

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**EVALUACIÓN DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES  
CUPRÍFEROS Y AURÍFEROS EN MEDIO ÁCIDO  
CON SALES OXIDANTES EN AGUA DE MAR,  
EN MINERA SEÑOR DE LOCUMBA**

**ITE – TACNA**

**TESIS**

Presentada por:

Bach. Ronaldo Catachura Chino

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO METALURGISTA**

TACNA – PERÚ

2024

# UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

## Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

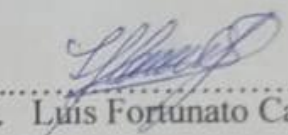
### EVALUACIÓN DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES CUPRÍFEROS Y AURÍFEROS EN MEDIO ÁCIDO CON SALES OXIDANTES EN AGUA DE MAR,

EN MINERA SEÑOR DE LOCUMBA

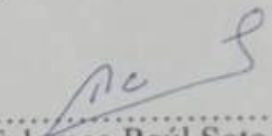
ITE – TACNA

Tesis sustentada y aprobada el día 22 de noviembre de 2024, siendo el jurado calificador:

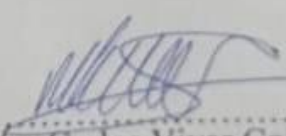
**PRESIDENTE**

  
:.....  
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

**SECRETARIO**

  
:.....  
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

**VOCAL**

  
:.....  
Dr. Matías Carlos Vivar Colquicocha

**ASESOR**

  
:.....  
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

## **HOJA DE JURADOS**

## **DEDICATORIA**

Dedico con todo mi corazón mi tesis a mis padres Patricio y Beatriz, por haberme apoyado durante mis estudios en la universidad y durante el desarrollo de esta tesis.

A mis hermanos por su apoyo y comprensión, pues sin ellos no lo había logrado.

## **AGRADECIMIENTO**

Gracias a Dios por bendecirme y guiarme por el camino del bien cada día de mi vida y por permitirme vivir con salud y energía.

Expreso mi agradecimiento a la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann y a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales por la formación brindada en esta etapa de mi vida.

Agradecido con los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales quienes me brindaron su apoyo incondicional en mi vida universitaria y después de haber acabado mis estudios universitarios, así mismo durante el desarrollo de la tesis.

## CONTENIDO

HOJA DE JURADOS	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
CONTENIDO DE TABLAS	ix
CONTENIDO DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1 Descripción del problema	3
1.1.1 Antecedentes del problema	3
1.1.2 Problemática de la investigación	3
1.2 Formulación del problema	4
1.2.1 Formulación de problema general	4
1.2.2 Formulación de problemas específicos	4
1.3 Justificación e importancia	4
1.4 Alcances y limitaciones	5
1.5 Objetivos	5
1.6 Hipótesis	6
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	8

2.1 Antecedentes del estudio	8
2.1.1 Antecedentes internacionales	8
2.1.2 Antecedentes nacionales	12
2.2 Bases teóricas	14
2.2.1 Conceptos de hidrometalurgia	14
2.2.2 Métodos de lixiviación	15
2.2.3 Diagrama de pH potencial	20
2.2.4 Cloruración	25
2.2.5 Consumo de ácido	32
2.2.6 Proceso de lixiviación	32
2.2.7 Agua de mar en minería	36
2.2.8 Diseño experimental	42
2.2.9 Difracción de rayos X	51
2.3 Definición de términos	53
<b>CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO</b>	<b>56</b>
3.1 Tipo y diseño de investigación	56
3.2 población y muestra	56
3.2.1. Población	56
3.2.2 Muestra	56
3.3 Variables	56
3.4 Técnicas e instrumentos para recolección de datos	58

3.5 Procesamiento y análisis de datos	59
3.5.1 Materiales, equipos y reactivos	59
3.5.2 Evaluación del mineral	60
3.5.3 Pruebas de lixiviación por agitación	70
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
4.1 Resultados	74
4.2 Discusión	82
CONCLUSIONES	96
RECOMENDACIONES	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
ANEXOS	102

## CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1 Resultados obtenidos en 24 días	9
Tabla 2 Proporción de sales disueltas en los océanos	38
Tabla 3 Composición típica del agua de mar	39
Tabla 4 La concentración de IoncCloruro en el agua de mar de la Playa Punta Picata del Distrito de Ite, Departamento de Tacna.	40
Tabla 5 Operacionalización de las variables	58
Tabla 6 Análisis granulométrico del mineral chancado	61
Tabla 7 Leyes de cabeza de mineral	63
Tabla 8 Determinación de porcentaje de humedad	64
Tabla 9 Análisis granulométrico del mineral fino	66
Tabla 10 Determinación de la densidad relativa (peso específico)	66
Tabla 11 Consumo de ácido	68
Tabla 12 Condiciones	74
Tabla 13 Niveles de experimentación	75
Tabla 14 Resultados de recuperación de Cobre	76
Tabla 15 Resultados de recuperación de Oro	77
Tabla 16 Análisis mineralógico por difracción de rayos X en la muestra	79
Tabla 17 Otros minerales detectados en difracción de rayos X	79
Tabla 18 Resultado de elementos detectados por difracción de rayos X	81
Tabla 19 Análisis de varianza para recuperación de Cu	82

Tabla 20 Optimizar respuesta en maximizar recuperación de Cobre	87
Tabla 21 Análisis de varianza para recuperación Au	88
Tabla 22 Optimizar respuesta en maximizar recuperación de Oro	93
Tabla 23 Resultados con Nitrato de Amonio	102
Tabla 24 Recuperación de Cobre y Oro usando Nitrato de Amonio	102

## CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1 Lixiviación en pilas	17
Figura 2 Tanque de agitación	19
Figura 3 Diagrama de potencial -pH para un sistema de Oro-Agua	22
Figura 4 Diagrama de Eh/pH para el sistema Cu-S-O-H <sub>2</sub> O	24
Figura 5 Movimiento de la carga en un olinio de rodamiento de cara	36
Figura 6 Diseño factorial	44
Figura 7 Diseño factorial 2 <sup>k</sup> con pruebas centrales	49
Figura 8 Difractograma de rayos X que muestra tres fases	52
Figura 9 Molienda	62
Figura 10 Muestreo por método de damero	63
Figura 11 Secado de la muestra	64
Figura 12 Agitación en RO-TAP para análisis granulométrico	65
Figura 13 Determinación de densidad relativa del mineral	67
Figura 14 Titulación con Hidróxido de Sodio .....	68
Figura 15 Determinación de densidad de pulpa	69
Figura 16 Proceso de agitación	71
Figura 17 Filtración de pulpa	71
Figura 18 Resultados de difractograma de la muestra	78
Figura 19 Fases cristalinas encontradas	80
Figura 20 Elementos por difracción de rayos X	80

Figura 21 Diagrama de pareto estandarizado para recuperación de Cu	84
Figura 22 Grafica de efectos principales para recuperación de Cu	85
Figura 23 Gráfica de interacción para recuperación de Cu	86
Figura 24 Grafica de contornos de superficie de respuesta estimada	87
Figura 25 Grafica de efectos principales para recuperación de oro	90
Figura 26 Grafica de interacción para recuperación de oro	91
Figura 27 Diagrama de pareto estandarizada para recuperación de oro	91
Figura 28 Grafica de contornos de la superficie	92
Figura 29 Gráfica de contornos de la superficie de respuesta	93

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación aplicada a la industria minera. trata sobre la lixiviación de minerales cupríferos y auríferos, en donde la problemática que hay en la minera es que no se recupera el oro. Es por lo cual el objetivo de esta investigación, evaluar la lixiviación de minerales cupríferos y auríferos utilizando ácido sulfúrico concentrado y sales oxidantes en agua de mar con minerales de la minera señor de Locumba con el fin de lixiviar cobre y oro en un solo proceso. Para lo cual se realizó una serie de pruebas en agitación usando un diseño factorial de  $(2^K)$  más 3 repeticiones en el centro, donde se usó 4 variables independientes que son la concentración del ácido sulfúrico y sales oxidantes como variable dependiente la recuperación de cobre y oro; manteniendo constante la granulometría, el porcentaje de sólido, rpm, tiempo de agitación y agua de mar. Con las pruebas realizadas a nivel laboratorio y analizados con el paquete estadístico STATGRAPHICS CENTURION. Se llegó a los siguientes resultados, se obtuvo una máxima recuperación de oro 54,86 % y cobre 92,64%. En donde se puede concluir que sí es posible lixiviar el oro y cobre usando sales oxidantes. Estas sales se agregan con el fin de lixiviar el oro, porque el cobre presente en gran porcentaje es óxido con un pequeño porcentaje de sulfuros.

*Palabras claves:* lixiviación por agitación, sales oxidantes, agua de mar

## **ABSTRACT**

This research work applied to the mining industry deals with the leaching of copper and gold ores, where the problem in the mining industry is that gold is not recovered. Therefore, the objective of this research is to evaluate the leaching of copper and gold ores using concentrated sulfuric acid and oxidizing salts in seawater with minerals from the Señor de Locumba mine in order to leach copper and gold in a single process. For which a series of agitation tests were carried out using a factorial design of  $(2^K)$  plus 3 repetitions in the center, where 4 independent variables were used which are the concentration of sulfuric acid and oxidizing salts as a dependent variable the recovery of copper and gold, keeping constant the granulometry, the percentage of solid, rpm, agitation time and sea water. With the tests carried out at laboratory level and analyzed with the statistical package STATGRAPHICS CENTURION. The following results were obtained: a maximum recovery of 54,86% gold and 92,64% copper. It can be concluded that it is possible to leach gold and copper using oxidizing salts, these salts are added in order to leach the gold since the copper present in great percentage is oxide with a small percentage of sulfides.

*Keywords:* agitation leaching, oxidizing salts, sea water

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, en la minera señor de Locumba ubicado en el departamento de Tacna provincia Jorge Basadre Grohmann en distrito de Ite, específicamente por pequeña minería se cuenta con minerales oxidados de cobre en mayor cantidad y algo de sulfuros con una ley de 3,072% de cobre total y 3,119g/TM de oro, es así que esta tesis se basa en evaluar la lixiviación de minerales cupríferos y auríferos usando sales oxidantes en agua de mar por su cercanía. El problema que se tiene actualmente es que no se está recuperando el oro debido a la naturaleza del mineral y entre otros factores.

El objetivo principal de esta tesis, es evaluar la lixiviación con ácido sulfúrico y sales oxidantes esto con el fin de lixiviar cobre y oro en un solo proceso usando agua de mar por su cercanía a la costa. Con el fin de lograr nuestros objetivos, se realizaron una serie de pruebas metalúrgicas que es la lixiviación por agitación, este método implica la mezcla de un mineral pulverizado con una solución química (conocida como lixivante) en recipientes estos son agitados a un determinado (rpm) para permitir la disolución selectiva de los minerales de interés.

El desarrollo de la tesis consta de cuatro capítulos:

Capítulo I.- Planteamiento de problema, se muestra la introducción del problema mediante los antecedentes, justificación, formulación y evaluación del problema, sus objetivos.

Capítulo II.- Fundamento teórico, en este capítulo comprende en revisión bibliográfica relacionada con el tema de investigación que son de vital importancia conocer los antecedentes ya estudiados en tesis o patentes de otros autores.

Capítulo III.- Marco metodológico, se describe el procedimiento que se realiza en cada prueba, la población y muestra.

Capítulo IV.- Resultados obtenidos, en este capítulo se muestran los resultados obtenidos en la lixiviación de minerales cupríferos y auríferos usando sales oxidantes y agua de mar mediante gráficas y tablas.

Finalmente, se muestran las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de investigación, así mismo su bibliografía y anexos.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1 Descripción del problema**

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

La investigación que se evalúa en la presente tesis, se enfoca principalmente en evaluar la lixiviación de minerales cupríferos y auríferos en medio ácido con sales oxidantes como cloruro de sodio, nitrato de sodio y clorito de sodio en agua de mar en la minera Señor de Locumba. A los minerales oxidados de cobre en mayor cantidad, donde el proceso realizado es la lixiviación por agitación. En el cual la finalidad es lixiviar el cobre y oro en un solo proceso utilizando sales oxidantes y ácido sulfúrico concentrado en agua de mar.

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

En la minera Señor de Locumba, se cuenta con minerales oxidados de cobre y un pequeño porcentaje de sulfuros donde el proceso de extracción es a través de la vía hidrometalúrgica más precisamente la lixiviación por agitación.

Teniendo en cuenta los antecedentes, en el presente proyecto se pretende estudiar la recuperación de cobre y oro utilizando ácido sulfúrico concentrado y sales oxidantes en agua de mar con el fin de lixiviar cobre y oro en un solo proceso.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Formulación de problema general**

¿En qué medida se puede mejorar la evaluación por lixiviación de minerales cupríferos y auríferos en medio ácido con sales oxidantes en agua de mar, en la minera señor de Locumba Ite-Tacna?

### **1.2.2 Formulación de problemas específicos**

¿En qué medida se puede mejorar la concentración de ácido sulfúrico y sales oxidantes que indique la recuperación de cobre?

¿En qué medida se puede mejorar la concentración de ácido sulfúrico y sales oxidantes que indique la recuperación de oro?

## **1.3 Justificación e importancia**

El proceso de lixiviación de cobre y oro con sales oxidantes permite explotar yacimientos sin usar agentes muy contaminantes como es la amalgamación, cianuración entre otros procesos.

La investigación de este estudio permita conocer las concentraciones óptimas de lixiviación, en cuanto a ácido sulfúrico y sales oxidantes con minerales de la minera señor de locumba, el cual aportará condiciones de operación eficientes y seguros para los sectores de pequeña minería de la zona, obteniendo mayor recuperación posible en cuanto a cobre y oro.

## **1.4 Alcances y limitaciones**

El presente trabajo de investigación procurará evaluar y analizar la concentración de ácido sulfúrico, nitrato de sodio, cloruro de sodio y clorito de sodio en agua de mar, con minerales de la minera Señor de Locumba en región de Tacna, mediante un proceso hidrometalúrgico.

### **1.4.1 Delimitación espacial**

La investigación se desarrolló en laboratorio de la minera Señor de Locumba y en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, en laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, Tacna – Perú.

### **1.4.2 Delimitación social**

- Investigador
- Asesor
- Jefe de laboratorio

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

- Evaluar la lixiviación de minerales cupríferos y auríferos en medio ácido con sales oxidantes en agua de mar, en minera Señor de Locumba Ite - Tacna.

### **1.5.2 Objetivo específico**

- Determinar las concentraciones de ácido sulfúrico y sales oxidantes que indiquen la recuperación de cobre de la lixiviación en medio ácido con minerales de la minera Señor de Locumba Ite-Tacna.
- Determinar las concentraciones de ácido sulfúrico y sales oxidantes que indiquen la recuperación de oro de la lixiviación en medio ácido con minerales de la minera Señor de Locumba Ite-Tacna.

## **1.6 Hipótesis**

### **1.6.1 Hipótesis general**

- La aplicación de las sales oxidantes mejorará la lixiviación de minerales cupríferos y auríferos en agua de mar, en minera Señor de Locumba Ite - Tacna.

### **1.6.2 Hipótesis específica**

- Se logrará mejorar la extracción de cobre con el uso de ácido sulfúrico, cloruro de sodio, nitrato de sodio y clorito de sodio, que indica la recuperación de cobre de la lixiviación en medio ácido con minerales de la minera Señor de Locumba Ite-Tacna.
- Se logrará mejorar la extracción de oro con el uso de ácido sulfúrico, cloruro de sodio, nitrato de sodio, clorito de sodio, que indica la recuperación de oro de la lixiviación en medio ácido con minerales de la minera Señor de Locumba Ite-Tacna.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

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

##### **2.1.1 Antecedentes internacionales**

Cabe mencionar, que (Chile Patente n° 36158, 1988) realizó un estudio de lixiviación en columnas con mineralización de cuarzo, albita, calcita, almagrado, atacamita, calcopirita, crisocola, calcosina, covelina, cuprita, magnetita, y fierro oligisto. Con una ley promedio de alimentación de 0,4 gramos por tonelada de oro y 2,1% de cobre. Utilizando agua de mar, ácido sulfúrico concentrado a 170 gramos por litro, cloruro de sodio a razón de 10 kilos por tonelada, 0,3% hipoclorito de sodio con respecto al peso de la muestra ensayada, 0,1% de dicromato de potasio con respecto al peso de la muestra y 0,2% de nitrato de sodio con respecto al peso de la muestra ensayada.

En el cual encontró los siguientes resultados (tabla 1):

**Tabla 1***Resultados obtenidos en 24 días*

Días de Lixiviación	C		T		R	
	Cu %	Au (g/T)	Cu (%)	Au (g/T)	Cu (%)	Au (%)
4	2,12	0,41	1,35	0,32	36,47	22,95
8	2,14	0,49	0,81	0,30	62,05	39,05
12	2,02	0,36	0,51	0,19	75,00	47,19
16	1,93	0,54	0,33	0,26	82,70	52,04
20	2,04	0,31	0,19	0,13	90,60	57,01
24	2,01	0,46	0,18	0,20	90,90	57,20

Nota.- recuperado de (Chile Patente nº 36158, 1988)

Así también, (Beltrán Aguilar , 2006) generó un trabajo de grado “LIXIVIACIÓN DE MINERAL AURÍFERO CON SALES OXIDANTES EN MEDIO ÁCIDO” en la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga-Colombia. Con minerales de pirita, cuarzo, feldespato y moscovita. En el cual llegó a las siguientes conclusiones:

- En las pruebas realizadas con diferentes porcentajes de sólidos en la pulpa, se determinó que el mayor porcentaje de disolución de oro se obtuvo con un 20% de sólidos. Asimismo, la mayor disolución de oro se alcanzó a las 13 horas de lixiviación, aunque el resultado no fue significativamente diferente

al obtenido a las 10 horas, con una diferencia de solo 0,05g/T en la disolución de oro entre ambos tiempos.

- Para obtener los datos de disolución de oro en las pruebas preliminares, se emplearon dos técnicas: ensayo al fuego y análisis elemental por absorción atómica. Esta última presentó inconvenientes durante las mediciones, proporcionando resultados distantes en comparación con los obtenidos mediante el ensayo al fuego. Los errores en la medición fueron causados por interferencias debido a altas concentraciones de sodio y la presencia de metales pesados como cobre y hierro en la solución lixiviada.
- Los resultados de las pruebas preliminares muestran que la eficiencia de disolución de oro no supera el 20%, lo que indica una baja recuperación de oro en el proceso de lixiviación con sales oxidantes en medio ácido al aplicar este tipo de mineral concentrado.
- A partir del diseño estadístico, se determinaron los valores óptimos para maximizar la disolución de oro. Se concluyó que, para obtener un porcentaje de oro disuelto del 18,2582%, es necesario trabajar con concentraciones de 123,806 kg/T de ácido sulfúrico, 85,5943 kg/T de cloruro de sodio y 21,5706 kg/T de nitrato de sodio.

También (Adán Rodríguez & Reyes Valverde, 2010) elaboró una monografía titulada “LIXIVIACIÓN DE MINERALES AURÍFEROS POR AGITACIÓN CON SALES DE CLORURO Y NITRATO DE SODIO EN MEDIO

ÁCIDO, VERSUS CIANURACIÓN, EN IBEROMINAS, SOMOTILLO, MUNICIPIO DE CHINANDEGA-NICARAGUA, FEBRERO 2008” Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua recinto universitario “Rubén Darío” facultad de ciencias e ingenierías departamento de química y farmacia. Llegó a las siguientes conclusiones:

- Los resultados alcanzados de los distintos ensayos evidencian que la lixiviación con sales en medio ácido de broza aurífera, es un método de lixiviación efectivo para extraer oro del mineral proveniente del yacimiento El Danto, ya que pueden alcanzar tasas de recuperación de hasta el 95,31% de oro, lo que afirma que la hipótesis es favorable.
- Las condiciones óptimas para la lixiviación con sales oxidantes se lograron al mantener una proporción de 1:4,61 entre nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) y cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ), coincidiendo con la estequiometría de la ecuación del proceso.
- Además, se demostró que el uso de lixiviación con sales oxidantes supera los resultados obtenidos que con la lixiviación con cianuro de sodio para el beneficio de la broza del yacimiento El Danto. con una mejora de 7,89%. Esta diferencia resulta significativa en términos de producción de onzas troy, así como en la relación costo-beneficio.

### 2.1.2 Antecedentes nacionales

Cabe resaltar, que (Condori Quispe & Valdez Abrigo, 2018) realizó una tesis titulada “EVALUACIÓN DE LA LIXIVIACIÓN CON CLORURO DE SODIO Y NITRATO DE POTASIO EN MEDIO ÁCIDO DE MINERAL AURÍFERO SULFURADO PROVENIENTE DE LA MINERA LAYTARUMA DE BAJA RECUPERACIÓN DE ORO CON LOS PROCESOS TRADICIONALES USADOS EN PEQUEÑA MINERÍA” en la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Arequipa. Con minerales de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), esfalerita ( $\text{Zn,FeS}$ ), calcita  $\text{CaCO}_3$ , pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y galena ( $\text{PbS}$ ). La tesis llegó a las siguientes conclusiones:

- Se concluye que la lixiviación en medio ácido con sales oxidantes para el mineral analizado se ve principalmente afectado por la presencia de oro grueso, cuarzo y electrum asociado a arcillas, dado que la máxima recuperación alcanzada es 29,31% de Au. Donde las concentraciones de los reactivos fueron determinados experimentalmente.
- Para aumentar la recuperación de oro del 26,62% al 29,31%, la concentración de cloruro de sodio debe incrementar a 103,33g/L, la concentración de nitrato de potasio debe incrementar a 25,42g/L y la concentración del ácido sulfúrico debe mantenerse en 125,93g/L.
- La recuperación de oro, que fue de 29,31%, se vio influenciada principalmente por la presencia de arcillas produciendo un efecto de

pasivación, secuestro del oro ya disuelto impactando de manera significativa en la recuperación, produciendo una ligera disminución al aumentar el tiempo de lixiviación, este efecto debe ser evaluado para determinar su reversibilidad.

- La recuperación está directamente influenciada por la concentración del ácido sulfúrico y la concentración de cloruro de sodio, seguida de la concentración de nitrato de potasio con la interacción entre el ácido sulfúrico y el nitrato de potasio.
- La cinética de disolución en el proceso de lixiviación en medio ácido, es considerablemente más rápida que la cinética que el método tradicional de cianuración, cuyo tiempo de lixiviación es de 72 horas aproximadamente, mientras que la lixiviación en medio ácido con sales oxidantes solo toma alrededor de 8 horas.

Así mismo, (Severo, 2010) generó una investigación patentada como “proceso Severo” a minerales refractarios, sulfurados, encapsulados y ripios productos de cianuración. Donde indica que logró una recuperación de 95% a nivel industrial, el proceso se realiza a temperatura ambiente, empleando ácido sulfúrico concentrado junto con la adición de sales oxidantes como los cloruros y nitrato de sodio o nitrato de amonio la relación es de 1:4 de nitrato de sodio a cloruro de sodio a una concentración de ácido sulfúrico en rango de 110 a 120 g/L. En el cual llegó a las siguientes conclusiones:

- Desde un punto de vista técnico, es factible recuperar oro, metales grupo platino, tierras raras y titanio a partir de minerales mediante un proceso de lixiviación con mezcla de sales oxidantes en medio ácido mediante el proceso SEVERO.
- Las sales oxidantes en medio ácido son ecológicamente estables con el medio ambiente, no generan ningún tipo de gases y no emiten olores de dichas soluciones.
- Las variables importantes del proceso son: concentración de ácido sulfúrico y la combinación de sales oxidantes (nitrato y cloruro, en cualquiera de sus formas existentes) las cuales tienen el propósito de generar cloro nascente y agua regia in situ.
- La existencia del ion cloruro permite la generación de cloro nascente y cloruro de nitrosilo in situ lo que posibilita formación de complejo aniónico tetracloruarato, tetracloruro de platino e incrementando la solubilidad del oro, metales valiosos, tierras raras y oro atómico.

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Conceptos de hidrometalurgia**

La hidrometalurgia implica la disolución selectiva de minerales o metales en soluciones acuosas, incluidos los procesos posteriores de separación (sólido - líquido), la purificación de soluciones y la recuperación final de metales. Desde una

perspectiva etimológica, el término “hidrometalurgia” deriva de la raíz “Hidro”, por lo que se puede decir que es el arte y ciencia de extraer metales, a partir de minerales y/o materiales que contienen metales en un ambiente acuoso. Por tanto, los metales se extraen, recuperan y purifican mediante procesos en soluciones acuosas. Los metales primero se disuelven y luego se recuperan en otras formas, como óxidos e hidróxidos. Dentro del proceso hidrometalúrgico también se incluye la utilización de solventes orgánicos para la separación y concentración selectiva de iones metálicos en solución, así como el empleo de resinas de intercambio iónico. Aunque la electrometalurgia de soluciones acuosas se considera una disciplina independiente en sí misma, se analiza como un componente de la hidrometalurgia, ya que la lixiviación, por ejemplo, puede considerarse como un fenómeno electroquímico. La electrometalurgia no es solo el refinado del metal, también se define como el proceso de utilización de la electricidad o efectos eléctricos. Por tanto, procesos que aprovechan el efecto electroquímico del consumo de electricidad. No es un proceso espontáneo de consumo eléctrico, y hay que aprovechar el potencial (Uceda Herrera, 2016).

### **2.2.2 Métodos de lixiviación**

En términos generales, los diversos métodos empleados para llevar a cabo la lixiviación de minerales buscan abordar las preguntas esenciales de cualquier actividad industrial. Su objetivo es maximizar los beneficios económicos mientras se minimizan los costos y las complicaciones (Gupta & Mukherjee, 1990).

### **Lixiviación in situ**

La lixiviación in situ, (o en el lugar) implica en aplicar soluciones directamente sobre el mineral que se encuentra en el yacimiento, sin llevar a cabo ningún tipo de extracción minera alguna. Este es un método a muy bajos costos debido a que no se realiza ningún movimiento de dicho mineral, la contra que tiene este método es que no llega a una recuperación muy buena donde también se contamina el suelo esto se debe a que no cuenta con un debido aislamiento, en donde generalmente se usa geomembranas de polietileno de alta densidad (Domic, 2001).

### **Lixiviación en pilas**

En las operaciones comerciales de lixiviación en pilas, el mineral se apila sobre un sustrato impermeable y se recolecta una solución rica en oro y plata, eliminando cualquier posibilidad de que la solución desaparezca bajo tierra y el riesgo de contaminación del agua con cianuro (Gallardo, 1980).

Solo se puede tomar una decisión a favor de la lixiviación en pilas después de analizar las propiedades metalúrgicas del mineral, determinadas en pruebas de laboratorio.

Aunque los estudios mineralógicos pueden indicar que el oro está asociado con rocas asociadas adecuadas para la lixiviación en pilas, sería prudente realizar pruebas de laboratorio y de planta piloto para verificar que el mineral de oro se puede lixiviar mediante la percolación de soluciones débiles de cianuro.

## **Figura 1**

### *Lixiviación en pilas*



Nota.- Lixiviación en pilas en Minera Michilla tomado de (Portal Minero S.A., 2006)

### **Sistema de riego**

La solución de cianuro se introduce en la pila mediante riego con tubos de plástico perforados. Existen muchos tipos de equipos de riego, como por ejemplo: 1) aspersores, 2) emisores, 3) boquillas y 4) los llamados osciladores, es decir mangueras quirúrgicas (Gallardo, 1980).

El riego tiene que ser uniforme. La pila debe humedecerse con una determinada cantidad de litros de solución por hora y por metro cuadrado de superficie, según lo determinen pruebas de laboratorio (Gallardo, 1980).

El riego por goteo es más conveniente cuando los recursos hídricos son limitados, el viento aún es fuerte o existe riesgo de que la solución se congele en zonas montañosas (3000 a 4000 metros sobre el nivel del mar). El riego por aspersión es adecuado cuando hay suficiente agua, condiciones climáticas favorables (temperatura mínima 0°C), calidad del agua dura, peligro evidente de precipitación de carbonatos, viento moderado o condiciones intermitentes en determinados períodos es conveniente agregar oxígeno a la solución lixivante (Gallardo, 1980)

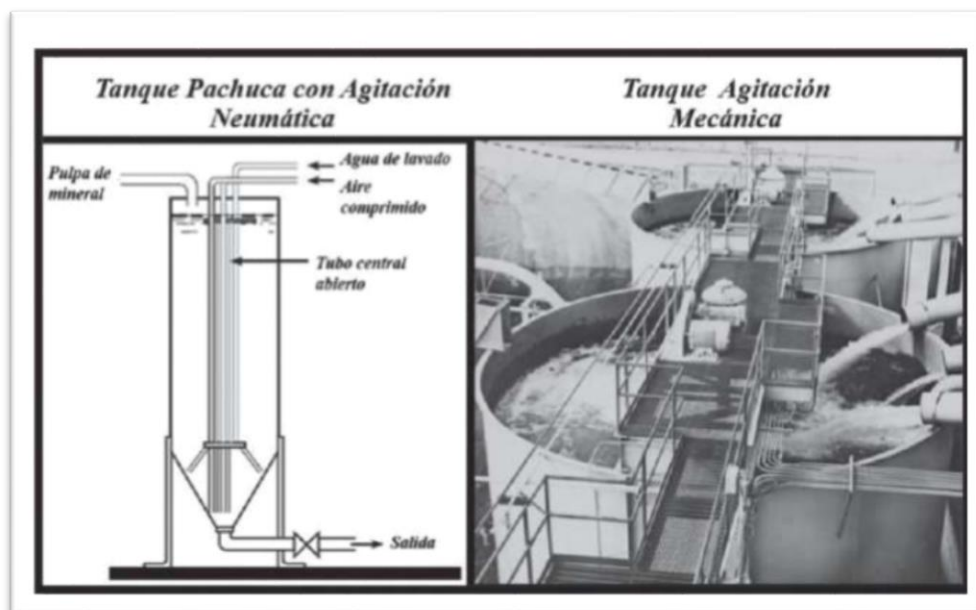
### **Lixiviación por agitación**

El uso de lixiviación por agitación requiere una molienda fina del mineral, por lo que solo es adecuado para minerales frescos de mayor ley que requieren molienda húmeda debido a su contenido de mayor valor a cambio de una mayor recuperación. El menor tiempo de procesamiento, ya sea concentrado o a calcinas de tostación, debido a su menor volumen, puede justificar los costos de mezcla, que en algunos casos pueden extenderse. Esto aumenta el área expuesta a la lixiviación y mezcla, reduciendo así el espesor de la capa limitante de la difusión, al tiempo que aumenta el área de la interfaz gas-líquido (Domic, 2001).

La lixiviación del mineral con agitación (cuando el mineral está en suspensión) se utiliza para minerales de ley relativamente alta para justificar los costos de molienda y mezcla. Los subproductos de alta calidad (residuos) también se pueden eliminar mediante limpieza. Hay cuatro tipos de lixiviación agitada. (Uceda Herrera, 2016)

## Figura 2

*Tanque de agitación*



Nota.- Tanque de agitación mecánica (University of Saskatchewan Geological Introduction to mineral Engineering)

1. **Tanques.-** La agitación se realiza inyectando aire comprimido en el fondo del tanque. El tanque tiene un fondo cónico que dirige la solución sólida a la entrada de aire. A menudo se operan en serie para cumplir con los

requisitos de tiempo de residencia. No es muy popular porque los sólidos se depositan si se corta la electricidad.

2. **Agitadores de velocidad baja.** Se utiliza cuando una mezcla vigorosa no aumenta la velocidad de reacción. Una paleta o rastrillo de gran diámetro mantiene el lodo fuera del fondo del tanque.
3. **Agitadores de velocidad alta.** Se aplica cuando la tasa de lixiviación es limitada debido a la difusión del reactivo en las superficies minerales (típico). Diseñado para un bombeo rápido de pulpa.

#### **Ventajas de la lixiviación por agitación**

- Muy buena eficiencia en la extracción de los elementos a recuperar.
- Corto tiempo de procesamiento (horas).
- Proceso continuo, con un alto nivel de automatización.
- Maneja fácilmente minerales alterados o generadoras de finos.

#### **Desventajas**

- Los costos de inversión y operación son altos.
- Es necesario contar con una fase de molienda y un proceso de separación sólido/líquido, que incluye espesamiento y filtración.

#### **2.2.3 Diagrama de pH potencial**

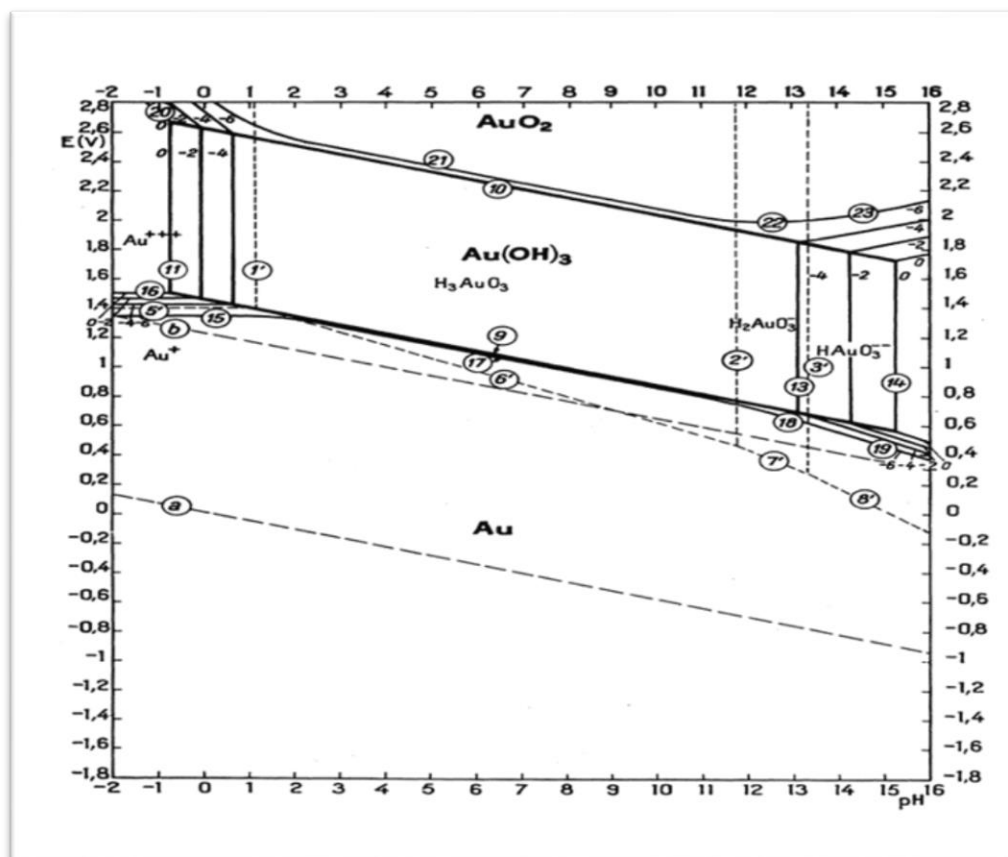
La lixiviación se puede realizar en diferentes condiciones. Puede realizarse con soluciones ácidas o básicas y en ambientes oxidantes, neutras o incluso reductoras. La elección de condiciones de lixiviación específicas depende

principalmente de la naturaleza del material a tratar y del grado de selectividad requerido en el proceso de lixiviación. En otras palabras, mediante el uso de las condiciones de lixiviación adecuadas, puede ser posible disolver ciertos compuestos metálicos de un material de alimentación complejo y dejar otros sin atacar o convertirlos en especies sólidas insolubles que serán rechazadas en los residuos de lixiviación (Gupta & Mukherjee, 1990).

Una adaptación de gran utilidad en hidrometalurgia es el diagrama potencial-pH o diagrama de Pourbaix. Estos diagramas se desarrollaron por primera vez para estudios en el campo de la corrosión. Han sido ampliamente aceptados en diversos temas relacionados con la termodinámica de los sistemas acuosos (Gupta & Mukherjee, 1990).

**Figura 3**

*Diagrama de potencial -pH para un sistema de Oro-Agua a 25°C*



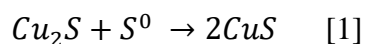
Nota. El diagrama de potencial – pH. tomado de (Pourbaix, 1974)

### Uso del diagrama Eh/pH del sistema Cu-O-S-H<sub>2</sub>O para disolución de Cu<sub>2</sub>S

Para mostrar cómo pueden predecirse a partir de los diagramas Eh/pH conocidos también como diagramas de Marcel Pourbaix, permiten prever las relaciones de estabilidad y la secuencia de formación de capas superficiales conforme avanzan las reacciones sucesivas de disolución, se presenta en la figura 4 el sistema Cu-O-S-H<sub>2</sub>O a 25°C. En este caso, se asume que la concentración molar

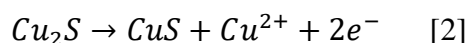
(actividad total) de todas las especies disueltas que contienen azufre es de ( $10^{-1}$ ) molar ( $\sum a_{\text{azufre}} = 10^{-1}$ ) (Domic, 2001)

Las regiones de estabilidad para la calcosina  $\text{Cu}_2\text{S}$ , y la covelina,  $\text{CuS}$ , indican que la formación de capas sólidas de azufre elemental no se producirá en la superficie de la calcosina, debido a que la reacción:

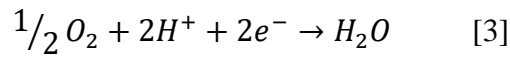


Es termodinámicamente favorable. Por otro lado, se puede predecir que la secuencia de formación de capas superficiales en la superficie del  $\text{Cu}_2\text{S}$  será la siguiente:  $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CuS}/\text{S}^0$  (Domic, 2001).

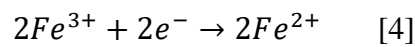
Cuando el  $\text{Cu}_2\text{S}$  está en una solución acuosa con un alto potencial de oxidación (Eh), reaccionará; lo que provocará una disminución del potencial, debido a que el oxidante se irá agotando en la superficie. Esto generará un sobrepotencial de polarización y dará lugar a la formación de capas porosas de covelina  $\text{CuS}$ , sobre el sustrato de calcosina,  $\text{Cu}_2\text{S}$ , como subproducto inicial. La reacción anódica es: (Domic, 2001)



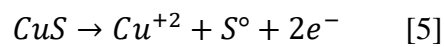
Si el oxidante es el oxígeno, la reacción catódica implicará el consumo de iones de hidrógeno en la superficie, como se describe en las siguientes reacciones:



En cambio, si el par catódico involucra iones férricos, se tendrá sin consumir iones hidrógeno, la formación de iones ferroso:

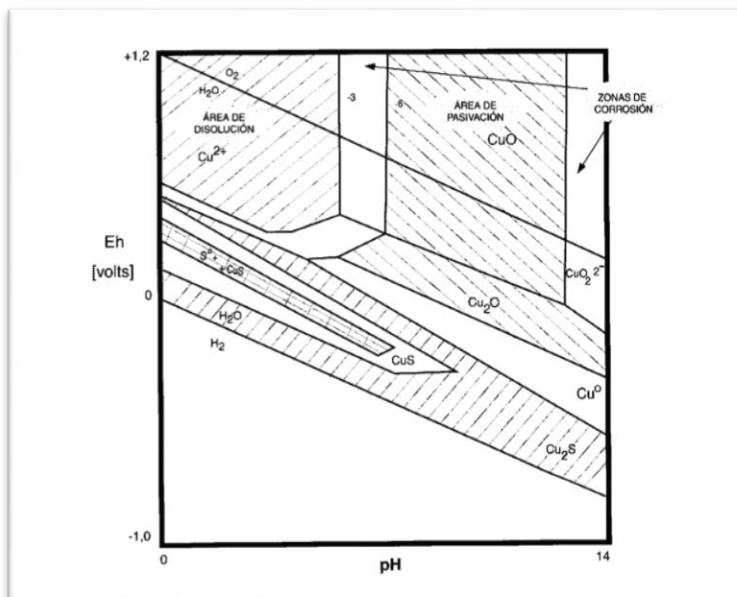


La generación de azufre elemental sobre la superficie de la covelina porosa ocurre en forma de capas superficiales no conductoras, y se lleva a cabo según la siguiente reacción: (Domic, 2001)



**Figura 4**

Diagrama de Eh/pH para el Sistema Cu-S-O-H<sub>2</sub>O a 25°C



Nota.- tomado de (Domic, 2001)

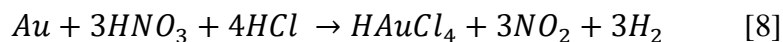
### 2.2.4 Cloruración

En el siglo XIX, antes de la introducción del cianuro, la cloruración se utilizaba ampliamente para tratar minerales que contenían oro, sulfuros de oro y telurios que no estaban sujetos a concentración gravimétrica ni amalgamación (Severo, 2010).

El oro se disuelve en una solución acuosa de cloruro, formando complejos de cloruro de oro (I) y oro (III):



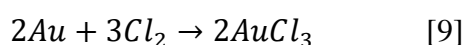
El ácido nítrico actúa como un potente agente oxidante y es eficaz para disolver el oro en un medio cloruro. Por lo tanto, se utiliza agua regia (una mezcla de 33% de HNO<sub>3</sub> y 66% de HCl) para disolver el oro, como se indica en la ecuación correspondiente. Esta reacción genera dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), un gas que es altamente tóxico.



La reacción entre el ácido nítrico y el ácido clorhídrico concentrado produce dióxido de nitrógeno, un gas altamente tóxico; por lo que es importante trabajar bajo una campana extractora. Además, como resultado de la formación del

mencionado gas, se forma una cantidad insuficiente de agua regia, por lo que de vez en cuando se debe agregar ácido nítrico y ácido clorhídrico para disolver el oro.

El oro es entonces lixiviado a pH bajo, mediante los cloruros:



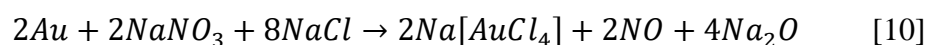
### **Lixiviación con sales oxidantes en medio ácido**

La lixiviación con sales oxidantes en medio ácido, conocida como Proceso Severo, se basa en la generación de cloro y agua regia in situ, lo que produce un lixivante altamente efectivo para la recuperación de metales nobles de minerales auríferos o concentrados. Este proceso, utiliza ácido sulfúrico concentrado en la pulpa, junto con la adición de sales oxidantes como cloruro de sodio, nitrato de sodio, amonio o potasio, en diversas proporciones, lo que facilita la formación de cloruro de nitrosilo durante la reacción (Severo, 2010).

El proceso que se presenta es una tecnología innovadora y ecológica, desarrollada completamente en Perú, para la recuperación de oro a partir de menas, concentrados y materiales refractarios, mediante agitación en pilas o por inundación. Este método ha sido patentado bajo el nombre de Proceso SEVERO. La lixiviación se lleva a cabo mediante la adición de sales oxidantes en un medio ácido y ofrece varias ventajas en comparación con los métodos convencionales (Severo, 2010).

- Muy sensible a elementos incrustados en el mineral como Pb, Cu, Zn, Sb, etc., sin interacción con el azufre residual, permitiendo su liberación del proceso.
- Buena eficiencia en la recuperación de oro y elementos nobles, como platino, paladio, iridio, rodio, osmio, rutenio, titanio, germanio y talio, especialmente de arsenopiritas y calcopiritas.
- Recuperación efectiva de oro a partir de minerales refractarias.
- Posibilidad de regenerar el lixivante mediante la adición de sales y la precipitación controlada de estas.

Las sales en medio ácido interactúan con el oro formando un complejo aniónico, mediante un mecanismo de reacción que implica la oxidación del oro y su posterior combinación con cloruros, dando lugar a un complejo estable, siendo su mecanismo de reacción:

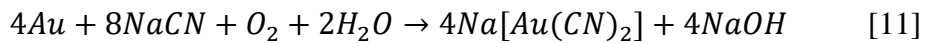


Esta reacción es eficiente, logrando extracciones de oro de hasta un 98%. Una de sus principales ventajas es la capacidad de reciclar la solución lixivante, lo que contribuye a la sostenibilidad del proceso. Además, a diferencia de otros métodos, no produce dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), un gas venenoso y altamente tóxico; lo que la convierte en una opción más segura y ecológica para la recuperación de oro (Severo, 2010).

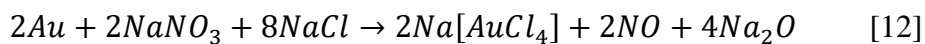
## Química de lixiviación

A continuación, se presentan las reacciones de lixiviación del oro utilizando cianuro y sales oxidantes:

Cianuración (ecuación de Elsner)



Sales oxidantes (Proceso Severo)



- La lixiviación con sales oxidantes emplea nitrato y cloruro de sodio como lixivante, los cuales al reaccionar en un entorno ácido, generan cloruro de nitrosilo (NOCl). Así, la velocidad de este proceso depende directamente de las concentraciones tanto del ácido como de las sales.
- Las sales disueltas del oro generan complejos estables de oro (I) y (III), como  $H[AuCl_4]$  y  $Au[AuCl_4]$ , en el medio. Estas sales se combinan con el oro formando ligandos de cloruro y nitrosilo.

## Cloruración del oro

En este proceso, considere los siguientes pasos:

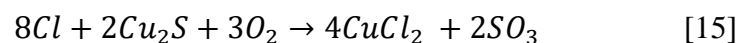
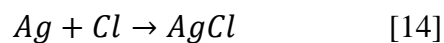
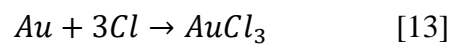
- Calcinación de la mena.
- Cloruración del oro y lixiviación del cloruro áurico formado con agua.
- Extracción de oro de una solución de cloruro.

El objetivo de la calcinación es liberar el oro y la conversión de todos los metales presentes, a excepción del oro y la plata, en óxidos, los cuales prácticamente son inmunes a la acción del cloro. El arsénico, el antimonio y el azufre, como el sulfato o cloruro férrico, no deben dejarse en el mineral calcinado, ya que podrían precipitar el oro de la solución de cloruro, afectando el proceso de recuperación (Gallardo, 1980).

La mena calcinada se somete a un proceso de cloruración para formar el cloruro áurico ( $AuCl_3$ ) soluble en agua.

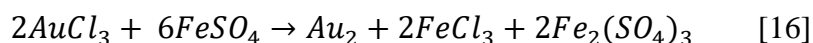
En el proceso antiguo, el cloro se generaba a partir de polvo de blanqueo (oxicloruro de calcio). El cloro en su forma primaria tiene un efecto limitado sobre los óxidos metálicos, pero actúa sobre los metales, así como sobre los sulfuros, arseniuros y antimoniuros (Gallardo, 1980).

Como ejemplo, se pueden considerar las reacciones siguientes:

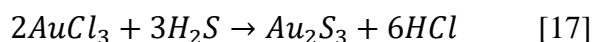


El oro suele precipitarse utilizando sulfato ferroso, carbón vegetal o ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ).

El sulfato ferroso, uno de los precipitantes más antiguos utilizados para recuperar oro, se obtiene al disolver hierro en ácido sulfúrico, el cual luego reacciona con cloruro de oro según la siguiente ecuación química:



La precipitación de oro contenido en la solución rica con ácido sulfhídrico se efectúa de acuerdo a la siguiente reacción:



La precipitación ocurre de manera rápida, y el precipitado ( $Au_2S_3$ ) se separa de la solución mediante un filtro prensa. Posteriormente, el material obtenido se somete a fusión. Este método logra una tasa de recuperación del 95%.

El proceso de cloruración se basa en la solubilidad del oro en agua clorada y proporciona un método disponible para extraer oro de ciertos minerales auríferos que no son adecuados para la amalgamación o el tratamiento económico mediante lixiviación por cianuración, o fundición. Para algunos minerales, el proceso de cloruración puede lograr mejores resultados que el tratamiento con cianuro. En general, el proceso de cianuro es más adecuado para tratar minerales de baja ley, mientras que el método de cloruración es más eficaz para tratar muchos minerales refractarios de alta ley (Gallardo, 1980).

Como se mencionó anteriormente, la cloruración de dichos materiales implica la tostación del mineral, que es la parte más costosa de la operación.

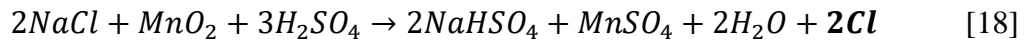
El proceso PLATTNER, fue propuesto por su autor en 1848 para la extracción de oro a partir de las piritas arsenicales, un residuo de las producciones de REICHENSTEIN en Silesia, y fue introducido en 1858 por Dietken, en Grass Valley, California.

Las condiciones para una satisfactoria cloruración de los minerales auríferas son la ausencia de cuerpos que recubran las partículas de oro protegiendo de la acción del cloro y el uso de cloro puro, especialmente más libre de ácido clorhídrico (Gallardo, 1980)

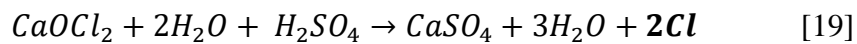
Si el oro finalmente no se separa, el tiempo de cloración es demasiado largo; por lo que los minerales que contienen oro grueso no son adecuados para este proceso.

El cloro se emplea en procesos de cloruración utilizando dióxido de manganeso, cloruro de sodio y ácido sulfúrico, o bien hipoclorito de calcio (polvo blanqueador) junto con ácido sulfúrico. En el primer caso, el cloro se genera en un equipo especializado, mientras que en el segundo, la producción de cloro ocurre directamente en el tanque de cloruración (Gallardo, 1980).

Primer caso



segundo caso



### 2.2.5 Consumo de ácido

El consumo depende del tipo de minerales. Los materiales oxidados tienden a reaccionar más rápidamente con los ácidos y, dependiendo del tipo de suelo, esto suele seguir el mismo patrón. Esto significa que los minerales oxidados suelen tener especies altamente reactivas y el consumo suele alcanzar entre 20 y 60 kg/t. Para los sulfuros, recuerde que debido a la oxidación del azufre catalizada por bacterias, parte del ácido se regenerará y si hay demasiada pirita, incluso puede haber problemas de acumulación de ácido en el sistema. Sin embargo, el consumo neto de minerales sulfurados suele estar entre 5 y 10 kg/t (Domic, 2001).

### 2.2.6 Proceso de lixiviación

#### Conminución

El término conminución se utiliza para identificar los procesos involucrados en la reducción del tamaño de los minerales y permitir la liberación de sus sustancias valiosas. Según este concepto, la voladura es el primer paso de trituración dentro de las operaciones mineras. Para garantizar el control metalúrgico y operativo, así como optimizar el diseño de una planta de trituración de minerales, es fundamental contar con información detallada sobre el balance de materiales en

cada punto del proceso. Este enfoque es crucial, ya que permite verificar de manera indirecta el equipo (a menudo junto con sistemas complejos de automatización y control) esté funcionando dentro de los límites de diseño y sea capaz de detectar cualquier cambio en ciertos parámetros operativos. Los ejemplos comunes incluyen la determinación del tamaño de partícula de alimentación y salida para bucles de proceso específicos o el porcentaje de sólidos de pulpa durante un proceso específico. De esta manera podrá identificar rápidamente el origen del problema (Portal Minero S.A., 2006).

### **Chancado**

Un proceso de trituración consiste normalmente de muchos eventos de rotura combinados con un proceso de selección. Estos procesos pueden operar simultáneamente o consecutivamente o ambos. Se produce selección y rotura con cada evento. Sin embargo, el proceso puede operar también de manera que el producto de cada evento sea sometido a alguna operación de separación por tamaño, antes que alguna parte sea sometida al siguiente evento de rotura.

Este concepto es simple de entender en el caso de las chancadoras de mandíbula. Durante el golpe de rotura, un trozo de mineral es pulverizado y durante el golpe inverso (apertura), los fragmentos mayores que el espacio de descarga son retenidos en la mandíbula para chancado adicional. El mismo tipo de proceso ocurre

en las chancadoras giratorias y de rodillo y es una característica especial de la operación de los molinos de barra (Lynch, 1977)

## **Molienda**

Este es el paso final en el proceso de reducción del tamaño de las partículas minerales. La molienda se puede realizar en un medio metálico (molino de barras o molino de bolas) o en un medio no metálico (guijarros) o con el propio mineral, es decir mediante la denominada molienda autógena. El interior del molino está fabricado con materiales duraderos. Generalmente, se utilizan caucho, metal resistente al desgaste o una combinación de estos dos materiales. La molienda se produce según los tres mecanismos mencionados anteriormente: compresión sobre las paredes del molino, desgaste entre las partículas y el medio de molienda y el impacto de ambos al caer durante la rotación del molino (Antonio Ballester, 2000).

## **Movimiento de la carga en un molino de rodamiento de carga**

La característica principal de los molinos de rodamientos de carga es el uso de cuerpos trituradores sueltos, los cuales son grandes, duros y pesados en comparación con las partículas de mineral. Sin embargo, estos cuerpos son más pequeños en relación con el volumen total del molino, ocupando un poco menos de la mitad de su capacidad (Wills, 1994).

Debido a la fricción generada por la rotación de la coraza del molino, el medio de molienda se eleva a lo largo del lado ascendente del molino hasta alcanzar

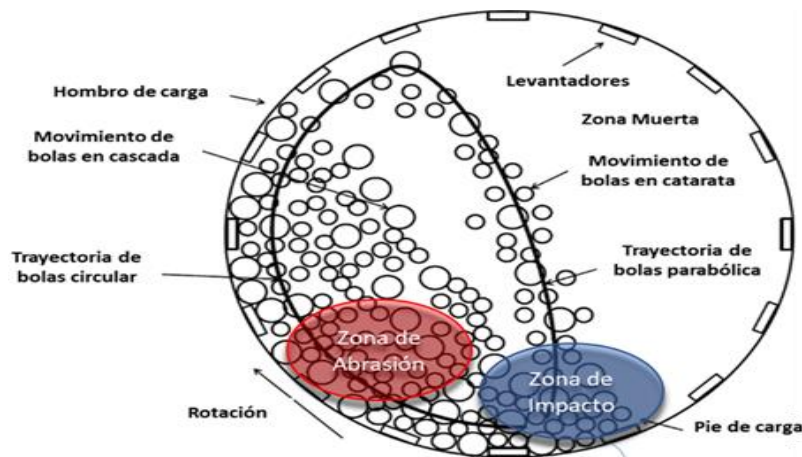
un punto de equilibrio dinámico. En este punto, los cuerpos caen en cascada, así también en forma de catarata sobre la superficie libre de otros cuerpos, alrededor de la zona muerta, donde el movimiento es mínimo, hasta llegar al pie de la carga del molino (ver figura 5) (Wills, 1994).

La velocidad del molino es un factor clave, ya que influye tanto en la naturaleza del producto final como en el nivel de desgaste de la coraza. Por ejemplo, si se conoce con precisión la trayectoria que siguen las bolas de acero dentro del molino, estas aterrizan en el fondo de la carga en lugar de golpear el revestimiento, provocando un rápido desgaste del revestimiento.

La fuerza que impulsa el molino se transfiere desde el revestimiento hacia la carga. A velocidades relativamente bajas, o cuando se utilizan revestimientos lisos, los medios de molienda tienden a rodar hacia abajo hasta la base del molino, lo que genera una pulverización por abrasión. Este efecto de cascada resulta en una molienda más fina, con un aumento en la producción de lamas y un mayor desgaste del revestimiento (Wills, 1994).

**Figura 5**

*Movimiento de la carga en un molino de Rodamiento de Cara*



Nota. Tomado de (Wills, 1994).

### **2.2.7 Agua de mar en minería**

Actualmente, el agua de mar se utiliza tanto en la lixiviación de minerales oxidados de cobre como minerales mixtos, y en muchos casos también en minerales sulfurados. Se han implementado diversos procesos de producción de cobre utilizando este recurso hídrico, y su uso ha ido aumentando en la producción mundial del cobre mediante métodos hidrometalúrgicos, a medida que han surgido innovaciones que lo han facilitado. Además, el agua de mar se está empleando cada vez más en la producción de concentrados mediante la flotación de sulfuros de cobre, un proceso que requiere alrededor de tres veces más agua que los métodos hidrometalúrgicos. Un ejemplo de su uso fue en la planta de flotación de Carolina Michilla. También se analizan las limitaciones en la lixiviación de las principales especies de minerales sulfurados cupríferos (Cisternas & Moreno, 2014).

El agua de mar es una solución compleja que contiene diversos tipos de sales, con una composición y concentración total relativamente constantes (3,5%).

Su composición química se mantiene inalterada por varios motivos:

- Por razones termodinámicas, ya que algunas sales precipitarán y se incorporarán al sedimento si la cantidad es demasiado grande.
- La circulación de las masas oceánicas permite que el agua puede agitarse y mezclarse constantemente.
- Los organismos en el mar fijan selectivamente ciertas sales solubles (carbonatos y silicatos) y las convierten en sales solubles (conchas) para incorporarlas a los sedimentos marinos cuando mueren.

Sin embargo, la salinidad local de los diferentes océanos varía según la profundidad y la ubicación geográfica en la Tierra. Además, el agua marina contiene una gran cantidad de elementos químicos (como yodo, sílice, estroncio, aluminio, hierro, cobre), gases disueltos (como oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono) y nutrientes (como fosfatos). Las sales disueltas actúan como electrolitos, lo que les confiere propiedades fisicoquímicas y termoquímicas complejas y variables. En la tabla 2, se muestran las concentraciones promedio de algunas sales como referencia, ya que estas sustancias se encuentran en forma de iones en el agua y no forman sales (Cisternas & Moreno, 2014).

**Tabla 2***Proporción de sales disueltas en los océanos*

Sales disueltas	Peso (g/L)	% de total de sales
Cloruro de Na	27,21	77,8
Cloruro de Mg	3,81	10,9
Sulfato de Mg	1,66	4,7
Sulfato de Ca	1,26	3,6
Sulfato de K	0,86	2,5
Carbonato de Ca	0,12	0,5
Bromuro de Mg	0,08	0,2

Nota. Tomado de (Cisternas & Moreno, 2014)

El agua es una de las pocas sustancias que existe en la naturaleza en tres estados de la materia: sólido (en los glaciares), líquido (océanos y lagos) y gaseoso (en el aire). Cuando el agua proviene del mar, se congela a una temperatura ligeramente inferior a la del agua pura (0°C), y el punto de congelación depende de la salinidad. El hielo que se forma en el mar contiene menos sal que el agua de mar líquida porque la mayor parte de la sal se deposita antes del punto de congelación; por lo que el agua congelada tiene menos sal. Además, el hielo flota en la superficie del océano debido a la diferencia de densidad entre el agua hielo y el agua líquida.

### Composición química del agua de mar

La salinidad del agua de mar es aproximadamente del 3,5%, expresada en equivalente de cloruro de sodio (NaCl), lo que equivale a una concentración aproximada de 0,55 M. Aunque el cloruro de sodio es el principal componente disuelto, no el único. El agua de mar también contiene varios iones secundarios en baja concentración, como iones sulfato (2,7g/kg), magnesio (1,29g/kg), calcio (0,41g/kg), entre otros (Cisternas & Moreno, 2014)

**Tabla 3**

*Composición típica del agua de mar*

Iones	Concentración mg/kg	Partes de salinidad, %
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	19,345	55,03
Sodio (Na <sup>+</sup> )	10,752	30,59
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup> )	2,701	7,68
Magnesio (Mg <sup>2+</sup> )	1,295	3,68
Calcio (Ca <sup>2+</sup> )	416	1,18
Potasio (K <sup>+</sup> )	390	1,11
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	145	0,41
Bromuro (Br <sup>-</sup> )	66	0,19
Borato (BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup> )	27	0,08
Estroncio (Sr <sup>2+</sup> )	13	0,04
Fluoruro (F <sup>-</sup> )	1	0,003

Nota. Tomado de (Cisternas & Moreno, 2014).

El cloruro presente en el agua de mar en la playa Punta Picata, ubicada en Ite en el departamento de Tacna contiene 19,721g/L. Lo cual es de vital importancia al momento de lixiviar el cobre y oro. Gracias a esta concentración de cloro se puede usar menos cantidad del cloruro de sodio.

**Tabla 4**

*La concentración de ion cloruro en el agua de mar de la playa Punta Picata del Distrito de Ite, Departamento de Tacna.*

Ion	Concentración mg/L	Concentración g/L
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	19721	19,721

Nota. Laboratorio Minares South S.R.L.

#### **Lixiviación de óxidos de cobre utilizando agua de mar**

La recuperación de cobre a partir de minerales oxidados se logra mediante la vía hidrometalúrgica, que incluyen procesos de lixiviación, extracción por solventes (SX) y electroobtención (EW).

La lixiviación, es un proceso hidrometalúrgico en el que se extrae el cobre de sus minerales oxidados utilizando ácido sulfúrico y agua. Se vierte lentamente una solución ácida de agua que contiene ácido sulfúrico sobre la superficie de la pila a través de un sistema de riego por goteo y de los aspersores. Esta solución ácida de agua se debe a la presencia de ácido sulfúrico en la superficie de la pila de lixiviación. Esta solución penetra hasta el fondo de la pila, actúa rápidamente y

disuelve el cobre presente en los minerales oxidados, generando una nueva solución de sulfato de cobre (Cisternas & Moreno, 2014).

La solución ácida enriquecida con cobre proveniente de la lixiviación se dirige a la etapa de extracción por solvente, donde se pone en contacto con un solvente orgánico para extraer el cobre. Posteriormente, en un paso de re-extracción, el cobre se transfiere a una solución ácida con bajo contenido de cobre, que proviene de la etapa de electrodeposición. Esto resulta en la formación de un electrolito rico y recuperando el solvente orgánico para su reutilización (Cisternas & Moreno, 2014).

El electrolito rico se envía a la etapa de electrodeposición (EW), donde se utiliza un ánodo insoluble de plomo y un cátodo permanente de acero inoxidable. En esta, el cobre presente en el electrolito se deposita en el cátodo al aplicarse corriente continua, mientras que en el ánodo se descompone en agua. Los productos de la electrodeposición son: cobre metálico (EO) con una pureza del 99,99% y ácido sulfúrico (Cisternas & Moreno, 2014)

La planta Diana de la compañía minera Tocopilla fue la primera en el mundo en emplear agua de mar acidulada con ácido sulfúrico en 1960. En esta planta, se obtenía una solución de cobre mediante lixiviación por agitación de minerales oxidados, y luego se extraía cemento de cobre utilizando chatarra de hierro como agente reductor.

Otra de las primeras plantas de lixiviación de minerales de cobre oxidados en Chile fue la compañía minera Carolina Michilla, que comenzó a operar en 1970. El proceso que empleo consistió en lixiviación por agitación de óxidos de cobre molidos, utilizando agua de mar acidulada con ácido sulfúrico y con una distribución de tamaño de partícula del 100% bajo malla 50. Posteriormente, se cambió a un método de lixiviación en pila en lugar de lixiviación por agitación. En ambos casos, el cobre se precipitaba utilizando chatarra de hierro (Cisternas & Moreno, 2014).

### **2.2.8 Diseño experimental**

#### **El proceso de adquisición de conocimientos**

Cualquier búsqueda de nueva información comienza cuando el investigador formula una serie de preguntas (Figura 6). Por ejemplo, si queremos conocer el efecto de los fertilizantes sobre el rendimiento del trigo de un terreno, podríamos hacernos algunas preguntas como:

- ¿Cuánto fertilizante se necesita para aumentar el rendimiento en un 10%?
- ¿Cómo afecta la precipitación a la eficacia de los fertilizantes?
- ¿El fertilizante afecta la calidad del trigo?

Estas preguntas definen el problema y lo que se debe hacer para resolverlo. Por eso, es importante hacer las preguntas correctas: aquellas que pueden ayudarnos a resolver el problema. No es tan simple como parece.

Antes de comenzar cualquier experimento, conviene comprobar que no se dispone de la información necesaria. En primer lugar, el experimentador debe hacer un inventario bibliográfico, consultando a expertos, realizando cálculos teóricos o cualquier otro método teórico, o cualquier otro método que le permita responder a las preguntas que se plantea sin necesidad de realizar ningún experimento. Este estudio preliminar puede responder a todas las preguntas. Si no es así, algunas preguntas pueden quedar sin respuesta o modificarse en función de la información obtenida. Entonces será necesario realizar experimentos para obtener todas las respuestas necesarias (Goupy, 1993).

Discutirlo más a fondo. Nuestra preocupación no se centra en esta fase inicial, sino en las siguientes.

Este estudio preliminar es una parte rutinaria de todo trabajo experimental y no nos ocuparemos de él.

Se trata de las fases en las que el experimentador piensa en los experimentos que debe realizar, y nuestro problema es cómo seleccionar los experimentos que deben hacerse y los que no es necesario realizar. ¿Existe una única estrategia ideal? Dicha estrategia ideal debería dar los resultados deseados lo antes posible (Goupy, 1993).

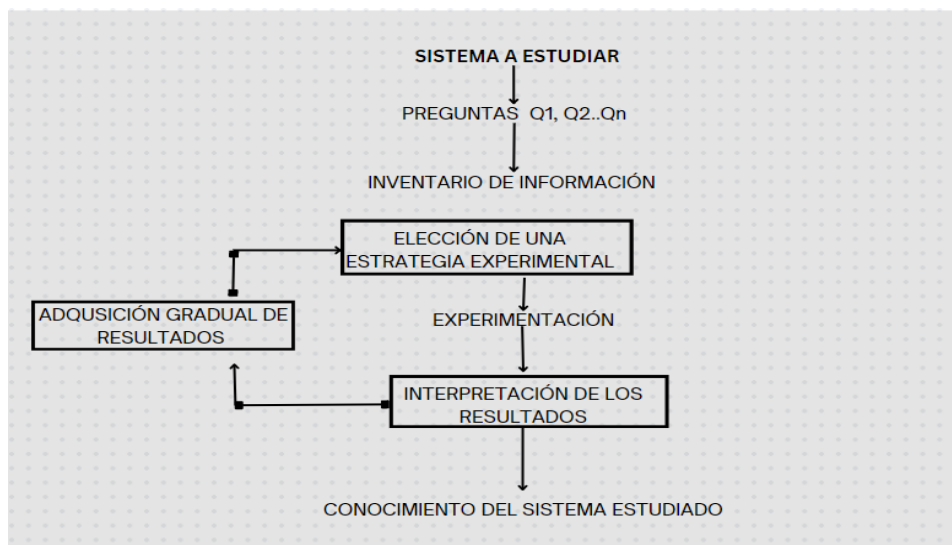
Evitar la realización de experimentos innecesarios.

- Garantizar que los resultados sean lo más precisos posible.

- Permitir que los experimentos avancen sin contratiempos.
- proporcionar un modelo y una optimización de los fenómenos estudiados.
- La estrategia ideal existe y es eficaz porque tiene en cuenta simultáneamente tres aspectos esenciales de la adquisición de conocimientos.
- Simultáneamente tres aspectos esenciales de la adquisición de conocimientos.
- la adquisición progresiva de resultados.

## Figura 6

### *Diseño factorial*



Nota. tomado de (Goupy, 1993)

### **Interpretación de los resultados**

Selección de la mejor estrategia experimental. Interpretación de los resultados la elección inicial de los experimentos debe facilitar la interpretación de

los resultados. Los resultados deben ser fácilmente interpretables y comprensibles tanto para los especialistas en la materia como para los que no lo son. Los métodos recomendados anteriormente pueden ayudarnos a alcanzar ambos objetivos.

Los microordenadores han hecho mucho más accesible lo que antes era un largo y tedioso proceso de cálculo de resultados. No solo los cálculos se hacen con rapidez y precisión, sino que además, la representación gráfica de los resultados es espectacular (Goupy, 1993).

### **Diseño factorial**

El término “experimento factorial” o “arreglo factorial” se refiere a la composición de tratamientos o combinaciones de tratamientos que se comparan. Este concepto no influye en lo que se conoce como diseño de tratamientos, ya que se enfoca a la selección de los factores a investigar, el nivel de factores a probar y sus combinaciones (Severo, 2011).

De esta manera, hay que dejar claro que el diseño de tratamientos es independiente del diseño experimental, que es la forma en que se asignan aleatoriamente los tratamientos a las diferentes unidades experimentales y la forma en que se controla su variación natural. Así, los diseños experimentales pueden ser completamente al azar, bloques completamente al azar, cuadrados latinos, etc., y cada uno de estos diseños puede tener un arreglo de factorial.

En muchos experimentos, el éxito o el fracaso del experimento depende más de la elección de los tratamientos comparados que de la elección del diseño. Pero la elección de ambos (diseño y procesamiento) es importante; por lo que ninguno debe ignorarse en el diseño experimental. En un experimento factorial, se analizan simultáneamente los efectos de factores diferentes. La necesidad de estudiar múltiples factores de manera conjunta se debe principalmente a dos razones:

- a. Identificar un modelo que represente el comportamiento general del fenómeno bajo investigación, aplicable únicamente dentro del rango de variaciones de los niveles de los factores.
- b. Optimizar la respuesta o variable independiente, lo que implica encontrar la combinación de niveles de los factores que maximice o minimice la respuesta según el objetivo del estudio.

En el análisis factorial, los tratamientos se componen de todas las combinaciones posibles que se forman a partir de los diferentes niveles de los factores. La característica clave que justifica el estudio conjunto de estos factores, es la posibilidad de que el efecto de un factor varíe en presencia de los niveles de otro. Lo que implica que los factores interactúen entre sí, dando lugar al concepto de interacción entre factores (Severo, 2011).

Cuando un factor se estudia de forma aislada, los resultados pueden diferir de los estudiados en conjunto y puede resultar más difícil describir el comportamiento general o encontrar el comportamiento óptimo (Severo, 2011).

### **Diseño factorial $2^k$**

Se introduce la familia de diseños factoriales completos  $2^k$  (donde  $k$  representa el número de factores con dos niveles de prueba cada uno), que es una de las más influyentes en la industria y en la investigación, gracias a su eficiencia y versatilidad. Los diseños factoriales completos  $2^k$  son especialmente útiles cuando se estudian entre dos y cinco factores ( $2 \leq k \leq 5$ ), rango en el cual su tamaño varía entre cuatro y 32 tratamientos; en muchas situaciones experimentales esta cantidad es manejable. Si el número de factores es superior a cinco, se recomienda emplear un diseño factorial fraccionado  $2^{k-p}$ . En general, los diseños factoriales a dos niveles, tanto completos como fraccionados, son los más influyentes y efectivos en diversas aplicaciones experimentales (Gutiérrez Pullido & De La Vera Salazar, 2008)

Es un diseño muy útil en la primera fase del trabajo experimental, donde en el proceso hay muchos factores por analizar.

Este diseño implica examinar un número mínimo de factores, para que se pueda obtener la máxima cantidad de información.

Estos diseños son muy útiles en estudios exploratorios (Screening), ya que facilitan el ajuste adecuado de una relación, ya sea lineal o cuadrática, entre la respuesta como variable dependiente y las variables independientes.

Estos diseños también son útiles en las etapas iniciales de un programa experimental secuencial, ya que permiten identificar la respuesta óptima del sistema estudiado (Severo, 2004).

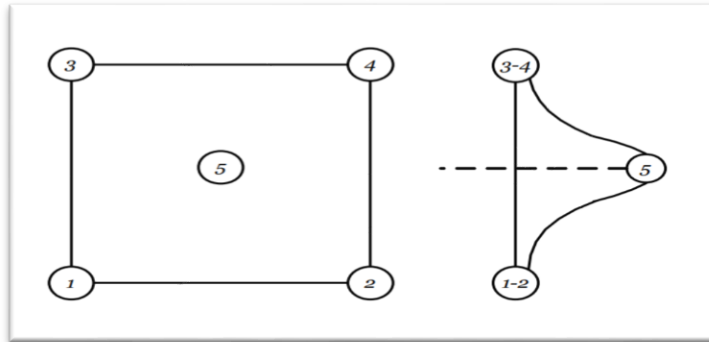
### **Diseño $2^k$ con pruebas centrales**

En un estudio factorial simple  $2^k$ , solo se analizan las combinaciones en el plano cartesiano, sin considerar la influencia de los factores en la suposición de linealidad. Por ello, se añaden pruebas centrales al diseño para evaluar el error aleatorio de la muestra como la posible curvatura de la función matemática (Severo, 2011).

Como se muestra en la figura 7, el plano factorial entre los puntos 1-2 y 3-4 está atravesado por una línea de curvatura tipo Gauss, lo que indica una desviación de la linealidad esperada en el diseño factorial.

**Figura 7**

*Diseño factorial  $2^k$  con  $P$ +pruebasCentrales*



Nota.- tomado de (Severo, 2011)

El punto central (punto 5), que se utiliza para evaluar el error aleatorio, también permite analizar la linealidad del modelo matemático. Por ejemplo, si en el punto 5 de intersección no se observa curvatura, se puede considerar que el modelo es lineal. Sin embargo, si el análisis sugiere la existencia de curvatura, se debe descartar el análisis lineal y proceder con un tratamiento cuadrático, incrementando pruebas experimentales en el diseño inicial (rotacional) (Severo, 2011).

Hay un método para replicar ciertos puntos en un diseño factorial  $2^k$  que ayuda a proteger contra la curvatura y permitir obtener estimaciones de errores independientes. Este método implica agregar pruebas centrales al diseño  $2^k$ , realizando réplicas en el eje central. Es importante señalar, que las corridas de réplicas en el centro del diseño no deben influir en las estimaciones usuales de los

efectos en un diseño  $2^k$ , donde hay una observación en cada uno de los puntos factoriales (Severo, 2011).

Sea  $Y_F$  el promedio de las cuatro corridas en los puntos factoriales y  $Y_C$  el promedio de las corridas en el punto central.

Si la diferencia  $|\bar{Y}_F - \bar{Y}_C|$  es pequeña, esto indica que los puntos centrales están alineados en el plano y no hay curvatura. Por otro lado, si  $|\bar{Y}_F - \bar{Y}_C|$  es grande, se evidencia la existencia curvatura. Una suma de cuadrados para la curvatura, con un grado de libertad (GL), se expresa como:

$$SC_{curvatura} = \frac{n_F n_C (\bar{Y}_F - \bar{Y}_C)^2}{n_F - n_C} \quad [17]$$

Donde  $n_F$  y  $n_C$  representan el número de puntos factorial y centrales, respectivamente. Esta cantidad se puede verificar utilizando el cuadrado medio del error para evaluar la curvatura.

$$Y = A_0 + \sum A_i X_i + \sum \sum A_{ij} X_i X_j + \sum A_{jj} X_j^2 \quad [18]$$

Donde:

$A_{jj}$  son efectos cuadráticos.

Sí los puntos factoriales del diseño no son replicados, es pueden utilizar los puntos centrales  $n_C$  para generar una estimación del error, empleado  $n_C - 1$  grados de libertad (Severo, 2011).

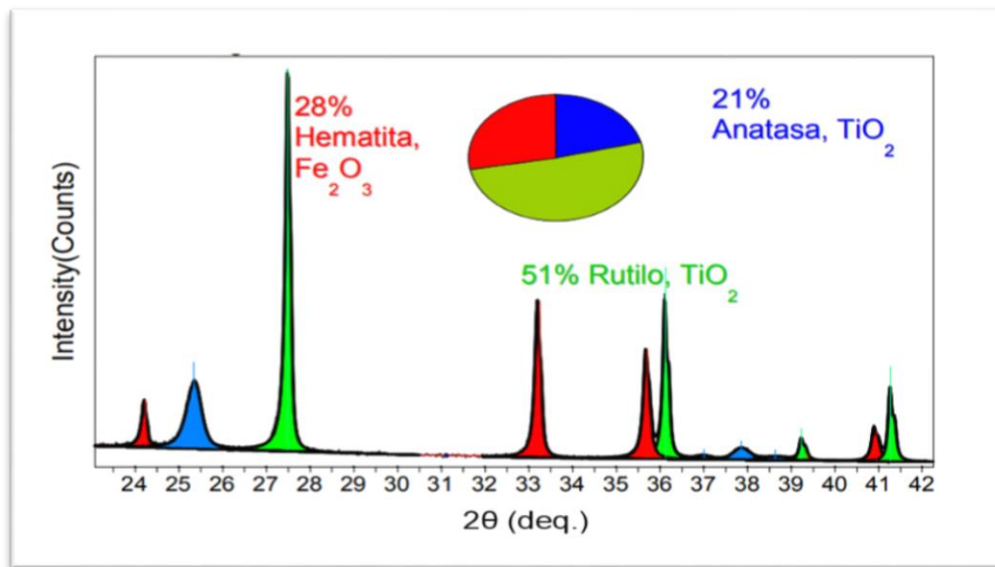
### **2.2.9 Difracción de rayos X**

La difracción de rayos X por el método de polvo (DRXP) es una técnica que proporciona información detallada acerca de la estructura cristalina de cualquier sólido cristalino, incluidos los minerales. Por esta razón, es una de las herramientas más importantes para identificar minerales en suelos y rocas. Cuando los rayos X interactúan con los átomos de un mineral, se genera un diagrama de difracción característico de ese mineral. Esta particularidad convierte al diagrama de difracción en una especie de huella dactilar de la fase cristalina que lo produce, permitiendo su identificación. Al analizar una muestra compuesta por varios minerales, las posiciones de los picos correspondientes a cada uno no cambian, pero su intensidad, que se mide como la altura o el área del pico, sí lo hace (Benavente, y otros, 2012).

La cuantificación de fases cristalinas y amorfas, que se realiza antes de la identificación, puede llevarse a cabo utilizando diversos métodos, como el Refinamiento Rietveld. Este método consiste en ajustar teóricamente el patrón de difracción utilizando un modelo que incluye tanto factores estructurales como experimentales. Además de proporcionar la concentración de los minerales presentes en la muestra, el Refinamiento Rietveld también brinda información sobre las características estructurales de cada fase mineral, como los parámetros de la celda unitaria, el tamaño de los granos, las posiciones atómicas, entre otros (Gabriel Tuesta & Huaypar Vásquez).

### Figura 8

Difractograma de rayos X que muestra tres fases minerales con sus respectivas cuantificaciones



Nota. tomado de (Gabriel Tuesta & Huaypar Vásquez)

El estudio de las materias primas implica investigar los cambios de fase mediante el seguimiento de las transformaciones estructurales de las fases cristalinas presentes en una muestra. Estos cambios se pueden observar bajo diferentes condiciones de temperatura, presión, y molienda, entre otros factores (Gabriel Tuesta & Huaypar Vásquez)

## **2.3 Definición de términos**

### **Ácido sulfúrico**

El ácido sulfúrico, es el agente de lixiviación más utilizado. Se produce mediante la oxidación de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  catalizada por  $\text{V}_2\text{O}_5$  a  $400^\circ\text{C}$  y luego el  $\text{SO}_3$  se absorbe en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 96% para elevar su concentración a 98%. El  $\text{SO}_2$  se genera mediante la oxidación del azufre, pirita, o como un subproducto de la oxidación de sulfuros de metales no ferrosos, como ocurre en las fundiciones de cobre (Uceda Herrera, 2016).

### **Cloruro de sodio.**

El agua y el cloruro de sodio, que son los principales componentes del agua de mar, interactúan mediante la transferencia de un electrón desde un átomo neutro de sodio (Na) hacia un átomo neutro de cloro (Cl), lo que resulta en la formación de un ion de sodio positivo ( $\text{Na}^+$ ) y un ion de cloro negativo ( $\text{Cl}^-$ ). La disposición de estos iones da lugar a la formación de cloruro de sodio sólido ( $\text{NaCl}$ ), el cual se presenta en forma de cristales (Brown, LeMay, & Bursten, 2009).

### **Nitrato de sodio.**

El nitrato de sodio es un fertilizante que también se emplea en múltiples aplicaciones industriales, tales como la fabricación de explosivos y la alimentación animal. El salitre se utiliza en el tratamiento de aguas residuales y en la conservación de alimentos debido a sus propiedades oxidantes (Severo, 2010).

### **Clorito de sodio.**

El clorito de sodio ( $\text{NaClO}_2$ ) es un compuesto químico que se emplea principalmente en la industria papelera. Los oxianiones que se forman al quitar  $\text{H}^+$  de los oxiácidos son, que generalmente es más estable que el oxiácido. Debido al fuerte poder oxidante de los iones  $\text{ClO}_2$ , el clorito se utiliza como agente blanqueador y desinfectante (Brown, LeMay, & Bursten, 2009).

### **Agua de mar**

Los dos elementos principales que contiene el agua de mar son el cloro (1,9%) y el sodio (1%), que juntos forman cloruro de sodio (sal de mesa). Además del flujo de agua en el océano, existen otros fenómenos que provocan aumento de la salinidad, deshielo, evaporación y erupciones volcánicas (Cisternas & Moreno, 2014).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Tipo y diseño de investigación**

Este trabajo de tesis se enfoca en la evaluación de lixiviación de minerales cupríferas y auríferas en la minera Señor de Locumba, que es lixiviado usando ácido sulfúrico concentrado y sales oxidantes en agua de mar. Para este fin, se realizó una serie de pruebas utilizando un diseño factorial ( $2^k$ ) más 3 repeticiones en el centro.

#### **3.2 población y muestra**

##### **3.2.1. Población**

El mineral fue extraído de distintas vetas de la minera Señor de Locumba en donde de cada uno se sacó un aproximado de media tonelada. Del tote extraído se tomó una muestra de aproximadamente 50 kilogramos para realizar las pruebas.

##### **3.2.2 Muestra**

De los 50 kilogramos de muestra, se destinaron 500 gramos para determinar la ley de cabeza de cobre soluble, cobre total y oro. Se emplearon 500 gramos en cada prueba de lixiviación por agitación, reservando el restante para los análisis físico-químicos del mineral.

#### **3.3 Variables**

##### **3.3.1 Identificación de variables**

###### **a) Variables independientes**

X1: Concentración de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ): se mide en g/L en niveles 70, 120 y 170.

X2: Concentración de cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ): se mide en unidades de g/L en niveles de experimentación: 5, (7,5) y 10.

X3: Concentración de nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ): se mide en unidades de g/L en niveles de 1, (1,2) y 2.

X4: Concentración de clorito de sodio ( $\text{NaClO}_2$ ): se mide en unidades de g/L en niveles de experimentación: 1, (1,2) y 2.

**b) Variable dependiente**

Y1: Recuperación de cobre (%).

Y2: Recuperación de oro (%).

**c) Factores que se mantienen constantes**

- Porcentaje de sólido.
- Granulometría.
- Tiempo de agitación.
- Agua de mar.
- Velocidad de agitación (rpm).
- Temperatura.

**3.3.2 Operacionalización de las variables**

**Tabla 5***Operacionalización de las variables*

<b>Variab</b>		<b>Características de las Variables</b>		
<b>Variab</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Escala de Medición</b>	<b>Tipo de variable</b>	
X1: Ácido sulfúrico	Concentración	g/L	Cuantitativa continua	
X2: Cloruro de sodio	Concentración	g/L	Cuantitativa continua	
X3: Nitrato de sodio	Concentración	g/L	Cuantitativa continua	
X4: Clorito de sodio	Concentración	g/L	Cuantitativa continua	
<b>Variab</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Escala de medición</b>	<b>Tipo de variable</b>	
Y1: Recuperación de cobre	-	%	Cuantitativa continua	
Y2: Recuperación de oro	-	%	Cuantitativa continua	

### 3.4 Técnicas e instrumentos para recolección de datos

Se tomó muestra del lote extraído de diferentes vetas de la mina Señor de Locumba un aproximado de 50 kilos, el cual se homogenizó por roleos y cuarteos sucesivos para obtener:

1. 0,5 kilogramos de mineral para análisis mineralógico.
2. 0,5 kilogramos para análisis químico de cabeza por cobre total, cobre soluble y oro.
3. 2 kilos para análisis granulométrico por fracciones.

4. 3 kilos para caracterización física, que incluye determinar la humedad de la muestra, densidad relativa del mineral.
5. 1 kilo para la prueba de consumo de ácido.
6. 10 kilos para las pruebas por agitación.
7. El resto queda como testigo.

### **3.5 Procesamiento y análisis de datos**

#### **3.5.1 Materiales, equipos y reactivos**

##### **Materiales**

- Mineral
- Jarra de 2L
- Brocha
- Balanza
- Set de Malla
- Pala
- Pipeta
- Propipeta
- Vaso precipitado
- Matraz aforado
- Embudo
- Bureta
- Botellas de plástico
- Balde
- Espátula
- Lona de jebe
- Mesa de trabajo

##### **Equipos**

- Agitador mecánico eléctrico
- pHmetro digital
- Molino de bolas
- Ro – Tap
- Balanza analítica
- Balanza Marcy
- Estufa.

#### **Reactivos requeridos para pruebas**

- Ácido sulfúrico
- Cloruro de sodio
- Nitrato de sodio
- Clorito de sodio
- Naranja de metilo
- Hidróxido de sodio
- Nitrato de amonio

#### **3.5.2 Evaluación del mineral**

De un aproximado de 50 kilos de mineral de la mina Señor de Locumba es tomada para las pruebas metalúrgicas. El mineral contiene cuarzo, dolomita, calcita, siderita, tenorita y otras fases.

#### **Chancado**

El mineral se chancó hasta una granulometría mostrada en la tabla 6.

**Tabla 6***Análisis granulométrico del mineral chancado*

mallas ASTM-	Abertura	Masa	%Retenido	%Retenido	% Pasante
E11	( $\mu$ )	retenida (g)	%Retenido	Acumulado	Acumulado
4	4750	267	26,7	26,7	73,3
10	2000	303	30,3	57	43
20	850	134	13,4	70,4	29,6
30	600	61	6,1	76,5	23,5
50	300	63	6,3	82,8	17,2
100	150	68	6,8	89,6	10,4
200	75	83	8,3	97,9	2,1
(-200)	*	21	2,1	100	*

**Molienda**

1. Se agregó de mineral chancado 15 kilos.
2. Enseguida se agregó bolas de acero de diferentes diámetros según el collar de bolas.
3. Se dejó moler el mineral por un tiempo de 45 minutos.
4. Descargar las bolas de acero limpiando con una brocha.
5. Descargar el mineral.
6. El análisis granulométrico molido se muestra en la tabla 9.

## **Figura 9**

### *Molienda*



### **Homogenizado y cuarteo**

1. Toda la muestra obtenida de molienda es homogenizada totalmente.
2. Se homogenizo por roleo 20 veces por lado.
3. Seguidamente se procedió a cuartear la muestra.
4. Aplicando método de Damero hasta obtener medio kilo.
5. Esto es enviado a un laboratorio externo para su análisis de ley de cabeza por cobre soluble, cobre total y oro.

**Figura 10**

*Muestreo por método dedDamero*



**Tabla 7**

*Leyes de cabeza de mineral*

Composición	Au	Au	Cu soluble	Cu total
	Oz/Tc	g/TM	%	%
Contenido	0,091	3,119	2,901	3,072

Nota. Laboratorio Minares South S.R.L.

### **Humedad natural**

La humedad natural corresponde al contenido de agua que tienen las partículas de mineral sin procesar en estado natural.

El procedimiento para su determinación

1. Tomar aproximadamente 1,2 kilos de mineral molido

2. Pesar la muestra sobre una bandeja y luego secar en la estufa a 75°C por 24 horas
3. Enfriar y pesar el mineral seco
4. Anotar y calcular.

**Figura 11**

*Secado de la muestra*



**Tabla 8**

*Determinación de porcentaje de humedad*

Peso de la bandeja (g)	283
Peso del mineral húmedo (g)	1513
Peso del mineral seco (g)	1452
Peso de la bandeja más el mineral seco (g)	1735
% Humedad	4,03

## **Análisis granulométrico**

Consiste en llevar a cabo un análisis de la cantidad de cada fracción de mineral obtenida tras el proceso de tamizado del material representativo.

### **Procedimiento**

1. Secar las muestras en una estufa por 24 horas a 70°C y dejar enfriar.
2. Pesar 1,2 kilogramos de mineral seco.
3. Realizar el análisis granulométrico, respetando el orden de set de mallas:  
4M, 10M, 20M, 30M, 50M, 100M y 200M.
4. Dejar en el ro-tap por un tiempo de 20 minutos.
5. Realiza el análisis granulométrico de la muestra.
6. Registrar los pesos en cada malla correspondiente y anotar los resultados.

### **Figura 12**

*Agitación en RO-TAP para análisis granulométrico*



**Tabla 9***Análisis granulométrico del mineral fino*

Malla ASTM-E11	Malla ( $\mu$ )	Masa Retenido (g)	%Retenido	%Retenido Acumulado	% Pasante Acumulando
4	4750	0	0,00	0,00	100
10	2000	0	0,00	0,00	100
20	850	1	0,08	0,08	99,92
30	600	2	0,17	0,25	99,75
50	300	5	0,42	0,67	99,33
100	150	96	8,00	8,67	91,33
200	75	578	48,17	56,83	43,17
-200	*	518	43,17	100,00	*

**Densidad relativa**

1. Medir 35 ml. de agua en la probeta.
2. Pesa 8 gramos de mineral molido.
3. Añade el mineral inclinando la probeta que contiene el agua.
4. Registra el nuevo volumen desplazado, tomando una nueva lectura.
5. Realizar los cálculos.

**Tabla 10***Determinación de la densidad relativa (peso específico)*

Masa del mineral (g)	8
Volumen inicial (mL)	35
Volumen final (mL)	38
Densidad relativa ( $t/m^3$ )	2,66

### **Figura 13**

*Determinación de densidad relativa del mineral*



### **Consumo de ácido**

Esto consiste en la determinación del consumo máximo de ácido en minerales de la minera Señor de Locumba. Primeramente, se inició a una concentración de 145 g/L de ácido sulfúrico.

#### **Procedimiento**

1. Agitar por 8 horas.
2. Medir 5 ml. de la muestra en un vaso de precipitado
3. Añadir 30 ml. de agua destilada
4. Añadir 2 gotas de indicador (naranja de metilo). La solución se tornará un color rosado fucsia, tal como se aprecia en la figura 14.

5. Titular con hidróxido de sodio (NaOH) a una concentración de 1N, hasta que la solución se torne al primer cambio de color naranja y el color rosado desaparezca por completo.
6. Leer el gasto y calcular el consumo.

**Tabla 11**

*Consumo de ácido*

Concentración inicial de ácido sulfúrico (g/L)	145,04
Concentración final de ácido sulfúrico (g/L)	83,3
Consumo de ácido kg/TM	61

**Figura 14**

*Titulación con hidróxido de sodio*



### **Determinación pH natural del mineral**

1. Primeramente, se pesó 500 gramos de mineral en 1000 ml. de agua
2. Se dejó agitando 8 horas
3. Se tomó la lectura de pH del mineral dando como resultado 8,4 esto nos indica que está en un medio alcalino o básico.

### **Densidad de la pulpa**

1. Se usó la balanza Marcy
2. Para esto primero se calibra con agua usando un desarmador plano.
3. Llevar a la densidad del agua que es 1000 g/L.
4. Una vez calibrado se puede dar uso con la pulpa agitada.
5. Finalmente tomar lectura

### **Figura 15**

*Determinación de densidad de pulpa*



### **3.5.3 Pruebas de lixiviación por agitación**

#### **Procedimiento**

1. Agitación en jarras de 2,5 L
2. Se pesó 500 gramos de mineral fino, para esto antes se tiene que tarar el peso de la jarra.
3. Agregar un litro de agua (33,33 porcentaje de sólido)
4. Rotular cada jarra.
5. Pesar las sales oxidantes según el diseño experimental.
6. Llevar el control de temperatura, pH y mV.
7. Dejar agitando por 5 horas
8. Con un papel filtro filtrar las muestras en vasos de precipitados correctamente rotuladas.
9. Posteriormente transvasar las muestras a botellas de muestreo previamente rotulados.
10. Sacar un volumen alícuota y mandar a analizar por cobre y oro.
11. Se mandó a analizar la cola de la prueba 7, 12 y 19.

**Figura 16**

*Proceso de agitación*



**Figura 17**

*Filtración de pulpa*



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Resultados

Los resultados obtenidos de las pruebas en agitación según el diseño experimental utilizando un paquete estadístico, son analizados en este capítulo, con minerales de la minera Señor de Locumba Ite Tacna.

La tabla 12 los principales parámetros considerados para las pruebas por agitación.

**Tabla 12**

*Condiciones*

Descripción	Valor	Unidad
Cantidad de agua de mar	1	L
Peso mineral	0,5	kg
Humedad del mineral	4,03	%
Sólidos	33,33	%
Velocidad de agitación	850	rpm
Granulometría (P80)	120	μ
Tiempo	5	h
pH	0,5	N/A
ORP, Rédox	1350	mV
Temperatura	25	°C
Densidad relativa	2,66	g/L
pH del mineral	8,4	N/A
Densidad de la pulpa	1265	g/L

Evaluar la lixiviación con cloruro de sodio, nitrato de sodio y clorito de sodio en medio ácido con minerales de la mina Señor de Locumba, proveniente de Ite de la región Tacna.

**Tabla 13**

*Niveles de experimentación*

VARIABLES	UNIDAD	FACTOR	NIVEL BAJO	PUNTO CENTRAL	NIVEL ALTO
Concentración de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/L	A	70	120	170
Concentración de NaCl	g/L	B	5	7,5	10
Concentración de NaNO <sub>3</sub>	g/L	C	1	1,5	2
Concentración de NaClO <sub>2</sub>	g/L	D	1	1,5	2

El diseño  $2^k$  incluirá puntos centrados. Los tratamientos en la primera fase se llevarán a cabo mediante un diseño factorial  $2^k$ , que contará con 3 puntos centrados. Para este diseño, se tomarán en cuenta 4 variables.

- Diseño  $2^4 = 16$ , entonces se obteniéndose 16 pruebas.
- Puntos centrados 3 (para verificar la curvatura).

Se realizó  $16+3 = 19$  pruebas.

**Tabla 14***Resultados de recuperación de cobre*

N° de pruebas	Ácido sulfúrico (g/L) A	Cloruro de sodio (g/L) B	Nitrato de sodio (g/L) C	Clorito de sodio (g/L) D	Porcentaje de recuperación (%Cu)
14	170	5	2	2	91,27
1	70	5	1	1	85,93
8	170	10	2	1	91,26
13	70	5	2	2	86,54
10	170	5	1	2	91,26
4	170	10	1	1	88,89
17	120	7,5	1,5	1,5	90,63
5	70	5	2	1	86,08
11	70	10	1	2	86,53
9	70	5	1	2	86,19
15	70	10	2	2	87,94
18	120	7,5	1,5	1,5	89,77
16	170	10	2	2	91,04
3	70	10	1	1	86,24
2	170	5	1	1	91,19
7	70	10	2	1	84,91
12	170	10	1	2	92,64
6	170	5	2	1	90,33
19	120	7,5	1,5	1,5	90,36

**Tabla 15***Resultados de recuperación de oro*

N° de pruebas	Ácido sulfúrico (g/L) A	Cloruro de sodio (g/L) B	Nitrato de sodio (g/L) C	Clorito de sodio (g/L) D	Porcentaje de recuperación (%Au)
14	170	5	2	2	45,64
1	70	5	1	1	43,56
8	170	10	2	1	27,06
13	70	5	2	2	52,65
10	170	5	1	2	51,65
4	170	10	1	1	37,42
17	120	7,5	1,5	1,5	34,01
5	70	5	2	1	54,52
11	70	10	1	2	54,86
9	70	5	1	2	4,21
15	70	10	2	2	11,43
18	120	7,5	1,5	1,5	37,48
16	170	10	2	2	24,52
3	70	10	1	1	28,66
2	170	5	1	1	29,80
7	70	10	2	1	22,65
12	170	10	1	2	54,15
6	170	5	2	1	34,28

Nota.- Las pruebas se realizaron de manera aleatoria, para asegurar la disminución de error en la experimentación.

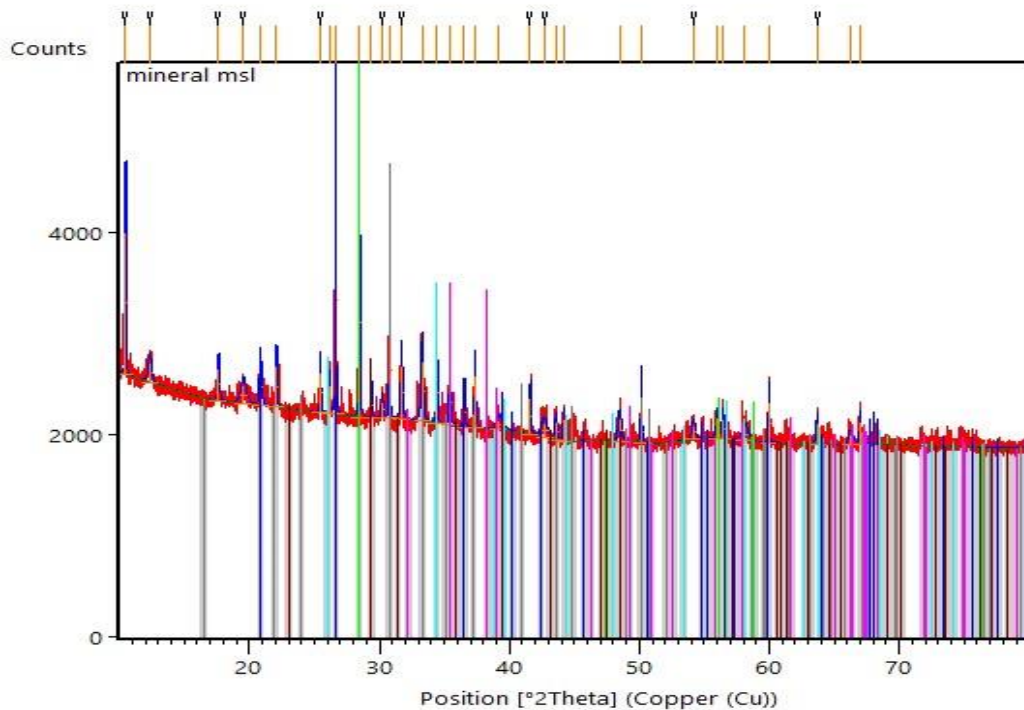
## Resultados del difractograma

Mediante el análisis de difracción de rayos X (figura 18), se ha podido identificar la presencia de principalmente de cuarzo, tenorita, dolomita, calcita, siderita, cordierita.

El análisis que se realizó es de manera general para todos los compuestos de mineral, los resultados que se muestran son de manera cualitativa y semicuantitativa.

### Figura 18

*Resultados de difractograma de la muestra*



**Tabla 16***Análisis mineralógico por difracción de rayos X en la muestra*

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Tenorita	CuO	7,38
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	17,22
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	3,28
Siderita	(Fe,Ca)CO <sub>3</sub>	6,56
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	23,79
silicio	Si	23,79
Otras fases		17,98

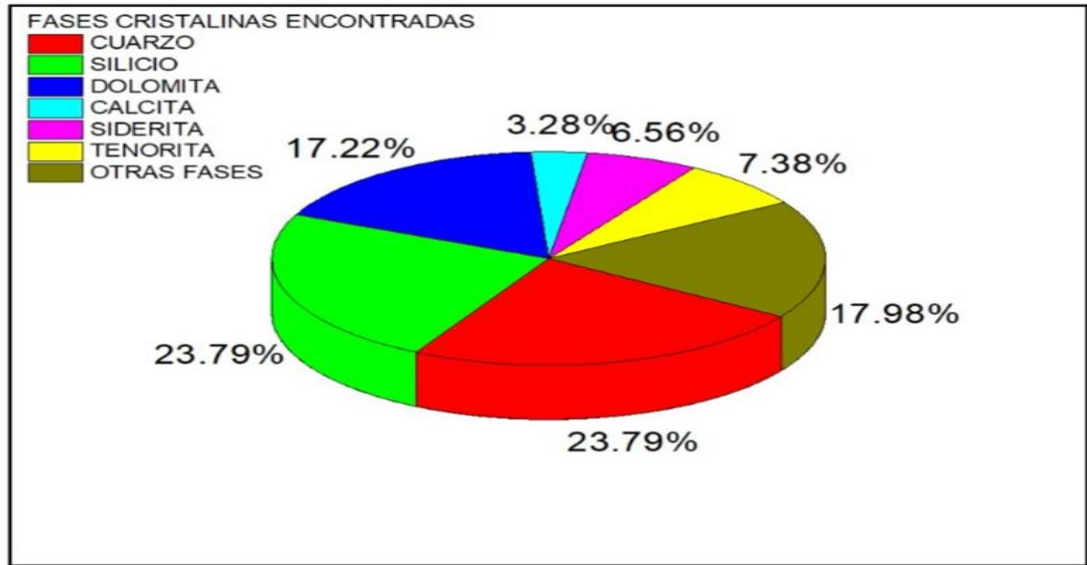
Algunos minerales detectados en otras fases que representan el 17,98% son:

**Tabla 17***Otros minerales detectados en difracción de rayos X*

Nombre del mineral	Fórmula general
Cordierita	(Mg,Fe) <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>11</sub>
Epidote	Ca <sub>2</sub> Fe <sup>3+</sup> Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )(SiO <sub>4</sub> )O(OH)
Malaquita	Cu <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub>
Crisocola	(Cu, Al) <sub>4</sub> H <sub>4</sub> (OH) <sub>8</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub>
Otros	

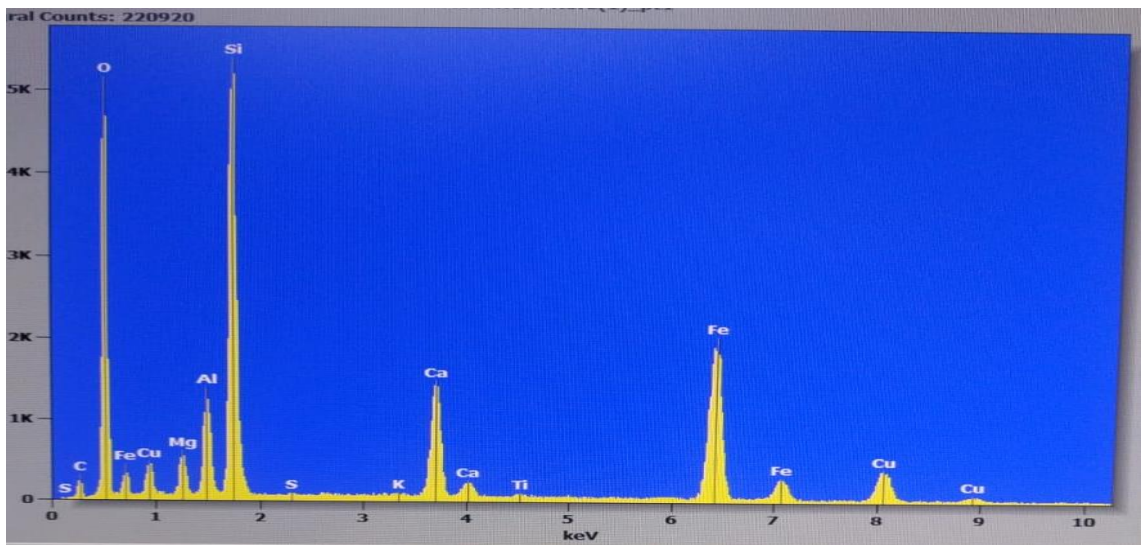
**Figura 19**

*Fases cristalinas encontradas*



**Figura 20**

*Elementos por difracción de rayos X*



**Tabla 18***Resultado de elementos detectados por difracción de rayos X*

Nombre	Fórmula química	% Peso
Carbono	C	4,34
oxígeno	O	49,07
magnesio	Mg	2,50
Aluminio	Al	4,62
Silicio	Si	16,46
Azufre	S	0,07
Potasio	K	0,08
Calcio	Ca	4,36
Titanio	Ti	0,16
Fierro	Fe	13,66
Cobre	Cu	4,68

De los resultados obtenidos del análisis mineralógico por difracción de rayos X, tal como se aprecia en la tabla 18 se tiene en mayor porcentaje de: oxígeno, silicio, fierro y cobre.

## 4.2 Discusión

### Resultados estadísticos para recuperación de cobre

#### Análisis de varianza para recuperación de Cu

En la siguiente tabla 19, se muestran los resultados de análisis de varianza de las interacciones entre los reactivos obtenido del paquete estadístico utilizado, a partir del cual se evalúa la significancia de cada interacción.

En el cuadro de análisis de varianza para recuperación de cobre, el valor-P de la concentración de ácido sulfúrico tiende a cero, lo cual nos afirma la interpretación desarrollada en la estimación de efectos. El coeficiente de correlación con 87,7078 por ciento nos indica que el modelo es bueno para el proceso.

**Tabla 19**

*Análisis de varianza para recuperación de Cu*

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Concentración de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	88,0313	1	88,0313	455,10	0,0022
B: Concentración de NaCl	0,0280563	1	0,0280563	0,15	0,7400
C: Concentración de NaNO <sub>3</sub>	0,0150062	1	0,0150062	0,08	0,8068
D: Concentración de NaClO <sub>2</sub>	4,61176	1	4,61176	23,84	0,0395
AB	0,0742562	1	0,0742562	0,38	0,5987
AC	0,0280563	1	0,0280563	0,15	0,7400
AD	0,0162563	1	0,0162563	0,08	0,7992
BC	0,0885063	1	0,0885063	0,46	0,5685
BD	1,64481	1	1,64481	8,50	0,1002
CD	0,00180625	1	0,00180625	0,01	0,9318
Falta de ajuste	12,8628	6	2,1438	11,08	0,0851
Error puro	0,386867	2	0,193433		
Total (corr.)	107,789	18			

R-cuadrada = 87,7078 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 72,3426 por ciento

Error estándar del est. = 0,439811

Error absoluto medio = 0,685436

Estadístico Durbin-Watson = 1,65729 (P=0,3611)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,169883

### **Modelo matemático para recuperación de cobre**

El modelo matemático depende mucho del R-Cuadrado en donde se obtuvo un resultado de 87,7078 por ciento lo cual significa que es bueno.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\begin{aligned} \text{Recuperación de Cu} = & 84.3345 + 0.0516*A - 0.39185*B - 0.12025*C - 0.93925*D \\ & - 0.000545*A *B - 0.001675*A *C + 0.001275*A *D + 0.0595*B *C + 0.2565*B \\ & *D - 0.0425*C *D \end{aligned}$$

Donde:

A= Concentración de ácido sulfúrico (g/L)

B= Concentración de cloruro de sodio (g/L)

C= Concentración de nitrato de sodio (g/L)

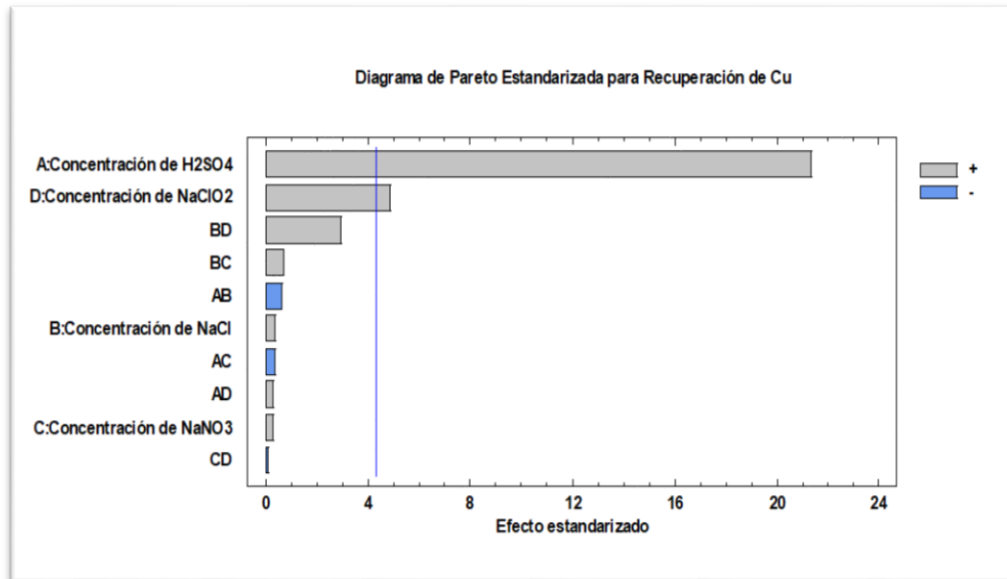
D= Concentración de clorito de sodio (g/L)

### **Diagrama de Pareto estandarizado para recuperación de cobre**

El diagrama de Pareto nos muestra el efecto de los reactantes sobre el porcentaje de recuperación de cobre.

**Figura 21**

*Diagrama de Pareto estandarizado para recuperación de cobre*



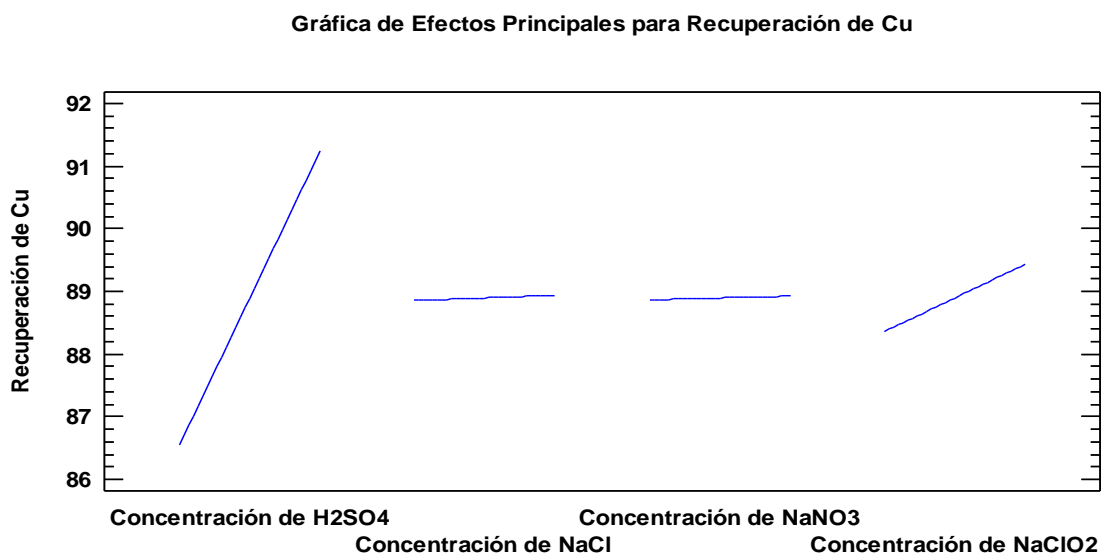
Nota.- El diagrama de Pareto nos indica gráficamente que la concentración de ácido sulfúrico es la más significativa seguido de la concentración de clorito de sodio.

### **Gráfica de efectos principales para recuperación de cobre**

En el gráfico de efectos principales para recuperación de cobre, claramente podemos corroborar que el factor de mayor influencia en el proceso es la concentración de ácido sulfúrico, no influye mucho la concentración de cloruro de sodio y nitrato de sodio como que se mantiene constante y la concentración de clorito de sodio si tiene una significancia relativa por el orden de la pendiente.

**Figura 22**

*Gráfica de efectos principales para recuperación de cobre*

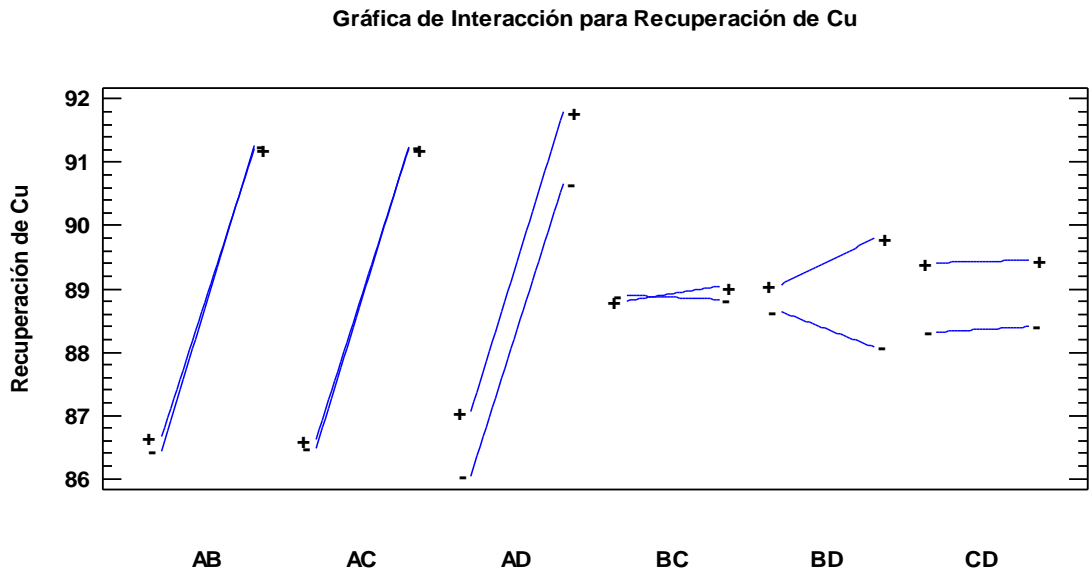


**Gráfica de interacción para recuperación de cobre**

En la gráfica de interacción para recuperación de cobre, se puede visualizar que dentro del rango de estudio (niveles) solamente existe una ligera interacción entre los factores AB, BC y AC.

**Figura 23**

*Gráfica de interacción para recuperación de cobre*

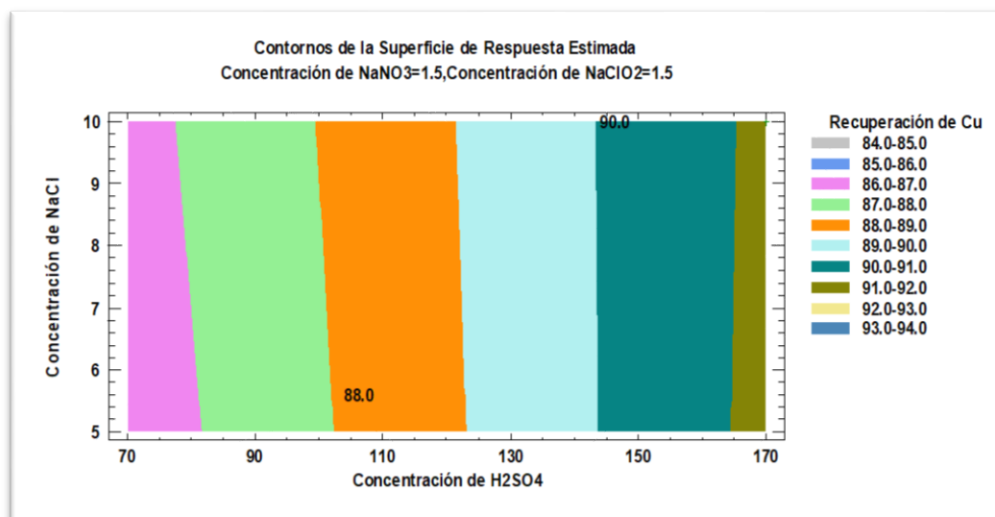


**Gráfica de contornos de superficie de respuesta estimada**

En el gráfico de contornos de superficie de respuesta estimada se puede visualizar la región óptima del proceso

**Figura 24**

*Gráfica de contornos de superficie de respuesta estimada*



**Optimizar respuesta**

Al desarrollar la optimización de las variables mediante el modelo matemático, certificamos que las cuatro variables tienden al máximo.

Meta: maximizar recuperación de Cu

Valor óptimo = 92,1565

**Tabla 20**

*Optimizar respuesta en maximizar recuperación de cobre*

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Concentración de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	70,0	170,0	170,0
Concentración de NaCl	5,0	10,0	10,0
Concentración de NaNO <sub>3</sub>	1,0	2,0	2,0
Concentración de NaClO <sub>2</sub>	1,0	2,0	2,0

## Resultados estadísticos para recuperación de oro

### Análisis de varianza para recuperación Au

En la siguiente tabla 21, se muestran los resultados de análisis de varianza de las interacciones entre los reactivos obtenido del paquete estadístico utilizado, a partir del cual se evalúa la significancia de cada interacción.

En el cuadro de análisis de varianza para recuperación de oro, el valor-P de la interacción BC tiende a cero, lo cual nos afirma la interpretación desarrollada en la estimación de efectos. El coeficiente de correlación con 68,8298 % nos indica que el modelo es regular para el proceso.

**Tabla 21**

#### *Análisis de varianza para recuperación Au*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Conc H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	130,759	1	130,759	21,72	0,1346
B: Conc NaCl	109,202	1	109,202	18,14	0,1468
C: Conc NaNO <sub>3</sub>	19,8025	1	19,8025	3,29	0,3208
D: Conc NaClO <sub>2</sub>	76,2129	1	76,2129	12,66	0,1744
AB	1,7956	1	1,7956	0,30	0,6818
AC	266,016	1	266,016	44,19	0,0951
AD	224,101	1	224,101	37,22	0,1034
BC	1621,27	1	1621,27	269,29	<b>0,0387</b>
BD	34,281	1	34,281	5,69	0,2526
CD	118,048	1	118,048	19,61	0,1414
Falta de ajuste	1172,09	6	195,348	32,45	0,1318
Error puro	6,02045	1	6,02045		
Total (corr.)	3779,6	17			

R-cuadrada = 68,8298 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 24,3009 porciento

Error estándar del est. = 2,45366

Error absoluto medio = 6,33318

Estadístico Durbin-Watson = 1,63623 (P=0,3554)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,144729

### **Modelo matemático**

El modelo matemático depende mucho del R-Cuadrado en donde se obtuvo un resultado de 68,8298 por ciento lo cual significa que es regular.

$$\begin{aligned} \text{Recuperación Au} = & -68.8361 + 0.057175*A + 8.9564*B + 94.042*C - 6.084*D + \\ & 0.00268*A *B - 0.1631*A *C + 0.1497*A *D - 8.053*B *C + 1.171*B *D - \\ & 10.865*C *D \end{aligned}$$

Donde:

A= Concentración de ácido sulfúrico (g/L)

B= Concentración de cloruro de sodio (g/L)

C= Concentración de nitrato de sodio (g/L)

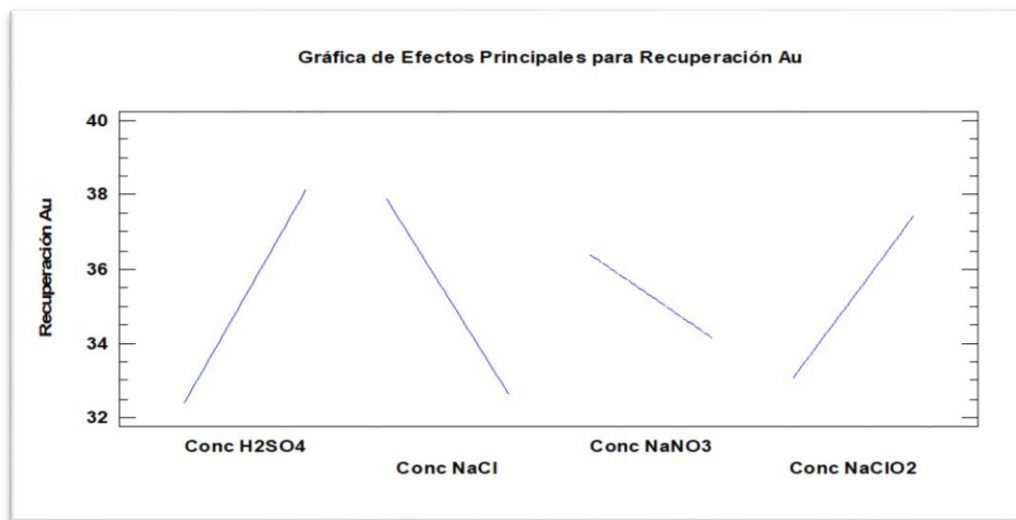
D= concentración de clorito de sodio (g/L)

### **Gráfica de efectos principales para recuperación de oro**

Gráfica de efectos principales para recuperación de oro (Au), para observar y evaluar la presencia de la curvatura en el modelo matemático y la significancia de cada reactivo.

### Figura 25

*Gráfica de efectos Principales para recuperación de oro*



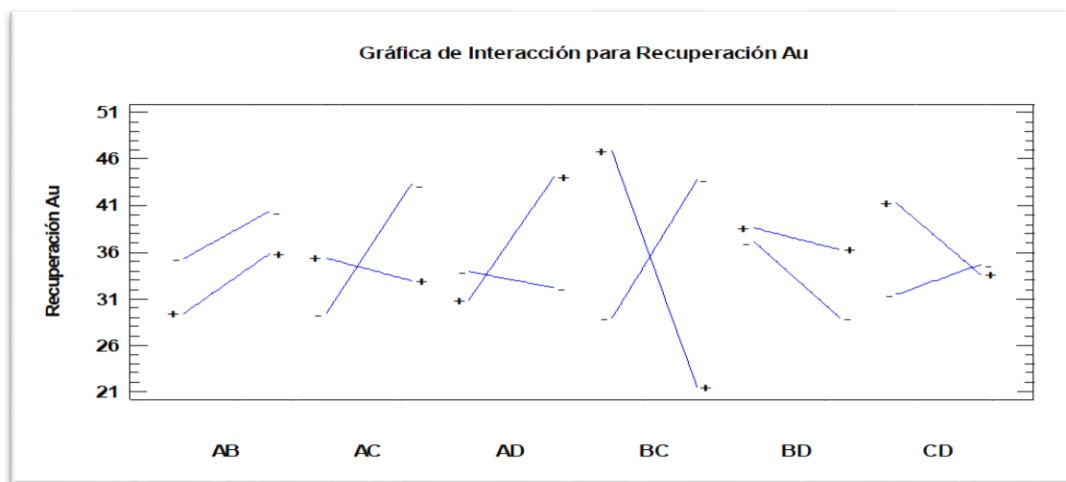
Nota.- En el gráfico de efectos principales para recuperación de oro, claramente podemos corroborar que los factores de mayor influencia en el proceso son la concentración de ácido sulfúrico y la concentración de clorito de sodio.

### Gráfica de interacción para recuperación de oro

En la gráfica de interacción para recuperación de oro se puede visualizar que dentro del rango de estudio (niveles) existe interacción entre los factores AC, AD, BC y CD.

**Figura 26**

*Gráfica de interacción para recuperación de oro*

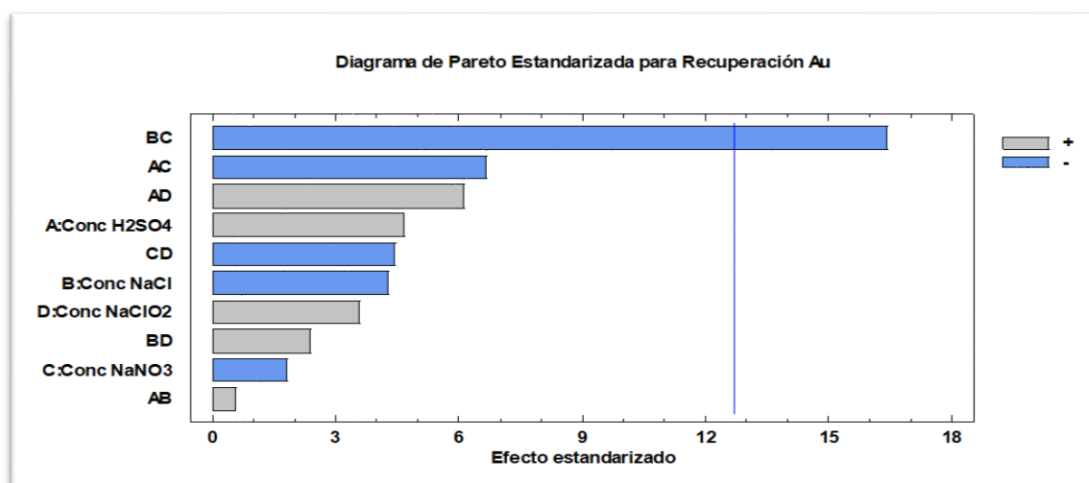


**Diagrama de Pareto estandarizada para recuperación de oro**

El diagrama de Pareto estandarizada para recuperación de oro, muestra el efecto de los reactantes sobre el porcentaje de recuperación de oro.

**Figura 27**

*Diagrama de Pareto estandarizada para recuperación de oro*



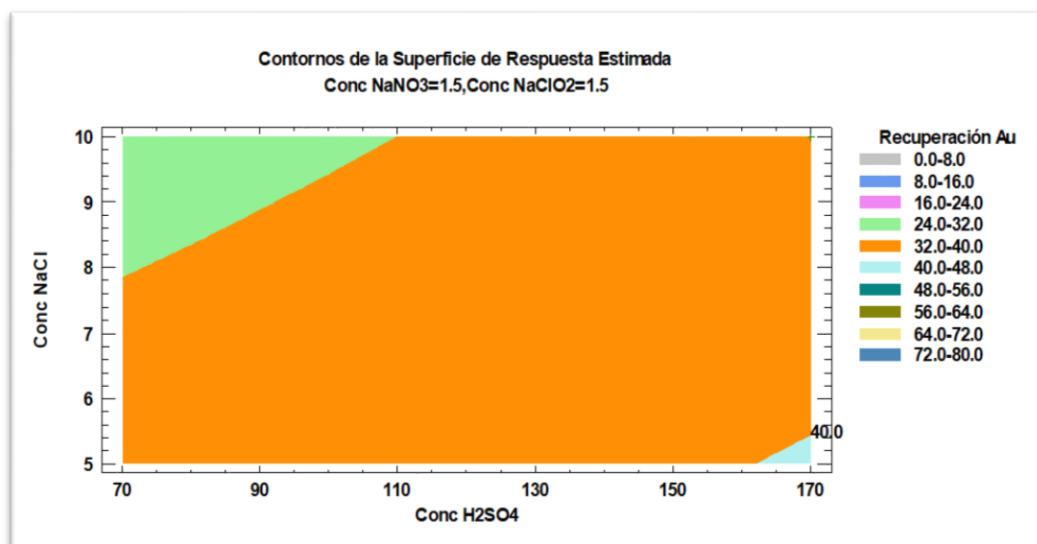
### Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada

En la presente gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada concentración de ácido sulfúrico y cloruro de sodio figura 28, se puede establecer claramente que la máxima recuperación de oro se ubica cuando se mantiene al máximo la concentración de cloruro de sodio y la concentración de ácido sulfúrico.

En gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada, concentración de Nitrato de Sodio y Cloruro de Sodio figura 29, se puede visualizar claramente que la máxima recuperación de oro es usando en su nivel máximo, la concentración de cloruro de sodio y en mínimo la concentración de nitrato de sodio.

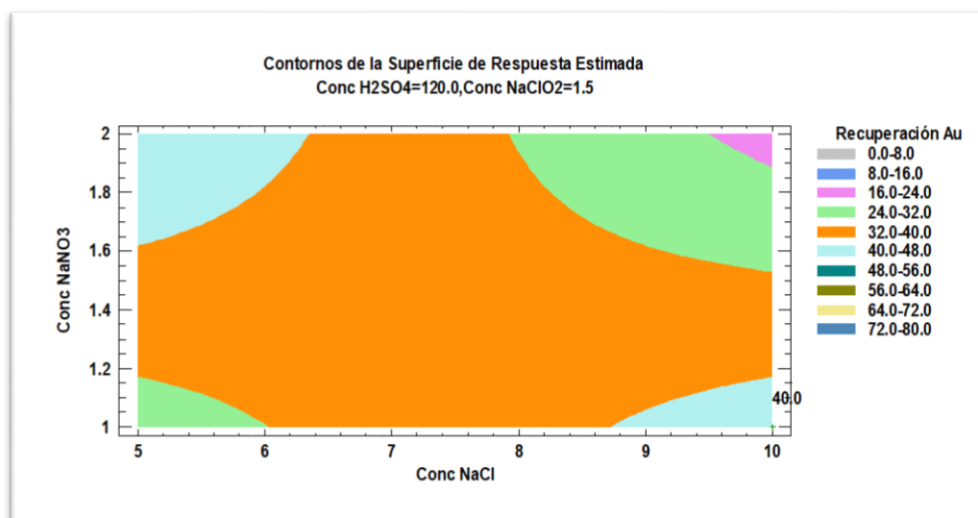
### Figura 28

*Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada concentración de Ácido Sulfúrico y Cloruro de Sodio*



**Figura 29**

*Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada concentración de Nitrato de Sodio y Cloruro de Sodio*



**Optimizar respuesta**

Meta: maximizar recuperación Au

Valor óptimo = 61,2086

**Tabla 22**

*Optimizar respuesta en maximizar recuperación de oro*

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Conc H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	70,0	170,0	170,0
Conc NaCl	5,0	10,0	10,0
Conc NaNO <sub>3</sub>	1,0	2,0	1,0
Conc NaClO <sub>2</sub>	1,0	2,0	2,0

Con el presente cuadro maximizando para la recuperación de oro, para lo cual debemos dosificar a su máximo la concentración de ácido sulfúrico, cloruro de sodio y clorito de sodio y a su mínimo la concentración de nitrato de sodio.

## CONCLUSIONES

- Los valores óptimos para la recuperación de cobre son usando una concentración de 170 g/L de ácido sulfúrico, 10g/L cloruro de sodio, 2g/L nitrato de sodio y 2g/L clorito de sodio obteniendo una máxima recuperación de 92,16% de disolución de cobre.
- Los valores óptimos para la recuperación de oro son usando una concentración de 170 g/L de ácido sulfúrico, 10g/L cloruro de sodio, 1g/L nitrato de sodio y 2g/L clorito de sodio obteniendo una máxima recuperación de 61,21% de disolución de oro.
- El agua de mar aporta con 19,721g/L de ion cloro.

## **RECOMENDACIONES**

- Complementar la cinética de lixiviación, con fin de tener un tiempo óptimo de lixiviación.
- Realizar las pruebas en forma aleatoria.
- Realizar el control de potencial redox (mV) y su grado de acidez pH.
- Realizar un estudio más profundo en la moliendabilidad, análisis de grado de liberación y granulometría adecuada para la aplicación del proceso.
- Analizar la cola por difracción de rayos X, esto con el fin de analizar que minerales quedan presente en ella.
- Realizar un estudio usando el nitrato de amonio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adán Rodríguez, J., & Reyes Valverde, R. J. (2010). *LIXIVIACIÓN DE MINERALES AURÍFEROS POR AGITACIÓN CON SALES DE CLORURO Y NITRATO DE SODIO EN MEDIO ÁCIDO, VERSUS CIANURACIÓN, EN IBEROMINAS, SOMOTILLO, MUNICIPIO DE CHINANDEGA - NICARAGUA. FEBRERO 2008. NICARAGUA* . Obtenido de <https://repositorio.unan.edu.ni/5762/1/85347.pdf>

Antonio Ballester, L. F. (2000). *Metalurgia extractiva* . EDITORIAL SINTESIS.

Beltrán Aguilar , A. (2006). *LIXIVIACIÓN DE MINERAL AURÍFERO CON SALES OXIDANTES EN MEDIO ÁCIDO*. Bucaramanga. Obtenido de <https://deploy.studylib.es/doc/6897187/1-lixiviaci%C3%B3n-de-mineral-aur%C3%ADfero-con-sales-oxidantes-en-...>

Benavente, D., Cañaveras, J. C., Martínez, J., Muños, M., Rodríguez García, M. Á., & Ordóñez, S. (2012). Identificación de minerales mediante difracción de rayos X utilizando bases de datos online de libre acceso. *Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*, 280-289. Obtenido de <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/download/261179/356448>

Brown, T., LeMay, E., & Bursten, B. (2009). *QUÍMICA LA CIENCIA CENTRAL*. Mexico: PEARSON. Obtenido de <https://ebooks.papacambridge.com/directories/IB/IB->

ebooks/upload/chemistry%20-  
%20brown,%20lemay,%20bursten,%20murphy%20and%20woodward%2  
0-%20eleventh%20edition%20(spanish)%20-%20pearson%202009.pdf

(1988). *Chile Patente n° 36158*.

Cisternas, I., & Moreno, L. (2014). *EL AGUA DE MAR EN LA MINERÍA FUNDAMENTOS Y APLICACIONES*. Santiago: MASTERS Ril. Obtenido de <https://vbook.pub/documents/el-agua-de-mar-en-la-mineria-fundamentos-y-apl-k2kn4kjylr2y/>

Condori Quispe, A. J., & Valdez Abrigo, D. E. (2018). *EVALUACIÓN DE LA LIXIVIACIÓN CON CLORURO DE SODIO Y NITRATO DE POTASIO EN MEDIO ÁCIDO DE MINERAL AURÍFERO SULFURADO PROVENIENTE DE LA MINERA LAYTARUMA DE BAJA RECUPERACIÓN DE ORO CON LOS PROCESOS TRADICIONALES USADOS EN PEQUEÑA MINERÍA*. AREQUIPA. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/019f2495-7293-4483-80fa-156a2f9d9bb2/full>

Domic, E. (2001). *Hidrometalurgia fundamentos, procesos y aplicaciones*. Santiago: Andros Editores.

Gabriel Tuesta, E., & Huaypar Vásquez, Y. (s.f.). *APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX) EN LA INDUSTRIA*

- MINERA. *Buenaventura Ingenieros S.A.*, 1-6. Obtenido de <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CNM9-011.pdf>
- Gallardo, J. V. (1980). *METALURGIA DEL ORO Y LA PLATA*. La Paz: San Marcos.
- Goupy, J. L. (1993). *Methods for experimental design*. Paris: ELSEVIER.
- Gupta, C., & Mukherjee, T. (1990). *HYDROMETALLURGY in EXTRACTION PROCESSES*. CRC press.
- Gutiérrez Pullido, H., & De La Vera Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw-Hill. Obtenido de [https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis\\_y\\_diseno\\_experimentos.pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf)
- Martul Hernández, C. (2020). *ENCICLOPEDIA ILUSTRADA DE MINERALES, ROCAS Y FÓSILES*. Madrid: Libsa.
- Portal Minero S.A. (2006). *Manual general de minería y metalurgia*. Chile: Portal Minero Ediciones. Obtenido de <https://www.portalminero.com/wp/>
- Pourbaix, M. (1974). *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*. Obtenido de <http://sunlight.caltech.edu/aic/pourbaix.pdf>
- Severo, P. (2004). *DISEÑO EXPERIMENTAL Aplicado a Ciencia y Tecnología*. Lima: CONCYTEC.

Severo, P. (2010). *PROCESO SEVERO*. Lima: CONCYTEC.

Severo, P. (2011). *ESTADISTICA EXPERIMENTAL*. Lima: CONCYTEC.

Uceda Herrera, D. A. (2016). *Hidrometalurgia Quimica e Ingeniería*. Lima: EIRL.

Obtenido de <https://iimp.org.pe/archivos/publicaciones/a621-20210824-062743-1552.pdf>

Wills, B. A. (1994). *TECNOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES*.  
Mexico: LIMUSA.

## ANEXOS

### Resultados de la prueba complementaria usando nitrato de amonio

Se realizó una prueba complementaria usando nitrato de amonio, esto con fin de sustituir el nitrato de sodio.

**Tabla 23**

*Resultados con Nitrato de Amonio*

Item	Au (mg/L)	Cu (g/L)
PE	0,710	14,798

Nota. Laboratorio Minares South S.R.L.

### Recuperación de cobre y oro usando nitrato de amonio

**Tabla 24**

*Recuperación de cobre y oro usando Nitrato de Amonio*

Prueba	Ácido sulfúrico (g/L)	Cloruro de sodio (g/L)	Nitrato de amonio (g/L)	Clorito de sodio (g/L)	Porcentaje recuperación (% Au)	Porcentaje recuperación (% Cu)
1	170	10	2	2	47,44	91,00

Nota.- Según la prueba complementaria que se realizó tal como se muestra en la tabla 24, no solo se puede usar el nitrato de sodio, con el uso de nitrato de amonio tiene el mismo efecto, técnicamente en términos de costo y abundancia es preferible usar el nitrato de amonio.

### Cálculo de prueba por agitación para lixiviación de cobre

Datos:

Peso del mineral húmedo = 0,5Kg

Porcentaje de humedad = 4,03

Peso del mineral seco = 479,85g

Volumen total = 1L

Ley de cabeza CuT = 3,072%

### **Tabla 25**

*Balance de prueba por agitación cobre M-12*

Producto	Volumen	Ley	Contenido Cu	%Recuperación
Solución	1 L	15,067 g/L	15,067g	92,6
cola	479,85 g	0,250 %	1,199 g	

$$\text{Ley de cabeza calculada (\%)} = \frac{16,266 * 100}{479,85} = 3,389\%$$

### **Cálculo de prueba de agitación para lixiviación de oro**

Datos:

Peso del mineral húmedo = 0,5Kg

Porcentaje de humedad = 4,03%

Peso del mineral seco = 479,85g

Volumen total = 1L

Ley de cabeza g/TM= 3,119

**Tabla 26**

*Balance de prueba de agitación oro M-12*

Producto	Volumen	Ley	Contenido Au	%Recuperación
Solución	1 L	0,568 mg/L	0,568 mg/L	38
cola	479,85 g	1,439 g/TM	1,439 g/TM	

$$\text{Contenido de Au (mg)} = 0,479\text{kg} * 3,119 \frac{\text{mg}}{\text{Kg}} = 1,494\text{mg}$$

**Determinación de porcentaje de humedad del mineral**

Datos:

Peso del mineral húmedo = 1530g

Peso del mineral seco = 1452g

$$\%H = \frac{1513 - 1452}{1513} * 100$$

$$\%H = 4,03$$

**Determinación de densidad relativa del mineral**

**Dato:**

Peso del mineral seco = 8g

Volumen inicial = 35mL

Volumen final = 38mL

Volumen desplazado = 3mL

$$\rho_{relativa} = \frac{8}{38 - 35}$$

$$\rho_{relativa} = 2,66 \text{ g/mL}$$

**Determinación de dilución**

$$D = \frac{L(\text{litros de solución})}{M(\text{Kilogramos de mineral})}$$

$$D = \frac{1L}{0.5Kg}$$

$$D = 2$$

**Determinación de porcentaje de solución**

$$D = \frac{100 - \%S}{\%S}$$

$$2 = \frac{100 - \%S}{\%S}$$

$$\%S = 33,33$$

Ley de cabeza

	<b>MINARES SOUTH S.R.L.</b> LABORATORIO QUÍMICO ANÁLISIS QUÍMICO DE MINERALES Y PRUEBAS METALÚRGICAS DE FLOTACIÓN - CIANURACIÓN	<b>CERTIFICADO N°: MSSC 001-1919-AQP</b>															
<b>INFORME DE ENSAYO</b>																	
<b>Análisis solicitado por:</b>	CATACHURA CHINO RONALDO																
<b>Contacto:</b>	RONALDO CATACHURA																
<b>Asunto:</b>	ANÁLISIS QUÍMICO																
<b>Instrucciones de Ensayo:</b>	TIPO RECONOCIMIENTO																
<b>Características:</b>	SOBRE SELLADO																
<b>Recepción de Muestras:</b>	MOLIDO																
<b>Cantidad Muestras:</b>	1																
<b>Fecha de Recepción:</b>	01/06/2024																
<b>Fecha de Entrega:</b>	03/06/2024																
<b>Requerimiento de Análisis:</b>	001-1919																
<table border="1"><thead><tr><th>Cod. Lab.</th><th>Código Cliente</th><th>Au oz/TC</th><th>Au g/TM</th><th>Cu solub. %</th><th>Cu total %</th></tr></thead><tbody><tr><td>AQP-3</td><td>MSL</td><td>0.091</td><td>3.119</td><td>2.901</td><td>3.072</td></tr></tbody></table>						Cod. Lab.	Código Cliente	Au oz/TC	Au g/TM	Cu solub. %	Cu total %	AQP-3	MSL	0.091	3.119	2.901	3.072
Cod. Lab.	Código Cliente	Au oz/TC	Au g/TM	Cu solub. %	Cu total %												
AQP-3	MSL	0.091	3.119	2.901	3.072												
<b>Observación:</b>																	
<b>Nota:</b> Los resultados indicados en el presente documento, corresponde al análisis solicitado en la muestra recibida del cliente.																	
Arequipa, 03 de junio de 2024																	
 																	
<small>Av. Panamericana Sur N° 355 - Vista Alegre - Nasca Cel.: 986635088 / minaresouthnazca@gmail.com / informesnasca@minares.com.pe Av. 19 de Diciembre Mz. 36 Lte. 11 - La Aguadita - Chala - Cel.: 986635086 / minaresouth2014@outlook.com / informeschala@minares.com.pe Parque San Martín N° 224/226 - Dpto. 1401- Pueblo Libre - Lima Telf.: 01 530 4689 Cel.: 986635085 / informeslima@minares.com.pe</small> <b>www.minares.com.pe</b>																	

Reconocimiento de ion cloro en agua de mar

**MINARES SOUTH S.R.L.**  
LABORATORIO QUÍMICO  
ANÁLISIS QUÍMICO DE MINERALES Y  
PRUEBAS METALÚRGICAS DE FLOTACIÓN - CIANURACIÓN

CERTIFICADO N°: MSSA-2403- 005

**INFORME DE ENSAYO**

**DATOS DEL CLIENTE**

A SOLICITUD DE : RONALDO CATACHURA CHINO

SOLICITUD DE ANÁLISIS : RECONOCIMIENTO : Cl

**RECEPCIÓN DE MUESTRAS**

PRODUCTO DESCRITO COMO : SOLUCION

CODIGO DE MUESTRA : AM

N° DE CODIGO DE LABORATORIO : 005

MUESTRA ENVASADA EN : BOTELLA

PESO DE LA MUESTRA : gr. Aprox.

FECHA DE RECEPCIÓN : 5/06/2024

FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO : 6/06/2024

**DETALLE DE INFORME**

ITEM	CODIGO DEL CLIENTE	RESULTADOS Au	
		Ley Cl	mg/L
01	AM		19721

NOTA: Los resultados indicados en el presente documento, corresponde al analisis solicitado en la muestra recibida del cliente.

  
ING. DANIEL HUATUCO SOTO  
JEFE DE LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD  
REG. CIP N° 72140

Av. Panamericana Sur N° 355 - Vista Alegre - Nasca Cel.: 986635088 / minaressouthnazca@gmail.com / informesnasca@minares.com.pe  
Av. 19 de Diciembre Mz. 36 Lte. 11 - La Aguadita - Chala - Cel.: 986635086 / minaressouth2014@outlook.com / informeschala@minares.com.pe  
Parque San Martín N° 224/226 - Dpto. 1401- Pueblo Libre - Lima Telf.: 01 530 4689 Cel.: 986635085 / informeslima@minares.com.pe  
[www.minares.com.pe](http://www.minares.com.pe)

Resultado de las 19 pruebas



**MINARES SOUTH S.R.L.**

**LABORATORIO QUÍMICO**

ANÁLISIS QUÍMICO DE MINERALES Y  
PRUEBAS METALÚRGICAS DE FLOTACIÓN - CIANURACIÓN

**CERTIFICADO DE ANÁLISIS**

CLIENTE : CATACHURA CHINO RONALDO  
SOLICITUD DE ANÁLISIS : RECONOCIMIENTO: Au, Cu

**RECEPCIÓN DE MUESTRAS**

DESCRIPCIÓN : SOLUCION  
N° DE CODIGO DE LABORATORIO : 123 - 132  
MUESTRA ENVASADA EN : BOTELLA PLASTICA  
FECHA DE RECEPCIÓN : 13/06/2024  
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO : 14/06/2024

ITEM	CÓDIGO DEL CLIENTE	RESULTADOS	
		AU mg/l	Cu (g/l)
01	M - 1	0.652	13.974
02	M - 2	0.446	14.829
03	M - 3	0.087	14.025
04	M - 4	0.560	14.455
05	M - 5	0.816	13.998
06	M - 6	0.513	14.690
07	M - 7	0.020	13.808
08	M - 8	0.405	14.840
09	M - 9	0.048	14.016
10	M - 10	0.773	14.844

NOTA: Los resultados indicados en el presente documento, corresponde al analisis solicitado en la muestra recibida del cliente.



ING. DANIEL HUATUCO SOTO  
JEFE DE LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD  
REG. CIP N° 72140



# MINARES SOUTH S.R.L.

## LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS QUÍMICO DE MINERALES Y  
PRUEBAS METALÚRGICAS DE FLOTACIÓN - CIANURACIÓN

### CERTIFICADO DE ANÁLISIS

CLIENTE : CATACHURA CHINO RONALDO

SOLICITUD DE ANÁLISIS : RECONOCIMIENTO: Au, Cu

#### RECEPCIÓN DE MUESTRAS

DESCRIPCIÓN : SOLUCION

N° DE CODIGO DE LABORATORIO : 133 - 141

MUESTRA ENVASADA EN : BOTELLA PLASTICA

FECHA DE RECEPCIÓN : 13/06/2024

FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO : 14/06/2024

ITEM	CÓDIGO DEL CLIENTE	RESULTADOS	
		AU mg/l	Cu (g/l)
01	M - 11	0.821	14.071
02	M - 12	0.568	15.067
03	M - 13	0.788	14.074
04	M - 14	0.683	14.843
05	M - 15	0.171	14.301
06	M - 16	0.367	14.805
07	M - 17	0.509	14.739
08	M - 18	0.315	14.598
09	M - 19	0.236	14.695

NOTA: Los resultados indicados en el presente documento, corresponde al analisis solicitado en la muestra recibida del cliente.



ING. DANIEL HUATUCO SOTO  
JEFE DE LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD  
REG. CIP N° 72140

## Resultados de análisis de cola



### MINARES SOUTH S.R.L.

**LABORATORIO QUÍMICO**

ANÁLISIS QUÍMICO DE MINERALES Y  
PRUEBAS METALÚRGICAS DE FLOTACIÓN - CIANURACIÓN

CERTIFICADO N°: MSSC 001-2530-AQP

### INFORME DE ENSAYO

**Análisis solicitado por:** CATACHURA CHINO RONALDO

**Contacto:**

**Asunto:** ANÁLISIS QUÍMICO

**Instrucciones de Ensayo:** TIPO RECONOCIMIENTO

**Características:** BOLSA PLÁSTICA SELLADA

**Recepción de Muestras:** MOLIDO

**Cantidad Muestras:** 4

**Fecha de Recepción:** 25/06/2024

**Fecha de Entrega:** 26/06/2024

**Requerimiento de Análisis:** 001-2530

Cod. Lab.	Código Cliente	Au oz/TC	Au g/TM	Cu total %
AQP-245	C - 7	<b>0.095</b>	3.256	
AQP-246	C - 12	<b>0.042</b>	1.439	
AQP-247	C - 12			<b>0.250</b>
AQP-248	C - 19	<b>0.057</b>	1.953	

**Observación:**

**Nota:**  
Los resultados indicados en el presente documento, corresponde al análisis solicitado en la muestra recibida del cliente.

Arequipa, 26 de junio de 2024



ING. DANIEL HUATUCO SOTO  
JEFE DEL LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD  
REG. CIP N° 72140

Av. Panamericana Sur N° 355 - Vista Alegre - Nasca Cel.: 986635088 / minaresouthnazca@gmail.com / informesnasca@minares.com.pe  
Av. 19 de Diciembre Mz. 36 Lte. 11 - La Aguadita - Chala - Cel.: 986635086 / minaresouth2014@outlook.com / informeschala@minares.com.pe  
Parque San Martín N° 224/226 - Dpto. 1401 - Pueblo Libre - Lima Telf.: 01 530 4689 Cel.: 986635085 / informeslima@minares.com.pe  
[www.minares.com.pe](http://www.minares.com.pe)

Prueba complementaria usando nitrato de amonio

**MINARES SOUTH S.R.L.**  
LABORATORIO QUÍMICO  
ANÁLISIS QUÍMICO DE MINERALES Y  
PRUEBAS METALÚRGICAS DE FLOTACIÓN - CIANURACIÓN

**CERTIFICADO DE ANÁLISIS**

CLIENTE : CATACHURA CHINO RONALDO

SOLICITUD DE ANÁLISIS : RECONOCIMIENTO: Au, Cu

**RECEPCIÓN DE MUESTRAS**

DESCRIPCIÓN : SOLUCION

N° DE CODIGO DE LABORATORIO : 142

MUESTRA ENVASADA EN : BOTELLA PLASTICA

FECHA DE RECEPCIÓN : 13/06/2024

FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO : 14/06/2024

ITEM	CÓDIGO DEL CLIENTE	RESULTADOS	
		AU mg/l	Cu (g/l)
01	PE	0.710	14.798

**NOTA:** Los resultados indicados en el presente documento, corresponde al analisis solicitado en la muestra recibida del cliente.

  
 **ING. DANIEL HUATUCO SOTO**  
JEFE DE LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD  
REG. CIP N° 72140

Av. Panamericana Sur N° 355 - Vista Alegre - Nasca Cel.: 986635088 / minaresouthnazca@gmail.com / informesnasca@minares.com.pe  
Av. 19 de Diciembre Mz. 36 Lte. 11 - La Aguadita - Chala - Cel.: 986635086 / minaresouth2014@outlook.com / informeschala@minares.com.pe  
Parque San Martin N° 224/226 - Dpto. 1401- Pueblo Libre - Lima Telf.: 01 530 4689 Cel.: 986635085 / informeslima@minares.com.pe  
[www.minares.com.pe](http://www.minares.com.pe)

Repetición de las pruebas 3, 7 y 9



**MINARES SOUTH S.R.L.**

**LABORATORIO QUÍMICO**

ANÁLISIS QUÍMICO DE MINERALES Y  
PRUEBAS METALÚRGICAS DE FLOTACIÓN - CIANURACIÓN

CERTIFICADO N°: MS-SA-2401- 117 - 119

**INFORME DE ENSAYO**

**DATOS DEL CLIENTE**

A SOLICITUD DE : CATACHURA CHINO RONALDO  
SOLICITUD DE ANÁLISIS : RECONOCIMIENTO : Au

**RECEPCIÓN DE MUESTRAS**

PRODUCTO DESCRITO COMO : SOLUCION  
N° DE CODIGO DE LABORATORIO : 117 - 119  
MUESTRA ENVASADA EN : BOTELLA PLASTICA  
FECHA DE RECEPCIÓN : 13/07/2024  
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO : 14/07/2024

**DETALLE DE INFORME**

ITEM	CÓDIGO DEL CLIENTE	RESULTADOS
		Ley Au (g/m3)
01	M - 3	0.429
02	M - 7	0.339
03	M - 9	0.063

  
**ING. DANIEL HUATUCO SOTO**  
JEFE DE LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD  
REG. CIP N° 72140

NOTA: Los resultados indicados en el presente documento, corresponde al analisis solicitado en la muestra recibida del cliente.

Av. Panamericana Sur N° 355 - Vista Alegre - Nasca - Cel.: 986635088 / minaresouthnazca@gmail.com / informesnazca@minares.com.pe  
Av. 19 de Diciembre Mz. 36 Lte. 11 - La Aguadita - Chala - Cel.: 986635086 / minaresouth2014@outlook.com / informeschala@minares.com.pe  
Parque San Martín N° 224/226 - Dpto. 1401 - Pueblo Libre - Lima Telf.: 01 530 4689 Cel.: 986635085 / informeslima@minares.com.pe  
[www.minares.com.pe](http://www.minares.com.pe)