

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE ORO CON REACTIVO  
SANDIOSS EN LA EMPRESA MINERA COLIBRÍ S.A.C**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**NORMA NERY CCARI SIRENA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO QUÍMICO**

**PUNO – PERÚ**

**2018**

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE ORO CON REACTIVO  
SANDIOSS EN LA EMPRESA MINERA COLIBRÍ S.A.C

TESIS PRESENTADA POR:

NORMA NERY CCARI SIRENA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO



APROBADA POR:


PRESIDENTE:

  
M.Sc. CIRO HERNAN VERA ALATRISTA

PRIMER MIEMBRO:

  
Ing. DARSSY ARGELIDA CARPIO RAMOS

SEGUNDO MIEMBRO:

  
Ing. RENÉ JUSTO QUISPE FLORES

DIRECTOR / ASESOR:

  
M. Sc. GERMÁN QUILLE CALIZAYA

Área : Proceso industriales  
Tema : Tratamiento de minerales  
Línea : Tecnología ambiental  
Fecha de sustentación: 25/05/2018

## DEDICATORIA

Mi gratitud infinita a nuestro creador  
Dios.

A mis queridos padres a quienes con su  
siempre contaste apoyo durante todo el  
transcurso de mi carrera contribuyeron  
en mi formación académica y personal.

A mis hermanos a quienes me complace  
dedicar esta Tesis cuyas personalidades  
son completamente ejemplares. Me han  
enseñado a encarar las adversidades sin  
perder nunca la dignidad ni desfallecer  
en el intento. Me han dado todo lo que  
soy como persona, mis valores, mis  
principios, mi perseverancia y mi  
empeño, y todo ello con una gran dosis  
de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

## AGRADECIMIENTOS

- Agradezco a Dios por llenar mi vida de bendiciones y fortaleza.
- A la Universidad Nacional del Altiplano, y a la Facultad de Ingeniería Química por haberme impartido sus buenas enseñanzas y brindado una profesión digna y la mejor de todas las profesiones.
- A los catedráticos de la Facultad de Ingeniería Química por su disposición y ayuda brindada, haber compartido sus valiosos conocimientos y la colaboración brindada hacia mi persona para la culminación del presente trabajo.
- Al personal administrativo de la Facultad de Ingeniería Química.
- A mis padres a quienes agradezco de todo corazón por su apoyo económico y moral y aquel amor incondicional que siempre estuvo a mi lado en momentos difíciles.
- Agradezco a mis hermanos por la compañía, los consejos de sus experiencias vividas que siempre me apoyo moralmente, y por su compañía que siempre contare.
- A todas aquellas personas que me han acompañado y facilitado su apoyo, consejo y ánimo a lo largo de este proceso, sin las cuales no hubiera sido posible lograr este objetivo.
- A los jurados quienes evaluaron este trabajo y me permitieron plasmar mis propósitos y desde ya serán parte de varias iniciativas para evaluar los recursos mineros.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
ÍNDICE DE TABLAS .....	9
RESUMEN .....	10
ABSTRACT.....	11
I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	12
1.1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA GENERAL.....	12
1.1.2. FORMULACIÓN DE LOS PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....	12
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	13
1.3. HIPÓTESIS .....	13
1.3.1. HIPÓTESIS GENERAL.....	13
1.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS .....	14
1.4. OBJETIVOS .....	14
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	14
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	15
2.1. ANTECEDENTES.....	15
2.2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.2.1. REACTIVO SANDIOSS.....	17
2.2.2. Características, usos y aplicaciones de reactivo sandioss.....	18
2.2.3. CIANURACIÓN DE ORO.....	19
2.2.4. REACCIONES DE DISOLUCIÓN DE ORO EN CIANURO .....	20
2.2.5. MECANISMOS DE LA DISOLUCIÓN CON CIANURO DE SODIO .	21
2.2.6. LIXIVIACIÓN DE MENAS AURÍFERAS CON SALES OXIDANTES EN MEDIO ÁCIDO MEDIANTE EL PROCESO SEVERO.....	27
2.2.7. PROCESO OPERATORIO DE LIXIVIACIÓN .....	28

2.2.8.	MECANISMO DE REACCIÓN .....	28
2.2.9.	LIXIVIACIÓN CON EL MINERAL AURÍFERO .....	29
2.2.10.	RECICLADO DEL ÓXIDO NÍTRICO.....	30
2.2.11.	TERMODINÁMICA DE LIXIVIACIÓN DEL ORO.....	31
2.2.12.	PROCESO DE LIXIVIACIÓN .....	33
2.2.13.	CIANURACIÓN .....	35
2.2.14.	LA APLICACIÓN NOVEDOSA DE FERRICIANURO COMO UN OXIDANTE EN LA CIANURACIÓN DE ORO Y PLATA .....	36
2.2.15.	DISOLUCIÓN DE ORO .....	37
2.2.16.	DISOLUCIÓN DE SULFURO DE PLATA .....	38
III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	39
2.3.	MATERIALES DE LABORATORIO .....	39
2.3.1.	EQUIPOS Y MATERIALES .....	39
2.3.2.	REACTIVOS E INSUMOS.....	40
2.4.	LIXIVIACIÓN DE ORO CON REACTIVO SANDIOSS .....	41
2.5.	OPERACIONES PARA EL ANÁLISIS DE ORO.....	42
2.5.1.	FLUX PARA FUNDICIÓN .....	42
2.5.2.	FUNDICIÓN .....	42
2.5.3.	INCUARTACION .....	43
2.5.4.	COPELACIÓN .....	43
2.5.5.	APARTADO.....	44
2.6.	ENSAYOS ANALÍTICOS EN LA DETERMINACIÓN DE ORO.....	45
2.7.	DETERMINACIÓN DE ORO EN SOLUCIONES LIXIVIADAS .....	46
2.8.	MODELO MATEMÁTICO PARA LA INVESTIGACIÓN .....	47
2.8.1.	DISEÑO FACTORIAL DE EXPERIMENTOS.....	47
2.8.2.	MATRIZ DE DISEÑO .....	49
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	51

4.1. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE LIXIVIACIÓN DE ORO CON REACTIVO SANDIOSS .....	51
4.1.1. RECUPERACIÓN DE ORO CON REACTIVO SANDIOSS.....	51
4.2. PARÁMETROS ÓPTIMOS DE CONCENTRACIÓN DE SANDIOSS PH, Y TIEMPO DE LIXIVIACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO (AU).....	52
4.3. MODELO MATEMÁTICO PARA EL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ORO POR EL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN .....	52
4.4. RENDIMIENTO Y CAPACIDAD DE RECUPERACIÓN DE ORO POR EL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN, A PARTIR DE MINERALES PROVENIENTES DE LA ZONA OXIDADA DE LA EMPRESA MINERA COLIBRÍ S.A.C .....	53
4.5. COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	55
V. CONCLUSIONES.....	57
VI. RECOMENDACIONES.....	58
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59
ANEXOS .....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Modelo electroquímico para la cianuración del oro. ....	22
<b>Figura 2.</b> Modelo electroquímico de la lixiviación de oro con tiosulfato de amonio. ...	34
<b>Figura 3.</b> Diagrama de Pourbaix para el sistema de Au-CnH <sub>2</sub> O a 25 C para [Au]= 10 <sup>-4</sup> M y [CN]=10 <sup>-3</sup> M (Hiskey y Atlury, 1988) .....	35
<b>Figura 4.</b> Porcentaje de recuperación de oro. ....	51
<b>Figura 5.</b> Diagrama de Pareto estandarizado. ....	69
<b>Figura 6.</b> Efectos de interacciones en la recuperación de cromo. ....	70
<b>Figura 7.</b> Balanza Analítica - Laboratorio Metalúrgico. ....	73
<b>Figura 8.</b> Cuarteo de muestra - Laboratorio Metalúrgico. ....	73
<b>Figura 9.</b> Pesado de muestra - Laboratorio Metalúrgico. ....	74
<b>Figura 10.</b> Pesado de reactivo - Laboratorio Metalúrgico. ....	74
<b>Figura 11.</b> Mineral, Cianuro de Sodio y Reactivo Sandioss - Laboratorio Metalúrgico. ....	75
<b>Figura 12.</b> Control de pH - Laboratorio Metalúrgico. ....	75
<b>Figura 13.</b> Equipo rotámetro - Laboratorio Metalúrgico. ....	76
<b>Figura 14.</b> Medición de pH - Laboratorio Metalúrgico. ....	76



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Componentes del reactivo Sandioss. ....	17
<b>Tabla 2.</b> Niveles máximos y mínimos.....	49
<b>Tabla 3.</b> Matriz de diseño factorial $2^3=8$ .....	50
<b>Tabla 4.</b> Recuperación de oro. ....	51
<b>Tabla 5.</b> Resultados de cálculo de porcentaje de extracción de oro.....	54
<b>Tabla 6.</b> Comparación de métodos en la extracción de oro. ....	55
<b>Tabla 7.</b> Resultados de pruebas de lixiviación de oro.....	66
<b>Tabla 8.</b> Resultados de cálculo de oro extraído. ....	67
<b>Tabla 9.</b> Análisis de Varianza para Lixiviación de oro.....	68
<b>Tabla 10.</b> Efectos estimados para Lixiviación de oro (%). ....	70
<b>Tabla 11.</b> Coeficiente de regresión para Lixiviación de oro. ....	71
<b>Tabla 12.</b> Valores de variables óptimos. ....	72

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación fue el de recuperar oro utilizando reactivo sandioss por el método de lixiviación por agitación. Las innovaciones tecnológicas en materia de tratamiento de minerales de oro son cada vez más crecientes, es por ello se realizó la lixiviación de minerales de oro con un nuevo producto chino denominado reactivo Sandioss para conocer y comprobar su capacidad de disolución de oro. La técnica de lixiviación con reactivo Sandioss se realizó con minerales oxidados del yacimiento Minero Empresa Minera Colibrí S.A.C. Arequipa-Perú. El proceso se inició con las operaciones de chancado y molienda del mineral hasta obtener una granulometría de malla fina 80%-malla 200. La extracción de oro fue realizada por el método de lixiviación por agitación. El porcentaje de extracción de oro alcanzada fue de 93,98 %, determinándose las variables óptimas como la concentración de reactivo Sandioss 0,8%, pH 11 y tiempo de lixiviación 72 horas. La técnica de lixiviación con reactivo Sandioss se comparó con la técnica de cianuración con cianuro de sodio, los resultados de porcentaje de extracción de oro fueron iguales para el mineral oxidado de la Empresa Minera Colibrí S. A. C. Se aplicó el diseño experimental factorial 2<sup>n</sup> el mismo que ha permitido optimizar las variables del proceso. Según el diseño experimental se han realizado 8 pruebas y 3 pruebas centrales haciendo un total de 11 ensayos. Las pruebas experimentales de lixiviación y análisis químico de oro se realizaron en el laboratorio metalúrgico de la Empresa Minera Colibrí S.A. C. Arequipa.

**PALABRAS CLAVES:** Sandioss, Lixiviación, oro, minerales oxidados.

## ABSTRACT

The objective of this research work was to recover gold using waterioss reagent by the agitation leaching method. Technological innovations in the treatment of gold ores are increasingly increasing, that is why the leaching of gold ores was carried out with a new Chinese product called Sandioss reagent to know and verify its capacity to dissolve gold. The leaching technique with Sandioss reagent was carried out with oxidized minerals from the Minero Empresa Minera Colibrí deposit S.A.C. Arequipa, Peru. The process began with the operations of crushing and grinding the ore until obtaining a granulometry of fine mesh 80% - 200 mesh. The extraction of gold was done by the leaching method by agitation. The percentage of extraction of gold reached was 93.98%, determining the optimal variables such as the concentration of Sandioss reagent 0.8%, pH 11 and leaching time 72 hours. The leaching technique with Sandioss reagent was compared with the cyanidation technique with sodium cyanide, the percentage gold extraction results were the same for the oxidized mineral of the Colibrí Mining Company S. A. C. The 2n factorial experimental design was applied, which allowed to optimize the process variables. According to the experimental design, 8 tests and 3 central tests have been carried out, making a total of 11 tests. The experimental leaching and gold chemical analysis tests were carried out in the metallurgical laboratory of Empresa Minera Colibrí S.A. C. Arequipa

**KEYWORDS:** Sandioss, Leaching, gold, oxidized minerals.

## **I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El presente trabajo de investigación consiste en la lixiviación de minerales de oro de la Empresa minera Doble S.A.C. Arequipa con reactivo lixivante llamado reactivo Sandioss. El reactivo Sandios es una mezcla de varios compuestos diseñados para la extracción de oro y plata. La lixiviación de oro se realizó con minerales provenientes de la zona oxidada. El proceso empieza con la preparación mecánica de minerales consistentes en chancado y molienda. Los minerales así preparados a malla fina pasan a la etapa de recuperación de oro por el método de lixiviación por agitación. El oro fue analizado por el método de fusión al horno. Una vez terminado la lixiviación se procedió a la filtración, secado y análisis de oro tanto en mineral relave y lixiviado.

Las pruebas de lixiviación se realizarán en el laboratorio metalúrgico de la Empresa Minera Colibrí S.A.C. Arequipa. Las variables de estudio de la lixiviación de oro son: concentración de reactivo Sandioss, pH y Tiempo de lixiviación.

#### **1.1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA GENERAL**

- ¿En qué medida se puede recuperar oro utilizando reactivo sandioss por el método de lixiviación por agitación a partir de minerales provenientes de la zona oxidada de la Empresa Minera Colibrí S.A.C.?

#### **1.1.2. FORMULACIÓN DE LOS PROBLEMAS ESPECÍFICOS**

- ¿Se podrá definir la tecnología propuesta, dando a conocer los parámetros óptimos de concentración de sandioss, pH y tiempo de lixiviación para la recuperación de oro?

- ¿En qué medida se determinará el modelo matemático para el proceso de recuperación de oro por el método de lixiviación por agitación?

- ¿Se podrá definir el rendimiento y capacidad de recuperación de oro por el método de lixiviación por agitación, a partir de minerales provenientes de la zona oxidada de la Empresa Minera Colibrí S.A.C.?

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

El cianuro de sodio es el lixiviante universalmente utilizado en la extracción de oro, pero sin embargo es un reactivo altamente tóxico y contaminante. Entre los lixiviantes alternativos al cianuro se encuentra el tiosulfato de amonio y tiosulfato de sodio y presentan comportamientos muy favorables para minerales de oro con contenido de cobre. Se ha diseñado nuevo material lixiviante de oro llamado reactivo Sandioss, que es un producto chino alternativo al cianuro de sodio. El producto no es corrosivo, no genera gases tóxicos en el proceso, sin pasivos ambientales, el proceso de aplicación es el mismo que el cianuro de sodio y no requiere de ningún cambio en las condiciones de operación, es decir se trabaja en las mismas condiciones de pH, Temperatura y tiempo de lixiviación. El producto sandioss según su hoja técnica indica que se puede aplicar a minerales oxidados y minerales sulfurados.

## **1.3. HIPÓTESIS**

### **1.3.1. HIPÓTESIS GENERAL**

- Conociendo el método de lixiviación por agitación se recupera oro utilizando el reactivo sandioss a partir de minerales provenientes de la zona oxidada de la Empresa Minera Colibrí S.A.C.

### **1.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS**

- Los parámetros óptimos de concentración de sandioss, pH y tiempo de lixiviación permitirán analizar la tecnología propuesta para la recuperación de oro.
- En el proceso de recuperación de oro por el método de lixiviación por agitación será posible determinar el modelo matemático.
- Utilizando los minerales provenientes de la zona oxidada de la Empresa Minera Colibrí S.A.C. se evalúa el rendimiento y capacidad de recuperación de oro por el método de lixiviación por agitación.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

- Recuperar de oro utilizando reactivo sandioss por el método de lixiviación por agitación a partir de minerales provenientes de la zona oxidada de la Empresa Minera Colibrí S.A.C.

### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir la tecnología propuesta, dando a conocer los parámetros óptimos de concentración de sandioss, pH y tiempo de lixiviación para la recuperación de oro.
- Determinar el modelo matemático para el proceso de recuperación de oro por el método de lixiviación por agitación.
- Evaluar el rendimiento y capacidad de recuperación de oro por el método de lixiviación por agitación, a partir de minerales provenientes de la zona oxidada de la Empresa Minera Colibrí S.A.C.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. ANTECEDENTES

**Xie Feng et al., (2007)**, estudió la lixiviación de minerales de oro y plata con cianuro-ferrocianuro ha sido investigado con el propósito de mejorar la extracción de oro y plata. Sin ferricianuro la extracción de oro y plata con solución de cianuro aireado alcanzo 62% y 24% respectivamente, después de la lixiviación de una hora mientras en la presencia de ferricianuro 0,5 g/L de  $K_3Fe(CN)_6$ , la extracción de oro y plata alcanza a 87% y 47% respectivamente después de algunos tiempos de lixiviación. Con la presencia de ferricianuro, la extracción de oro tiende a ser estable después de la lixiviación de 4 horas comparada a 12 horas sin ferricianuro, sin embargo, la extracción final de oro después de 48 horas de lixiviación fue de 92% a 94%. Obviamente el ferricianuro acelera la disolución de oro dando un pequeño efecto en la recuperación final del oro. La extracción de plata en los dos casos fue estable después de lixiviar por 12 y 30 horas respectivamente, indicando que la disolución de plata también fue acelerada. La disolución de oro en solución de cianuro-ferricianuro se prepara 0,5 g/L de Fe como ferricianuro y 0,05 g/L de cianuro de sodio. Mostrando que el ferricianuro es un oxidante efectivo para disolver oro en solución cianuro.

**Gonzales et al., (2006)**, ha estudiado dos diferentes minerales, considerados como refractarios en el proceso extractivo del oro, a la aplicación del pre tratamiento oxidante empleando microondas, como fuentes de energía para generar el calor de transformación de los sulfuros a óxidos y, una vez aplicado el pre tratamiento, se somete el mineral a la lixiviación con cianuro sódico, bajo condiciones convencionales, con el objeto de mostrar el efecto que dicho proceso tiene sobre los minerales que causan la refractariedad. Los minerales procedentes de la mina El Roble y el Zancudo, los cuales presentan una

refractoriedad física y química, debido a las asociaciones del oro, su presentación y a la presencia de minerales consumidores de cianuro y oxígeno, se expusieron a las microondas dentro de una cavidad multimodo cuya frecuencia es de 2450 MHz y una potencia de 1000W; logrando oxidar más del 90% de los sulfuros en un tiempo no superior a los 10 minutos. Finalmente se pudo concluir a partir de la fase experimental, que la energía microonda tiene un gran potencial en el campo de la metalurgia extractiva, especialmente en las menas refractarias auríferas. La tostación de este material en un horno microondas es un pre tratamiento que mejora la extracción de oro en la cianuración, ya que pasa de tener un porcentaje de extracción del 20% a un 80%, aproximadamente.

**Yañez et al., (2005)**, estudió procesos de beneficio y tratamiento de minerales auroargentíferos, existentes actualmente en la zona minera de San Pedro Frío (Bolívar), conllevan a sistemas poco eficientes con porcentajes de recuperación de oro no mayores al 40%. Con este artículo, se intenta incentivar a los mineros a realizar un desarrollo compaginado con la universidad, ya que, según los resultados obtenidos durante esta investigación, es posible lograr porcentajes de disolución de oro hasta el 85% para los minerales de san Pedro Frío. Esta afirmación fue posible proponerla, mediante los análisis de la caracterización del mineral.



## 2.2. MARCO TEÓRICO

### 2.2.1. REACTIVO SANDIOSS

Es un producto químico, no tóxico, no explosivo y no se incluyen componentes tanto corrosivos o peligrosos como inflamables, es propugnada y patentada por China, como lixiviante de oro y plata sin cianuro, reemplaza 100% al cianuro de sodio, extrae el oro 100% ecológicamente, el producto sirve para tratamiento de minerales oxidados, minerales sulfurados y relaves cianurados.

El reactivo Sandioss puede ser aplicado en los métodos de lixiviación por agitación, lixiviación en pilas y recuperación con polvo de zinc. Tiene alta recuperación, alta disolución, bajo costo y buena lixiviación, ha elevado el valor económico de la industria minera del oro y hace real la lixiviación ecológica.

**Tabla 1.** Componentes del reactivo Sandioss.

<b>Nombres de los componentes</b>	<b>N° CAS</b>	<b>Porcentaje en peso %</b>
Oxido de sodio (Na <sub>2</sub> O)	1313-59-3	35-50%
Nitrógeno (N)	7727-37-9	12-20%
Amonio (NH <sup>4+</sup> )	14798-03-9	7-12%
Ferrocianuro de sodio	13601-19-9	7-12%
Agua (H <sub>2</sub> O)	7732-18-5	1-4%
Calcio (Ca)	7440-70-2	1-5%
Fierro (Fe)	7439-89-6	1-5%
Insolubles en agua	-----	3-8%

Fuente: <https://es.scribd.com/document/259862305/Ficha-Tecnica-Sandioss-ROYAL-CHEMICAL>

### 2.2.2. Características, usos y aplicaciones de reactivo sandioss.

- a) **Área de aplicación:** Minas oxido de oro y plata, primarias, de sulfuro, escombros electrónicos, el relave cianurado, pilas (heap leaching) de oro concentrado, de piscina (poza), de pulpas (agitación).
- b) **Composiciones del producto:** oxido de sodio, nitrógeno, amonio, calcio, hierro, etc.
- c) **Formas del producto:** granular o polvo, soluble en agua, puede ser utilizado una vez disuelto en el agua
- d) **Forma de usar:** al usar el reactivo, se debe disolver bien con el agua alcalina al clima y luego la echa a la pulpa para realizar la lixiviación.

Es el mismo proceso que el cianuro en las pilas de material oxidado de oro, la piscina y la pulpa, se puede recircular las soluciones ricas y pobres en la producción, las ricas es bueno absorber con el carbón activado. La temperatura del espacio es más de 10° C para obtener mejor lixiviación. Es compatible con la metalúrgica de cianuración.

- e) **Alcalinizar:** generalmente se usa la cal o la soda caustica para regular y conservar pH en 10-12, cuando los materiales están en pilas o piscina, el pH se regula en  $11 \pm 1$ .
- f) **Dosis:** la dosis del agente es de 5.0~10.0 /10000 (500~1000 g de reactivo/TM), la característica, la ley y pH afectan la dosis del agente. Según la cantidad y concentración del reactivo del reactivo se puede calcular la dosis real.
- g) **Dosificación:** bajo la temperatura normal, se disuelve con el agua y basta (se disuelve con agitación o en la corriente de agua), duchar con agua para que el extractor sea disuelto en la tina (pobre) o en la piscina de solución. Si es para

pilas (heap leaching), el agregar el reactivo y el duchar pueden ser en el mismo tiempo.

- h) La concentración del reactivo:** la composición y el pH de cada material son distintos, la concentración debe ser considerada por la cantidad y característica del material para agregar el extractor ecológico.
- i) Sin riesgo de contaminación:** El producto no es corrosivo. No genera gases tóxicos en el proceso. Sin pasivos ambientales. Se convierte en un efectivo fertilizante luego del proceso de lixiviación.
- j) Operatividad:** Proceso de aplicación es el mismo que el cianuro de sodio. No requiere de ningún cambio en las condiciones de operación.
- k) Buen rendimiento:** Actúa eficientemente tanto en óxidos como en minerales sulfurados con contenido de arsenopirita, arsénico, pirita, etc.
- l) Alta aplicabilidad:** Se aplica en PAD (pilas), VAT (pozas) y en tanques de agitación. Se recupera tanto con polvo de zinc como carbón activado.
- m) Innovación:** Revolucionario agente químico que se utiliza para sustituir el cianuro de sodio a través de una eficiente lixiviación ecológica.
- n) Inversión rentable:** Costo – Beneficio altamente favorable. Sin tramites especiales de compra, almacenamiento y transporte. Oportunidad inmejorable para su comercialización con responsabilidad ambiental.

<http://www.bioper.com.pe/>

### 2.2.3. CIANURACIÓN DE ORO

Astucuri. (1984), señala que la cianuración es el método más importante que se ha desarrollado para la extracción del oro de sus minerales y se usa a escala comercial en todo el mundo. La química del proceso de cianuración se basa en el hecho, de que, bajo

condiciones oxidantes, el oro y la plata pueden disolverse y acomplejarse en soluciones de cianuros alcalinos.

El oro no se oxida a temperatura ordinaria, no es soluble en ácidos: clorhídrico, nítrico y sulfúrico. Se disuelve en agua regia, la que puede ser dificultada por la presencia de la plata mediante la formación de cloruro de plata que cubre la superficie del metal.

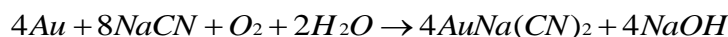
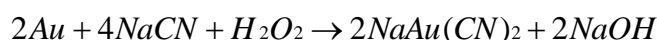
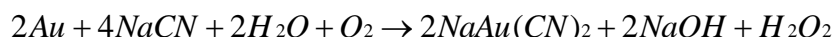
El oro también se disuelve en soluciones que contengan bromo o cloro, pero con mayor lentitud, siendo la reacción acelerada por el incremento de la temperatura. El yodo al estado nascente disuelve al oro.

La base del proceso de cianuración, es que soluciones débiles o diluidas de cianuro de sodio o potasio, tienen una acción disolvente preferencial sobre partículas de oro metálico (igualmente sobre la plata), con respecto a otros metales que se encuentran habitualmente en los minerales de oro.

El cianuro es el término descriptivo general aplicado usualmente al cianuro de sodio (NaCN). Debiendo mencionarse que el ion cianuro ( $\text{CN}^-$ ) es en realidad el que tiene la acción o fuerza disolvente y la base alcalina del sodio, potasio o calcio, simplemente da la estabilidad química al compuesto.

#### **2.2.4. REACCIONES DE DISOLUCIÓN DE ORO EN CIANURO**

Sancho y Verdeja (1998), para poder realizar la extracción del metal precioso (oro) a partir de minerales auríferos, se emplea el cianuro de sodio, estos al reaccionar forman complejos estables; para ello se requiere un agente oxidante, según la ecuación de Elsner.

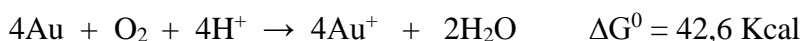
**a. Ecuación de Elsner****b. Ecuación sugerida por Jani****c. Ecuación de Bodlaender**

La ecuación global vendría a ser la misma que la ecuación de Elsner.

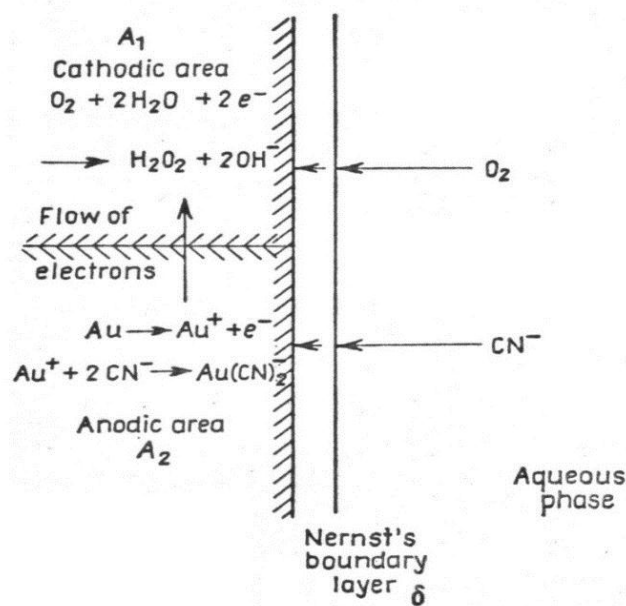
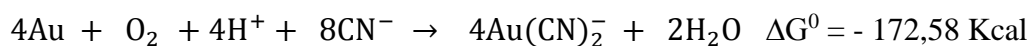
Respecto a estas ecuaciones cabe hacer un comentario, en razón de que el constituyente de mayor importancia es el oxígeno (excepto el de Janin, por lo que pierde credibilidad). Las reacciones propuestas por Bodlaender resaltan cuán importante es la presencia de oxígeno, la cual, en una cantidad limitada, forma el peróxido necesario por la disolución del oro y en exceso, propicia la oxidación del ion cianuro a ion cianato.

**2.2.5. MECANISMOS DE LA DISOLUCIÓN CON CIANURO DE SODIO**

Houng et al., (1986), indica que la lixiviación de oro con cianuro de sodio es bien conocido y termodinámicamente probado que el oxígeno no oxida al oro en un ambiente normal.



En la presencia de iones cianuro, el oro es fácilmente soluble. Existe formación de un complejo de cianuro de oro estable.

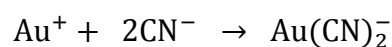


**Figura 1.** Modelo electroquímico para la cianuración del oro.

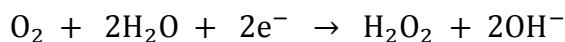
La disolución de oro en soluciones de cianuro es electroquímica por naturaleza. El oro es disuelto en sitios anódicos mientras que el oxígeno es reducido en sitios catódicos. El ánodo y el cátodo forman un par de corrosión en el cual existe transferencia de electrones de los sitios anódicos a los sitios catódicos a través del oro sólido.

Las reacciones anódicas y catódicas son:

Reacción anódica



Reacción catódica



Astucuri (1984), ha mostrado que la cinética de cianuración del oro y plata es controlada por difusión. Para altas concentraciones de oxígeno, la velocidad de reacción depende de la difusión de iones cianuro a través de la capa de película del líquido, y para concentraciones de cianuro altas, la velocidad es controlada por la difusión del oxígeno a través de la capa de película.

Para el desarrollo de esta ecuación se parte de la aplicación de la ley de Fick para la difusión del oxígeno y el cianuro hacia la superficie del oro - interface – bajo condiciones de estado estacionario.

$$\frac{d(\text{O}_2)}{dt} = \frac{\mathcal{D}_{\text{O}_2}}{\delta} A_1 \{[\text{O}_2] - [\text{O}_2]_i\}$$

$$\frac{d(\text{CN}^-)}{dt} = \frac{\mathcal{D}_{\text{CN}^-}}{\delta} A_2 \{[\text{CN}^-] - [\text{CN}^-]_i\}$$

Donde:

- $\mathcal{D}_{\text{O}_2}$  y  $\mathcal{D}_{\text{CN}^-}$  : son los coeficientes de difusión del  $\text{O}_2$  y  $\text{CN}^-$ , respectivamente
- $i$  : es la interfase es decir indica las concentraciones en la interfase.
- $\frac{d(\text{O}_2)}{dt}$  y  $\frac{d(\text{CN}^-)}{dt}$  : son las velocidades de difusión de  $\text{O}_2$  disuelto y  $\text{CN}^-$ , respectivamente.
- $[\text{O}_2]$  y  $[\text{O}_2]_i$  : son la concentración de  $\text{O}_2$  disuelto en el seno de la solución, y la interface de reacción, respectivamente en moles/litro.
- $[\text{CN}^-]$  y  $[\text{CN}^-]_i$  : son las concentraciones del ión  $\text{CN}^-$  en el seno de la solución y la interface de reacción, respectivamente en moles /litro.
- $A_1$  y  $A_2$ : son las áreas superficiales en las cuales ocurren las reacciones catódicas y anódicas, respectivamente es el espesor de la capa límite, en cm.

Para el caso de control difusional (en que la difusión es el mecanismo limitante o el paso más lento), es posible asumir que las reacciones químicas en la superficie del oro son muy rápidas comparadas con las velocidades de las cuales los iones oxígeno y cianuro difunden a través de la capa límite. De esta forma, las concentraciones de la interface del sólido pueden ser consideradas como cero.

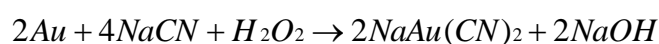
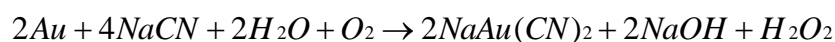
$$[O_2]_i = 0 \quad [CN^-]_i = 0$$

Por lo tanto, tenemos:

$$\frac{d(O_2)}{dt} = \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 [O_2]$$

$$\frac{d(CN^-)}{dt} = \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 [CN^-]$$

En 1966, Habashi citado por Astucuri, mostró la evidencia cinética del proceso de disolución, que es de naturaleza electroquímica, siendo la reacción total la siguiente:



Inspeccionando las reacciones catódicas y anódicas y la consecuente reacción global, se puede ver que se requieren 4 moles del ión cianuro y 1 mol de oxígeno para disolver para disolver 2 moles de oro. Entonces la velocidad de disolución del oro estará dada por:

$$\text{velocidad de disolución} = 2 \frac{d(O_2)}{dt} = 2 \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 [O_2]$$

$$\text{velocidad de disolución} = \frac{1}{2} \frac{d(CN^-)}{dt} = \frac{1}{2} \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 [CN^-]$$



Además, en condiciones de estado estacionario la velocidad de la reacción catódica debe ser igual a la velocidad de la reacción anódica, por lo tanto:

$$2 \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 [O_2] = \frac{1}{2} \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 [CN^-]$$

Si consideramos que el área de interface total relevante para la disolución de oro, es  $A=A_1+A_2$ . Reemplazando en la expresión de la velocidad de disolución, finalmente resulta:

$$\text{velocidad de disolución} = \frac{2AD_{O_2}D_{CN^-}[O_2][CN^-]}{\delta\{D_{CN^-}[CN^-] + 4D_{O_2}[O_2]\}}$$

Esta es la ecuación cinética general de la cianuración y la que hay que saber interpretar.

Cuando la concentración de cianuro es muy baja, en la ecuación general el primer término del denominador puede ser desechado, por lo tanto, la ecuación de disolución se simplifica:

$$\text{velocidad de disolución} = \frac{1}{2} \frac{AD_{CN^-}}{\delta} [CN^-]$$

$$\text{velocidad de disolución} = k_1 [CN^-]$$

Esta última relación nos indica que, a bajas concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución depende solo de la concentración de cianuro, lo cual es apoyado por datos experimentales.

Por otro lado; si la concentración de cianuro es alta, el término de la derecha del denominador de la ecuación general se elimina quedando, por lo tanto:

$$\text{velocidad de disolución} = 2 \frac{A \mathcal{D}_{O_2}}{\delta} [O_2]$$

$$\text{velocidad de disolución} = k_2 [O_2]$$

De acuerdo a esto a altas concentraciones de cianuro la velocidad depende de la concentración de oxígeno, el cual también coincide con la experiencia.

También se puede deducir para que ocurra una máxima velocidad de disolución se tiene que cumplir que:

$$\frac{1}{2} \frac{A \mathcal{D}_{CN^-}}{\delta} [CN^-] = 2 \frac{A \mathcal{D}_{O_2}}{\delta} [O_2]$$

$$\mathcal{D}_{CN^-} [CN^-] = 4 \mathcal{D}_{O_2} [O_2]$$

Entonces, la velocidad límite máxima para la disolución del oro ocurre cuando:

$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} = 4 \frac{\mathcal{D}_{O_2}}{\mathcal{D}_{CN^-}}$$

Ahora bien, se ha determinado que la difusión de la molécula de cianuro hacia la interface es más dificultosa, primero, ya que al tener carga negativa tiende a asociarse en su movimiento con los protones presentes y, segundo, por ser de un tamaño, mayor que la del oxígeno. Entonces, no es extraño descubrir que la molécula de oxígeno, al ser un gas disuelto, presente una movilidad mayor, cerca de 1,5 veces más rápida que la del

cianuro. Por lo tanto, al medir experimentalmente los coeficientes de difusión respectivos, para 25°C, se tiene aproximadamente los siguientes valores:

$$D_{O_2} = 2,76 * 10^{-5} \text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$$

$$D_{CN^-} = 1,83 * 10^{-5} \text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$$

Es decir, se mantiene la relación  $\frac{D_{O_2}}{D_{CN^-}} = 1,5$ . Reemplazando estos valores resulta que: Astucuri (1984), la mayor velocidad para la disolución del oro ocurre cuando se cumple que las concentraciones del cianuro y del oxígeno disuelto se encuentran en una razón molar de aproximadamente seis.

$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} = 6$$

Por otra parte, a temperatura ambiente y presión atmosférica, en un litro de agua hay unos 8,2 mg de O<sub>2</sub> disuelto en el agua. Esto corresponde a unos 0,27\*10<sup>-3</sup> moles/litro de concentración de O<sub>2</sub> de acuerdo a esto la velocidad máxima de disolución del oro, con O<sub>2</sub> del aire a 1atm (P<sub>O<sub>2</sub></sub>=0,21atm), estará dada por una concentración de KCN de 0,079 g/Lo de 1,62\*10<sup>-3</sup> moles/litro (0,01%), aproximadamente, que es justamente lo que se observa en la práctica.

### **2.2.6. LIXIVIACIÓN DE MENAS AURÍFERAS CON SALES OXIDANTES EN MEDIO ÁCIDO MEDIANTE EL PROCESO SEVERO**

Palacios (1996), realizó el trabajo de lixiviación en menas auríferas, concentrados y material refractario (sulfurado), en pulpa en partículas a temperatura ambiente con

tiempo de lixiviación máximo de 12 horas, usando como medio lixivante el ácido sulfúrico concentrado adicionando sales oxidantes como los cloruros y nitratos de sodio en distintas proporciones, los resultados obtenidos respecto a la recuperación de oro alcanzan el 98%.

La adición de sales a la pulpa acida, tiene por finalidad producir cloro y agua regia in situ, lixivante energético para recuperar elementos nobles de concentrados y minerales auríferos.

### **2.2.7. PROCESO OPERATORIO DE LIXIVIACIÓN**

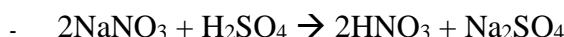
El presente proceso es innovativo y ecológico para la recuperación de menas y concentrados de oro y plata. Esta operación se lleva a cabo mediante la adición de sales en medio ácido y tiene las siguientes ventajas frente a los procesos convencionales:

- a) Alta sensibilidad a elementos incrustados en las menas de plomo, cobre, zinc, antimonio, etc.
- b) No interacciona con el azufre residual liberándolo del proceso
- c) Alta recuperación de oro y plata, elementos nobles como titanio, platino, etc.  
De las arsenopiritas y las calcopiritas
- d) Recuperación satisfactoria del oro de menas refractarias
- e) Regeneración del lixivante adicionando sales y precipitando sale

### **2.2.8. MECANISMO DE REACCIÓN**

Si en la mena aurífera existe plata, platino, talio, etc. dichos elementos valiosos son lixiviados bajo las siguientes semi-reacciones:

- El ácido nítrico se forma mediante la interacción de sodio con el ácido sulfúrico, mediante la reacción:



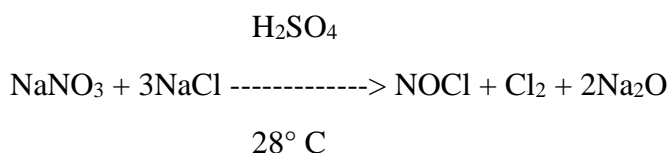
- Para obtener ácido clorhídrico se hace reaccionar cloruro de sodio más ácido sulfúrico, mediante la siguiente reacción:



Entonces el cloruro de sodio en reacción con el ácido sulfúrico primeramente forma bisulfato, en una segunda reacción reciente forma sulfato de sodio, como se nota en la reacción existente un exceso de cloruro de sodio y una formación de un exceso de ácido clorhídrico que se obtiene, el cual es benefactor para la lixiviación de los metales nobles presente el mineral.

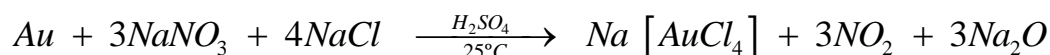
El nitrato de sodio de calidad comercial el cual interactiva en el medio ácido produciendo ácido nítrico in situ.

- El cloruro de sodio de igual manera es de calidad comercial, dichas reacciones favorecen en el proceso para poder formar el cloruro de nitrosilo. La formación de agua regia in situ en el medio acuoso soluble en agua de reacción:

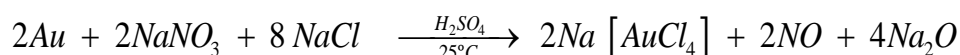


### 2.2.9. LIXIVIACIÓN CON EL MINERAL AURÍFERO

La interacción del mineral aurífero con el medio lixivante se desarrolla bajo la reacción:



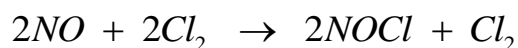
Dicha reacción no es recomendable por la generación del gas  $NO_2$ , que es altamente tóxico, por lo que se ha desarrollado la siguiente reacción química que es bastante favorable para el proceso de lixiviación con sales oxidantes:



Notará que se obtiene  $NO$ , óxido nítrico, el cual luego es regenerado a cloruro de nitrosilo. Se podrá establecer que la adición de las sales oxidantes es muy importante en el presente proceso, por lo que es necesario dosificar adecuadamente de tal manera evitar la contaminación del medio ambiente, ya que el presente proceso es ecológico, se regenera la solución lixivante para procesos posteriores de lixiviación de mineral fresco.

#### 2.2.10. RECICLADO DEL ÓXIDO NÍTRICO

Dicha reacción es espontánea ya que la presencia del ión cloro (en exceso) en el medio interactúan con el óxido nítrico y genera cloruro de nitrosilo y cloro naciente, por lo tanto, el gas nitrosilo siempre estará presente en dicho medio lixivante, bajo la siguiente reacción:



El óxido nítrico ( $NO$ ), a pesar de su carácter endotérmico, es perfectamente estable en condiciones normales. Es un gas incoloro, relativamente es poco soluble en agua, y no se combina con ella. Entrega su oxígeno con gran dificultad.

El óxido nítrico se combina directamente con el oxígeno. El dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), es un gas de color pardo, que se condensa fácilmente formando un líquido que hierve a  $210^\circ\text{C}$ . El  $\text{NO}_2$  es un agente oxidante muy poderoso.

El principal producto resultante de la reducción del ácido nítrico moderadamente fuerte, es el óxido nítrico y del concentrado, el dióxido de nitrógeno.

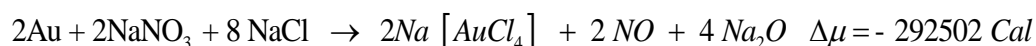
Si el proceso se lleva a cabo en disoluciones no muy concentradas, de los gases formados por descomposición del ácido nítrico solo se desprende óxido nítrico, puesto que el dióxido de nitrógeno, al reaccionar con el agua, da ácido nítrico y óxido nítrico.

El cobre reacciona con el ácido nítrico concentrado dando el gas dióxido de nitrógeno, de color pardo rojizo, mientras que con el mismo ácido diluido forma el óxido nítrico, incoloro:

### 2.2.11. TERMODINÁMICA DE LIXIVIACIÓN DEL ORO

Navarro et al., (2007). La termodinámica define el estado de equilibrio a que deberá llegar finalmente la reacción de lixiviación en las condiciones dadas, aunque en la práctica no se logre alcanzar el equilibrio.

La termodinámica nos indica qué reacciones son posibles, y cuáles no, por lo tanto, para las ecuaciones se obtuvieron los siguientes valores:



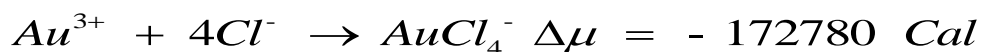
Dicha reacción es factible ya que la energía libre es espontánea, no requiriendo energía externa para su formación.

Por tal motivo es importante estudiar la termodinámica primero, antes de desarrollar cualquier trabajo que pueda impedir el estudio, los diagramas de estabilidad (Eh-pH) son representaciones termodinámicas del sistema que permiten visualizar de una manera global las zonas de estabilidad de los elementos y compuestos basándose en el pH y el potencial del proceso de oxidación y reducción. Dichas variables son tan importantes para mostrar la extensión de las reacciones, las cuales se pueden expresar mediante ecuaciones en que intervienen las variables mencionadas.

Siempre hay que tener presente que los diagramas representan, en cuanto a exactitud, por los datos experimentales un aproximado a la realidad, en dicho caso no se considera la cinética del proceso involucrado.

Los diagramas de estabilidad son herramientas muy valiosas para el estudio de los procesos de lixiviación. El conocimiento real de las variables permite tener una visión muy clara de lo que está ocurriendo en el proceso desde el punto de vista de las especies que están presentes en el medio.

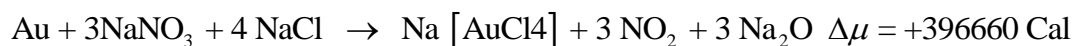
Una primera evaluación termodinámica indica que la disolución del oro, usando sales oxidantes a temperatura ambiente, es un proceso atractivo que se muestra a través de las siguientes reacciones:



La estabilidad del complejo es parte importante para su extensión en el medio, por lo cual es importante que la reacción sea de izquierda a derecha. Dicha reacción ocurre en medio ácido, en presencia de sales oxidantes. En particular, esto se puede lograr, adicionando adecuadamente las concentraciones de las sales de nitrato y cloruro de sodio



en el medio ácido, en la que los iones cloro son los controlantes del proceso, un exceso del nitrato genera gas  $\text{NO}_2$  contaminante para el medio ambiente.



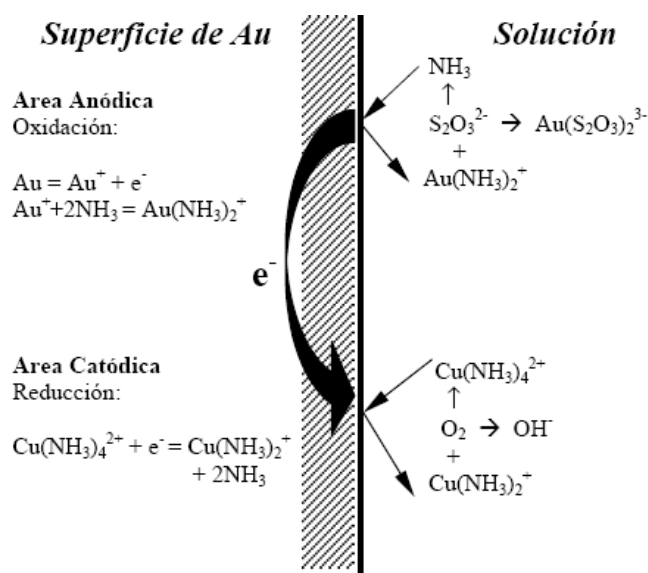
Dicha reacción no ocurre espontáneamente, ya que requiere energía externa o un exceso de nitrato de sodio.

Las especies resultantes de la reacción son  $\text{AuCl}_2$  y  $\text{AuCl}_4^-$  pero el oro (III) predomina en la forma del complejo.

### 2.2.12. PROCESO DE LIXIVIACIÓN

Marín, (1995). La disolución de oro en una solución de tiosulfato de amonio es una reacción que puede ser catalizada directamente por la presencia de ión cúprico. En el área anódica el oro es acomplejado simultáneamente tanto por el tiosulfato como por el amoniaco formando un aurotiosulfato  $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$  y una amina de oro  $\text{Au}(\text{NH}_3)_2^+$  respectivamente, siendo el complejo con tiosulfato el más estable termodinámicamente a pH cercano a 10. En la figura 1, se presenta un esquema de la lixiviación de oro con tiosulfato de amonio

El agente oxidante del oro metálico aparece en la solución como ión cúprico, a la forma de cuprotetramina  $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ .



**Figura 2.** Modelo electroquímico de la lixiviación de oro con tiosulfato de amonio.

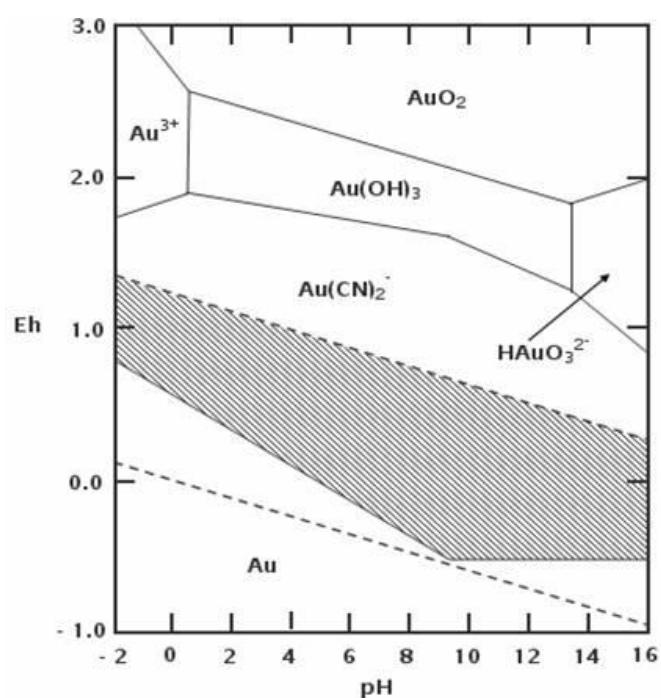
En la figura 2 se observa la disolución del oro al trabajar con 10% de sólidos para diferentes concentraciones de ión cúprico en la solución, desde 0 a 0,1 mol/l, manteniendo constante la concentración de tiosulfato de amonio y la temperatura. En todos los casos se tiene que la disolución de oro es muy rápida en las primeras horas para luego ir aumentando en forma lenta.

El hecho de aumentar la concentración de cobre en la solución produjo un aumento en el contenido de cuprotetramina la cual es el principal agente oxidante en el proceso de acuerdo al esquema presentado en la figura 1, de manera tal que su aumento se vio reflejado en una mayor disolución de oro, lográndose el mayor efecto para una concentración de 0,05 mol/l de  $\text{Cu}^{2+}$ .

### 2.2.13. CIANURACIÓN

Este proceso se ha venido aplicando desde finales del siglo XIX, cuando los escoceses John S. MacArthur y los hermanos Forrest (William y Robert), obtuvieron su patente en 1887 en el Reino Unido, sin embargo, la acción del cianuro de potasio como complejante del oro fue descubierta por el químico sueco Carl Scheele desde 1793.

En la figura 1, es posible apreciar la especie estable del oro en solución acuosa de cianuro y las condiciones necesarias para obtenerlas.



**Figura 3.** Diagrama de Pourbaix para el sistema de Au-CnH<sub>2</sub>O a 25 C para [Au]= 10<sup>-4</sup> M y [CN]=10<sup>-3</sup> M (Hiskey y Atlury, 1988)

Como ejemplo de la utilidad de los diagramas Eh – pH o de Pourbaix, veamos la Figura 3, en ella se observa que solamente el complejo ciano-auroso Au(CN)<sub>2</sub> - es el único compuesto estable en solución acuosa, además de encontrarse en toda la amplitud

del intervalo de pH, sin embargo, en la zona en donde se encuentran las condiciones más favorables por ser menos oxidantes, es a un pH cercano al 9.5.

Es muy importante señalar que debido al valor tan grande de la constante de estabilidad ( $pK=9.36$ ) del HCN (ácido cianhídrico), de carácter muy venenoso, en la práctica la cianuración se realiza bajo un pH de 10.5 a 12 (Dadgar, 1989).

#### **2.2.14. LA APLICACIÓN NOVEDOSA DE FERRICIANURO COMO UN OXIDANTE EN LA CIANURACIÓN DE ORO Y PLATA**

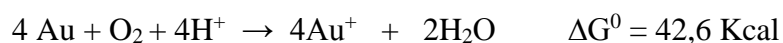
Xie Feng, et al (2007) estudió la lixiviación de minerales de oro y plata con cianuro – ferrocianuro, ha sido investigado con el propósito de mejorar la extracción de oro y plata.

Sin ferricianuro la extracción de oro y plata con solución de cianuro aireado alcanza 62 % y 24% respectivamente, después de una hora de lixiviación, con la presencia de 0,5 g/L de ferricianuro ( $K_3Fe(CN)_6$ ), la extracción de oro y plata alcanza a 87% y 47% respectivamente después de algunos tiempos de lixiviación. Con la presencia de ferricianuro, la extracción de oro tiende a ser estable después de lixiviación de 4 horas comparada a 12 horas sin ferricianuro, sin embargo, la extracción final de oro después de 48 horas de lixiviación fue de 92 a 94%.

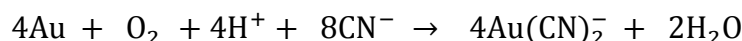
Obviamente el ferricianuro acelera la disolución de oro dando un pequeño efecto en la recuperación final de oro. La extracción de plata en los dos casos fue estable después de lixiviar por 12 y 30 horas respectivamente, indicando que la disolución de plata también fue acelerada.

La extracción final de plata después de 48 horas en la presencia de ferricianuro fue ligeramente alto 54 y 50% respectivamente. Este fue probablemente debido a la diferencia mineralógica entre oro y plata, ya que el análisis del mineral mostró la posible ocurrencia de sulfuro de plata que es dificultoso recuperar en el tradicional proceso de cianuración.

Houng. et al (1986), indica que la lixiviación de oro con cianuro de sodio es bien conocido y termodinámicamente probado que el oxígeno no oxida al oro en un ambiente normal.



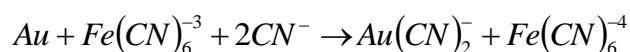
En la presencia de iones cianuro, el oro es fácilmente soluble. Existe formación de un complejo de cianuro de oro estable.



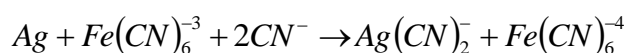
$$\Delta G^0 = - 172,58 \text{ Kcal}$$

### 2.2.15. DISOLUCIÓN DE ORO

La disolución de oro en solución de cianuro – ferricianuro se prepara 0,5 g/l de Fe como  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$  y 0,05 g/L de  $\text{NaCN}$ . Mostrando que el ferricianuro es un oxidante efectivo para disolver oro en solución cianuro, la disolución cianuro – ferricianuro puede ser expresado como la siguiente reacción:



También puede ser deducido que la disolución de plata en solución cianuro – ferricianuro es:

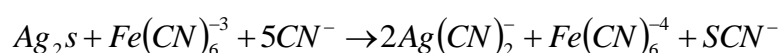


### 2.2.16. DISOLUCIÓN DE SULFURO DE PLATA

Navarro et al., (2001). La lixiviación de sulfuro de plata ( $Ag_2S$ ) con cianuro – ferricianuro ha sido investigado con el propósito de incrementar la extracción de plata, con la adición de 0,05 g/l de fierro (III) como ferricianuro a 0,5 g/l de NaCN, sin la presencia de oxígeno la extracción de plata incremento a más de 50% después de lixiviar 8 horas.

Cuando 0,5 g/l Fe (III) como ferricianuro fue añadido, el sulfuro de plata fue totalmente disuelto después de 24 horas.

La lixiviación de sulfuro de plata por el ferricianuro – cianuro es la siguiente:



La posible formación de  $Ag(CN)_3^{-2}$  o  $Ag(CN)_4^{-3}$  dependerá de la actividad de cianuro libre en la cianuración.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.3. MATERIALES DE LABORATORIO

##### 2.3.1. EQUIPOS Y MATERIALES

- Hornos de fundición CERAMICS USA.
- Planchas de calentamiento THERMOLYNE.
- Balanza Análítica Mettler Toledo.
- Muflas eléctricas.
- Pares de guantes de jebe (un par de manga larga y otro manga corta).
- Crisoles de porcelana.
- Espátulas de acero inoxidable de 150 mm.
- Pinza con punta curva de acero inoxidable.
- Pinceles N° 10.
- Embudos de vidrio.
- Vaso de precipitados de 600 ml, marca Duran.
- Estufa.
- Mallas de tamices ASTM.
- Material de vidrio.
- Papel filtro.
- Recipiente.
- Plancha de secado.
- Cianuro de sodio (14%).
- Acetato de plomo (10%).
- Zinc en polvo.

- Oxido de calcio.
- Crisoles N°30.
- Escorificadores de 2 ½” de diámetro.
- Copelas.
- Bolsas plásticas 4 x 8 x 2.
- Bolsas plásticas 8 x 10 x 2.

### 2.3.2. REACTIVOS E INSUMOS

- Reactivo Flux para oro.
- Nitrato de plata diluido (8%).
- Cianuro de potasio Q.P.
- Hidróxido de amonio Q.P.
- Hidróxido de sodio Q.P.
- Polvo de zinc.
- Harina de cocina.
- Cloruro de sodio (sal).
- Cloruro de bario.
- Fenoltaleina.
- Agua destilada Q.P.
- Bolsas plásticas 4 x 8 x 2.
- Bolsas plásticas 8 x 10 x 2.
- Papel indicador de pH, rango 0-14
- Cianuro de sodio (14%).
- Acetato de plomo (10%).
- Zinc en polvo.



- Oxido de calcio.
- Clorato de potasio.
- Ácido clorhídrico, P. A. 37% Riedel.
- Ácido sulfúrico, P.A. 98% Riedel.
- Hidróxido de sodio, P.A. 99%, Scharlau.
- Bicarbonato de sodio 98%.
- Ácido nítrico 46%.

#### 2.4. LIXIVIACIÓN DE ORO CON REACTIVO SANDIOSS

La lixiviación de minerales de oro se inicia con la preparación física de minerales y su posterior tratamiento químico, tal como se describe a continuación:

1. Se prepara 100 mL de solución de reactivo Sandioss al 1,0% y luego se transfiere en el vaso precipitado de 400 mL.
2. Se ajusta la solución Sandioss a pH 11 con lechada de cal.
3. Se pesa 10 g de mineral molido 80% - malla 200 y se agrega sobre la solución preparada.
4. Se instala el equipo de agitación mecánica tomando el tiempo  $t=0$ , se inicia la lixiviación con agitación continua durante 72 horas.
5. Terminado el tiempo de lixiviación se filtra la pulpa lavando los sólidos con agua destilada y luego se seca el sólido.
6. Se analiza el oro tanto en sólido y lixiviado por el método de fusión.
7. Se realizará cálculos para determinación de la ley de oro.

## 2.5. OPERACIONES PARA EL ANÁLISIS DE ORO

### 2.5.1. FLUX PARA FUNDICIÓN

Por naturaleza los minerales son infusibles por sí mismos, necesitándose la adición de reactivos o fundentes para hacer una mezcla fácilmente fusible a la temperatura del horno (900 a 950 °C). Los flujos utilizados para la determinación de oro, con los siguientes:

- 120 g Litargirio (64,51%)
- 60 g Bórax (32,26%)
- 6 g Carbonato de sodio (3,23%)

En el proceso de análisis de oro se efectúan varias fases bien definidas que se explicarán separadamente con el objeto de dar mayor claridad a los métodos operatorios que oportunamente se irán citando.

### 2.5.2. FUNDICIÓN

Para hacer la fusión, se pone en el crisol la mezcla de fundentes (flux) y sobre ella la muestra cuidadosamente pesada y encuartada, se mezclan perfectamente y se cubren con bórax y urea teniendo cuidado de que el crisol solo quede lleno hasta 2/3 partes de su altura. Se introducen los crisoles a la mufla caliente (900-950 °C) procurando que el calentamiento no sea muy rápido y cuando ha cesado el ruido característico (de ebullición) se dejan los crisoles a fusión tranquila de 50 a 60 minutos (por ser en mufla eléctrica), conociéndose que ya ha fundido el mineral cuando el crisol se ve transparente.

Se saca el crisol de la mufla, se mueve y golpea ligeramente para asentar el oro fundido y se echa poco a poco (continuo), en una lingotera caliente,

se deja enfriar, se separa la escoria del oro y se martillea, éste, para formar un cubo el cual irá a copelación.

### **2.5.3. INCUARTACION**

Cuando el contenido de plata en la muestra, es similar o menor que el oro, el ácido nítrico no disuelve la plata y en ese caso es necesario adicionar o incuarter más plata hasta tener unas 8 veces más platas que oro, lo que se hace adicionando plata en la fundición o en la copelación.

### **2.5.4. COPELACIÓN**

Tiene por objeto separar el oro y la plata de plomo que le colectó en la fusión o escorificación y consiste de una reacción oxidante en una copela, transformando el plomo metálico a óxido, que en su mayor parte (98,5% de PbO) es absorbido por la misma copela y una menor cantidad se volatiliza, quedando un botón brillante de oro y plata (oro en bullón) cuando la oxidación ha terminado.

Para copelar se introducen las copelas a la mufla y se cierra la puerta hasta que estén bien caliente. Se abre la puerta y con tenazas se colocan sobre ellas los cubos de plomo y se cierra nuevamente la puerta los botones de plomo se funden y cubren con una espuma oscura que desaparece en unos dos minutos si las copelas están bien calientes y el plomo se hace brillante, lo que indica que se han cubierto las copelas o que el plomo empieza a oxidarse.

Se vuelve a abrir la puerta para dar entrada al aire, la superficie del plomo se hace convexa y pasan de abajo pajitas de litargirio que indican que le botón se está moviendo, llamándose así por la apariencia que dan las pajitas de litargirio.

La temperatura de copelación es fundamental, pues si es alta se debe volatilizar la plata y si es baja no se volatiliza todo el plomo y una pequeña parte de él queda con el botón de oro y plata. Los humos de plomo oxidado dan buena indicación de la temperatura de copelación, pues si ascienden rápidamente la temperatura es elevada y si por el contrario descienden, la temperatura es baja. La temperatura adecuada (aproximadamente 850 °C) hace que los humos se desprendan lentamente y cristalicen en los bordes de la copela, dando un anillo de plumillas de litargirio alrededor del botón de oro y plata que quede al final de la copelación.

Hacia el final de proceso se cierra la puerta de la mufla para elevar la temperatura a unos 900 °C, y expulsar los últimos restos de plomo, se vuelve abrir la mufla para que el enfriamiento sea lento y al solidificarse el botón de oro y plata se produce el relámpago. Después de esto se sacan las copelas y se dejaban enfriar con la precaución, cuando los botones son grandes de sacarlas muy lentamente o tapar las copelas con otras más calientes para evitar el galleo o chisporroteo, que trae, fuertes pérdidas.

Los botones se despegan de las copelas con pinzas para botones y se limpian con un cepillo de cerda dura antes de pesarlos.

#### **2.5.5. APARTADO**

Para el apartado del oro y plata de los botones se usan crisoles de porcelana, dentro de los cuales se colocan los botones (estos botones antes de ponerlos en los crisoles se

martillean o laminan, si son muy grandes) y se llenan hasta las tres cuartas partes de su altura con ácido nítrico Q.P. diluido con agua destilada, exenta de cloruros, en la proporción de 5:1 y se calienta bien durante 20 minutos, pero sin llegar a la ebullición, hasta que cesa la disolución de la plata, con la precaución de que al final del ataque se decanta la solución y se adiciona ácido nítrico diluido 1:1 y se sigue calentando durante 15 minutos con el objeto de asegurarse de la lixiviación total de la plata, esto se hace especialmente cuando los contenidos de oro son altos.

Se decanta la solución y el oro se lava tres veces con agua destilada, se vuelven a calentar los crisoles para secar y se calcina el oro, dejándolo enfriar para pesarlo. El peso de oro restarlo del peso original del botón, y dará el de la plata.

## **2.6. ENSAYOS ANALÍTICOS EN LA DETERMINACIÓN DE ORO**

### **Determinación del oro en minerales dóciles y relaves**

1. Homogenizar, cuartear y secar, en una bandeja la muestra de relave o mineral.
2. Pulverizar la muestra seca hasta 100% malla – 100, homogenizar, cuartear y guardar aproximadamente 150 g de muestra en bolsa debidamente codificada y rotulada.
3. Pesarse en la balanza electrónica (dos decimales precisión) 25 g de muestra pulverizada.
4. Previamente un crisol preparado con un vasito del flux de fundente tipo “a” (100 g), se adiciona una cucharita de litargirio (5 g) e incuarte con plata metálica (0,15 g), se le agrega la muestra pesada anteriormente y se homogeniza con la ayuda de una espátula. Cubrir con una cucharadita de bórax. (5 g) y otra cucharita de urea (3 g).
5. Llevar a fundición, lingotear, moldear el régulo y llevar a copelación.

6. Secar enfriar y apartar la plata de oro.
7. Pesar y calcular.

$$\text{Ley} = \text{mg Oro} \times 1,16679 = \frac{\text{onz troy}}{\text{ton corta}}$$

Donde el valor 1,16679 es el factor de conversión.

Ejemplo: de 25 g de muestra se ha obtenido 0,456 mg de oro puro, su ley será.

$$\text{Ley} = 0,456 \times 1,16679 = 0,532 \frac{\text{onz troy}}{\text{ton corta}}$$

## 2.7. DETERMINACIÓN DE ORO EN SOLUCIONES LIXIVIADAS

1. La solución decantada de la pulpa, anterior ensayo, es filtrada en papel filtro lento para obtener una solución limpia.
2. Tomar solución filtrada en un vaso de precipitados, para cabeza 250 mL y para cola 500 mL.
3. Llevar el vaso sobre estufa caliente, agregar 25 mL de solución de acetato de plomo al 10% y adicionar 15 g de polvo de zinc, agitar con una baqueta para formar una esponja y calentar hasta ebullición.
4. Sacar y adicionar lentamente 20 mL de ácido clorhídrico por las paredes para disolver el exceso de zinc, dejar enfriar.
5. Filtrar en papel filtro enjuagando el precipitado con agua destilada hasta llevar pH = 7.
6. Tomar el papel filtro conteniendo con el precipitado y calcinarlo en un escorificador en mufla caliente, sacar y dejar enfriar.
7. Sobre el escorificador, con las cenizas, agregar una cucharada de flux de fundente tipo “b” (30 g) encuarte con plata metálica, una cucharita de litargirio (5 g) y cubrir con un poco de bórax.

8. Llevará a fundición, lingotear, separar el régulo, moldear y copelar.
9. Separar la plata de oro.
10. Pesarse, calcular y reportar.

$$\text{Ley de oro } \left(\frac{g}{TM}\right) = \frac{mg \text{ Au}}{\text{Volumen muestra}} * \text{Factor}$$

$$\text{Factor} = \frac{mg}{g} * \frac{1g}{1000mg} * \frac{1000g}{1Kg} * \frac{1000Kg}{1TM} = 1000 \frac{g}{TM}$$

Estas leyes indican los gramos de oro existentes en la solución que forma la pulpa con 1 TM de sólidos a una determinada densidad.

## 2.8. MODELO MATEMÁTICO PARA LA INVESTIGACIÓN

### 2.8.1. DISEÑO FACTORIAL DE EXPERIMENTOS

Es una técnica estadística que permite planificar eficientemente la experimentación de modo que con un número mínimo de ensayos se logra determinar la significancia de cada una de las variables independientes a ser evaluadas, el efecto de sus interacciones y se obtiene un modelo matemático empírico, que constituye la base para un proceso posterior de optimización.

El desarrollo de la presente investigación se basa en el diseño factorial de Kafarov, técnica de análisis estadístico que nos permitirá planificar y estimar adecuadamente los factores investigados.

Para nuestro caso los factores serán optimizados en experimentos factoriales generales, tomándose en cuenta tres factores con dos niveles.

Para la determinación de la muestra o número de experimentos, en un diseño factorial completa se da la siguiente ecuación:

$$N = 2^k$$

Siendo:

N = Número total de experimentos

k = Número de variables

Para un diseño factorial  $2^3$  para tres factores o variables originales (Concentración de reactivo sandioss, pH y tiempo de lixiviación) y cada factor con dos niveles  $k = 2$ , se tiene el siguiente modelo matemático de regresión:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_4X_1^2 + B_5X_2^2 + B_6X_3^2 + B_7X_1X_2 + B_8X_1X_3 + B_9X_2X_3$$

Siendo:

Y = Variable respuesta rendimiento

$X_1, X_2$  y  $X_3$  = Variables codificadas de entrada: Concentración de reactivo sandioss, pH y tiempo de lixiviación

$X_1X_2, X_1X_3, X_2X_3$  y  $X_1X_2X_3$  = Interacciones entre las tres variables principales

Primero hallaremos los valores de  $X_1, X_2$  y  $X_3$  en función a las variables de entrada del proceso y luego los valores de  $b_0, b_1, b_2, b_3, \dots, b_7$  (estimadores de los coeficientes de regresión) en función a la variable respuesta Rendimiento (Y).



**Tabla 2.** Niveles máximos y mínimos.

VARIABLES	FACTOR	UNIDAD	NIVEL (-) INFERIOR	NIVEL (+) SUPERIOR
X <sub>1</sub>	Concentración de sandioss	%	0,6	0,8
X <sub>2</sub>	pH	escala	10	11
X <sub>3</sub>	Tiempo de lixiviación	Horas	36	72

Fuente: Elaboración propia en base a niveles máximos y mínimos.

### 2.8.2. MATRIZ DE DISEÑO

Determinaremos con lo anterior el número de pruebas experimentales que vamos a realizar (combinando los valores máximo y mínimo de tres factores establecidos). Para un diseño  $2^3$  se tiene 8 pruebas experimentales. Además de acuerdo al principio de adición de Puntos Centrales (que proporciona protección contra el efecto curvatura y permite una estimación independiente del error que ha de obtenerse) (Miranda 1998 y Murphy 1976), se adiciona a la matriz 3 puntos centrales, vale decir la pruebas 8, 9 y 10 de la matriz. Así se tiene las siguientes combinaciones en la tabla 3.

**Tabla 3.** Matriz de diseño factorial  $2^3=8$ 

N° DE PRUEBA	DISEÑO	COMBINACIÓN DE NIVELES			VARIABLE RESPUESTA (RENDIMIENTO %) "Y"
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	
1	[1]	0,6	10	36	78,43
2	a	0,8	10	36	79,44
3	b	0,6	11	36	78,61
4	ab	0,8	11	36	80,19
5	c	0,6	10	72	89,63
6	ac	0,8	10	72	92,13
7	bc	0,6	11	72	90,74
8	abc	0,8	11	72	93,98
9	abcd	0,7	10,5	54	87,60
10	abcd	0,7	10,5	54	87,22
11	abcd	0,7	10,5	54	87,41

Fuente: Elaboración propia en base a diseño factorial 2

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

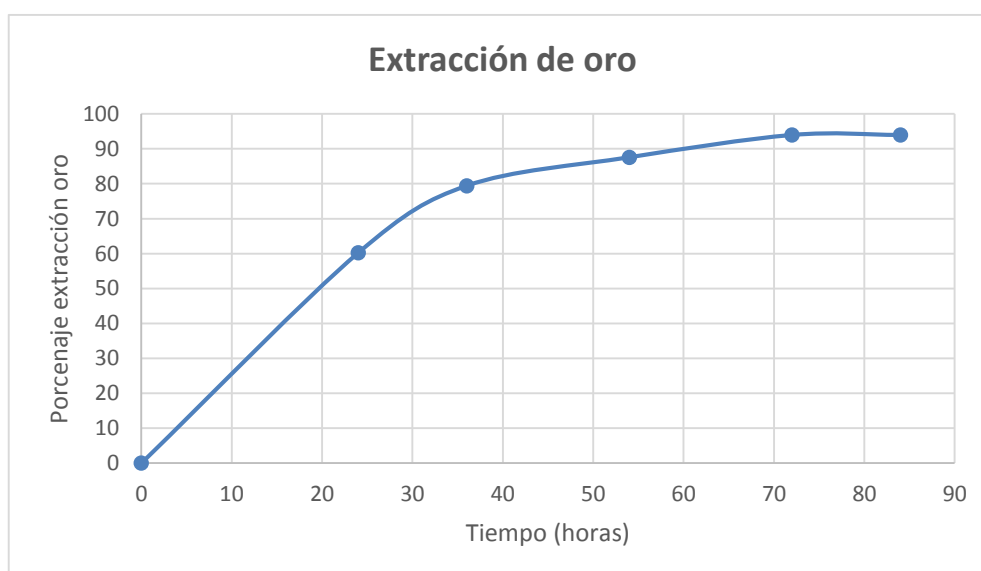
### 4.1. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE LIXIVIACIÓN DE ORO CON REACTIVO SANDIOSS

#### 4.1.1. RECUPERACIÓN DE ORO CON REACTIVO SANDIOSS

**Tabla 4.** Recuperación de oro.

Tiempo (horas)	% recuperación de Oro
0	0,000
24	60,23
36	79,44
54	87,60
72	93,98
84	93,99

Fuente: Resultado de prueba de lixiviación de oro



**Figura 4.** Porcentaje de recuperación de oro.

La figura 4, nos muestra el porcentaje de recuperación de oro a diferentes tiempos. La máxima recuperación alcanzada fue de 93,98 % de oro en un tiempo de 72 horas. Además, la gráfica nos muestra que a 36 horas alcanza extracción de 79,44% Au, esto nos indica que la cinética de reacción es rápida en las horas iniciales.

#### **4.2. PARÁMETROS ÓPTIMOS DE CONCENTRACIÓN DE SANDIOSS PH, Y TIEMPO DE LIXIVIACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO (AU)**

La influencia que el tiempo ejerce en el proceso de lixiviación de minerales de oro con reactivo sandioss en la empresa minera Colibrí es la variable de mayor influencia, se efectuó el modelo matemático por experimentación y estadística, según se observa en la tabla 3.

La tabla 11 del anexo A<sub>4</sub>, muestran que el pH óptimo es de 11, con un tiempo de 72 horas y una concentración de sandioss 0,8

El proceso de lixiviación de minerales de oro con reactivo sandioss depende de una serie de características físico-químicas del reactivo y muy especialmente del tiempo.

El tiempo junto con la dosis de reactivo sandioss, son los factores que influyen en el proceso de recuperación de oro. Su influencia es determinante ya que afecta a todos los equilibrios de lixiviación que se producen.

#### **4.3. MODELO MATEMÁTICO PARA EL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ORO POR EL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN**

La ecuación de regresión generada representa a los datos experimentales que le dieron origen y describe el sistema bajo estudio.

La validez del modelo de regresión matemático queda demostrada por la similitud de los valores hallados por el modelo matemático y los resultados experimentales.

Por consiguiente, se concluye que el tiempo, es la variable más significativa en el proceso de recuperación de oro por el método de lixiviación por agitación.

$$Y = 93,5748 - 30,6125*\text{Sandioss} - 2,4375*\text{pH} - 0,0695139*\text{Tiempo} + 2,825*\text{Sandioss}*\text{pH} + 0,20625*\text{Sandioss}*\text{Tiempo} + 0,0256944*\text{pH}*\text{Tiempo}$$

#### 4.4. RENDIMIENTO Y CAPACIDAD DE RECUPERACIÓN DE ORO POR EL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN, A PARTIR DE MINERALES PROVENIENTES DE LA ZONA OXIDADA DE LA EMPRESA MINERA COLIBRÍ S.A.C

##### 4.4.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN

Peso de mineral	: 100 g
Ley de cabeza en oro	: 10,80 g/TM Au
Granulometría	: 80% -malla 200
Concentración de reactivo Sandioss	: 0,6% y 0,8%
Ph	: 11 (con cal)
Volumen lixivante	: 200 mL
Cantidad de Sandioss	: 1,6 g
Velocidad de agitación	: 200 rpm
Porcentaje de sólidos	: 33,3%
Tiempo de lixiviación	: 72 h

#### 4.4.2. RENDIMIENTO Y CAPACIDAD DE RECUPERACIÓN DE ORO

En la tabla 5 se observa el rendimiento de recuperación de oro por el método de lixiviación por agitación, a partir de minerales provenientes de la zona oxidada de la Empresa Minera Colibrí S.A.C

El mayor porcentaje de rendimiento es de 93,98 % con la aplicación de 0,8 % del reactivo sandioss, un pH de 11 y un tiempo de 72 horas.

**Tabla 5.** Resultados de cálculo de porcentaje de extracción de oro.

Nº de ensayo	X1 (Sandioss) %	X2 (pH)	X3 (Tiempo)	% Extracción de oro
1	0,6	10	36	78,43
2	0,8	10	36	79,44
3	0,6	11	36	78,61
4	0,8	11	36	80,19
5	0,6	10	72	89,63
6	0,8	10	72	92,13
7	0,6	11	72	90,74
<b>8</b>	<b>0,8</b>	<b>11</b>	<b>72</b>	<b>93,98</b>

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5. COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

**Tabla 6.** Comparación de métodos en la extracción de oro.

MÉTODOS DE TRATAMIENTO	RECUPERACIÓN DE ORO
- Cianuración convencional	- 90–95%
- Proceso Severo	- 98%
- Tiosulfato de Amonio catalizada con ión cúprico	- 93%
- Cianuro-Ferricianuro	- 94%
- Cianuración con cianuro de sodio (mineral oxidado Mina Colibrí Arequipa)	- 94%
- Lixiviación con reactivo Sandioss - (mineral oxidado Mina)	- 93,98%

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 6 nos muestra los resultados de extracción de oro utilizando diferentes métodos. Según Misari (1993) la recuperación de oro mediante procesos convencionales de cianuración se obtuvo 90 a 95% de extracción en un tiempo de 24 a 48 horas. Palacios (1994) utilizó sales oxidantes en la lixiviación de oro, conocido hoy en día como proceso Severo, mediante este proceso logró recuperar al 98%. Las últimas investigaciones realizadas por Navarro et al (2001) en la lixiviación de oro con tiosulfato de amonio catalizada con ión cúprico alcanzó 93% de extracción de oro. La aplicación novedosa de Xie Feng et al (2007) con ferricianuro como un oxidante en la cianuración de oro y plata a partir de minerales sulfurados alcanzaron extracciones de 94% en oro. La investigación realizada por el método de lixiviación por agitación a partir de minerales de minerales oxidados de la Mina Colibrí alcanzó una recuperación de 93,98 %. Este resultado nos

indica que la recuperación es comparable con métodos convencionales de cianuración y otros procesos indicados en la tabla 6. Por lo tanto, se concluye que los resultados obtenidos son comparables con otras investigaciones realizadas.



## V. CONCLUSIONES

- El reactivo Sandioss disuelve el oro contenido en minerales oxidados de la Mina Colibrí Arequipa. La recuperación del oro mediante la lixiviación por agitación con reactivo Sandioss fue de 94%.
- Las variables óptimas de lixiviación de oro con reactivo Sandioss fueron:
  - Concentración de reactivo Sandioss : 0,8%
  - pH : 11
  - Tiempo de lixiviación : 72 horas
- El porcentaje de extracción de oro con reactivo Sandioss es tan igual que la extracción de oro con cianuro de sodio para el mineral oxidado de la Mina. Colibrí Arequipa.
- La ecuación del modelo matemático obtenido es:

$$Y = 93,5748 - 30,6125*\text{Sandioss} - 2,4375*\text{pH} - 0,0695139*\text{Tiempo} + 2,825*\text{Sandioss}*\text{pH} + 0,20625*\text{Sandioss}*\text{Tiempo} + 0,0256944*\text{pH}*\text{Tiempo}$$

- El rendimiento de recuperación de oro por el método de lixiviación por agitación, a partir de minerales provenientes de la zona oxidada de la Empresa Minera Colibrí S.A.C. es de 93,98 % con la aplicación de 0,8 % del reactivo sandioss, un pH de 11 y un tiempo de 72 horas.

## VI. RECOMENDACIONES

- Aplicar a escala industrial el uso de reactivo Sandioss en la extracción de oro por ser ecológico.
- Realizar un programa de difusión de las ventajas que tiene el reactivo sandioss en el proceso de lixiviación de tal manera que evite la contaminación con cianuro.
- Realizar la lixiviación de oro con reactivo Sandioss utilizando oxidantes con la finalidad de incrementar la recuperación de oro.
- Realizar la lixiviación de minerales sulfurados de oro y plata con reactivo Sandioss.
- Utilizar las normas de seguridad de laboratorio en manejo de reactivos.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bueno, Antonio; Cáceres N., (1995). Diseños Experimentales en Investigación Aplicada, UNSAAC, Cusco-Perú.
- Ballester-Verdeja-Sancho (2000) Metalurgia extractiva, fundamentos. Editorial Síntesis. Madrid. España.
- Bedoya C, Erasmo, (1997). Efecto del Oxígeno en la Lixiviación de Sulfuros Auríferos de Inti Raymi S.A. Oruro-Bolivia.
- Cárdenas R., A, (1993). Metalurgia Extractiva del Oro, Ed. Imral Ltda., Oruro-Bolivia.
- Cochran, W.G.; Cox, G. M., (1997). Diseños Experimentales, Trillas, 2da edición, México.
- Domic M, Esteban, (2001). Hidrometalurgia, Fundamentos, Procesos y Aplicaciones
- Glandt, Eduardo D., (2001). Optimization of Chemical Processes, Segunda Edición, McGraw-Hill Higher Education, University of Pennsylvania.
- Gonzales, Jorge y Mora, Hermes,F.(2006). Tostación, Empleando Microondas, en Menas Refractarias Auríferas y su Efecto en la Extracción del Oro. Universidad Nacional de Colombia – Medellín.
- Houng, D.H.H.; Twidwel, D.L.G. y Miller, D.J.D. (1986). Hidrometalurgia, Tomo II Editorial San Marcos, Lima.
- kopacz, Stanislaw; Mikulski, Teofil, (1990). The Rare Elements, Occurrence and Technology, Oxford-New Cork-Tokio.
- Misari, Ch., Fidel Sergio, (1993). Metalurgia del Oro, Volumen I y II, Primera Edición, editorial Litoral, Lima-Perú.
- McCabe, L. W., Smit, J. C., Harriott, P. (1998). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Editorial McGraw-Hill, Inc., España.

- Marín Escalona, Luis. (2007). Aglomerado y Curado en el Proceso de Lixiviación de Minerales.
- Navarro D., Villarroel P., Alguacil P., (2001). Lixiviación de Oro con Tiosulfato de Amonio Catalizada con ión Cúprico desde un Concentrado Polimetálico, Sam-Conamet-AAS, Santiago de Chile.
- Ramidez Monreal, Ricardo, (1970). Oro, Plata y Cobre, Editorial Zig-Zag, Santiago-Chile.
- Smith, Adrián; Mudder Ferry, (1992). The Chemistry and Treatment of Cyanidation Waste, Edición Mining, England.
- Sancho, José; Verdeja, Luís Felipe, (1998). Metalurgia Extractiva, Volumen I y II Editorial Síntesis, México.
- Salinas E., Rivera I., Carrilo F. R., Patiño F., Hernández J., (2004). Mejora del Proceso de Cianuración de Oro y Plata, Mediante la Preoxidación de Minerales Sulfurosos con Ozono. Rev. Soc. Quim. México. 48, 315-320.
- Terkel, Rosenquist, (1987). Fundamentos de Metalurgia Extractiva, Ed. Limusa, México.
- Treybal, R. E. (1980). Operaciones de Transferencia de Masa. Editorial McGraw-Hill. México.
- Torre, Chauvin, Ernesto; Guevara Caiquetan, Alicia (2005). Recuperación de Oro a partir de Minerales Refractarios Polisulfurados.
- Tecsup (2010). Metalurgia Extractiva del Oro. Convenio de Cooperación Técnica.
- Vargas Gallardo, Juan, (1995). Metalurgia del Oro y la Plata, Editorial San Marcos, Lima-Perú.
- V. N.John; E. M., Dorr, (1996). Cianuración y Concentración del Minerales de Oro y Plata, 3ra, Ed. Me Graw-Hill, New York y London.
- Yáñez Traslaviña, J.J., García Páez, I.H., Pedraza Rosas J.E., Laverde Cataño, D. (2005).

Caracterización de los Minerales Auríferos de la zona Minera de San Pedro Frio  
(Bolívar-Colombia). Universidad Nacional de Colombia Medellín Colombia.

Yong Sohn, Hong; Wadsworth, Milton E., (1986). Cinética de los Procesos de la  
metalurgia Extractiva, Editorial Trillas S. A., Primera Edición.

XieFeng, Dreysinger David, Lu Jianming, (2007). La Aplicación Novedosa de  
Ferricianuro como Oxidante en la cianuración de oro y plata,  
ScienceDirectIngeniería de Minerales, Canada.

## ANEXOS

ANEXO A: Reporte de laboratorio químico con reactivo sandioss

ANEXO B: Reporte de laboratorio químico con cianuro de sodio

ANEXO C: Reporte de laboratorio químico con reactivo sandioss

ANEXO D: Diseño experimental para la lixiviación de minerales de oro

- 4.1. Tratamiento estadístico con diseño factorial
- 4.2. Diagrama de Pareto
- 4.3. Estimación de efectos y modelo matemático
- 4.4. Optimización de respuesta

ANEXO E: Fotografías de equipo de laboratorio

ANEXO A

REPORTE DE LABORATORIO QUÍMICO CON REACTIVO SANDIOSS



Chaparra - Caraveli - Arequipa  
ANÁLISIS DE ORO (MÉTODO FUSIÓN)  
REPORTE DE LABORATORIO

FECHA : 4/03/2018 Turno Dia  
SEÑORES: Norma Nery Ccari Sirena DNI. 70544205  
TIPO DE MUESTRA: Mineral oxido Lixiviada

ANALISIS CON REACTIVO SANDIOSS

DESCRIPCIÓN	Ley Au (g/TM)	Ley Ag(g/TM)	Ley Cu (%)
CABEZA Muestra	10.800		0.23
MUESTRA Solido	0.650		0.22
MUESTRA Liquido	6.600		

.....  
Jefe de Laboratorio Químico  
Juan Vasquez  
DNI 31305373

.....  
Basilides Juan Vasquez Rojas  
DNI: 31305373  
JEFE DE LAB. QUIMICO  
MINERA COLIBRÍ S.A.C.

ANEXO B

REPORTE DE LABORATORIO QUÍMICO CON CIANURO DE SODIO



Chaparra - Caraveli - Arequipa  
ANÁLISIS DE ORO (MÉTODO FUSIÓN)

REPORTE DE LABORATORIO

FECHA : 4/03/2018 Turno Dia  
SEÑORES: Norma Nery Ccari Sirena DNI. 70544205  
TIPO DE MUESTRA: Mineral oxido Lixiviada

ANALISIS CON CIANURO DE SODIO

DESCRIPCIÓN	Ley Au (g/TM)	Ley Ag(g/TM)	Ley Cu (%)
CABEZA Muestra	10.800		0.23
MUESTRA Solido	0.600		0.22
MUESTRA Liquido	6.900		

Jefe de Laboratorio Químico

Juan Vasquez

DNI 31305373

Basildes Juan Vasquez Rojas  
DNI: 31305373  
JEFE DE LAB. QUIMICO  
MINERA COLIBRÍ S.A.C.



ANEXO C

REPORTE DE LABORATORIO QUÍMICO CON REACTIVO SANDIOSS



Chaparra - Caraveli - Arequipa  
**ANÁLISIS DE ORO (MÉTODO FUSIÓN)**  
**REPORTE DE LABORATORIO**

FECHA : 4/03/2018 Turno Dia  
 SEÑORES: Norma Nery Ccari Sirena DNI. 70544205  
 TIPO DE MUESTRA: Mineral oxido Lixiviada

**ANALISIS CON REACTIVO SANDIOSS**

DESCRIPCIÓN	Ley Au (g/TM)
MUESTRA RELAVE 1	2.33
MUESTRA RELAVE 2	2.22
MUESTRA RELAVE 3	2.31
MUESTRA RELAVE 4	2.14
MUESTRA RELAVE 5	1.12
MUESTRA RELAVE 6	0.85
MUESTRA RELAVE 7	1.00
MUESTRA RELAVE 8	0.65
MUESTRA RELAVE 9	1.34
MUESTRA RELAVE 10	1.38
MUESTRA RELAVE 11	1.36

.....  
 Jefe de Laboratorio Químico  
 Juan Vasquez  
 DNI 31305373

Basildes Juan Vasquez Rojas  
 DNI: 31305373  
 JEFE DE LAB. QUIMICO  
 MINERA COLIBRÍ S.A.C.

## ANEXO D

**DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE  
ORO**

**4.1. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO CON DISEÑO FACTORIAL**

**Tabla 7.** Resultados de pruebas de lixiviación de oro.

Nº de ensayo	X1 (Sandioss) %	X2 (pH)	X3 (Tiempo-hrs)	Ley de oro en mineral (g/TM)	Cantidad de oro en relave (g/TM)
1	0,6	10	36	10,80	2,33
2	0,8	10	36	10,80	2,22
3	0,6	11	36	10,80	2,31
4	0,8	11	36	10,80	2,14
5	0,6	10	72	10,80	1,12
6	0,8	10	72	10,80	0,85
7	0,6	11	72	10,80	1,0
8	0,8	11	72	10,80	0,65
9	0,7	10,5	54	10,80	1,34
10	0,7	10,5	54	10,80	1,38
11	0,7	10,5	54	10,80	1,36

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de la matriz de diseño Experimental

**Tabla 8.** Resultados de cálculo de oro extraído.

N° de ensayo	X1 (Sandioss) %	X2 (pH)	X3 (Tiempo-hrs)	Ley de oro en mineral (g/TM)	Extracción de oro (g/TM)
1	0,6	10	36	10,80	8,47
2	0,8	10	36	10,80	8,58
3	0,6	11	36	10,80	8,49
4	0,8	11	36	10,80	8,66
5	0,6	10	72	10,80	9,68
6	0,8	10	72	10,80	9,95
7	0,6	11	72	10,80	9,80
8	0,8	11	72	10,80	10,13
9	0,7	10,5	54	10,80	9,46
10	0,7	10,5	54	10,80	9,42
11	0,7	10,5	54	10,80	9,44

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 9.** Análisis de Varianza para Lixiviación de oro.

Fuente: Calculados por programa STATGRAPHICS Centurión XVI.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Sandioss (%)	8.30281	1	8.30281	3.63	0.1293
B: pH	1.72051	1	1.72051	0.75	0.4345
C: Tiempo (hrs)	307.892	1	307.892	134.73	0.0003
AB	0.159613	1	0.159613	0.07	0.8046
AC	1.10261	1	1.10261	0.48	0.5255
BC	0.427813	1	0.427813	0.19	0.6876
Error total	9.14094	4	2.28524		
Total (corr.)	328.746	10			

R-cuadrada = 97.2195 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 93.0486 porciento

Error estándar del est. = 1.5117

Error absoluto medio = 0.80876

Estadístico Durbin-Watson = 2.74407 (P=0.9984)

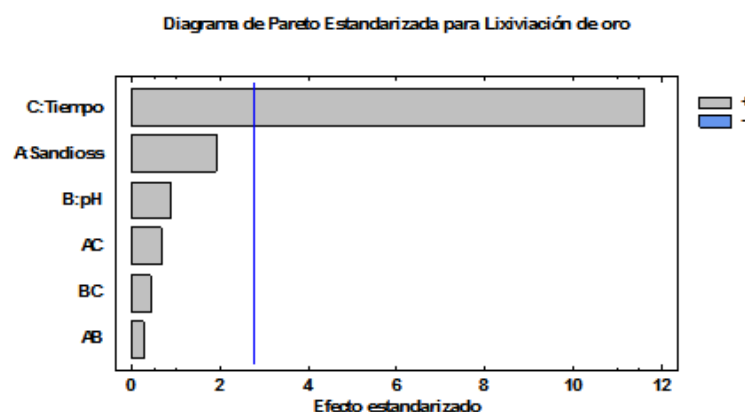
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.405859

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Lixiviación de oro en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 1 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 97.2195% de la variabilidad en Lixiviación de oro. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más

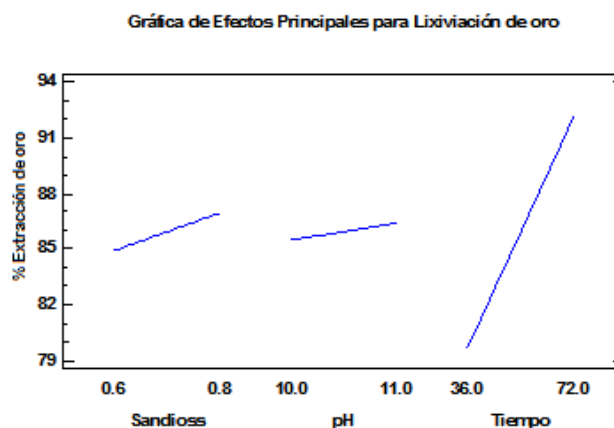
adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 93.0486%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 1.5117. El error medio absoluto (MAE) de 0.80876 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

#### 4.2. DIAGRAMA DE PARETO



**Figura 5.** Diagrama de Pareto estandarizado.

El diagrama de Pareto de la Figura 5, nos muestra los efectos de las variables en la extracción de oro con reactivo Sandioss. El factor C (tiempo) tiene mayor efecto significativo en la recuperación de oro. Seguido del factor A (Concentración de reactivo sandioss). El de menor efecto puro es el factor B (pH). La interacción AC y BA son poco significativas y, la interacción AB muestra efectos de menor significancia en la extracción de oro.



**Figura 6.** Efectos de interacciones en la recuperación de cromo.

La figura 6, nos muestra los efectos principales. La primera línea para reactivo Sandioss se incrementa al aumentar la concentración del lixiviante. La línea de pH se incrementa ligeramente al aumentar el pH y la última línea de tiempo nos indica que la recuperación de oro se aumenta rápidamente al incrementar el tiempo.

### 4.3. ESTIMACIÓN DE EFECTOS Y MODELO MATEMÁTICO

Nombre del archivo: C:\Archivos de programa\Statgraphics\STATGRAPHICS Centurion XVI.I\Data\Sandioss.sfx

Comentario: Lixiviación de oro

**Tabla 10.** Efectos estimados para Lixiviación de oro (%).

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
Promedio	85.9273	0.455795	
A: Sandioss	2.0375	1.06893	1.0
B: pH	0.9275	1.06893	1.0
C: Tiempo	12.4075	1.06893	1.0
AB	0.2825	1.06893	1.0
AC	0.7425	1.06893	1.0
BC	0.4625	1.06893	1.0

Fuente: Efectos estimados por programa STATGRAPHICS Centurion XVI.

La tabla 10 muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1.0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

**Tabla 11.** Coeficiente de regresión para Lixiviación de oro.

Coeficiente	Estimado
Constante	93,5748
A: Sandioss	-30,6125
B: Ph	-2,4375
C: Tiempo	-0,0695139
AB	2,825
AC	0,20625
BC	0,0256944

**Fuente:** Coeficientes estimados por programa STATGRAPHICS

La ecuación del modelo matemático ajustado es:

$$\begin{aligned} \text{Lixiviación de oro} = & 93,5748 - 30,6125*\text{Sandioss} - 2,4375*\text{pH} - \\ & 0,0695139*\text{Tiempo} + 2,825*\text{Sandioss}*\text{pH} + 0,20625*\text{Sandioss}*\text{Tiempo} + \\ & 0,0256944*\text{pH}*\text{Tiempo} \end{aligned}$$

En donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuesta de la lista de Opciones Gráficas.

#### 4.4. OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTA

##### Optimizar Respuesta

Meta: maximizar Lixiviación de oro

Valor óptimo = 94,3573

**Tabla 12.** Valores de variables óptimos.

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
Sandioss	0,6	0,8	0,8
pH	10,0	11,0	11,0
Tiempo	36,0	72,0	72,0

Fuente: Valores óptimos estimados por programa STATGRAPHICS

La tabla 12, muestra la combinación de niveles de factores que maximiza la función recuperación de oro. También muestra la combinación de factores a la cual se alcanza el óptimo. La máxima optimización alcanzada en la lixiviación de oro con reactivo Sandioss es de 94,3573%. Así mismo muestra las variables óptimas como la concentración de reactivo Sandioss 0,8%; pH 11 y tiempo de lixiviación de 72 horas.



## ANEXO E

## FOTOGRAFÍAS DE EQUIPO DE LABORATORIO



**Figura 7.** Balanza Analítica - Laboratorio Metalúrgico.



**Figura 8.** Cuarteo de muestra - Laboratorio Metalúrgico.



**Figura 9.** Pesado de muestra - Laboratorio Metalúrgico.



**Figura 10.** Pesado de reactivo - Laboratorio Metalúrgico.



**Figura 11.** Mineral, Cianuro de Sodio y Reactivo Sandioss - Laboratorio Metalúrgico.



**Figura 12.** Control de pH - Laboratorio Metalúrgico.



**Figura 13.** Equipo rotámetro - Laboratorio Metalúrgico.



**Figura 14.** Medición de pH - Laboratorio Metalúrgico.