

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“CONDICIONES ÓPTIMAS DE LIXIVIACIÓN  
MICROBIANA EMPLEANDO *Acidithiobacillus ferrooxidans*  
COMO PRETRATAMIENTO PARA LA CIANURACIÓN DE  
MINERAL SULFURADO AURÍFERO”**

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

**HANS LUCIANO CAYO GONZALES**

**Callao, Julio, 2016**

**PERÚ**

## PRÓLOGO DEL JURADO

La presente tesis fue sustentada por el Bachiller CAYO GONZALES HANS LUCIANO, ante el JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS conformado por los siguientes Docentes Ordinarios:

Dr. OSCAR JUAN RODRÍGUEZ TARANCO	Presidente
Ing. ROBERTO LAZO CAMPOSANO	Secretario
Mg. SONIA ELIZABETH HERRERA SÁNCHEZ	Vocal
Dr. JULIO CÉSAR CALDERÓN CRUZ	Asesor

Tal como está asentado en el Libro de Actas de Sustentación de tesis N<sup>o</sup> 02, Folio N<sup>o</sup> 78, Acta N<sup>o</sup> 261, de fecha Catorce de Julio de 2016, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico, de acuerdo a lo normado por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado por Resolución N<sup>o</sup> 082-2011-CU de fecha 29 de abril de 2011, modificado con Resolución N<sup>o</sup> 221-2012-CU de fecha 19 de setiembre de 2012.

**LIBRO 2 FOLIO No.78 ACTA N° 261 DE SUSTENTACION DE TESIS SIN  
CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO QUÍMICO**

El día Catorce de julio del Dos Mil Dieciséis, siendo las..... horas, se reunió el JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS de la Facultad de Ingeniería Química, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

Ing. RODRIGUEZ TARANCO OSCAR JUAN	: Presidente
Ing. LAZO CAMPOSANO ROBERTO	: Secretario
Ing. HERRERA SANCHEZ SONIA ELIZABETH	:Vocal
Ing. CALDERON CRUZ JULIO CESAR	:Asesor

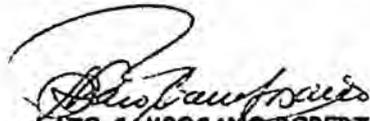
con el fin de dar inicio al acto de sustentación de tesis del Señor Bachiller CAYO GONZALES HANS LUCIANO, quien habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico, sustenta la tesis titulada "CONDICIONES ÓPTIMAS DE LIXIVIACIÓN MICROBIANA EMPLEANDO ACIDITHIOBACILLUS FERROXIDANS COMO PRETRATAMIENTO PARA LA CIANURACIÓN DE MINERAL SULFURADO AURÍFERO".

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la exposición de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, se acordó: Dar por *Aprobada* con el calificativo *Excelente* al expositor Señor Bachiller CAYO GONZALES HANS LUCIANO.

Se dio por cerrada la Sesión a las *15:40* horas del día catorce del mes y año en curso.

Ing.   
RODRIGUEZ TARANCO OSCAR  
JUAN

Presidente

Ing.   
LAZO-CAMPOSANO ROBERTO  
Secretario

Ing.   
HERRERA SANCHEZ SONIA  
ELIZABETH  
Vocal

Ing.   
CALDERÓN CRUZ JULIO CESAR  
Asesor

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Recomendaciones de los Señores Miembros del Jurado de Sustentación al Sustentante, para que realice las correcciones de la tesis antes de su aprobación.

TESISTAS : Bachiller CAYO GONZALES HANS LUCIANO.

TITULO DE LA TESIS: CONDICIONES ÓPTIMAS DE LIXIVIACIÓN MICROBIANA EMPLEANDO ACIDITHIOBACILLUS FERROXIDANS COMO PRETRATAMIENTO PARA LA CIANURACIÓN DE MINERAL SULFURADO AURÍFERO"

I. - PRESIDENTE:

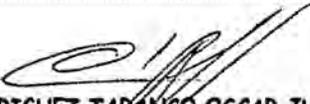
.....  
.....  
.....

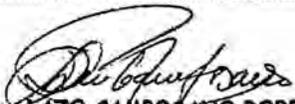
II. - SECRETARIO:

*Debe consignar la eliminación de metales pesados.*

III. - VOCAL:

.....  
.....  
.....

  
Ing. RODRIGUEZ TARANCO OSCAR JUAN  
Presidente

  
Ing. LAZO CAMPOSANO ROBERTO  
Secretario

  
Ing. HERRERA SANCHEZ SONIA ELIZABETH  
Vocal

Bellavista, 14 de julio 2016

PILY C.

## DEDICATORIA

A Dios por brindarme la convicción y fortaleza para llegar a este momento tan importante de mi vida profesional.

A mis padres por enseñarme que la disciplina y perseverancia permiten cumplir con los objetivos trazados.

A mi hermana por los consejos brindados.

A mi abuela que desde el cielo siento que está conmigo siempre guiándome y sé que este momento hubiera sido tan especial para ella como lo es para mí.

## AGRADECIMIENTO

Mi especial agradecimiento a los catedráticos de la Universidad Nacional del Callao, al Dr. Julio César Calderón Cruz por la asesoría, al Mg. Agerico Pantoja Cadillo y al Dr. Oscar Juan Rodríguez Taranco por los consejos y la orientación brindada durante las diferentes etapas en el enfoque y la redacción de la tesis.

A la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, en especial al Mg. Vladimir Arias Arce a cargo del grupo de investigación en Biometalurgia de la Facultad de Ingeniería Metalúrgica, a la Ing. Janeth Quiñones Lavado a cargo del círculo de estudios de Mineralogía de la Escuela de Ingeniería Geológica y al Dr. Abad Flores Paucarima del grupo de Investigación en Biotecnología de la Facultad de Ciencias Biológicas; quienes desinteresadamente me permitieron realizar los diversos ensayos como parte de los proyectos de investigación PMI2014L02 y 141601051, auspiciados por el Vicerrectorado de Investigación, sin ellos no hubiera sido posible concretar este objetivo anhelado.

Al M. Sc. José Andrés Yparraguirre Calderón por brindarme las instalaciones del laboratorio de caracterización mineralógica en la empresa FA Ingenieros S.A.C.

A la Ing. Norma Ortiz Aguirre de K.W. Química Germana S.A.C. por los consejos brindados sobre los análisis por absorción atómica y análisis mineralógico que permitieron obtener mejores resultados.

Y por último a todas las personas que directa e indirectamente contribuyeron para la realización del presente trabajo.

## ÍNDICE

TABLAS DE CONTENIDO	4
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
1.1 Identificación del problema.....	10
1.2 Formulación del problema.....	11
1.3. Objetivos de la investigación.....	11
1.4. Justificación.....	12
1.5. Importancia.....	13
II. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1 Antecedentes del estudio.....	14
2.2 Microorganismos en los procesos de lixiviación microbiana.....	15
2.3 Características de <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> .....	18
2.4 Lixiviación microbiana.....	19
2.5 Mecanismos de lixiviación microbiana.....	20
2.6 Adherencia microbiana a minerales sulfurados.....	23
2.7 Precipitación del ión férrico.....	28
2.8 Diseño experimental.....	34
2.9 Aplicaciones del diseño experimental.....	34
2.10 Optimización.....	35
2.11 Diseño experimental hexagonal.....	35
2.12 Cianuración de oro y plata.....	36
2.13 Métodos de cianuración.....	40

2.14	Definiciones de términos básicos.....	42
III.	VARIABLES E HIPÓTESIS.....	50
3.1	VARIABLES DE INVESTIGACIÓN.....	50
3.2	Operacionalización de variables.....	50
3.3	Hipótesis .....	51
3.3.1	Hipótesis general.....	51
3.3.2	Hipótesis específicas.....	51
IV.	METODOLOGÍA.....	52
4.1	Tipo de investigación.....	52
4.2	Diseño de la investigación.....	52
4.3	Población y muestra.....	55
4.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	55
4.4.1	Plan de recolección y procesamiento de la información.....	56
4.4.2	Materiales.....	56
4.4.3	Reactivos y soluciones.....	57
4.5	Procedimientos de recolección de datos.....	58
4.5.1	Preparación del medio de cultivo 9 K.....	58
4.5.2	Resiembra del inóculo de microorganismos.....	58
4.5.3	Muestreo y cuarteo de la muestra experimental.....	60
4.5.4	Análisis químicos de la muestra experimental.....	60
4.5.5	Caracterización mineralógica de la muestra experimental.....	62
4.5.6	Análisis granulométrico de la muestra experimental.....	69
4.5.7	Condiciones experimentales de lixiviación microbiana.....	70
4.5.8	Caracterización mineralógica de la muestra pretratada.....	74
4.5.9	Proceso de cianuración.....	75

4.6	Procedimiento estadístico y análisis de datos.....	77
4.6.1	Tratamiento estadístico.....	77
4.6.2	Análisis estadístico.....	78
V.	RESULTADOS.....	80
5.1	Resultados para las condiciones óptimas de lixiviación microbiana.....	80
5.2	Resultados del tiempo de lixiviación microbiana.....	85
5.3	Resultados de la acidez de la pulpa mineralizada.....	85
5.4	Resultados del proceso de cianuración.....	86
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	88
6.1	Contrastación de hipótesis con los resultados.....	88
6.2	Contrastación de resultados con otros estudios similares.....	88
VII.	CONCLUSIONES.....	91
VIII.	RECOMENDACIONES.....	92
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
X.	ANEXOS.....	98
10.1	Pruebas preliminares de lixiviación microbiana.....	98
10.2	Resultados complementarios de lixiviación microbiana.....	106
10.3	Análisis por el método matricial.....	113
10.4	Resultados de caracterización mineralógica de la muestra pretratada..	116
10.5	Tratamiento de efluentes.....	118
10.6	Matriz de consistencia.....	126

## TABLAS DE CONTENIDO

### Cuadros

3.1 Operacionalización de las variables.....	50
4.1 Análisis químicos.....	61
4.2 Caracterización mineralógica.....	63
4.3 Distribución volumétrica.....	64
4.4 Grados de liberación.....	66
4.5 Análisis granulométrico.....	70
4.6 Condiciones experimentales de lixiviación microbiana.....	71
4.7 Distribución del diseño experimental.....	72
4.8 Condiciones de operación del proceso de cianuración.....	76
5.1 Diseño experimental hexagonal.....	80
5.2 Preparación para el modelo matemático.....	81
5.3 Estadística de la regresión.....	82
5.4 Análisis de varianza.....	82
5.5 Coeficientes del modelo matemático.....	83
5.6 Condiciones óptimas de lixiviación microbiana.....	85
5.7 Cianuración de mineral de cabeza.....	86
5.8 Cianuración de mineral pretratado.....	87
10.1 Condiciones de pruebas preliminares.....	98
10.2 Potencial óxido reducción prueba 1.....	99

10.3	Conteo microbiano prueba 1.....	101
10.4	Potencial de óxido reducción prueba 2.....	104
10.5	Acidez de la pulpa mineralizada.....	107
10.6	Potencial de óxido reducción.....	108
10.7	Conteo microbiano.....	110
10.8	Matriz X, vector Y.....	113
10.9	Matriz transpuesta.....	114
10.10	Producto de matrices.....	114
10.11	Matriz inversa.....	115
10.12	Producto de matriz transpuesta por vector respuesta.....	115
10.13	Coefficientes del modelo matemático.....	116

**Gráficas**

4.1	Análisis químicos.....	61
4.2	Distribución volumétrica.....	65
10.1	Potencial óxido reducción prueba 1.....	100
10.2	Crecimiento microbiano prueba 1.....	102
10.3	Porcentaje de recuperación de cobre prueba 1.....	102
10.4	Porcentaje de recuperación de hierro prueba 1.....	103
10.5	Potencial óxido reducción prueba 2.....	105
10.6	Porcentaje de recuperación de cobre prueba 2.....	105
10.7	Porcentaje de recuperación de hierro prueba 2.....	106

10.8	Potencial de óxido reducción.....	109
10.9	Crecimiento microbiano.....	111

**Figuras**

2.1	Mecanismos de lixiviación microbiana.....	22
2.2	Estructura de diseño hexagonal con valores codificados.....	36
4.1	Diseño de la investigación.....	53
4.2	Diseño experimental.....	54
4.3	Medio de cultivo 9K.....	59
4.4	Mineral de cabeza.....	60
4.5	Briqueta pulida.....	62
4.6	Fotomicrografía 1 de mineral de cabeza.....	67
4.7	Fotomicrografía 2 de mineral de cabeza.....	68
4.8	Fotomicrografía 3 de mineral de cabeza.....	69
4.9	Conteo microbiano.....	73
4.10	Lixiviación microbiana.....	73
4.11	Sección delgada.....	74
4.12	Proceso de cianuración.....	77
4.13	Diseño experimental hexagonal.....	78
10.1	Resultados de la lixiviación microbiana.....	112
10.2	Fotomicrografías de mineral pretratado.....	117
10.3	Oro en mineral de cabeza y pretratado.....	118

10.4 Sedimentador para clarificar las aguas tratadas.....	119
10.5 Tratamiento convencional para aguas ácidas.....	122

## RESUMEN

La presente investigación se realizó con un mineral sulfurado aurífero que presentó características refractarias, por la baja recuperación de oro y plata por cianuración, debido a esto se realizó la optimización de la lixiviación microbiana como pretratamiento para solubilizar elementos cianicidas como el hierro, azufre y cobre; descomponer la matriz de pirita que contenía al oro, y por el proceso de cianuración elevar el porcentaje de recuperación de oro y plata.

Primero se realizó los análisis químicos, caracterización mineralógica y análisis granulométrico para identificar en el mineral de cabeza cómo se encontraron el oro y la plata. Se determinó que el oro se encontró en la pirita y la plata formaba parte de la tenantita. Luego se realizó una serie de pruebas preliminares de lixiviación microbiana, para la adaptación de las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* al mineral, tomando lecturas del potencial de óxido reducción (ORP), del pH, número de bacterias y análisis por absorción atómica de hierro.

Después de realizarse las condiciones óptimas de lixiviación microbiana usando el diseño experimental hexagonal, se determinó el tiempo óptimo de 12,23 días y la acidez óptima de la pulpa de 1,61 que permitieron determinar utilizando el modelo matemático, la máxima solubilidad de hierro, que fue 1643,50 ppm.

Finalmente se desarrolló la cianuración para el mineral de cabeza y mineral pretratado por lixiviación microbiana, elevando el porcentaje de recuperación para el oro de 20,07 % a 60,29 % y de la plata de 18,52 % a 54,70 %.

Palabras claves: lixiviación microbiana, condiciones óptimas, diseño experimental, cianuración.

## ABSTRACT

This research was conducted with a gold sulphide ore which has refractory characteristics, the low recovery of gold and silver by cyanidation because of this optimization of microbial leaching as a pretreatment was performed to solubilize cyanicidas elements such as iron, sulfur and copper; decompose the pyrite matrix containing gold, for by the cyanidation process increase the recovery rate of gold and silver.

First chemical analysis, mineralogical characterization and particle size analysis to identify ore head as gold and silver is performed. It was determined that gold is found in pyrite and silver is part of the tennantite. Series of preliminary tests for microbial leaching is then performed for the adaptation of bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* to the ore, taking readings oxide reduction potential (ORP), pH, number of bacteria and analysis by atomic absorption of iron.

After optimum conditions of microbial leaching using the hexagonal experimental design, where was determined the optimal time 12,23 days and optimum acidity 1,61 pulp that allowed determined using the mathematical model, the maximum solubility of iron were 1643,50 ppm.

Finally cyanidation for mineral ore head and pretreated by microbial leaching was developed, raising the recovery rate for gold from 20,07 % to 60,29 % and silver from 18,52 % to 54,70 %.

Keywords: microbial leaching, optimum conditions, experimental design, cyanidation.

## I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1. Identificación del problema

Los minerales sulfurados en el Perú son polimetálicos, es decir, presentan una gran variedad de elementos en su composición que no permiten desarrollar la recuperación de diferentes menas como oro y plata por el proceso tradicional de la cianuración, debido a que estos metales presentes en el mineral también lixivian, permitiendo que el grado de recuperación de la mena a extraer disminuya y no sea rentable para la minera.

Además muchos minerales tienen penalidades al tener elementos en su composición, tales como arsénico, manganeso, antimonio y cadmio; los cuales al realizar el proceso de cianuración para solubilizar oro y plata, son solubilizados también, formando complejos que hacen difícil la separación del metal a recuperar y además consumen una mayor cantidad de cianuro.

Es por ello que un proceso alternativo para mejorar la extracción de los metales a recuperar es el proceso de lixiviación microbiana para minerales sulfurados, en la cual por la acción de las bacterias como agente biolixivante, los compuestos insolubles en agua como los diferentes sulfuros se solubilizan, al ser transformados a sulfatos por oxidación.

Además este proceso se puede utilizar como pretratamiento, debido a que podemos solubilizar las impurezas para luego realizar el proceso de cianuración al mineral pretratado, previa separación de la solución biolixivante y así, elevar el porcentaje de recuperación de oro y plata en la solución cianurada.

Para el presente trabajo de investigación se realizó el proceso de lixiviación microbiana al mineral sulfurado aurífero denominado Shalke ubicado en el departamento de La Libertad.

## **1.2. Formulación del problema**

### **❖ Problema general**

¿Cuáles son las condiciones óptimas de lixiviación microbiana empleando *Acidithiobacillus ferrooxidans* como pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero?

### **❖ Problemas específicos**

- A. ¿Cuál es el tiempo óptimo de lixiviación microbiana empleando *Acidithiobacillus ferrooxidans* como pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero?
- B. ¿Cuál es la acidez óptima de la pulpa mineralizada en la lixiviación microbiana empleando *Acidithiobacillus ferrooxidans* como pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero?

## **1.3. Objetivo de la investigación**

### **❖ Objetivo general**

Determinar las condiciones óptimas de lixiviación microbiana empleando *Acidithiobacillus ferrooxidans* como pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero.

❖ **Objetivos específicos**

- A. Identificar el tiempo óptimo de lixiviación microbiana empleando *Acidithiobacillus ferrooxidans* como pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero.
- B. Determinar la acidez óptima de la pulpa mineralizada en la lixiviación microbiana empleando *Acidithiobacillus ferrooxidans* como pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero.

**1.4. Justificación**

❖ **Teórica**

La lixiviación microbiana es un proceso aplicado para minerales sulfurados complejos, ya que permite oxidar (solubilizar) elementos como hierro, azufre, arsénico y cobre para que el mineral pretratado esté listo para el proceso de cianuración y se tenga una excelente recuperación de oro.

❖ **Tecnológica**

La presencia cada vez más frecuente de minerales sulfurados complejos, hace que se desarrollen nuevas tecnologías para poder elevar el porcentaje de recuperación de los metales preciosos, es así que haciendo uso de la biotecnología aplicada a los procesos mineros, surge la lixiviación microbiana como una excelente alternativa (pretratamiento), para luego finalizar con el proceso de cianuración y elevar el porcentaje de recuperación de oro.

❖ **Económica**

Los costos para la obtención de las condiciones óptimas de la lixiviación microbiana son bajos, debido a que la solubilidad de las diferentes especies

sucede por la actividad microbiana y en el proceso posterior de cianuración el consumo de reactivos químicos es menor y con ello disminuyen los costos de tratamiento de los efluentes.

❖ **Medio ambiental**

Se garantiza la calidad del medio ambiente debido a que la lixiviación microbiana usa reactivos químicos con concentraciones en ppm (como  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , KCl,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  y  $\text{MgSO}_4$ ) que no contaminan y en la cianuración se utiliza el NaCN en concentración diluida.

Se mejora la calidad del aire debido a que la lixiviación microbiana no genera formación de gases tóxicos.

❖ **Legal**

Se cumple con el ECA (estándar de calidad ambiental) del decreto supremo N° 015-2015-MINAM y el LMP (límite máximo permisible) del decreto supremo N° 010-2010-MINAM para el agua, por el uso de una menor concentración de cianuro de sodio, puesto que el mineral sulfurado aurífero se encuentra pretratado por lixiviación microbiana.

### **1.5. Importancia**

El alcance de la investigación permite plantear, a la lixiviación microbiana como un método viable de pretratamiento para solucionar los problemas presentes en la baja recuperación de oro de minerales sulfurados auríferos, para lo cual se debe de realizar pruebas a nivel piloto y finalmente llevar a escala industrial.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes del estudio

Gabriel Eduardo Meruane Naranjo (2002) en su tesis doctoral en Ciencias de la ingeniería, mención en química “Oxidación bacteriana de sulfato ferroso con *Acidithiobacillus ferrooxidans*”, profundizó en el estudio del mecanismo de oxidación del ión ferroso por *Acidithiobacillus ferrooxidans*, utilizando un enfoque que integra aspectos teóricos y experimentales avanzados, al caracterizar la influencia del potencial redox de una solución de sulfato ferroso sobre la cinética de oxidación bacteriana de ión ferroso con *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Maurice Andre Menadier Stavelot (2009) en su tesis para el grado de Ingeniero civil químico “Biolixiviación de pirita por *Acidithiobacillus ferrooxidans* y cepas nativas”, comparó la biolixiviación de pirita en presencia de una cepa pura de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y la disolución en presencia de un consorcio de cepas bacterianas nativas provenientes del PLS de una pila industrial de minera Escondida.

Argelia Juárez Alcaraz (2004) en su tesis doctoral en Ciencias del área de biotecnología “Biolixiviación de minerales sulfuro ferrosos en jales: aislamiento y caracterización de cultivos puros y mixtos de microorganismos involucrados” evaluó el efecto de las cepas microbianas quimiolitotróficas y heterotróficas, aisladas desde depósitos residuales de minas de hierro, sobre el proceso de disolución oxidativa de los minerales sulfurosos presentes en estos jales.

Indira Adriana Jaque Liberona (2012) en su tesis para el título de Ingeniero civil químico “Estudio de la biolixiviación de pirita por un cultivo de *Sulfobacillus acidophilus* a 45 °C”, caracterizó el comportamiento de la bacteria *Sulfobacillus acidophilus* en la biolixiviación de pirita.

Dolores Segura Pachón (1998) en su tesis doctoral “Aislamiento e identificación de bacterias ferrooxidantes y sulfooxidantes del área minera de Riotinto” realizó el estudio y clasificación de la población bacteriana con capacidad oxidante de hierro, azufre y sulfuros metálicos que se localizan en el área minera de Riotinto y constituyen una parte fundamental de la comunidad microbiana.

## **2.2. Microorganismos en los procesos de lixiviación microbiana**

Los microorganismos involucrados en los procesos de lixiviación microbiana corresponden a arqueas y bacterias, las que se caracterizan por poder desarrollarse en condiciones extremas tales como pH ácidos, altas temperaturas y concentraciones de elementos metálicos, y cuya principal fuente de energía está dada por la oxidación del ión ferroso a férrico y la de compuestos reducidos de azufre. Se aíslan generalmente de lugares donde ocurre la oxidación natural de minerales, tales como minas, aguas de manantiales ricas en azufre y depósitos de carbón. Es posible clasificarlos de acuerdo al intervalo de temperatura en que es posible su desarrollo, distinguiéndose tres grupos: mesófilos, termófilos moderados y termófilos extremos (Rodríguez *et al.* 2001).

Las bacterias mesófilas tienen un rango de temperatura entre los 15 °C y 40 °C. Entre ellas se encuentran las autótrofas, que utilizan como fuente de carbono

compuestos inorgánicos tales como el dióxido de carbono; las heterótrofas, que utilizan fuentes orgánicas y las mixotróficas, que utilizan como fuente de carbono tanto compuestos orgánicos como inorgánicos. Algunas de las bacterias mesófilas autótrofas obligadas más comúnmente aisladas de ambientes mineros son *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*, las cuales coexisten en ambientes naturales cooperando en la biolixiviación de minerales. Su mayor diferencia reside en la capacidad que tienen de utilizar el ión ferroso y/o los compuestos reducidos de azufre como fuente de energía, donde *At. ferrooxidans* es capaz de utilizar ambas fuentes de energía, mientras que *At. thiooxidans* sólo puede usar el azufre reducido y *L. Ferrooxidans*, el ión ferroso. No obstante, todas estas bacterias ocupan el oxígeno como aceptor terminal de electrones (Rodríguez *et al.* 2001).

Las bacterias termófilas moderadas se caracterizan por desarrollarse en ambientes ácidos y a temperaturas entre los 45 °C y 55 °C. Entre ellas se pueden nombrar a *Thiobacillus caldus*, *Leptospirillum thermoferrooxidans*, *Acidimicrobium ferrooxidans*, *Sulfobacillus thermosuldidooxidans* y *Sulfobacillus acidophilus*. La bacteria *At. calduses* es autótrofa azufreoxidante e incapaz de oxidar el ión ferroso, es por ello utilizada junto con bacterias ferroxidantes tales como *L. ferrooxidans* en la oxidación de concentrados de calcopirita. Por su parte, *L. thermoferrooxidans* es quimioautótrofa estricta, ferroxidante y no azufreoxidante; si bien posee similitudes con *L. ferrooxidans*, presenta diferencias fisiológicas y morfológicas tales como su temperatura óptima de crecimiento, su buena resistencia a altas concentraciones de ión ferroso y su mayor tamaño. En

cuanto a las bacterias del género *Sulfobacillus*, se ha observado que aquella que es más activa en relación a la oxidación de  $\text{Fe}^{+2}$  y de sulfuros minerales es *S. thermosulfidooxidans*, mientras que *S. acidophilus* es más eficiente en la oxidación de azufre; sin embargo, se considera que ambas son nutricionalmente versátiles debido a que son capaces de crecer tanto en forma autotrófica, heterótrofa, como mixotrófica, al utilizar  $\text{CO}_2$  y glucosa como fuentes de carbono (Rodríguez *et al.* 2001).

Los microorganismos termófilos extremos se presentan en ambientes con temperaturas entre los 55 °C y 90 °C, pueden crecer de forma autótrofa y heterótrofa. Bajo condiciones autótrofas catalizan la oxidación de azufre elemental,  $\text{Fe}^{+2}$  y minerales de azufre reducido. Presentan velocidades de biolixiviación de sulfuros metálicos considerablemente altas, sobre todo cuando la concentración de sólidos o la densidad de pulpa son bajas; en caso contrario su acción se ve altamente restringida. En general, los termófilos extremos presentan como principal problema la gran sensibilidad de su membrana frente a fenómenos de atrición, lo que obliga a utilizarlas en los procesos de biolixiviación dinámica, tales como reactores, con densidades de pulpas menores que las utilizadas con microorganismos termófilos moderados. Es debido a lo anterior, que se ha implementado el uso de bacterias termófilas moderadas, las que son resistentes a altas densidades de pulpa y a elevadas concentraciones de  $\text{Fe}^{+2}$  (Rodríguez *et al.* 2001).

Con el tiempo ha ido tomando mayor fuerza la idea de la utilización de estas bacterias termófilas moderadas en la biolixiviación de concentrados minerales,

debido a que se pueden alcanzar mayores grados de disolución y velocidades de lixiviación, comparativamente con las bacterias mesófilas. De esta forma, la alta eficiencia en la extracción de cobre desde calcopirita, junto con la oxidación de pirita y arsenopirita que se logra con estos microorganismos, es una de las aplicaciones más importantes de la biolixiviación a altas temperaturas.

### 2.3. Características de *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

*Acidithiobacillus ferrooxidans* son bacterias con forma de bastón, Gram negativas, no forman esporulación y tienen dimensiones de 0,5  $\mu\text{m}$  de ancho y 1,0 a 2,0  $\mu\text{m}$  de largo con extremos redondeados (Rossi, 1990). Normalmente se encuentran aisladas o en pares y solo ocasionalmente forman cadenas cortas. Son móviles y poseen un flagelo polar, encontrándose usualmente en aguas ácidas de minas de carbón y hierro. Además, de acuerdo a su metabolismo poseen las características que se indican a continuación:

- Autótrófica: Su fuente de carbono para la síntesis celular es el dióxido de carbono. Además, requieren nitrógeno (como amonio), azufre (como sulfato o compuestos reducidos) y fósforo (en forma de fosfato) como nutrientes para el crecimiento celular y síntesis, junto con trazas de metales como: Fe, K, Mg, Na, Ca y Co.
- Quimiolitotrófica: La energía para mantenimiento y crecimiento es obtenida partir de la oxidación de compuestos reducidos de azufre y oxidación de ion ferroso. Además, son capaces de oxidar hidrógeno (Drobner *et al.*, 1990) y compuestos orgánicos en algunos casos.

- Aeróbica: Utilizan oxígeno como aceptor de electrones, sin embargo, se ha demostrado que es además anaeróbica facultativa (Brock y Gustafson, 1976).
- Mesófila: Crece en condiciones de temperatura entre 10 °C y 45 °C, encontrándose el óptimo entre 28 °C y 35 °C dependiendo de la concentración total de hierro disuelto y el pH.
- Acidófila: Posee un pH óptimo de crecimiento entre 1,6 y 2,4 en la oxidación de sulfato ferroso.

#### **2.4. Lixiviación microbiana**

La lixiviación microbiana es un proceso que corresponde a una lixiviación catalizada biológicamente por microorganismos, los cuales disuelven minerales liberando compuestos solubles de hierro, arsénico, manganeso, cobre y zinc.

El microorganismo *Acidithiobacillus ferrooxidans*, es el más estudiado en relación con la lixiviación microbiana de concentrados sulfurosos, dado su predominio en estos tipos de sistemas, aunque *Leptospirillum ferrooxidans* ha demostrado también ser particularmente útil.

El proceso de lixiviación microbiana de la pirita ocurre muy rápido, aproximadamente 500 000 veces más veloz que la lixiviación química por la presencia de oxígeno, lo que hace más evidente la eficiencia del proceso, sobre todo cuando participan ambos microorganismos (*Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*).

En cuanto a las ventajas que presentan los procesos biohidrometalúrgicos con respecto a los piro o hidrometalúrgicos, se tiene que los primeros se dan en condiciones cercanas a las ambientales, los compuestos utilizados pertenecen a los

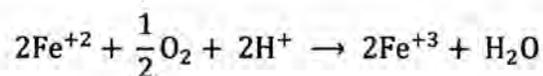
ciclos biogeoquímicos y por tanto, los productos y subproductos que se obtienen son compatibles medioambientalmente. Así mismo, no se producen emisiones de SO<sub>2</sub> como en el caso de los procesos pirometalúrgicos. Junto con lo anterior, las bacterias logran disgregar matrices de baja porosidad que hacen poco accesible a reactivos utilizados en hidrometalurgia, permitiendo así la disolución de metales, sin la necesidad de realizar una molienda del mineral hasta que este alcance tamaños de partículas muy reducidos.

## **2.5. Mecanismos de lixiviación microbiana**

Helmut Tributsh propone la existencia de los siguientes tres mecanismos para la biolixiviación: indirecto, por contacto y el cooperativo. Asimismo indica que es necesario que las bacterias se contacten con el sulfuro a través de una capa de polímeros extracelulares (EPL), los que actúan como medio para la reacción de disolución del mineral (Tributsch, 2001).

### **- Mecanismo de lixiviación indirecta**

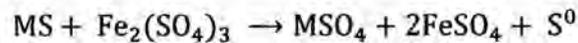
El mecanismo indirecto considera la acción de iones férricos sobre minerales sulfurados mediante una disolución electroquímica, así por medio de esta reacción se producen ión ferroso y azufre elemental. Posteriormente, estos son oxidados biológicamente a ión férrico e ión sulfato respectivamente. Tanto los microorganismos que se encuentran en solución como los adheridos al mineral pueden oxidar el ión ferroso a férrico en presencia de oxígeno y protones, por medio de la siguiente reacción (Ballester, 2005):



El  $\text{Fe}^{+3}$  oxida a los minerales sulfurados de acuerdo a la siguiente reacción:



Expresada formalmente como:



De esta forma, los microorganismos permiten la regeneración de ión férrico, por medio de la oxidación de ión ferroso, de tal manera que el primero esté disponible para la lixiviación de los minerales sulfurados. Sin embargo, como esta reacción consume protones, se puede producir un aumento del pH y consecuentemente la precipitación de ión férrico, formando barreras difusionales que impiden el contacto directo entre este y el sólido, de esta forma afecta negativamente la disolución biológica del mineral (Ballester, 2005).

- Mecanismo de lixiviación por contacto

Anteriormente este mecanismo era denominado directo, el cual se refiere a un contacto directo entre la membrana del microorganismo y el sulfuro utilizando para la lixiviación mecanismos enzimáticos. Sin embargo, Tributsch propuso que se sustituyese dicho término por el de mecanismo por contacto debido a que el microorganismo crea una zona de reacción controlada con una capa de exopolímeros (EPL) entre la membrana bacteriana y el sulfuro. De esta forma, la bacteria mantiene un estrecho contacto con la interfaz de sulfuro con el fin de condicionar el entorno del mineral para facilitar la disolución electroquímica por

el ataque de ión férrico, disolución que de otra forma no tendría lugar (Tributsch, 2001).

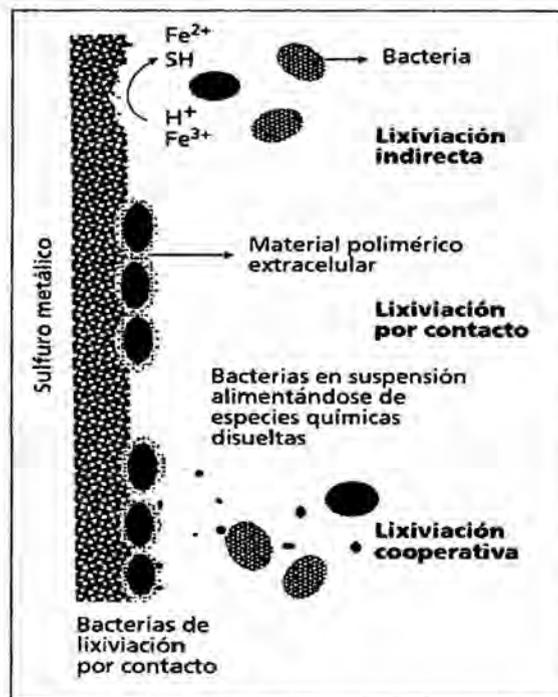
- Mecanismo de lixiviación cooperativa

Tributsch introduce el concepto de mecanismo cooperativo, en el que los microorganismos adheridos al mineral y los libres en solución cooperan entre sí. Las bacterias adheridas al sulfuro liberan especies metálicas oxidables como el ión ferroso, éste es oxidado por las bacterias en solución regenerando así el agente oxidante  $Fe^{+3}$ , el que ataca al mineral dando lugar a la lixiviación directa (Tributsch, 2001, Rodríguez *et al.* 2003a).

En la Figura son esquematizados los tres mecanismos de lixiviación.

FIGURA 2.1

MECANISMOS DE LIXIVIACIÓN MICROBIANA



Fuente: Tributsch (2001).

## 2.6. Adherencia microbiana a minerales sulfurados

Diferentes estudios sobre las sustancias poliméricas extracelulares (EPS) han indicado que la formación de estas es un prerrequisito importante para la adherencia bacteriana y la consecuente disolución del mineral. El hierro contenido en esta capa de exopolímeros confiere una carga neta positiva a las células bacterianas, causando la atracción electrostática con la superficie de la pirita cargada negativamente, además de iniciar la etapa de disolución del mineral sulfurado. De esta forma, las sustancias extracelulares son consideradas una extensión del radio de acción de los microorganismos, debido a que es un compartimiento especial para condicionar las reacciones de disolución del mineral (Rodríguez *et al.*, 2003a).

La composición de las sustancias exopoliméricas no es del todo conocida, sin embargo, algunos investigadores han encontrado que ésta depende del nutriente en que se desarrolle el microorganismo. Si éste es hecho crecer en sulfato ferroso hay una baja producción de EPS, mientras que al desarrollarse en un medio con pirita se produciría una cantidad trece veces mayor de dichas sustancias, siendo su composición en ambas condiciones diferentes. Así, cuando *Acidithiobacillus ferrooxidans* fue crecida en pirita, la composición másica de las sustancias extracelulares fue de un 48,5% de azúcares, un 39,4% de lípidos, un 5,8% de ácidos grasos libres, un 0,5% de nitrógeno y 0,8% de fósforo (Gehrke *et al.*, 1998).

Algunos minerales de azufre reducido pueden ser disueltos en soluciones ácidas o por extracción de electrones con  $\text{Fe}^{+3}$ , siendo estas situaciones favorables para la lixiviación indirecta durante las cuales no es indispensable la adherencia bacteriana a la superficie del sulfuro. Sin embargo, las reacciones interfaciales de la pirita y otros sulfuros son determinadas por la coordinación química del metal, de forma que la extracción del metal no conduce de forma directa a la disolución del mineral de azufre reducido. Lo anterior explica el que la pirita sea muy estable, no siendo fácilmente disuelta por el mecanismo directo. De esta forma, las bacterias deben generar mecanismos especializados para disgregar el mineral con el fin de obtener la energía química que requieren. Así, la lixiviación por contacto se ha desarrollado para romper la estructura cristalina, ya sea por la extracción de azufre en el caso de *Acidithiobacillus ferrooxidans* o por disolución electroquímica en el de *Leptospirillum ferrooxidans* (Tributsch, 2001).

Debido a las necesidades energéticas de los microorganismos y el que en ocasiones no puedan contar con las especies químicas tal como están disponibles en el ambiente natural en que se desarrollan, deben producir un portador energético de naturaleza química para disponer de ellas o incrementar artificialmente la concentración de un agente extractor de electrones ( $\text{Fe}^{+3}$ ) en la superficie del mineral. Para ello, crean una zona de reacción controlada, esto es, una capa de polímeros extracelulares entre la membrana celular y el mineral sulfurado (Tributsch, 2001).

Un estudio de biolixiviación de pirita con la bacteria *L. ferrooxidans*, mostró que su capacidad de lixiviación va más allá de la oxidación del ión ferroso a férrico.

Las células bacterianas se adhieren al mineral liberando sustancias poliméricas extracelulares, junto con capturar y almacenar en la capa de estos exopolímeros nanopartículas de alta densidad electrónica, es decir, generan una concentración de los iones férrico, los que son almacenados para llevar los electrones hasta un potencial lo suficientemente positivo para inducir la formación electroquímica de thiosulfato y sulfato. Los análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM), de microscopía electrónica de transmisión (TEM) y las mediciones de energía dispersiva de las mediciones de rayos X y difracción de electrones, establecieron que los agregados de nanopartículas de alta densidad de electrones comprendían pirita con una estequiometría bien definida. Al agregar sólo ión férrico no se produce ningún tipo de corrosión local de la pirita, lo que indica que las reacciones que tienen lugar entre las bacterias adheridas y la superficie de este mineral son responsables de los patrones de lixiviación observados (Rojas-Chapana y Tributsch, 2004).

Al estudiar la lixiviación de pirita con *At. ferrooxidans*, se encontró que el mineral sulfurado cristalizado se transformaba en un azufre coloidal. Un transportador de azufre, basado en la cisteína era utilizado para transportarlo a través de éste y así extraer el azufre desde la pirita para formar un polisulfuro, dejando libre azufre elemental en forma coloidal, el que actúa como un reservorio temporal de energía y queda en una cápsula orgánica alrededor de las bacterias (Rojas-Chapana y Tributsch, 1995).

Dado que se encontraron orificios en la superficie de los minerales sulfurados, Tributsch concluyó que éstas fueron causadas por la presencia de un reactivo

químico producido por las bacterias. Mediante un estudio de la lixiviación de pirita con *Acidithiobacillus ferrooxidans* con la adición de pequeñas cantidades del aminoácido cisteína, encontró que la fase de latencia en el crecimiento de la bacteria disminuía al mínimo y la tasa de lixiviación del mineral aumentó tres veces en comparación con el proceso normal sin este aditivo. Así mismo, observó que en ausencia del microorganismo y presencia de cisteína, la velocidad de lixiviación es comparable con la alcanzada con bacterias en condiciones normales de lixiviación. Lo anterior se explicaría por el grupo sulfhidrilo de la cisteína, el que participa en un enlace con la pirita. Los grupos libres -SH de la superficie en la pirita serían la contraparte para la formación del disulfuro correspondiente. Esta reacción tiol-disulfuro implica que la cisteína es consumida por la superficie de la pirita con la consiguiente liberación de especies de hierro y azufre. Las bacterias utilizarían este proceso para producir una corrosión bioquímica del mineral mediante la captación y oxidación de las especies liberadas (Rojas-Chapana y Tributsch, 2001).

Se ha demostrado la disolución localizada por acción bacteriana de *At. ferrooxidans* en minerales de azufre reducido, donde por medio de imágenes de microscopía de transmisión óptica se vieron orificios de disolución en el mineral, en lugares donde las bacterias se habían adherido encontrándose ya sea disociados, en pares, en grupos o formando cadenas. Esto mostraba que la bacteria mantiene un estrecho contacto a través de la capa de exopolímeros con la superficie del mineral con el fin de disolverlo. Junto con esto, se observó que la distribución de las bacterias dependía de que la superficie tuviese una estructura

cristalina, pues esta presenta enlaces químicos más débiles, así como también de la presencia de líneas de fractura o dislocaciones en el mineral, donde hay una mayor superficie para la interacción química. De esta forma a las bacterias les es más favorable obtener la energía (Bennett y Tributsch, 1978).

Con el fin de entender la importancia del mecanismo por contacto en la biolixiviación, se estudió la tasa de disolución de pirita con y sin *Acidithiobacillus ferrooxidans*, encontrándose que bajo las mismas condiciones existían diferencias en dicha velocidad, siendo esta mayor en presencia de las bacterias. Además, la morfología de los patrones de corrosión de la lixiviación microbiana era distinta a la de la lixiviación abiótica (Ndlovu y Monhemius, 2005).

Al estudiar la biolixiviación en tres tipos de minerales, calcopirita, pirita y esfalerita, se observó que durante la biolixiviación de estos se desarrollaban tres etapas. Una fase inicial relacionada con una alta adherencia de las bacterias al mineral, lo que es necesario para lograr altas tasas de disolución dada la liberación inicial del ión ferroso por la lixiviación por contacto. Una segunda etapa, donde el número de células libres en la solución aumenta en el tiempo debido a la saturación de bacterias en la superficie del mineral y la presencia del ferroso en la solución. Esto favorece el aumento de bacterias hierro-oxidantes en solución produciendo así un alza en la concentración de ión férrico, el agente oxidante, y por tanto de la velocidad de disolución del mineral. Finalmente, en una tercera etapa se llega a un equilibrio entre las células adheridas y planctónicas, dando lugar al mecanismo cooperativo (Rodríguez *et al.*, 2003a).

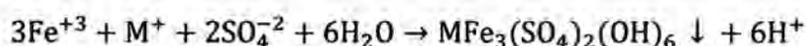
Junto con lo anterior, se observó que existe una relación entre la adherencia al mineral y la tasa de disolución de éste. Las mayores velocidades de disolución se debían probablemente a una mayor adherencia inicial de las bacterias a los minerales. De esta forma, la adhesión bacteriana a la superficie de la pirita es de gran importancia en la biolixiviación, debido a varios efectos positivos, tales como, la liberación del ión ferroso por lixiviación por contacto y la oxidación de éste y de azufre elemental, los que pueden ser acumulados en la superficie del mineral (Rodríguez *et al.*, 2003b).

## **2.7. Precipitación de ión férrico.**

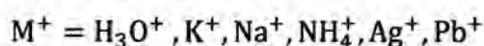
El ión férrico es fundamental en la lixiviación y biolixiviación al ser el agente oxidante de los minerales de azufre reducido, tales como la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ). Los microorganismos presentes en los procesos de lixiviación permiten la regeneración del ión férrico por medio de la oxidación del ferroso, de tal manera que esté disponible para la lixiviación de los minerales sulfurados. Sin embargo, la oxidación del ión ferroso consume protones, lo que puede llevar a un aumento en el pH y la consecuente precipitación del ión férrico. Así, dicho ión se convierte en un agente perjudicial debido a que su precipitación descontrolada forma barreras difusionales que impiden el contacto directo entre este agente lixivante y el sólido afectando negativamente la disolución biológica del mineral (Ballester, 2005).

En equipos de lixiviación industriales se ha reportado la precipitación de ión férrico como hidróxido ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), óxido ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), goetita ( $\text{FeO}\cdot\text{OH}$ ) y jarositas

( $MFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ ), estas últimas formadas mediante la siguiente reacción general (Paipa, 2004):



Donde  $M^+$  puede corresponder a uno de los siguientes cationes:



Dando origen a las jarositas de hidronio, de potasio, natrojarosita, amoniojarosita, argentojarosita o plumbojarosita, respectivamente.

Las jarositas formadas a partir del ión férrico precipitan cubriendo la superficie de los minerales, lo cual genera barreras difusionales que retardan o impiden la disolución de los minerales y con ello la recuperación de los metales de interés, tales como el cobre. Junto con lo anterior, la formación de dichos precipitados de jarosita en los sistemas de biolixiviación causa la disminución del pH debido a la liberación de protones, a la vez que atrapa nutrientes desde la solución de lixiviación tales como el  $K^+$  o  $NH_4^+$ , los que son indispensables para el crecimiento de los microorganismos, reduciendo así la actividad bacteriana en el proceso (Paipa, 2004, Jian-nan *et al.*, 2007).

En cuanto a los mecanismos de precipitación de las jarositas, se tiene que el primer paso sería la formación de productos de hidrólisis de bajo peso molecular, tales como  $FeOH^{+2}$ ,  $Fe(OH)_2^+$  y  $Fe_2(OH)_4^{+2}$ . Le seguiría la formación de iones complejos hidroxilos con una razón  $OH/Fe^{+3}$  creciente con el envejecimiento del polímero, proceso que es más rápido con el incremento de la temperatura. En los

varían tanto la cantidad como la composición de los precipitados, y en exceso de iones férrico precipita casi la totalidad del potasio. Junto con lo anterior, se encontró que con el incremento de la concentración de ácido y de esta forma una disminución del pH del medio, se disminuye la precipitación (Dutrizac, 2008).

Estudios sobre el efecto de semillas que actuarían como centros de cristalización, indican que la presencia de núcleos de jarositas aumenta la tasa inicial de precipitación de las jarositas de amonio y potasio, de forma lineal a la cantidad de dichas semillas y se extendería el rango de precipitación a menores valores de pH y temperatura que en ausencia de estos núcleos de precipitación, junto con eliminarse el periodo de inducción. Además, la presencia de semillas de sodiojarosita llevaría a que su velocidad de precipitación sea prácticamente independiente de la concentración de ión férrico (Dutrizac, 1996).

Asimismo, al estudiar el efecto de la presencia de perlas de vidrio en un cultivo con *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*, se encontraron diferencias considerables en la tasa de oxidación de ferroso, la formación de jarositas y la población bacteriana en dos grupos de cultivo, con y sin perlas. El grupo con estos centros de cristalización tuvo una velocidad de oxidación de ión ferroso seis horas más rápida y una precipitación 78 % mayor, así como también, una menor densidad poblacional que el grupo sin dichas semillas. Los análisis de difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM), espectro por energía dispersiva (EDS) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), indicaron que los precipitados originados por los dos grupos son una mezcla de jarositas de potasio y amoniojarositas, con características morfológicas similares. Junto con lo

anterior, se encontró que una gran parte de los precipitados de jarosita se depositaron en la superficie de las perlas de vidrio, consumiendo gran cantidad de  $\text{NH}_4^+$  o  $\text{K}^+$  y registrándose una fuerte caída del pH. Por otro lado, algunas bacterias planctónicas fueron absorbidas o atrapadas en las partículas de precipitado, lo que explicaba la menor densidad poblacional registrada en los grupos con semillas que en los que no las tenían (Jian-nan *et al.*, 2007).

## **2.8. Diseño experimental**

Los diseños experimentales constituyen la estrategia más adecuada para obtener modelos matemáticos empíricos con un mínimo de pruebas experimentales.

Un experimento diseñado está definido como una prueba o serie de pruebas en las cuales se efectúan cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en las respuestas de salida (Montgomery, 1991).

## **2.9. Aplicaciones del diseño experimental**

El diseño experimental es una estrategia más adecuada para obtener modelos matemáticos empíricos con un mínimo de pruebas experimentales para mejorar el rendimiento de un proceso o en el desarrollo de nuevos procesos.

Las aplicaciones técnicas del diseño experimental en su fase inicial del desarrollo de un proceso pueden proporcionar los resultados siguientes:

- a).- Mejora en el rendimiento de un proceso.
- b).- Menor variabilidad
- c).- Menor tiempo de desarrollo.

d).- Menores costos globales

## **2.10. Optimización**

La optimización de un proceso por medio de diseños experimentales requiere del uso de una metodología o estrategia adecuada, que nos lleve por el camino seguro y rápido para encontrar los valores óptimos de un proceso bajo estudio.

El primer paso en un experimento de caracterización, nos interesa determinar cuáles variables del proceso influyen en la respuesta.

El segundo paso es optimizar; el cual significa determinar en qué región los procesos importantes conducen a la mejor respuesta (Montgomery, 1991).

## **2.11. Diseño experimental hexagonal**

En la etapa del diseño factorial se identificó las variables que son significativas para el proceso.

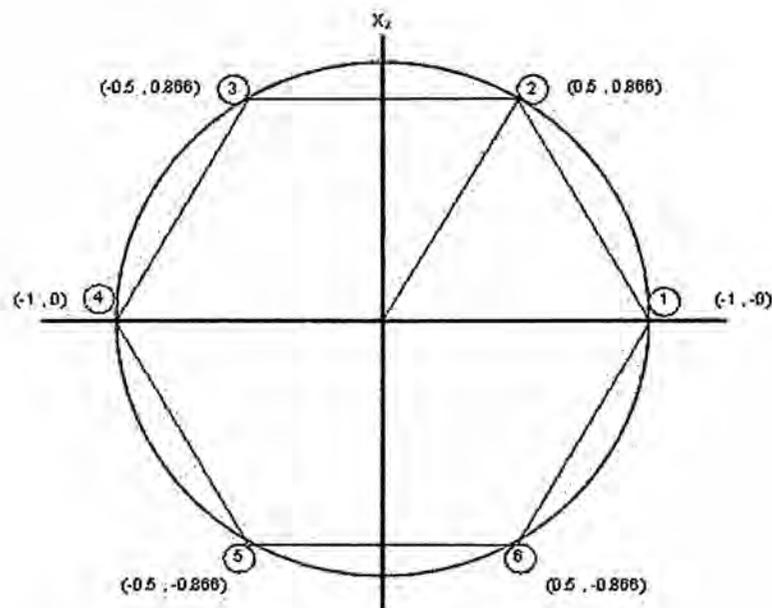
En la segunda etapa de optimización final, vamos a describir la región experimental donde se ubican las condiciones óptimas, utilizando un diseño rotatable.

Los diseños experimentales rotatables tienen igual facultad de predecir en todas las direcciones a partir de un punto central y donde los otros puntos experimentales están a una distancia constante del punto central.

El diseño hexagonal se utiliza para estimar modelos matemáticos de segundo orden que consiste en 6 puntos de un hexágono inscritos dentro de una circunferencia de radio unitario más los puntos necesarios replicados en el centro

del diseño para estimar la variancia del error experimental, la gráfica se muestra (Ayala Mina, 1995).

**FIGURA 2.2**  
**ESTRUCTURA DE DISEÑO HEXAGONAL CON VALORES**  
**CODIFICADOS**



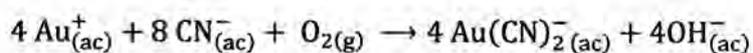
**Fuente: Ayala Mina (1995).**

### **2.12. Cianuración de oro y plata**

Los cianuros de potasio, sodio y calcio, en medio alcalino, disuelven el oro formando complejos de cianuro. Sin embargo, industrialmente se prefiere usar el cianuro de sodio (NaCN) por su mayor contenido de CN activo por unidad de peso: 53 %, versus 40 % en el caso del KCN, lo que influye en los precios de comercialización y transporte. El cianuro de calcio,  $\text{Ca}(\text{CN})_2$  no es tan utilizado, a

pesar de presentar un buen porcentaje de ion  $\text{CN}^-$  activo: 56,5 % dado que suele comercializarse con un mayor contenido de impurezas que en los otros dos casos.

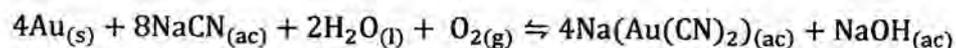
La reacción de disolución que tiene lugar durante la lixiviación de estos elementos con soluciones de NaCN, son de tipo electroquímico. La reacción global del oro es:



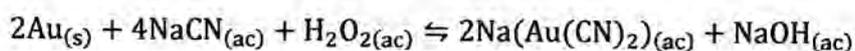
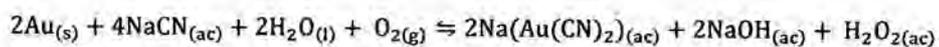
El  $\text{O}_2$  que actúa como oxidante está presente en la lixiviación sin costo, pero cinéticamente no es muy favorable dada su baja solubilidad y consumos laterales, controlando la velocidad de disolución. La recuperación de oro disuelto con cianuro normalmente se puede realizar a través de la precipitación con zinc, previa desoxigenación de las soluciones, proceso conocido como Merrill Crowe.

Disolución de oro en soluciones cianuradas.

La reacción de disolución de oro por el cianuro sugerida por L. Elsner en 1846 es la siguiente:

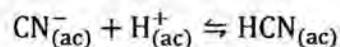


La disolución de oro por el cianuro según G. Bodlander en 1896 sugirió que ocurre en un proceso de dos pasos en el que se forma peróxido de hidrógeno como compuesto intermedio:



En este caso se asume que, como producto intermedio, se forma  $H_2O_2$ . No obstante, la ecuación sumada es de nuevo la misma que propuso Elsner cincuenta años antes.

Pueden utilizarse disoluciones de cianuro relativamente diluidas debido al fuerte complejo formado entre el cianuro y el oro, diciano aurato (I) de Sodio ( $Na [Au (CN)_2]$ ). Además según los estudios realizados por F. Habashi (1966-67) concluyó que la concentración de  $CN^-$  es beneficiosa en baja dosis, ya que a concentraciones más altas de cianuro se promueve la producción del ácido cianhídrico, que no disuelve el oro ni la plata, de acuerdo a la siguiente reacción:



Cuya constante de equilibrio es:  $K = 10^{9,24}$ .

Es decir, a  $pH = 9,24$  se empiezan a producir pérdidas de cianuro libre por formación de HCN gaseoso.

La reacción con la plata es análoga; sin embargo, el cianuro complejo de plata es más débil que el cianuro de oro y para disolverla debe emplearse disoluciones de cianuros más concentrados o tiempos de contacto más largos. La necesidad de condiciones más agresivas cuando hay presencia de plata, puede favorecer el ataque sobre otros minerales metálicos presentes en la mena, lo que lleva a aumentar el consumo de cianuro, a disminuir la selectividad y a aumentar las concentraciones de metales en disolución.

A pesar de la relativa especificidad de la reacción oro-cianuro, hay otros metales y componentes inorgánicos que reaccionan a la vez con el cianuro y en cierta medida con el hidróxido que debe estar presente para mantener el cianuro en forma iónica. Las reacciones con minerales ferríferos, es decir pirita o pirrotina, son de gran importancia en muchos casos, ya que estos minerales figuran entre los más consumidores de cianuro de una mena de oro.

La formación del ion ferrocianuro, (en la cual el hierro está con estado de oxidación +2), es frecuentemente motivo de perturbación desde los puntos de vista operacional y ambiental. Pero, las condiciones para su formación son más limitadas. Se forma con relativa rapidez en condiciones de baja alcalinidad y escasa aireación, sobre todo si la pre oxidación de la mena ha dado lugar a la presencia del ión ferroso. Esto se debe en parte a una caída del pH causada por la precipitación incompleta del hidróxido ferroso.

Debe señalarse que las condiciones para la formación de tiocianato y ferrocianuro a partir de minerales sulfurados de hierro son en cierta medida mutuamente restrictivas, puesto que las condiciones escogidas para minimizar a uno de ellos pueden promover la formación del otro. Esto tiene especial importancia desde el punto de vista de la depuración del agua residual, dado que el tiocianato crea una demanda de oxidante, es potencialmente tóxico por sí mismo y se descompone formando amoníaco, que a su vez es causa de nuevas complicaciones.

Los sulfuros de hierro no son los únicos minerales capaces de generar tiocianato en las disoluciones de cianuro, todos los minerales sulfurados, excepto el sulfuro

de plomo tienen esta posibilidad. El primer requisito para ello es la formación de compuestos que contengan átomos de azufre inestables en disolución. Entre ellos figuran las micelas de azufre elemental y los polisulfuros, tiosulfatos y politionatos alcalinos y alcalinotérreos. El cianuro no reacciona directamente con el ion sulfuro, pero los componentes antes citados pueden todos proporcionar iones sulfuros procedentes del ataque alcalino sobre los minerales que contienen sulfuros metálicos. Un método para minimizar la formación de tiocianato es el de favorecer la oxidación completa de los sulfuros a sulfatos, lo que puede realizarse en cierta medida por la adición de una sal de plomo juntamente con una vigorosa aireación.

### **2.13. Métodos de cianuración**

Los principales métodos de lixiviación usados en la actualidad se pueden clasificar de la forma que sigue:

- Lixiviación in-situ:

Consiste en la aplicación de soluciones directamente sobre el mineral que está ubicado en el lugar del yacimiento, sin someterlo a labores de extracción minera alguna.

- Lixiviación en botaderos:

Consiste en el tratamiento de minerales de muy bajas leyes, normalmente debajo de la ley de corte económica para la planta principal-conocidos como “estéril mineralizado”. En los yacimientos más antiguos, este material muchas veces se

acumuló sin prestar atención a su tratamiento posterior, normalmente en cañones o quebradas cercanas a las minas. Alcanzando alturas de 100 metros o más y el sustrato basal no siempre es el adecuado para recoger soluciones, sin embargo estas continúan aplicándose en la parte superior y colectándose en una laguna de intersección en la roca impermeable más próxima.

- Lixiviación en pilas (Pad):

A diferencia de los botaderos, en este caso el mineral tiene una mayor ley y, por lo tanto, económicamente paga por un tratamiento más complejo a través de una planta de chancado. Las pilas se cargan habitualmente entre 3 y 10 metros, sobre un sustrato impermeable, normalmente protegido con una membrana de plástico del tipo polietileno de alta, baja o muy baja densidad o cloruro de polivinilo, que puede tener desde 0,1 a 1,5 mm de espesor según las exigencias de cada aplicación. Para ayudar a la recolección de las soluciones se usan cañerías de drenaje perforadas y canaletas abiertas. Las soluciones se distribuyen por medio de goteros, incluso enterrados en los casos de condiciones climáticas extremas o bien mediante aspersores dependiendo de la evaporación y la disponibilidad de agua en cada operación.

- Lixiviación en bateas inundadas:

Conocido como sistema de lixiviación por percolación, consiste en una estructura con forma de paralelepípedo de hormigón, protegido interiormente con asfalto antiácido o resina epóxica, provisto de un fondo falso de madera y una tela

filtrante, que se llena hasta arriba de mineral y que se inundan con las soluciones de lixiviación.

- Lixiviación por agitación:

Para ello se requiere que el mineral este finamente molido, por esto se aplica solamente a minerales frescos de leyes altas, que por su mayor valor contenido justifican una molienda húmeda, a cambio de una mayor recuperación y de un menor tiempo de proceso. Así se aumentan el área expuesta a la lixiviación y la agitación permite disminuir el espesor de la capa limitante de difusión, al mismo tiempo que se maximiza el área de la interfase gas-líquido.

#### **2.14. Definiciones de términos básicos**

- Biominería

Disciplina que estudia y aplica la utilización de microorganismos para facilitar la extracción y recuperación de metales desde yacimientos (conteniendo hierro y sulfuros) minerales, concentrados sulfurados en pilas o biorreactores.

- Biolixiviación

Es el mecanismo por el cual los microorganismos o sus productos atacan o se adhieren al mineral para lograr la solubilización de metales generando ión férrico ( $Fe^{+3}$ ) y ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ).

- Biooxidación

Mecanismo por el cual los microorganismos descomponen la matriz del mineral y permiten exponer el metal atrapado para lograr que un agente químico potencie su proceso de extracción. A diferencia de la biolixiviación no se produce férrico y

ácido; puesto que, la biooxidación es un proceso en donde los microorganismos no solubilizan el metal.

- Aireación

Es la presencia de oxígeno del aire para asegurar la biooxidación y de esta forma las bacterias obtengan la energía celular (ATP) útil para la fijación de carbono y producción de biomasa celular.

- Mesófilo

Capacidad de los microorganismos para crecer en condiciones de temperatura entre 10 y 45 °C, encontrándose el óptimo entre 28 y 35 °C dependiendo de la concentración total de hierro disuelto y el pH.

- Acidófilo

Capacidad de los microorganismos para desarrollarse en ambientes con un medio ácido. Posee un pH óptimo de crecimiento entre 1,6 y 2,4 en la oxidación de sulfato ferroso.

- Cámara de Neubauer

La cámara de recuento es un aparato de precisión hecho de vidrio óptico especial. Se utiliza para contar células en suspensiones bajo el microscopio óptico. Las cámaras de recuento se utilizan para contar bacterias y esporas de hongo. Además las cámaras de recuento sirven para el análisis de sangre (recuento de leucocitos, eritrocitos, trombocitos) y recuento de células.

- Conteo microbiano

El conteo señala la magnitud de la población total microbiana en unidades de bacterias/ml.

En ese sentido se puede determinar por medida directa al microscopio óptico.

- Microscopio de luz polarizada

Es un microscopio de campo claro al cual se le adicionan filtros (polarizadores) que modifican la luz. También se denomina microscopio metalúrgico por su uso inicial en el estudio de minerales.

- Sección delgada

La lámina delgada o sección delgada es una preparación que se realiza en rocas para su estudio con el microscopio petrográfico, y que consiste en rodajas de la roca de un espesor de unas 30  $\mu\text{m}$  que se adhieren a láminas de vidrio (portas) mediante resina epoxi, para posteriormente ser recubiertas por otra lámina de vidrio. El objetivo de preparar una lámina delgada es el de conseguir un grosor de la roca muestreada tan pequeño que permita que la luz la atravesara para identificar las especies no metálicas.

- Sección pulida

La sección pulida o briqueta pulida es una preparación realizada de rocas para el estudio con microscopio. El objetivo de preparar una briqueta pulida es determinar e identificar las especies metálicas presentes.

- Análisis Mineralógico

El análisis mineralógico es una técnica de investigación geológica de laboratorio, dedicada a la obtención de datos mineralógicos como la identificación de minerales y el conocimiento detallado de sus propiedades físicas y químicas necesarios para la evaluación y aprovechamiento de las menas presentes en el mineral y cuya asistencia es de vital importancia en la minería.

- Fotomicrografías

Una fotomicrografía es la imagen obtenida de objetos no visibles mediante la ayuda de instrumentos ópticos o electrónicos como el microscopio. La fotografía microscópica o fotomicrografía es la técnica fotográfica que permiten obtener imágenes con una ampliación mínima de diez veces.

- Diseño experimental

Los diseños experimentales constituyen la estrategia más adecuada para obtener modelos matemáticos empíricos con un mínimo de pruebas experimentales. Un experimento es una prueba o ensayo.

Un experimento diseñado está definido como una prueba o serie de pruebas en los cuales se efectúan cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en las respuestas de salida.

- Análisis de varianza

El análisis de varianza (ANOVA) es una potente herramienta estadística, de gran utilidad tanto en la industria, para el control de procesos, como en el laboratorio de análisis, para el control de métodos analíticos. Es una colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados, en el cual la varianza está particionada en ciertos componentes debido a diferentes variables explicativas.

- Oro fino

El denominado oro fino estaría entre un rango de tamaños del oro grueso y el oro ultra fino, estaría entre 0,2mm (200 micrones) y los 10 micrones.

- Oro grueso

Que viene a ser el oro aluvial en forma de pepitas, el oro filoniano en forma de escamas o hilos, hasta un tamaño no menor a 0,2 mm.

- Mineral sulfurado

Un gran número de minerales de metales preciosos que son procesados contienen sulfuros. Los sulfuros pueden inhibir la cianuración combinándose directamente con el cianuro o consumiendo el oxígeno necesario para disolver los metales preciosos de acuerdo con la ecuación. Cuando se produce la reacción del azufre con el cianuro, el producto es el tiocianato. Por ejemplo, para la pirrotita un esquema para la producción de tiocianato sería:



Desde el punto de vista mineralógico el estudio de los sulfuros reviste importancia debido a la relativa abundancia de minerales metálicos en forma de sulfuro, para explotar. Podemos clasificar inicialmente a los sulfuros, de acuerdo a la naturaleza del elemento con el cual se halla enlazado el átomo de azufre: metálicos y no metálicos.

- Ión cianuro (CN<sup>-</sup>)

Este término se refiere únicamente el anión libre CN<sup>-</sup> en solución.

- Cianuro libre

Esta denominación comprende tanto al ácido cianhídrico molecular (HCN) como al ión cianuro (CN<sup>-</sup>). Esta terminología se emplea tanto para la descripción analítica del cianuro como para evaluar su toxicidad.

- Cianuro total (TCN)

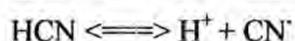
Se denomina así a todos los compuestos de cianuro existentes en una solución acuosa. Este es un término que se emplea en los procedimientos analíticos. El "cianuro total real" de una solución puede o no concordar con el "cianuro total" determinado por una técnica analítica particular. En la práctica, la cuantificación del cianuro total depende del método analítico empleado.

- Cianuro disociable en ácido débil ( $\text{CN}^-_{\text{WAD}}$ )

Es un término analítico utilizado para designar a los compuestos de cianuro que se disocian bajo reflujo, con un ácido débil, normalmente a pH 4.

- Cianuro de hidrógeno

El cianuro de hidrógeno (HCN) o ácido cianhídrico es un líquido o gas incoloro con un punto de ebullición de 25,7 °C. Se trata de un ácido débil, altamente soluble en agua, con una constante de disociación de  $4,365 \times 10^{-10}$  y un pKa = 9,31 a 20 °C, para una reacción de equilibrio de:



- Límite máximo permisible (LMP)

Medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan al efluente líquido de actividades minero metalúrgicas, y que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, bienestar humano o ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el Ministerio del Ambiente y los organismos que conforman el sistema de gestión ambiental.

#### - Efluente

Se denomina a un curso de agua, cuando descarga aguas o vertidos empleados en los procesos industriales, urbanos, o agrícolas.

#### - Minería subterránea

Una mina subterránea es aquella explotación de recursos mineros que se desarrolla por debajo de la superficie del terreno.

Para la minería subterránea se hace necesario la realización de túneles, pozos, chimeneas y galerías, así como cámaras. Los métodos más empleados son mediante túneles y pilares, hundimientos, corte y relleno, realce por subniveles y cámaras-almacén.

Las minas subterráneas se pueden dividir en dos tipos, según la posición de las mismas con respecto al nivel del fondo del valle:

- Las que se encuentran por encima se denominan minas de montaña. En ellas el acceso es más fácil, al poder realizarse mediante galerías horizontales excavadas en las laderas del valle.
- En las minas que se encuentran por debajo del nivel del fondo del valle es necesario excavar pozos (verticales o inclinados), labores de acceso que descendan al nivel del yacimiento.

#### - Minería de socavón

Este tipo de extracción se realiza cuando la cubierta de rocas (o material sin presencia de mineral) es de un espesor tal que el costo de removerlo para hacer un tajo abierto no es económico (como por ejemplo, del interior de un cerro). Este tipo de explotación se usa cuando las zonas mineralizadas (comúnmente llamadas

vetas) son angostas y profundas, por lo que es preferible hacer perforaciones en la roca para acceder a las mismas.

La forma en que se accederá a la zona mineralizada dependerá de cómo es que se presente el mineral en el subsuelo y la forma de trabajo a usar en el proceso de explotación.

### III. VARIABLES E HIPÓTESIS

#### 3.1. Variables de investigación

$$Y = f(X_1, X_2)$$

- Variables independientes:
  - $X_1$  = Tiempo de lixiviación microbiana
  - $X_2$  = Acidez de la pulpa mineralizada
- Variable dependiente:
  - $Y$  = Condición óptima de lixiviación microbiana
- Parámetros de trabajo:
  - Peso del mineral: 15 gramos
  - Velocidad de agitación: 150 rpm
  - Volumen de inóculo: 10 %
  - Granulometría del mineral: 75,55 % - 200 TYLER

#### 3.2. Operacionalización de variables

**CUADRO 3.1**

**OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES**

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
$Y$ = Condición óptima de lixiviación microbiana	Solubilidad de hierro	mg/L (ppm)	Pruebas experimentales y análisis estadístico
VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
$X_1$ = Tiempo de lixiviación microbiana	Tiempo	Días	Análisis cronológico
$X_2$ = Acidez de la pulpa mineralizada	pH	Escala de acidez	Análisis de acidez

### **3.3. Hipótesis**

#### **3.3.1. Hipótesis general**

“Si determinamos las condiciones óptimas de lixiviación microbiana empleando *Acidithiobacillus ferrooxidans*, entonces se logrará el pretratamiento para la cianuración del mineral sulfurado aurífero”.

#### **3.3.2. Hipótesis específicas**

- A. “Si identificamos el tiempo óptimo de lixiviación microbiana empleando *Acidithiobacillus ferrooxidans*, entonces se logrará el pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero”.
- B. “Si determinamos la acidez óptima de la pulpa mineralizada en la lixiviación microbiana empleando *Acidithiobacillus ferrooxidans*, entonces se logrará el pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero”.

## IV. METODOLOGÍA

### 4.1. Tipo de investigación

#### ➤ Por su finalidad

La investigación fue aplicada debido a que los resultados sirven para ser empleados en el área de procesos metalúrgicos de la industria minera.

#### ➤ Por su diseño interpretativo

La investigación fue experimental ya que el estudio se realizó mediante la observación, registro y análisis para las variables que intervinieron en la investigación.

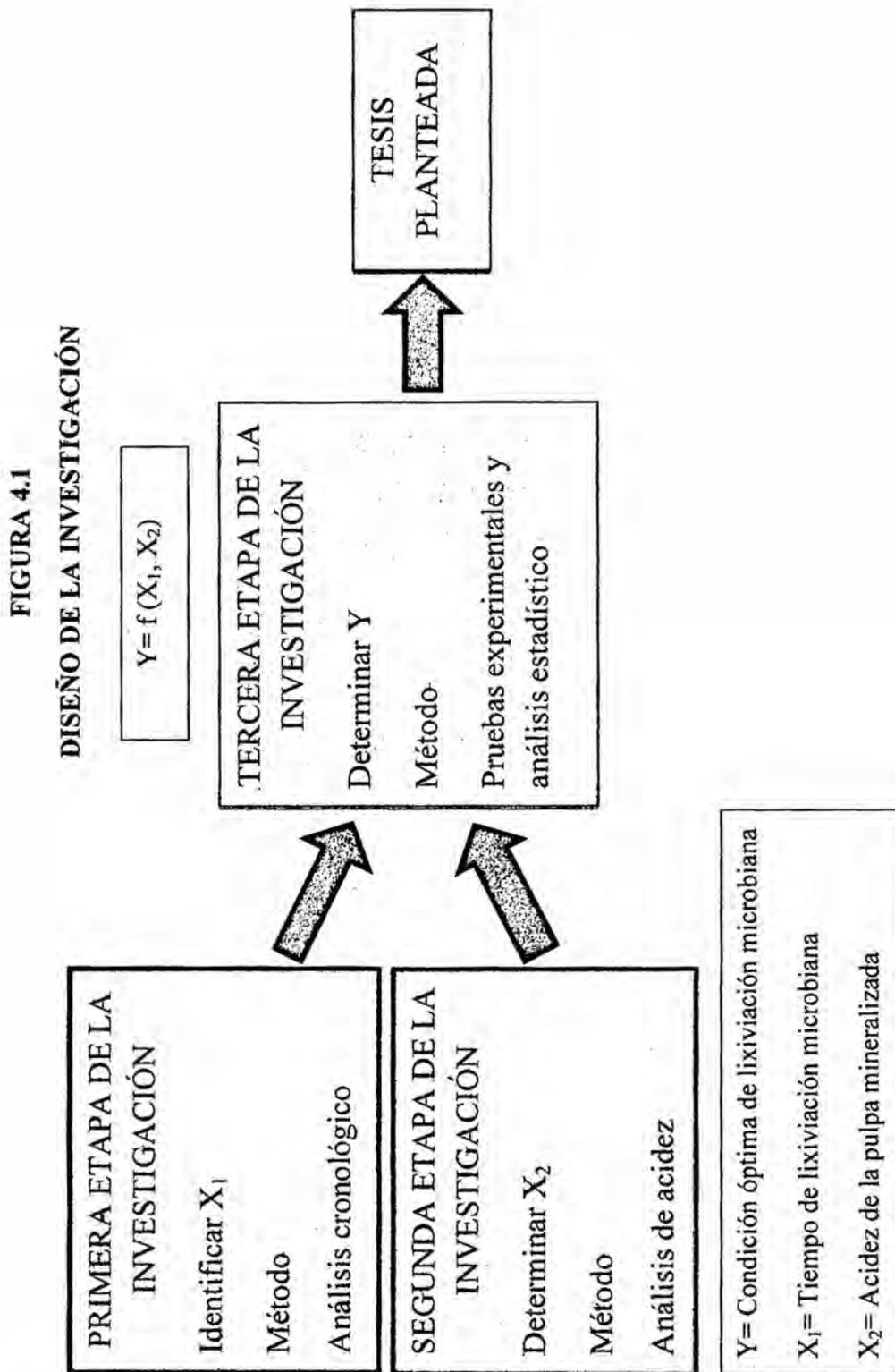
#### ➤ Por el énfasis en la naturaleza de los datos manejados

La investigación fue cuantitativa.

### 4.2. Diseño de la investigación.

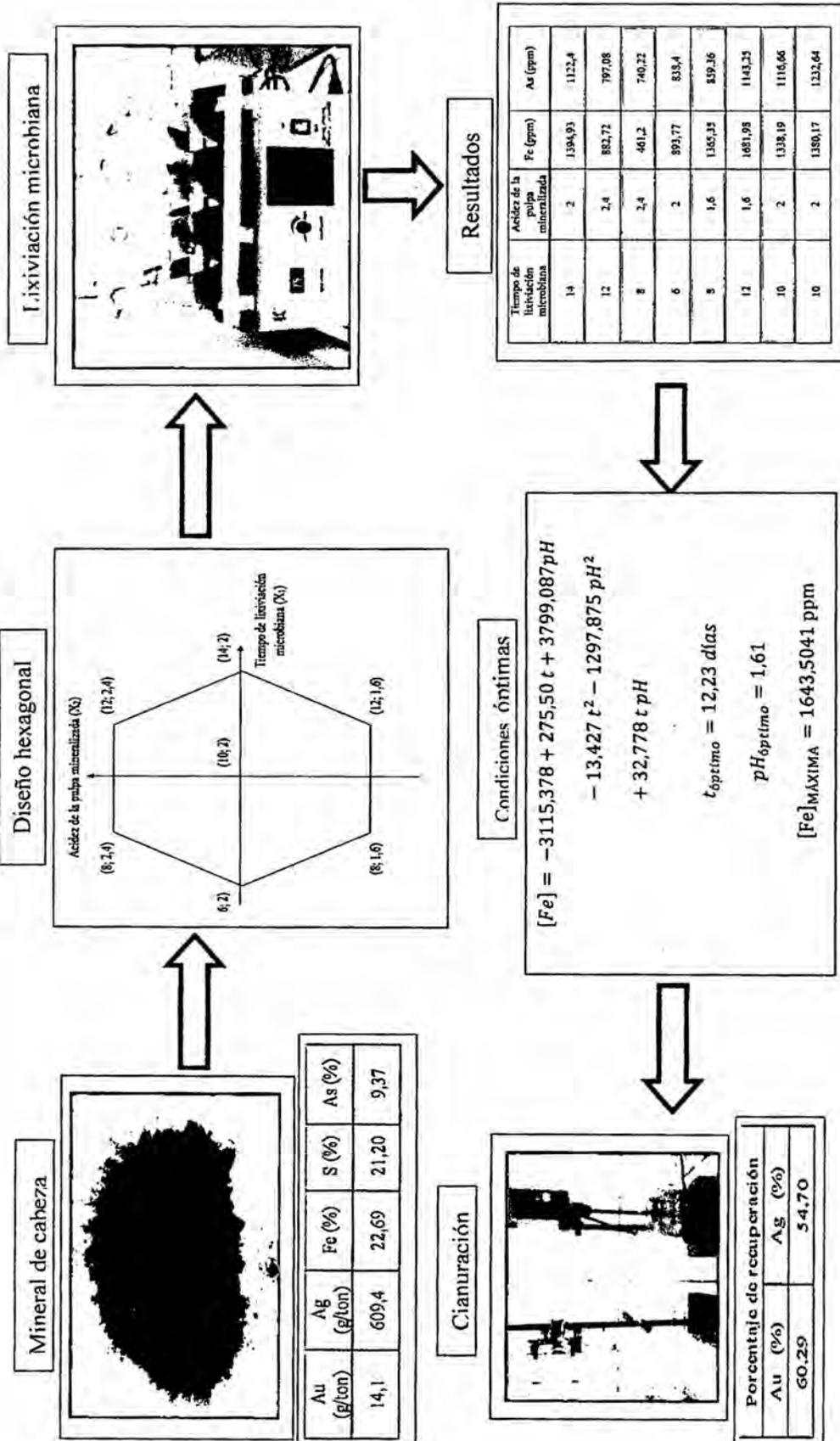
La investigación fue del tipo experimental ya que se evaluó el efecto que tuvo la lixiviación microbiana sobre el mineral sulfurado aurífero.

La investigación realizada tuvo 3 etapas que detalladamente se muestra en la figura 4.1.



Luego se realizaron las pruebas experimentales siguiendo el diseño experimental que se muestra en la figura 4.2.

**FIGURA 4.2  
DISEÑO EXPERIMENTAL**



### **4.3. Población y muestra**

El criterio de población no fue aplicable para la presente investigación pero si se aplica el criterio de muestra experimental.

La muestra experimental estuvo conformada por 50 Kg de mineral, la cual fue homogenizada y cuarteada para realizar las pruebas experimentales.

### **4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para la recolección de datos se utilizaron los siguientes equipos de medición:

- Para medir el pH de la solución: pHmetro calibrado marca HANNA modelo HI 98129.
- Para medir el potencial óxido reducción (ORP): multiparámetro de la marca HANNA modelo HI 8424.
- Para el conteo microbiano: microscopio LEICA modelo DM750 y cámara de Neubauer marca MARIENFELD.
- Para medir el tiempo de lixiviación microbiana: cronómetro calibrado.
- Para medir el peso del mineral y de insumos: balanza OHAUS calibrada con 3 decimales.
- Para las lecturas de absorción atómica: Espectrofotómetro de absorción atómica Varian AA 240.
- Para el sistema de agitación de lixiviación microbiana a 150 rpm: agitador GEMMY Orbit Shaker VRN-480.
- Para la agitación de la cianuración a 300 rpm: agitador CAT R-50.

#### **4.4.1. Plan de recolección y procesamiento de la información**

- Tabla de recolección de datos para la determinación de los análisis químicos (Tabla 4.1).
- Tabla de recolección de datos para hallar la caracterización mineralógica (Tabla 4.2).
- Tabla de recolección de datos para la determinación del diseño experimental hexagonal (Tabla 5.1).
- Tabla de recolección de datos para hallar los coeficientes del modelo matemático (Tabla 5.5).
- Tabla de recolección de datos para la cianuración del mineral pretratado (Tabla 5.7).
- Tabla de recolección de datos para el potencial óxido reducción (Tabla 10.6).
- Tabla de recolección de datos para el conteo microbiano (Tabla 10.7).

#### **4.4.2. Materiales**

- pH metro HI 98129 HANNA
- Multiparámetro para lectura de ORP 8424 HANNA
- Balanza electrónica calibrada OHAUS ADVENTURER™
- Microscopio óptico LEICA DM750
- Cámara de Neubauer MARIENFELD
- Papel tissue
- Lunas portaobjetos
- Agitador GEMMY Orbit Shaker VRN-480
- Agitador CAT R50

- Pipetas de Pasteur
- Cámara de aislamiento
- Mechero Bunsen
- Matraces de 500 mL y de 1 L
- Vaso de precipitado de 1L
- Tubos de ensayo y gradillas
- Papel filtro N<sup>o</sup> 41
- Fiola de 250 mL, 500mL y 1000 mL
- Bureta de 50 mL
- Pipeta de 10 mL y 20 mL
- Probeta de 50 mL y 100 mL
- Piceta
- Tamices
- Equipo de tamizado RO-TAP

#### **4.4.3. Reactivos y soluciones**

- Sulfato de amonio  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- Fosfato ácido de potasio  $\text{K}_2\text{HPO}_4$
- Cloruro de potasio  $\text{KCl}$
- Sulfato de magnesio heptahidratado  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
- Nitrato de calcio dihidratado  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- Sulfato ferroso heptahidratado  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
- Ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{CC})$
- Solución buffer pH 4 y pH 7

- Cianuro de sodio NaCN
- Nitrato de plata AgNO<sub>3</sub>
- Yoduro de potasio KI
- Oxido de calcio CaO
- Alcohol etílico al 96 %
- Aceite de inmersión

#### 4.5. Procedimientos de recolección de datos

##### 4.5.1. Preparación del medio de cultivo 9K

- Primero se llevó a la autoclave para esterilizar los materiales de vidrio: matraces, lunas de reloj, espátula y vasos de precipitado.
- Después pesamos los componentes del medio de cultivo 9K:

$$W_{(NH_4)_2SO_4} = 3 \text{ g}$$

$$W_{KCl} = 0,1 \text{ g}$$

$$W_{K_2HPO_4} = 0,5 \text{ g}$$

$$W_{MgSO_4 \cdot 7H_2O} = 0,5 \text{ g}$$

$$W_{Ca(NO_3)_2 \cdot 2H_2O} = 0,01 \text{ g}$$

$$W_{FeSO_4 \cdot 7H_2O} = 33 \text{ g}$$

- A continuación se adicionó 1 L de H<sub>2</sub>O destilada esterilizada y agregamos unas gotas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(CC) hasta llegar a pH 1,8.

se adicionó 24 gotas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para 1 litro

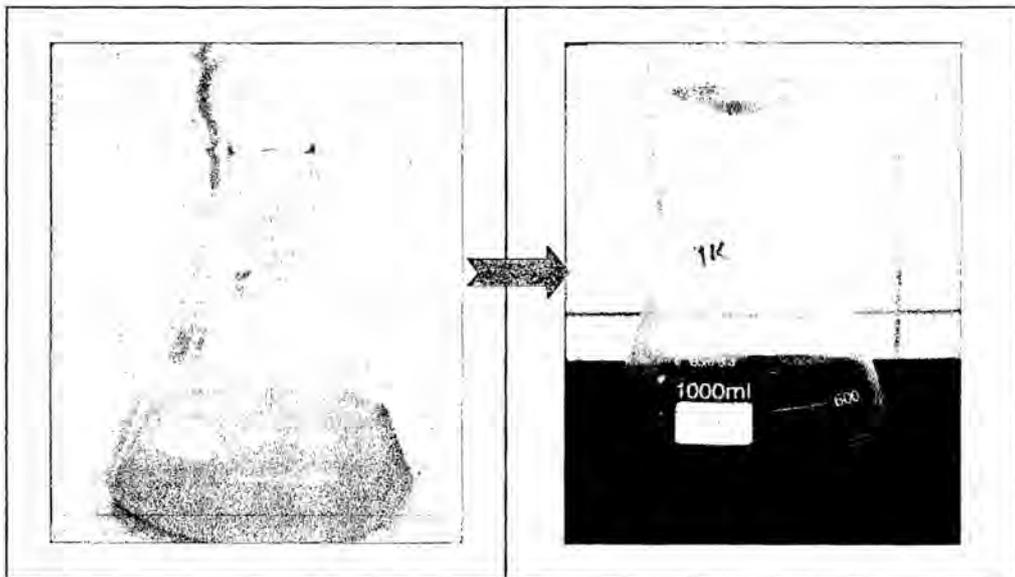
##### 4.5.2. Resiembra del inóculo de microorganismos

- Se agregó el contenido del medio 9K en 4 matraces (de 225 mL cada uno) y fueron llevados a la cámara de aislamiento.

- Después, del matraz que tenía el inoculo puro, se tomó 25 mL para cada uno de los 4 matraces con el medio 9K, se les colocaron tapones de algodón y fueron llevados al shaker.
- A continuación se esperó que la solución de cada matraz, inicialmente verde claro, se torne de color rojo debido a la oxidación del hierro y por la alta concentración de bacterias.

**FIGURA 4.3**

**MEDIO DE CULTIVO 9K**



- Para la primera generación de *Acidithiobacillus ferrooxidans* el tiempo que se tomó para obtener el concentrado de bacterias fue de:

$$\text{tiempo}_{\text{resiembr}a \text{ inicial}} = 7 \text{ días}$$

- Luego se realizó diferentes pruebas de lixiviación microbiana y sus respectivas resiembras para que las bacterias se adapten al mineral sulfurado aurífero.

- Entonces para la vigésima generación de *Acidithiobacillus ferrooxidans* se realizó la resiembra con el medio de cultivo 9K y el tiempo fue de:

$$\text{tiempo}_{\text{resiembra final}} = 2 \text{ días}$$

#### 4.5.3. Muestreo y cuarteo de la muestra experimental

- El mineral de cabeza se colocó en una manta, homogenizamos agitando varias veces y se realizó el muestreo.
- Después dividimos el contenido en 4 partes (cuarteo) y se procedió a sacar en una bolsa 10 kg de mineral, que fue la muestra representativa.

**FIGURA 4.4**

**MINERAL DE CABEZA**



#### 4.5.4. Análisis químicos de la muestra experimental

- Luego se tomó 200 gramos de muestra representativa del mineral sulfurado aurífero y llevamos al laboratorio Actlabs Skyline Perú S.A.C. para realizar los análisis químicos.

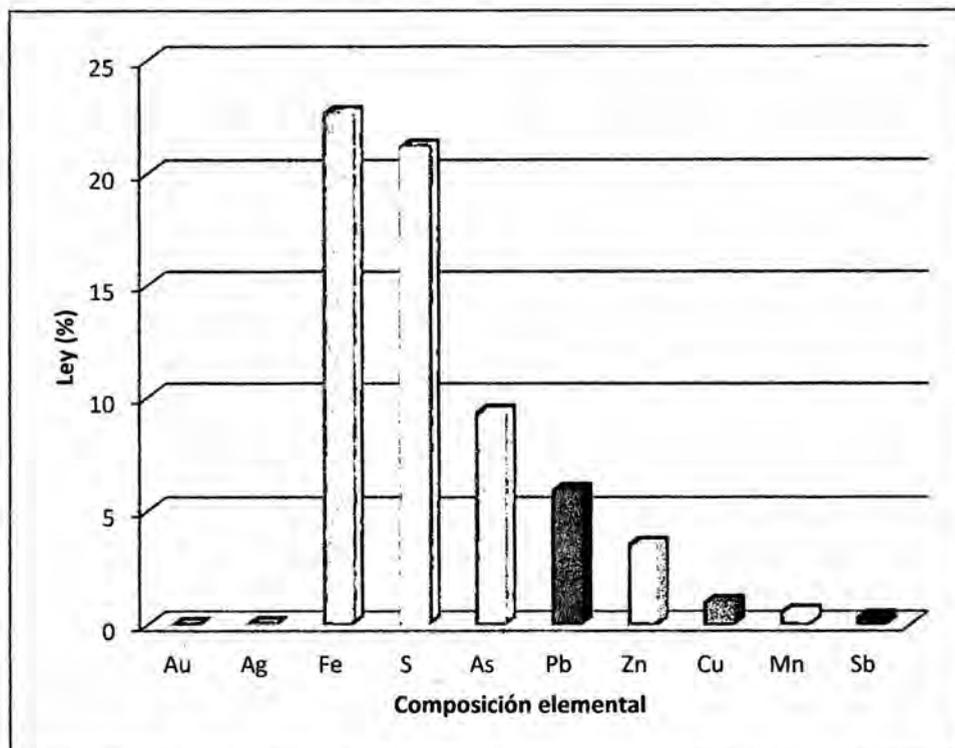
- Entonces se determinó la composición química del mineral de cabeza, los resultados fueron los siguientes:

**CUADRO 4.1**  
**ANÁLISIS QUÍMICOS**

Au (g/ton)	Ag (g/ton)	Fe (%)	S (%)	As (%)
14,1	609,4	22,69	21,20	9,37
Pb (%)	Zn (%)	Cu (%)	Mn (%)	Sb (%)
5,94	3,56	1,02	0,6	0,36

- De forma gráfica tenemos:

**GRÁFICA 4.1**  
**ANÁLISIS QUÍMICOS**



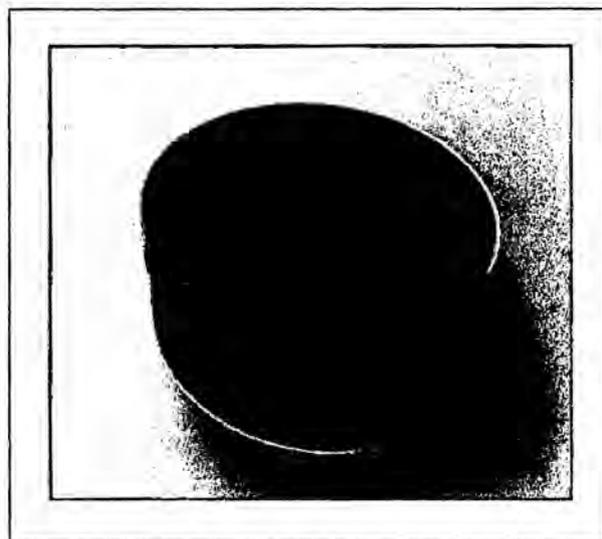
- Se concluyó que el mineral presentaba concentraciones elevadas de hierro, azufre y arsénico; además concentraciones intermedias de plomo, zinc y cobre, que al formar diferentes compuestos en el mineral, se comportaban como cianicidas en el proceso de cianuración, produciendo una baja recuperación de oro y plata.

#### **4.5.5. Caracterización mineralógica de la muestra experimental**

- La caracterización mineralógica se realizó en la EAP de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y en FA Ingenieros S.A.C.
- Se envió 100 g de muestra representativa para la preparación de la briqueta pulida.

**FIGURA 4.5**

**BRIQUETA PULIDA**



- Se realizó la caracterización mineralógica para determinar que especies (sulfuros) conforman el mineral y como se encuentra el oro. Los resultados fueron los siguientes:

a. Mineralogía.

- En la caracterización mineralógica se identificó los minerales que han sido observados por el microscopio de luz polarizada, los cuales fueron los siguientes:

**CUADRO 4.2**  
**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA**

<b>Minerales</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Abreviatura</b>
<b>Pirita</b>	$\text{FeS}_2$	py
<b>Arsenopirita</b>	$\text{FeAsS}$	apy
<b>Esfalerita</b>	$\text{ZnS}$	ef
<b>Galena</b>	$\text{PbS}$	gn
<b>Calcopirita</b>	$\text{CuFeS}_2$	cp
<b>Boulangerita</b>	$\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$	boul
<b>Tenantita</b>	$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}(\text{Ag,Fe,Zn})$	tn
<b>Goetita</b>	$\text{FeO.OH}$	gt
<b>Enargita</b>	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	en
<b>Covelita</b>	$\text{CuS}$	cv
<b>Oro</b>	Au	Au
<b>Gangas</b>	-	Ggs

**Fuente: Caracterización mineralógica EAP Ingeniería Geológica UNMSM**

b. Distribución volumétrica

- La distribución volumétrica se realizó para la muestra en base a los minerales que intervinieron y fue la siguiente:

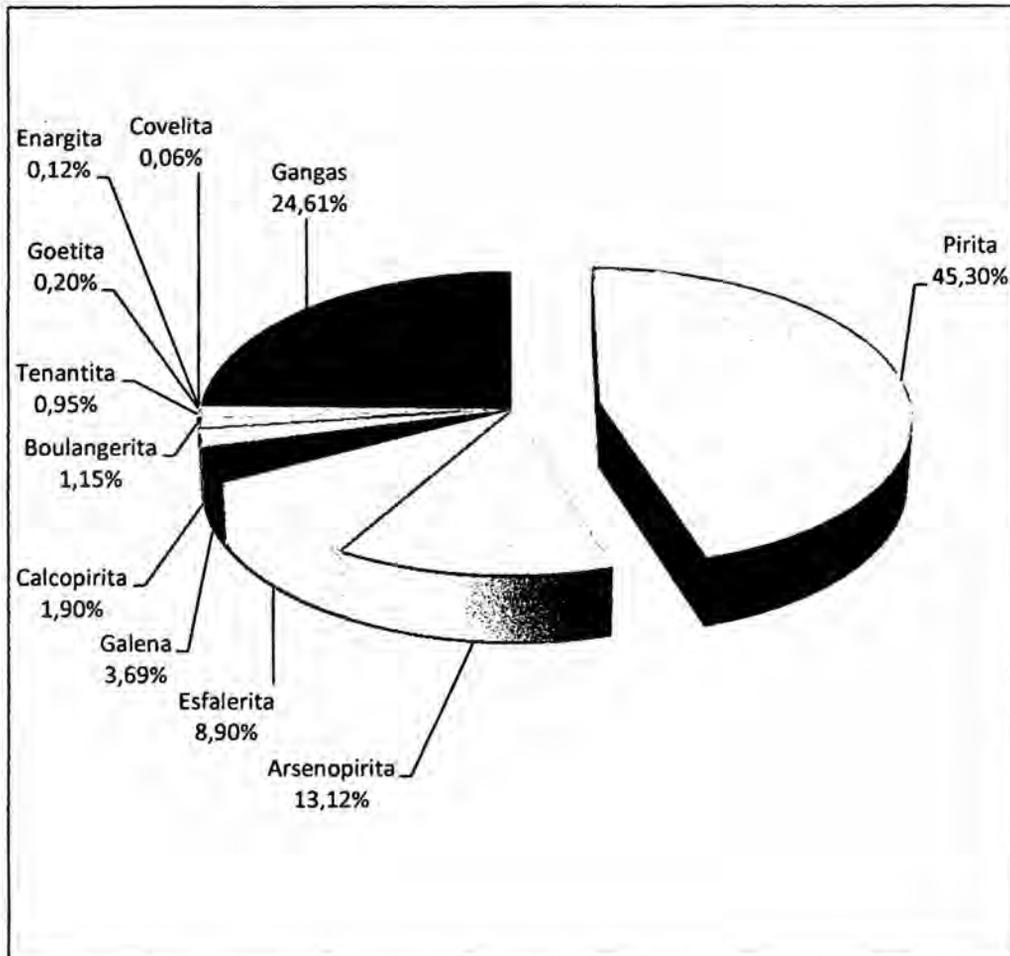
**CUADRO 4.3**  
**DISTRIBUCIÓN VOLUMÉTRICA**

<b>Minerales</b>	<b>Volumen porcentual</b>
<b>Pirita</b>	45,30
<b>Arsenopirita</b>	13,12
<b>Esfalerita</b>	8,9
<b>Galena</b>	3,69
<b>Calcopirita</b>	1,9
<b>Boulangerita</b>	1,15
<b>Tenantita</b>	0,95
<b>Goetita</b>	0,2
<b>Enargita</b>	0,12
<b>Covelita</b>	0,06
<b>Oro</b>	0
<b>Gangas</b>	24,61

**Fuente: Caracterización mineralógica EAP Ingeniería Geológica UNMSM**

- Se realizó la siguiente gráfica:

**GRÁFICA 4.2**  
**DISTRIBUCIÓN VOLUMÉTRICA**



c. Grados de liberación

- Los grados de liberación que presentaron los minerales que intervinieron en el análisis de la muestra, nos indicaron las dificultades que se encontraron durante la molienda de los diferentes minerales.
- Los grados de liberación fueron los siguientes:

**CUADRO 4.4**  
**GRADOS DE LIBERACIÓN**

<b>Minerales</b>	<b>Grados de liberación</b>
<b>Pirita</b>	95,06
<b>Arsenopirita</b>	93,90
<b>Esfalerita</b>	79,28
<b>Galena</b>	71,20
<b>Calcopirita</b>	84,21
<b>Boulangerita</b>	76,90
<b>Tenantita</b>	85,10
<b>Goetita</b>	100
<b>Enargita</b>	0
<b>Covelita</b>	0
<b>Oro</b>	0
<b>Gangas</b>	97,50

**Fuente:** Caracterización mineralógica EAP Ingeniería Geológica UNMSM

La interpretación de los grados de liberación fue la siguiente:

- La pirita ocupó el 45,30 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 95,06 % se encontró libre, mientras que el 4,94 % restante se encontró aún entrelazado.
- La arsenopirita ocupó el 13,12 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 93,90 % se halló libre, mientras que el 6,10 % restante se encontró entrelazado.

➤ La tenantita ocupó el 0,95 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 85,10 % se halló libre, mientras que el 14,90 % se encontró entrelazado.

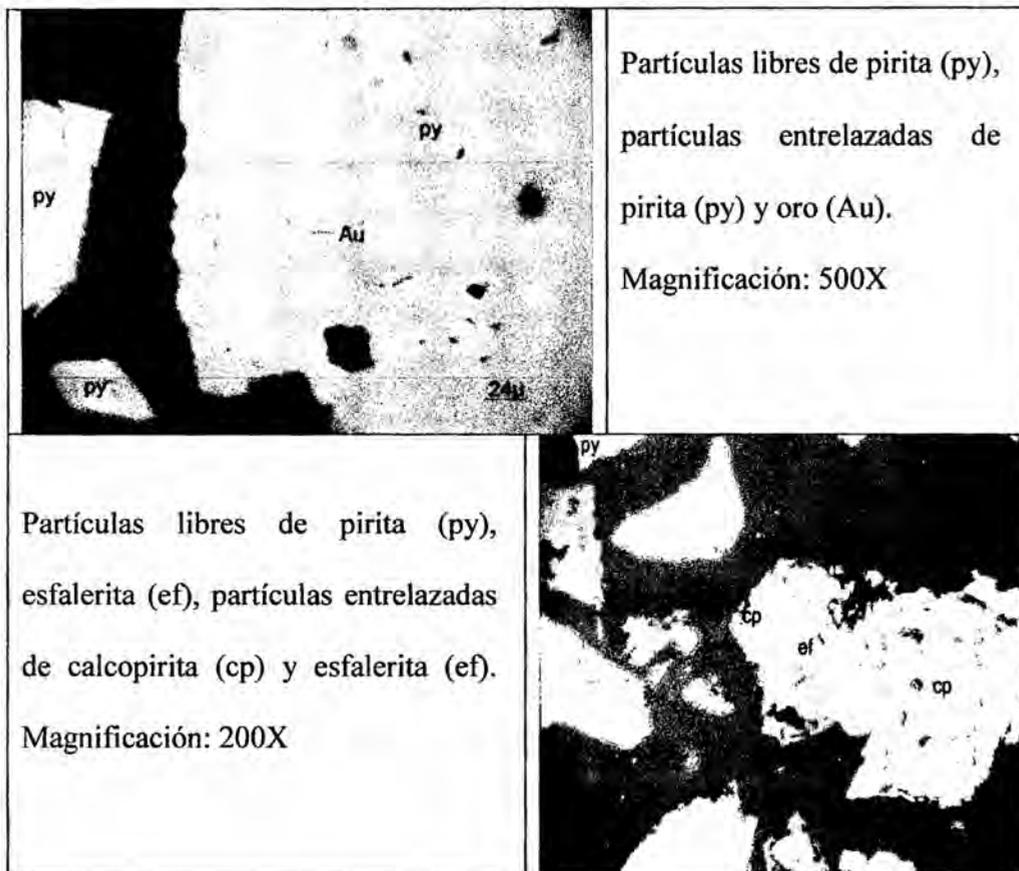
➤ El oro ocupó el 0,01 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 100 % se encontró entrelazado.

d. Fotomicrografías

➤ A continuación se muestra las fotomicrografías tomadas durante el estudio, que son pruebas fehacientes de lo observado.

**FIGURA 4.6**

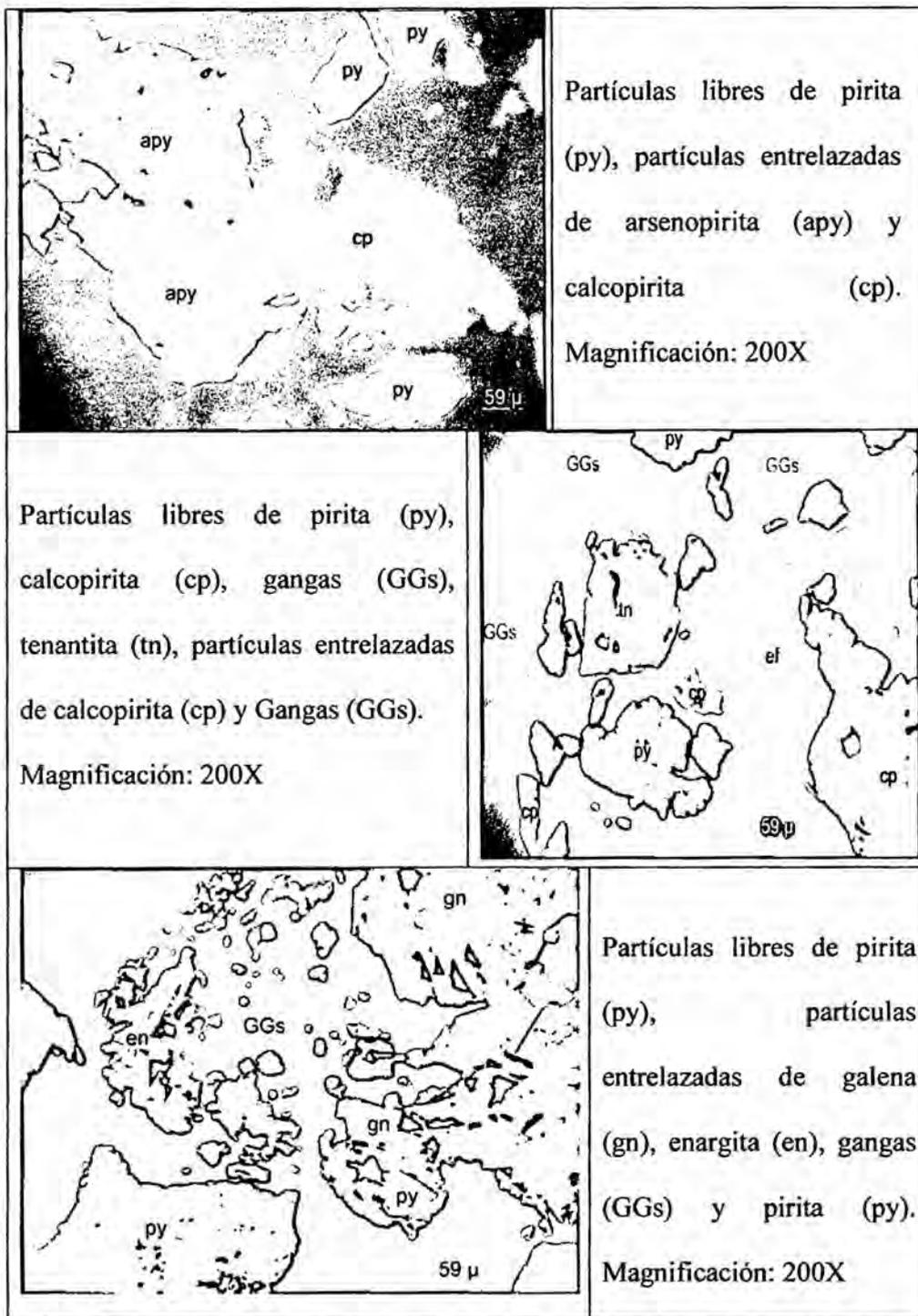
**FOTOMICROGRAFÍA 1 DE MINERAL DE CABEZA**



**Fuente: Caracterización mineralógica EAP Ingeniería Geológica UNMSM**

FIGURA 4.7

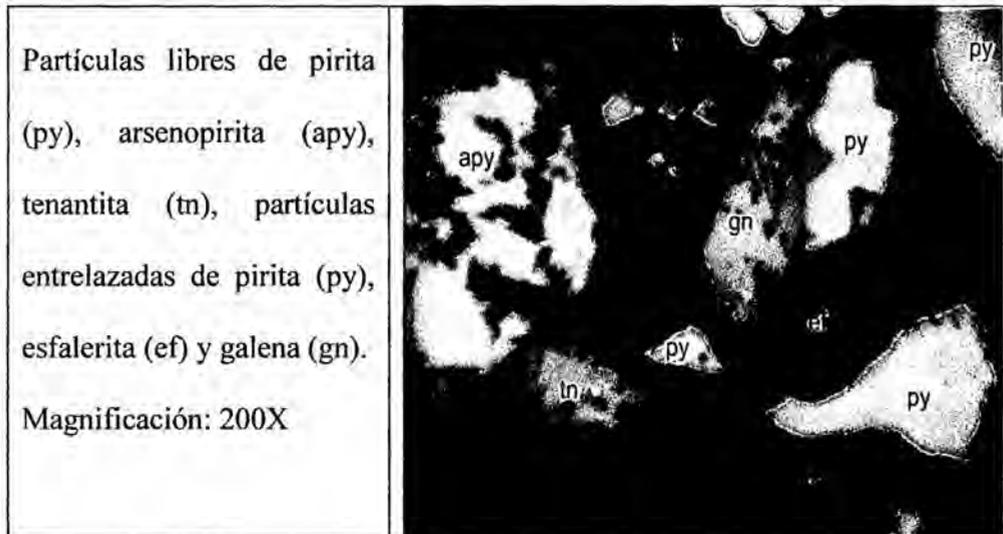
FOTOMICROGRAFÍA 2 DE MINERAL DE CABEZA



Fuente: Caracterización mineralógica EAP Ingeniería Geológica UNMSM

**FIGURA 4.8**

**FOTOMICROGRAFÍA 3 DE MINERAL DE CABEZA**



**Fuente: Caracterización mineralógica EAP Ingeniería Geológica UNMSM**

Entonces se llegó a la conclusión de la caracterización mineralógica:

- El oro se encontró en la pirita y necesitó un pretratamiento, para oxidar la matriz de pirita y liberar la partícula de oro, para que sea recuperada por el proceso de cianuración.
- Además la plata se encontró en la tenantita (sulfuro) y para liberarla se tiene que oxidar la matriz (solubilizar los elementos que rodean a la plata) y luego sea recuperada por el proceso de cianuración.

**4.5.6. Análisis granulométrico de la muestra experimental**

- El análisis se desarrolló en el Laboratorio de Metalurgia Extractiva de la EAP de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- De la muestra representativa se tomó 100 gramos de mineral de cabeza y realizamos el análisis granulométrico (se utilizó las mallas 100, 200 y 325

TYLER); realizamos el tamizado en húmedo y los resultados fueron los siguientes:

**CUADRO 4.5**  
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

$\mu\text{m}$	Malla	Peso (R)	% Peso	% Ac. Ret.	% Ac. Pas.
150	100	9,751	9,751	9,751	90,249
75	200	14,696	14,696	24,447	75,553
45	325	16,598	16,598	41,045	58,955
	-325	58,955	58,955	100	0

- El 75,55 % del mineral fue pasante la malla 200 TYLER.

#### 4.5.7. Condiciones experimentales de lixiviación microbiana

- Primero se llevó a la autoclave para esterilizar los materiales de vidrio.
- Después se pesó los componentes del medio de cultivo 9 K.
- Pesamos por triplicado, se agregó en 3 matraces de 1 L y se completó con agua destilada.
- Luego agregamos gotas de  $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{CC})$  de la siguiente forma:
  - matraz 1: 33 gotas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  para  $\text{pH} = 1,6$
  - matraz 2 : 16 gotas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  para  $\text{pH} = 2$
  - matraz 3 : 8 gotas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  para  $\text{pH} = 2,4$

- Después se pesó en una luna de reloj 200 gramos de mineral sulfurado aurífero y llevamos a la estufa hasta peso constante (retirar humedad).
- Luego con el mineral seco, pesamos en 8 lunas de reloj 15 gramos de mineral en cada una.
- Las condiciones de operación del proceso y la distribución de los 8 matraces fue de la siguiente forma:

**CUADRO 4.6**

**CONDICIONES EXPERIMENTALES DE LIXIVIACIÓN MICROBIANA**

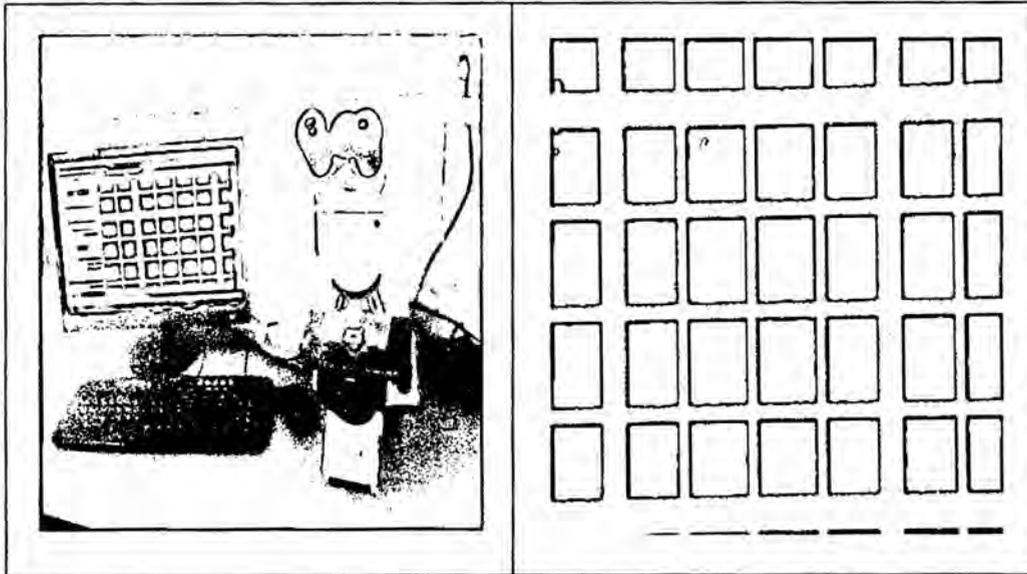
<b>PARÁMETROS DE TRABAJO</b>	<b>CONDICIONES EXPERIMENTALES</b>
<b>Peso del mineral</b>	15 g
<b>Granulometría</b>	75,55 % -200 tyler
<b>pH de la pulpa mineralizada</b>	1,6 – 2,4 (según diseño experimental)
<b>Velocidad de agitación</b>	150 rpm
<b>Volumen de inóculo</b>	30 mL (10 %)
<b>Volumen del medio 9K</b>	255 mL
<b>L</b>	285 mL
<b>S</b>	15 g
<b>T</b>	300 g
<b>% SS</b>	5 %

**CUADRO 4.7****DISTRIBUCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL**

Número	X <sub>1</sub> = Tiempo de la lixiviación microbiana		X <sub>2</sub> = Acidez de la pulpa mineralizada	
	Código	Días	Código	pH
1	1	14	0	2
2	0,5	12	0,9	2,4
3	-0,5	8	0,9	2,4
4	-1	6	0	2
5	-0,5	8	-0,9	1,6
6	0,5	12	-0,9	1,6
7	0	10	0	2
8	0	10	0	2

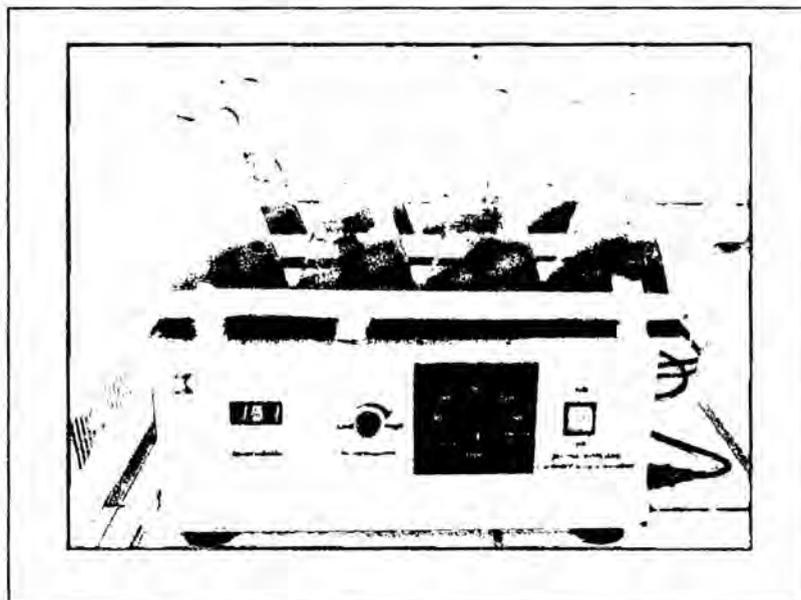
- Se realizó el seguimiento día a día del ORP y número de bacterias.

**FIGURA 4.9**  
**CONTEO MICROBIANO**



- Todos los días se controló que el pH se encuentre fijo según el diseño experimental hexagonal planteado con la adición de  $H_2SO_4$  (cc).

**FIGURA 4.10**  
**LIXIVIACIÓN MICROBIANA**



- Al finalizar se tomó una alícuota de cada matraz y analizamos por absorción atómica para hierro y arsénico.
- Luego se retiró la solución de lixiviación microbiana, llevamos a la estufa las 8 muestras (hasta peso constante) para tener el mineral “pretratado” listo y se realice la caracterización mineralógica.

#### **4.5.8. Caracterización mineralógica de la muestra pretratada**

- La caracterización mineralógica se realizó en la empresa FA Ingenieros S.A.C.
- Se llevó una muestra representativa del mineral pretratado por lixiviación microbiana para la preparación de una sección delgada.
- En las fotomicrografías se observó el efecto de la lixiviación microbiana sobre el mineral sulfurado aurífero.

**FIGURA 4.11**

#### **SECCIÓN DELGADA**



#### 4.5.9. Proceso de cianuración

- Se realizó el proceso de cianuración para el mineral de cabeza y el mineral pretratado por lixiviación microbiana.
- De los resultados del diseño experimental hexagonal, la muestra de mineral pretratado a las condiciones óptimas de lixiviación microbiana, se llevó a la estufa hasta peso constante.
- Se pesó 60 g de mineral de cabeza y fue adicionado a un vaso de precipitado de 1L, agregándose 240 mL de agua destilada y cal para regular el pH a 10,5.
- La cianuración para el mineral pretratado (por lixiviación microbiana) se realizó con las mismas condiciones.
- Posteriormente adicionamos 0,3 g de NaCN para tener una concentración de 1000 ppm e iniciar la cianuración.
- A continuación se preparó el titulante  $\text{AgNO}_3$ , pesando 4,33 g y se enrazando con agua destilada en una fiola de 1 L; luego pesamos 5 g de KI y se enrazó con agua destilada en una fiola de 100 mL.
- Se controló el pH con cal ( $\text{CaO}$ ) a 10,5 y se tomó alícuotas para determinar el contenido de cianuro libre (2, 4, 8, 16, 24, 48, 72 y 96 horas).
- La prueba de cianuración se realizó bajo las condiciones que se muestran a continuación:

**CUADRO 4.8****CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE CIANURACIÓN**

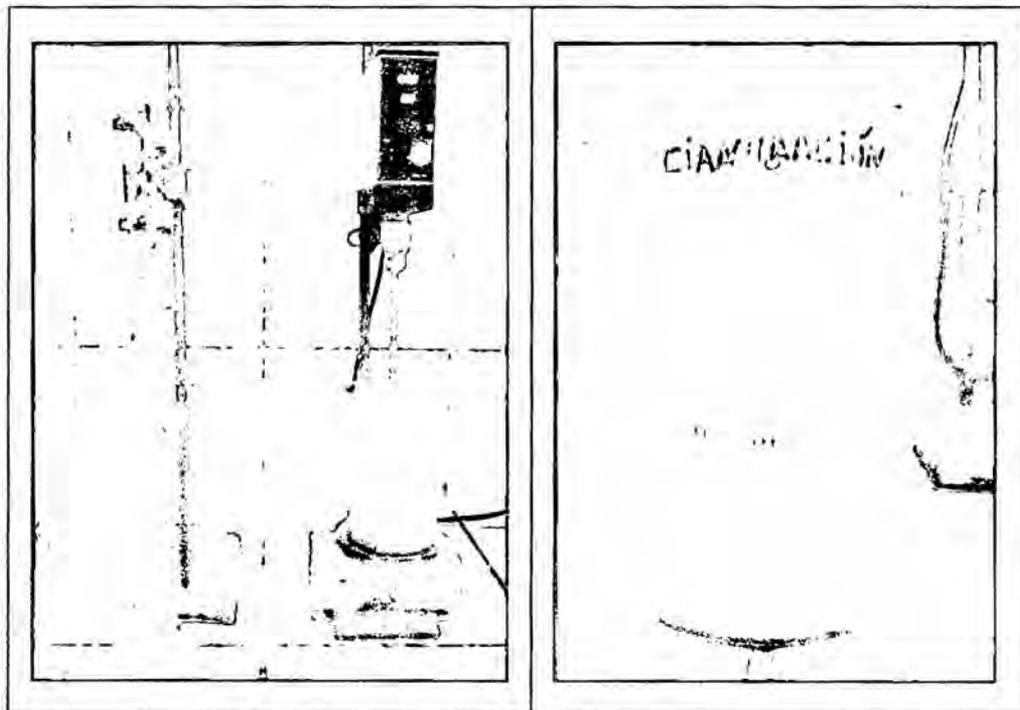
<b>VARIABLES</b>	<b>CANTIDADES</b>
<b>Peso del mineral</b>	60 g
<b>Granulometría</b>	75,55 % -200 tyler
<b>pH de la pulpa mineralizada</b>	10,5
<b>Velocidad de agitación</b>	300 rpm
<b>Concentración de NaCN</b>	1000 ppm
<b>L</b>	240 mL
<b>S</b>	60 g
<b>T</b>	300 g
<b>% SS</b>	20 %
<b>Tiempo</b>	96 horas

- Luego de finalizar tomamos una alicuota y se analizó por absorción atómica de oro y plata (determinamos el contenido de oro y plata en la solución cianurada).
- El relave se llevó a la estufa a secar hasta peso constante y luego se envió para analizar el contenido de oro y plata.

- Con los resultados obtenidos se determinó el porcentaje de recuperación de oro y plata para el mineral de cabeza y el mineral pretratado a las condiciones óptimas de lixiviación microbiana.

**FIGURA 4.12**

**PROCESO DE CIANURACIÓN**

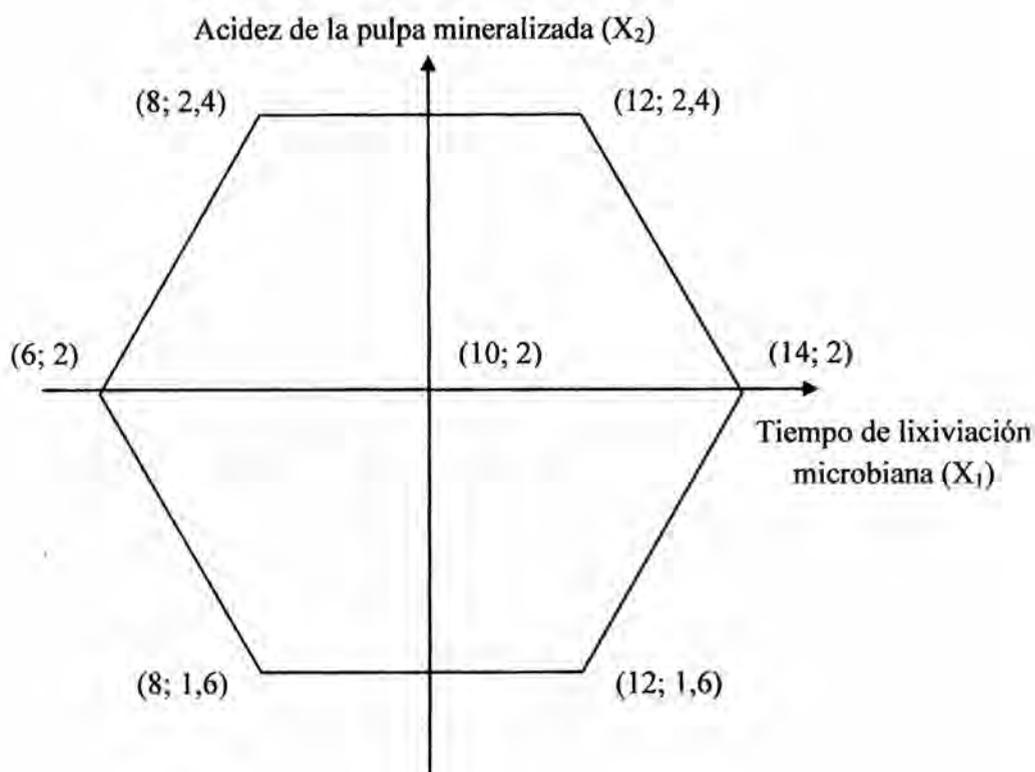


**4.6. Procedimiento estadístico y análisis de datos**

**4.6.1. Tratamiento estadístico**

Se realizó el análisis en base al diseño experimental hexagonal para múltiples niveles con dos factores, para obtener el modelo matemático multivariable, que permitió representar mediante una ecuación el desarrollo de la lixiviación microbiana y la interacción que presentan las variables.

**FIGURA 4.13**  
**DISEÑO EXPERIMENTAL HEXAGONAL**



La evaluación del diseño experimental hexagonal se realizó utilizando el programa Excel 2013.

#### **4.6.2. Análisis estadístico**

Para el análisis estadístico se realizó el análisis de varianza (ANOVA) utilizando como software Excel 2013.

Mediante el análisis de varianza (ANOVA) se determinó si los datos experimentales obtenidos se ajustan al modelo matemático multivariable planteado, obteniendo un coeficiente de correlación aceptable.

Mediante los métodos de regresión y matricial se determinó los coeficientes del modelo matemático multivariable, luego se calculó el tiempo óptimo de lixiviación microbiana y la acidez óptima de la pulpa mineralizada, después fueron reemplazados en la ecuación del modelo matemático multivariable y se determinó la máxima solubilidad de hierro.

## V. RESULTADOS

### 5.1. Resultados para las condiciones óptimas de lixiviación microbiana

- A continuación mostramos el código, el valor real para cada factor y los resultados de los análisis de absorción atómica en ppm de hierro y arsénico para el diseño experimental hexagonal:

**CUADRO 5.1**

#### DISEÑO EXPERIMENTAL HEXAGONAL

Número	X <sub>1</sub> = Tiempo de lixiviación microbiana		X <sub>2</sub> = Acidez de la pulpa mineralizada		Y = Solubilidad de Fe (ppm)	
	Código	Días	Código	pH	Fe (ppm)	As (ppm)
1	1	14	0	2	1394,93	1122,4
2	0,5	12	0,9	2,4	882,72	797,08
3	-0,5	8	0,9	2,4	461,2	740,22
4	-1	6	0	2	893,77	838,4
5	-0,5	8	-0,9	1,6	1365,35	859,36
6	0,5	12	-0,9	1,6	1681,98	1143,25
7	0	10	0	2	1338,19	1116,66
8	0	10	0	2	1380,17	1232,64

- Para determinar los coeficientes del modelo matemático multivariable del diseño experimental hexagonal se realizó la siguiente tabla:

**CUADRO 5.2**

**PREPARACIÓN PARA EL MODELO MATEMÁTICO**

t	pH	t <sup>2</sup>	pH <sup>2</sup>	t*pH	Fe (ppm)
14	2	196	4	28	1394,93
12	2,4	144	5,76	28,8	882,72
8	2,4	64	5,76	19,2	461,2
6	2	36	4	12	893,77
8	1,6	64	2,56	12,8	1365,35
12	1,6	144	2,56	19,2	1681,98
10	2	100	4	20	1338,19
10	2	100	4	20	1380,17

- Luego aplicando el método de regresión se determinó la estadística de la regresión, el análisis de varianza (ANOVA) y los coeficientes del modelo matemático multivariable:

**CUADRO 5.3**  
**ESTADÍSTICA DE LA REGRESIÓN**

<b>Coefficiente de correlación múltiple</b>	0,99526
<b>Coefficiente de determinación R<sup>2</sup></b>	0,99055
<b>R<sup>2</sup> ajustado</b>	0,96694
<b>Error típico</b>	71,56070
<b>Observaciones</b>	8

- Entonces con los resultados obtenidos para el coeficiente de correlación múltiple de 0,99 y el R<sup>2</sup> ajustado de 0,96; se concluyó que el diseño experimental hexagonal se ajusta al modelo matemático multivariable.

**CUADRO 5.4**  
**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
<b>Regresión</b>	5	1074142,877	214828,5754	41,951	0,0234
<b>Residuos</b>	2	10241,87022	5120,935108	-	-
<b>Total</b>	7	1084384,747	-	-	-

- Del análisis de varianza (ANOVA) se determinó que el valor crítico F es menor a 0,05 ( $0,023 < 0,05$ ) esto nos indica que los datos experimentales se ajustan al modelo matemático multivariable (ecuación cuadrática).

- Los coeficientes del modelo matemático fueron:

**CUADRO 5.5**

**COEFICIENTES DEL MODELO MATEMÁTICO**

Coeficientes	Valores	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
<b>a<sub>0</sub></b>	-3115,3783	1765,7281	-1,7643	0,21971
<b>a<sub>1</sub></b>	275,5008	126,9236	2,1706	0,1621
<b>a<sub>2</sub></b>	3799,0875	1417,1685	2,6807	0,1155
<b>a<sub>3</sub></b>	-13,4268	4,4725	-3,0020	0,0953
<b>a<sub>4</sub></b>	-1297,875	335,4408	-3,8691	0,0607
<b>a<sub>5</sub></b>	32,7781	44,7254	0,7328	0,5398
Coeficientes	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
<b>a<sub>0</sub></b>	-10712,6934	4481,9368	-10712,6934	4481,9368
<b>a<sub>1</sub></b>	-270,6074	821,6091	-270,6074	821,6091
<b>a<sub>2</sub></b>	-2298,4966	9896,6716	-2298,4966	9896,6716
<b>a<sub>3</sub></b>	-32,6706	5,8169	-32,6706	5,8169
<b>a<sub>4</sub></b>	-2741,1603	145,4103	-2741,1603	145,4103
<b>a<sub>5</sub></b>	-159,6599	225,2161	-159,6599	225,2161

- El modelo matemático multivariable (ecuación cuadrática) para el diseño experimental hexagonal fue el siguiente:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_1^2 + a_4X_2^2 + a_5X_1X_2$$

$$[\text{Fe}] = a_0 + a_1 t + a_2 \text{pH} + a_3 t^2 + a_4 \text{pH}^2 + a_5 t \text{pH}$$

- Reemplazando los coeficientes obtenidos para el modelo matemático:

$$[\text{Fe}] = -3115,378 + 275,50 t + 3799,087\text{pH} - 13,427 t^2 - 1297,875 \text{pH}^2 + 32,778 t \text{pH}$$

- A partir del modelo matemático multivariable (ecuación cuadrática) obtenida se determina para las variables (factores): el tiempo óptimo de lixiviación microbiana y la acidez óptima de la pulpa mineralizada.
- Entonces en la ecuación cuadrática se derivó con respecto a cada una de las variables que son el tiempo y el pH:

$$[\text{Fe}] = -3115,378 + 275,50 t + 3799,087\text{pH} - 13,427 t^2 - 1297,875 \text{pH}^2 + 32,778 t \text{pH}$$

$$\frac{d[\text{Fe}]}{dt} = +275,50 - 26,8536 t + 32,778 \text{pH} = 0$$

$$\frac{d[\text{Fe}]}{d\text{pH}} = +3799,087 - 2595,75 \text{pH} + 32,778 t = 0$$

- Resolviendo el sistema de ecuaciones con 2 variables se determinó:

$$t_{\text{óptimo}} = 12,2343 \text{ días}$$

$$\text{pH}_{\text{óptimo}} = 1,61807$$

- Finalmente reemplazando en el modelo matemático multivariable se determinó la máxima solubilidad de hierro para la condición óptima de lixiviación microbiana:

$$[\text{Fe}] = -3115,378 + 275,50 t + 3799,087\text{pH} - 13,427 t^2 - 1297,875 \text{pH}^2 + 32,778 t \text{pH}$$

$$[\text{Fe}]_{\text{MÁXIMA}} = 1643,5041 \text{ ppm}$$

- Entonces las condiciones óptimas de lixiviación microbiana permitió que el mineral pretratado al ser sometido al proceso de cianuración eleve la recuperación de oro y plata.

**CUADRO 5.6**

**CONDICIONES ÓPTIMAS DE LIXIVIACIÓN MICROBIANA**

<b>Tiempo óptimo de lixiviación microbiana (días)</b>	12,23
<b>Acidez óptima de la pulpa mineralizada</b>	1,61
<b>Máxima solubilidad de hierro (ppm)</b>	1643,50

**5.2. Resultados del tiempo de lixiviación microbiana**

- El tiempo óptimo de lixiviación microbiana fue de 12,23 días para obtener la máxima solubilidad de hierro y la matriz de pirita que contenía al oro se encuentre descompuesta; para que el oro presente en el mineral pretratado sea recuperado por el proceso de cianuración.

**5.3. Resultados de la acidez de la pulpa mineralizada**

- La acidez óptima de la pulpa mineralizada fue de 1,61 para determinar la máxima solubilidad de hierro y que el mineral pretratado se encuentre oxidado; para que las partículas de oro sean recuperadas por el proceso de cianuración.

#### 5.4. Resultados del proceso de cianuración

➤ La cianuración se realizó al mineral de cabeza y al mineral pretratado para la optimización de la lixiviación microbiana, los resultados fueron los siguientes:

➤ Mineral de cabeza

- Para el mineral de cabeza los resultados del proceso de cianuración fueron los siguientes:

**CUADRO 5.7**

#### **CIANURACIÓN DE MINERAL DE CABEZA**

Mineral de cabeza		Relave		Porcentaje de recuperación	
Au (g/ton)	Ag (g/ton)	Au (g/ton)	Ag (g/ton)	Au (%)	Ag (%)
14,1	609,4	11,27	496,52	20,07	18,52

➤ Mineral pretratado para las condiciones óptimas de lixiviación microbiana.

- Para el mineral pretratado los resultados del proceso de cianuración fueron los siguientes:

**CUADRO 5.8**  
**CIANURACIÓN DE MINERAL PRETRATADO**

Mineral pretratado		Solución de cianuración		Relave		Porcentaje de recuperación	
Au (g/ton)	Ag (g/ton)	Au (g/ton)	Ag (g/ton)	Au (g/ton)	Ag (g/ton)	Au (%)	Ag (%)
16,12	616	2,656	79,73	6,40	279	<b>60,29</b>	<b>54,70</b>

- Entonces se concluyó que la lixiviación microbiana como pretratamiento permitió elevar el porcentaje de recuperación de oro de 20,07 % a 60,29 % y de plata de 18,52 % a 54,70 % cumpliendo de esta forma con la hipótesis planteada.

## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. Contraste de hipótesis con el resultado

#### a. Hipótesis General

- En la tabla 5.6 (página 85) se observó que la máxima solubilidad de hierro fue de 1643,5041 ppm (condición óptima de lixiviación microbiana), entonces para el mineral pretratado se realizó el proceso de cianuración y se observó en la tabla 5.8 (página 87) que el porcentaje de recuperación de oro y plata fue de 60,29 % y 54,70 % respectivamente, cumpliendo con la hipótesis general.

#### b. Hipótesis Específica

- En la tabla 5.6 (página 85) observamos que el tiempo óptimo fue de 12,23 días en la lixiviación microbiana como pretratamiento para la cianuración del mineral sulfurado aurífero, esto demostró que se cumple con la hipótesis específica.
- En la tabla 5.6 (página 85) se observó que la acidez óptima de la pulpa mineralizada fue de 1,61 en la lixiviación microbiana como pretratamiento para la cianuración del mineral sulfurado aurífero, cumpliendo con la hipótesis específica.

### 6.2. Contrastación de resultados con otros estudios similares.

1. En el estudio realizado por el Dr. Gabriel Eduardo Meruane Naranjo “Oxidación bacteriana de sulfato ferroso con *Acidithiobacillus ferrooxidans*”, expresa lo siguiente:

La medición de la velocidad de oxidación bacteriana de ión ferroso por *Acidithiobacillus ferrooxidans* en el rango de pH de 1,3 – 2,5, indica que al

aumentar la concentración de ácido en el sistema se produce una importante disminución de la actividad oxidativa.

Se encontró que a valores de pH sobre 5 la oxidación bacteriana de ión ferroso es despreciable y predomina el proceso de oxidación química. Además se pudo mostrar que la formación de precipitados de ión férrico tiene un rol importante en la disminución de la actividad oxidativa bacteriana a pH sobre 2,5.

- En la presente tesis se desarrolló la lixiviación microbiana del mineral sulfurado aurífero y se determinó que el pH óptimo es 1,61, obteniendo resultados similares de pH que está dentro del rango propuesto para el estudio de la velocidad de oxidación bacteriana.
2. En el estudio realizado por el Ingeniero Maurice Andre Menadier Stavelot “Biolixiviación de piritas por *Acidithiobacillus ferrooxidans* y cepas nativas”, expresa lo siguiente:

La biolixiviación de pirita mediada por la acción metabólica de *At. ferrooxidans* está controlada por la difusión del agente oxidante a través de los subproductos de la reacción y requiere un tiempo para su disolución total de 833 días ante una concentración inicial de ión férrico en solución de 2,4g/L. Al aumentar al doble la concentración del ión oxidante, 5 g/L el tiempo disminuye en 6 veces llegando a 141 días. Por ende, se concluye que en la biolixiviación por la cepa pura al incrementar la concentración del ión férrico en la solución, se favorece para la conversión final de la pirita, pasando de un 27 % de recuperación a un 45 %.

➤ En la presente tesis se desarrolló la lixiviación microbiana con agitación, se tiene un tiempo óptimo de 12,23 días, es menor en comparación a los resultados del estudio anterior y esto es por la alta disolución de hierro debido a que las bacterias se habían adaptado previamente al mineral sulfurado aurífero.

3. En el estudio realizado por la Dra. Argelia Juárez Alcaraz “Biolixiviación de minerales sulfuro-ferrosos en jales: Aislamiento y caracterización de cultivos puros y mixtos de microorganismos involucrados”, expresa lo siguiente:

La pirita presente en los jales sirvió como fuente de energía, al liberar electrones durante la oxidación del Fe (II) al estado Fe (III), para el crecimiento de los cultivos microbianos nativos. Lo que demostró, que aunque de manera lenta según las condiciones de medio ambiente, tanto la actividad oxidativa de los compuestos reducidos de azufre y hierro, el incremento de la acidez como el descenso del pH sigue su curso. Con esto, se demostró el rol importante que tienen los microorganismos nativos en el cambio de condiciones en sus nichos ecológicos.

Por otra parte, cuando se adicionó sulfato ferroso como fuente de energía, se aceleró significativamente la actividad oxidativa.

➤ En la presente tesis de la caracterización mineralógica y los análisis químicos; se determinó que el mineral presenta el 45,3 % de pirita y se utilizó como fuente de energía para las pruebas preliminares de la lixiviación microbiana obteniendo resultados positivos, ya que las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* tomaron como sustrato el hierro y azufre de la pirita.

## VII. CONCLUSIONES

- a. Se determinó la máxima solubilidad de hierro de 1643,5041 ppm (condición óptima de lixiviación microbiana), permitiendo que el mineral pretratado se encuentre listo para el proceso de cianuración.
- b. El tiempo óptimo de lixiviación microbiana fue de 12,23 días, esta condición permitió que se tenga una alta población bacteriana que fue de  $2,54 \times 10^8$  bacterias/mL, beneficiando el proceso de lixiviación microbiana por la solubilidad de hierro, arsénico y azufre.
- c. La acidez de la pulpa mineralizada fue igual a 1,61; esta condición permitió que el potencial de óxido reducción (ORP) llegue a 632,4 mV, permitiendo que exista una alta oxidación de diferentes especies que conforman el mineral.
- d. Se realizó el proceso de cianuración para el mineral de cabeza y el mineral pretratado para las condiciones óptimas de lixiviación microbiana, donde se incrementó el porcentaje de recuperación para oro de 20,07 % a 60,29 % y plata de 18,52 % a 54,70 %.

## VIII. RECOMENDACIONES

- a. Para las pruebas de lixiviación microbiana, se sugiere realizar con el ingreso de oxígeno y temperatura de 30 °C, para evaluar el comportamiento de la oxidación de los sulfuros y el crecimiento de la población bacteriana en función del tiempo.
- b. Se recomienda realizar las pruebas de lixiviación microbiana a escala piloto, para comparar con los resultados obtenidos a nivel de laboratorio y plantear la implementación del proceso a escala industrial.
- c. Se sugiere realizar la lixiviación microbiana como pretratamiento, con otros minerales que por el proceso de cianuración presenten una baja recuperación de oro y plata, ya que nuestro país cuenta con grandes yacimientos de minerales sulfurados auro-argentíferos, para lo cual este método es el indicado.
- d. Para el tratamiento de los efluentes de lixiviación microbiana, se recomienda utilizar métodos que permitan recuperar los metales solubilizados como el hierro, zinc y cobre, para de esa forma poder comercializar dichos metales y que la remediación de los efluentes sea rentable económicamente.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADUVIRE Osvaldo. **Drenaje ácido de mina, generación y tratamiento.** España. Editorial del Instituto Geológico y Minero de España. 2006.
2. AYALA MINA Jorge, PARDO MERCADO Richard. **Optimización por diseños experimentales con aplicación en ingeniería.** Perú. Editorial Concytec. 1995.
3. BABCAN J. **Synthesis of jarosite  $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ .** Geoloski Zbornik. Vol. 22: 299-304. 1971.
4. BALLESTER, A. **Mecanismo de la Biolixiviación.** En: **Fundamentos y Perspectivas de las Tecnologías Biomineras.** Chile. Ediciones Universitarias de Valparaíso. Primera edición. 2005.
5. BARTON, Larry L. **Geomicrobiology: Molecular and Environmental Perspective.** Netherlands. Published by Springer. 2010.
6. BENNETT, J.C. y TRIBUTSCH, H. **Bacterial Leaching Patterns on Pyrite Crystal Surfaces.** Journal of Bacteriology. Vol. 134: 310-317. 1978.
7. BROCK T.D. and GUSTAFSON J. **Ferric iron reduction by sulfur- and iron oxidizing bacteria.** Applied and Environmental Microbiology. Vol. 32: 567-571. 1976.
8. COCHRAN William G., COX Gertrude M. **Diseños experimentales.** México. Editorial Trillas. Segunda edición. 1995.
9. DIAZ INOCENTE, Daysi Kelly, CONDORI CCOILLO, Ismael Rene. **Proceso de detoxificación de soluciones cianuradas usando el método**

- INCO en efluentes mineros.** Tesis para el grado de ingeniero químico. Lima. Universidad Nacional de Ingeniería. 2008. PP (14-20).
10. DONATI Edgardo R. et al. **Microbial Processing of Metal Sulfides.** Netherlands. Published by Springer. 2007.
  11. DROBNER E. et al. ***Thiobacillus ferrooxidans*, a facultative hydrogen oxidizer.** Applied and Environmental Microbiology. Vol. 56: 2922-2923. 1990.
  12. DUTRIZAC, J.E. **The effect of seeding on the rate of precipitation of ammonium jarosita and sodium jarosite.** Hydrometallurgy. Vol. 42: 293-312. 1996.
  13. DUTRIZAC, J.E. **Factor's Affecting the Precipitation of Potassium Jarosite in Sulfate and Chloride Media.** Metallurgical and Materials Transactions B. Vol. 39B: 771-783. 2008.
  14. GEHRKE, T. et al. **Importance of Extracelullar Polymeric Substances from *Thiobacillus ferrooxidans* for Bioleaching.** Applied and Environmental Microbiology. Vol. 64. 2743-2747. 1998.
  15. HABASHI, F. **Kinetics and mechanic of gold and silver in cyanide solution.** Montana College of Mineral Science and Technology Butte. Vol. 59. 1967.
  16. JAQUE LIBERONA, Indira Adriana. **Estudio de la biolixiviación de pirita por un cultivo de *Sulfobacillus Acidophilus* a 45 °C.** Tesis para el grado de ingeniero civil químico. Santiago. Universidad de Chile. 2012. PP (27-28).

17. JIAN-NAN, D. et al. **Jarosite-type precipitates mediated by YN22, *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*, and their influences on strain.** Trans. Nonferrous Met. Soc. China. Vol. 17: 1038-1044. 2007.
18. JUÁREZ ALCARAZ, Argelia. **Biolixiviación de minerales sulfuroferrosos en jales: Aislamiento y caracterización de cultivos puros y mixtos de microorganismos involucrados.** Tesis para el grado de doctor en ciencias: área biotecnología. Colima. Universidad de Colima. 2004. PP (10-11).
19. LIDDELL, K. y BAUTISTA, R. **A partial equilibrium model to characterize the precipitation of ferric ion during the leaching of chalcopyrite with ferric sulfate.** Metallurgical Transactions B. Vol. 14B: 5-15. 1983.
20. MENADIER STAVELOT, Maurice Andre. **Biolixiviación de piritas por *Acidithiobacillus Ferrooxidans* y cepas nativas.** Tesis para el grado de ingeniero civil químico. Santiago. Universidad de Chile. 2009. PP (11-12).
21. MERUANE NARANJO, Gabriel Eduardo. **Oxidación bacteriana de sulfato ferroso con *Acidithiobacillus Ferrooxidans*.** Tesis para el grado de doctor en ciencias de la Ingeniería, mención química. Santiago. Universidad de Chile. 2002. PP (44-46).
22. MINISTERIO DEL AMBIENTE, decreto supremo N<sup>o</sup> 010-2010. **“Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas”.** Lima.

23. MINISTERIO DEL AMBIENTE, decreto supremo N<sup>o</sup> 015-2015, “**Estándares nacionales de calidad ambiental para agua**”. Lima.
24. MONTGOMERY DOUGLAS C. **Diseño y Análisis de experimentos**. México. Editorial iberoamericana. Sexta edición. 1991.
25. NDLOVU, S. y MONHEMIUS, A.J. **The influence of crystal orientation on the bacterial dissolution of pyrite**. Hydrometallurgy. Vol. 78: 187-197. 2005.
26. PAIPA, C. **Estudio Cinético de la Precipitación de Jarositas en el Sistema Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)-H<sub>2</sub>O-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-M<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 70°C**. Tesis de Doctorado en Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Santiago. Universidad de Chile. 2004.
27. RAWLINGS, Douglas E. **Biomining: Theory, Microbes and Industrial Processes**. Germany. Published by Springer. First edition. 1997.
28. RODRIGUEZ, Y. et al. **La biolixiviación al comienzo del siglo XXI**. Revista de Metalurgia. Vol. 37: 616-627. 2001.
29. RODRÍGUEZ, Y. et al. **Study of Bacterial Attachment During the Bioleaching of Pyrite, Chalcopyrite, and Sphalerite**. Geomicrobiology Journal. Vol. 20: 131-141. 2003.
30. ROJAS-CHAPANA, J., TRIBUTSCH, H. **Interfacial activity and leaching patterns of *Leptospirillum ferrooxidans* on pyrite**. Microbiology Ecology. Vol. 47: 19-29. 2004.
31. ROSSI G. **Biohydrometallurgy**. Hamburg. Published by McGraw Hill. 1990.

32. SADOWSKI, Z. **Adhesion of microorganism cells and jarosite particles on the mineral surface.** Process Metallurgy. Vol. 9: 393-398. 1999.
33. SANTOS SOBRAL, Luis Gonzaga et al. **Biohydrometallurgical processes: a practical approach.** Brazil. CETEM / MCTI. 2011.
34. SASAKI, K. et al. **Characterization of argentojarosite formed from biologically oxidized Fe<sup>+3</sup> ions.** The Canadian Mineralogist. Vol. 33: 1311-1319. 1995.
35. SASAKI, K. y KONNO, H. **Morphology of jarosite-group compounds precipitated from biologically and chemically oxidized Fe ions.** The Canadian Mineralogist. Vol. 38: 45-56. 2000.
36. SASAKI, K. **Raman study of the microbially mediated dissolution of pyrite by *Thiobacillus ferrooxidans*.** The Canadian Mineralogist. Vol. 33: 1311-1319. 1997.
37. SEGURA PACHÓN, Dolores. **Aislamiento e identificación de bacterias ferrooxidantes y sulfooxidantes del área minera de Rio Tinto.** Tesis para el grado de Doctor en biología. Sevilla. Universidad de Sevilla. 1998. PP (60).
38. TRIBUTSCH, H. **Direct versus indirect bioleaching.** Hydrometallurgy. Vol. 59: 177-185. 2001.

## X. ANEXOS

### 10.1. Pruebas preliminares de lixiviación microbiana

- Se realizaron diferentes pruebas en las que se trabajó con las siguientes condiciones:

**CUADRO 10.1**

#### CONDICIONES DE PRUEBAS PRELIMINARES

VARIABLES	CANTIDADES
Peso del mineral	3 g, 6 g, 9 g, 12 g, 15 g y 18 g
Granulometría	75,55 % -200 tyler
pH de la pulpa mineralizada	1,8
Velocidad de agitación	150 rpm
Volumen de inóculo	30 mL (10 %)
Volumen del medio 9K	255 mL
L	285 mL
S	3 g, 6 g, 9 g, 12 g, 15 g y 18 g
T	300 g
% SS	1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 5 % y 6 %

1. Primero se realizaron 3 pruebas de lixiviación microbiana para diferentes pesos de mineral de la siguiente forma:

Al ser las primeras pruebas de lixiviación microbiana (fue el primer contacto entre las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* y el mineral), empezaron a adaptarse de forma progresiva al mineral, es decir obteniendo en las pruebas realizadas en los meses siguientes mejores resultados.

- Resultados de lecturas de ORP.

A continuación se muestra en la tabla como fue el desarrollo del potencial de óxido reducción (ORP):

**CUADRO 10.2**

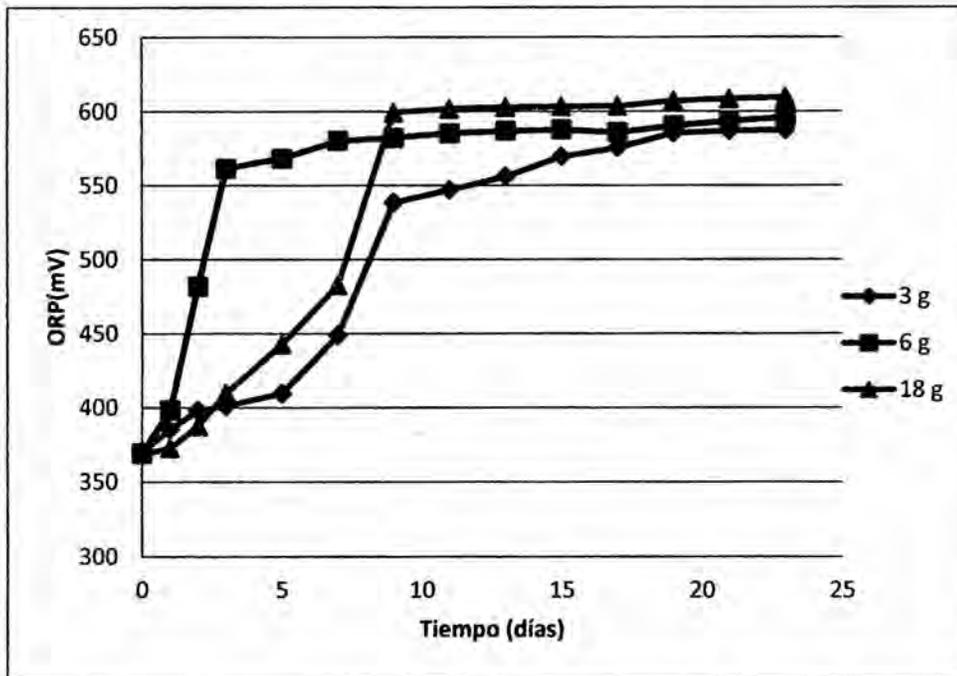
**POTENCIAL ÓXIDO REDUCCIÓN PRUEBA 1**

<b>Días</b>	<b>3 g</b>	<b>6 g</b>	<b>18 g</b>
0	370,2	369,3	368,8
1	385,3	398,2	372,7
2	398	481,7	387,6
3	401	561,3	409,4
5	409,3	568,2	442,7
7	448,7	580,1	482,5
9	538,3	582,1	599,2
11	546,8	585,3	601,5
13	555,7	586,8	602,8
15	569,3	587,7	603,2
17	575,4	585,8	603,5
19	585,4	590,4	607,1
21	586,7	593,4	608,2
23	587,4	595,8	609,5

En la gráfica se apreció el desarrollo en función del tiempo del potencial de óxido reducción para cada una de las pruebas.

GRÁFICA 10.1

POTENCIAL ÓXIDO REDUCCIÓN PRUEBA 1



De la gráfica se concluye que las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* se fueron adaptando al mineral, ya que el ORP nos indica que hubo oxidación de las especies y por ello se solubilizaron diferentes metales como el hierro, azufre, arsénico y cobre.

- Resultados de la curva de crecimiento microbiano

En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos del conteo microbiano:

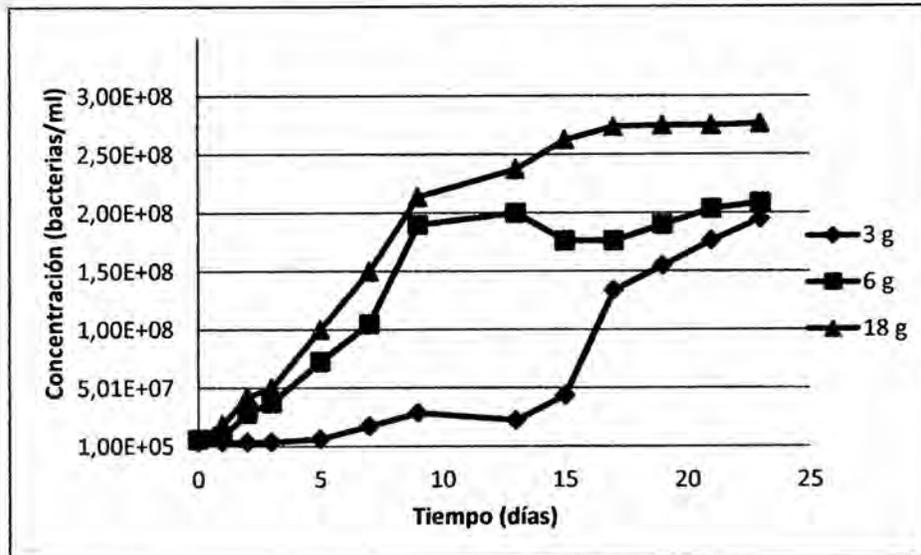
**CUADRO 10.3****CONTEO MICROBIANO PRUEBA 1**

<b>Días</b>	<b>3 g</b>	<b>6 g</b>	<b>18 g</b>
0	3,75E+06	6,25E+06	6,25E+06
1	3,75E+06	8,75E+06	1,88E+07
2	3,75E+06	2,88E+07	4,25E+07
3	3,75E+06	3,75E+07	5,00E+07
5	6,25E+06	7,25E+07	1,00E+08
7	1,75E+07	1,05E+08	1,50E+08
9	2,88E+07	1,90E+08	2,14E+08
13	2,25E+07	2,00E+08	2,38E+08
15	4,38E+07	1,76E+08	2,63E+08
17	1,34E+08	1,76E+08	2,74E+08
19	1,55E+08	1,90E+08	2,75E+08
21	1,76E+08	2,04E+08	2,75E+08
23	1,95E+08	2,09E+08	2,76E+08

En la gráfica se observó la curva de crecimiento microbiano para cada una de las muestras.

GRÁFICA 10.2

CRECIMIENTO MICROBIANO PRUEBA 1

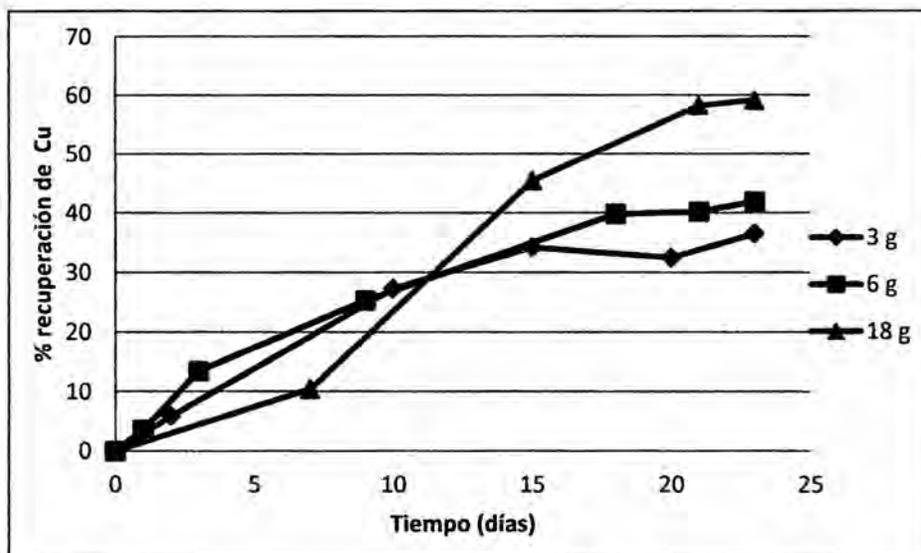


- Resultados del porcentaje de recuperación de cobre

En la siguiente gráfica se apreció el porcentaje de recuperación de cobre para cada muestra.

GRÁFICA 10.3

PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE COBRE PRUEBA 1

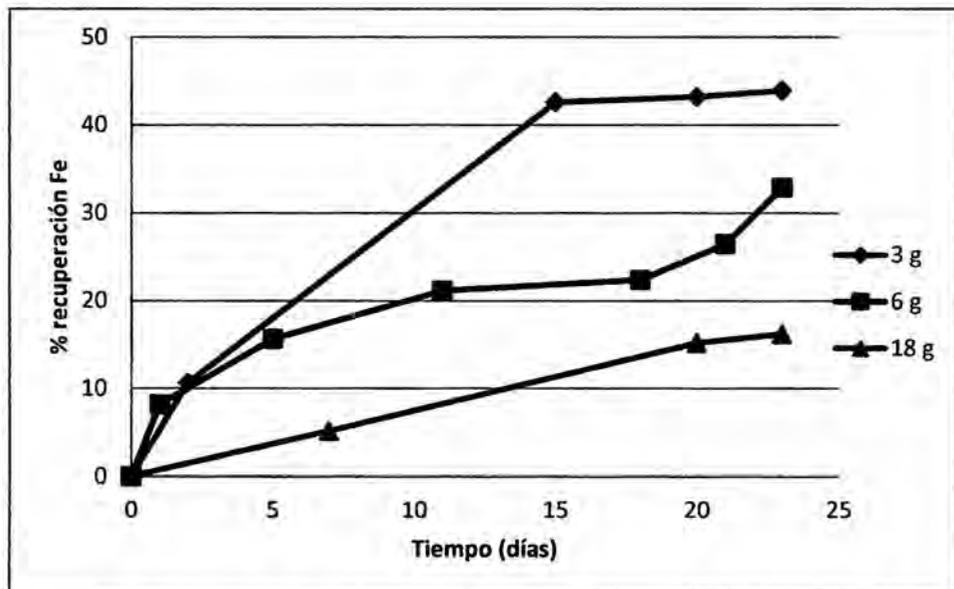


- Resultados del porcentaje de recuperación de hierro

En la gráfica se observó el porcentaje de recuperación de hierro para las diferentes muestras.

**GRÁFICA 10.4**

**PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE HIERRO PRUEBA 1**



2. Luego se realizaron 3 pruebas de lixiviación microbiana en simultáneo, para diferentes pesos de mineral (9, 12 y 15 gramos), los resultados se muestran a continuación:

- Resultados de lecturas de ORP

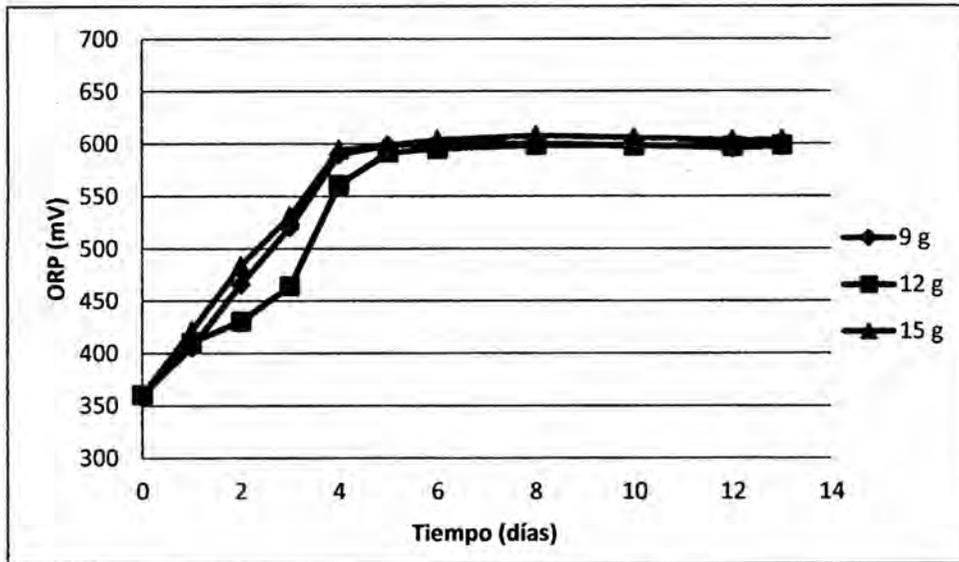
A continuación se muestra en la tabla los resultados obtenidos del potencial de óxido reducción.

**CUADRO 10.4****POTENCIAL DE ÓXIDO REDUCCIÓN PRUEBA 2**

<b>Días</b>	<b>9 g</b>	<b>12 g</b>	<b>15 g</b>
0	360,2	360,2	360,2
1	405,4	410,5	421,4
2	465,7	430,2	483,7
3	520,4	464,2	530,9
4	589,6	560,9	594,3
5	598,3	591,5	598,5
6	600,2	595,2	603,6
8	600,3	598,5	607,8
10	598,6	597,9	605,7
12	595,7	597,5	603,2
13	597,4	598,4	603,7

En la siguiente gráfica se apreció el potencial de óxido reducción en función del tiempo:

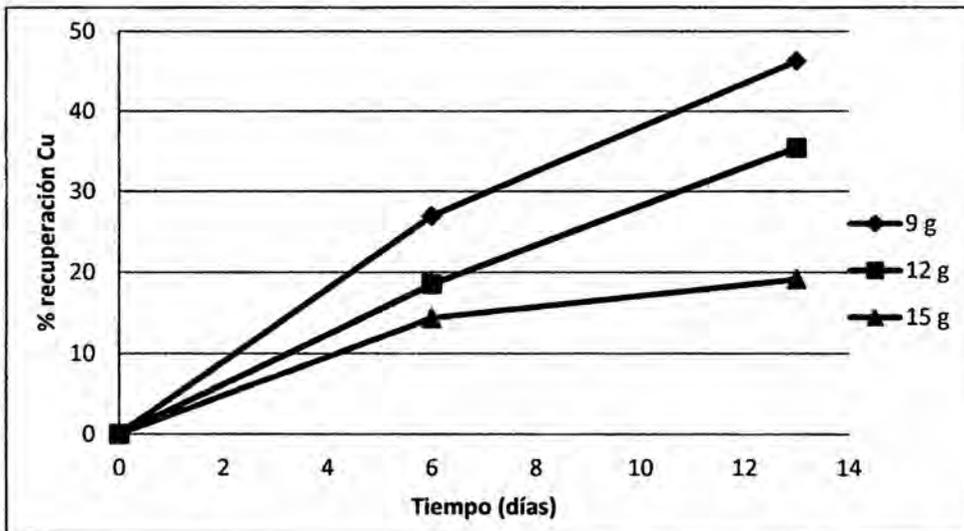
**GRÁFICA 10.5**  
**POTENCIAL ÓXIDO REDUCCIÓN PRUEBA 2**



- Resultados de lecturas de porcentaje de recuperación de cobre

En la siguiente gráfica se observó el porcentaje de recuperación de cobre en función del tiempo.

**GRÁFICA 10.6**  
**PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE COBRE PRUEBA 2**

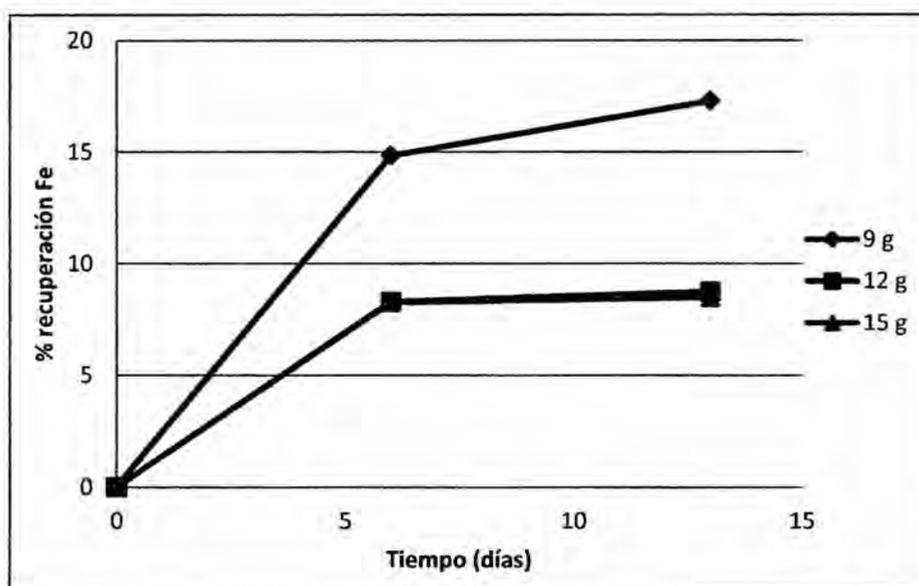


- Resultados de lecturas de porcentaje de recuperación de hierro

Los porcentajes de recuperación de hierro para las muestras fueron las siguientes:

**GRÁFICA 10.7**

**PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE HIERRO PRUEBA 2**



- De las pruebas preliminares se concluyó que para la prueba de 5 % en peso de mineral se tiene que determinar la optimización de la lixiviación microbiana, porque es la prueba que alcanza el mayor potencial de óxido reducción (mV) en el menor tiempo (gráfica 10.5 tiempo versus ORP).

**10.2. Resultados complementarios de lixiviación microbiana**

- A continuación mostramos cómo fue el desarrollo de la acidez de la pulpa mineralizada para cada una de las muestras (el pH se mantuvo constante con adición de gotas de ácido sulfúrico) según el diseño experimental hexagonal planteado:

**CUADRO 10.5**

**ACIDEZ DE LA PULPA MINERALIZADA**

Día	Peso de mineral = 15 g (5 %)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	t=6 d pH=2	t=8 d pH=1,6	t=8 d pH=2,4	t=12 d pH=1,6	t=12 d pH=2,4	t=14 d pH=2	t=10 d pH=2	t=10 d pH=2
0	2	1,6	2,4	1,61	2,4	2	2	2
1	2,15	1,6	2,45	1,62	2,44	2,1	2,12	2,15
2	2,1	1,6	2,42	1,6	2,43	2,1	2,15	2,15
3	2,1	1,62	2,4	1,63	2,42	2,15	2,06	2,09
4	2,07	1,62	2,43	1,62	2,43	2,1	2,05	2,08
6	2,04	1,61	2,41	1,62	2,42	2,0	2,01	2,03
7	-	1,61	2,42	1,62	2,41	2,1	2,02	2,03
8	-	1,62	2,41	1,64	2,42	2,2	2,01	2,01
9		-	-	1,62	2,43	2,01	2,0	2,0
10	-	-	-	1,62	2,44	2,05	1,98	1,99
11	-	-	-	1,62	2,41	2,1	-	-
12	-	-	-	1,62	2,4	2,2	-	-
13	-	-	-	-	-	2,01	-	-
14	-	-	-	-	-	2,04	-	-

1. Gráfica del potencial de óxido reducción

- Los resultados obtenidos en las lecturas del potencial de óxido reducción (ORP) en milivoltios (mV) fueron los siguientes:

**CUADRO 10.6**

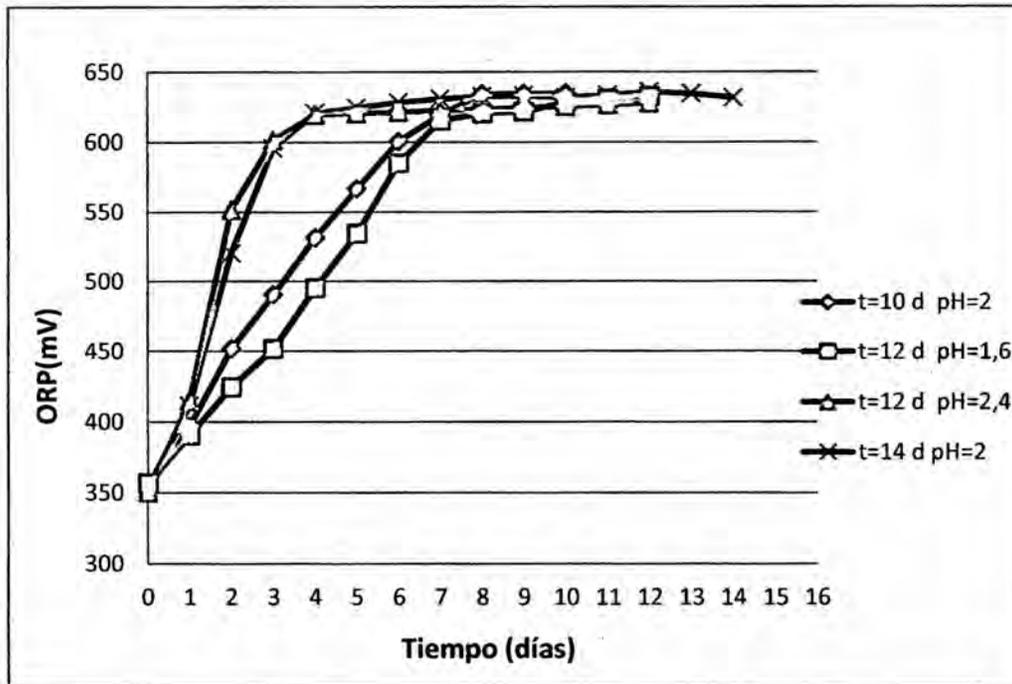
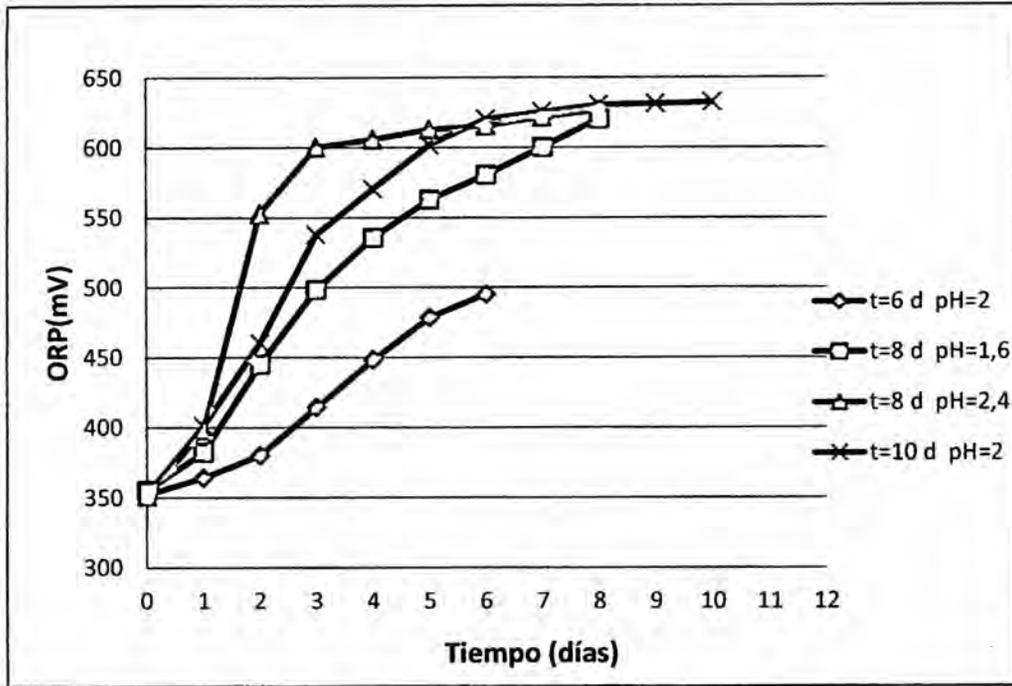
**POTENCIAL DE ÓXIDO REDUCCIÓN**

Día	Peso de mineral = 15 g (5 %)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	t=6 d pH=2	t=8 d pH=1,6	t=8 d pH=2,4	t=12 d pH=1,6	t=12 d pH=2,4	t=14 d pH=2	t=10 d pH=2	t=10 d pH=2
0	352,1	355,3	351,1	356,7	350,2	353,1	352,4	353,8
1	364,2	382,5	398,3	390,5	414,9	411,5	401,1	396,8
2	380,1	445,1	552,8	424,7	551,4	520,1	460,2	451,5
3	414,2	498,4	600,2	451,7	601,4	595,7	537,8	490,4
4	448,2	535,4	605,8	495,2	619,4	620,6	570,2	531,2
5	478,4	562,7	612,9	534,2	620,5	624,3	601,8	566,4
6	495,1	580,5	615,4	584,8	621,2	628,2	620,4	600,4
7	-	600,3	621,7	615,2	622,4	630,7	625,3	619,5
8	-	620,4	626,4	620,2	623,1	632,4	630,4	634,2
9		-	-	621,4	624,3	632,8	631,2	634,4
10	-	-	-	628,2	625,2	631,4	632,2	634,7
11	-	-	-	630,8	626,4	633,4	-	-
12	-	-	-	632,4	627,7	635,7	-	-
13	-	-	-	-	-	634,4	-	-
14	-	-	-	-	-	631,4	-	-

➤ En las gráficas se observa cómo fue el desarrollo en función del tiempo del potencial de óxido reducción (ORP) para cada uno de los matraces:

GRÁFICA 10.8

POTENCIAL DE ÓXIDO REDUCCIÓN



2. Gráfica del crecimiento microbiano

➤ En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos del conteo microbiano (bacterias/mL).

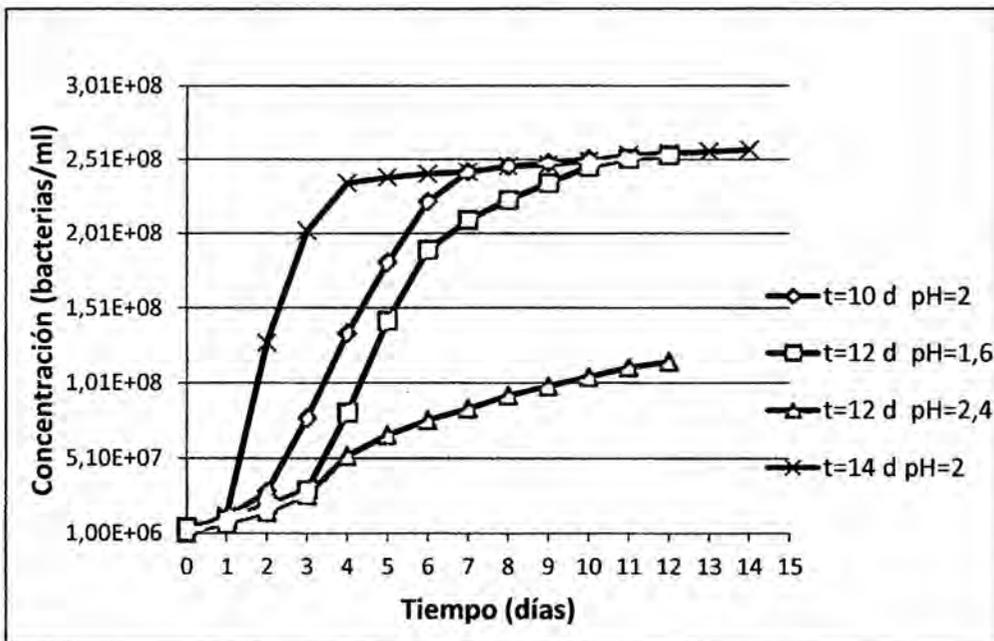
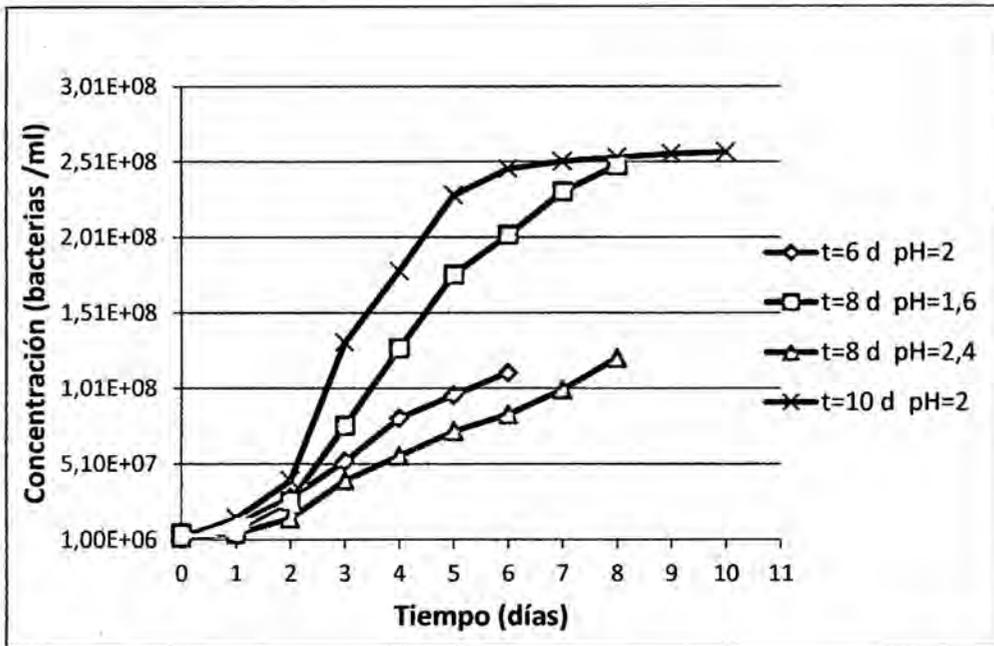
**CUADRO 10.7**  
**CONTEO MICROBIANO**

Día	Peso de mineral = 15 g (5 %)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	t=6 d pH=2	t=8 d pH=1,6	t=8 d pH=2,4	t=12 d pH=1,6	t=12 d pH=2,4	t=14 d pH=2	t=10 d pH=2	t=10 d pH=2
0	2,50E+06	5,00E+06	2,50E+06	5,00E+06	1,25E+06	2,50E+06	2,50E+06	2,50E+06
1	1,13E+07	7,50E+06	5,00E+06	1,00E+07	7,50E+06	1,25E+07	1,50E+07	1,13E+07
2	2,88E+07	2,63E+07	1,50E+07	2,00E+07	1,50E+07	1,28E+08	4,00E+07	2,88E+07
3	5,25E+07	7,63E+07	4,00E+07	3,00E+07	2,63E+07	2,03E+08	1,31E+08	7,75E+07
4	8,13E+07	1,28E+08	5,63E+07	8,13E+07	5,25E+07	2,35E+08	1,79E+08	1,34E+08
5	9,63E+07	1,76E+08	7,25E+07	1,43E+08	6,63E+07	2,39E+08	2,29E+08	1,81E+08
6	1,11E+08	2,03E+08	8,38E+07	1,90E+08	7,63E+07	2,41E+08	2,46E+08	2,23E+08
7	-	2,31E+08	1,00E+08	2,10E+08	8,38E+07	2,43E+08	2,51E+08	2,43E+08
8	-	2,49E+08	1,21E+08	2,24E+08	9,25E+07	2,46E+08	2,54E+08	2,46E+08
9		-	-	2,35E+08	9,88E+07	2,48E+08	2,56E+08	2,49E+08
10	-	-	-	2,46E+08	1,05E+08	2,50E+08	2,58E+08	2,51E+08
11	-	-	-	2,51E+08	1,11E+08	2,54E+08	-	-
12	-	-	-	2,54E+08	1,15E+08	2,55E+08	-	-
13	-	-	-	-	-	2,56E+08	-	-
14	-	-	-	-	-	2,58E+08	-	-

➤ En las gráficas se observa cómo fue el desarrollo del crecimiento microbiano para cada uno de los matraces:

**GRÁFICA 10.9**

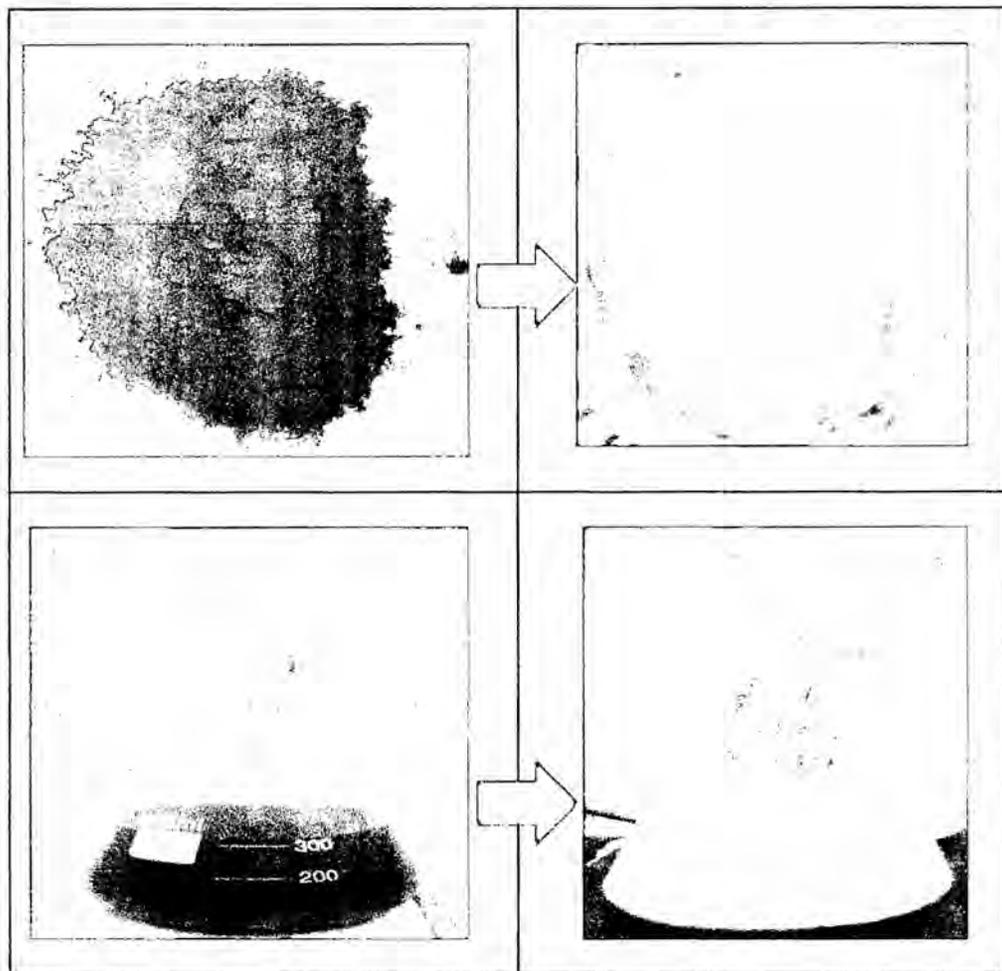
**CRECIMIENTO MICROBIANO**



- De las gráficas concluimos que para valores de pH entre 1,6 y 2 el crecimiento de *Acidithiobacillus ferrooxidans* fue de forma eficiente, en cambio para pH 2,4 el crecimiento fue lento, llegando a tener una población microbiana menor, lo cual implicó una menor cantidad de solubilidad de hierro y arsénico.
- A continuación se muestra los cambios producidos en el mineral por la lixiviación microbiana.

**FIGURA 10.1**

**RESULTADOS DE LA LIXIVIACIÓN MICROBIANA**



### 10.3. Análisis por el método matricial

- Por el método matricial resolvemos el sistema y determinamos los coeficientes del modelo matemático:

$$[B] = [X^T * X]^{-1}[X^T * Y]$$

Donde:

$[B]$  = Coeficientes del modelo matemático

$X^T$  = Transpuesta de la matriz de diseño

$X$  = Matriz de diseño

$Y$  = Respuesta

$[ ]^{-1}$  = Matriz inversa

- Luego la matriz X, y el vector de respuesta Y, quedaron definidos de la siguiente manera:

**CUADRO 10.8**

**MATRIZ X, VECTOR Y**

X						Y
1	14	2	196	4	28	1394,93
1	12	2,4	144	5,76	28,8	882,72
1	8	2,4	64	5,76	19,2	461,2
1	6	2	36	4	12	893,77
1	8	1,6	64	2,56	12,8	1365,35
1	12	1,6	144	2,56	19,2	1681,98
1	10	2	100	4	20	1338,19
1	10	2	100	4	20	1380,17

- Hallando la matriz transpuesta de X, tuvimos el siguiente resultado:

**CUADRO 10.9**

**MATRIZ TRANSPUESTA  $X^T$**

1	1	1	1	1	1	1	1
14	12	8	6	8	12	10	10
2	2,4	2,4	2	1,6	1,6	2	2
196	144	64	36	64	144	100	100
4	5,76	5,76	4	2,56	2,56	4	4
28	28,8	19,2	12	12,8	19,2	20	20

- A continuación se procedió a multiplicar la matriz transpuesta ( $X^T$ ), por la matriz X.

**CUADRO 10.10**

**PRODUCTO DE MATRICES ( $X^T * X$ )**

8	80	16	848	32,64	160
80	848	160	9440	326,4	1696
16	160	32,64	1696	67,84	326,4
848	9440	1696	109376	3458,56	18880
32,64	326,4	67,84	3458,56	143,4624	678,4
160	1696	326,4	18880	678,4	3458,56

- Seguidamente para continuar con la evaluación se procedió a obtener la matriz inversa de  $(X^T * X)^{-1}$ , quedando determinada de la siguiente manera:

**CUADRO 10.11**

**MATRIZ INVERSA DE  $(X^T * X)$ :  $(X^T * X)^{-1}$**

608,833	-30,833	-462,500	0,750	95,313	7,812
-30,833	3,146	15,625	-0,078	-1,953	-0,781
-462,500	15,625	392,188	-0,391	-87,891	-3,906
0,750	-0,078	-0,391	0,004	0,098	-4,21E-15
95,313	-1,953	-87,891	0,098	21,973	-9,46E-13
7,812	-0,781	-3,906	-4,24E-15	-9,53E-13	0,391

- A continuación se evaluó el producto de la matriz transpuesta de X,  $(X^T)$  y el vector respuesta Y.

**CUADRO 10.12**

**PRODUCTO DE MATRIZ TRANSPUESTA POR VECTOR RESPUESTA**

**$(X^T * Y)$**

9398,31
97464,04
18115,256
1063634
35570,384
188198,352

- Luego para obtener los coeficientes del modelo matemático a escala codificada se multiplicó la matriz  $(X^T * X)^{-1} * (X^T * Y)$ , obteniendo lo siguiente:

### CUADRO 10.13

#### COEFICIENTES DEL MODELO MATEMÁTICO

[B]
-3115,37833
275,500833
3799,0875
-13,426875
-1297,875
32,778125

➤ Finalmente reemplazamos en la expresión del modelo matemático:

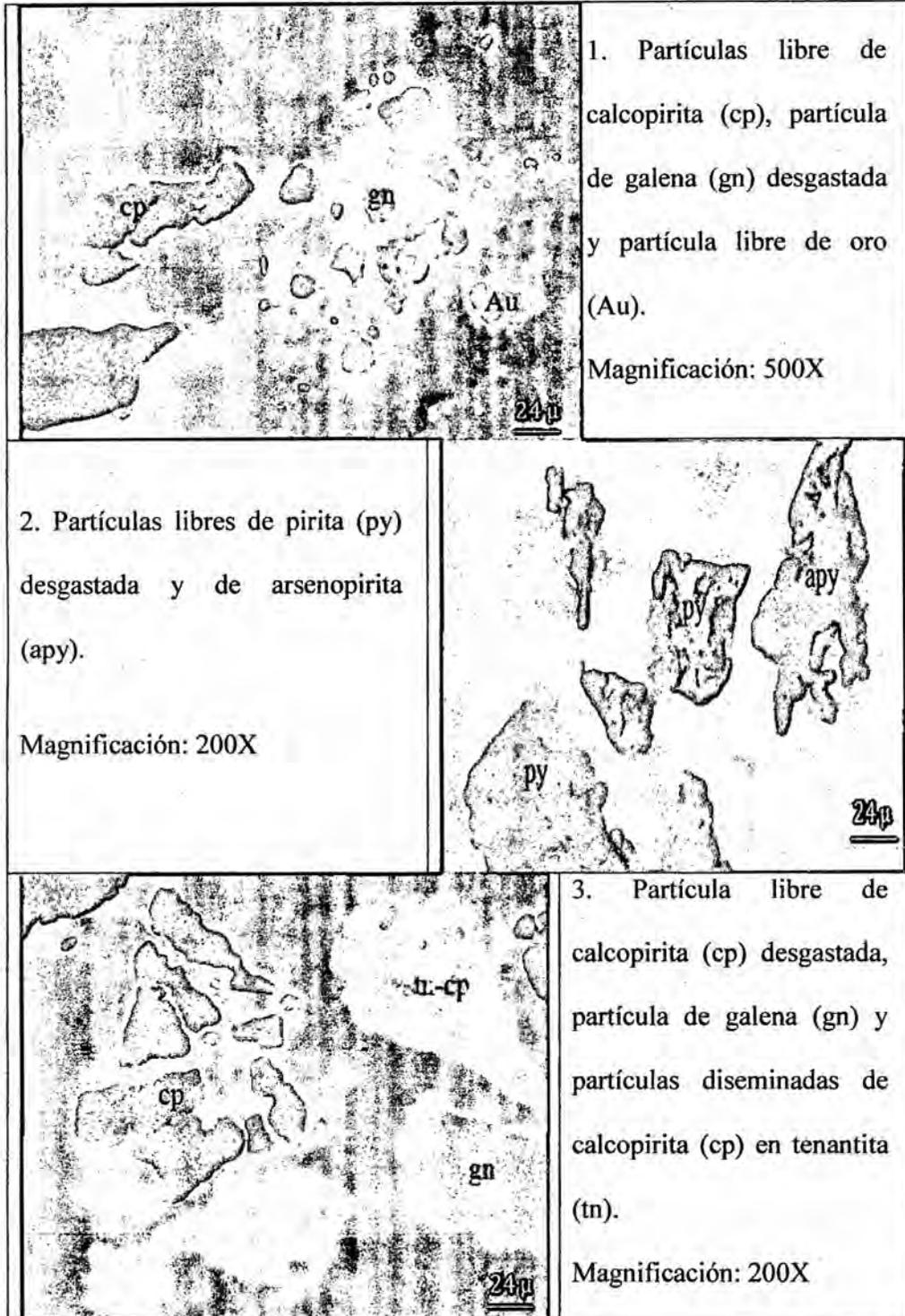
$$[\text{Fe}] = -3115,378 + 275,50 t + 3799,087\text{pH} - 13,427 t^2 - 1297,875 \text{pH}^2 + 32,778 t \text{pH}$$

#### 10.4. Resultados de caracterización mineralógica de la muestra pretratada

➤ El efecto de la lixiviación microbiana sobre el mineral sulfurado aurífero se observó en la caracterización mineralógica mediante las siguientes fotomicrografías:

FIGURA 10.2

FOTOMICROGRAFÍAS DE MINERAL PRETRATADO

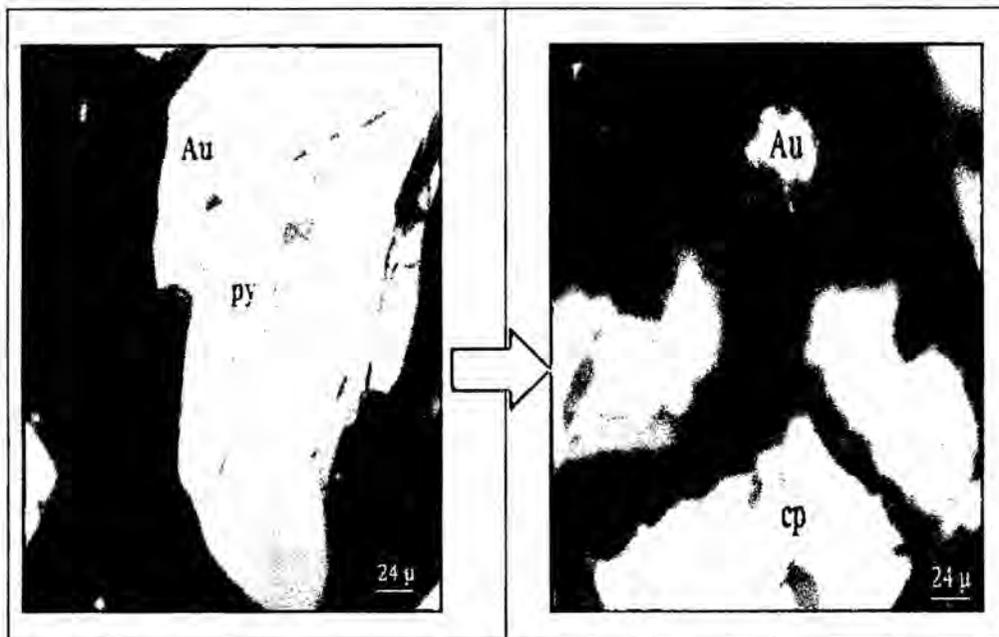


Entonces se concluyó:

- En la caracterización mineralógica se observó el efecto de la lixiviación microbiana, en la que se apreció oro liberado, que sí fue recuperado por el proceso de cianuración.
- Además se apreció partículas desgastadas de pirita (py), arsenopirita (apy) y calcopirita (cp) pruebas del proceso de la lixiviación microbiana al solubilizar hierro, arsénico, cobre y azufre.

**FIGURA 10.3**

**ORO EN MINERAL DE CABEZA Y PRETRATADO**



### 10.5. Tratamiento de efluentes

#### 1. Tratamiento de efluentes de lixiviación microbiana

La alteración más significativa sobre las aguas que produce la actividad minera es la polución con partículas en suspensión y la acidificación de las mismas, esto

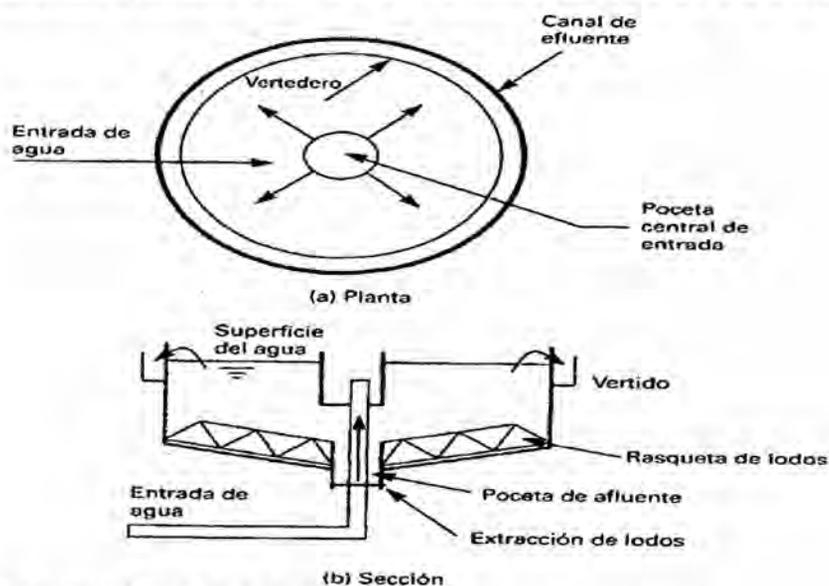
incide directamente sobre la calidad de las aguas y el aprovechamiento del suelo. Por lo que, se requiere un control de los parámetros fisico-químicos y un adecuado tratamiento de los efluentes, que por lo general es de la siguiente forma:

a. Eliminación de sólidos en suspensión por decantación

Los sólidos en suspensión constituyen una de las fuentes más frecuentes de contaminación física de las aguas. Esta se produce por la fuerza erosiva del agua que provoca en su circulación superficial el arrastre de partículas sólidas.

El tratamiento más común consiste en retener las aguas en unas balsas o reposadores durante un tiempo suficiente para que se produzca la decantación de los sólidos. Si el agua clarificada no está contaminada químicamente y cumple los estándares de calidad requeridos, este agua puede verterse directamente a un cause público o reutilizarse en las operaciones de la explotación minera, caso contrario, debe procederse a su tratamiento en una instalación mediante un proceso químico.

**FIGURA 10.4**  
**SEDIMENTADOR PARA CLARIFICAR LAS AGUAS TRATADAS**



Fuente: Osvaldo Aduvire (2006)

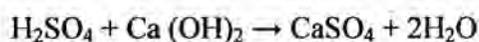
b. Neutralización química de las aguas ácidas

El proceso de neutralización de las aguas ácidas mediante la adición de sustancias alcalinas es el que actualmente se lleva a cabo en la mayoría de las minas que generan efluentes de este tipo.

El tratamiento en las plantas convencionales se realiza en tres etapas: neutralización, oxidación y precipitación. Las reacciones principales que tienen lugar según el tipo de agente alcalino que se utilice son:

1º. Neutralización del ácido con una base.

Con cal:



Con caliza:



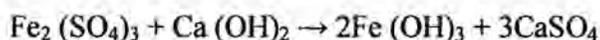
2º. Oxidación del hierro ferroso o férrico.

Se lleva a cabo tomando oxígeno de la atmósfera mediante la agitación de las aguas en unos tanques. Con esto se consigue modificar el estado del hierro haciéndolo insoluble.

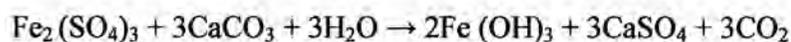
3º. Precipitación de los hidróxidos de hierro.

Los hidróxidos se forman al reaccionar el sulfato férrico con los agentes alcalinos.

Con cal:



Con caliza:



La separación de los sólidos insolubles se realiza en decantadores circulares o rectangulares, ayudada por la acción de floculantes. La filtración en las diversas variantes puede emplearse como sistema complementario.

Los agentes alcalinos a emplear son muchos: cal rápida, cal hidratada, roca caliza, caliza en polvo, magnesita, dolomía, sosa cáustica, cenizas de sosa e hidróxido de amonio.

Pero, en la práctica los más usados son: la cal, la cal hidratada y la caliza.

La concentración de metales pesados en el efluente puede reducirse por precipitación como hidróxidos a distintos valores de pH, por ejemplo el pH mínimo para el  $Pb^{+2}$  es 6,3; para el  $Fe^{+2}$  es 9,5 y para el  $Mn^{+2}$  es 10,6. Hay que tomar precauciones cuando están presentes metales anfóteros como el zinc y el aluminio que se disuelven en la solución si ésta es demasiada alcalina.

#### c. Tratamiento de aguas ácidas en una planta convencional

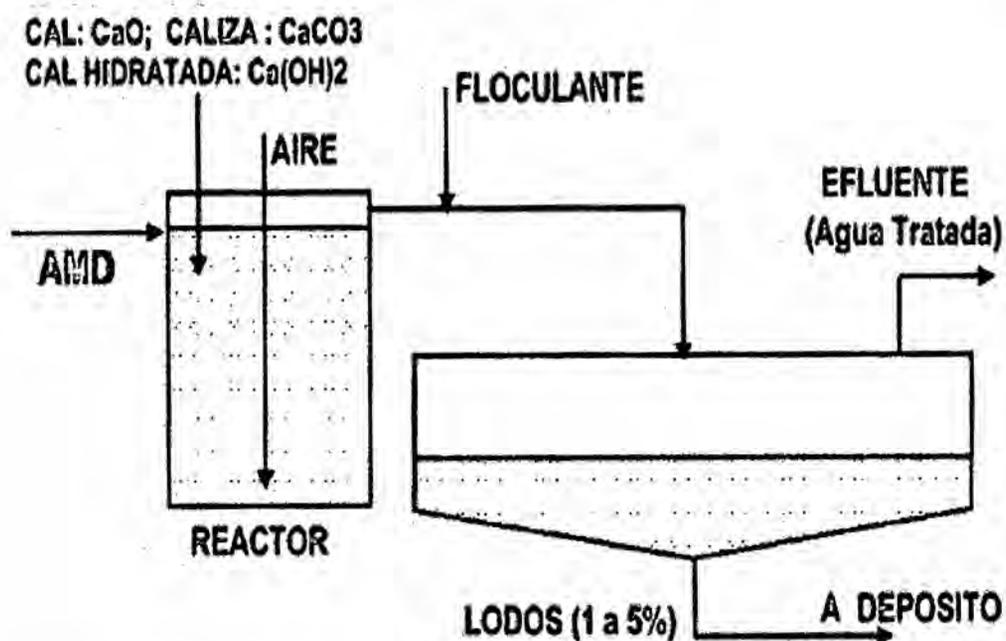
El proceso de tratamiento más común utilizado en el tratamiento de aguas ácidas es el que emplea cal, en cuya etapa inicial se produce la neutralización de la acidez y finaliza con la oxidación del hierro ferroso para formar hidróxido férrico que es insoluble y precipita.

El proceso comienza con la entrada del agua ácida a la planta, a través de un canal donde se mide el caudal y el pH, pasa seguidamente a las cubas de neutralización donde se adiciona la lechada de cal hasta alcanzar un valor del pH entre 10 y 10,5; con el que se consigue que se formen los hidróxidos de hierro y manganeso. Estas cubas disponen de unos agitadores que garantizan una mezcla homogénea, transcurrido cierto tiempo.

En un depósito más pequeño se recogen las aguas de recirculación de los fangos del decantador y las aguas sucias procedentes del lavado de los filtros. Seguidamente el agua pasa por gravedad a los tanques de aireación, donde el oxígeno atmosférico se incorpora al agua mediante unas turbinas de agitación y se consigue la oxidación del hierro ferroso y el manganeso.

FIGURA 10.5

TRATAMIENTO CONVENCIONAL PARA AGUAS ÁCIDAS



Fuente: Osvaldo Aduvire (2006)

2. Tratamiento de efluentes del proceso de cianuración

El principal objetivo en una campaña de degradación de cianuro en efluentes metalúrgicos es disminuir la concentración de cianuro libre a niveles asimilables para los seres vivos. Para ello se han empleado varios métodos que en general se pueden clasificar en:

#### a. Degradación natural

La degradación natural en las pozas de tratamiento se lleva a cabo debido a la interacción de varios procesos como la volatilización, hidrólisis, foto degradación, disociación, oxidación química y bacteriológica, y precipitación. La degradación natural puede verse influenciada por variables como: las especies de cianuro en la solución y sus respectivas concentraciones, temperatura, pH, aeración, rayos de sol, presencia de bacterias, tamaño de poza, profundidad y turbulencia. Los mecanismos principales que controlan la degradación natural del cianuro son la volatilización del HCN y la disociación de los complejos metálicos cianurados, siendo esta última, la etapa controlante del proceso.

La degradación natural es un método simple de disminución de concentraciones de cianuro, pero su éxito depende de las especies de cianuro presente, el tiempo de retención que la poza de almacenamiento puede proveer y los niveles de cianuro residual esperados. Las mayores ventajas del proceso de degradación natural son los bajos costos de capital y operación, no se conoce de formación de productos tóxicos, y se le puede usar como un pre-tratamiento. Este proceso no es adecuado si el tiempo de retención en la poza es limitado o si existe peligro de toxicidad para la vida silvestre.

#### b. Degradación por recuperación del cianuro

En muchos casos en que se tiene efluentes con contenidos de cianuro, es ventajoso regenerar cianuro, ya que, el costo de cianuro nuevo es de 3 a 5 veces el costo de cianuro reciclado, se reducen los costos de tratamiento de soluciones cianuradas y es posible recuperar los metales contenidos en las soluciones cianuradas.

El cianuro que puede recuperarse de los diferentes procesos para regenerar cianuro son el cianuro libre, complejos cianurados de Cu, Zn, Ni, Cd y Co (II). Los que no son recuperables son: tiocianatos, cianatos y los complejos de Hierro.

c. Degradación por precipitación

La precipitación de cianuros estables se puede obtener mediante la adición deliberada de acomplejantes tales como el hierro. Esto reduce la concentración de cianuro libre y también es eficaz para controlar los elevados niveles de otros metales que están presentes como resultado del tratamiento.

d. Degradación por conversión a formas menos tóxicas

- Conversión a Tiocianato

La conversión de cianuro a tiocianato fue revisado por Dodge y Reams, el cianuro se convierte en tiocianato por una mezcla de peróxido y tiosulfato a pH entre 7 y 10. El cianuro reacciona con polisulfuros en solución a 80°C para formar tiocianato. El sulfuro de cal (70% de sulfuro de calcio, 5% de tiosulfato de calcio, 5% de azufre libre), se usa como fuente de polisulfuro usado como fungicida en agricultura.

- Conversión a Ferrocianuro

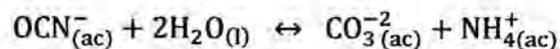
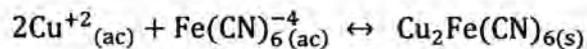
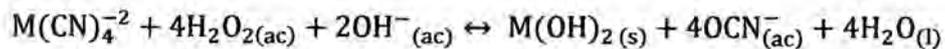
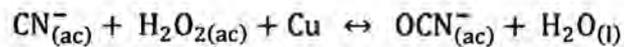
La adición de excesos de sulfato ferroso a las soluciones cianuradas ajustadas entre pH 7,5 y 10,5 convierte la mayor parte del cianuro en ferrocianuro. Este es uno de los métodos más antiguos de disposición de cianuro. El método trabaja mejor para soluciones de 10 a 100 ppm de HCN, y requiere grandes excesos de sulfato ferroso (16 moles por mol de cianuro para soluciones cuprocianuradas). Se puede alcanzar reducciones en las concentraciones de cianuro de 88 a 96%. Las

sales de ferrocianuro formado son muy estables y precipitan rápidamente, pero a pesar de ser considerados no tóxicos, estos se fotodegradan liberando HCN.

- Degradación por oxidación

Los procesos de oxidación química para el tratamiento del cianuro incluyen el proceso con SO<sub>2</sub>/Aire (desarrollado por dos compañías canadienses, INCO y NORANDA) y el proceso de tratamiento con Peróxido de Hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, iniciado por Degussa). Una alternativa de oxidación química más antigua, es el Proceso de Cloración Alcalina, se utiliza rara vez en la industria minera en la actualidad.

La reacción fundamental para el proceso de oxidación con peróxido de hidrógeno y sulfato de cobre como catalizador es:



## 10.6. Matriz de consistencia

CONDICIONES ÓPTIMAS DE LIXIVIACIÓN MICROBIANA EMPLEANDO <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> COMO PRETRATAMIENTO PARA LA CIANURACIÓN DE MINERAL SULFURADO AURÍFERO						
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable dependiente	Dimensiones	Indicadores	Métodos
¿Cuáles son las condiciones óptimas de lixiviación microbiana empleando <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> como pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero?	Determinar las condiciones óptimas de lixiviación microbiana empleando <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> como pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero.	"Si determinamos las condiciones óptimas de lixiviación microbiana empleando <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> , entonces se logrará el pretratamiento para la cianuración del mineral sulfurado aurífero".	Y Condición óptima de lixiviación microbiana	Solubilidad de hierro	mg/L (ppm)	Pruebas experimentales y análisis estadístico
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables independientes	Dimensiones	Indicadores	Métodos
A. ¿Cuál es el tiempo óptimo de lixiviación microbiana empleando <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> como pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero?	A. Identificar el tiempo óptimo de lixiviación microbiana empleando <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> como pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero.	A. "Si identificamos el tiempo óptimo de lixiviación microbiana empleando <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> , entonces se logrará el pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero".	X <sub>1</sub> Tiempo de lixiviación microbiana	Tiempo	Días	Análisis cronológico
B. ¿Cuál es la acidez óptima de la pulpa mineralizada en la lixiviación microbiana empleando <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> como pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero?	B. Determinar la acidez óptima de la pulpa mineralizada en la lixiviación microbiana empleando <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> como pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero.	B. "Si determinamos la acidez óptima de la pulpa mineralizada en la lixiviación microbiana empleando <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> , entonces se logrará el pretratamiento para la cianuración de mineral sulfurado aurífero".	X <sub>2</sub> Acidez de la pulpa mineralizada	pH	Escala de acidez	Análisis de acidez

Y = f (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>)

Y = Condición óptima de lixiviación microbiana

X<sub>1</sub> = Tiempo de lixiviación microbiana

X<sub>2</sub> = Acidez de la pulpa mineralizada