua durante los tiempos solicitados, o el tiempo hasta que deje de consumir reactivos como fue el caso de esta prueba.

Se tiene una botella de manipulación para determinar el consumo de reactivos; evitando pérdidas que podrían afectar el balance metalúrgico.

Las pruebas de cianuración en botellas son efectuadas para obtener información preliminar sobre el consumo total de reactivos que intervienen en el proceso de lixiviación tales como el NaCN y CaO; así mismo, se puede predecir el porcentaje de recuperación de plata (Ag) que se pueda obtener.

Parámetros de prueba metalúrgica:

Tabla 4.

Parámetros de la lixiviación en botella.

<b>Características</b>	<b>Cantidad</b>
Fecha de inicio de las pruebas	2015-01-14
Fecha de final de las pruebas	2015-01-18
Hora de inicio de las pruebas	10:15 h
Peso seco de la muestra (kg)	2,00
Peso del agua (kg)	3,00
Peso botella vacía (kg)	1,87
Peso botella con pulpa (kg)	6,87
Adición de cal (g)	0,00
Consumo de cal (kg/t)	0,00
Granulometría de la muestra	100 % M -10
Velocidad de agitación (rpm)	25
Consumo de NaCN (kg/t)	0,00
Fuerza de CN <sup>-</sup> de trabajo (ppm)	60
Finos en cabeza: Ag (mg)	1 165,4

Fuente: Elaboración propia – laboratorio de metalurgia minero Solitario S.A.

Tabla 5.

Datos metalúrgicos.

<b>Características</b>	<b>Cantidad</b>
Cabeza Ensayada de Ag (g/t)	582,70
Ripios de Ag (g/t)	123,40
Extracción Ag (%)	69,8

Fuente: Elaboración propia – laboratorio de metalurgia minero Solitario S.A.

**c. Lixiviación en columna**

- Medir la Columna (h y D).
- Depositar el mineral sobre una carpeta y homogenizar el material mediante técnica de cono y cuarteo.
- Reducir la Muestra hasta aproximadamente la masa necesaria para la prueba.

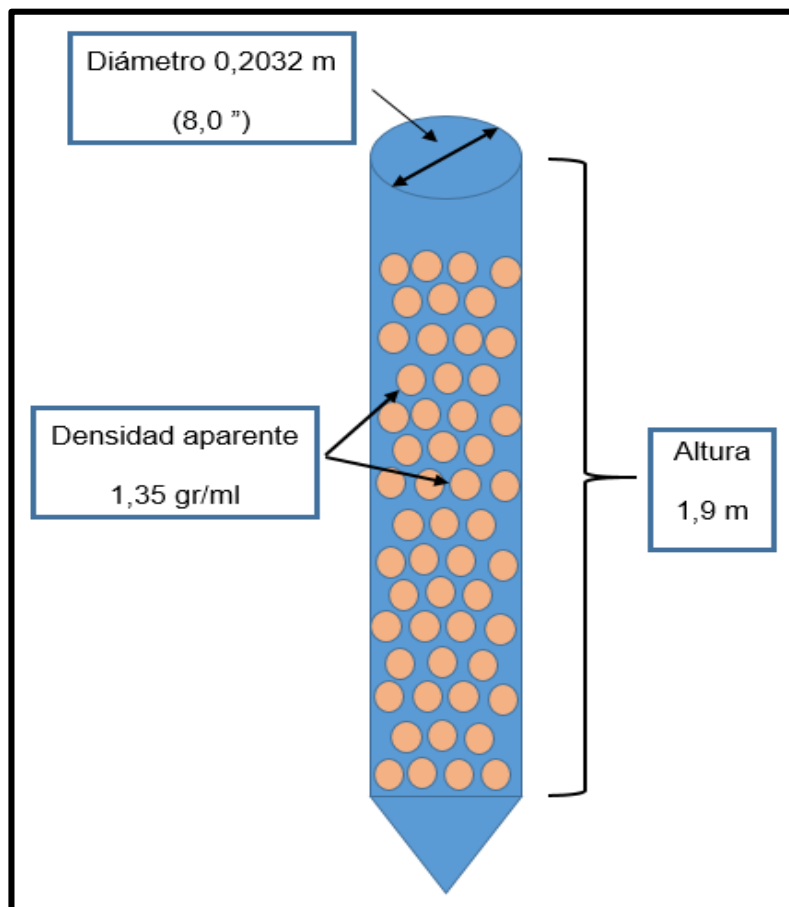


Figura 4. Parámetros de diseño.

Fuente: Elaboración propia.

Datos para cálculo de columna de lixiviación.

- 1,9 m de altura
- 0,203 2 m (8,0 ") de diámetro
- 1,35 g/ml densidad aparente

Se calcula la cantidad del mineral para la lixiviación en columna.

- Se calcula la altura real

$$h_{real} = \frac{h}{1,1} = x \qquad h_{real} = \frac{1,9 \text{ m}}{1,1} = 1,727 \text{ m}$$

- Se calcula el volumen de un cilindro.

$$V = \pi * r^2 * h = x \qquad V = 3,1416 * \left(\frac{0,2032 \text{ m}}{2}\right)^2 * 1,727 \text{ m} = x$$

$$V = 0,056 \ 005 \ m^3 \qquad V = 56 \ 005 \ \text{ml}$$

- Se calcula el volumen.

$$d = m/v \qquad m = v * d$$

$$m = 56 \ 005 \ \text{ml} * 0,001 \ 35 \ \text{kg/ml}$$

$$m = 76,00 \ \text{kg} = \text{cantidad del mineral.}$$

**d. Aglomerado y curado**

Procedimiento para el curado

- En una manta HDPE se deposita 76 kg de mineral, luego se homogeniza.
- Primeramente se agrega la cal sobre el mineral y se mezcla, de igual manera se procede con la adición del cemento, simulando un aglomerador.
- Seguidamente se procede al curado, echando 9,5 litros de solución fuerte de cianuro, mezclando hasta que todo el material esté humectado.
- Terminado el proceso se deja curando 24 horas.
- Pasada las 24 horas se determina lo siguiente:

Tabla 6.

Propiedades físicas del mineral de (Ag).

<b>Propiedades físicas del mineral de (Ag)</b>	
Peso específico del mineral	2,08
Densidad aparente del mineral curado	0,8 g/ml
Porcentaje de humedad del mineral curado	10,68 %

Fuente: Elaboración propia

**e. Cálculos para la dosificación de reactivos.**

- Consumos para 76 kg de mineral.
- Cal (60 %)
- Consumo de cal = 17,7 kg/t
- Cantidad de cal a utilizar para el proceso 802 g
- Cemento (8 kg/t)
- Cemento para el aglomerado 600 g
- Cianuro de sodio (55,41 %)
- Consumo de cianuro usado 4,27 kg/t
- Cianuro para el curado 225,2 g
- Cantidad de agua para el curado (12,5 %)
- $76 \text{ kg} \times 0,125 = 9,5 \text{ l}$

Con estos cálculos se procede a pesar las cantidades calculadas para el proceso.



Figura 5. Mineral de desmonte de Pacuani 100 % menos malla -1  
Fuente: Elaboración propia



Figura 6. Mineral de desmonte de Pacuani aglomerado y curado dentro de la columna  
Fuente: Elaboración propia



**f. Proceso de lixiviación**

- Después de las 24 horas se carga el mineral curado a la columna de lixiviación y se mide la altura inicial (175,5 cm).
- Luego se procede al riego del mineral con un flujo de 10 ml/min, esta solución de riego está en un recipiente acondicionado en la parte superior de la columna (la solución débil es de 0,3 g NaCN/l). El riego se realiza por un periodo aproximado de 15 días, se toma muestras de solución cianurada cada cierto tiempo, después de este periodo de lixiviación el mineral (ripios) es lavado y secado.



Figura 7. Columna de lixiviación

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.3 Muestreo y medición

Para la medición se consideró:

- El flujo de entrada.
- El flujo de salida.
- pH.
- Volumen de solución cianurada.

Para la medición de flujos se utilizó una probeta de 10 ml. Las muestras de solución cianurada tomadas se guardaron en envases de plásticos; se consideró el tiempo para cada muestra.



Figura 8. Recipiente para recibir soluciones cianuradas

Fuente: Elaboración propia



Figura 9. Muestras de soluciones cianuradas

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Resultados

##### 4.1.1 Resultado granulométrico del mineral.

Este análisis permite calcular la distribución porcentual del contenido metálico por mallas. Lo que hace posible poder obtener una extracción por malla de Ag, al realizar la misma operación con el mineral de desmonte y mineral para las pruebas en columna 100 % menos malla 1".

Tabla 7.

Análisis granulométrico del mineral de desmonte

Serie ASTM	Apertura (μ)	Peso (g)	% Ind	% Acum	% Pass
1"	25 400	0,84	22,22	22,22	77,78
3/4"	19 050	0,50	13,25	35,48	64,52
5/8"	15 875	0,23	6,19	41,67	58,33
1/2"	12 700	0,15	3,99	45,66	54,34
1/4"	6 350	0,60	15,74	61,40	38,60
8	2 378	0,53	13,99	75,39	24,61
10	2 000	0,09	2,35	77,75	22,25
35	500	0,38	10,05	87,80	12,20
50	297	0,10	2,57	90,37	9,63
100	149	0,12	3,23	93,60	6,40
140	105	0,08	2,22	95,82	4,18
200	75	0,07	1,96	97,78	2,22
-200	-75	0,08	2,22	100,00	0,00
<b>TOTAL</b>		<b>3,78</b>			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.

Análisis granulométrico del mineral para las pruebas en columna 100 % menos malla 1".

Serie ASTM	Apertura (μ)	Peso (g)	% Ind	% Acum	% Pass
3/4"	19 050	0,38	12,45	12,45	87,55
5/8"	15 875	0,282	9,24	21,70	78,30
1/2"	12 700	0,295	9,67	31,37	68,63
1/4"	6 350	0,577	18,91	50,28	49,72
m 8	2 378	0,496	16,26	66,54	33,46
m 10	2 000	0,094	3,08	69,62	30,38
m 35	500	0,426	13,96	83,58	16,42
m 50	297	0,108	3,54	87,12	12,88
m 100	149	0,133	4,36	91,48	8,52
m 140	105	0,069	2,26	93,74	6,26
m 200	74	0,079	2,59	96,33	3,67
- m 200		0,112	3,67	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2 Lixiviación en botella.

Mineral de plata, que se hizo prueba con cianuración en botella, obteniéndose alto porcentaje de extracción de plata, a granulometría 100 % -m #10. El objetivo de esta prueba es determinar si es posible extraer los metales valiosos por percolación, así como el consumo de reactivos, y el tiempo óptimo de extracción por días.

En la figura 10, los resultados obtenidos, proveen información inicial acerca de la disolución de los metales preciosos, en el caso de la plata tiene una concentración 271 ppm en 92 horas (4 días) de lixiviación.

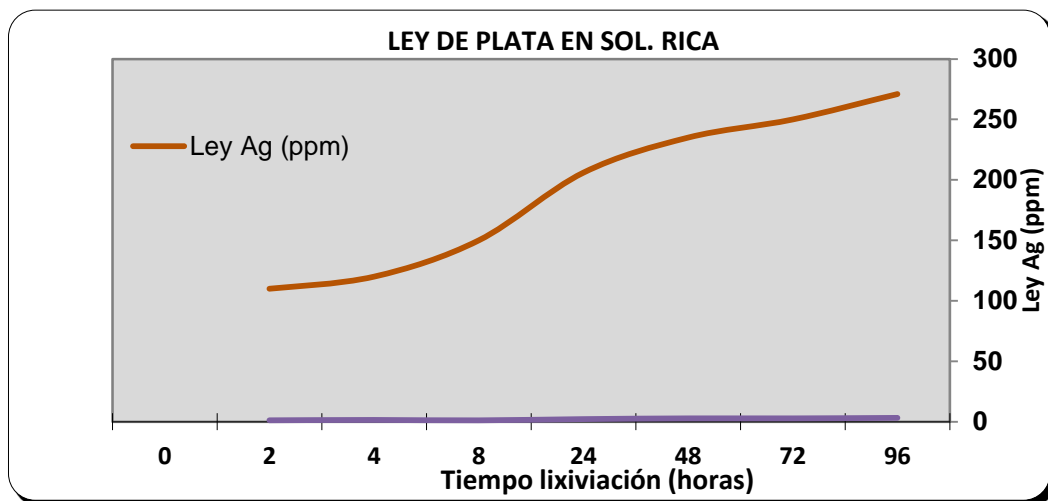


Figura 10. Disolución de la plata en soluciones cianuradas.

Fuente: Elaboración propia

- **Lixiviación en botella.**

Tabla 9 .

Resumen: Lixiviación en botella

Tiempo Agitación (h)	pH		Ley ppm	Contenidos finos (mg)	Extracción (%)	NaCN	Cal
	pH Inicial	pH Final	Ag	Ag	Ag	(kg/t)	(kg/t)
0	7,70	10,50		0	0	0	0
2	10,60	10,60	110	330	28,32	2,90	7,20
4	10,40	10,60	120	360	30,89	3,20	7,60
8	10,50	10,50	150	450	38,61	3,40	7,90
24	9,80	10,55	206	618	53,03	3,34	7,90
48	9,55	10,51	235	705	60,49	4,54	8,10
72	9,77	10,30	250	750	64,36	4,60	8,20
96	9,70	10,00	271	813	69,76	5,30	8,30
<b>TOTAL</b>				<b>813</b>	<b>69,76</b>		

Fuente: Elaboración propia - laboratorio de Metalurgia minero Solitario S.A.

#### 4.1.3 Resultados de extracción en columna a los 15 días de lixiviación

Tabla 10.

Propiedades del mineral y los reactivos.

Datos metalúrgicos			
Peso del mineral	76,0 kg	Concentración sol.	0.3 g/l
Ley del mineral	179,0 g/t	pH	10,5-12,0
Plata soluble	124,0 g/t	Flujo	0,9 – 11 ml/min
Plata fino (a)	9,244 g	Inicio de riego	11,00 am
Granulometría	-1"	Altura inicial	172,5 cm
% CN p/curado	55,44 %	Altura final	172,0 cm
CN curado	225,62 g		
Tiempo de curado	24 h		

Fuente: Elaboración propia - laboratorio de metalurgia minero Solitario S.A.

Los resultados indican que la muestra responde al proceso de cianuración por percolación fácilmente a pesar de la granulometría utilizada en la aglomeración (-1"). Es de destacar que aún con las concentraciones más bajas (0,3 g/l de cianuro) en la solución de irrigación la tendencia en la extracción fueron significativas en un período de operación corto para este proceso (15 días).



Tabla 11.

Resultados de extracción en columna a los 15 días de lixiviación

N	Fecha	Hora	Tiempo parcial (h)	Tiempo acumu (h)	Recepción		Flujo (ml/min)	Ag gpl	Ag ext parc (g)	Ag ext Acum (g)	Ag ext Parc (%)	Ag ext Acum (%)	pH
					Vparc (l)	Vacum (l)							
1	2015-01-23	11:00	6	6	1,950	1,95	7,0	0,233	0,454	0,454	4,821	4,82	12,0
2	2015-01-24	07:30	20	26	7,100	9,05	8,0	0,232	1,647	2,102	17,479	22,30	12,0
3	2015-01-24	10:00	2	28	1,970	11,02	8,0	0,142	0,280	2,381	2,968	25,27	12,0
4	2015-01-25	11:00	21	49	7,350	18,37	10,5	0,162	1,191	3,572	12,635	37,90	12,0
5	2015-01-26	08:30	21	70	6,750	25,12	8,0	0,128	0,864	4,436	9,168	47,07	12,0
6	2015-01-26	15:30	7	77	3,200	28,32	10,0	0,086	0,275	4,711	2,920	49,90	12,0
7	2015-01-27	09:00	17	94	5,500	33,82	11,5	0,062	0,341	5,052	3,618	53,61	12,0
8	2015-01-28	09:00	24	118	6,600	40,42	10,0	0,058	0,383	5,435	4,062	57,67	12,0
9	2015-01-30	09:00	48	166	18,000	58,42	8,0	0,018 1	0,326	5,761	3,457	61,13	12,0
10	2015-01-31	09:00	24	190	11,000	69,42	10,0	0,009 22	0,101	5,862	1,076	62,21	12,0
11	2015-01-31	09:00	24	214	10,500	79,92	10,5	0,008 34	0,088	5,950	0,929	63,13	12,0
12	2015-02-01	09:00	24	238	8,300	88,22	10,0	0,007 34	0,061	6,011	0,646	63,78	12,0
13	2015-02-02	09:00	24	262	9,000	97,22	10,0	0,004 38	0,039	6,050	0,418	64,20	12,0
14	2015-02-03	09:00	24	286	10,800	108,02	10,5	0,004 28	0,046	6,096	0,490	64,69	12,0
15	2015-02-04	09:00	24	310	11,300	119,32	10,0	0,005 14	0,058	6,154	0,616	65,31	12,0
16	2015-02-05	09:00	24	334	12,800	132,12	11,0	0,005 78	0,074	6,228	0,785	66,09	11,5
17	2015-02-06	09:00	24	358	9,900	142,02	10,0	0,005 66	0,056	6,284	0,595	66,69	11,5
18	2015-02-07	09:00	24	382	10,100	152,12	10,5	0,005 96	0,060	6,345	0,639	67,32	11,0
19	2015-02-08	09:00	24	406	10,800	162,92	10,0	0,006 3	0,068	6,413	0,722	68,05	11,0
20	2015-02-09	09:00	24	430	10,900	173,82	10,5	0,004 72	0,051	6,464	0,546	68,59	11,0
21	2015-02-10	09:00	24	454	11,100	184,92	11,0	0,003 54	0,039	6,503	0,417	69,01	10,5

Fuente: Elaboración propia - laboratorio de metalurgia minero Solitario S.A.

## 4.2 Discusión

### 4.2.1 Lixiviación en botella

El objetivo de esta prueba es determinar si es posible extraer la plata por agitación, así como el consumo de reactivos, y el tiempo óptimo de extracción de plata por días; se puede apreciar en la figura 11, a las 48 horas se obtiene la recuperación que pasan el 60 %, llegando hasta 69,76 % a las 96 horas.

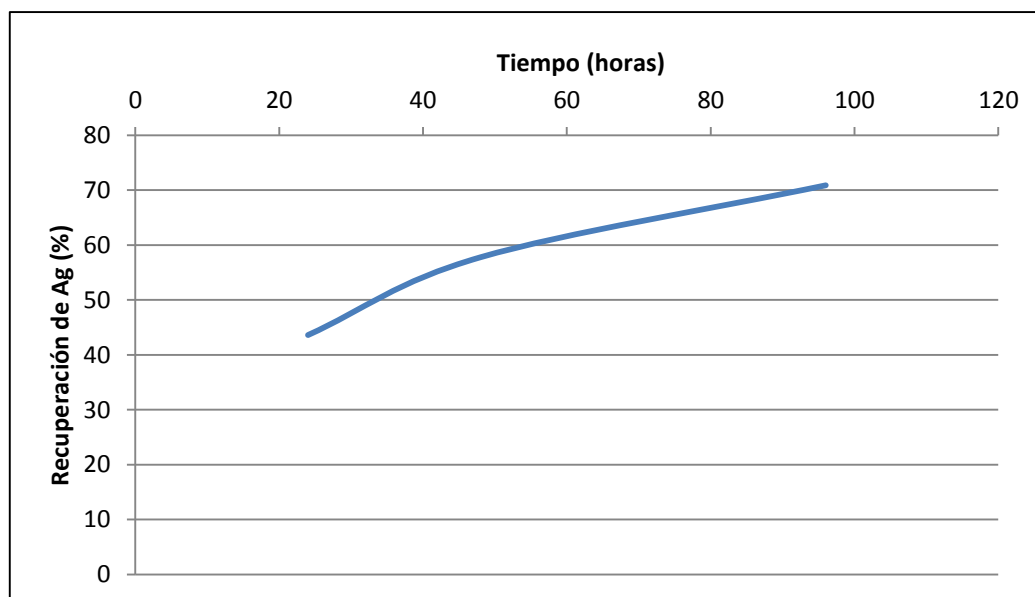


Figura 11. Disolución de la plata en soluciones cianuradas en botella.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2 Lixiviación en columna

La velocidad de disolución de la plata mediante el proceso de cianuración se incrementa de manera significativa durante las primeras 150 horas de lixiviación.

Luego de este lapso la velocidad hace constante. Considerando que durante las primeras 150 horas de proceso se logra disolver por encima del 60,2 %, se puede creer que alcanzando buenas condiciones de cianuración este tiempo de lixiviación puede ser el requerido para el proceso, considerando el proceso de curado.

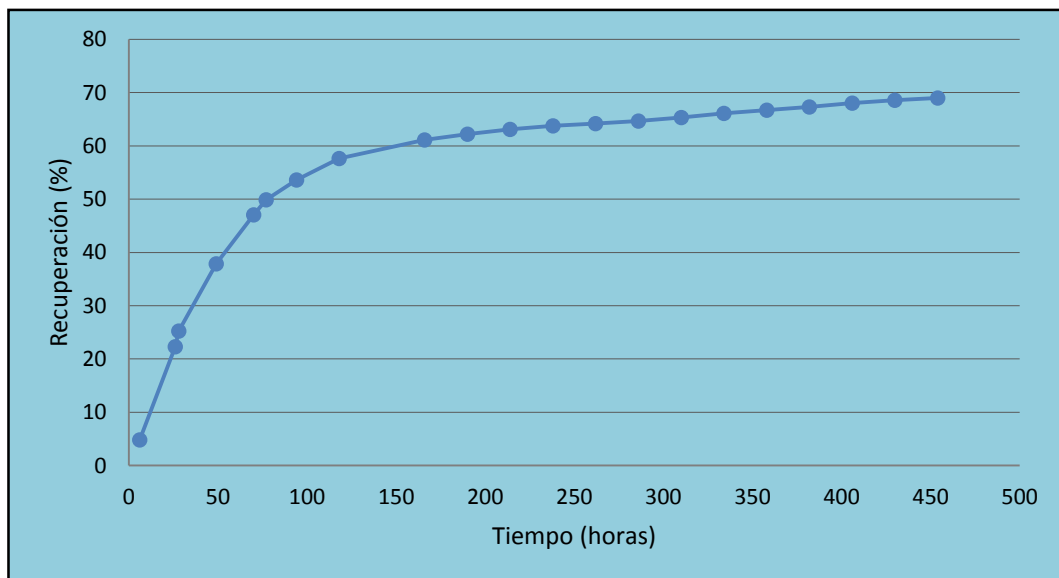


Figura 12. Extracción de la plata en soluciones cianuradas en columna

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: La disolución de plata es a los 6 días llegando a una recuperación del 62 %, después la disolución de la plata se hace lenta.

## CONCLUSIONES

Se evaluó la recuperación de la plata en columnas de lixiviación mediante el proceso de cianuración y el valor de extracción de plata es del 69,01 % y es obtenido a los 15 días de lixiviación.

Gran parte de la disolución de plata es a los 6 días llegando a una recuperación del 62 %, después la disolución de la plata se hace lenta (ver Fig. 12).

La aglomeración de los finos en torno a las partículas mayores con agua y cemento permite elevar la resistencia del material mientras se mantiene una buena permeabilidad del lecho de mineral con el fin de alcanzar alturas si se considera la lixiviación en pilas, mejorará los índices de recuperación de plata y se acortan los ciclos de lixiviación si el mineral es aglomerado.

Las extracciones de plata de los botaderos mediante la cianuración no supera el 70 % de recuperación, debido que el 30 %, se supone que está en forma de sulfuro. Estas recuperaciones no desaniman al metalurgista, ya que no hay costo de extracción o minado.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda a la empresa minera Solitario S.A.:

Mejorar la disolución de la plata en los botaderos usando un catalizador.

En las posteriores investigaciones. Utilizar agentes oxidantes como peróxido de hidrógeno o bien el peróxido de calcio.

Tener en soluciones cianuradas cantidades de cianuro libre por encima de los 450 ppm, para mejorar la disolución de la plata.

Se recomienda realizar proceso de precipitación para la recuperación de plata de soluciones cianuradas.

Estos datos se podría tener en cuenta para considerar una planta piloto.

Para el tratamiento de los minerales de plata en botaderos seleccionar el método de lixiviación en pilas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bart, H.-J. (2005). *“Extraction columns in hydrometallurgy.”* Hydrometallurgy 2005.

Cisternas, L., N. Luza, et al. (2008). HydroSim: *“Una librería para simulación, modelación y optimización en hidrometalurgia.”* “Antofagasta, Chile, Universidad de Antofagasta.




Cornelius Klein & Cornelius S. Hurlbut, (1996) *“Manual de Mineralogía”* 4ª Edición, Editorial Reverte, S.A. España-Barcelona

Domic Mihovilovic, Esteban Miguel, (2001) *“Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones”* 1ª Edición, Chile-Santiago

Habashi, F. (1999). *“Libro de hidrometalurgia”* 2ª Edición, Editorial Quebec. Ottawa-Canada

# ANEXOS

## Anexo 1. Informe de ensayo

 <p>Miembro del grupo SGS (Société Générale de Surveillance)</p>		<p><b>SGS BOLIVIA S.A.</b>  <b>LABORATORIO PARA ENSAYOS MINERALÓGICOS</b>          SGS MINLAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro          Telf.: (591-2) 2825852 / 2821139 (int. 231), Fax: (591-2) 2821139 (int. 214)          La Paz-Bolivia</p>	
Laboratorio Acreditado con el registro IBMETRO DTA- CET-019, bajo la norma NB-ISO-IEC 17025:2005			
		Pág. 1 de 1	
<b>INFORME DE ENSAYO</b>			
ORDEN N°	01475-13	FECHA EMISIÓN	2015-04-15
CLIENTE	EMINSOL S.A.		
MATERIAL	MINERAL		
NUESTRA REFERENCIA	COMERCIAL		
ENSAYOS SOLICITADOS	Au, Ag		
FECHA DE ENSAYOS	2015-04-09 al 2015-04-15		
DIRECCION CLIENTE	Av. Montenegro, N° 909, San Miguel, La Paz.		
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO	2015-04-09		
Su referencia:	*Au g/t	Ag g/t	
CABEZA P.L.C.	0,14	179	
Método Utilizado	Au: P3-MINE-35/Ensayo al Fuego; Ag: P3-MINE-49/AAS		
Observaciones	<small>NOTA 1: LOS RESULTADOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ENSAYO, CORRESPONDEN A RESULTADOS DE MUESTRAS TOMADAS Y ENTREGADAS POR EL CLIENTE O POR UN TERCERO EN NOMBRE DEL CLIENTE SIN LA INTERVENCIÓN DE SGS.          NOTA 2: SGS SOLO RECONOCE COMO VÁLIDOS, INFORMES DE ENSAYO EMITIDOS EN SOPORTE FÍSICO, CON EL DEBIDO SELLO Y FIRMA DEL PERSONAL AUTORIZADO.</small>		
<small>(*) Parámetro que NO es parte del alcance de acreditación</small>			
I   1   O		 Luis M. Mena Lozano SUPERVISOR LAB. MINERALES	
<p><b>ADVERTENCIA:</b> Los resultados de la(s) muestra(s) registrados en este informe (los "resultados") se ha(n) elaborado por instrucciones provistas por el cliente o por un tercero que actúe por instrucción del cliente. Los resultados no constituyen garantía de la representatividad de la muestra del (o los) bienes y estrictamente están relacionadas con la(s) muestra(s). SGS Bolivia S. A. no asume ninguna responsabilidad en relación con el origen o la fuente de la que la muestra(s) es/o se dice que fueron extraídos.</p> <p><small>Laboratorio ACREDITADO por el organismo nacional de acreditación (DTA-IBMETRO) para realizar análisis de Zn en minerales concentrados, Pb en minerales concentrados, Sn en minerales concentrados, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en Ulexita, Sb en Ulexita, Sn en Ulexita de antimonio, Ag en concentrados de zinc-plata, Au en concentrados, Ag en concentrados de plata, Sn en minerales concentrados, Fe en minerales concentrados, Ag en rocas y minerales. Este informe de ensayo emitido en el marco de los ensayos incluidos en el certificado de acreditación DTA-CET-019 y su alcance respectivo. En caso de duda consultar al organismo nacional de acreditación (cred@dgta.gov.bo) De acuerdo al Comunicado Conjunto ISO-ILAC-IAF fechado Enero de 2009 (SE ADJUNTA COPIA DEL DOCUMENTO ORIGINAL), el cumplimiento por parte de un laboratorio de los requisitos de ISO/IEC 17025:2005 quiere decir que el laboratorio cumple tanto los requisitos de competencia técnica como los requisitos relativos a la gestión necesarios para emitir de manera consistente resultados de ensayo y calibraciones Mediciones válidas. Los requisitos relativos a la gestión en ISO/IEC 17025:2005 (Sección 4) están escritos en un lenguaje relevante para las operaciones del laboratorio, cumplen los principios de ISO 9001:2008 Sistemas de Gestión de la Calidad – Requisitos y están alineados con sus requisitos pertinentes.</small></p>			