

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y
METALÚRGICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**“EXTRACCIÓN DEL COBRE A PARTIR DE TARJETAS DE
CIRCUITOS INTEGRADOS DE COMPUTADORAS POR LIXIVIACIÓN
ÁCIDA EN LA CIUDAD DE CUSCO”
(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

PRESENTADO POR:

- **Bach. Allende Aguilar, Sheila**
- **Bach. Llonto Taypeccahuana, Anahid**

Priscila

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
METALÚRGICO**

ASESOR: Ing. Dr. CAMERO HERMOZA, PEDRO

Cusco – Perú

2021

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Señores miembros del Jurado.

Cumpliendo con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica ponemos a vuestra consideración el trabajo de tesis intitulado:

**“EXTRACCIÓN DEL COBRE A PARTIR DE TARJETAS DE CIRCUITOS
INTEGRADOS DE COMPUTADORAS POR LIXIVIACIÓN ÁCIDA EN LA CIUDAD
DE CUSCO”**

(Investigación Tecnológica)

El presente trabajo tuvo como objetivo investigar una posibilidad tecnológica de extraer el cobre de las tarjetas de circuitos integrados desechados. Este trabajo es de carácter experimental-descriptivo, con el que esperamos cumplir las exigencias requeridas.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo extraer cobre a partir de tarjetas de circuito integrado de computadoras mediante el proceso de lixiviación acida por agitación en la ciudad del Cusco.

Las tarjetas de circuito integrado son placas de material aislante (plástico, baquelita, vidrio, etc.) y los metales tales como Cu, Pb, Zn, Fe, Cd, Be, Cr, Au, Pt, Pd, y Ag de acuerdo al análisis químico que se obtuvo en el Laboratorio Analíticos del Sur.

Para la evaluación del presente estudio se recolectó un total de 20 TCI (Tarjeta de Circuito Integrado) con un peso total de 9.68 kg, de los cuales se separó el material no metálico manualmente, habiendo disminuido su peso a 4.87 kg, que fueron triturados para facilitar el proceso de lixiviación, tomando una muestra representativa de 130g., que fueron enviadas a “Laboratorios Analíticos del Sur” para el análisis químico del contenido de cobre en la muestra dando una ley de cabeza de 24.6% de Cobre.

Por las diferentes características que presenta las Tarjetas de Circuito Integrado se han realizado pruebas de lixiviación por agitación a nivel de laboratorio. De acuerdo a las pruebas preliminares de lixiviación por agitación se ha podido determinar las variables que tienen mayor influencia como: la concentración de agua oxigenada, concentración de ácido y el tiempo de lixiviación; variables que han sido de mayor utilidad para realizar las pruebas de la cinética de lixiviación y para aplicar posteriormente el diseño factorial 2^3 .

En estas condiciones, el proceso nos ha permitido obtener, de acuerdo a la prueba metalúrgica N°8, una extracción de 52.62% de Cobre; el cual se lleva en el diseño factorial 2^3 , relativamente superior al porcentaje de cobre extraído en las pruebas de cinética de lixiviación donde obtuvimos 51.73% de Cobre. Finalmente, los parámetros más importantes en este proceso de extracción fueron: Concentración del agua oxigenada 30%, 450 g/l de ácido sulfúrico y con un tiempo de lixiviación de 48 horas. El modelo matemático obtenido es $\hat{y} = 31.08 + 14.85x_1 + 5.14x_2$

Palabras clave: Extracción, cobre, lixiviación, agitación, concentración, agua oxigenada.

ABSTRACT

The present research work has as purpose to extract copper from computer integrated circuit cards through the process of acid leaching by agitation in the city of Cusco

Integrated circuit boards are plates of insulating material (plastic, Bakelite, glass, etc.) and metals such as Cu, Pb, Zn, Fe, Cd, Be, Cr, Au, Pt, Pd, and Ag according to the chemical analysis that was obtained in the Laboratorio Analíticos del Sur.

For the evaluation of the present study, a total of 20 TCI (Integrated Circuit Card) were collected with a total weight of 9.68 kg, from which the non-metallic material was separated manually, having decreased its weight to 7.11 kg, which were crushed to facilitate the leaching process, taking a representative sample of 130g, which was sent to "Laboratorios Analíticos del Sur" for the chemical analysis of the copper content in the sample, giving a head grade of 24.6% Copper.

For the different characteristics of the Integrated Circuit Cards, agitation leaching tests have been carried out at the laboratory level. According to preliminary agitation leaching tests, it has been possible to determine the variables that have the greatest influence, such as: hydrogen peroxide concentration, acid concentration and leaching time; variables that have been most useful to carry out the leaching kinetics tests and to subsequently apply the factorial design 2^3 .

Under these conditions, the process has allowed us to obtain, according to test N°. 8, an extraction of 52.62% of Copper; which is carried in the factorial design 2^3 , relatively higher than the percentage of copper extracted in the leaching kinetic tests where we obtained 51.73% of Copper. Finally, the most important parameters in this extraction process were: 30% hydrogen peroxide concentration, 450 g/l of sulfuric acid and a leaching time of 48 hours. The mathematical model is $\hat{y} = 31.08 + 14.85x_1 + 5.14x_2$

INTRODUCCION

El avance científico y tecnológico, es la principal característica de este mundo moderno y globalizado, las empresas e instituciones estatales y privadas y los individuos en general, requieren permanentemente ir adquiriendo aparatos eléctricos y electrónicos cada vez más sofisticados, aparatos que a su vez se van modernizando constantemente, por lo que el tiempo de utilidad de estos es cada vez más corto; y muchos de estos aparatos quedan en desuso, almacenados en algunos casos, tirados a los botaderos de basura, en otros convirtiéndose en una fuente de contaminación nocivos para la salud debido a la composición química que contienen.

En nuestro país, anualmente se importan 2,5 millones de unidades de aparatos electrónicos entre laptops, celulares y otros; creciendo su demanda cada día más. Y de acuerdo a la información que nos brinda el Ministerio de Ambiente, casi 100 mil toneladas acumuladas de RAEE del Perú provienen de equipos de cómputo. Cusco es uno de los principales consumidores de este tipo de artículos; por lo que, cada vez es más común ver aparatos eléctricos y electrónicos tirados en los botaderos de basura o almacenados en las instituciones públicas y privadas.

Frente a este problema, en nuestra ciudad, el año 2019 se logró recaudar Más de 25 toneladas de residuos electrónicos durante la campaña de recolección y reciclaje de Residuos de Aparatos Electrónicos y Eléctricos (RAEE), Reciclafest Cusco, Sebastián Larroumets, coordinador de ReCusco quién organizó la campaña, afirmó que lo recolectado servirá para hacer nuevos productos o reutilizar parte de los residuos como materia prima.

Con este trabajo de investigación intitulado “*Extracción del cobre a partir de tarjetas de circuitos integrados de computadoras por lixiviación ácida en la ciudad de cusco*”, se busca demostrar que es posible la extracción de ciertos elementos metálicos con valor comercial, en este caso el cobre.

DEDICATORIA I

El presente trabajo lo dedico a mis padres a mi mamá Victoria Aguilar Alvarez y a mi papá Saturnino Carrillo Mollinedo, a los dos por permitirme haber llegado hasta el día de hoy, por brindarme todo su apoyo incondicional, a quienes debo mi vida universitaria y por ser mi inspiración y motivación para terminar este trabajo.

A mis hermanos Franklin, quien desde el cielo me ha cuidado siempre y quien ha sido fundamental en mi formación profesional, a Maribel, Porfirio, Roció, Rossibelt y Luis David quienes con sus consejos dieron luz a mi vida, a quienes tengo siempre presente por su gran motivación.

A mi padrino Braulio Delgado, quien ha fomentado en mi vida estudiantil la investigación y las ganas de ser siempre alguien más, por transmitirme su ambición a la superación.

A mis compañeros de la universidad quienes han sido fundamental en esta etapa universitaria por sus consejos y por los buenos momentos, en particular una amistad tan valiosa como la de ella.

Quiero dedicar también a una persona especial que, a través de cada exigencia, cada consejo me ha demostrado su apoyo y su interés de verme profesional, y por todos los gratos momentos compartidos por confiar y creer en nuestros sueños.

Sheila Allende Aguilar

DEDICATORIA II

Con mucho cariño a mi madre Carla Taype Vargas, quien fue mi ejemplo de perseverancia y lucha la que me enseñó que todo con esfuerzo y sacrificio es recompensado, a mi padre Américo Lizaraso, por sus todos sus consejos, y por brindarme su apoyo incondicional, por el ejemplo de responsabilidad que impartió en mí y esas ganas de seguir adelante y creciendo profesionalmente, a mi hermana Angela Lizaraso por la paciencia, por ser mi compañera y amiga durante casi toda mi vida, a la engreída de la casa a mí sobrina Alessia quien con su ternura y carisma se ganó el cariño de todos, a mi madrina Gloria Taype por ser como una segunda madre para mí y siempre estar velando por mi bienestar. A mis tíos quienes depositaron toda su confianza en mí y mis primos quienes fueron mis cómplices en cada travesura y fueron mis primeros amigos que Dios destinó para mí. A mis abuelitos Julián, Inés y mi papá Berno a quienes les hubiera gustado estar en este momento conmigo, quienes siempre me aconsejaron de la mejor manera, seguramente desde ahí arriba han estado velando por mí todo éste tiempo, a mi mamá Vira quién me dio el mejor ejemplo de lucha y venció esta enfermedad que a muchos afectó y no pudieron salir victoriosos, a mi papá Cesar a quién extraño mucho y estoy segura que estaría muy orgulloso de mí, tengo muchos angelitos ahí arriba velando por mí.

A mis amigos que el destino y la vida me regaló con quienes compartí y seguiré compartiendo tantas aventuras y teniendo un sin fin de anécdotas, quienes dieron sentido a la palabra amistad e hicieron de la universidad y una de mis mejores etapas.

Y por último y no menos importante, a mis docentes, personas de gran sabiduría, quienes se han esforzado por ayudarme a llegar al punto en el que me encuentro.

Anahid Priscila Llonto Taypeccahuana

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradecemos a Dios por sus bendiciones, de habernos permitido llegar hasta aquí, a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco y a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, que entre sus aulas fuimos formadas y fueron testigos de tantas anécdotas.

A nuestro Asesor: Ing. Dr. Pedro Camero Hermoza, por su gran aporte en la ejecución de este trabajo de investigación, por sus sabios consejos, por su paciencia, quien gracias a su gran experiencia profesional supo encaminar el desarrollo de este trabajo.

A nuestros docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, quienes han sido fundamental en nuestra formación, por mostrarnos las capacidades que se esconden en cada una de nosotras, por brindarnos el tesoro más grande que existe, la educación universitaria.

SHEILA Y ANAHID

LISTA DE TERMINOS Y SIMBOLOS

A	Amperios
cal	Calorías
cm	Céntimo
cm ²	Centímetros Cuadrados
cm ³	Centímetros Cúbicos
°C	Grados Centígrados
C	Concentración de reactantes
D	Constante de difusión
Df	Grados de libertad de los efectos e interacciones
e ⁻	Electrones
E°	Potencial estándar de reacción
E ⁰ _p	Potencial Redox
E _a	Energía de activación
E _h	Potencial electroquímico
E _{ox}	Potencial de oxidación
E _{red}	Potencial de reducción
F	Constante de Faraday
g/L	Gramos por litro.
g	Gramos
G.E.	Gravedad Específica
h	Hora
K	Constante de velocidad de reacción
K _e	Constante de equilibrio
Kcal	Kilocaloría
Kg	Kilogramo

KJ	kilo joule
L	Litro
ln	Logaritmo natural
m = b	Pendiente ecuación lineal
mg	Miligramo
ml	mililitro
n	Número de electrones
N	Número de pruebas experimentales
N	Orden de reacción
pH	Potencial del Hidrogeno.
r	Número de réplicas en el diseño
R	Constante de gases
T	Temperatura
V_1	Velocidad de una reacción.
Vs	Versus
X_i	Variable independiente.
Y_i	Variable dependiente.
ΔG°	Variación de energía libre
ΔH	Cambio de entalpía
ΔS	Cambio de entropía
μ	Media General
β_0	Ordenada de origen
ε	Error

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
INTRODUCCIÓN	IV
DEDICATORIA 1	V
DEDICATORIA 2	VI
AGRADECIMIENTO	VII
LISTA DE TERMINOS	VIII
INDICE	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABLAS	XI
CAPITULO I: ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACION	1
1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2.1 PROBLEMA GENERAL	2
1.2.2 PROBLEMA ESPECÍFICO	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	2
1.3.1 CONVENIENCIA	2
1.3.2 RELEVANCIA SOCIAL	2
1.3.3 RELEVANCIA TECNOLÓGICA	3
1.3.4 RELEVANCIA AMBIENTAL	3
1.3.5 VALOR TEÓRICO	3
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.4.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	3
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	5

2.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES	5
2.2 ANTECEDENTES NACIONALES	6
2.3 BASES TEÓRICAS	9
2.3.1 RESIDUOS PELIGROSOS	9
2.3.2 BASES LEGALES DEL MANEJO DEL RAE	14
2.3.3 LIXIVIACIÓN	18
CAPITULO III: HIPOTESIS Y VARIABLES	56
3.1 HIPÓTESIS	56
3.1.1 HIPÓTESIS GENERAL	56
3.1.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	56
3.2 VARIABLES	56
3.2.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	56
3.2.2 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	57
CAPITULO IV: METODOLOGÍA	58
4.1 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:	58
4.1.1 TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	59
4.2 POBLACIÓN Y MUESTRA	60
4.2.1 POBLACIÓN	60
4.2.2 MUESTRA	60
4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	60
CAPITULO V: PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES Y ANALISIS RESULTADOS	61
5.1 INTRODUCCIÓN	61
5.2 RECOLECCIÓN DE TCI DE COMPUTADORAS.	62
5.3 SEPARACIÓN MANUAL DE ELEMENTOS METÁLICOS Y POLÍMEROS.	62
5.4 REDUCCIÓN DE TAMAÑO DE TCI DE COMPUTADORAS	63
5.5 MUESTREO POR CUARTEO DE LA MUESTRA DE TCI	65

5.6 ANÁLISIS QUÍMICO	66
5.7 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	67
5.8 DETERMINACIÓN GRAVEDAD ESPECIFICA DE LA MUESTRA.	68
5.9 PREPARACIÓN DE LA PULPA PARA LA ALIMENTACIÓN AL AGITADOR.	70
5.10 PRUEBAS EXPLORATORIAS PRELIMINARES	72
5.10.1 PRUEBA DE CURADO	72
5.10.2 PRUEBA DE LIXIVIACIÓN (AGUA OXIGENADA MÁS ÁCIDO SULFÚRICO)	75
5.11 PRUEBAS EXPERIMENTALES	77
5.11.1 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE LA SOLUCIÓN LIXIVIANTE Y DEL AGUA OXIGENADA	77
5.11.2 PRUEBAS DE CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN	79
5.11.3 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DEL COBRE	82
5.11.4 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO ÓPTIMO DE LIXIVIACIÓN	83
5.11.5 DETERMINACIÓN DEL MODELO CINÉTICO.	84
5.11.6 DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE ÁCIDO	86
5.12 PRUEBAS METALÚRGICAS DE LABORATORIO	87
CAPITULO VI: ANALISIS DE RESULTADOS	92
6.1 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO	92
6.1.1 VARIABLES INVOLUCRADAS	92
6.1.2 REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA DE LAS COMBINACIONES	94
6.2 CONDICIONES DEL ANÁLISIS DE DATOS	95
6.2.1 MODELO ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO	95
6.2.2 HIPÓTESIS DE INTERÉS	96
6.3 ANÁLISIS DE LOS CONTRASTES	97
6.4 ANÁLISIS DE LOS EFECTOS ESTIMADOS Y DE LOS CUADRADOS MEDIOS	100
6.4.1 CÁLCULO DE LOS EFECTOS	100
6.4.2 GRÁFICA DE EFECTOS	101
6.4.3 CONTRIBUCIÓN DE LOS EFECTOS	105
6.4.4 CÁLCULO DE LOS CUADRADOS MEDIOS	106
6.5 ANÁLISIS DE VARIANZAS	107
6.5.1 GRADOS DE LIBERTAD DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	108

6.5.2	CÁLCULO DE LOS CUADRADOS MEDIOS	108
6.5.3	FORMULACIÓN DE ANOVA	110
6.6	EL MEJOR ANOVA	111
6.6.1	DETERMINACIÓN DE F DE FISHER	111
6.6.2	FORMULACIÓN DEL MEJOR ANOVA	112
6.7	PARETO ESTANDARIZADO	114
6.7.1	DIAGRAMA DE PARETO NORMAL	114
6.7.2	DIAGRAMA DE PARETO ESTANDARIZADO	115
6.8	MODELO MATEMÁTICO	117
6.8.1	FORMULACIÓN DEL MODELO DE REGRESIÓN	118
6.8.2	CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE REGRESIÓN	118
6.9	GRAFICA DE SUPERFICIE	120
6.10	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN	121
6.11	INTERVALOS DE CONFIANZA	122
CAPITULO VII		125
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		125
CONCLUSIONES		127
RECOMENDACIONES		128
BIBLIOGRAFIA		129
ANEXOS		133

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 PORCENTAJE DE MATERIAL EN LA	7
FIGURA 2.2 PORCENTAJE DE MATERIAL EN EL MONITOR	8
FIGURA 2.3 COMPOSICIÓN DE UNA TCI DE UNA COMPUTADORA	13
FIGURA 2.4 COMPOSICIÓN METÁLICA DE UNA TCI DE UNA COMPUTADORA	14
FIGURA 2.5 PCs Y RAEE PCs EN HOGARES DE CUSCO. PROYECCIÓN 2014-2020	17
FIGURA 2.6 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL BENEFICIO DE POLVOS DE TCI MOLIDAS	21
FIGURA 2.7 FLOW SHEET, LIXIVIACIÓN IN SITU	24
FIGURA 2.8 FLOW SHEET, LIXIVIACIÓN POR BOTADEROS	25
FIGURA 2.9 FLOW SHEET, LIXIVIACIÓN EN PILAS	26
FIGURA 2.10 FLOW SHEET, LIXIVIACIÓN EN VATS	27
FIGURA 2.11 FLOW SHEET, LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN	28
FIGURA 2.12 CELDAS PARA LA LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN	29
FIGURA 2.13 CURVA % DE EXTRACCIÓN VS TIEMPO	31
FIGURA 2.14 SISTEMA CU- H ₂ O	43
FIGURA 2.15 SISTEMA CU- H ₂ O	43
FIGURA 2.16 GRÁFICA DE LA CINÉTICA DE UN PRODUCTO Y REACTANTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	45
FIGURA 5.1 TARJETAS DE CIRCUITO INTERNO	62
FIGURA 5.2 SEPARACIÓN DE LAS TARJETAS DEL CPU	62
FIGURA 5.3 SEPARACIÓN POR PALLAQUEO	63
FIGURA 5.4 POLÍMEROS	63
FIGURA 5.5 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	69
FIGURA 5.6 CUARTEO	65
FIGURA 5.7 CURADO CON ÁCIDO SULFÚRICO	73
FIGURA 5.8 CURADO CON AGUA OXIGENADA.....	74
FIGURA 5.9 SOLUCIÓN DE PLS.....	76
FIGURA 5.10 LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN	81
FIGURA 5.11 X _B VS T EN LA ETAPA DE DIFUSIÓN	85
FIGURA 5.12 PREPARACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO A UTILIZAR	86
FIGURA 5.13 ADECUACIÓN DE LOS REACTORES ANTES DE LA LIXIVIACIÓN	86

FIGURA 6.1 REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA DE LAS VARIABLES EN 2^3	94
FIGURA 6.2 REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA DE LOS EFECTOS PRINCIPALES	102
FIGURA 6.3 REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA DE LOS EFECTOS PRINCIPALES	103
FIGURA 6.4 REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN	105
FIGURA 6.5 DIAGRAMA DE PARETO NORMAL.....	115
FIGURA 6.6 DIAGRAMA DE PARETO ESTANDARIZADO	117
FIGURA 6.7 GRÁFICA DE SUPERFÍCIE PARA FACTORES MAS INFLUYENTES	121

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Potencial correspondiente a distintos agentes oxidantes.	35
Tabla 3.1 Operacionalización de variables	57
Tabla 4.1 Plan de pruebas experimentales mediante el diseño factorial	59
Tabla 5.1 Contenido metálico de TCI	66
Tabla 5.2 Contenido de cobre en la muestra	67
Tabla 5.3 Análisis granulométrico	67
Tabla 5.4 Determinación de la gravedad específica	69
Tabla 5.5 Balance de pulpa para 20% de sólidos.....	71
Tabla 5.6 Curado con agua oxigenada	74
Tabla 5.7 Lixiviación sin oxidación	73
Tabla 5.8 Lixiviación y oxidación simultáneamente	75
Tabla 5.10 Cantidad de ácido requerido a 350 g/l de H ₂ SO ₄	79
Tabla 5.11 Cantidad de ácido requerido a 400 g/l de H ₂ SO ₄	79
Tabla 5.12 Resultados de análisis químico en las pruebas de cinética de lixiviación.	81
Tabla 5.13 Porcentaje de extracción de cobre en las pruebas de cinética de lixiviación.	83
Tabla 5.15 Modelamiento matemático de difusión controlada.....	85
Tabla 6.1 Resultados del Diseño factorial - Pruebas Nivel laboratorio.....	93
Tabla 6.2 Tabla de signos del diseño factorial 2 ³	98
Tabla 6.3 Contribución porcentual de los efectos.....	106
Tabla 6.4 Cálculos de los grados de libertad	108
Tabla 6.5 ANOVA para la recuperación de cobre	110
Tabla 6.6 Mejor ANOVA para la recuperación de cobre (sin AB)	113
Tabla 6.7 Mejor ANOVA para la recuperación de cobre, con variables significativas	113

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACION

1.1 Situación Problemática

La alta demanda de productos electrónicos ha generado en la ciudad del Cusco una cantidad considerable de desechos, para los cuales existe parcialmente un sistema de recolección y almacenamiento de estos productos, como en entidades públicas e instituciones privadas, en caso de los residuos eléctricos y electrónicos generados en domicilios son tirados a los botaderos de basura, donde existe una actividad de reciclado informal y no cuantificado.

El tiempo de vida de los dispositivos tecnológicos se reduce notablemente a medida que pasa el tiempo, esto no se produce sólo porque los aparatos dejan de funcionar, sino porque se vuelven obsoletos por las mismas exigencias impuestas por el mercado. La obsolescencia tecnológica se ve representada en los equipos de informática y comunicaciones, los cuales generan la necesidad de recambio por el hecho de que aparece una nueva versión del mismo, incluso aunque los cambios no sean necesarios.

Es así como el manejo de residuos electrónicos representan un desafío en cuanto al desarrollo de tecnologías de reciclaje sostenible, que sean capaces de hacer frente al volumen y complejidad de este tipo de residuos, con el presente trabajo de investigación se busca extraer metales valiosos como el cobre y de esta manera contribuir con la reducción de agentes contaminantes, nocivos para la salud al medio ambiente.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema general

¿Cuánto será la extracción de cobre a partir de tarjetas de circuito integrado de computadoras mediante el proceso de lixiviación ácida por agitación, en la ciudad de Cusco?

1.2.2 Problema específico

- ¿Cuál es la concentración de agua oxigenada óptima para la lixiviación ácida?
- ¿Cuál es la concentración de ácido para una extracción óptima de cobre?
- ¿En qué tiempo se logrará una mejor extracción?

1.3 Justificación

1.3.1 Conveniencia

La recuperación del cobre permitirá generar ingresos económicos a las personas involucradas en todo el proceso del reciclado de desechos electrónicos y extracción del cobre a partir de estos.

1.3.2 Relevancia Social

Se propone el sistema para evitar conflictos sociales con autoridades sobre la contaminación que pueden producir toda la chatarra electrónica en la ciudad del Cusco, también es motivo de preocupación social que algunos residuos al contener sustancias tóxicas, pueden constituir un peligro para la salud de las personas cuando alcanzan una determinada concentración en el cuerpo.

1.3.3 Relevancia Tecnológica

Se muestra una alternativa, el cual generará un sistema de reciclado y extracción del cobre por lixiviación de los desechos electrónicos.

1.3.4 Relevancia Ambiental

Considerando el alarmante crecimiento de los residuos electrónicos que se genera en Cusco causado principalmente por computadoras, el proyecto muestra cómo reducir la contaminación ambiental proponiendo un manejo técnico de estos residuos para su disposición final.

1.3.5 Valor Teórico

Este trabajo de investigación tiene como un propósito la recuperación del cobre de TCI, se sabe que estas tarjetas tienen una composición de diferentes metales, y entre uno de los que existe mayor contenido es el cobre, existiendo además otros elementos que pueden ser recuperados.

Este trabajo nos permitirá conocer bajo qué condiciones podemos obtener un mayor porcentaje de extracción del cobre, ayudará al mismo tiempo fomentar el reciclado de estos mismos.

1.4 Objetivos de la Investigación

1.4.1 Objetivo General

- Extraer el cobre de tarjetas de circuitos integrados de computadoras mediante el proceso de lixiviación ácida por agitación, en la ciudad de Cusco.

1.4.2 Objetivo Específico

- Determinar la concentración de agua oxigenada para una mejor extracción.

- Determinar la concentración de ácido sulfúrico adecuado para una mejor extracción.
- Determinar el tiempo óptimo del proceso de lixiviación para una mayor extracción.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes Internacionales

DAIRO ERNESTO CHAVERRA ARIAS (2014). “Extracción de cobre a partir de tarjetas de circuito impreso de residuos electrónicos”, Colombia.

Se encontró que para una concentración eficiente y posterior recuperación de cobre a partir de residuos electrónicos es necesaria una buena liberación en el proceso de reducción de tamaño, donde se encuentra que la fracción gruesa es la más rica en contenido de cobre. Además, los procesos físicos de concentración magnética y electrostática mostraron ser eficientes en el proceso de reciclaje y representan una excelente alternativa puesto que no generan contaminación.

Se puede obtener cobre metálico mediante electrodeposición siendo esta una técnica que no genera grandes efluentes ya que las soluciones son recirculadas al proceso de lixiviación. El proceso realizado mostró que es factible técnicamente obtener un cobre sin refinar con una pureza superior al 99%.

La etapa de lixiviación de cobre permitió obtener una solución rica en sulfato de cobre apta para la posterior extracción de cobre. Se alcanzó una extracción de cobre del 87% después de 30 minutos de proceso y una extracción superior al 95%, en 100 ml de solución 2.3 M de ácido sulfúrico con 18 ml de peróxido de hidrógeno durante 60 min. También se obtuvo una extracción del 55.44% después de 24 h de operación en una solución 2.32 M de ácido sulfúrico con burbujeo de O₂ como agente oxidante.

2.2 Antecedentes Nacionales

- **PAREDES CHOQUE EDITH, COHAILA BARRIOS ALBERTO (2013)** “Reciclaje de residuos electrónicos en computadoras de Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann”, (Revista), Tacna – Perú.

La reducción del ciclo de vida de los equipos electrónicos, especialmente los relacionados con las TCI, ha convertido la Gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) en un reto global. Los RAEE en computadoras generadas por la UNJBG en el año 2012 ofrecen las siguientes características: En los monitores monocromáticos y a colores, el vidrio se encuentra en el TRC (Tubos de Rayos Catódicos), con 1331,74 Kg. En las Unidades de Sistemas el material ferroso se encuentra en las carcasas o cubiertas de los dispositivos, con 173,00 Kg.

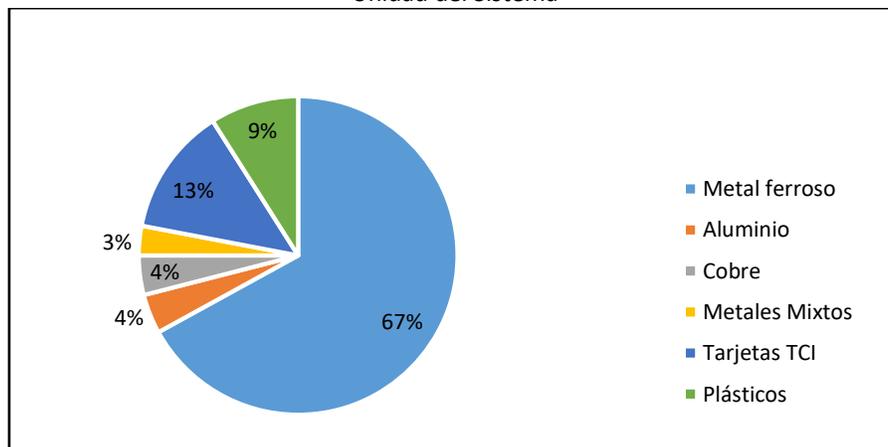
Es grande la magnitud de la problemática del aprovechamiento inadecuado que se les da a las computadoras, cuando éstas cumplen con su vida útil. El 87,40% no cuentan con los componentes completos, el 12,6% tienen los componentes básicos para operar. Lo que nos demuestra que hay una gran cantidad de computadoras con componentes extraídos o extraviados, debido al cual han dejado de operar.

Los residuos sólidos generados por las computadoras son materiales peligrosos: plomo, estaño, aluminio, hierro, silicio, níquel, cadmio, litio, zinc, oro, cobre, mercurio, azufre, carbono, arsénico, antimonio, bromo, selenio, cromo, cobalto y retardantes de flama. El proceso de recuperación y separación de estos elementos requieren de alta tecnología.

De 398 computadoras recogidas de las diferentes oficinas y laboratorios de cómputo de la UNJBG, lo ideal sería encontrar con los componentes completos, pero se observa en el Gráfico N°

2.1 que del total de U.S. el 12,56 % cuentan con los componentes completos y el 87,40% se encuentran con componentes incompletos, lo que imposibilita el funcionamiento. Señalar el grafico definición de simbologías

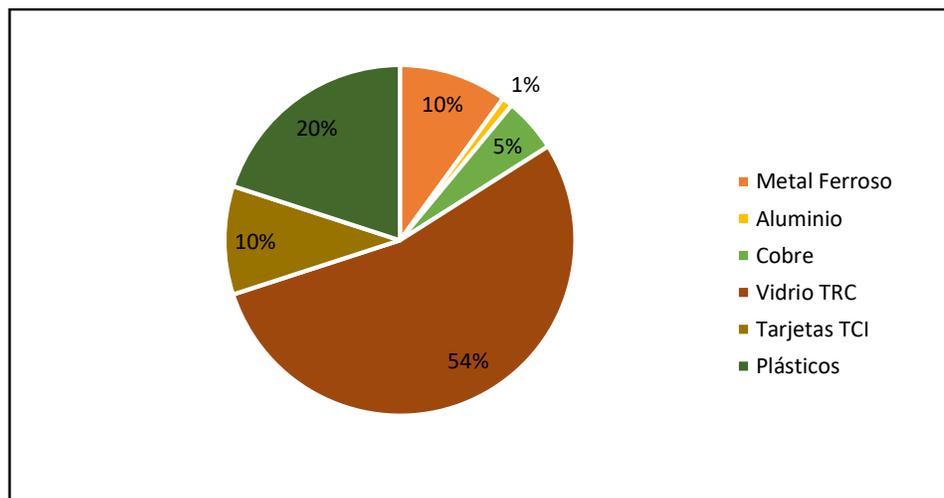
Figura 2.1 Porcentaje de material en la Unidad del Sistema



Fuente: Paredes Choque Edith, Reciclaje De Residuos Electrónicos En Computadoras De La Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, 2012.

Los materiales encontrados, se muestran en el Gráfico N° 2.1, Predomina los metales ferrosos con un 67%, seguido de las tarjetas impresas con el 13%. Otro elemento que se encuentra es el plástico, con un 9% y los materiales aluminio, cobre y otros materiales alcanzan 11%.

Figura 2.2 Porcentaje de material en el monitor



Fuente: Paredes Choque Edith, Reciclaje De Residuos Electrónicos En Computadoras De La Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, 2012.

Es grande la magnitud de la problemática del aprovechamiento inadecuado que se les da a las computadoras, cuando éstas cumplen con su vida útil. El 87,40% no cuentan con los componentes completos, el 12,6% tienen los componentes básicos para operar. Lo que nos demuestra que hay una gran cantidad de computadoras con componentes extraídos o extraviados, debido al cual han dejado de operar. Se caracterizó los residuos sólidos electrónicos generado por las computadoras, obteniendo como material mayoritario, metales ferrosos en US con el 67%, en teclados y mouse, el material plástico con el 85% y en monitores el de mayor predominancia es el vidrio con el 54%.

- **ROLANDO RAMOS OBREGON, CAMERO HERMOZA PEDRO** “Recuperación del Cobre de Placas Integradas por Tecnologías Metalúrgicas” (Revista) Cusco – Perú.

En la región del Cusco, se generan anualmente una enorme cantidad de residuos electrónicos y eléctricos que no son manejados conforme a la legislación ambiental vigente.

Desde el punto de vista ambiental estos materiales constituyen pasivos ambientales de enorme preocupación por lo que se necesita actuar con suma urgencia, a través de este trabajo se demuestra que separando polímeros de los metales es posible plantear un sistema de tratamiento de estos residuos para el reciclado como material secundario tanto para la industria polimérica como para la industria metálica.

Desde el producto calcinado sometido a molienda por pallaqueo se obtiene 123g de cobre que es el 11.54% del peso del producto calcinado y es de venta directa, también se obtiene metales como el Pb, Sn y Al y otro por un peso de 484.10 g., que también pueden ser vendidos por separado y representa el 45.24% y en la separación magnética 39.68g de Fe que es el 3.71%.

El material que se somete a lixiviación tiene una ley de cobre de 24.96%, en la lixiviación con ácido sulfúrico a 24 horas de operación se logra una extracción de 16.525%, esta extracción es bastante aceptable si se considera que se lixivió cobre metálico sin usar oxidantes y a temperatura ambiente.

2.3 Bases Teóricas

2.3.1 *Residuos peligrosos*

«Los residuos peligrosos, son elementos, sustancias, compuestos, residuos o mezclas que al finalizar su vida útil adquieren la condición de residuos o desechos y que independientemente de su estado físico, representan un riesgo para la salud o el ambiente, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas». En el caso de los residuos químicos peligrosos, son los establecimientos industriales, comerciales y de servicios los que generan los mayores volúmenes al desechar productos de consumo que contienen materiales

peligrosos, al eliminar envases contaminados con ellos, al desperdiciar materiales peligrosos que se usan como insumos de procesos productivos o al generar subproductos o desechos peligrosos no deseados en dichos procesos. Asimismo, los residuos biológico-infecciosos, se generan en mayor cantidad fuera de los establecimientos médicos o laboratorios, por el gran número de desechos contaminados que se genera por el tratamiento médico al que someten a los individuos infectados o enfermos en sus hogares o en donde abandonen materiales que hayan entrado en contacto con su sangre (o esputo en el caso de individuos tuberculosos). Es por las razones antes expuestas, que se hace esencial el conocimiento acerca de la peligrosidad y riesgo en el manejo de los residuos peligrosos de toda índole, así como saber qué medidas de protección se pueden adoptar para prevenir o reducir dicho riesgo”. (*Dirección General de Salud Ambiental, 2006, Manual de Difusión Técnica N° 01 Gestión de los Residuos Gestión de los Residuos Peligrosos en el Perú Peligrosos en el Perú, p.15, recuperado de <http://sial.segat.gob.pe/documentos/manual-tecnico-gestion-residuos-peligrosos-peru>*)

Entre estos residuos o desechos peligrosos se encuentran los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, esto debido a que ya no es posible su reciclaje y los componentes contaminantes que poseen deben enviarse a empresas para disponerlos en incineradores o rellenos sanitarios especiales. Los elementos y compuestos que los hacen peligrosos son: Berilio, Cromo Hexavalente, Cobre, Arsénico, Selenio, Antimonio, Mercurio (*Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2010*).

2.3.1.1 Residuos Eléctricos y Electrónicos

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) son todos aquellos productos eléctricos y electrónicos que han sido desechados o descartados, tales como: computadoras,

teléfonos, celulares, televisores y electrodomésticos, en términos generales comprende todos aquellos componentes, que forman parte del aparato en el momento que se desecha. La definición abarca los residuos procedentes tanto de hogares particulares como los de uso profesional, los residuos tecnológicos se caracterizan por su rápido crecimiento debido a la obsolescencia que están adquiriendo los dispositivos electrónicos y por la mayor demanda de éstos, entre otros factores su tratamiento inadecuado puede ocasionar graves impactos al medio ambiente y poner en riesgo la salud humana ya que contienen materiales potencialmente peligrosos tales como: plomo, mercurio y cromo presentes en circuitos impresos, pilas , etc.; sin embargo están fabricados con materiales valiosos por lo que el reciclaje de los equipos obsoletos proporcionan materias primas secundarias válidas para su utilización en el procesos de fabricación de nuevos equipos y la recuperación de metales valiosos, evitando así el uso de recursos naturales y acumulación de residuos en los botaderos. (<https://www.larioja.org/medio-ambiente/es/residuos/residuos-gestion-especial/raees/residuos-aparatos-electricos-electronicos>)

2.3.1.2 Manejo de Residuos Eléctricos y Electrónicos

Es importante el adecuado manejo de residuos eléctricos y electrónicos. Los RAEE son residuos muy complejos que se componen de varios materiales reciclables, pero también de sustancias potencialmente tóxicas que necesitan ser manejadas de manera ambientalmente amigable. Estas sustancias no se liberan durante su fase de uso sino al momento de extraer y recuperar los componentes y materiales reciclables y de valor. Es sumamente importante asegurar que éstos lleguen a tener un manejo diferenciado y especializado para garantizar la recuperación de los recursos secundarios contenidos y la disposición final adecuada de los componentes peligrosos.

El año 2012 el Poder Ejecutivo aprobó el Reglamento Nacional para la Gestión y Manejo de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), para regular el manejo, tratamiento y disposición final de estos materiales, algunos de cuyos componentes pueden resultar altamente tóxicos. De acuerdo con el reglamento RAEE, el consumidor o usuario final está obligado a hacer uso de los canales oficiales de retoma que se están estableciendo para la gestión de los RAEE. Es decir, lo debería entregar en una campaña oficial de recolección de RAEE, en un sistema colectivo de gestión o directamente a un gestor de RAEE autorizado. (Sistema Nacional de Información Ambiental, 2020)

2.3.1.3 Tarjeta de Circuitos Integrados

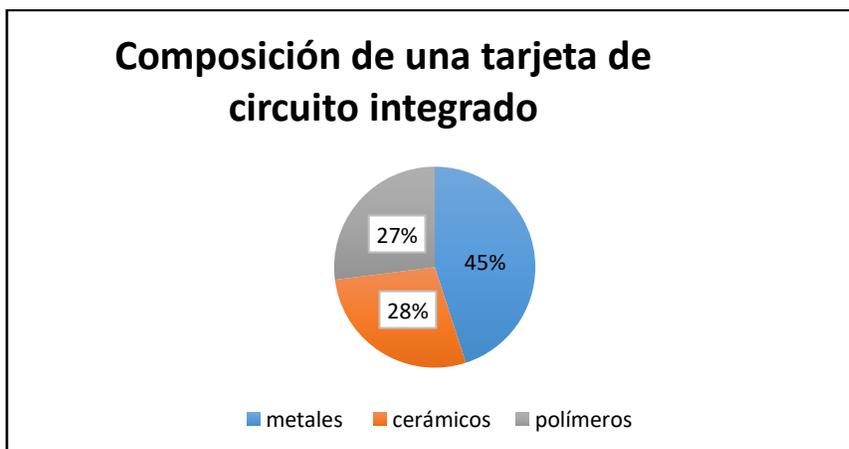
Las tarjetas de circuito impreso son la base de la industria electrónica, siendo una parte esencial de casi todos los AEE. Las TCI son placas de material aislante (plástico, baquelita, vidrio, etc.) y los metales tales como: Cu, Pb, Zn, Fe, Cd, Be, Cr, Au, Pt, Pd, y Ag, provista de pistas o caminos de cobre que sirven para interconectar los diversos componentes que constituyen el circuito en cuestión. En ella se encuentran las conexiones para los diferentes dispositivos periféricos como son: tarjetas de memoria RAM, tarjetas de sonido, discos duros, fuente de poder, etc. (Muller, 2012).

Las TCI representan entre el 3.1% y el 6.0% del total de los RAEE (Vidyadhar & Mehrotra, 2009), y son un material de interés creciente, no sólo por su contenido de metales, sino también por las complicaciones presentadas durante la recuperación de metales debido a su composición compleja y falta de métodos establecidos.

2.3.1.4 Composición de las Tarjetas de Circuito Integrado

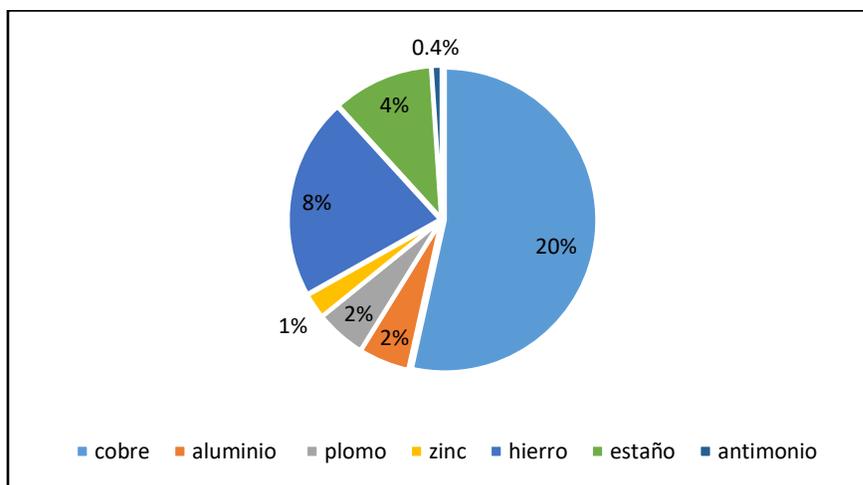
La composición de un TCI es 45% de metales, (21.3% Cu, 5.94% Sn, 3.2% Pb y 2.24% Fe, 0.025% Au, 0.1% Ag y 0.01% Pd), (Chatterje & Kumar, 2009) (Li, Lu, Guo, Xu, & Zhou, 2007), 27% de polímeros y 28% de cerámicos. Sin embargo, hay una gran variación en la composición de los residuos de TCI procedentes de diferentes aparatos, de diferentes fabricantes y de diferente edad. La concentración de cobre en las TCI es de alrededor del 20% en peso y tiende a permanecer constante (Harue, Tavares de Morales, Romano Espinoza, & Soares , 2011)

Figura 2.3 Composición de una TCI de una computadora



Fuente: (Chatterje & Kumar, 2009) (Li, Lu, Guo, Xu, & Zhou, 2007)

Figura 2.4 Composición metálica de una TCI de una computadora



Fuente: Luda, 2011

2.3.2 Bases legales del manejo del RAE.

La Ley 27314, Ley General de Residuos Sólidos, fue publicada el 10 de Julio de 2000.

El 23 de diciembre de 2016 se publicó el Decreto Legislativo N°1278 que aprueba la ley de gestión integral de Residuos sólidos y reemplaza a la Ley 27314.

El “Reglamento nacional para la gestión y manejo de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos”, aprobado el 27 de junio del 2012 mediante el decreto supremo N° 001-2012 MINAM.

Este Reglamento establece derechos y obligaciones para la adecuada gestión y manejo ambiental de los RAEE a través de las diferentes etapas de manejo, que son siete: generación, recolección, transporte, almacenamiento, tratamiento, reaprovechamiento y disposición final., también involucra el manejo responsable de RAEE, a fin de prevenir, controlar, mitigar y evitar

daños a la salud de las personas y el ambiente. (*Ley N° 27314, Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 10 de Julio de 2000*).

2.3.2.1 Gestión y manejo de RAEE en Cusco

Actualmente en la ciudad de Cusco no existen plantas de tratamiento de RAEE (Residuos de Aparatos de Eléctricos y Electrónicos), los equipos malogrados se disponen como residuo urbano, o los que todavía se pueden reutilizar, son regalados, donados o vendidos a recicladores que van de puerta en puerta.

En cumplimiento de lo estipulado en el reglamento, este año, el MINAM ha organizado una campaña de acopio de RAEE en el Cusco el 6 de septiembre de 2014, llegando a recaudar 11,7 toneladas de RAEE con la participación de la población, las instituciones privadas y las entidades estatales que constituye una de las campañas más exitosa de todas las llevadas a cabo con el liderazgo del MINAM.

La preocupación del municipio por el tratamiento adecuado de los RAEE se ha visto reflejado en que dentro del Plan de Desarrollo Urbano Cusco al 2023 aprobado por la Municipalidad Provincial del Cusco, se ha considerado una propuesta para la promoción de la gestión y manejo de la disposición final de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) teniendo en cuenta que en la provincia del Cusco no existe tecnología para el manejo de estos residuos, el Plan propone las siguientes acciones:

- Promover la implementación del Plan de Gestión y Manejo de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos en los gobiernos locales de la Provincia Cusco.

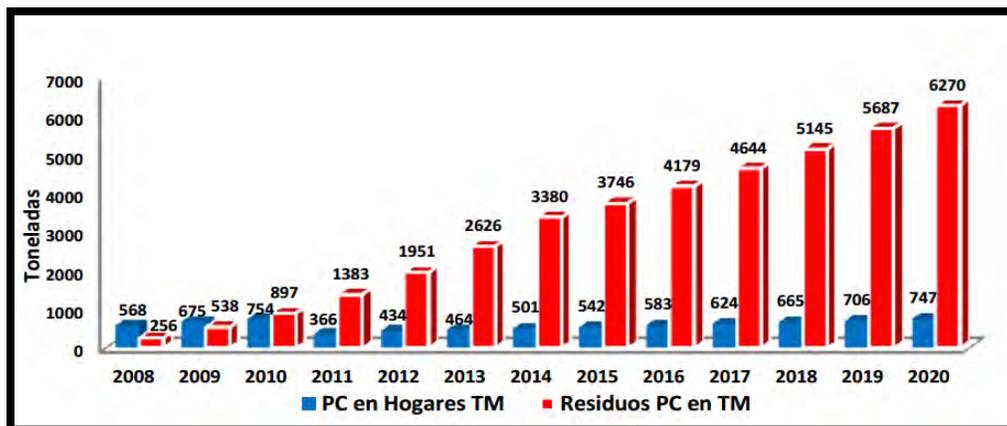
- Promover el manejo responsable de los RAEE, dando prioridad a la minimización y al reaprovechamiento mediante la reutilización, reciclaje y recuperación.
- Promover que las autoridades competentes se involucren en la sensibilización, promoción, difusión, control y fiscalización del manejo adecuado de los RAEE. Promover el enfoque de la responsabilidad compartida para la gestión integral de los RAEE, que comprende la responsabilidad extendida del productor para el manejo post-consumo de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) hasta su reaprovechamiento o disposición final.
- Promover la asociatividad público privada para el manejo ambiental adecuado de los RAEE, ponderando el rol de los diferentes actores (autoridades gubernamentales, productores, operadores de RAEE y usuarios), que intervienen en el ciclo de vida de los AEE. (*Diagnóstico situacional del manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en la ciudad de cusco, recuperado de la página web:<http://municusco.gob.pe/gerencias/WebPlanUrbano/Estrategia.php>, 12/12/2020*)

2.3.2.2 Situación actual de manejo de RAEE de PC, en la ciudad Cusco

En el Cusco, como en la mayoría de las regiones del país, no se cuenta con información precisa del manejo de los RAEE. La principal información disponible que se tiene es la data de cantidades de equipos de cómputo, celulares y demás AEE que se tienen como parte del equipamiento de los hogares de las Encuestas Nacionales llevadas a cabo por el INEI. En el siguiente gráfico 2.5 se muestra la demanda de Equipos de Cómputo (PC) en hogares de

la ciudad de Cusco, así como la generación de RAEE como producto del Ciclo de Vida Útil de la PC al cabo de 5 años.

Figura 2.5 PCs y RAEE PCs en Hogares de Cusco. Proyección 2014-2020



Fuente: Censos Nacionales de Población y Vivienda 1993 – 2007 (Equipamiento de Hogar) INEI 2007. Población proyectada al 2014 – Boletín Especial N° 18

2.3.2.2.1 Manejo de RAEE en Instituciones Públicas

A nivel de las instituciones públicas, los entrevistados confirmaron la existencia de RAEE (residuos de aparatos eléctrico y electrónico) en dichas instituciones, pero a su vez señalan que los procedimientos administrativos retrasan el proceso de disposición de los RAEE y aún se encuentran en proceso de inventariar los bienes calificados como RAEE, en la mayoría de los casos también se afirma que los operadores de RAEE debidamente autorizados no han mostrado aun su interés en solicitar la donación de los mismos. Sin embargo, a pesar de las dificultades administrativas y de tiempo, que se pueden ocasionar porque los operadores de RAEE están localizados en Lima, se han llevado a cabo donaciones de RAEE, o han culminado los procedimientos de baja.

2.3.2.2.2 Manejo de RAEE en Instituciones Privadas

En la ciudad de Cusco existen 5 371 instituciones privadas (empresas, escuelas, y universidades), que utilizan en su actividad diaria equipos de cómputo en oficinas y áreas operativas, así como las instituciones educativas tienen centros de cómputos implementados principalmente por adquisición propia. (*Diagnóstico situacional del manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos RAEE en la ciudad del Cusco*)

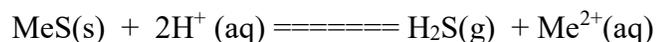
2.3.3 Lixiviación

La lixiviación, o extracción sólido-líquido, es un proceso en el que un disolvente líquido pasa a través de un sólido para que se produzca la disolución de uno o más de los componentes solubles del sólido, consiste en la remoción de una o varias sustancias solubles, mediante la acción de un agente lixivante que disuelve la sustancia o metal de interés, permitiendo su recuperación desde el mineral. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido. La lixiviación tiene una gran importancia en el ámbito de la metalurgia, ya que se utiliza frecuentemente en la extracción de algunos minerales como oro, plata y cobre.

La lixiviación es la primera etapa de cualquier proceso hidrometalúrgico. Éste es el término aplicado a la recuperación o disolución química de un metal a partir de un mineral utilizando el disolvente adecuado. En general, la lixiviación se aplica a los minerales que no pueden ser tratados con beneficio económico equivalente con métodos convencionales más desarrollados a escala comercial como la concentración por flotación o la fusión. La lixiviación es de un tipo u otro en función de la reacción química que la provoca. Según esto, el ataque químico de un mineral

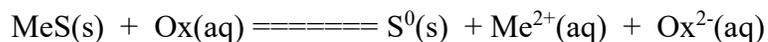
sólo se puede realizar mediante cualquiera de las tres acciones siguientes: acido-base, redox y complejante.

La primera de las anteriores acciones, acido-base, responde a una reacción general tipo:



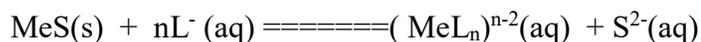
Donde para el ataque del citado sulfuro se debería utilizar un reactivo muy ácido, como el ácido sulfúrico, el clorhídrico, el nítrico, etc., o para otro tipo de compuestos, reactivos básicos como el hidróxido sódico, carbonato sódico, cal, amoníaco, etc.

La segunda acción que se puede ensayar es la redox. Recurriendo al mismo caso anterior de ataque de un sulfuro metálico, la reacción correspondiente a un ataque oxidante sería.



Donde el azufre sulfuro se puede oxidar a azufre elemental o a sulfato dependiendo de las condiciones de trabajo. Los oxidantes más conocidos y utilizados son el oxígeno atmosférico y el ion férrico.

Finalmente, es posible utilizar una acción complejante mediante reacciones del tipo:

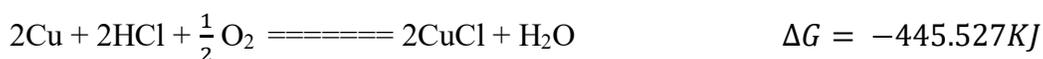
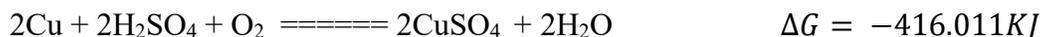


Aunque los complejantes más utilizados, como los iones cianuro, el amoníaco, los iones sulfato, etc., no son por si solos, tampoco suficientes para producir la lixiviación de las distintas materias primas.

La efectividad de cualquiera de las anteriores reacciones químicas depende de los parámetros y variables fundamentales de tipo químico que las condicionan. (*Ballester, A. Verdeja, L.2003, Metalurgia Extractiva, p.339. Editorial Síntesis*).

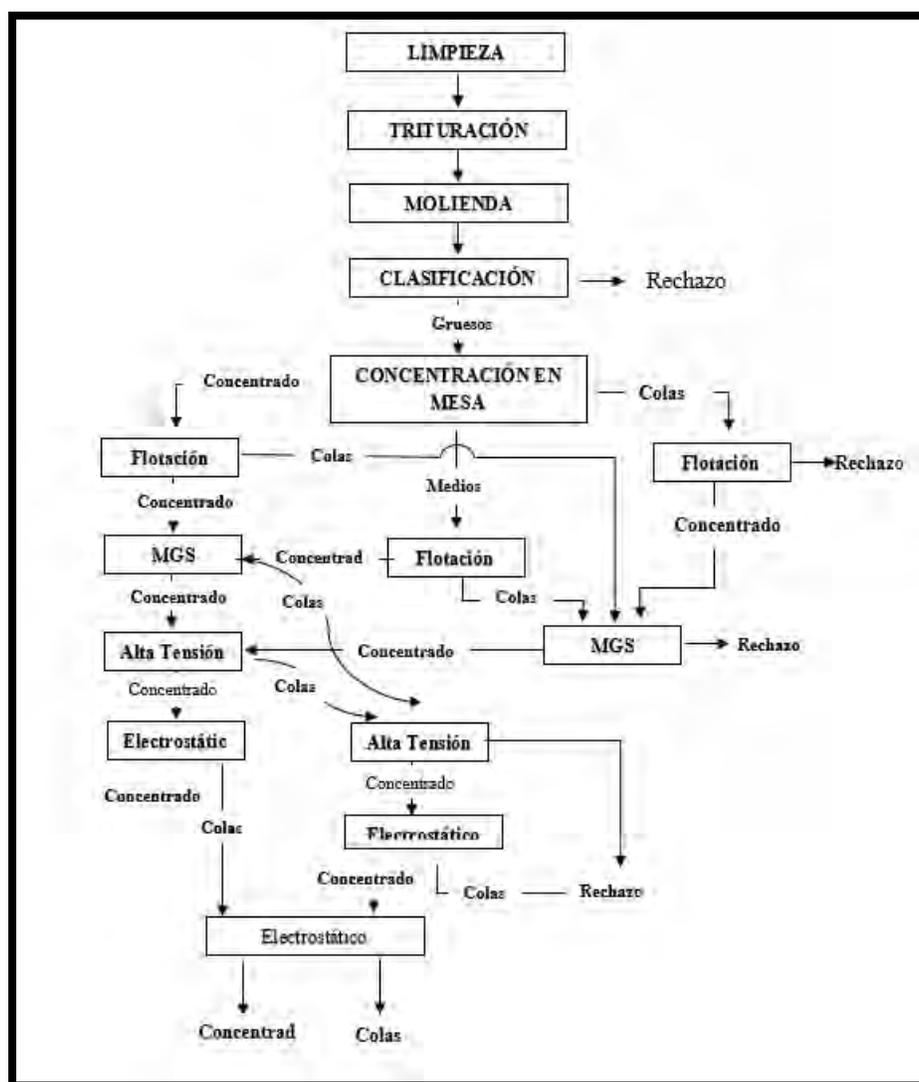
2.3.3.1 Lixiviación de metales

Dependiendo del metal deseado y su matriz original, se pueden usar diferentes solventes en el proceso de lixiviación, estos solventes se conocen como lixivante, los lixiviantes pueden ser ácidos o básicos, éstos varían en términos de pH, potencial redox o agentes quelantes, que pueden ayudar a aumentar la velocidad, o la selectividad de la disolución del metal deseado. La lixiviación química de metales implica distintos procesos usando ácido o ligando acomplejantes. Las técnicas de lixiviación de metales preciosos más comunes consisten en procesos usando cianuro, haluros, tiourea y tiosulfato (Pant et al., 2012). El cobre se puede lixiviar usando ácido sulfúrico, ácido hidroclicórico y ácido nítrico:



Park y Fray (2009) desarrollaron un método para recuperar metales con alta pureza en varias etapas como se muestra en la figura 2.6. Se realiza una lixiviación de plata, paladio y oro con agua regia a una razón fija de 1/20 (g/ml) entre metales y lixivante. Como la plata es relativamente estable en agua regia, se logra una extracción del 98% sin un tratamiento adicional.

Figura 2.6 Diagrama de flujo para el beneficio de polvos de TCI molidas



Fuente: Adaptado de Das et al. (2009).

Lo más común es fundir los residuos de TCI para eliminar los plásticos y obtener un fundido de los diferentes metales. Havlik et al. (2010) estudiaron la pirolisis y quemado como tratamientos previos a un proceso de lixiviación ácida. Con temperaturas superiores a 900 °C y durante 15 min de proceso se obtiene una remoción de plásticos del 35%. Durante este proceso el cobre se oxida lo que facilita la disolución posterior en ambientes ácidos no oxidantes. Se logra una recuperación de cobre en una solución 1 M HCl hasta del 98%(Havlik et al., 2011)

El ácido sulfúrico lixiviará la mayoría de los metales base de la matriz sólida, e incluso algunos de los metales preciosos. La elección de un lixivante es importante para lixiviar la cantidad máxima del producto deseado, pero también es importante evaluar qué otros metales irán a dar dentro de la solución (*recuperado 10/01/2021, <https://emew.com/es/lixivacion-en-metalurgia-y-en-la-recuperacion-de-metales>.*)

En esta etapa intervienen además del material sólido de origen, un agente lixivante (disolvente) que normalmente está disuelto en la solución acuosa y ocasionalmente un agente externo que actúa como oxidante o reductor y participa en la disolución del metal de interés. (Domic E, 2001)

2.3.3.2 Tipos de lixiviación

2.3.3.2.1 Lixiviación acuosa o natural

Este método de lixiviación es producido por las aguas de lluvia percolan en el yacimiento atacando las superficies expuestas y produciendo un lixivante con contenido variables de ácido, hierro e incluso cobre, este efecto ocurre en ciertas estaciones del año y zonas de producción como aguas de desagüe de minas.

La hidrometalurgia estudia todos los procesos extractivos que ocurren en medios acuosos, que permiten la extracción y obtención de metales y/o compuestos desde sus minerales o materiales de reciclaje (chatarras, escorias, cementos metálicos, barros anódicos, etc)

2.3.3.2 Lixiviación ácida

Es un proceso de extracción de sólido a líquido, también denominado proceso de disolución por reacción química, emplea reactivos selectivos que reaccionan con el mineral valioso y tratar de evitar que reaccione con la ganga, en la lixiviación ácida los reactivos más utilizados son: ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y ácido nítrico.

2.3.3.3 Métodos de lixiviación

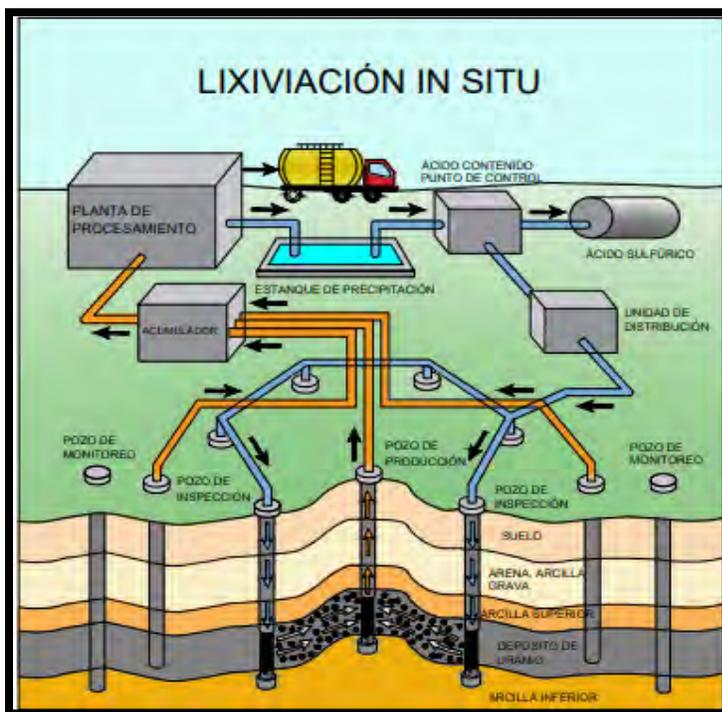
Los principales métodos de lixiviación de los minerales oxidados de cobre son:

2.3.3.3.1 Lixiviación IN - SITU

Este método consiste en la extracción de metales desde minerales, mediante el paso de soluciones a través de un cuerpo mineralizado (permeable) o con fracturas hechas con explosivos u otras técnicas.

Las fuentes son depósitos de baja ley, minas fuera de trabajo. Si el yacimiento ha sido tronado para fracturar el mineral.

Figura 2.7 Flow Sheet, lixiviación IN SITU

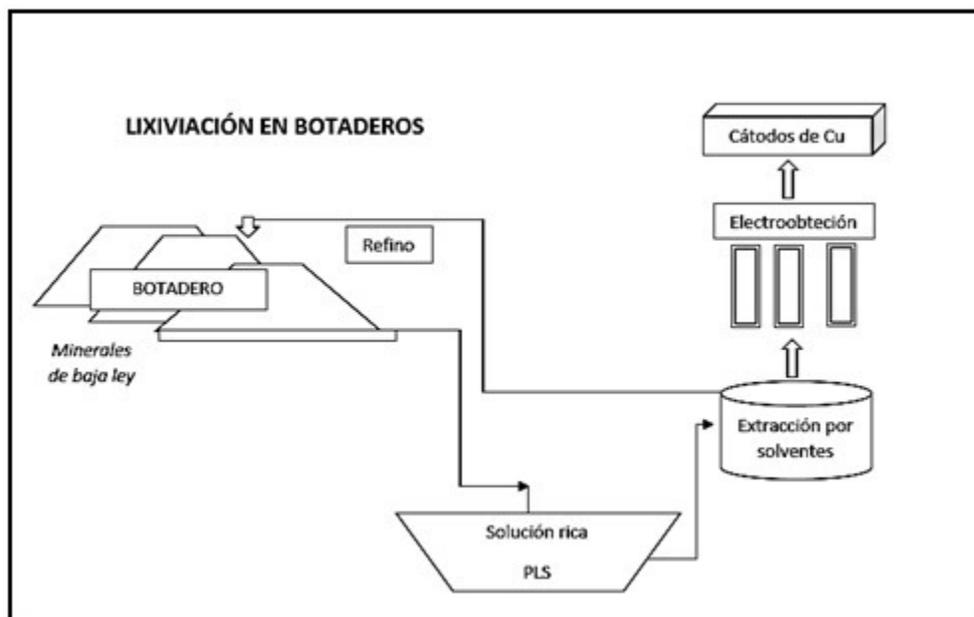


Fuente: Pannier (2009), *Lixiviación in Situ*, Recuperado: <https://mineriaenlinea.com/glosario/lixiviacion>.

2.3.3.3.2 Lixiviación en DUMP (botadero)

La lixiviación en Dump es usada para materiales de baja ley y desechos en mina separados de las operaciones en tajo abierto. La materia es amontonada en grandes botaderos y la solución de ácido sulfúrico es distribuida sobre la superficie y pasada a través del botadero. Para la recolección de soluciones que emergen del botadero se utilizan piscinas construidas en el terreno.

Figura 2.8 Flow Sheet, lixiviación por botaderos

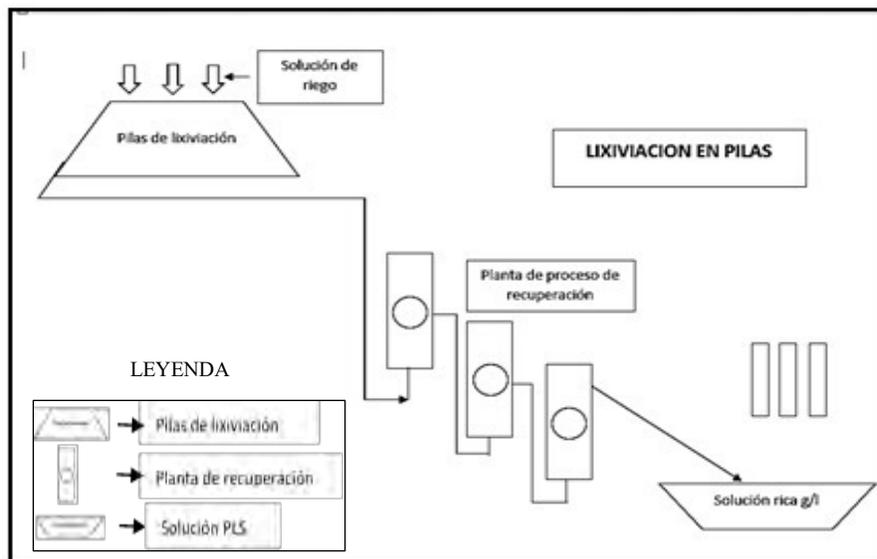


Fuente: Masari Chuquipuma, F. (2000). *Biolixiviación*, 141,
https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Biolixiviacion.pdf.

2.3.3.3 Lixiviación en HEAP (pila)

Llamada también lixiviación heap leaching, este método de lixiviación está basada en una solución lixivante que percola por gravedad a través de una cama de mineral que esta como lecho estático, la solución lixivante que contiene el reactivo químico reacciona químicamente en su trayecto al atravesar el mineral, al reaccionar disuelve los minerales y la solución gradualmente se va concentrando en iones metálicos disueltos.

Figura 2.9 Flow Sheet, lixiviación en pilas

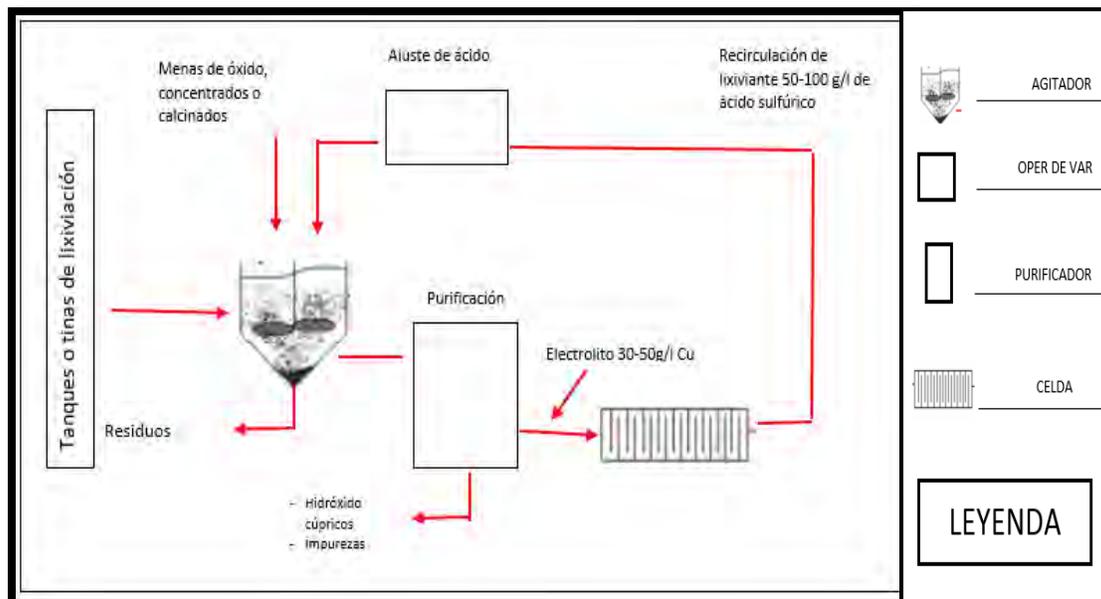


Fuente: Roberto Acevedo, Gonzalo Montes-Atenas. (2004). Hacia un Enfoque Dinámico de la Físico-Química <https://www.file:///C:/Users/siwar/Downloads/volumen-2.pdf>.

2.3.3.3.4 Lixiviación en VATS (tinajas)

La lixiviación en VATS es empleada para extraer cobre de minerales oxidados o de una mezcla de óxidos-sulfuros que contienen más de 0.5% de cobre soluble en ácido. Este es usado en lugar de la lixiviación en heap, si el material del mineral no es poroso y si el chancado es necesario para permitir un contacto adecuado entre la solución lixivante y los minerales de cobre.

Figura 2.10 Flow Sheet, lixiviación en VATS



Fuente: Roberto Acevedo, Gonzalo Montes-Atenas. (2004). *Hacia un Enfoque Dinámico de la Físico-Química* <https://www.file:///C:/Users/siwar/Downloads/volumen-2.pdf>.

2.3.3.3.5 Lixiviación por agitación

La lixiviación por agitación comprende la lixiviación rápida de minerales oxidados de cobre en partículas finas. (Ballester, A. Verdeja, L.2003, *Metalurgia Extractiva*, p.361. Editorial Síntesis).

2.3.3.4 Lixiviación por agitación

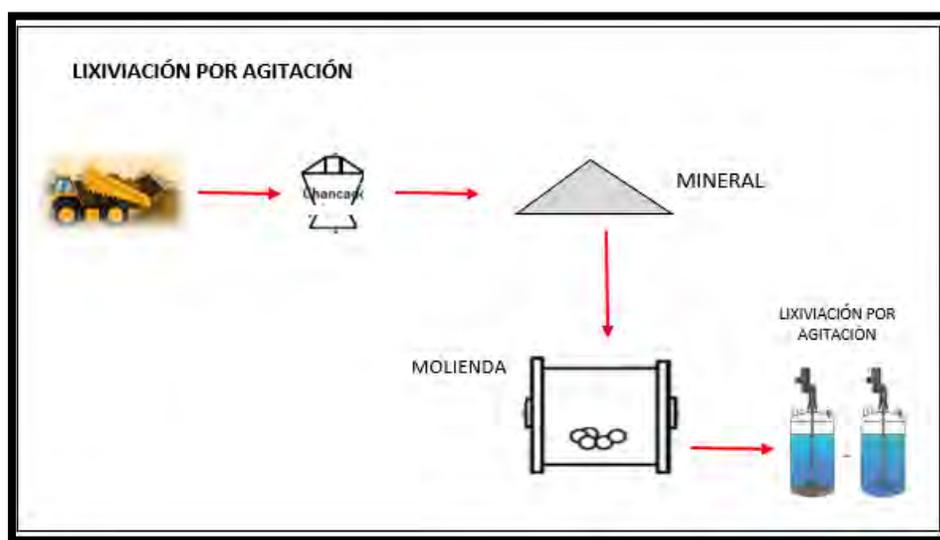
La lixiviación por agitación puede ser usada para recuperar cobre a partir de relaves de flotación y concentrados de flotación de óxidos sin reducción de tamaño adicional. La molienda es requerida para el tratamiento de minerales oxidados y de alta ley o que produzcan mucho contenido de finos que impidan la lixiviación por percolación.

La agitación de la pulpa durante la lixiviación tiene dos objetivos: mantener en suspensión los sólidos y favorecer la transferencia de materia.

Se recurre a la lixiviación por agitación mediante el burbujeo o bien la agitación mecánica para mantener la pulpa en suspensión hasta que se logre la disolución completa, siendo el tiempo de contacto de los sólidos con la solución del orden de horas comparado con el proceso de lixiviación en pilas que requiere meses, los agitadores mecánicos son simplemente impulsores colocados en el interior del tanque, mientras que los tanques agitados con aire son los tanques de tipo Pachuca. La lixiviación por agitación tiene como objetivo dispersar los sólidos en una emulsión y generar una suspensión homogénea y acelerar las velocidades de disolución incrementando la transferencia de masa, son estanques agitados mediante un impulsor o rotor en el fondo del tanque que recibe la rotación a través de un eje vertical, los agitadores pueden ser de hélice o de paleta plana.

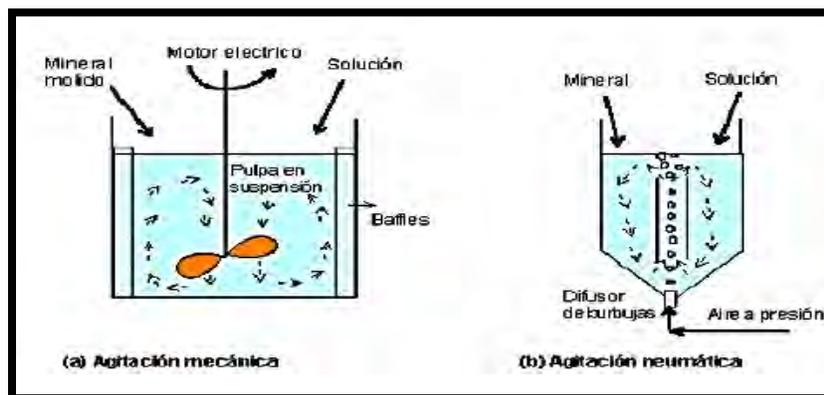
(Ballester, A. Verdeja, L.2003, Metalurgia Extractiva, p.369. Editorial Síntesis)

Figura 2.11 Flow Sheet, lixiviación por agitación



Fuente: Elaboración propia

Figura 2.12 celdas para la lixiviación por agitación



Fuente: Medina, J. (2016)

VENTAJAS

- ❖ Alta extracción del elemento a recuperar
- ❖ Tiempos cortos de procesamiento
- ❖ Proceso continuo permite una gran automatización
- ❖ Facilidad para tratar menas alteradas o generadoras de finos

DESVENTAJAS

- ❖ Mayor costo de inversión
- ❖ Necesita una etapa de molienda y una etapa de separación sólido-líquido.

2.3.3.5 Variables en el proceso de lixiviación

Para el análisis de las variables de la lixiviación por agitación se debe hacer confluir aspectos técnicos-operacionales y económicos, el análisis debe de realizarse considerando las extracciones del elemento de Cu, disolución de impurezas y consumo de reactivo del lixivante:

a) Porcentaje de sólidos

El % de sólidos debe de ser lo más alto posible de tal manera alcanzar una alta concentración del ión metálico en la solución, minimizar los costos de inversión en el circuito de lixiviación por menos capacidad volumétrica, reducir el costo.

b) Tamaño de partícula

Para el tamaño de partícula se debe de considerar un tamaño que no contenga un exceso de partículas gruesas ($> 2\text{mm}$) que reduzcan problemas en la agitación como el incremento de la potencia en la agitación y que por otra parte no contenga un exceso de finos $< 40\%$ que dificulten la separación sólido- líquido. El pequeño tamaño del sólido hace que la cinética de la operación sea rápida.

c) Concentración de reactivo

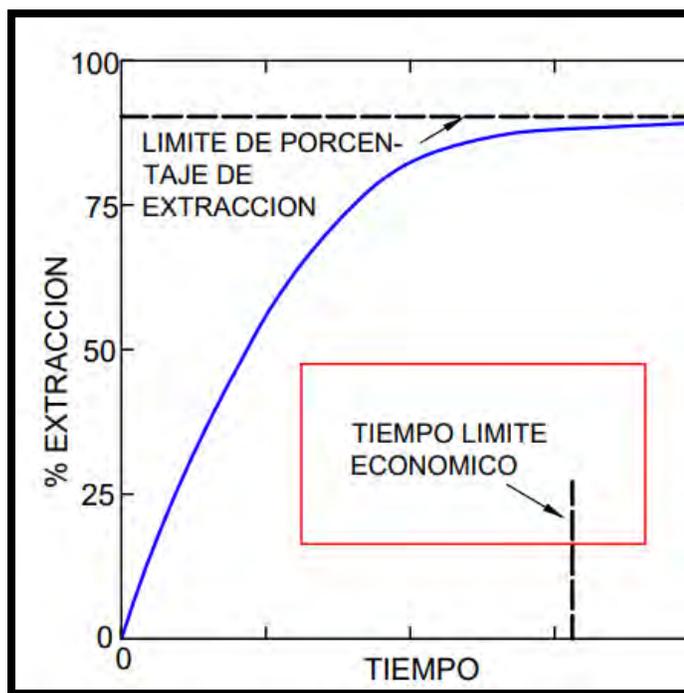
La concentración de reactivo debe ser optimizada según el tipo de operación y método de lixiviación. Por ejemplo, en la lixiviación por agitación de minerales oxidados de cobre se utilizan mayores concentraciones de ácido sulfúrico que en la lixiviación en pilas.

d) Tiempo de lixiviación

El tiempo de lixiviación se refiere al tiempo en el cual el mineral está en contacto con el líquido lixivante, es el tiempo necesario para que suceda la disolución del cobre, bajo ciertas condiciones del proceso de lixiviación. Todas las reacciones dependen del medio y de las condiciones bajo las cuales se realiza el proceso de extracción, es así que la cinética de extracción es una función del tiempo y ocurre de manera simultánea en forma independiente..

Como se observa en la fig. 2.13 el porcentaje de extracción es directamente proporcional al tiempo, a mayor tiempo, mayor extracción

Figura 2.13 curva % de extracción vs tiempo



Fuente: curva % de extracción vs tiempo. slideserve.com.
<https://www.slideserve.com/demont/m-todos-de-lixiviaci-n>

e) Temperatura

La temperatura en la que se realiza la lixiviación es a temperatura de ambiente, sin embargo, la lixiviación es más rápida si esta es sometida a altas temperaturas.

f) Velocidad de agitación

La velocidad de agitación debe ser lo suficientemente alta para mantener los sólidos en suspensión, para que no decanten, una velocidad de agitación alta tiende a favorecer la cinética de

la reacción, pero tiene un costo de energético apreciable, esta favorece también la disolución de gases en la solución.

2.3.3.6 EL PERÓXIDO DE HIDRÓGENO (AGUA OXIGENADA)

Es un líquido incoloro a temperatura ambiente con sabor amargo. El peróxido de hidrógeno es inestable y se descompone rápidamente a oxígeno y agua con liberación de calor. Aunque no es inflamable, es un agente oxidante potente que puede causar combustión espontánea cuando entra en contacto con materia orgánica.

El agua oxigenada, o peróxido de hidrógeno, es un compuesto que contiene los mismos elementos del agua, pero, con el doble oxígeno (H₂O₂) (Recuperado 20/01/2021, https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts174.html)

Propiedades físico-químicas

El peróxido de hidrógeno puro (H₂O₂) es un líquido denso y claro, con una densidad de 1,47 g/cm³ a 0 °C. El punto de fusión es de -0,4 °C, y su punto de ebullición normal es de 150°C.

Cuando es pura es un líquido espeso, incoloro, de olor nitroso, de sabor metálico desagradable, soluble en alcohol y éter; su densidad es 1,46, se congela a -1°.

Posee una temperatura de fusión=-0. 43° y una temperatura de ebullición=150°C. Su punto de ebullición es más alto que el del agua, así que las disoluciones se pueden concentrar por evaporación. A temperatura ambiente, es un líquido azul pálido casi incoloro y viscoso (consecuencia del enlace por puentes de hidrógeno, d = 1.44 g/cc). A concentraciones elevadas es extremadamente corrosiva y por tanto en esas condiciones debe ser utilizada con gran precaución.

Su formación, partiendo del agua ordinaria, es de carácter endotérmico, pues tiene lugar con absorción de calor, por lo que fácilmente se descompone en agua y oxígeno, es una sustancia oxidante. (Recuperado, 15/02/2021, Ecured, https://www.ecured.cu/Agua_oxigenada, 15/02/2021).

Reactividad

El peróxido de hidrógeno concentrado es una sustancia peligrosamente reactiva, debido a que su descomposición para formar agua y oxígeno es sumamente exotérmica. La siguiente reacción termoquímica demuestra ese hecho:



2.3.3.7 Reactivos de lixiviación.

Para que ocurra la lixiviación, debe emplearse un reactivo, llamado lixivante, cuyo objetivo es solubilizar en el medio acuoso el metal que se quiere recuperar. La selección del reactivo químico depende de su disponibilidad, costo, estabilidad química, selectividad y facilidad de producir, regenerar y recuperar el metal.

Cualquier reactivo químico, para ser usado en un proceso de lixiviación, debe cumplir con las siguientes características.

- Debe disolver las menas minerales con la rapidez suficiente para hacer comercialmente utilizable la reacción correspondiente. Pero al mismo tiempo, debe ser inerte con respecto a los componentes de la ganga. En situaciones donde hay un cierto ataque de la ganga, hay

un consumo excesivo del reactivo de lixiviación y, además el licor se carga en impurezas hasta concentraciones muchas veces molestas para el proceso.

- Debe ser barato por su fácil obtención en grandes tonelajes.
- Si es posible, se debe elegir de tal manera que facilite su generación en etapas posteriores del proceso hidrometalúrgico. (*Ballester, A. Verdeja, L.2003, Metalurgia Extractiva, p.379. Editorial Síntesis*).

Tipos de reactivo:

a) Reactivos ácidos

Los ácidos sulfúricos, clorhídricos y nítricos son los más utilizados. El primero es el más barato, aunque hay algunos problemas asociados con su uso. Además, no puede ser vertido en los cauces naturales y por tanto antes de hacer esta operación hay que neutralizar o cristalizar sus disoluciones y eliminarlo; ambas posibilidades son costosas. El ácido sulfúrico también compite con los reactivos básicos. El ácido clorhídrico ha sido utilizado también en algunos procesos. Por ejemplo, en el tratamiento por vía húmeda de las ilmenitas para obtener óxido de titanio. Finalmente, el ácido nítrico no se utiliza extensivamente, aunque está siendo utilizado en el tratamiento de los materiales nucleares y para disolver algunos sulfuros como la calcopirita.

b) Reactivos básicos

Los reactivos como el amoníaco, hidróxido sódico y carbonato sódico son los más utilizados. El hidróxido de sodio se utiliza en el tratamiento de las bauxitas mediante el procedimiento Bayer, éste es un buen ejemplo, casi único de lixiviación en ausencia de un oxidante.

➤ Reactivos salinos

En este grupo se debe hacer mención a los cianuros de sodio y potasio que conjuntamente con el oxígeno, se utilizan para lixiviar los minerales de oro y plata. Además, es necesario nombrar también las sales sulfatadas y cloruradas de los iones férricos y cúpricos que tienen, sobre todo las del primer metal, una amplia utilización a escala industrial por su carácter oxidante.

El potencial redox estándar para el sistema férrico/ferroso, según la tabla 2.1 es de +0.77, sin embargo, este valor se ha determinado en condiciones en las cuales no hay complicación del hierro y se extrapola a fuerza iónica cero. (Ballester, A. Verdeja, L.2003, *Metalurgia Extractiva*, p.379. Editorial Síntesis).

Tabla 2.1 Potencial correspondiente a distintos agentes oxidantes.

ITEM	OXIDANTE	SEMI-REACCIÓN	POTENCIAL (V)
01	CuCl ₂	+ Cl ⁻ + e ⁻ → CuCl	+0,54
02	Fe ³⁺	Fe ³⁺ + e ⁻ → Fe ²⁺	+0,77
03	Hg ²⁺	2Hg ²⁺ + 2e ⁻ → Hg ₂ ²⁺	+0,92
04	HNO ₃	NO ₃ ⁻ + 4H ⁺ + 3e ⁻ → NO + 2H ₂ O	+0,96
05	MnO ₂	MnO ₂ + 4H ⁺ + 3e ⁻ → Mn ²⁺ + 2H ₂ O	+1,20
06	O ₂	O ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ → 2H ₂ O	+1,23
07	K ₂ Cr ₂ O ₇	CrO ₇ ²⁻ + 14H ⁺ + 6e ⁻ → 2Cr ³⁺ + 7H ₂ O	+1,33
08	Cl ₂	Cl ₂ + 2e ⁻ → 2Cl ⁻	+1,35
09	NaClO ₃	ClO ₃ ⁻ + 6H ⁺ + 6e ⁻ → Cl ⁻ + 4H ₂ O	+1,45
10	KMnO ₄	MnO ₄ ⁻ + 8H ⁺ + 5e ⁻ → Mn ²⁺ + 4H ₂ O	+1,49
11	HClO	2HClO + 2H ⁺ + 2e ⁻ → Cl ₂ + 2H ₂ O	+1,63
12	H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → 2H ₂ O	+1,77
13	H ₂ SO ₅	SO ₅ ²⁻ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → SO ₄ ²⁻ + H ₂ O	+1,81
14	K ₂ S ₂ O ₈	S ₂ O ₈ ²⁻ + 2e ⁻ → 2SO ₄ ²⁻	+2,00
15	O ₃	O ₃ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → O ₂ + H ₂ O	+2,07

Fuente: Ballester Antonio, Verdeja L. F., Sancho J, Madrid, 2003;341

En situaciones prácticas, se puede definir un nuevo potencial redox E_p^0 , que es de gran importancia; debido a que, por otra parte no existan datos de coeficientes de actividad para disoluciones de alta fuerza iónica, se emplea normalmente la ecuación del Nernst modificada en función de las concentraciones.

$$E = E_p^0 + \frac{0.059}{n} \log \frac{[Ox]}{[Red]} \quad \text{Ec 2.1}$$

Donde los paréntesis son las concentraciones y E_p^0 es el potencial redox del sistema para unas condiciones específicas de la disolución y en donde la relación de concentraciones es la unidad

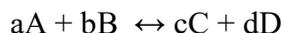
➤ **Reactivos gaseosos**

Los dos gases que comúnmente se utilizan en los procesos de lixiviación son el oxígeno y el cloro. El oxígeno puede participar directamente en el proceso de oxidación o puede aparecer desempeñando un papel secundario como reactivo de regeneración del hierro férrico que se utiliza como oxidante. No obstante, esta regeneración del hierro también se puede hacer con otros reactivos oxidantes como peróxido de manganeso o el clorato sódico, o incluso con la participación de bacterias ferro-oxidantes o el uso de la corriente eléctrica en celdas especiales de electro lixiviación.

La utilización directa de oxígeno puede lograrse a través del aire o del oxígeno puro, a presión atmosférica o en autoclaves (altas presiones y temperaturas). De esta última forma se propician mejoras cinéticas de reacción al haber una mejor solubilización del oxígeno en la disolución.

2.3.3.8 Reacciones químicas

La lixiviación es de un tipo de reacción química. Según esto el ataque químico de un mineral sólo se puede realizar mediante cualquiera de las tres acciones siguientes: ácido-base, redox y complejante.



Donde:

A,b,c,d: coeficientes estequiométricos

A, B: Reactantes

C, D: Productos

El valor de la energía libre estándar de la reacción (G°) puede determinarse conociendo los potenciales químicos estándares o las energías libres de formación de los reactantes y productos:

$$E = E_p^0 + \frac{0.059}{n} \log \frac{[Ox]}{[Red]} \quad \text{Ec 2.2}$$

Donde ν_i son los coeficientes estequiométricos de la reacción.

En este caso:

$$\Delta G^\circ = cx\mu^0(C) + dx\mu^0(D) - ax\mu^0(A) - bx\mu^0(B) \quad \text{Ec 2.3}$$

Donde:

ΔG° : Variación de energía libre estándar de la reacción (cal/mol o joule/mol)

a,b,c,d: coeficientes estequiométricos

$\mu^\circ(A), \mu^\circ(B), \mu^\circ(C), \mu^\circ(D)$: Energías libres estándar de formación o potenciales químicos de los compuestos que participan en la reacción.

El valor de ΔG° nace de la segunda ley de la termodinámica.

$$\Delta G^\circ = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{Ec. de Helmholtz - Gibbs}). \quad \text{Ec 2.4}$$

Donde:

ΔH : Cambio de entalpía.

ΔG° : Cambio de energía libre estándar

T : Temperatura

ΔS : Cambio de entropía

En hidrometalurgia es importante conocer el significado de la energía libre porque su valor nos determina si una reacción ocurre o no o está en equilibrio.

$\Delta G^\circ = -$ (negativo), la reacción ocurre espontáneamente.

$\Delta G^\circ = +$ (positivo), la reacción no ocurre espontáneamente.

$\Delta G^\circ = 0$ (cero), implica que la reacción está en equilibrio, vale decir que los productos y reactantes se forman simultáneamente con igual velocidad. En cambio ΔH (entalpía) indica si la reacción es endotérmica o exotérmica.

De igual manera el valor de ΔS (entropía) de una reacción química le afecta a la energía libre, mientras mayor entropía tenga, mayor desorden habrá, por lo tanto, le desfavorece a la energía libre; si la entropía es menor no le afecta gradualmente a la energía libre.

La energía libre en cualquier otra condición que no sea la estándar, se puede determinar mediante la fórmula siguiente.

$$\Delta G_r = \Delta G^\circ + RT \ln K \quad \text{Ec 2.5}$$

Donde:

ΔG° = energía libre estándar de la reacción.

K: ley de acción de masas de los productos y reactantes.

T: temperatura absoluta.

R: constante de gases ideales

Utilizando los estados estándares, la variación de energía libre de una reacción se puede expresar como:

$$\Delta G_r = \Delta G_r^0 + RT \ln \frac{a_C^c \cdot a_D^d}{a_A^a \cdot a_B^b} \quad \text{Ec 2.6}$$

Donde:

a_C, a_D, a_A, a_B : actividades de los productos y reactantes.

T= temperatura (°K)

R = constante universal de los gases 1.987 cal/mol. K)

Si el sistema estuviera en equilibrio entonces tendremos $\Delta G_r^0 = 0$

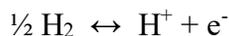
Se puede decir que, si la temperatura aumenta, la actividad disminuye. Según experiencias industriales la lixiviación ácida se realiza a temperaturas bajas (medio ambiente).

2.3.3.8.1 Reacciones tipo redox

Son aquellas reacciones que envuelven transferencia de electrones. Por ejemplo.



Expresada como reacciones de semi celda tenemos:



El ión cúprico Cu^{2+} , se transforma en el ión cuproso Cu^+ (reducción), y la media molécula neutra e hidrogeno $(\text{H}_2)_{(g)}$, en ión hidrógeno H^+ , cargado positivamente (oxidación).

Considerando la relación entre la energía química y la energía eléctrica, obtenemos la ecuación de la energía libre de Gibbs.

$$-\Delta G^0 = nE^0F \quad \text{Ec 2.7}$$

Donde:

$n = N^\circ$ de electrones que intervienen

$F =$ constante de Faraday (96500 C/mol)

$E^0 =$ potencial o fuerza electromotriz

2.3.3.9 Termodinámica de la lixiviación

La termodinámica del proceso de lixiviación del mineral aglomerado, estudia las reacciones químicas y electroquímicas, dependiendo de las especies mineralógicas presentes producidas durante el proceso, las cuales llegan al equilibrio químico y electroquímico respectivamente. La termodinámica es importante para explicar la lixiviación de los distintos minerales, y para definir las condiciones de precipitación de los metales a partir de los licores de lixiviación e incluso para explicar otros ámbitos de los materiales metálicos como su mineralización geológica y su corrosión.

Los parámetros más importantes son el voltaje, relacionado con la energía libre y el pH, la forma más conveniente de representar la termodinámica de sistemas acuosos es en forma gráfica con los diagramas Potencial - pH, también llamados Diagramas de Pourbaix. Estos diagramas son una herramienta gráfica útil para la presentación de los datos termodinámicos asociados con los sistemas acuosos. Cubren condiciones desde muy oxidantes a muy reductoras y hacen posible la visualización de los campos termodinámicos de existencia de fases, tanto estables como metaestables que pueden existir entre sólido líquido y gases en equilibrio a una determinada temperatura y para unas determinadas condiciones de concentración.

➤ **Diagramas Potencial – pH**

Los diagramas Pourbaix, también conocidos como diagramas potencial-pH, son representaciones gráficas de la estabilidad de un metal y sus productos de corrosión en función del potencial y el pH (acidez o alcalinidad) de la solución acuosa. Tales diagramas se construyen a partir de cálculos termodinámicos basados en la ecuación de Nernst y los datos de solubilidad de diversos compuestos metálicos y muestran tres zonas bien definidas: una zona de inmunidad, donde el metal permanece en forma metálica; una zona de corrosión, donde el metal pasa a una forma iónica; y una zona pasiva donde el metal forma capas de productos con el Oxígeno y el Hidrógeno, que podrían inhibir el proceso corrosivo. Estos diagramas son ampliamente utilizados, porque nos permite la visualización de reacciones sin tener que recurrir al cálculo termodinámico para los fenómenos que ocurren en medio acuoso, como por ejemplo para predecir la dirección espontánea de reacciones, estimar la estabilidad y la composición de los productos de corrosión, predecir los cambios ambientales que eviten o reduzcan la corrosión y para

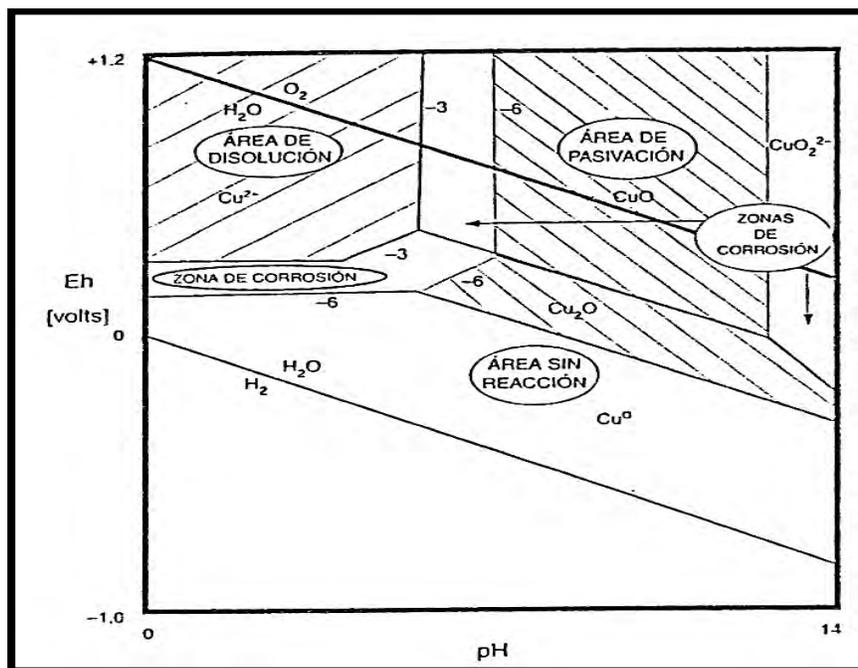
determinar las condiciones termodinámicas óptimas de lixiviación, como para discutir la precipitación de especies metálicas en disolución.

Una importante restricción en la aplicación práctica de los diagramas termodinámicos, es que predicen tendencias a que ocurran fenómenos, pero no la velocidad con que éstos puedan ocurrir.

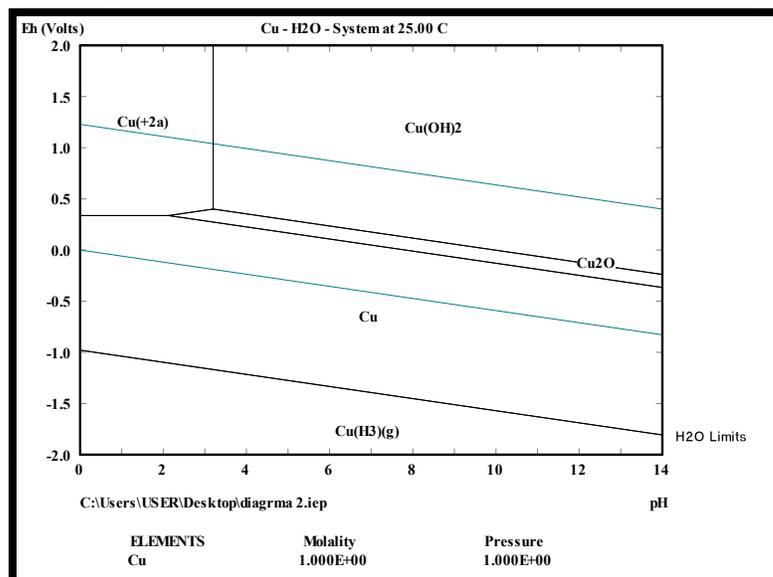
Aún con las limitaciones de los diagramas de Pourbaix, los mismos pueden ser usados como una ayuda práctica en el diseño de experimentos adecuados para la predicción de la corrosión.

Sin embargo, si se desea la solución por ejemplo en la extracción hidrometalúrgica de un metal valioso, 10^{-3} M es un valor mucho más efectivo y cercano a las condiciones reales.

Los valores intermedios entre los anteriores representan condiciones de corrosión, pero son claramente insuficientes para asegurar una materia prima ha sido lixiviada.

Figura 2.14 Sistema Cu- H₂O

Fuente: Muñoz, M. Construcción de los diagramas de Pourbaix para los sistemas metalurgia, <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13709/Construcci%C3%B3n%20diagramas%20de%20Pourbaix.pdf>

Figura 2.15 Sistema Cu- H₂O

Fuente: Elaboración propia

2.3.3.10 Cinética del proceso de lixiviación

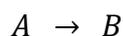
La finalidad de la cinética química es medir la rapidez de las reacciones químicas y encontrar ecuaciones que relacionen la rapidez de una reacción con las variables experimentales.

Experimentalmente la velocidad de una reacción puede ser descrita a partir de las concentraciones de las especies involucradas en la reacción y una constante k , sin embargo, esta puede depender de numerosos factores como el uso de catalizadores, temperatura, etc. El hecho de que una reacción sea termodinámicamente posible ($\Delta G < 0$), no es suficiente para predecir si la reacción va pasar en una escala de tiempo razonable. Eso depende de la cinética de reacción. Este factor es muy importante para la concepción y la evaluación de la rentabilidad económica de todos los procesos hidrometalúrgicos. También en las plantas en operación, optimizar la cinética resulta generalmente un mejoramiento del proceso.

De esta forma, los procesos finales de una operación hidrometalúrgica van a estar condicionados generalmente por cláusulas de tipo cinético.

La cinética nos da información sobre el tiempo que dura una reacción química, vale decir nos determina la velocidad con que ocurre el cambio químico.

En una reacción química siempre hay reactantes y productos. Si la cinética evalúa algunos productos, implica que el producto se incremente con el tiempo, dicho de otro modo que su cinética estará dada por la velocidad de aparición, su cinética es positiva.



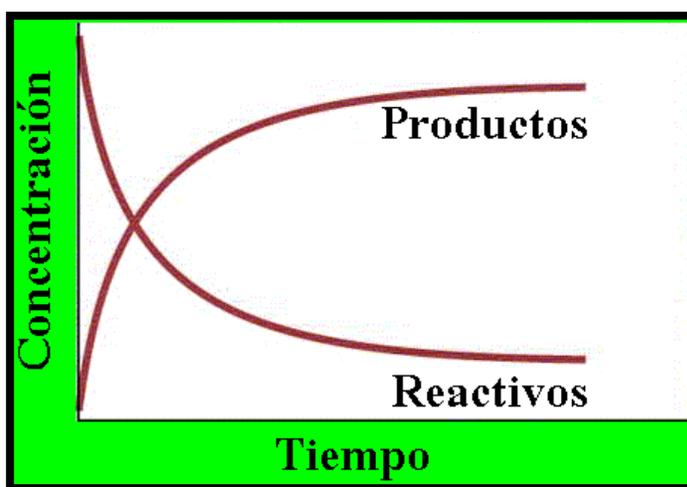
$$\frac{d[B]}{dt} > 0$$

Si la cinética, evalúa un reactante, su concentración disminuirá en función al tiempo, su cinética estará dada por la velocidad de desaparición y su cinética será negativa.

$$\frac{d[A]}{dt} < 0$$

A continuación, se muestra una gráfica de la variación de un producto y reactante en función del tiempo:

Figura 2.16 Gráfica de la cinética de un producto y reactante en función del tiempo



Fuente: *Cinética de Lixiviación*. (2010). *Conceptos de Química*.
<http://conceptosdequimica.blogspot.com/2014/07/cinetica-quimica-en-la-industria.html?m=1>

Interpretando la figura 2.16 con respecto al producto, la pendiente será positiva conforme pase el tiempo, el cobre aparecerá cada vez más en la lixiviación de un mineral oxidado. En los primeros momentos la velocidad de reacción es alta y al finalizar el experimento la velocidad es lenta. Si se tomara en cuenta el ácido sulfúrico que es el reactante, conforme pasa el tiempo el ácido se consumirá, la concentración del ácido disminuirá gradualmente por tanto la pendiente será negativa.

Si se supone una reacción en una sola fase:



La medida más útil de la velocidad de reacción del reactivo A es: Velocidad de desaparición de A, se observa que es una medida intensiva

$$-r_A = \frac{1}{v} \frac{dN_A}{dt} = \frac{\text{cantidad de A que desaparece} \left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3 * \text{s}} \right]}{(\text{volumen})(\text{tiempo)}} \quad \text{Ec 2.8}$$

Además, las velocidades de reacción de todos los puntos implicados en la reacción están relacionadas mediante:

$$-\frac{r_A}{a} = -\frac{r_B}{b} = \frac{r_R}{r} = \frac{r_S}{s} \quad \text{Ec 2.9}$$

La experiencia ha demostrado que en la velocidad de reacción influyen la composición y la energía del material. Energía significa la temperatura (energía cinética debida al movimiento aleatorio de las moléculas), intensidad de luz dentro del sistema (esto podría afectar la energía entre átomos), intensidad de campo magnético.

2.3.3.10.1 Reacción homogénea – heterogénea

➤ Cinética homogénea

Es aplicable a procesos que se realizan en una sola fase, vale decir que pueden ocurrir en estado líquido o también reacciones que pueden ocurrir en el estado gaseoso. Todos los productos y reactantes pertenecen a una sola fase. Las reacciones homogéneas son generalmente más rápidas que las reacciones heterogéneas, ya que necesitan transporte de masa en una sola fase y que las especies en solución reaccionan rápidamente.

➤ **Cinética heterogénea**

Esta cinética está referida a reacciones químicas que se presentan en más de una fase o estado.

En toda investigación de la cinética de la hidrometalurgia, se mide la concentración de la especie, el valor a diversos tiempos, y con los datos cinéticos obtenidos se deberá determinar el orden de reacción. Los parámetros cinéticos característicos del sistema en estudio, y como objetivo último los mecanismos de reacción. Sobre esta base, y como etapa posterior, los resultados obtenidos podrán ser utilizados para la optimización de los procesos, como también para el diseño de reactores hidrometalúrgicos.

2.3.3.10.2 Velocidad de una reacción

La velocidad de una reacción V es el número de moles transformados por unidad del tiempo del componente “ i ” involucrado en la reacción química.

Es importante conocer la velocidad en la que se produce una determinada transformación químico-físico, para una cinética lenta se requiere equipos de mayor tamaño, con altas inversiones. En casos de cinética rápida los equipos serán de menores tamaños y por lo tanto las inversiones disminuirán.

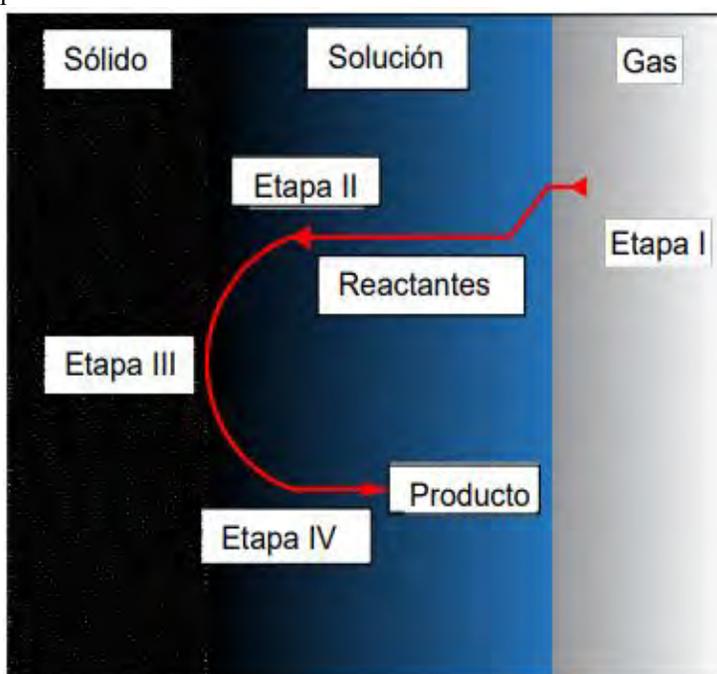
En una reacción heterogénea es importante conocer los mecanismos controlantes de la cinética de procesos más o menos complejos para poder acelerar el proceso.

2.3.3.11 Etapas de una reacción

Los sistemas hidrometalúrgicos se caracterizan por ser sistemas heterogéneos, cuando sus reacciones tienen lugar en una interface en la cual ocurre transferencia de materia de una fase a

otra. Las reacciones heterogéneas son controladas por la velocidad de la reacción química o por la transferencia de masa de los diversos reactantes hacia la superficie de contacto de dos fases. En la figura 2.17 se muestra el modelo simplificado de lixiviación de disolución completa del mineral. El caso representa la disolución de especies puras que no forman residuos sólidos como producto de la reacción.

Figura 2.17 Esquema de una reacción de lixiviación en pilas con disolución completa del mineral.



Fuente: Marco Surco, 2012,

Las etapas principales de una reacción son:

En la etapa I el transporte de masa de los reactantes gaseosos a través de la interfase gas - líquido y posterior disolución (cuando es el caso).

En la etapa II el transporte de masa de los reactantes a través de la interfase solución - sólido, hacia la superficie del sólido.

En la etapa III la reacción química o electroquímica en la superficie del sólido, incluyendo adsorción y desorción en la superficie del sólido y/o a través de la doble capa electroquímica.

En la etapa IV el transporte de masa de las especies producidas a través de la interfase hacia el seno de la solución.

La etapa controlante de la reacción es la velocidad más lenta. El control de la reacción global puede ser:

- Por transporte de masa (etapa I, II o IV).
- Por reacción química (etapa III).
- Mixto.

Las reacciones heterogéneas implican el transporte de masa a través del límite entre dos fases, lo que a veces es la etapa controlante de las reacciones.

2.3.3.11.1 Modelo matemático de la cinética

"Un modelo matemático es cualquier sistema completo y compatible de ecuaciones (estructuras) matemáticas, diseñadas para que se correspondan con alguna entidad química, física, biológica, social, psicológica o conceptual, tal vez, incluso, otro modelo matemático". La ecuación matemática general utilizada para describir la cinética de una reacción química es como se muestra:

$$v_i = KC_1^{n_1}C_2^{n_2} \quad \text{Ec 2.10}$$

Donde v_i es la velocidad de reacción, k es la constante de velocidad de reacción, C es la concentración de reactantes y n es el orden de la reacción. En el caso de que exista sólo un reactante en solución, la ecuación 2.11 se puede simplificar de la siguiente manera:

$$v_i = -KC^n \quad \text{Ec 2.11}$$

$$v = \frac{1}{v} \frac{dN}{dt} = \frac{1}{V} \cdot \frac{d(C \cdot V)}{dt} = \frac{dC}{dt} \quad \text{Ec 2.12}$$

La ecuación 2.13 nos muestra que la velocidad de reacción es proporcional a la concentración del reactante, elevado al orden de la reacción. Esta expresión puede ser integrada para mostrar la evolución de la concentración con el tiempo para una cierta constante de velocidad y un cierto orden de reacción. La mayoría de reacciones químicas en la lixiviación que minerales oxidados de cobre son de primer orden. Si consideramos ello ($n=1$), integramos la ecuación 2.13 así como se muestra:

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = - \int_0^t k \cdot dt \quad \text{Ec 2.13}$$

$$C_{(t)} = C_0 \cdot e^{-kt} \quad \text{Ec 2.14}$$

En la ecuación 2.15 observamos una constante "k", llamada constante de velocidad. Svante Arrhenius, en 1889 descubrió que la velocidad de las reacciones químicas aumenta con la temperatura en una relación proporcional a la concentración de moléculas existentes.

La dependencia de la constante de velocidad de una reacción química con la temperatura a la que se lleva a cabo esta reacción es plasmada en un modelo matemático, llamado ecuación de Arrhenius, la que se muestra a continuación:

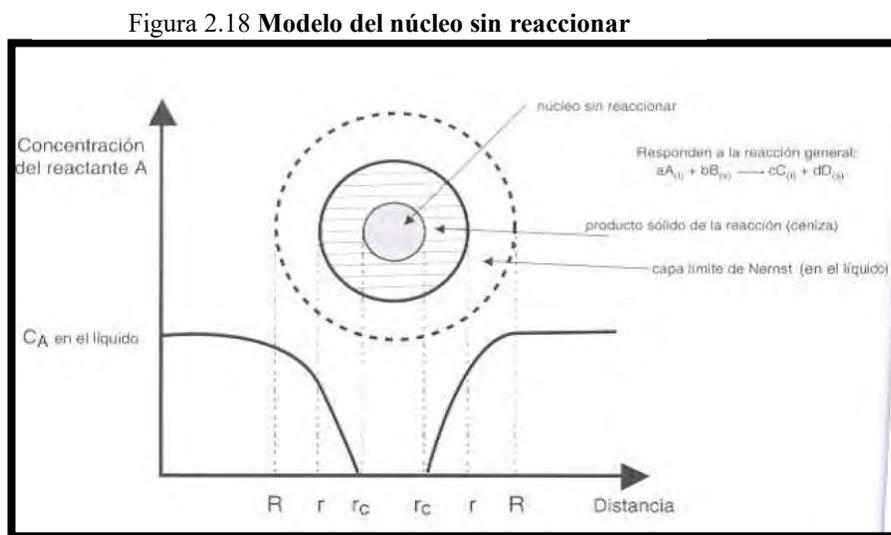
$$K = A \cdot e^{\frac{E_a}{RT}} \quad \text{Ec 2.15}$$

Donde K es la constante de velocidad. A es la constante de Arrhenius, R es la constante de los gases, E_a es la energía de activación y T es la temperatura. El mecanismo de reacción durante la etapa de lixiviación puede ser estudiado desde los conceptos de constante de velocidad (cinética)

y energía de activación (E_a), La energía de activación puede ser deducida, a partir del gráfico logaritmo natural de k ($\ln k$) versus el inverso de la temperatura absoluta ($1/T$).

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad \text{Ec 2.16}$$

Por otra parte, existen también los casos en que al ir reaccionando a un reactante (A) con el sólido (B), se disuelve solo una parte de este (C) y otros compuestos quedan como producto sólido de la reacción (D). A este producto sólido inerte (D), normalmente poroso, se le conoce con el nombre de “ceniza”. De esta forma, los reactantes (A) que viene a continuación deben atravesar difundiendo a través de la zona del nuevo sólido producido (ceniza D) hasta alcanzar la interfase de la reacción (en B). Esta va avanzando hacia el interior del núcleo sin reaccionar (B) en la forma que se muestra a continuación, en la Figura N° 2.18



Fuente: Domic M. – 2001:118

a) en primer lugar, que la reacción en la superficie de contacto – de radio r_c – fuese tan rápido que la concentración del reactante en ese punto se $C_A = 0$. Es decir, el control es difusional. En este caso se tendrá que:

$$-\frac{dNA}{dt} = 4\pi R^2 QA = 4\pi r^2 QA = \text{constante} \quad \text{Ec 2.17}$$

El flujo molar de reactantes es constante, ya que pasa la misma cantidad de moles a través de todos los radios hasta la superficie de la esfera reaccionante de radio r_c . Además, si el coeficiente de difusión es D , la densidad de difusión del reactante A se puede expresar como:

$$QA = Ddc/dr \quad \text{Ec 2.18}$$

Esto se puede combinar con la expresión anterior, resultando:

$$-\frac{dNA}{dt} = 4\pi r^2 Ddc/dr \quad \text{Ec 2.19}$$

E integrando a través de la capa de residuos sólidos (cenizas), resulta:

$$-\frac{dNA}{dt} \int_R^{r_c} \frac{dr}{r^2} = 4\pi D \int_{C_A=C_{As}}^{C_{Ac}=0} dc_A \quad \text{Ec 2.20}$$

O sea:

$$-\frac{dNA}{dt} \left[\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R} \right] = 4\pi DC_{As} \quad \text{Ec 2.21}$$

Ahora bien, la velocidad así calculada corresponde a un cierto momento en el proceso de reacción de esa partícula, es decir, la ecuación es válida para un cierto radio r_c dado.

Este último varía con el tiempo, a medida que avanza la reacción. Por lo tanto, para obtener una expresión global habría que integrar en el tiempo. Sin embargo, tenemos tres variables (t , N_A , y r_c), luego corresponderá expresarlos en función de las otras.

Para el sólido B:

$$NB = \rho_B V \quad \text{Ec 2.22}$$

Dónde:

ρ_B = Densidad molar de B expresada en [moles B/dm³sólido)

V = Volumen del sólido (dm³sólido)

$$dN_B = -bdNA = -\rho_B dV = -\rho_B d\left(\frac{4}{3}\pi r c^3\right) = -4\pi\rho_B r c^2 dr c \quad \text{Ec 2.23}$$

Reemplazando:

$$-\rho_B \int_{r_c=R}^{r_c=r_c} \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R}\right) r_c^2 \times dr_c = bDC_A \int_0^t dt \quad \text{Ec 2.24}$$

Luego resulta:

$$t = \frac{r_b R^2}{6bDC_{AS}} \left\{ 1 - 3 \left(\frac{r_c}{R}\right)^2 + 2 \left(\frac{r_c}{R}\right)^3 \right\} \quad \text{Ec 2.25}$$

Expresión que muestra como r_c disminuye con el tiempo.

Para la reacción total se tiene que: $r_c = 0$ y $t = \tau$, por lo tanto:

$$\tau = \frac{\rho_B R^2}{6bDC_{AS}} \quad \text{y: } \frac{t}{\tau} = 1 - 3 \left(\frac{r_c}{R}\right)^2 + 2 \left(\frac{r_c}{R}\right)^3 \quad \text{Ec 2.26}$$

Ahora bien, si X_B es el grado de conversión, entonces:

$$(1-X_B) = \frac{\text{volumen de nucleo sin reaccionar}}{\text{volumen inicial}} = \frac{4/3\pi r_c^3}{4/3\pi R^3} = \frac{r_c^3}{R^3} \quad \text{Ec 2.27}$$

Luego:

$$\frac{t}{\tau} = 1 - 3(1-X_B)^{2/3} + 2(1-X_B) \quad \text{Ec 2.28}$$

b) en segundo lugar, podemos elaborar el caso del control por reacción química, es decir: la reacción química es lenta. Asumiremos una reacción de primer orden. Por lo tanto, no se forman gradientes de concentración entre R y r_c , y tenemos:

$$-\frac{1}{4\pi r_c^2} \frac{dN_B}{dt} = -\frac{b}{4\pi r_0^2} \frac{dN_A}{dt} = bK_r C_{AS} \quad \text{Ec 2.29}$$

Expresando ahora N_B en función de r_c , resulta:

$$-\frac{1}{4\pi r_c^2} \rho_B 4\pi r_c^2 \frac{dr_c}{dt} = -\rho_B \frac{dr_c}{dt} = bK_r C_{AS} \quad \text{Ec 2.30}$$

Integrando:

$$-\rho_B \int_R^{r_c} dr_c = bK_r C_{AS} \int_0^t dt \quad \text{Ec 2.31}$$

Resulta:

$$t = \frac{\rho_B}{bK_r C_{AS}} (R - r_c) \quad \text{Ec 2.32}$$

Y para una conversión total: $r_c = 0$ y $t = \tau$ Ósea:

$$t = \frac{\rho_B R}{bK_r C_{AS}} \quad \text{Ec 2.33}$$

Es decir: $\frac{t}{\tau} = 1 - \frac{r_c}{R} = 1 - (1 - X_B)^{1/3}$ Ec 2.34

CAPITULO III

HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 *Hipótesis general*

- Mediante la lixiviación ácida por agitación de tarjetas de circuitos integrados se logra extraer un 60 % de cobre.

3.1.2 *Hipótesis Específicas*

- Se obtiene una mejor extracción de cobre empleando una concentración de agua oxigenada al de 30%.
- La concentración óptima de ácido sulfúrico para una mejor extracción es de 350 g/L.
- Empleando un tiempo de 12 horas de lixiviación se obtiene un buen porcentaje de extracción del cobre.

3.2 Variables

3.2.1 *Identificación de variables*

3.2.1.1 Dependientes

- Porcentaje de extracción.

3.2.1.2 Independientes

- Concentracion de agua oxigenada.
- Concentracion del ácido sulfúrico.
- Tiempo de lixiviación ácida.

3.2.1.3 Indicadores

- Porcentaje.
- Gramos/litro
- Horas

3.2.2 Operacionalización de variables

Tabla 3.1 Operacionalización de variables

OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	TIPOS DE VARIABLES	VARIABLES	CONCEPTO	INDICADORES
Extraer el cobre de tarjetas de circuitos integrados de computadoras mediante el proceso de lixiviación ácida por agitación, en la ciudad de Cusco	Determinar la concentración de agua oxigenada para una mejor extracción.	Dependiente	Porcentaje de extracción	Es el porcentaje de metal valioso que se extrae de una muestra.	Porcentaje (%)
	Determinar la concentración de ácido sulfúrico adecuado para una mejor extracción	Independiente	Concentración de agua oxigenada	Compuesto químico que funciona como catalizador para acelerar la oxidación del proceso.	Porcentaje (%)
	Determinar el tiempo óptimo del proceso de lixiviación para una mayor extracción.	Independiente	Concentración de ácido sulfúrico	Es la relación que hay entre la cantidad del soluto y la cantidad del solvente.	Gramos por litro (g/L)
			Tiempo de lixiviación	Es el tiempo necesario para lograr una mayor extracción del cobre en el proceso de lixiviación.	Horas(h)

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV

METODOLOGÍA

Para este trabajo de investigación se procedió a la recolección de CPU de computadoras para luego seleccionar manualmente las tarjetas de circuitos integrados obteniendo un total de 9.675 kg, posteriormente realizamos la separación de componentes metálicos, polímeros, y componentes electrónicos teniendo como resultado un peso total de 7.105 kg, seguidamente se empezó con la reducción de tamaño utilizando cizallas, molino, etc.

Se realizó el análisis granulométrico obteniendo tamaños menores y mayores a 4.75 mm de TCI, se procedió a realizar el muestreo por cuarteo para obtener una muestra representativa y mandar al “Laboratorio Analíticos del Sur” para el análisis químico, obteniendo una ley de cabeza, de 24.6 % de cobre, así mismo se realizó pruebas exploratorias preliminares donde se replantearon nuestras variables: tiempo de lixiviación, concentración de ácido sulfúrico y concentración de agua oxigenada.

4.1 Diseño de Investigación:

Utilizamos el diseño factorial como estructura de investigación, éste es la combinación de 2 o más diseños simples o (unifactoriales), es decir el diseño factorial requiere el manejo simultáneo de 2 o más variables independientes llamados factores en un mismo estudio de investigación. El trabajo de investigación se realizó de forma experimental, el cual tiene como objetivo la recuperación del cobre por lixiviación, se determinará la significancia relativa de las variables en estudio y de los modelos matemáticos empíricos con el enfoque de la caja negra. Eligiendo el diseño factorial de 2^k como se ve en la tabla N°4.1

Tabla 4.1 Plan de pruebas experimentales mediante el diseño factorial 2^3 .

N	X_1	X_2	X_3	Y
(1)	-	-	-	Y_1
a	+	-	-	Y_2
b	-	+	-	Y_3
ab	+	+	-	Y_4
c	-	-	+	Y_5
ac	+	-	+	Y_6
bc	-	+	+	Y_7
abc	+	+	+	Y_8

Fuente: Elaboración propia

Donde X_1 , X_2 , X_3 son las variables independientes correspondientes a la concentración de agua oxigenada, concentración de la solución lixivante y el tiempo de lixiviación respectivamente y “Y” es la variable respuesta correspondiente al porcentaje de extracción de cobre en la lixiviación.

4.1.1 Tipo y Nivel de Investigación

- Este trabajo es de carácter tecnológico donde se aplicó conocimientos de hidrometalurgia y a su vez se realizó, estudios exploratorios, para identificar la problemática de los circuitos integrados, estudios correlacionales, en las que se estudiaron las relaciones entre variables dependientes e independientes, estudios explicativos el cual nos permitirá conocer el porqué de los hechos estableciendo relaciones de causa y efecto.

- El nivel de investigación es experimental a nivel de laboratorio y teórica. Mediante este proceso obtendremos y describiremos las variables que influyen en el proceso de lixiviación.

4.2 Población y Muestra

4.2.1 Población

Todos los materiales de los circuitos integrados de las computadoras que se encuentran en depósitos, entidades, domicilios, etc., que son generadas en la ciudad del Cusco.

4.2.2 Muestra

Se logró recolectar un total de 9.675 kg de TCI, que se usaran como material de estudio del trabajo de investigación.

4.3 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

➤ **TÉCNICA**

- Investigación bibliográfica.
- Pruebas experimentales de laboratorio.
- Entrevistas para la recolección de información y procesamiento de datos.

➤ **INSTRUMENTOS**

- Avances teóricos, revisión de páginas web, revisión de seminarios de tesis y tesis.
- Balanzas, cizalla, tijeras, reactores, reactivos, instrumentos de laboratorio, etc.
- Cuestionarios, guías de análisis de observación, programas de diseño factorial 2ⁿ (MINITAB Y EXCEL), Word.

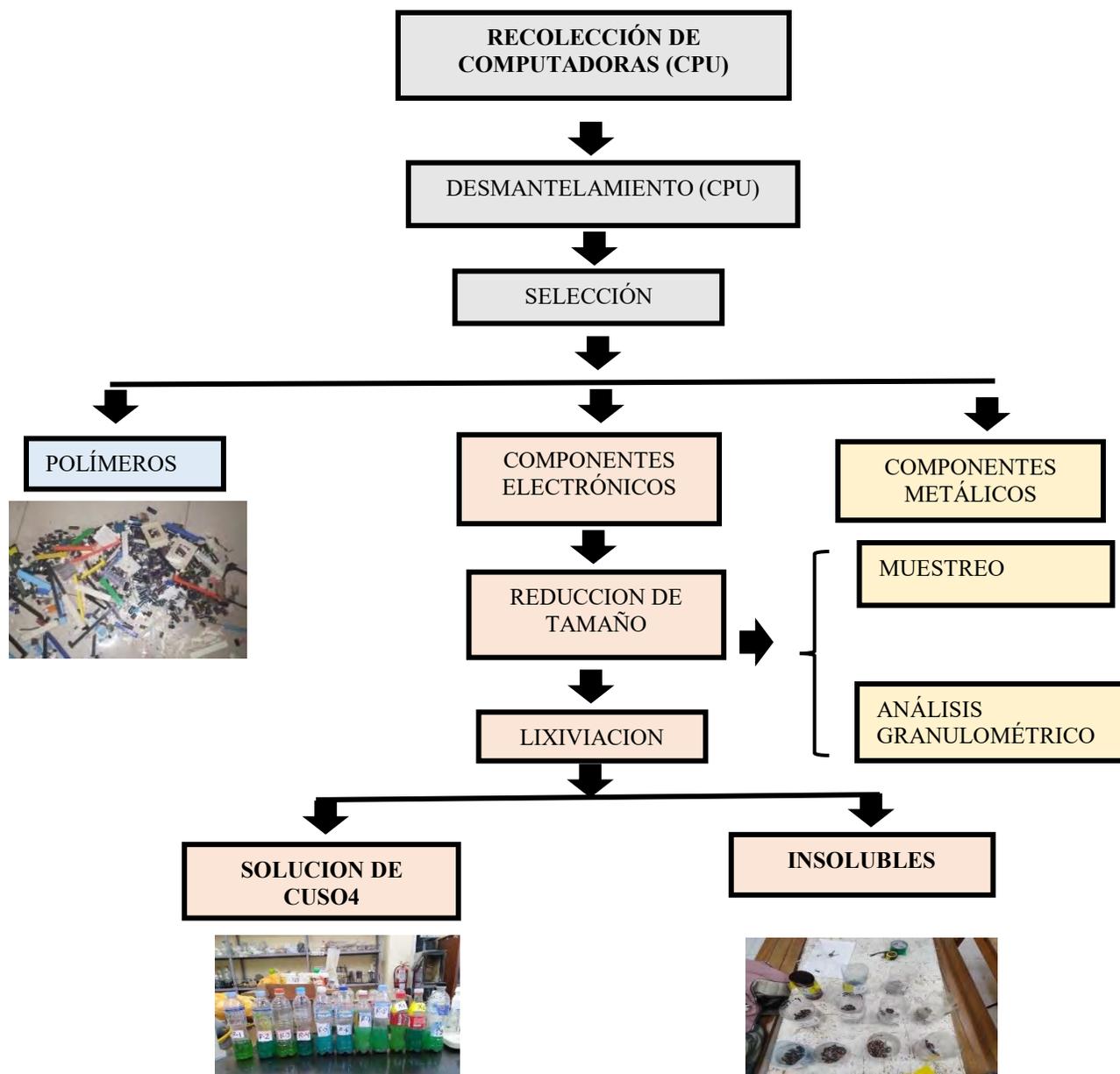
CAPÍTULO V

PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES Y ANALISIS RESULTADOS

5.1 Introducción

El siguiente diagrama muestra el procedimiento de la parte experimental del trabajo de investigación.

Diagrama 5.1 Resumen del procedimiento



Fuente: Elaboración propia

5.2 Recolección de TCI de Computadoras.

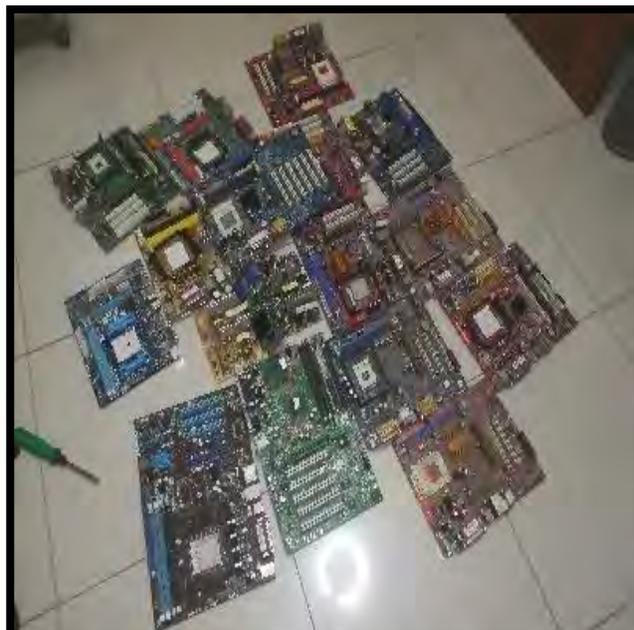
La recolección de tarjetas de circuito interno se realizó en la ciudad de Cusco, se recolectó 20 CPU, para su posterior desmantelamiento y extraer las TCI de cada CPU. (Ver figura 5.1 y 5.2), obteniendo un peso total de 9.675 kg. (Ver tabla 5.1).

Figura 5.2 Separación de las tarjetas del CPU



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.1 Tarjetas de Circuito Interno



Fuente: Elaboración propia

5.3 Separación manual de elementos metálicos y polímeros.

Las tarjetas de circuito interno están compuestas por elementos metálicos, polímeros y cerámico, la separación se realizó manualmente, donde utilizamos alicates, tijeras, desarmadores, etc. Todas estas partes retiradas comprendieron aproximadamente un 25% del total de las TCI como se muestra en la figura 5.3 y 5.4.

Figura 5.3 Separación por pallequeo



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.4 Polímeros



Fuente: Elaboración propia

El objetivo de esta separación es reducir el contenido de polímeros, cerámicos, etc, de las TCI y quedarnos con los componentes metálicos para su posterior tratamiento y extracción de cobre.

5.4 Reducción de tamaño de TCI de computadoras

Se redujo el tamaño aproximadamente a $\frac{1}{2}$ ", utilizando una cizalla para metales y materiales rígidos, como se muestra en la fig. 5.5

Figura 5.5 Reducción de tamaño con cizalla



Fuente: Elaboración propia

En este proceso se pudo seguir separando los polímeros que no se pudieron extraer en la separación manual, obteniendo un peso total de 4.870 kg de muestra. (Ver tabla 5.1)

Tabla 5.1 Peso de las placas

PESO INICIAL (kg)	PESO DE POLIMEROS (Kg)	PESO FINAL (Kg)
9.675	4.805	4.87

Fuente: Elaboración propia

Por la composición de las TCI, no se pudo reducir de tamaño en las chancadoras y molinos que existen en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, ya que al ser sometidos a estos equipos solo se laminaban; por lo que buscamos otras alternativas, como el molino de granos.

5.5 Muestreo por cuarteo de la muestra de TCI

En el muestreo por cuarteo, se toma una muestra representativa del total de material.

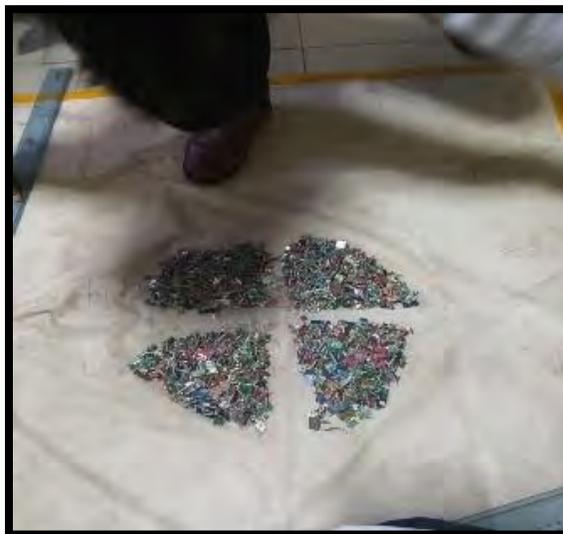
- Primero sobre una superficie se forma con el material un montón cónico, que se va mezclando homogéneamente para formar un nuevo montón, esta operación se tiene que realizar varias veces para obtener una mezcla homogénea.
- Se procede a distribuir marcando la superficie en forma de cruz perpendiculares, que deben cortarse exactamente en el centro del montón, los cuatro cuadrantes tienen las mismas dimensiones, se procede a separar los cuadrantes opuestos utilizando una brocha y espátulas, para luego el restante volverlas a mezclar y repetir el procedimiento, hasta obtener la cantidad de muestra deseada.

Figura 5.6 Preparación de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.7 Cuarteo



Fuente: Elaboración propia

5.6 Análisis Químico

El objetivo del análisis químico de la muestra es determinar el contenido metálico de las tarjetas de circuito integrado (ver tabla 5.2), así mismo determinar la ley de cabeza o el contenido de cobre presente en la muestra (Ver tabla 5.3). Se tomó una muestra de 130 gr, el cual se envió a “Laboratorios Analíticos del Sur”.

Tabla 5.2 Contenido metálico de TCI

ELEMENTO METÁLICO	PPM
Ag	363.19
Al	>10000
B	3441.70
Ba	3931.62
Be	A < 0.64
Bi	72.79
Ca	>10000
Cd	0.82
Co	2.97
Cr	40.70
Cu	>10000
Fe	4485.58
Ga	a < 1.60
In	a<0.40
K	173.30
Li	11.27
Mg	551.85
Mn	78.25
Mo	3.70
Na	704.62
Ni	1186.79
P	58.23
Pb	>10000
Sb	759.14
Se	a>0.64
Sn	>10000
Sr	263.57

Te	a>0.80
Ti	419.39
Tl	a>0.64
V	a>0.64
Zn	6300.16

Fuente: Laboratorio Analíticos del Sur

Tabla 5.3 Contenido de cobre en la muestra

PESO DE MUESTRA	NOMBRE DE MUESTRA	CU%
130.g	Placas de circuito interno	26.40

Fuente: Laboratorio Analíticos del Sur

5.7 Análisis Granulométrico

Para el análisis granulométrico se tomó una muestra de 2250 g., el cual tamizamos y obtuvimos diferentes tamaños como se puede observar en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Análisis granulométrico

N°	MALLA	PESO RETENIDO (g)	% PARCIAL RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO PASANTE
	ABERTURA (um)				
1/4	6350	528.7	23.52	23.52	76.48
4	4750	517.8	23.04	46.56	53.44
6	3350	304.7	13.56	60.12	39.88
8	2380	106.6	4.74	64.86	35.14
12	1700	154.1	6.86	71.72	28.28
14	1180	181.8	8.09	79.81	20.19
16	1000	40.8	1.82	81.63	18.37
20	850	106.6	4.74	86.37	13.13
28	600	113.3	5.04	91.41	8.59
-28		193.3	8.59	100	0
		2247.7	100		

Fuente: Elaboración propia.

El análisis granulométrico se realizó para poder replantear nuestras variables en cuanto al tamaño de partícula, se seleccionó dos grupos, partículas > a 4.75 mm y partículas < a 4.75 mm.

5.8 Determinación gravedad específica de la muestra.

El objetivo de determinar la gravedad específica de la muestra, permitirá hallar la densidad de la pulpa, con el que podremos calcular el peso de la muestra, el volumen de ésta y el volumen de la solución lixivante.

En el proceso de lixiviación por agitación sirve para dimensionar el volumen de las celdas de lixiviación.

Figura 5.8 Determinación de la gravedad Especifica



Fuente: Elaboración propia

La gravedad específica (adimensional) de los sólidos está dada por la siguiente expresión:

$$Ge = \frac{W}{W + W_1 - W_2} \quad \text{Ec 5.1}$$

Donde:

Ge: es gravedad específica

W: peso de la muestra

W_1 : peso de la fiola + agua

W_2 : Peso de la fiola + agua + muestra

A. MATERIALES Y EQUIPOS

- Fiola de 100ml.
- Balanza analítica
- Embudo.
- Muestra de TCI
- Piseta
- Agua destilada.

B. PROCEDIMIENTO

- Pesamos la fiola más agua (W_1) = 163.6.
- Agregamos la muestra pesada sobre 1/2 de volumen de agua de la fiola.
- Agitamos la fiola.
- Adicionamos agua poco a poco hasta aforar.
- Pesamos la fiola contenida de muestra más agua (W_2).
- Calculamos el valor de la gravedad específica.

C. RESULTADOS

Se realizaron tres pruebas en las mismas condiciones para obtener un resultado más certero, como se muestra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Determinación de la gravedad específica

Nº de pruebas	W, peso de la muestra (g)	W_1 , peso de agua + la fiola (g)	W_2 , peso de agua + fiola + muestra (g)	Gravedad Específica
1	5.00	163.60	167.70	5.50
2	5.00	163.60	167.50	4.54
3	5.00	163.60	167.20	3.57
PROMEDIO	5.00	163.60	167.50	4.54

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando en la Ec. 5.1

$$Ge = \frac{5g}{5g+163.6g-167.5g} = 4.54 \quad \longrightarrow \quad Ge = 4.54$$

Este resultado nos permitirá realizar los cálculos posteriores para las pruebas experimentales como: determinar la constante de equilibrio.

5.9 Preparación de la pulpa para la alimentación al agitador.

Se preparó la pulpa a 20% de sólidos:

Si: $Ge = 4.5$

➤ **Constante de equilibrio:**

$$k = \frac{Ge - 1}{Ge} \quad \text{Ec 5.2}$$

Reemplazando datos en la ecuación 4.3

$$k = \frac{4.54 - 1}{4.54} = 0.77$$

➤ **Densidad de pulpa:**

$$(\%S)(WK) = (W - 1000)x 100\% \quad \text{Ec 5.3}$$

Dónde: W: Densidad de pulpa.

$$(20)(Wx 0.77) = (W - 1000)x 100$$

$$W = 1182.03g/l$$

➤ **Peso de la muestra:**

$$W_s = \frac{W - 1000}{K} \quad \text{Ec 5.4}$$

Usamos como datos: $W = 1182.03 \text{ g/l}$ y $K = 0.77$

$$W_s = \frac{1182.03 - 1000}{0.77} = 236.40 \text{ g}; \quad W_s = 236.40 \text{ g}$$

➤ **Volumen del mineral:**

$$V_s = \frac{W_s}{G_e} \quad \text{Ec 5.5}$$

$$V_s = \frac{236.40}{4.5} = 52.53 \text{ cm}^3; \quad V_s = 52.53 \text{ cm}^3$$

➤ **Volumen de la solución lixivante:**

$$V_{\text{solucion}} = V_{\text{pulpa}} - V_s \quad \text{Ec 5.6}$$

$$V_{\text{solucion}} = 1000 - 52.53 \quad V_{\text{solucion}} = 947.47 \text{ cm}^3$$

Con los datos obtenidos se elabora la tabla N° 5.6 de Balance de pulpa para 1 y 0.5 litro.

Tabla 5.6 Balance de pulpa para 20% de sólidos.

Producto	Porcentaje (%)	Para 1 litro de pulpa		Para 0.5 litros de pulpa	
		Peso(g)	Vol. (cm ³)	Peso (g)	Vol. (cm ³)
<i>Cabeza</i>	20	236.4	52.53	118.2	26.27
<i>Sol. lixivante</i>	80	947.47	947.47	473.74	473.74
<i>Pulpa</i>	100	1182.03	1000	591.94	500

Fuente: Elaboración propia.

5.10 Pruebas Exploratorias Preliminares

Son pruebas que se realizan antes de las pruebas experimentales, con el objetivo de evaluar la influencia de las variables planteadas. Nuestras variables inicialmente fueron: concentración de ácido sulfúrico, tamaño de partícula y tiempo de lixiviación.

CALCULOS PARA PRUEBAS PRELIMINARES CON 20 g DE MUESTRA DE TCI

- Volumen de la pulpa

$$\begin{array}{ccc} 236.40 \text{ g} & \longrightarrow & 1000 \text{ ml} \\ 20 \text{ g} & \longrightarrow & X \\ X=84.60 \text{ ml} \end{array}$$

- Volumen del mineral

$$V_s = \frac{20}{4.5} = 4.4$$

5.10.1 Prueba de curado

El objetivo principal de este procedimiento es analizar y evaluar el comportamiento de la TCI al someterlo a un pre tratamiento de curado.

A. SIN OXIDACION

Realizamos este procedimiento con el objetivo de observar la reacción que ocurre en esta etapa, durante 120 horas, debido a que el ácido debería reaccionar con el cobre de la TCI cumpliendo la siguiente reacción



Inicialmente trabajamos con dos concentraciones de ácido sulfúrico, de 320 g/l y 200g/l, con éstos pudimos calcular la cantidad necesaria de ácido sulfúrico y agua.

$$C_1V_1 = C_2V_2 \tag{Ec 5.7}$$

$$320 \frac{\text{g}}{\text{l}} V_1 = 200 \frac{\text{g}}{\text{l}} 84.60 \text{ ml}$$

$$V_1 = 52.87\text{ml}$$

Volumen de agua a agregar

$$V_2 = 84.60\text{ml} - 52.87\text{ml} = 31.73\text{ml}$$

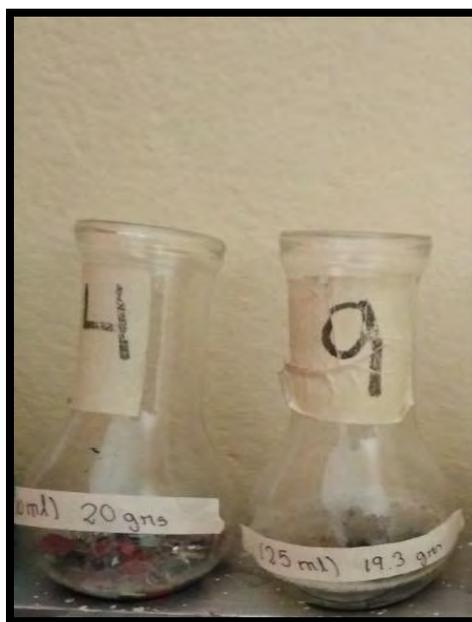
Tabla 5.7 Lixiviación sin oxidación

N° DE PRUEBA	TAMAÑO DE MUESTRA (μm)	PESO DE MUESTRA (grs)	H ₂ SO ₄ (ml)	H ₂ O (ml)	TIEMPO DE CURADO (h)
1	< a 4750	20.00	52.87	31.73	120
2	> a 4750	20.00	52.87	31.73	

Fuente: Elaboración propia.

Al concluir el tiempo de curado, se pudo observar que hubo una mínima reacción porque no presentó cambios visibles, por lo tanto descartamos continuar este procedimiento, como se observa en la figura 5.9.

Figura 5.9 curado con ácido sulfúrico



Fuente: Elaboración propia

B. OXIDACIÓN CON AGUA OXIGENADA

Realizamos este procedimiento con el objetivo de observar la reacción que ocurre en esta etapa, durante 120 horas, debido a que el agua oxigenada cumplirá la función de catalizador y así de ésta manera acelerar la reacción. Cumpliendo la siguiente reacción:

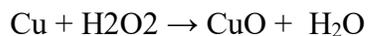


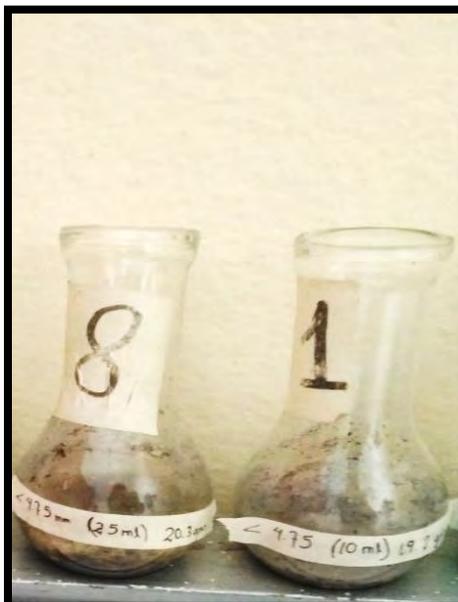
Tabla 5.8 Curado con agua oxigenada

PRUEBAS DE OXIDACION-CURADO					
N° DE PRUEBA	TAMAÑO DE MUESTRA (µm)	H ₂ O ₂ (ml)	PESO DE MUESTRA (g)	TIEMPO DE OXIDACION (h)	
1	< a 4750	25	20.00	120	
2	> a 4750	25	20.00		

Fuente: Elaboración propia.

En este proceso se observó que la muestra presenta una ligera oxidación. Ver figura 5.10

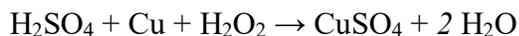
Figura 5.10 curado con agua oxigenada



Fuente: Elaboración propia

5.10.2 Prueba de lixiviación (agua oxigenada más ácido sulfúrico)

En este proceso realizamos la lixiviación con ácido sulfúrico a 320 g/l y agua oxigenada al 10% simultáneamente, ésta cumple la siguiente reacción:



CALCULAMOS EL PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DEL ANÁLISIS DE LABORATORIO

$Cu_{extraido}$ = concentración de cobre * volumen de solución lixivante

$$Cu_{extraido} = \frac{24.21gr.}{L} * 0.0846L = 2.048 \text{ g}$$

Cu_{total} = peso del mineral * ley de cabeza

$$Cu_{total} = 20g * 26.4\% = 5.28g.$$

$$\%E = \frac{Cu_{extraido}}{Cu_{total}} * 100\%$$

$$\%E = \frac{2.048g}{5.28g} * 100\% = 38.78\%$$

Tabla 5.9 Lixiviación y oxidación simultáneamente

SEGUNDA PRUEBA EXPLORATORIA										
LLEY DE CABEZA	N° DE PRUEBA	TAMAÑO DE MUESTRA (µm)	PESO DE MUESTRA (gr.)	H2O2 (ml)	H2SO4 (ml)	TIEMPO DE LIXIVIACION (h)	V SOL TOTAL	PESO EXTRAÍDO (gr.)	CONTENIDO DE COBRE (g/L)	% DE EXTRACCIÓN
26.40%	1	> a 4750	20.00	31.73	52.87	12	84.6	17.05	24.21	38.78
	2	< a 4750	20.00	31.73	52.87	12	84.6	16.06	16.90	27.07
	3	> a 4750	20.00	31.73	52.87	24	84.6	18.08	17.22	27.59
	4	< a 4750	20.00	31.73	52.87	24	84.6	17.39	19.50	31.24

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos del Laboratorio Analítico del Sur pudimos hallar el % de extracción y de las cuales analizando se pudo replantear nuestras variables a utilizar.

- Se puede observar que el tamaño de partícula no influye considerablemente en el porcentaje de extracción de cobre en el proceso de lixiviación; por lo tanto, descartamos esta variable.
- Se observó que el agua oxigenada influye considerablemente en el proceso de lixiviación, éste favorecerá el porcentaje de extracción de cobre; por consiguiente, se consideró como una variable.
- Consideraremos como una variable el tiempo de lixiviación, porque éste nos permitirá hallar la cinética de lixiviación.

Figura 5.11 Solución de PLS



Fuente: Elaboración propia

5.11 PRUEBAS EXPERIMENTALES

5.11.1 *Determinación del volumen de la solución lixiviante y del agua oxigenada*

5.11.1.1 Titulación de ácido – base para la lixiviación

1. Tomamos una muestra de ácido sulfúrico de 1 ml (alícuota), se depositó en un vaso precipitado, agitamos y homogenizar.
2. Agregamos una gota de indicador, anaranjado de metilo, de manera que la solución quede de color rosa, debido a la acidez de ésta.
3. Para titular se utiliza una solución de NaOH a 0,1 N, preparada con agua desionizada.
4. Esta solución es agregada en una bureta graduada en centésimas de 50 ml. La función del NaOH es subir el pH de la solución, hasta llegar al viraje. El pH del viraje indica el cambio de color que tiene la solución titulada, dada por el indicador, que al inicio es de color rosa, a medida que se va agregando gota a gota la solución de NaOH llega a un color naranja en la que se finaliza la valoración.

Para determinar la concentración del ácido de usa la siguiente expresión:

$$\text{concentración de } H_2SO_4 = \frac{\text{ml de NaOH} \times 49 \times \text{Normalidad de NaOH}}{\text{Volumen de la alícuota}} \quad \text{Ec 5.8}$$

$$\text{concentración de } H_2SO_4 = \frac{90.8\text{ml} \times 49 \times 0.1\text{N NaOH}}{1 \text{ ml } H_2SO_4}$$

$$\text{concentración de } H_2SO_4 = 445 \frac{\text{g}}{\text{l}} \text{ de } H_2SO_4$$

El ácido sulfúrico que utilizamos para nuestras pruebas experimentales tiene una concentración de 445. g/l.

5.11.1.2 Preparación de ácido a concentración de 350 y 400 g/l

A partir de la concentración del ácido sulfúrico de 445g/l, se determina la concentración a 350 y 400 g/l, las cuales son las variables con las que vamos a trabajar. Utilizaremos la ecuación 5.7

CALCULOS PARA LA PREPARACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO A 350 g/l

Datos:

- $H_2SO_4 = 445 \text{ g/l}$
- $C_1 = 445 \text{ g/l}$
- $V_2 = 473.74 \text{ ml}$
- $C_2 = 350 \text{ g/l}$

SOLUCIÓN

$$V_1 = \frac{C_2 V_2}{C_1} = = \frac{350 \text{ g/l} * 473.74 \text{ ml}}{445 \text{ g/l}} = 372.60 \text{ ml}$$

- Entonces la cantidad de agua oxigenada que se debe agregar es:

$$H_2O_2 = 473.74 - 372.60 = 101.14 \text{ ml}$$

CALCULOS PARA LA PREPARACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO A 400 g/l

Datos:

- $H_2SO_4 = 445 \text{ g/l}$
- $C_1 = 445 \text{ g/l}$
- $V_2 = 473.74 \text{ ml}$
- $C_2 = 400 \text{ g/l}$

SOLUCIÓN

$$V_1 = \frac{C_2 V_2}{C_1} = \frac{400 \frac{g}{l} * 473.74 \text{ ml}}{445 \frac{g}{l}} = 425.83 \text{ ml}$$

➤ Entonces la cantidad de agua oxigenada que se debe agregar es:

$$H_2O_2 = 473.74 - 425.83 = 47.91 \text{ ml}$$

A partir de los datos obtenidos se construyó las siguientes tablas.

Tabla 5.10 Cantidad de ácido requerido a 350 g/l de H_2SO_4

CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS	VOLUMEN ml	VOLUMEN DE H_2SO_4 ml	VOLUMEN H_2O_2 ml
20%	473.74	372.60	101.74

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.11 Cantidad de ácido requerido a 400 g/l de H_2SO_4

CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS	VOLUMEN ml	VOLUMEN DE H_2SO_4 ml	VOLUMEN H_2O_2 ml
20%	473.74	425.83	47.91

Fuente: Elaboración propia

5.11.2 Pruebas de cinética de lixiviación

La cinética de lixiviación se desarrolló con la finalidad de estimar el tiempo de lixiviación.

Los resultados se pueden observar en la Tabla N°5.12

A. CONDICIONES OPERATIVAS

➤ Tiempo = 60 horas

- Porcentaje de sólido = 20%
- Concentración de ácido sulfúrico = 400 g/l
- Concentración de agua oxigenada = 30%
- Ley de cabeza 26.4%
- Velocidad de agitación = 1740 rpm
- Peso del mineral = 118.20 gr

B. MATERIALES Y EQUIPOS

- Cronómetro.
- Muestras de TCI
- Agitador
- Solución lixivante de H_2SO_4
- Pipeta.
- Probeta
- Balanza
- Embudo

C. PROCEDIMIENTO

- Verter la solución lixivante a los reactores.
- Agregamos la muestra a las botellas.
- Tomamos el tiempo preestablecido a cada número de muestra.
- Llevamos las muestras al análisis químico por cobre y ácido libre.

Figura 5.12 Lixiviación por agitación



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.12 Resultados de análisis químico en las pruebas de cinética de lixiviación.

TIEMPO DE LIXIVIACIÓN (h)	Cu (g/l)	H ₂ SO ₄ CONSUMIDO g/l
0	0	400
10	15.10	300.91
20	22.52	296.85
30	24.43	280.75
40	28.80	273.32
50	34.08	271.45
60	34.15	270.93

Fuente: Laboratorio Analítico del Sur

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede observar que entre las 50 y 60 horas la extracción de cobre y el consumo de ácido sulfúrico no varía en gran proporción, es decir la recuperación es mínima.

5.11.3 Determinación del porcentaje de extracción del cobre

Con los datos obtenidos determinaremos el porcentaje de extracción de cobre para lo cual primero determinaremos la cantidad de cobre extraído.

$$\%E = \frac{Cu_{extraido}}{Cu_{total}} * 100\% \quad \text{Ec 5.9}$$

$$Cu_{extraido} = \text{concentración de cobre} * \text{volumen de solución lixivante} \quad \text{Ec 5.10}$$

$$Cu_{extraido} = \frac{15.10 \text{ gr.}}{l} * 0.473 \text{ l}$$

$$Cu_{extraido} = 7.15 \text{ g.}$$

Ec 5.11

$$Cu_{total} = \text{peso del mineral} * \text{ley de cabeza}$$

$$Cu_{total} = 118.20 \text{ g} * 26.4\% = 31.20 \text{ g.}$$

$$\%E = \frac{Cu_{extraido}}{Cu_{total}} * 100\%$$

$$\%E = \frac{7.15}{31.20} * 100\% = 22.91$$

El mismo cálculo se realizó para todas las muestras.

Tabla 5.14 Porcentaje de extracción de cobre en las pruebas de cinética de lixiviación.

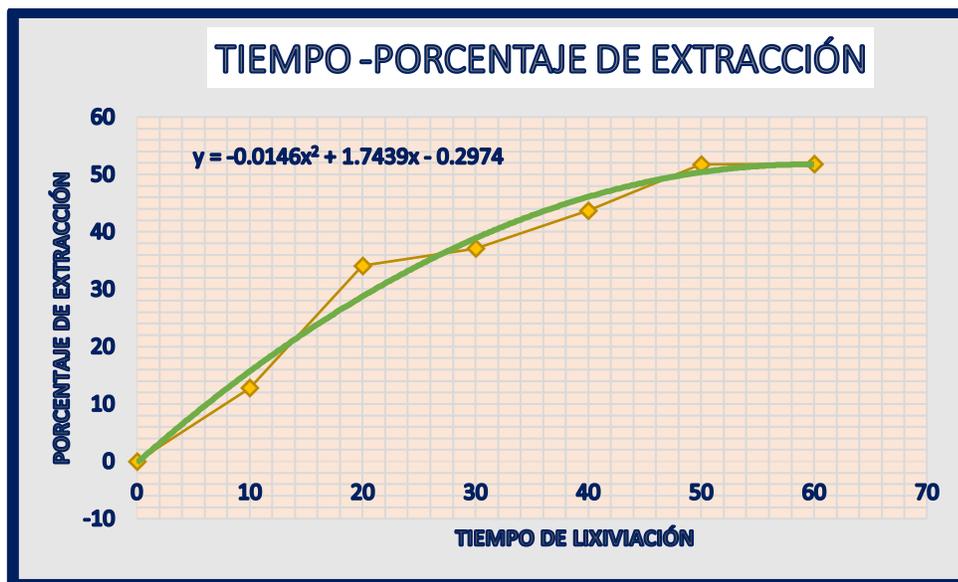
TIEMPO DE LIXIVIACION (h)	Cu g/l	$Cu_{extraido}(g)$	PORCENTAJE DE COBRE EXTRAIDO (%)
0	0	0	0
10	15.10	7.15	22.91
20	22.52	10.67	34.11
30	24.43	11.57	37.08
40	28.80	13.64	43.71
50	34.08	16.14	51.73
60	34.15	16.17	51.82

Fuente: Elaboración propia

5.11.4 Determinación del tiempo óptimo de lixiviación

La finalidad es determinar en qué tiempo logramos extraer el mayor porcentaje de cobre.

Figura 5.13 Tiempo de lixiviación vs porcentaje de extracción



Fuente: Elaboración propia (Excel)

Se trabajó con un tiempo de lixiviación de 60 horas, se observa que la curva empieza a mantenerse constante a partir de 48-50 horas, esto nos indica que en este tiempo tenemos el mayor porcentaje de extracción, a partir de este tiempo la extracción de cobre es mínima y la curva se va linealizando.

5.11.5 Determinación del modelo cinético.

Por tanto, utilizaremos este modelamiento matemático, ecuación $\frac{1}{t} = 1 - 3(1 - X_B)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - X_B)$, para nuestro estudio.

En la tabla 5.16 se muestra los valores de la ecuación matemática de difusión controlada para cada valor de la fracción del sólido reaccionado.

Tabla 5.16 Modelamiento matemático de difusión controlada.

Tiempo	Porcentaje de extracción de cobre (%)	X_B	$1 - X_B$	$\frac{1}{t} = 1 - 3(1 - X_B)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - X_B)$
0	00.000	0.000	1	0.0000
10	22.91	0.2291	0.7709	0.0195
20	34.11	0,3411	0,6589	0,0461
30	37.08	0,3708	0,6292	0,0556
40	43.71	0,4371	0,5629	0,0806
50	51.73	0,5173	0,4827	0,1194
60	51.82	0,5182	0.4818	0,1199

Fuente: Elaboración propia.

Dónde:

τ = es el tiempo necesario para la conversión completa de una partícula

$1 - X_B$ = Fracción del sólido o material sin reaccionar

Figura 5.14 X_B vs τ en la etapa de difusión

Fuente: Elaboración propia (Excel)

5.11.6 Determinación del consumo de ácido

Para determinar el consumo de ácido usamos la siguiente ecuación

$$\text{consumo de ácido} = (\text{concentración de ácido} - \text{concentración de ácido libre})$$

Ec 5.12

Figura 5.16 Preparación de ácido sulfúrico a utilizar



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.15 Adecuación de los reactores antes de la lixiviación



Fuente: Elaboración propia

➤ Para 10 horas

$$\text{consumo de ácido} = (400 - 300.91) * 0.4737 = 46.94$$

Haciendo el mismo procedimiento para todas las variables obtenemos el siguiente cuadro:

Tabla 5.17 Relación de consumo de ácido sulfúrico.

TIEMPO (h)	CONCENTRACION DE H ₂ SO ₄ (g/l)	CONCENTRACION DE COBRE %	CONSUMO DE ACIDO (g/l)	RELACION DE CONSUMO DE H ₂ SO ₄ (g/l) DE COBRE
10	300.91	15.10	46.93	3.10
20	296.85	22.52	48.86	2.17
30	280.75	24.43	56.49	2.31
40	273.32	28.80	60.01	2.08
50	271.45	34.08	60.89	1.78
60	270.93	34.15	61.14	1.79

Fuente: Elaboración propia

5.12 PRUEBAS METALÚRGICAS DE LABORATORIO

PRUEBA N°01

CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de agua oxigenada :10%
- Concentración de ácido sulfúrico: 350 g/L
- Tiempo de lixiviación: 12 h
- Velocidad de agitación:1740 rpm

Tabla 5.18 Balance Metalúrgico de la prueba experimental N°01 de lixiviación por agitación.

PRODUCTO	LEY	PESO DE MATERIAL	CONTENIDO DE COBRE	PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN
Alimento	26.4 %	118.20 g	31.20 g	100%
PLS	7.512 g/L	0.4737 l	3.55 g	11.379%
Residuo	31.78%	87 g	27.65g	88.63%.

Fuente: Elaboración propia

PRUEBA N°02 CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de agua oxigenada: 30%
- Concentración de ácido sulfúrico: 350 g/L
- Tiempo de lixiviación: 12 h
- Velocidad de agitación: 1740 rpm

Tabla 5.19 Balance Metalúrgico de la prueba experimental N°02 de lixiviación por agitación.

PRODUCTO	LEY	PESO DE MATERIAL	CONTENIDO DE COBRE	PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN
CABEZA	26.4 %	118.20 g	31.20 g	100%
PLS	26.759 g/L	0.4737 l	12.675 g	40.625%
RIPIO	21.48%	86.22 g	18.52 g	59.375%

Fuente: Elaboración propia

PRUEBA N°03 CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de agua oxigenada: 10%
- Concentración de ácido sulfúrico: 400 g/L
- Tiempo de lixiviación: 12 h
- Velocidad de agitación: 1740 rpm

Tabla 5.20 Balance Metalúrgico de la prueba experimental N°03 de lixiviación por agitación.

PRODUCTO	LEY	PESO DE MATERIAL	CONTENIDO DE COBRE (g)	PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN
CABEZA	26.4 %	118.20 g	31.200 g	100%
PLS	7.483 g/L	0.4737 l	3.544 g	11.358%
RIPIO	26.65%	103.75 g	27.65 g	88.642%

Fuente: Elaboración propia

PRUEBA N°04 CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de agua oxigenada: 30%
- Concentración de ácido sulfúrico: 400 g/L
- Tiempo de lixiviación: 12 h
- Velocidad de agitación: 1740 rpm

Tabla 5.21 Balance Metalúrgico de la prueba experimental N°04 de lixiviación por agitación.

PRODUCTO	LEY	PESO DE MATERIAL	CONTENIDO DE COBRE	PORCENTAJE DE EXTRACCION
CABEZA	26.4 %	118.20 g	31.20 g	100%
PLS	26.617 g/L	0.4737 l	12.60 g	40.410%
RIPIO	21.40%	86.80 g	18.59 g	59.59%

Fuente: Elaboración propia

PRUEBA N°05 CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de agua oxigenada: 10%
- Concentración de ácido sulfúrico: 350 g/L
- Tiempo de lixiviación: 48 h
- Velocidad de agitación: 1740 rpm

Tabla 5.22 Balance Metalúrgico de la prueba experimental N°05 de lixiviación por agitación.

PRODUCTO	LEY	PESO DE MATERIAL	CONTENIDO DE COBRE	PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN
CABEZA	26.4 %	118.20 g	31.20 g	100%
PLS	13.436 g/L	0.4737 l	6.36 g	20.397%
RIPIO	20.48%	76.03g	15.57 g	49.904%

Fuente: Elaboración propia

PRUEBA N°06 CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de agua oxigenada: 30%
- Concentración de ácido sulfúrico: 350 g/L
- Tiempo de lixiviación: 48 h
- Velocidad de agitación: 1740 rpm

Tabla 5.23 Balance Metalúrgico de la prueba experimental N°06 de lixiviación por agitación.

PRODUCTO	LEY	PESO DE MATERIAL	CONTENIDO DE COBRE (g)	PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN
CABEZA	26.4 %	118.20 g	31.20 g	100%
PLS	32.996 g/l	0.4737 l	15.63 g	50.096%
RIPIO	20.38%	76.39 g	15.57 g	49.904%

Fuente: Elaboración propia

PRUEBA N°07 CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de agua oxigenada: 10%
- Concentración de ácido sulfúrico: 400 g/L
- Tiempo de lixiviación: 48 h
- Velocidad de agitación: 1740 rpm

Tabla 5.24 Balance Metalúrgico de la prueba experimental N°07 de lixiviación por agitación.

CONCEPTO	LEY	PESO DE MATERIAL	CONTENIDO DE COBRE	PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN
CABEZA	26.4 %	118.20 g	31.20 g	100%
PLS	14.360 g/l	0.4737 l	6.80 g	21.795%
RIPIO	24.40%	80.66g	24.40 g	78.205%

Fuente: Elaboración propia

PRUEBA N°08 CONDICIONES OPERATIVAS

- Concentración de agua oxigenada: 30%
- Concentración de ácido sulfúrico: 400 g/L
- Tiempo de lixiviación: 48 h
- Velocidad de agitación: 1740 rpm

Tabla 5.25 Balance Metalúrgico de la prueba experimental N°08 de lixiviación por agitación.

PRODUCTO	LEY	PESO DE MATERIAL	CONTENIDO DE COBRE	PORCENTAJE DE EXTRACCION
CABEZA	26.4 %	118.20 g	31.20 g	100%
PLS	34.656 g/l	0.4737 l	16.416 g	52.615%
RIPIO	20.58%	71.82g	14.78 g	47.38%

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO VI

ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 Resultados de la experimentación a nivel de laboratorio

6.1.1 Variables involucradas

A nivel de laboratorio se trabajó con tres factores, *A* (agua oxigenada), *B* (ácido sulfúrico) y *C* (Tiempo de lixiviación), cada uno con dos niveles, son de interés, por lo tanto, se aplica un **diseño factorial 2³**, con la finalidad de verificar con mayor seguridad y amplitud las hipótesis planteadas. Se efectuaron ocho corridas de este diseño **2³** y se muestra en la tabla 6.1, en esta tabla se observa las combinaciones de los tratamientos en el orden ESTÁNDAR o de YATES y se escriben como: (1), *a*, *b*, *ab*, *c*, *ac*, *bc* y *abc*.

La matriz en escala codificada (ver tabla 6.1) comprende las columnas (X_1 , X_2 y X_3), que corresponden a los 3 factores en estudio expresadas en escala natural (*A*, *B* y *C*). Se observa también, que han sido dispuestas en el orden estándar, cada columna empieza por el signo –, y se alternan los signos – y +. Naturalmente, la respuesta del diseño está condicionada por los objetivos del experimento de recuperar cobre mediante lixiviación y con los datos del experimento final se llena la columna % de recuperación. Con los resultados experimentales se pretenden analizar los resultados expresados como datos experimentales y establecer argumentos comprobables que sirvan de fundamento para las conclusiones.

Tabla 6.1 Resultados del Diseño factorial - Pruebas Nivel laboratorio

N° Prueba	Escala Codificada			Escala Natural			Y:% Recuperación de Cu
	X_1	X_2	X_3	A	B	C	
1	-1	-1	-1	10	350	12	11.379
2	1	-1	-1	30	350	12	40.622
3	-1	1	-1	10	400	12	11.360
4	1	1	-1	30	400	12	40.404
5	-1	-1	1	10	350	48	20.397
6	1	-1	1	30	350	48	50.088
7	-1	1	1	10	400	48	21.798
8	1	1	1	30	400	48	52.610

Fuente: elaboración propia

Para analizar el diseño experimental se utilizó la escala natural, para analizar los datos generados por la presencia de distintos factores sometidas a variación en la unidad experimental se observó diversos resultados de la interacción de los factores controlables y la variable respuesta, estos efectos son materia del análisis cuantitativo.

FACTORES CONTROLABLES, estas variables se controlaron durante la lixiviación, cuyos valores son de interés para determinar la calidad del proceso, y son las siguientes:

A = Concentración de agua oxigenada (10 % - 30 %)

B = Concentración de ácido sulfúrico (350 g/l – 400 g/l)

C = Tiempo de lixiviación (12 h – 48 h)

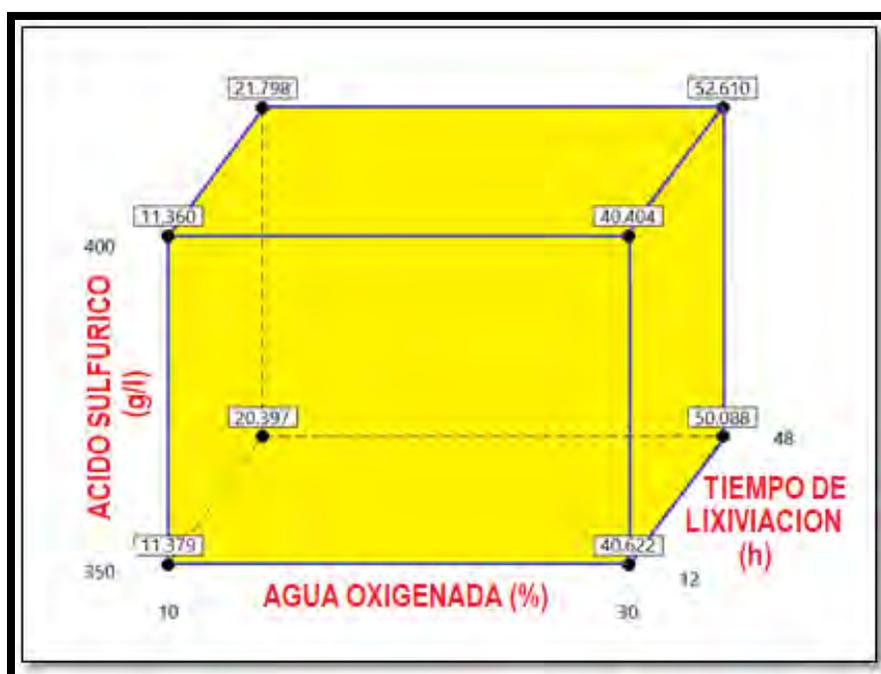
VARIABLE RESPUESTA, es la variable cuyos datos se capturó en la salida del proceso de lixiviación y son de interés para el establecimiento de resultados, está dado por:

Y = Rendimiento (% de extracción de cobre).

6.1.2 Representación geométrica de las combinaciones

La región experimental ahora es un cubo regular, cuyos vértices son los ocho tratamientos. Con este diseño se pueden estudiar los $2^3 - 1 = 7$ efectos: tres efectos principales A, B, C; tres interacciones dobles AB, AC, BC y una interacción triple ABC.

Figura 6.1 Representación geométrica de las variables en 2^3



Fuente: Elaboración propia - Minitab

Se analizó la influencia de los factores controlables sobre la variable respuesta, en la parte experimental se aleatorizó las pruebas experimentales con la finalidad de eliminar el efecto de otros factores al proceso de lixiviación del cobre. La figura 6.1, constituye un modelo que ha permitido analizar los efectos e implicancias de factores controlables de influencia en la variable respuesta mediante el diseño factorial 2^3 , se estudió el efecto de tres factores en dos niveles cada uno. Consta de $2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8$ tratamientos diferentes, La región experimental ahora es un cubo regular cuyos vértices son los ocho tratamientos, este modelo nos ha permitido estudiar siete efectos, que son las siguientes: tres principales A, B, C; tres interacciones dobles AB, AC, BC y una interacción triple ABC, en general, se puso interés en estudiar los efectos principales y las interacciones dobles, observando que, es preferible asegurarse que la interacción ABC mantiene un valor mínimo

6.2 Condiciones del análisis de datos

6.2.1 *Modelo estadístico del experimento*

Se aplicó un modelo estadístico para analizar los datos experimentales de la lixiviación del cobre proporcionados por el diseño estadístico del experimento, con la finalidad de obtener datos válidos que permitieron obtener conclusiones válidas y objetivas utilizando como herramienta el análisis de varianza. Los modelos estadísticos, permiten valorar las hipótesis de investigación formulada al inicio de la investigación. El modelo estadístico utilizado en los análisis de datos experimentales es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \alpha\beta_{ij} + \alpha\gamma_{ik} + \beta\gamma_{jk} + \alpha\beta\gamma_{ijk} + \epsilon_{ijk} \quad \text{Ec 6.1}$$

Donde:

μ = Media general

α_i = Efecto i-ésimo del factor A (concentración de agua oxigenada, en %)

β_j = Efecto j-ésimo del factor B (concentración de ácido sulfúrico, en g/l)

γ_k = Efecto k-ésimo del factor C (tiempo de lixiviación, en h)

$\alpha\beta_{ij}$ = Efecto ij-ésimo del factor AB

$\alpha\gamma_{ij}$ = Efecto ij-ésimo del factor AC

$\beta\gamma_{jk}$ = Efecto jk-ésimo del factor BC

$\alpha\beta\gamma_{ijk}$ = Efecto ijk-ésimo del factor ABC

ϵ_{ijk} = Error aleatorio ijk-ésimo que incorpora a los demás factores del experimento, en mínima magnitud, pero debe tenerse en cuenta.

6.2.2 *Hipótesis de interés*

Al plantear la investigación se formuló probar, que la concentración del agua oxigenada, concentración de ácido sulfúrico y el tiempo de lixiviación son las variables que regentan la extracción del cobre mediante el proceso de lixiviación acida por agitación. Para la extracción del cobre se planteó la siguiente hipótesis de investigación:

H = Mediante la lixiviación ácida por agitación de tarjetas de circuito integrado se logra extraer un 69% de cobre

Esta hipótesis de investigación formulada, se apoya en la experimentación efectuada en forma organizada para establecer la relación de las variables controlables (A, B y C), con la variable respuesta (Y) y con el diseño factorial 2^3 que ha permitido explicar el proceso de

lixiviación del cobre a partir de tarjetas de circuitos integrados de computadoras y también se ha podido formular las hipótesis estadísticas nulas y alternativas con símbolos estadísticos.

La hipótesis nula (H_0), indica que entre los efectos de las tres variables y sus interacciones determinadas no hay diferencias significativas con respecto a sus medias, estableciéndose que no existe relación o dependencia de las variables A, B y C con la variable respuesta, estableciendo la siguiente fórmula.

$$H_0: \alpha = \beta = \gamma = \alpha\beta = \alpha\gamma = \beta\gamma = \alpha\beta\gamma = 0 \quad \text{Ec 6.2}$$

La hipótesis alterna (H_A), nos indica que los efectos de las variables A, B y C, tienen diferencias significativas con relación a sus medias. Indicando que existe algún tipo de dependencia o relación entre las variables comparadas respecto a la variable de rendimiento de extracción del cobre.

$$H_A: \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq \alpha\beta \neq \alpha\gamma \neq \beta\gamma \neq \alpha\beta\gamma \neq 0 \quad \text{Ec 6.3}$$

6.3 Análisis de los contrastes

Los contrastes han sido contruidos con los promedios de los niveles de los factores. Con 8 tratamientos hay 7 contrastes ortogonales. Los valores de los contrastes en este arreglo se pueden calcular a partir del cuadro de signos (ver tabla 6.2), al multiplicar las columnas de signos del cuadro, por la columna de totales que constituyen los valores de la variable respuesta, siguiendo la notación de Yates. La tabla 6.2, tiene las siguientes propiedades:

- Todas las columnas tienen igual número de signos positivos y negativos, con excepción de la columna identidad I .

- Cuando se multiplica los signos de dos columnas cualesquiera, su sumatoria es igual a cero.
- El producto de la columna I por cualquier columna X es idéntica a X
- Con el producto de dos columnas cualesquiera se obtiene una columna resultante. Por ejemplo, $A \times B = AB$

Tabla 6.2 Tabla de signos del diseño factorial 2^3

Tratamientos	Signos algebraicos para contrastes y efectos factoriales								Y (Totales)
	I	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	
(1)	+	-	-	-	+	+	+	-	11.379
a	+	+	-	-	-	-	+	+	40.622
b	+	-	+	-	-	+	-	+	11.360
ab	+	+	+	-	+	-	-	-	40.404
c	+	-	-	+	+	-	-	+	20.397
ac	+	+	-	+	-	+	-	-	50.088
bc	+	-	+	+	-	-	+	-	21.798
abc	+	+	+	+	+	+	+	+	52.610

Fuente: elaboración propia

Los contrastes de las variables se utilizan para responder a la siguiente interrogante: ¿alguno de los factores afecta la extracción del cobre? Una manera de responder esta pregunta es examinando los valores de los 7 contrastes ortogonales, y son las siguientes:

CONTRASTES PRINCIPALES:

$$\text{Contraste } A = [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc]$$

$$\text{Contraste } A = [40.622 + 40.404 + 50.088 + 52.61 - 11.379 - 11.36 - 20.397 - 21.798]$$

$$\text{Contraste } A = 118.790$$

$$\text{Contraste } B = [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac]$$

$$\text{Contraste } B = [11.36 + 40.404 + 21.798 + 52.61 - 11.379 - 40.622 - 20.397 - 50.088]$$

$$\text{Contraste } B = 3.686$$

$$\text{Contraste } C = [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab]$$

$$\text{Contraste } C = [20.397 + 50.088 + 21.798 + 52.61 - 11.379 - 40.622 - 11.36 - 40.404]$$

$$\text{Contraste } C = 41.128$$

CONTRASTES DE INTERACCIÓN:

$$\text{Contraste } AB = [ab - b - a + abc + (1) - bc - ac + c]$$

$$\text{Contraste } AB = [40.404 - 11.36 - 40.622 + 52.61 + 11.379 - 21.798 - 50.088 + 20.3]$$

$$\text{Contraste } AB = 0.922$$

$$\text{Contraste } AC = [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc]$$

$$\text{Contraste } AC = [11.379 - 40.622 + 11.36 - 40.404 - 20.397 + 50.088 - 21.798 + 52.61]$$

$$\text{Contraste } AC = 2.216$$

$$\text{Contraste } BC = [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc]$$

$$\text{Contraste } BC = [11.379 + 40.622 - 11.36 - 40.404 - 20.397 - 50.088 + 21.798 + 52.61]$$

$$\text{Contraste } BC = 4.160$$

$$\text{Contraste } ABC = [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)]$$

$$\text{Contraste } ABC = [52.61 - 21.798 - 50.088 + 20.397 - 40.404 + 11.36 + 40.622 - 11.379]$$

$$\text{Contraste } ABC = 1.320$$

Por consiguiente, se observa que hay evidencia sólida que indica que dos de las variables controlables del proceso afecta directamente a la recuperación del cobre.

6.4 Análisis de los efectos estimados y de los cuadrados medios

Los efectos, tanto los principales como las interacciones, son independientes entre sí. Resulta fácil estimar los efectos a partir de los contrastes. Entonces, los siete contrastes permiten obtener tres efectos principales, tres efectos de interacción de dos factores y un efecto de interacción de tres factores. Efectos principales de las variables controlables A, B y C miden cómo afecta cada uno de estos factores a la variable respuesta (extracción del cobre). Los efectos de la interacción de dos factores AB, AC y BC miden la diferencia entre los efectos principales. La interacción ABC mide la diferencia promedio entre la interacción AB para los dos diferentes niveles de C. Por lo tanto, se tiene los siguientes cálculos.

6.4.1 Cálculo de los efectos

Efectos principales:

$$\text{Efecto } A = \frac{1}{4n} [\text{Contraste } A] = \frac{1}{4} [118.790]$$

$$\text{Efecto } A = 29.698$$

$$\text{Efecto } B = \frac{1}{4n} [\text{Contraste } B] = \frac{1}{4} [3.686]$$

$$\text{Efecto } B = 0.922$$

$$\text{Efecto } C = \frac{1}{4n} [\text{Contraste } C] = \frac{1}{4} [41.128]$$

$$\text{Efecto } C = 10.282$$

Efectos de interacción:

$$\text{Efecto } AB = \frac{1}{4n} [\text{Contraste } AB] = \frac{1}{4} [0.922]$$

$$\text{Efecto } AB = 0.231$$

$$\text{Efecto } AC = \frac{1}{4n} [\text{Contraste } AC] = \frac{1}{4} [2.216]$$

$$\text{Efecto } AC = 0.554$$

$$\text{Efecto } BC = \frac{1}{4n} [\text{Contraste } BC] = \frac{1}{4} [4.160]$$

$$\text{Efecto } BC = 1.040$$

$$\text{Efecto } ABC = \frac{1}{4n} [\text{Contraste } ABC] = \frac{1}{4} [1.320]$$

$$\text{Efecto } ABC = 0.330$$

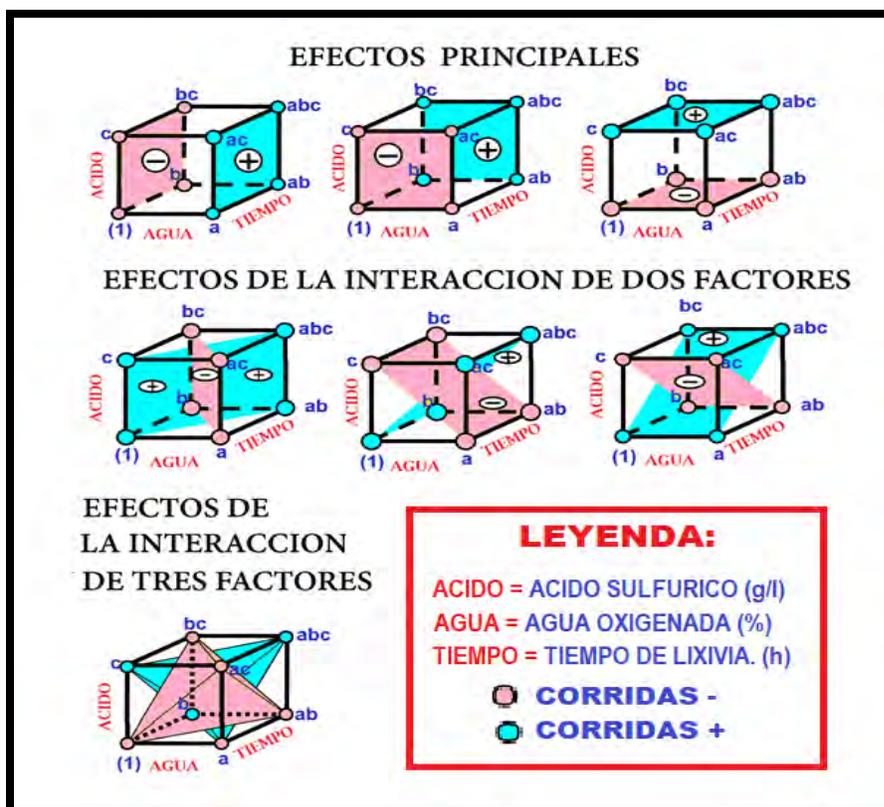
Observando sólo los efectos principales, las mejores condiciones son de las variables de concentración de agua oxigenada y el tiempo de lixiviación. El tratamiento que provoca un mayor cambio de rendimiento es variar la concentración del agua oxigenada de 10 a 30%.

6.4.2 *Gráfica de efectos*

Para observar la presencia de efectos de las variables controlables a la variable respuesta, se ha graficado los diferentes niveles de cada variable controlable con la media de los datos de la variable respuesta. Estos gráficos muestran la influencia de todos aquellos efectos considerados en el modelo experimental. Por lo tanto, si el efecto es significativo el gráfico muestra esta tendencia.

La forma de ver estos efectos es a través de la pendiente de estas líneas, entre los factores y la variable respuesta; por tanto, si hay efecto la pendiente de estas líneas es alta, como se puede observar en las figuras 6.2 y 6.3.

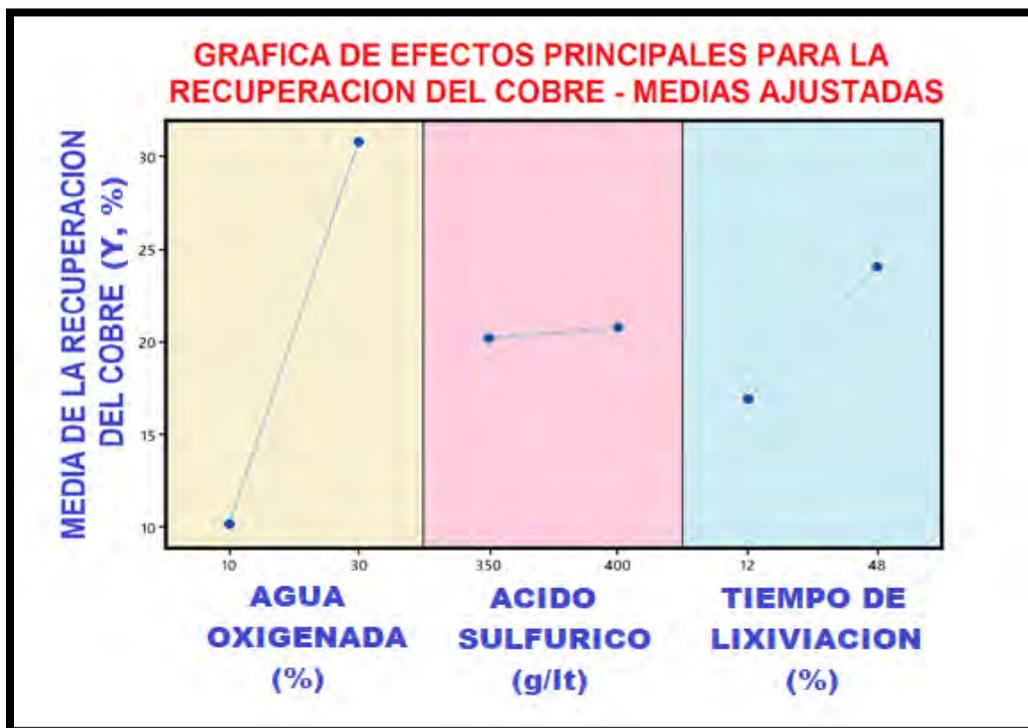
Figura 6.2 Representación geométrica de los efectos principales



Fuente: Elaboración propia - Minitab

La Figura 6.2 se ilustra gráficamente los términos involucrados en el cálculo de los efectos principales y de interacción provocados por la variación de los factores controlados a la variable respuesta como consecuencia de la aplicación del diseño factorial 2^3 , esta figura muestra en los vértices del cubo (la notación de yates) que deben ir en positivo, para luego de aplicada las operaciones de adición según la tabla de signos (tabla 6.2) al proceso de lixiviación del cobres se obtienen valores positivos para cada efecto, tal como se observa en la pendientes positivas de estas líneas, entre los factores y la variable respuesta; se observa un efecto con pendientes de altas (efectos de las variables concentración de agua oxigenada y tiempo de lixiviación) como se puede observar en las figuras 6.3 y 6.4..

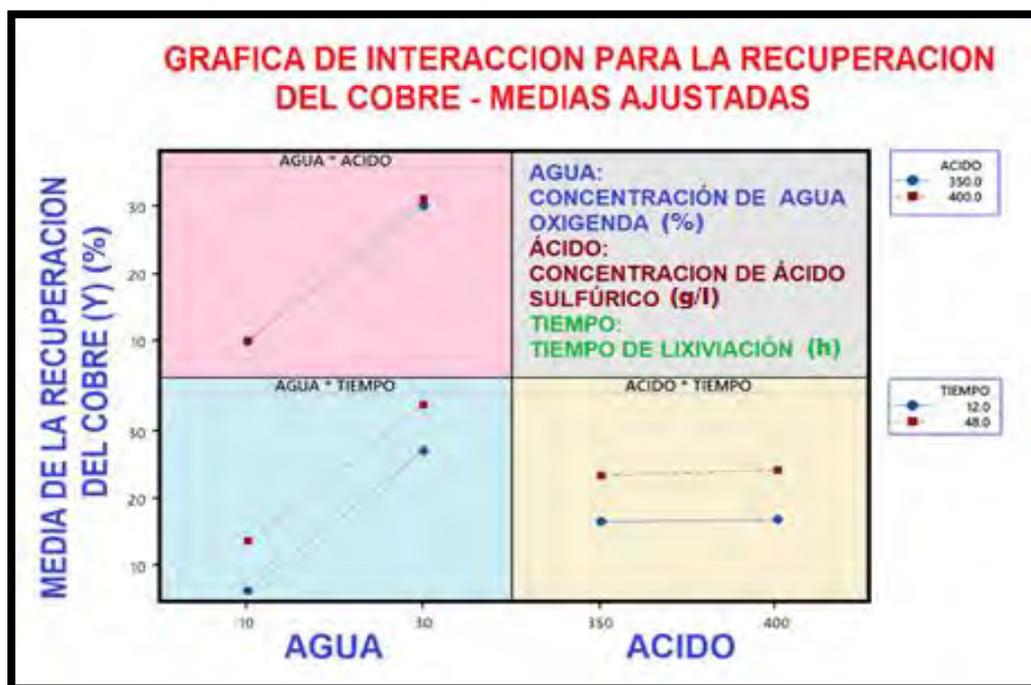
Figura 6.3 Representación geométrica de los efectos principales



Fuente: Elaboración propia - Minitab

En la figura 6.3, de efectos principales nos dicen cómo afecta cada factor en el resultado de la recuperación del cobre, en esta figura se observa, para el caso de la variable concentración de agua oxigenada que genera un mayor cambio de la variable respuesta (rendimiento de recuperación del cobre) al variar la concentración de 10 a 30 %. En cambio, para el efecto de la variable concentración de ácido sulfúrico su efecto es casi nulo, al variar de 350 a 400 g/l. También, esta figura nos muestra que la recuperación de cobre es afectada sensiblemente al variar el tiempo de lixiviación de 12 a 48 h. Todos los efectos principales tienen signo positivo, por lo que la recuperación del cobre aumenta al cambiar los niveles de experimentación de las variables de menor a mayor. La figura nos muestra que la concentración de agua oxigenada tiene fuerte interacción y el tiempo de lixiviación tiene una mediana interacción, las interacciones mostrados en la figura permite interpretar que se obtienen mejores resultados en la recuperación de Cu en los niveles altos de la concentración de agua oxigenada y el tiempo de lixiviación produciendo significativamente para incrementar la recuperación de Cu. Los efectos más grandes son para la concentración de agua oxigenada ($A = 30\%$), y el tiempo de lixiviación ($C = 48h$). Como la pendiente de la línea correspondiente al agua oxigenada A es más pronunciada, entonces tiene mayor efecto sobre la recuperación del cobre. Luego el análisis indica que los factores concentración de agua oxigenada y tiempo de lixiviación, son factores importantes porque tienen un impacto sobre la recuperación del cobre

Figura 6.4 Representación geométrica de los efectos de interacción



Fuente: Elaboración propia - Minitab

Los efectos de interacción de agua-acido, agua-tiempo y acido-tiempo se observan en la figura 6.4 y encontrar los valores extremos se utilizaron promedios entre las corridas de dos planos diagonales del cubo mostrados en la figura 6.2. En esta figura se observa que las líneas de interacción de agua*acido, agua*tiempo y acido*tiempo son paralelas por lo tanto las interacciones no tienen impacto sobre la recuperación de cobre. Cada punto de la gráfica de interacción muestra la recuperación media del cobre con diferentes combinaciones de los niveles de los factores.

6.4.3 Contribución de los efectos

Tabla 6.3 Contribución porcentual de los efectos

Factor	Efecto	Estimación del efecto	Y (Totales)
A	α	29.698	68.975
B	β	0.922	2.140
C	γ	0.231	0.535
AB	$\alpha\beta$	10.282	23.881
AC	$\alpha\gamma$	0.554	1.287
BC	$\beta\gamma$	1.040	2.415
ABC	$\alpha\beta\gamma$	0.330	0.766
Total		43.056	100

Fuente: elaboración propia

6.4.4 Cálculo de los cuadrados medios

Suma de cuadrados de los efectos principales:

$$SS_A = \frac{1}{n2^3} [\text{Contraste A}] = \frac{1}{8} [118.790]$$

$$SS_A = 1763.883$$

$$SS_B = \frac{1}{n2^3} [\text{Contraste B}] = \frac{1}{8} [3.686]$$

$$SS_B = 1.698$$

$$SS_C = \frac{1}{n2^3} [\text{Contraste C}] = \frac{1}{8} [41.128]$$

$$SS_C = 211.439$$

Suma de cuadrados de los efectos de interacción:

$$SS_{AB} = \frac{1}{n2^3} [\text{Contraste } AB] = \frac{1}{8} [0.922]$$

$$SS_{AB} = 0.106$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{n2^3} [\text{Contraste } AC] = \frac{1}{8} [2.216]$$

$$SS_{AC} = 0.614$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{n2^3} [\text{Contraste } BC] = \frac{1}{8} [4.160]$$

$$SS_{BC} = 2.163$$

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n2^3} [\text{Contraste } ABC] = \frac{1}{8} [1.320]$$

$$SS_{ABC} = 0.218$$

Suma de cuadrados totales:

$$SC_T = SC_A + SC_B + SC_{AB} + SC_C + SC_{AC} + SC_{BC} + SC_{ABC}$$

Ec 6.4

$$SC_T = 1763.883 + 1.698 + 0.106 + 211.439 + 0.614 + 2.163 + 0.218$$

6.5 Análisis de varianzas

La apreciación de la significancia de los factores y sus interacciones, se obtiene del análisis de varianza aplicado a los resultados experimentales de la lixiviación del cobre, para lo cual se efectuó la prueba de hipótesis con Fisher con una cola a la derecha.

6.5.1 Grados de libertad del diseño experimental

Los grados de libertad se definen como el número de “niveles de cada factor” menos el número de relaciones requeridas entre las observaciones en los datos que pueden variar libremente al estimar parámetros estadísticos. Para el proceso de lixiviación del cobre los grados de libertad se calculan los grados de libertad en la tabla 6.4, donde los valores “a = 2”, “b = 2” y “c = 2” representan el número de niveles de los factores correspondientes (A, B y C).

Tabla 6.4 Cálculos de los grados de libertad

Factor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	
A	1763.883	(a-1)	1
B	1.698	(b-1)	1
C	211.439	(c-1)	1
AB	0.106	(a-1) (b-1)	1
AC	0.614	(a-1) (c-1)	1
BC	2.163	(b-1) (a-1)	1
ABC	0.218	(a-1) (b-1) (c-1)	1
ERROR	0.000	abc(n-1)	0
TOTAL	1980.121	$n2^3-1$	7

Fuente: elaboración propia

6.5.2 Cálculo de los cuadrados medios

Los cuadrados medios se calculan dividiendo la suma de cuadrados correspondientes de cada de cada factor entre los grados de libertad y nos ayuda a determinar si los factores controlables A, B y C son significativos en la recuperación del cobre por lixiviación.

CUADRADO MEDIO DE LOS EFECTOS PRINCIPALES:

Cuadrado medio del factor A:

$$CM_{(A)} = \frac{SC_{(A)}}{(a-1)} = 1763.883;$$

Cuadrado medio del factor B:

$$CM_{(B)} = \frac{SC_{(B)}}{(b-1)} = 1.698;$$

Cuadrado medio del factor C:

$$CM_{(C)} = \frac{SC_{(C)}}{(c-1)} = 211,439;$$

CUADRADO MEDIO DE LAS INTERACCIONES:

Cuadrado medio de la interacción AxB:

$$CM_{(AB)} = \frac{SC_{(AB)}}{(a-1)(b-1)} = 0.106;$$

Cuadrado medio de la interacción AxC:

$$CM_{(AC)} = \frac{SC_{(AC)}}{(a-1)(c-1)} = 0.614;$$

Cuadrado medio de la interacción BxC:

$$CM_{(BC)} = \frac{SC_{(BC)}}{(b-1)(c-1)} = 2.163;$$

Cuadrado medio de la interacción A x B x C:

$$CM_{(ABC)} = \frac{SC_{(ABC)}}{((a-1)(b-1)(c-1))} = 0.218$$

Acá hay un detalle importante de para aclarar, estas ecuaciones son válidas para el diseño experimental es con submuestras (replicas). Sin embargo, cuando el experimento es estándar (es decir, no se toman varias muestras en las unidades experimentales (no tiene replicas), la suma de cuadrados del error (SC_E) toma el valor de cero haciendo que el (CM_E) resulte indeterminada como se observa en la tabla 6.5.

6.5.3 Formulación de ANOVA

Después de efectuar diversos cálculos para obtener los cuadrados medios mostrados anteriormente, se continúa con el análisis estadístico de los datos de acuerdo al diseño experimental 2^3 , para cuantificar y evaluar la importancia de las fuentes de variación (factores de tratamientos A, B y C), mediante el análisis de varianza (ANOVA). Fundamentalmente este análisis de ANOVA consiste en analizar de respuestas cuantitativas obtenidas en la lixiviación del cobre, donde se ha realizado ocho experimentos con una sola réplica de manera, que no es posible calcular F de Fisher.

Tabla 6.5 ANOVA para la recuperación de cobre

Fuente	SC	G.L.	CM	Fo	Fc	Decisión
A	1763.883	1	1763.883	*	*	*
B	1.698	1	1.698	*	*	*
C	211.439	1	211.439	*	*	*
AB	0.106	1	0.106	*	*	*
AC	0.614	1	0.614	*	*	*
BC	2.163	1	2.163	*	*	*
ABC	0.218	1	0.218	*	*	*

ERROR	0.000	0	*			
TOTAL	1980.121	7	1980.121			

Fuente: elaboración propia

Nótese que se requieren al menos dos replicas ($n \geq 2$) para calcular F de Fisher, puesto que la SC_E tiene 0 grados de libertad cuando $n=1$. Entonces, vamos a optimizar el análisis de ANOVA.

6.6 El mejor ANOVA

Los recursos son limitados, de tal manera que la lixiviación para recuperar cobre solo pudo ejecutar con una sola réplica del diseño factorial 2^3 , no pudiendo en una primera intención el análisis de varianza (ANOVA). Entonces Para ejecutar un ANOVA, la fuente de variabilidad error debe tener al menos un grado de libertad. Por lo que, se efectúa transformaciones del conjunto de datos original en la forma como se muestra en la tabla 6.6, por lo tanto, la transformación ha permitido efectuar el estadístico de prueba para la hipótesis formulada

6.6.1 Determinación de F de Fisher

El cálculo de Fisher se realiza dividiendo la media cuadrática de los efectos entre la media cuadrática del error y se utilizó para las comparaciones de los componentes de la desviación total. En su determinación se aplicó la siguiente fórmula

$$F_0 = \frac{MS_{Efectos}}{MS_{Error}} \quad \text{Ec 6.5}$$

La forma de cada distribución de muestreo teórico F depende del número de grados de libertad que estén asociados a ella, requerido para ANOVA. Tanto el numerador como el denominador tienen grados de libertad relacionados, habiéndose obtenido los siguientes valores:

$$F_{0A} = \frac{1763.883}{0.106} = 16640.406$$

$$F_{0B} = \frac{1.698}{0.106} = 16.019$$

$$F_{0C} = \frac{211.439}{0.106} = 1994.708$$

$$F_{0AC} = \frac{0.614}{0.106} = 5.792$$

$$F_{0BC} = \frac{2.163}{0.106} = 20.406$$

$$F_{0ABC} = \frac{0.218}{0.106} = 2.057$$

6.6.2 *Formulación del mejor ANOVA*

Se comparó los componentes de la fuente de variabilidad por análisis de varianza, con el uso de valores obtenidos anteriormente se formula el ANOVA para el proceso de lixiviación para recuperar el cobre; los resultados obtenidos en las la tablas 6.6 y 6.7; han sido obtenidas retirando los efectos en una primera instancia AB cuyo efecto es del 0.535 % y luego en segunda instancia los efectos B, AC, BC y ABC cuyo aporte total es de 6.608 % (ver tabla 6.3), es claro que los efectos retirados son casi no significativo, sus valores se acumulan en el error para obtener finalmente el análisis de varianza de la tabla 6.7, que muestra un ANOVA con sólo dos términos significativos, por lo que se considera como el mejor. Conviene utilizar el valor-p por ser una medida (cuantitativa) de evidencia en contra de la hipótesis nula. Teniendo presente que, cuanto más pequeño es el valor-p, más consistente es el rechazo a la hipótesis nula.

Tabla 6.6 Mejor ANOVA para la recuperación de cobre (sin AB)

Fuente	SC	G.L.	CM	Fo	Fc	Decisión
A	1763.883	1	1763.883	16640.406	161.448	Ho SE RECHAZA
B	1.698	1	1.698	16.019	161.448	Ho SE ACEPTA
C	211.439	1	211.439	1994.708	161.448	Ho SE RECHAZA
AC	0.614	1	0.614	5.792	161.448	Ho SE ACEPTA
BC	2.163	1	2.163	20.406	161.448	Ho SE ACEPTA
ABC	0.218	1	0.218	2.057	161.448	Ho SE ACEPTA
ERROR	0.110	1	0.106			
TOTAL	1980.121	7	1980.121	28.25		

Fuente: elaboración propia

El análisis de varianza mostrada en la tabla 6.6 permite identificar que los factores controlables más importantes son la concentración del agua oxigenada tiempo de lixiviación y están incluidas en el modelo matemático del diseño experimental. Después se revalora los términos más significativos y se tiene los efectos A y C en la tabla 6.7

Tabla 6.7 Mejor ANOVA para la recuperación de cobre, con variables significativas

Fuente	SC	G.L.	CM	Fo	Fc	Decisión
A	1763.883	1	1763.883	16640.406	161.448	Ho SE RECHAZA
C	211.439	1	211.439	1994.708	161.448	Ho SE RECHAZA
ERROR	4.799	5	0.96			
TOTAL	1980.121	7	1980.121	28.25		

Fuente: elaboración propia

En la tabla 6.7, observemos también recordemos que los factores concentración de agua oxigenada y tiempo de lixiviación tienen valor-p cercana a cero, significa que estos factores tienen total dominio sobre la variable de respuesta rendimiento de extracción de cobre, y de esta forma queda verificada las hipótesis estadísticas formuladas al iniciar el proceso de análisis de datos para un nivel de significancia de 0.05.

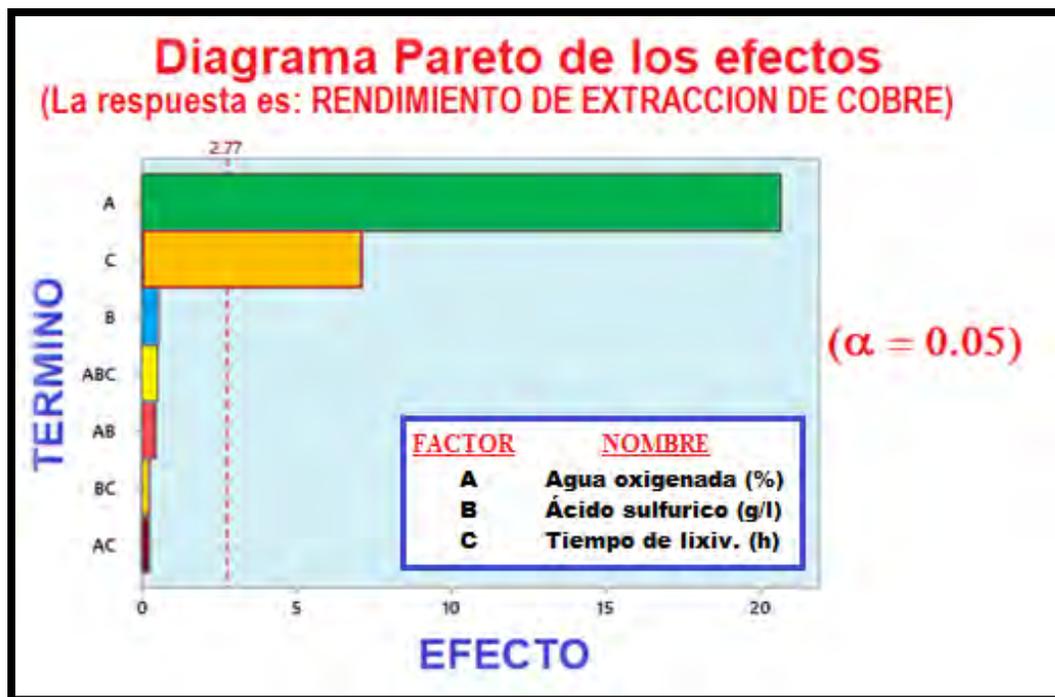
6.7 Pareto estandarizado

Se ha representado los efectos, en valor absoluto, en un diagrama de Pareto, donde los efectos se ordenan de mayor a menor magnitud (en valor absoluto).

6.7.1 *Diagrama de Pareto normal*

Según este diagrama de Pareto (figura 6.5) para el proceso de lixiviación del cobre las variables que tienen un efecto de mayor significancia son la variable A que representa a la concentración de agua oxigenada, la variable C que representa al tiempo de lixiviación. Las otras variables muestran un significado menor, En estos resultados, los dos efectos principales son estadísticamente significativos ($\alpha = 0.05$). El efecto para los otros términos es más pequeño siendo entonces menos significativas.

Figura 6.5 Diagrama de Pareto Normal



Fuente: Elaboración propia - Minitab

6.7.2 Diagrama de Pareto estandarizado

Para Obtener el diagrama de Pareto estandarizado (figura 6.6) con todos los efectos estimados, se efectuaron los siguientes cálculos, a partir de los efectos del factor A y el factor B anteriormente calculados:

$$\text{Efecto A} = 29.698$$

Efecto C = 10.282 Para graficar el diagrama de Pareto estandarizado, se calculó los efectos estandarizados de cada factor, considerado el valor del error estándar de un efecto:

$$\text{Error estándar de un efecto} = \sigma_{\text{efecto}} = \sqrt{\frac{CM_{\text{error}}}{n2^{k-2}}}$$

Por lo tanto:

$$\sigma_{\text{efecto}} = \sqrt{\frac{0.96}{2}} = 0.692$$

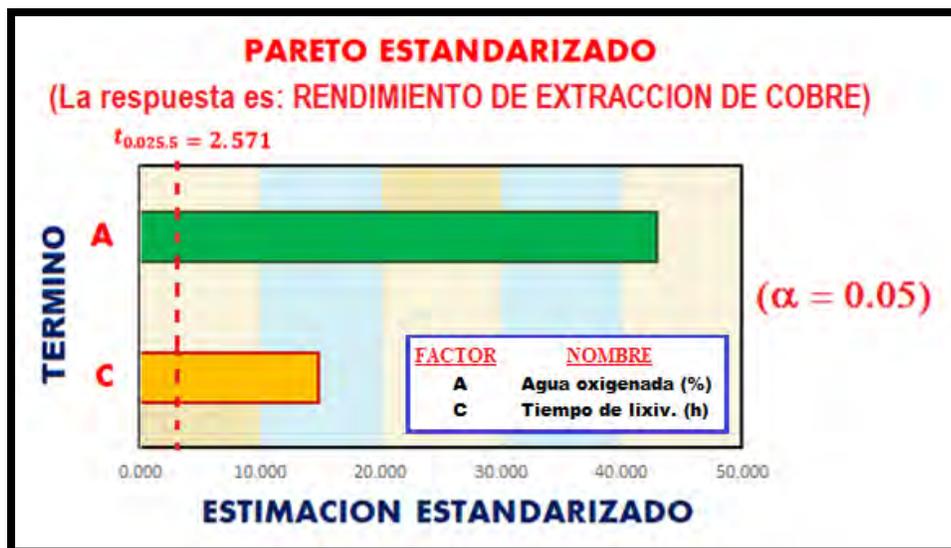
Luego tendremos los efectos estandarizados de cada factor significativo:

$$\text{Efecto estandarizado de A} = \frac{\text{efecto de A}}{\sqrt{\frac{CM_{\text{error}}}{n2^{k-2}}}} = \frac{29.698}{0.692} = 42.916$$

$$\text{Efecto estandarizado de C} = \frac{\text{efecto de C}}{\sqrt{\frac{CM_{\text{error}}}{n2^{k-2}}}} = \frac{10.282}{0.692} = 14.858$$

Con estos valores obtenidos se elaboró la figura 6.6. Donde se observa la eliminación de efectos poco significativos, esto nos da un Pareto estandarizado.

Figura 6.6 Diagrama de Pareto Estandarizado



Fuente: Elaboración propia - Minitab

El diagrama de Pareto estandarizado muestra los valores absolutos de los efectos estandarizados desde el efecto grande (concentración de agua oxigenada) hasta el efecto pequeño (tiempo de lixiviación). La longitud de las barras corresponde al valor absoluto de los efectos estandarizados. El diagrama también muestra una línea de referencia para indicar que estos efectos son estadísticamente significativos.

6.8 Modelo matemático

Se utilizó un modelo lineal de regresión múltiple para generar un valor de la variable dependiente o respuesta (Y: rendimiento de extracción de cobre) a partir de un conjunto de variables independientes (X_1 : concentración de agua oxigenada y X_2 : Tiempo de lixiviación). Con este modelo se evalúa la influencia que tienen las variables independientes sobre la variable

respuesta. En un diseño factorial 2^3 es sencillo expresar los resultados del experimento en términos de un **modelo de regresión**.

6.8.1 *Formulación del modelo de regresión*

El modelo de regresión se expresa matemáticamente para facilitar su estudio. Para el experimento del proceso de recuperación del cobre por lixiviación, el modelo de regresión es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad \text{Ec 6.6}$$

β_0 = Es la ordenada en el origen.

β_1 = Es el efecto promedio que tiene el incremento de la concentración del agua oxigenada (%) en una unidad de la variable rendimiento de extracción de cobre, manteniéndose constantes el resto de variables.

β_2 = Es el efecto promedio que tiene el incremento del tiempo de lixiviación (h) en una unidad de la variable rendimiento de extracción de cobre, manteniéndose constantes el resto de variables.

ε = es el residuo o error.

6.8.2 *Cálculo de los coeficientes de regresión*

En el proceso de lixiviación del cobre las variables controlables tienen dos niveles, esta codificación producirá la notación ± 1 . Por lo tanto, los cálculos de obtención de su valor correspondiente se ajustan al siguiente procedimiento:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad \text{Ec 6.7}$$

En la tabla 6.8, tomamos los valores del porcentaje de recuperación para el cálculo del coeficiente de regresión β_0 :

$$\hat{y} = 27.5 + \left(\frac{8.33}{2}\right)x_1 + \left(\frac{-5.00}{2}\right)x_2$$

Tabla 6.8 Resultados del Diseño factorial - Pruebas Nivel laboratorio

N° Prueba	Escala Codificada			Y: % Recuperación de Cu
	X ₁	X ₂	X ₃	
1	-1	-1	-1	11.379
2	1	-1	-1	40.622
3	-1	1	-1	11.360
4	1	1	-1	40.404
5	-1	-1	1	20.397
6	1	-1	1	50.088
7	-1	1	1	21.798
8	1	1	1	52.610
Total				248.672
Promedio				31.084

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto: $\hat{\beta}_0 = 31.084$

Para los cálculos de los coeficientes de regresión β_1 , β_2 , se recurre a los resultados de los efectos para los factores:

Efecto A = 29.698

Efecto $C = 10.282$

Entonces:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\text{Efecto } A}{2} = \frac{29.698}{2} = 14.849$$

$$\hat{\beta}_2 = \frac{\text{Efecto } C}{2} = \frac{10.282}{2} = 5.141$$

Finalmente, el modelo de regresión codificado:

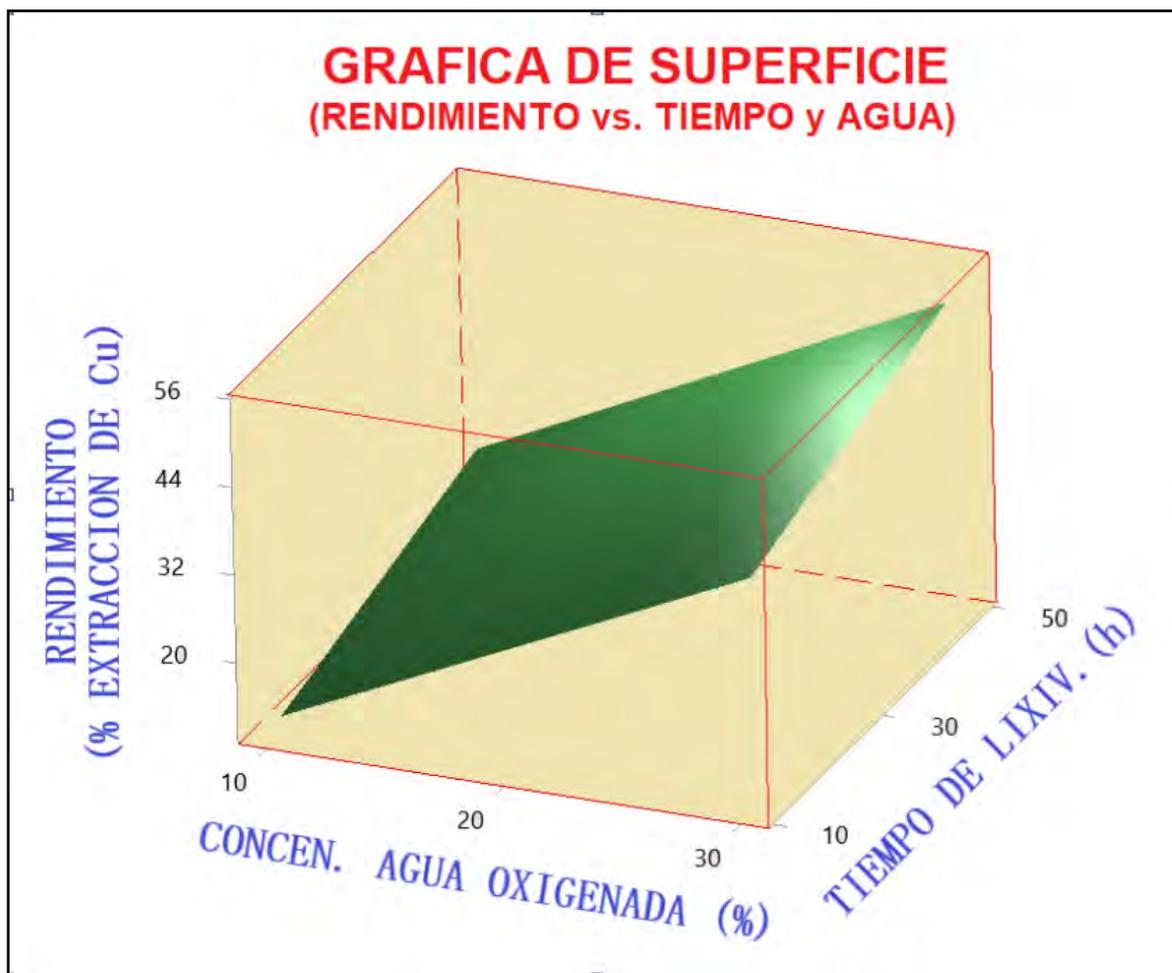
$$\hat{y} = 31.084 + 14.849x_1 + 5.141x_2 \quad \text{Ec 6.8}$$

Se puede apreciar que el coeficiente $\hat{\beta}_0$ es el gran promedio de las ocho observaciones de la recuperación del cobre, y los coeficientes de regresión $\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_2$ son la mitad de las estimaciones de los efectos de los factores correspondientes.

6.9 Grafica de superficie

Para observar gráficamente como el modelo matemático de la ecuación de regresión modela la respuesta y nos permite observar la zona más óptima, se utilizó la técnica de grafico de resultados del experimento. En la figura optimizan el valor de la variable respuesta, la diferencia entre una ecuación de superficie de respuesta y la ecuación de un diseño factorial es la adición observar todos los posibles resultados, luego, podemos mapear la superficie de respuesta. Los valores óptimos están en la parte superior de la figura 6.7.

Figura 6.7 Gráfica de superficie para factores mas influyentes



Fuente: elaboración propia – Minitab

6.10 Coeficiente de determinación

Se calcula el coeficiente de determinación para apreciar la proporción de la bondad del ajuste del modelo que hemos aplicado a la recuperación del cobre. La definición del coeficiente de determinación ordinaria es bastante sencilla: es el porcentaje de la variación en la variable de respuesta que es explicado por un modelo lineal.

$$R^2 = \frac{\text{Variación explicada}}{\text{Variación total}}$$

Los datos para reemplazar en la ecuación anterior, se encuentran en la tabla 5.7, entonces:

$$R^2 = \frac{SS_{Total} - SS_E}{SS_{Total}} = \frac{1980.121 - 4.799}{1980.121} = 0.9976$$

El resultado obtenido es cercano a 1, indicando un buen ajuste del modelo a la variable respuesta, por lo tanto, la ecuación de regresión es de buena calidad y se puede utilizar para predecir futuros resultados o probar la hipótesis de investigación. El coeficiente determina la calidad del modelo del 99.76 % para replicar los resultados. El estadístico R^2 **ajustada**, se calculó con la siguiente fórmula

$$R_{Ajustada}^2 = 1 - \frac{SS_E/df_E}{SS_{Total}/df_{Total}} = 1 - \frac{4.799/5}{1980.121/7} = 0.9966$$

Se observa que está ajustado para los dos factores principales, la concentración de agua oxigenada y tiempo de lixiviación, mostrándonos que estos dos factores tienen efecto preponderante del 99.66 % sobre el rendimiento de extracción de cobre; mientras que los otros factores un efecto sumamente débil. Los resultados nos muestran que R^2 ajustada del modelo apenas ha cambiado ligeramente respecto de la R^2 ordinario del modelo, confirmando los efectos predominantes de los dos factores mencionados.

6.11 Intervalos de confianza

Se ha construido un intervalo de confianza de nivel 95% para los coeficientes de regresión β_0 , β_1 y β_2 del modelo de regresión estimado teniendo presente los supuestos de normalidad,

homogeneidad de varianzas, e independencia. Primeramente, se calculó el **error estándar (se)** de cada coeficiente, definido como:

$$se(\hat{\beta}) = \sqrt{V(\hat{\beta})} = \sqrt{\frac{MS_E}{n2^k}}$$

Luego, el valor de MS_E , se encuentra en la tabla, con $n=1$, las que reemplazamos en la formula y obtenemos el error estándar:

$$se(\hat{\beta}) = \sqrt{\frac{0.96}{(1)(4)}} = 0.571$$

En el siguiente paso calculamos los intervalos de confianza de 95% para cada coeficiente de regresión a partir de la siguiente formula

$$\hat{\beta} - t_{0.025,p} se(\hat{\beta}) \leq \beta \leq \hat{\beta} + t_{0.025,p} se(\hat{\beta})$$

donde $(\alpha/2,p)$ es el percentil de la distribución t de Student. donde los grados de libertad de t se obtiene con p que es el grado de libertad de la suma de cuadrados del error en la tabla 5.7.

$$\text{Intervalo para } \hat{\beta}_0 = 31.084; , \text{ se tiene que } t_{\alpha/2,p} = t_{0.025,5} = \mathbf{2.571}$$

Luego:

$$31.084 - 2.571 * 0.571 \leq \hat{\beta}_0 \leq 31.084 + 2.571 * 0.571$$

$$28.616 \leq \hat{\beta}_0 \leq 32.552$$

$$\text{Intervalo para } \hat{\beta}_1 = 14.849; , \text{ se tiene que } t_{\alpha/2,p} = t_{0.025,5} = 2.571$$

Luego:

$$14.849 - 2.571 * 0.571 \leq \hat{\beta}_0 \leq 14.849 + 2.571 * 0.571$$

$$13.849 \leq \hat{\beta}_0 \leq 16.317$$

Intervalo para $\hat{\beta}_2 = 5.141$; , se tiene que $t_{\alpha/2,p} = t_{0.025,5} = 2.571$

Luego:

$$5.141 - 2.571 * 0.571 \leq \hat{\beta}_0 \leq 5.141 + 2.571 * 0.571$$

$$3.673 \leq \hat{\beta}_0 \leq 6.609$$

Luego, los intervalos de confianza nos permiten estimar entre qué valores están los valores accesibles de los coeficientes de la ecuación regresión, con una probabilidad de equivocarnos del 5%. C

CAPÍTULO VII

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Se hizo el análisis químico cuantitativo de una muestra de 130 g. de peso, en el Laboratorio Analítico del Sur, donde se obtuvo como resultado 26.40% ley de contenido de cobre, lo que indica que tiene un alto contenido de cobre y que la diferencia representa el contenido de otros elementos metálicos, polímeros, cerámicos, etc. El alto contenido de cobre hace que sea factible la extracción por lixiviación.
2. Al realizar el análisis granulométrico de la muestra, se logró obtener tamaños entre menores y mayores próximos a 4.75mm. En las pruebas preliminares de lixiviación se observó que el tamaño de partícula no tiene mucha influencia en la lixiviación; por lo que, se replanteó nuestra variable inicial por concentración de agua oxigenada que se usó como agente oxidante.
3. El consumo de ácido promedio es de 2.20Kg H₂SO₄ /Kg de Cu y se puede apreciar que a partir de las 40 horas se nota una considerable reducción en la concentración del ácido de 400 g/l bajo hasta una concentración de 273.32 g/l y a que partir de las 50 horas la concentración de ácido empieza a mantenerse casi constante.
4. Se realizó cálculos del diseño factorial 2³, donde se puede deducir los efectos de las variables:
 - ❖ El efecto de la concentración de agua oxigenada es de 29.698, por lo que al aumentar la concentración del agua oxigenada 10% al 30% la recuperación del cobre aumenta en mayor proporción, por tanto, es una de las variables que tiene mayor influencia.

- ❖ El efecto de la concentración de ácido sulfúrico es de 0.992, lo que indica que, al pasar la concentración de 350 g/l a 400 g/l, esta variable no tiene mayor influencia en el proceso de extracción del cobre.
- ❖ El efecto del tiempo de lixiviación es de 10.282, según el análisis de efectos al pasar el tiempo de lixiviación de 12 a 48 horas, tenderá a tener mayor porcentaje de extracción del cobre, quiere decir que es una de las variables que tiene significancia en el proceso de extracción.
- ❖ El efecto de interacción entre la concentración de agua oxigenada y la concentración de ácido sulfúrico es de 0.231, al pasar las dos variables a sus niveles más elevados, se podría obtener mayor influencia en el porcentaje de extracción
- ❖ El efecto de interacción entre la concentración de agua oxigenada y el tiempo de lixiviación es de 0.554, al pasar estas variables por sus niveles elevados, se puede observar que se eleva el porcentaje de extracción de cobre.
- ❖ El efecto de interacción entre la concentración de ácido sulfúrico y el tiempo de lixiviación 1.040, al obtener estas interacciones se mantienen constantes, observando que al elevar sus niveles el porcentaje de extracción es constante.
- ❖ El efecto de interacción entre, la concentración de agua oxigenada, concentración del ácido sulfúrico y el tiempo de lixiviación. Podemos decir que éstas son las variables con mayor influencia en el proceso de lixiviación del cobre en los TCI. Que el agua oxigenada es quien tiene mayor significancia en el porcentaje de extracción del cobre.

CONCLUSIONES

- ❖ En la ciudad de Cusco no existe un sistema de tratamiento de computadoras en desuso, las que se encuentran en entidades públicas o privadas quedan almacenadas y las domiciliarias se mezclan con residuos urbanos teniendo como destino final el precario relleno sanitario de Jaquira o los botaderos informales que existen en la ciudad.
- ❖ A través de este trabajo se demuestra que separando los polímeros de los metales es posible plantear un sistema de tratamiento de estos residuos para el reciclado como material secundario, tanto como para la industria polimérica como para la metálica.
- ❖ Se extrajo el 52.61 % de cobre de las tarjetas de circuito integrado de computadoras por medio del proceso de lixiviación ácida por agitación, con una concentración de agua oxigenada al 30%, por un tiempo de 48 horas y una concentración de 400g/l de ácido sulfúrico.
- ❖ El modelo matemático que mejor se ajusta al proceso de lixiviación acida por agitación de las tarjetas de circuito integrados de computadoras es:

$$\hat{y} = 31.084 + 14.849x_1 + 5.141x_2$$

RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir lixiviando los ripios, ya que, por el resultado de contenido de cobre en éstas, se puede ver que tiene un alto contenido que puede seguir siendo recuperado.
- Para lograr una mayor recuperación se recomienda incrementar la concentración de agua oxigenada; en vista que, a mayor oxidación, mayor % de recuperación.
- El cusco es una ciudad en la que se genera grandes residuos de aparatos eléctricos y electrónicos por lo que sería factible que se pudiera implementar un sistema de gestión para el manejo de estos aparatos.
- Se ha logrado demostrar con el presente trabajo de investigación que se puede extraer cobre con un buen porcentaje de extracción, de esta manera queda demostrado que es una buena alternativa para el manejo y tratamiento de estos residuos y de esta forma contribuir con la reducción de la contaminación del medio ambiente; por lo tanto, se recomienda realizar un trabajo de investigación que permita evaluar o plantear un proyecto de implementación de un sistema de reciclado de los RAEE.

BIBLIOGRAFIA

LIBROS

- Ballester Antonio, Verdeja Luis F., Sancho José Metalurgia Extractiva Fundamentos, Madrid, España, Síntesis.
- Ballester Antonio, Verdeja Luis F., Sancho José, (2000), Metalurgia Extractiva Procesos de Obtención volumen II, Madrid, España, Síntesis.
- Biswas A. K, Davenport W. C (1993), Cobre- Metalurgia Extractiva, México, Limusa.
- Duan, C., Wen, X., Shi, C., Zhao, Y., Wen, B., He, Y. (2009). Recovery of metals from waste printed circuit boards by a mechanical method using a water medium. *J. Hazard. Mater.*
- Hernández Sampieri Roberto, Fernández Carlos, Baptista Lucio, María del Pilar, (2010), Metodología de la Investigación, 5ta e, México. McGraw-Hill.
- Harue Yamane, L., Tavares de Moraes, V., Romano Espinosa, D., & Soares, Tenório, J. (2011). Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management*
- Octave Levenespiel, (2004), Ingeniería de las Reacciones Químicas, 3era e, USA, Limusa,
- Terkel Rosenqvist, (1987), Fundamentos de la Metalurgia Extractiva, México, Limusa.

REVISTAS

- Harue Yamane, Tavares de Moraes, Romano Espinoza, & Soares Tenório, (2011) “Recyclin WEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste manege*”.
- Miranda, L.F. y Miranda, E. (2015), Investigado en ingeniería, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa – Perú.
- Paredes Choque Edith, Cohaila Barrios Alberto (2013) “Reciclaje de residuos electrónicos en computadoras de Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann”, (Revista), Tacna – Perú.

- Ramos Obregón Rolando, Camero Hermoza Pedro (2017) “Recuperación del cobre de placas integradas por tecnologías metalúrgicas”, Cusco – Perú.

TESIS

- Dairo Ernesto Chaverra Arias (2014). “Extracción de cobre a partir de tarjetas de circuito impreso de residuos electrónicos”, (Tesis de pre grado), Colombia.

PÁGINAS WEB

- <http://www.monografias.com/trabajos58/principales-tipos-investigacion/principales-tipos-investigacion.shtml> (7:12 pm 10-08-2018)
- <http://www.inpralatina.com/20071013118/articuloslixiviación-de-minerales-oxidados-de.cobre/.html> (5:23 pm 15- 08-2018)
- <https://es.scribd.com/doc/310920909/mecanismos-de-lixiviacion-> (6:36 pm 20-08-2018)
- <https://rpp.pe/lima/actualidad/manejo-de-residuos-electricos-y-electronicos-como-hacerlo-sin-riesgos> (11:00 am 29-08-2018)
- <http://vrin.unsaac.edu.pe/data/119reglamento/20para/20presentacion/20y/20evaluacion/20proyectos/20fedu/202018-2019.pdf> (11:18 am 29-08-2018).
- Masari, F. S. (2000). *Biolixiviación*. PDF.
https://osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Biolixiviacion.pdf (12:40 m, 18-02-2021).

ANEXO I ANÁLISIS QUÍMICO DE PLACAS DE TCI EN LABORATORIO

ANALÍTICO DEL SUR

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú / Apartado 2102

Teléfono (054) 443284 Fax: (054) 444582
www.laboratoriosanaliticosdesur.com

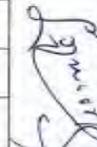
INFORME DE ENSAYO LAS-MT-19-00012

Fecha de emisión: 24/10/2019
Pág.: 1/2

Señores: ANAHID PRISCILA LLONTO
Dirección: CUSCO
Atención: ANAHID PRISCILA LLONTO
Recepción: 17/10/2019
Realización: 17/10/2019

Método de ensayo aplicado
*5516 Método de Ensayo multielemental por ICP OES para metales

Muestra	Nombre de muestra	Descripción de muestra	Procedencia de la muestra	5516 Ag ppm	5516 Al ppm	5516 B ppm	5516 Ba ppm	5516 Bi ppm	5516 Br ppm	5516 Ca ppm	5516 Cd ppm	5516 Co ppm	5516 Cr ppm	5516 Cu ppm	5516 Fe ppm	5516 Gs ppm	5516 Hr ppm	5516 Li ppm	
MT19000018	PLACAS DE CIRCUITO INTERNO	PLACAS	CUSCO	383,19	>10 000	3441,70	3931,62	72,79	<=0,84	>10 000	0,82	2,97	40,70	>10 000	4485,58	<=7,60	<=0,40	173,30	11,27


 Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
 Sixto Vicerio Juárez Mejía
 Gerente General
 Ing. Químico C.I.P. 19474

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú / Apartado 2102

Teléfono (054) 443294 Fax: (054) 444582
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

INFORME DE ENSAYO LAS-MT-19-00012

Fecha de emisión: 24/10/2019
Pág.: 2/2

Señores: ANAHID PRISCILA LLONTO
Dirección: CUSCO
Atención: ANAHID PRISCILA LLONTO
Recepción: 17/10/2019
Realización: 17/10/2019

Método de ensayo aplicado
6516 Método de Ensayo multielemental por ICP OES para metales

Muestra	Nombre de muestra	Descripción de muestra	Procedencia de la muestra	6516 Mg ppm	6516 Mn ppm	6516 Ni ppm	6516 P ppm	6516 Ph ppm	6516 Sb ppm	6516 Se ppm	6516 Sr ppm	6516 Te ppm	6516 Ti ppm	6516 V ppm	6516 Zn ppm				
MT1900018	PLACAS DE CIRCUITO INTERNO	PLACAS	CUSCO	551,85	76,25	3,70	704,62	1186,79	58,23	>10 000	759,74	<=0,64	>10 000	263,57	<=0,80	419,39	<=0,64	<=0,64	6300,16


Luzmila Medeiros del Sur E.I.R.L.
Srta. Priscila Llonto, Nóbrega
Gerente General
Ing. Darío C.I.P. 19074

ANEXO II ANÁLISIS QUÍMICO DE LA LEY DE CABEZA**Laboratorios Analíticos del Sur**

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa - Perú

Tel: (054) 443294 Fax: (054) 444582

www.laboratoriosanaliticosdel sur.com

INFORME DE ENSAYO LAS-MT-19-00011

Fecha de emisión: 19/10/2019

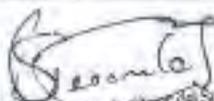
Pág.: 1/1

Señores: ANAHID PRISCILA LLONTO
Dirección: CUSCO
Atención: ANAHID PRISCILA LLONTO
Recepción: 17/10/2019
Realización: 17/10/2019

Método de ensayo aplicado

*6517 Método de ensayo para Cobre por Volumetría para aleaciones de Cobre

Muestra	Nombre de muestra	Descrip. de muestra	Procedencia de la muestra	6517 Cu
#				%
MT19000018	PLACAS DE CIRCUITO INTERNO	PLACAS	CUSCO	26,40


Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sede: Vicente Juárez Neira
Gerencia General
Hg. Químico C.I.P. 15474

ANEXO III RESULTADO DE PRUEBAS EXPLORATORIAS

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa - Perú

Tel: (054) 443294 Fax: (054) 444582

www.laboratoriosanaliticosdel sur.com

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-20-00028

Fecha de emisión: 18/01/2020 00:00:00

Página 1 de 1

Señores: ANAHI PRISCILA LLONTO
Dirección: CALLE LAMBAYEQUE 105 MARIANO MELGAR AREQUIPA
Atención: ANAHI PRISCILA LLONTO
Recepción: 17/01/2020
Realización: 17/01/2020
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra

Métodos ensayados

*909 Método de ensayo para Cobre por Volimetría en soluciones ácidas

Código Interno L.A.S	Nombre de Muestra	Procedencia de Muestra	Descripción de Muestra	*909	
				Cu	g/L
SS20000125	MUESTRA 01	No proporcionado por el cliente.	Solución de ácido sulfúrico	24,21	
SS20000127	MUESTRA 02	No proporcionado por el cliente.	Solución de ácido sulfúrico	15,90	
SS20000128	MUESTRA 03	No proporcionado por el cliente.	Solución de ácido sulfúrico	17,22	
SS20000129	MUESTRA 04	No proporcionado por el cliente.	Solución de ácido sulfúrico	19,50	

Fin del informe

Susante
Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicentio Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico C.I.R. 19674

ANEXO IV CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Telf: (054) 443294 Fax: (054) 444582

www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-20-00378

Fecha de emisión: 27/11/2020

Página 1 de 1

Clave generada : A201A5C5

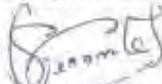
Señores: LLONTO TAYPECCAHUANA, ANAHID PRISCILA
 Dirección: CALLE LAMBAYEQUE 105 MARIANO MELGAR AREQUIPA
 Atención: ANAHI PRISCILA LLONTO
 Recepción: 26/11/2020
 Realización: 26/11/2020
 Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*909 Método de ensayo para Cobre por Volumetría en soluciones ácidas

Código Interno L.A.S	Tiempo (h)	Procedencia de Muestra	H2SO4 g/L	*909
				Cu g/L
SS20001970	0	No proporcionado por el cliente.	400.00	0
SS20001971	10	No proporcionado por el cliente.	300.91	15.10
SS20001972	20	No proporcionado por el cliente.	296.86	22.62
SS20001973	30	No proporcionado por el cliente.	280.75	24.43
SS20001974	40	No proporcionado por el cliente.	273.32	26.80
SS20001975	50	No proporcionado por el cliente.	271.45	34.06
SS20001976	80	No proporcionado por el cliente.	270.93	34.15

Fin del informe


 Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
 Sixto Víctor Lucéaz Hebra
 C. 100000000
 Ing. Químico C.A.R. 19474

ANEXOS VI ANALISIS DE RIPIOS**Laboratorios Analíticos del Sur**

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Tel: (054) 443294 Fax: (054) 444582

www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

INFORME DE ENSAYO LAS01-MT-20-00004

Fecha de emisión: 30/11/2020

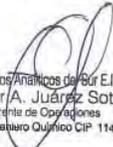
Pág.: 1/1

Señores: ANAHID PRISCILA LLONTO TAYPECCAHUANA
Dirección: CALLE LAMBAYEQUE 105 MARIANO MELGAR AREQUIPA
Atención: ANAHID PRISCILA LLONTO TAYPECCAHUANA
Recepción: 26/11/2020
Realización: 26/11/2020

Método de ensayo aplicado

*6503 Método de ensayo para Cobre por Volumetría para Cementos de Cobre

Muestra #	Nombre de muestra	Descrip. de muestra	Procedencia de la muestra	6503 Cu %
MT20000007	R 1	PLACA	No proporcionado por el cliente	31,78
MT20000008	R 2	PLACA	No proporcionado por el cliente	21,48
MT20000009	R 3	PLACA	No proporcionado por el cliente	26,65
MT20000010	R 4	PLACA	No proporcionado por el cliente	21,40
MT20000011	R 5	PLACA	No proporcionado por el cliente	20,48
MT20000012	R 6	PLACA	No proporcionado por el cliente	20,38
MT20000013	R 7	PLACA	No proporcionado por el cliente	24,40
MT20000014	R 8	PLACA	No proporcionado por el cliente	20,58


 Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
 Omar A. Juárez Soto
 Gerente de Operaciones
 M. So. Ingeiero Químico CIP 114428

Nº 19835

MATRIZ DE CONSISTENCIA

EXTRACCIÓN DEL COBRE A PARTIR DE TARJETAS DE CIRCUITO INTEGRADO DE COMPUTADORAS POR LIXIVIACIÓN ACIDA EN LA CIUDAD DEL CUSCO					
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA	INDICADORES
<p>Problema general</p> <p>¿Cuánto será la extracción de cobre a partir de tarjetas de circuito integrado de computadoras mediante el proceso de lixiviación ácida por agitación, en la ciudad de Cusco?</p> <p>Problemas específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ ¿Cuál es la concentración de agua oxigenada óptima para la lixiviación ácida? ❖ ¿Cuál es la concentración de ácido para una extracción óptima de cobre? ❖ ¿En qué tiempo se logrará una mejor extracción? 	<p>Objetivo general</p> <p>Extraer el cobre de tarjetas de circuitos integrados de computadoras mediante el proceso de lixiviación ácida por agitación, en la ciudad de Cusco.</p> <p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Determinar la concentración de agua oxigenada para una mejor extracción ❖ Determinar la concentración de ácido sulfúrico adecuado para una mejor extracción. ❖ Determinar el tiempo óptimo del proceso de lixiviación para una mayor extracción. 	<p>Hipótesis general</p> <p>Mediante la lixiviación ácida por agitación de tarjetas de circuitos integrados se logra extraer un 60 % de cobre.</p> <p>Hipótesis específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Se obtiene una mejor extracción de cobre empleando una concentración de agua oxigenada al de 30%. ❖ La concentración óptima de ácido sulfúrico para una mejor extracción es de 350 g/L. ❖ Empleando un tiempo de 12 horas de lixiviación se obtiene un buen porcentaje de extracción del cobre 	<p>Variables independientes</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Concentración de agua oxigenada. ❖ Concentración del ácido sulfúrico. ❖ Tiempo de lixiviación ácida <p>Variable dependiente</p> <p>Porcentaje de extracción</p>	<p>Nivel de investigación</p> <p>Experimental a nivel de laboratorio y teórica</p> <p>Tipo de investigación</p> <p>Tecnológico</p> <p>Población</p> <p>Todos los materiales de los circuitos integrados de las computadoras que se encuentran en depósitos, entidades, domicilios, etc., que son generadas en la ciudad del Cusco.</p> <p>Muestra; 9.675kg de TCI.</p> <p>Diseño de la investigación; Diseño factorial</p> <p>Técnicas de recolección de datos</p> <p>Investigación bibliográfica, Pruebas, experimentales de laboratorio, entrevistas para la recolección de información y procesamiento de datos.</p> <p>Instrumentos de recolección de datos</p> <p>Avances teóricos, revisión de páginas web, revisión de seminarios de tesis y tesis.</p> <p>Balanzas, cizalla, tijeras, reactores, reactivos, instrumentos de laboratorio, etc.</p> <p>Cuestionarios, guías de análisis de observación, programas de diseño factorial 2n (MINITAB Y EXCEL), Word.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Porcentaje (%). ❖ Gramos por litro (g/L). ❖ Tiempo de lixiviación (h)

Fuente: Elaboración propia

