



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E**  
**INDUSTRIAS EXTRACTIVAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN**  
**METALURGIA Y MATERIALES**



**“RECUPERACIÓN DE COBRE A PARTIR DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS**  
**IMPRESOS MEDIANTE D2EHPA-QUEROSENO EN MEDIO NÍTRICO”**

TESIS

PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO EN METALURGIA Y MATERIALES

PRESENTA

MARIO NIL RODRÍGUEZ SÁNCHEZ

ASESOR

DR. RICARDO GERARDO SÁNCHEZ ALVARADO

FECHA

CIUDAD DE MÉXICO, MARZO DE 2021

Folio  
T-DEySA-072-20

Asunto  
Autorización de tema

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"  
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración  
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía  
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"  
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

CDMX, 17 de diciembre de 2020

Pasante  
Mario Nil Rodríguez Sánchez  
PRESENTE

Boleta  
2015320916

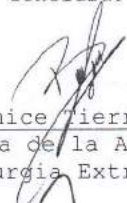
Programa Académico  
I.M.M.


Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica a través de este Departamento autoriza al **Dr. Ricardo Gerardo Sánchez Alvarado** sea asesor en el tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Individual**, con el título y contenido siguiente:

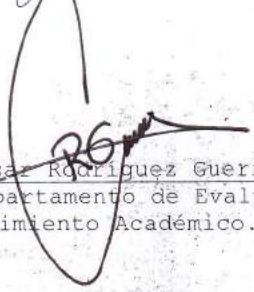
**"Recuperación de cobre a partir de circuitos electrónicos  
Impresos mediante d2ehpa-queroseno en medio nítrico"**


- Resumen  
Introducción  
I. Consideraciones teóricas.  
II. Desarrollo experimental  
III. Análisis y discusión de resultados.  
Conclusiones.  
Referencias.

De acuerdo al artículo 28 del Reglamento de Titulación Profesional del Instituto Politécnico Nacional, el trabajo deberá ser concluido en un término no mayor de un año, a partir de esta fecha.

  
M. en E. Berenice Tierrablanca Gudiño  
Presidenta de la Academia de  
Metalurgia Extractiva

  
Dr. Ricardo Gerardo Sánchez Alvarado  
Director

  
Ing. César Rodríguez Guerrero  
Jefe del Departamento de Evaluación y  
Seguimiento Académico.

  
M. en C. Isaura García Maldonado  
Subdirectora Académica

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.  
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar.  
CRG/mlcp



**Folio**  
T-DEySA-072-20

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional  
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"  
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas  
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

**Asunto**  
Autorización de Impresión

CDMX, a 04 de marzo de 2021

**Pasante**  
**Mario Nil Rodríguez Sánchez**  
**PRESENTE**

**Boleta**  
**2015320916**

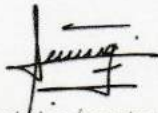
**Programa Académico**  
**I.M.M.**

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente denominado:

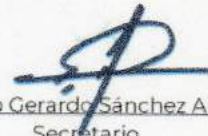
**"Recuperación de cobre a partir de circuitos electrónicos impresos mediante d2ehpa-queroseno en medio nítrico"**

encontramos que el citado trabajo escrito de **Tesis Individual**, reúne los requisitos para **autorizar el examen profesional y proceder a su impresión** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.


Atentamente  
**JURADO**



Ing. María de los Ángeles Hernández Pérez  
Presidenta



Dr. Ricardo Gerardo Sánchez Alvarado  
Secretario



M. en C. Ángel de Jesús Morales Ramírez  
Vocal 1



M. en E. Berenice Tierrablanca Gudiño  
Vocal 2



Ing. Ana Lilia Pérez Flores  
Vocal 3

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.  
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar.  
CRG/mlcp.



**Folio**

T-DLySA-072-20

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional  
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"  
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas  
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

**Asunto**

Cesión de derechos

CDMX, a 04 de marzo de 2021

# CARTA CESIÓN DE DERECHOS

El que suscribe: **Mario Nil Rodríguez Sánchez** estudiante del Programa de: **Ingeniería en Metalurgia y Materiales** con número de Boleta: **2015320916**, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo escrito, por la opción: **Tesis Individual**, bajo la dirección del profesor **Dr. Ricardo Gerardo Sánchez Alvarado** cede los derechos del Trabajo **"Recuperación de cobre a partir de circuitos electrónicos Impresos mediante d2ehpa-queroseno en medio nítrico"** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección de correo electrónico, [cuyoner@hotmail.com](mailto:cuyoner@hotmail.com) y [risanchez@ipn.mx](mailto:risanchez@ipn.mx) Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Atentamente

Mario Nil Rodríguez Sánchez

Nombre y Firma  
del estudiante

Ricardo Gerardo Sánchez Alvarado

Nombre y Firma  
del director



<b>ÍNDICE</b>	
<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	2
<b>OBJETIVO</b> .....	4
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	4
<b>CAPITULO 1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS</b> .....	5
<b>1.2 PRODUCCIÓN DE COBRE</b> .....	5
<b>1.2.1 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE COBRE</b> .....	5
<b>1.2.2 PRODUCCIÓN NACIONAL DE COBRE</b> .....	7
<b>1.2.3 PRECIO DEL COBRE</b> .....	8
<b>1.3 PRODUCCIÓN PRIMARIA DE COBRE</b> .....	8
<b>1.4 PREPARACIÓN DEL MINERAL</b> .....	9
<b>1.4.1 CONCENTRACIÓN DEL MINERAL</b> .....	10
<b>1.5 EXTRACCIÓN POR VÍA PIROMETALÚRGICA</b> .....	10
<b>1.5.1 TOSTACIÓN</b> .....	11
<b>1.5.2 FUSIÓN</b> .....	11
<b>1.5.3 CONVERSIÓN</b> .....	12
<b>1.6 EXTRACCIÓN POR VÍA HIDROMETALÚRGICA</b> .....	13
<b>1.6.1 LIXIVIACIÓN</b> .....	13
<b>1.6.2 EXTRACCIÓN POR SOLVENTES</b> .....	14
<b>1.6.3. DIAGRAMA DE McCABE-THIELE</b> .....	18
<b>1.7 ELECTRO-OBTENCIÓN</b> .....	20
<b>1.7.1 REFINACIÓN DEL COBRE</b> .....	21
<b>1.7.2 PIRO-REFINACIÓN</b> .....	21
<b>1.7.3 ELECTRO-REFINACIÓN</b> .....	21
<b>1.8 RECICLAJE DE METALES</b> .....	22
<b>1.8.1 RECICLAJE DE COBRE</b> .....	22
<b>1.8.2 DESECHOS URBANOS</b> .....	23
<b>1.8.3 CHATARRA ELECTRÓNICA</b> .....	24
<b>1.9 PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE</b> .....	24
<b>1.9.1 RECUPERACIÓN DE COBRE DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS IMPRESOS</b> .....	25
<b>CAPITULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b> .....	30
<b>2.1 MATERIALES</b> .....	30
<b>2.1.1 REACTIVOS QUÍMICOS</b> .....	31
<b>2.2 TÉCNICAS DE ANÁLISIS</b> .....	32
<b>2.3 ACONDICIONAMIENTO DE CEI</b> .....	34
<b>2.4 LIXIVIACIÓN DE CEI EN MEDIO NÍTRICO</b> .....	34
<b>2.5 EXTRACCIÓN POR SOLVENTES DE COBRE CON D2EHPA-QUEROSENO</b> .....	36
<b>2.6 EFECTO DEL pH EN LA EXTRACCIÓN DE COBRE</b> .....	39

<b>CAPITULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	41
<b>3.1 ETAPA DE LIXIVIACIÓN</b> .....	41
<b>3.2 EXTRACCIÓN POR SOLVENTES</b> .....	48
<b>3.3 EFECTO DEL pH INICIAL</b> .....	49
<b>3.4 ISOTERMA DE EXTRACCIÓN</b> .....	51
<b>3.5 RE-EXTRACCIÓN DE IONES DE COBRE</b> .....	57
<b>CONCLUSIONES</b> .....	60
<b>REFERENCIAS</b> .....	61
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	70
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	72

## RESUMEN

En el presente trabajo se estudió la recuperación de cobre a partir de circuitos electrónicos Impresos de desecho (CEI), sin componentes electrónicos y libres de resina, a través de un proceso hidrometalúrgico integrado por i) lixiviación del cobre presente en CEI con  $\text{HNO}_3$  a diferentes concentraciones y ii) extracción por solventes con diferentes concentraciones de D2EHPA diluido en queroseno. Se evaluaron las siguientes variables en la eficiencia de extracción para cobre: efecto de la concentración de  $\text{HNO}_3$  en la lixiviación de cobre presente en CEI, relación D2EHPA/Queroseno, relación de solución acuosa con respecto a la solución orgánica, así como el efecto del pH inicial de la solución acuosa procedente del proceso de lixiviación. Los resultados mostraron que es posible lixiviar a temperatura ambiente la totalidad de cobre presente en CEI con una solución 3 mol/L de  $\text{HNO}_3$  en 12 h. Posteriormente se realizó la extracción de iones de cobre con D2EHPA diluido en queroseno (10:90 % volumen) con una relación de fases acuosa/orgánica = 1, a temperatura ambiente y un pH inicial de la solución acuosa de 5.2, obteniéndose cerca del 95% de extracción de cobre. En la etapa de re-extracción, se empleó como solución de despojo un electrolito semejante al que se genera posterior al proceso de electrolisis convencional de cobre ( $[\text{Cu}] = 30 \text{ g/L}$  y  $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 320 \text{ g/L}$ ). Usando una relación de fases orgánico/acuoso = 2, fue posible recuperar 94 % de Cu, obteniendo un electrolito con una concentración de 44.3 g/L, el cual puede ser procesado mediante electrolisis convencional para la recuperación de cobre en forma metálica.

# INTRODUCCIÓN

Los desechos electrónicos son uno de los residuos más generados en el mundo, gran parte de ellos son conformados por teléfonos celulares y computadoras, ya que estos equipos son los que se opta por cambiar y desechar con mayor frecuencia, a estos se le suman los pequeños y grandes electrodomésticos. En términos internacionales, los mayores generadores de residuos electrónicos en el mundo son China, Estados Unidos e India [1]. Después de Brasil, México es el mayor generador de residuos electrónicos de América Latina [2], siendo un país donde la mayoría de estos desechos terminan en rellenos sanitarios, tiraderos clandestinos o bien almacenados en casas en vez de optar por la vía del reciclaje.

El reciclaje de estos desechos ayuda a la disminución del Impacto ambiental que estos generan al ser desechados de manera incorrecta, son susceptibles a reaccionar al clima y al medio donde son desechados donde las condiciones meteorológicas los convierten en un riesgo latente para la salud y el medio ambiente. Por lo tanto, el reciclaje de estos desechos de manera correcta no presenta ningún riesgo y es la vía para la obtención y recuperación de gran parte de los materiales que los conforman estos desechos, con mayor importancia y cantidad el cobre. Por lo tanto, actualmente algunos países siguen realizando investigaciones y buscando alternativas para optimizar el procesamiento del reciclaje de los desechos electrónicos para disminuir costos de procesamiento de estos, recuperar y aprovechar al máximo la mayor parte de los materiales presentes en ellos principalmente el cobre, ya que este metal es el más abundante en dispositivos electrónicos. El cobre se ha recuperado de la chatarra electrónica a través de vías de procesamiento pirometalúrgico e hidrometalúrgico. Ambas poseen



buenos resultados en la recuperación de Cu, pero solo la vía Hidrometalúrgica ofrece como ventaja la nula emisión de gases altamente contaminantes y de efecto invernadero provenientes de la incineración de dichos desechos, además de contar con agentes extractantes que permiten extraer, purificar y concentrar eficientemente iones metálicos presentes en soluciones acuosas.

## **OBJETIVO**

Recuperar el cobre presente en circuitos electrónicos impresos de desecho (CEI) por medio de extracción por solventes, empleando una mezcla de ácido di-2-etilhexil fosfórico (D2EHPA) con Queroseno en la fase orgánica, con la finalidad de obtener un electrólito que pueda ser procesado por medio del proceso de electrólisis convencional para cobre.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Obtener CEI a partir de equipos de cómputo.
- Determinar la concentración de  $\text{HNO}_3$  que permita lixiviar a temperatura ambiente el cobre presente en CEI.
- Evaluar la eficiencia de extracción de cobre presente en soluciones de lixiviación de CEI en función del pH.
- Obtener la isoterma de extracción de iones de cobre con D2EHPA-Queroseno para la recuperación de cobre.
- Obtener un electrólito rico en cobre a partir del reciclaje de CEI, que cumpla con las características necesarias para ser procesado por medio de electrólisis convencional de cobre.

# CAPITULO 1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

El cobre es un elemento químico cuyo símbolo en la tabla periódica es Cu con número atómico 29. Es un material no ferroso cuya abundancia en la corteza terrestre es relativamente alta y cuyas propiedades físicas, químicas, eléctricas y mecánicas lo hacen ser un material muy solicitado en la actualidad, cabe mencionar que fue uno de los primeros metales usados por el ser humano.

## 1.2 PRODUCCIÓN DE COBRE

La producción de cobre se puede realizar a través de procesos metalúrgicos, ya sea por vía Pirometalúrgica y/o Hidrometalúrgica. Los procesos anteriormente mencionados constan de una serie de procesos fisicoquímicos a realizar desde la obtención y concentración del mineral hasta obtener como resultado cobre metálico libre de impurezas.

### 1.2.1 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE COBRE

La producción mundial en el 2018 de cada país, que se expresan a continuación, están dadas en miles de toneladas métricas. Los principales países productores de cobre en el mundo son Chile, Perú, China, Estados Unidos, República Democrática del Congo, Australia, Zambia, Indonesia, México y Rusia. En la **Figura 1** podemos observar un mapa sobre "Los Principales Países Productores de Cobre a nivel mundial" proporcionado por el Servicio Geológico Mexicano mostrando la posición en el Ranking y cantidad producida de cobre de cada país durante el 2018 [3].

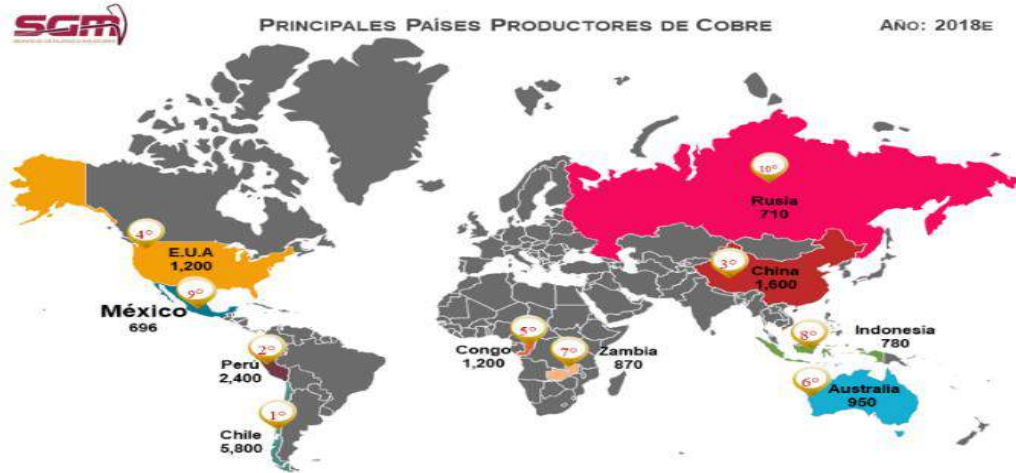


Figura1: Mapa Mundial de la producción de cobre en 2018.

En la **Figura 2** se presenta la gráfica de los 10 países con mayor producción de cobre, mencionados anteriormente y destacados en la **Figura 1** [4].

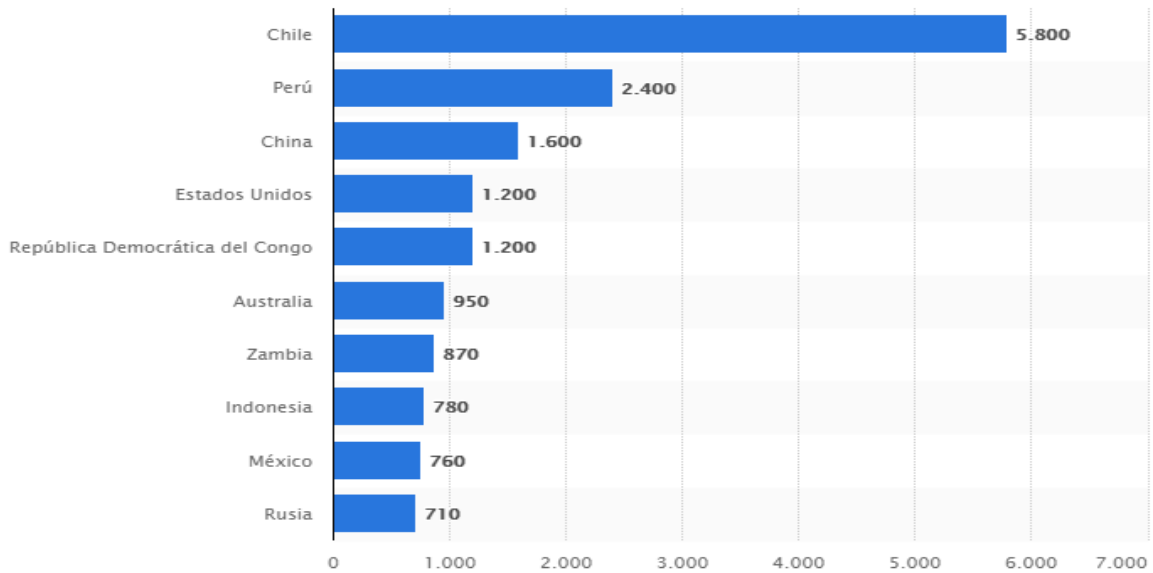


Figura 2: Ranking de los principales países productores de cobre a nivel mundial en 2018.

## 1.2.2 PRODUCCIÓN NACIONAL DE COBRE

México se encuentra en la novena posición del Ranking de los principales países productores de cobre a nivel mundial produciendo una cantidad de 760 mil toneladas métricas durante el 2018 [5].

En términos nacionales los estados que producen más cobre son el estado de Sonora ocupando el primer lugar estimando una cantidad producida de 54,655 toneladas, en segundo lugar, se encuentra el estado de Zacatecas con 4,104 toneladas y por último en tercer lugar el estado de San Luis Potosí con 2,382 toneladas durante el año 2019. Cabe mencionar que no son los únicos estados productores del país, también se encuentran los estados de Chihuahua, Hidalgo, Querétaro, Guerrero y Oaxaca entre otros. Como podemos observar en la **Tabla 1** sobre el "Volumen de producción de cobre Nacional" proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía [6].

Tabla 1: Volumen de Producción de cobre Nacional 2019.

Entidad	Toneladas
Aguascalientes	41
Baja California Sur	521
Chihuahua	1,222
Durango	559
Guerrero	27
Hidalgo	1,013
México	98
Michoacán de Ocampo	186
Oaxaca	148
Querétaro	288
San Luis Potosí	2,382
Sinaloa	78
Sonora	54,655
Zacatecas	4,104

### 1.2.3 PRECIO DEL COBRE

El precio del cobre grado "A" (99.99% de pureza) en diciembre del 2019 tuvo un valor de 6,077.06 dólares americanos por tonelada métrica [7]. Mientras que en 2020 el precio bajo a 5,697.75 dólares americanos por tonelada métrica [8]. Comparando estos dos valores del 2019 con los del 2020 podemos observar una disminución discreta del precio del cobre.

### 1.3 PRODUCCIÓN PRIMARIA DE COBRE

El proceso tradicional de producción de cobre inicia con la extracción de los minerales, estos se pueden extraer tanto en minas subterráneas como en minas a cielo abierto. Cabe mencionar que el mineral contiene un cierto porcentaje del mineral valor (mena) y un porcentaje restante de mineral sin importancia (ganga) "conteniendo entre 0.2% y 3% de Cobre" [9].

Las principales menas pueden ser de óxidos como la Tenorita ( $\text{CuO}$ ) y Cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ); sulfuros siendo la Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), Calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y Bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ); y compuestos mixtos como la Malaquita ( $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ) o Azurita ( $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ), "actualmente el 80% de la producción mundial de cobre se extrae de sulfuros" [10].

Existen dos rutas de extracción siendo la vía Pirometalúrgica y la vía Hidrometalúrgica, pero antes de entrar a esas etapas principalmente el mineral debe de pasar por una preparación previa.

En la **Figura 3** se muestra a mayor detalle toda la producción primaria de cobre de manera ilustrativa.

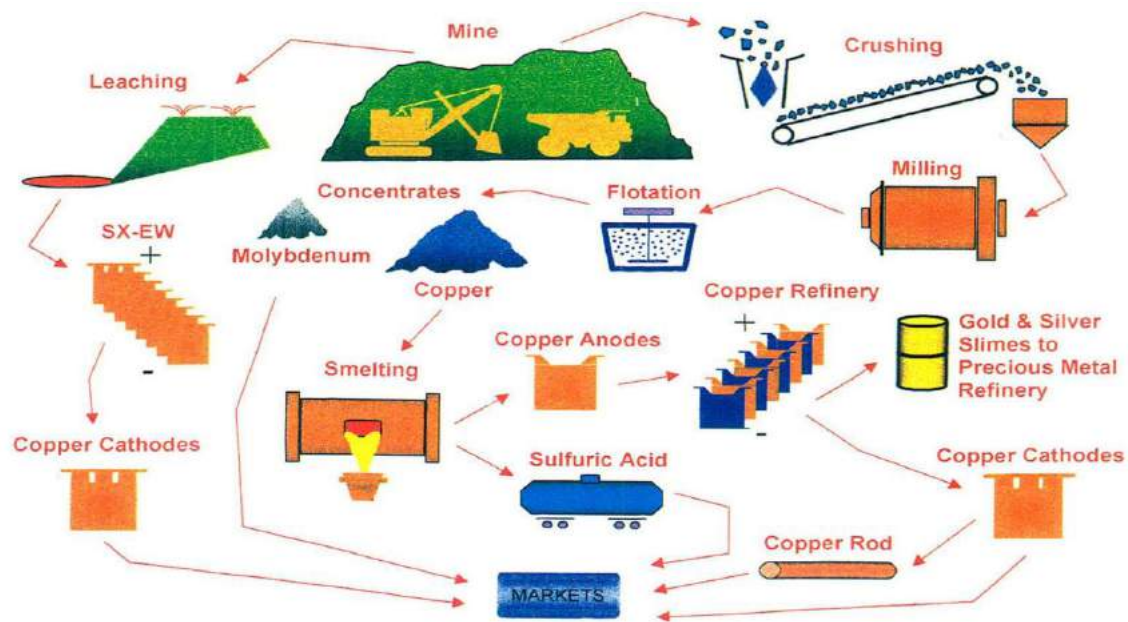


Figura 3: Diagrama de flujo de la producción primaria de Cu, incluyendo las rutas hidro y pirometalúrgica.

## 1.4 PREPARACIÓN DEL MINERAL

La preparación del mineral consta en pasar previamente la materia prima en etapas de trituración primaria, secundaria y terciaria, esto con el fin de llegar a un tamaño de partícula reducido entre 1.5 y 1 ¾ de pulgada [11], posteriormente se lleva a cabo un proceso de molienda con el objetivo de reducir aún más el tamaño obteniendo como resultado un polvo fino con partículas entre 10 a 200 micrómetros con el fin de optimizar la liberación de las especies minerales de interés, las cuales serán recuperadas y concentradas en los siguientes procesos de flotación o lixiviación. La preparación del mineral será una de las etapas del proceso más costosa.

### **1.4.1 CONCENTRACIÓN DEL MINERAL**

La etapa de concentración de mineral es importante en el proceso de producción de cobre ya que las menas utilizadas pueden contener poca o mediana cantidad de mineral valor, en dónde se encuentra el metal de interés. Por lo tanto, tienen que pasar a flotación, que consiste en realizar en varios ciclos una separación selectiva de la mena y la ganga (roca encajante) aprovechando las propiedades hidrofóbicas y aerofílicas de las partículas de ciertos minerales sulfurados de cobre o aumentando dichas propiedades con ayuda de ciertos compuestos químicos y aditivos.

Como resultado de esta etapa del proceso se obtiene un concentrado de mineral que contiene entre 20% y 45% en peso de cobre (especies minerales que contienen cobre) y conteniendo también especies minerales con impurezas como Azufre y Hierro principalmente [12].

El concentrado resultante pasa posteriormente a un proceso de secado con el objetivo de eliminar la mayor cantidad de humedad retenida en el anterior proceso de flotación.

### **1.5 EXTRACCIÓN POR VÍA PIROMETALÚRGICA**

Esta vía de extracción se usa principalmente en concentrados de minerales de cobre sulfurados, se basa en la obtención y refinado del metal sometiendo la materia prima a altas temperaturas, lo que permite realizar reacciones químicas que favorecen la metalización paulatina de los minerales de cobre.



### **1.5.1 TOSTACIÓN**

Es un pretratamiento que se enfoca en eliminar gran parte del contenido de azufre del concentrado, cambiando la composición química a óxidos mediante reacciones a altas temperaturas entre los 300 a 450 °C [13] junto con el oxígeno del ambiente, obteniendo productos que favorecerán a los procesos posteriores. Estos productos obtenidos son una calcina de óxidos de cobre y sulfuros con bajo contenido de azufre, óptimo para la fusión de la mata, y Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) gaseoso que se utilizará para generar Ácido Sulfúrico para beneficiar procesos posteriores de refinado electrolítico o bien para la vía de extracción Hidrometalúrgica. Este tipo de pretratamientos se realizan en hornos de lecho fluido o cadenas de Dwight-Lloyd. "Actualmente es común encontrar que éste paso la tostación no se lleva a cabo como tal en una etapa separada, sino que se realiza a la vez que se lleva a cabo la fusión de la mata con un incremento de aprovechamiento energético" [14].

### **1.5.2 FUSIÓN**

En esta etapa del proceso se busca eliminar aún más el contenido de azufre y hierro principalmente. Se busca fundir la calcina obtenida en el proceso de tostación, adicionando fundentes a temperaturas entre 1200 °C [15]. Una vez fundida la calcina se generarán dos fases, una de ellas es la escoria que está formada por hierro, silicatos y una cantidad considerable de óxidos de cobre, esta se reutiliza en la próxima etapa del proceso para recuperar la cantidad de cobre perdida. La segunda fase que se forma se llama "Mata" que por diferencia de densidades se encuentra por debajo de la escoria, cabe mencionar que la mata no es un cobre

puro, esta contiene una cantidad de cobre aproximadamente de 70% [16] y el resto son impurezas remanentes de óxidos u sulfuros de cobre y hierro. La mata líquida obtenida se extrae del horno y se lleva al siguiente proceso. Otras impurezas como el arsénico (As), Antimonio (Sb), Plomo (Pb), Cobalto (Co), entre otros; pasan a distribuirse entre la mata y la escoria o se separan con los gases del horno de fusión como el azufre formando Dióxidos ( $\text{SO}_2$ ). Esta etapa se lleva a cabo en hornos de reverbero u hornos de fusión instantánea, también conocidos como hornos flash.

### **1.5.3 CONVERSIÓN**

La conversión consiste en oxidar la mata de cobre obtenida en la fusión con aire caliente, donde los sulfuros se oxidan y se eliminan en forma de gas o se ven retenidos en la escoria principalmente como los óxidos de hierro. Dicha etapa del proceso se divide en dos fases:

Primeramente, los sulfuros de hierro ( $\text{FeS}$ ) se oxidan formando dióxidos de azufre los cuales se eliminan en fase gaseosa dando como resultado óxidos de hierro los cuales se escorifican con sílice formando compuestos estables.

La segunda fase consiste en la oxidación de los sulfuros de cobre eliminados en forma de gas, esta reacción se da entre los 1200 y 1300 °C, los óxidos de cobre formados y reciclados de la escoria de la etapa de fusión reaccionan con los sulfuros de cobre de la mata dando como resultado el Cobre "Blíster" el cual es un producto que contiene un 97% de cobre [16]. De este metal se obtienen ánodos de los cuales pueden ser llevados a etapas de refinación para llegar a purezas de 99.99% o pueden estar listos para ser vendidas. Los equipos utilizados son hornos de reverbero o Convertidor Modificado Teniente (CMT).

## **1.6 EXTRACCIÓN POR VÍA HIDROMETALÚRGICA**

Esta vía de extracción a diferencia de la Pirometalúrgica; extrae, purifica y refina el metal deseado desde una solución que lo contiene en forma iónica, siendo una vía más rápida. Cabe mencionar que esta ruta de procesamiento se usa solo para minerales oxidados y en ocasiones mixtos.

### **1.6.1 LIXIVIACIÓN**

La lixiviación es la primera etapa de la extracción, parte del concentrado de mineral de óxido de cobre ya seco. Esta etapa de proceso consiste en impregnar la materia prima lo máximo posible con una solución ácida o básica (dependiendo el mineral) la cual disuelve la mena cíclicamente y permite la formación de una solución rica en iones metálicos, conocida como "Licor". Este producto en estado líquido (con características de un electrolito) por gravedad se recolecta mediante canaletas y es enviado a piletas donde se usará para la siguiente etapa. Es importante saber que la solución más usada para la lixiviación es el ácido sulfúrico obteniéndose a partir de los óxidos de azufre generados como subproducto de la tostación u otros procesos. Por lo tanto, la solución obtenida como producto del proceso de lixiviación es rica en sulfatos de cobre y otras impurezas.

Existen varios tipos de lixiviación como por ejemplo la lixiviación in-situ, en botaderos, en pilas o columnas, por agitación sin mencionar más, el tipo de lixiviación que se va a utilizar se escoge considerando los tipos de minerales, la ley que tengan (si son baja, media o alta ley), sus propiedades fisicoquímicas, así mismo tomando en cuenta también la geografía del lugar, las condiciones

climatológicas, los tipos de yacimientos mineros y las facilidades tecnológicas disponibles.

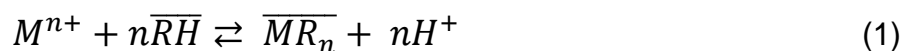
### **1.6.2 EXTRACCIÓN POR SOLVENTES**

Este proceso tiene gran aplicación en la industria de la metalurgia siendo de gran importancia dentro de la hidrometalurgia. Fue un proceso desconocido hasta hace unas décadas siendo aplicado estrictamente en el campo nuclear. Actualmente es usado en procesamiento de cobre, níquel, cobalto, zinc, uranio, molibdeno, tungsteno, vanadio, tierras raras, entre otros metales [17].

La extracción por solventes es una etapa de separación, purificación y concentración de iones del metal de interés a partir del licor obtenido de la lixiviación. Se divide en dos fases que son denominadas fase de carga y fase de descarga. La fase de carga consiste en añadir un compuesto orgánico con alta afinidad selectiva con determinados iones del metal que se quiere recuperar (para este caso iones de Cobre) la cual atraerá y despojará de la solución madre (Licor) hasta cargarse formando compuestos organometálicos estables separándolos de las otras impurezas. La fase de descarga consiste en llevar la solución orgánica ya saturada de iones metálicos de interés a una extracción donde se hace reaccionar generalmente en un volumen menor de solución ácida fuerte provocando el despojo de los iones metálicos en la solución orgánica (solución compuesta por un agente orgánico extractante y diluido en algún aditivo también orgánico) pasándolos a la solución y concentrando el contenido de cobre. Esta etapa se repite varias veces hasta que la solución madre tenga una muy baja cantidad de estos iones. La

sustancia extractante se regenera en contacto de sustancias ácidas y se vuelve a usar en el mismo proceso. Los factores más importantes involucrados en la extracción por solventes son las condiciones que prevalecen en la fase acuosa y la composición de la fase orgánica [17].

Para representar un proceso de extracción por solventes en equilibrio se puede describir en forma general, para una reacción de extracción por solventes de especies catiónicas, empleando extractantes orgánicos, con la reacción química 1:



En dónde  $M^{n+}$  representa el catión,  $RH$  representa al extractante orgánico, previos procesos de deprotonación (perdida de protones) y  $MR_n$  representa el producto de una reacción que compleja al metal derivado de un proceso de extracción por solventes. La barra en la parte superior de los símbolos representa las especies presentes en la fase orgánica. De la reacción anterior, es posible obtener el equilibrio químico basado en la concentración de las especies que participan en el proceso de extracción por solventes, como se muestra en la ecuación 1.

$$K_{conc} = \frac{C_{MR_n} \cdot C_{H^+}^n}{C_{M^{n+}} \cdot C_{RH}^n} \quad (1)$$

Dónde  $K_{conc}$  representa la constante de equilibrio, la cual es igual a  $K_{eq}$  cuando los coeficientes de actividad son igual a 1. Para propósitos prácticos, esta concentración basada en la constante de equilibrio es la más comúnmente usada. Si se requieren resultados de mayor precisión, por supuesto que se deberán evaluar los coeficientes de actividad de las especies químicas involucradas.

El coeficiente de distribución (D) es la relación que existe en el equilibrio de la concentración de la especie metálica de interés en la fase orgánica (CMRn), dividida por la concentración de la misma especie en la fase acuosa (CMn+), la cual está dada por la ecuación 2.

$$D = \frac{C_{MRn}}{C_{Mn+}} \quad (2)$$

La eficiencia de un proceso de extracción por solventes se puede expresar en términos de porcentaje de extracción (%E), lo que refiere a la relación de la concentración del ion metálico de interés en la fase orgánica al equilibrio, dividida por la concentración total inicial de ion metálico de interés en la fase acuosa, finalmente multiplicada por 100, esto expresado en la ecuación 3.

$$\%E = \frac{[M_{n+}] \text{ en equilibrio}}{[M_{n+}] \text{ inicial}} * 100 \quad (3)$$

El licor obtenido es un volumen de una sustancia altamente concentrada en iones de cobre "aproximadamente con concentraciones de aprox. 40 - 45 g/L o incluso mayores" [18] la cual será llevada para su recuperación a la etapa del proceso conocida como electro-obtención.

Los extractantes usados en este proceso se clasifican en catiónicos, aniónicos y por solvatación. Los extractantes catiónicos se subdividen en extractantes de quelación y ácidos; estos presentan una alta selectividad por un ion en específicos debido a la estabilidad de la estructura anular del complejo quelato. En los extractantes aniónicos el proceso de intercambio es similar al de resinas de intercambio iónico. Por último, los extractantes por solvatación presentan una

transferencia de una sal o complejo metálico de la fase acuosa a la fase orgánica mediante la solvatación del ión metálico [17].

En la **Tabla 2** se muestran el nombre comercial y descripción química de extractantes comúnmente usados en la industria metalúrgica [19].

Tabla 2. Nombre comercial y descripción química de algunos extractantes usados en la industria de la metalurgia para recuperación de metales.

<b>Nombre comercial</b>	<b>Descripción química del extractante.</b>
Alamine	Tricaprilamina
Cyanex 272	Ácido di-2,4,4 — trimetil — Pentil fosfínico
Cianex 301	Ácido bis/2,4,4 — trimetil — gentil fosfino ditioico
Cianex 302	Ácido bis (2,4,4 — Trimetil — pentil) Monotiososfínico
DBBP	di — butil — butil fosfato
D2EHPA	Ácido di — 2 — etil — hexil fosfórico
EHEHPA	Ácido di — 2 — etil — hexil fosfónico — mono-2 etil- hexil — éster
HDDNS	Ácido di — dodecil naftalensulfónico
Hostarex Dk - 16	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>
Kelex 100	7 — (5,5,7,7 tetrametil — 1 octan — 3 — il)-8 hidroxiquinolina
Lix 54	Fenil — alquil β — diketona
Lix 70	Oxima de 2 — hidroxil — 3 cloro — 5 — nonil benzofenona
MIBK	Metil — iso — butil — quejona
NPPA	Ácido nonil fenil fosfórico
SME 529	Oxima de 2 — hidroxil — 5 — nonil acetofenona
TBP	Tri — butil fosfato
TNOA	Tri — n — Octilamina
Topo	Óxido de tri — n — Octilfosfina

El ácido di-2-etilhexil fosfórico (D2EHPA) es un extractante ampliamente usado en el proceso de extracción por solventes de distintos metales base, en la **Figura 4** se muestra el orden de selectividad de extracción de cationes de distintos metales base [20].

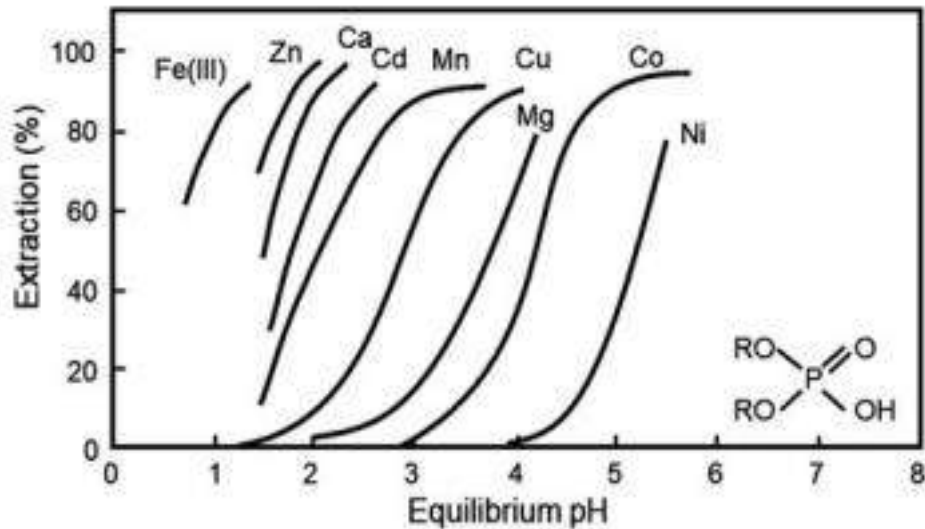


Figura 4. Orden de selectividad de extracción de cationes de metales base por ácido di-2-etilhexilfosfórico (D2EHPA).

### 1.6.3. DIAGRAMA DE McCABE-THIELE

En los procesos de extracción por solventes es importante saber el número de extracciones necesarias que se harán, esto sirve para saber qué tan viable puede ser realizar cada una de las extracciones o si solo es necesario utilizar unas cuantas, esto dependiendo del incremento en la eficiencia del proceso. Esta información se puede determinar a través de los diagramas de McCabe-Thiele, estos se construyen determinado la isoterma de equilibrio y la línea de operación.

Para la determinación de la isoterma de equilibrio se utiliza un método de relación de fases, este consiste en obtener y graficar las concentraciones de metal presentes en la fase acuosa y en la orgánica, al ponerse en contacto estas diferentes relaciones de fases (volúmenes) [21].



La línea de operación puede ser trazada con la relación de flujos acuoso/orgánico con la que se esté trabajando en el proceso continuo. Esta línea es una recta que se obtiene para este caso del balance total de las concentraciones [21] que están representadas en las ecuaciones 4 y 5:

$$F_{AC}[M_i - M_f] = F_{ORG}[M_F - M_I]_{ORG} \quad (4)$$

$$\frac{F_{AQ}}{F_{ORG}} = \frac{[M_F - M_I]_{ORG}}{[M_I - M_F]_{AQ}} \quad (5)$$

Esta es la ecuación de una línea recta de pendiente  $F_{AQ} / F_{ORG}$ .

Donde:

AQ: fase acuosa.

ORG: fase orgánica.

$M_F$ ,  $M_I$ : concentración del metal en mg/L

$F_{AQ}$ ,  $F_{ORG}$ : acuoso y orgánico respectivamente en mL/min.

En la **Figura 5** se muestra la construcción de un diagrama de McCabe-Thiele al graficar los datos de una isoterma de equilibrio y determinar la línea de trabajo [21].

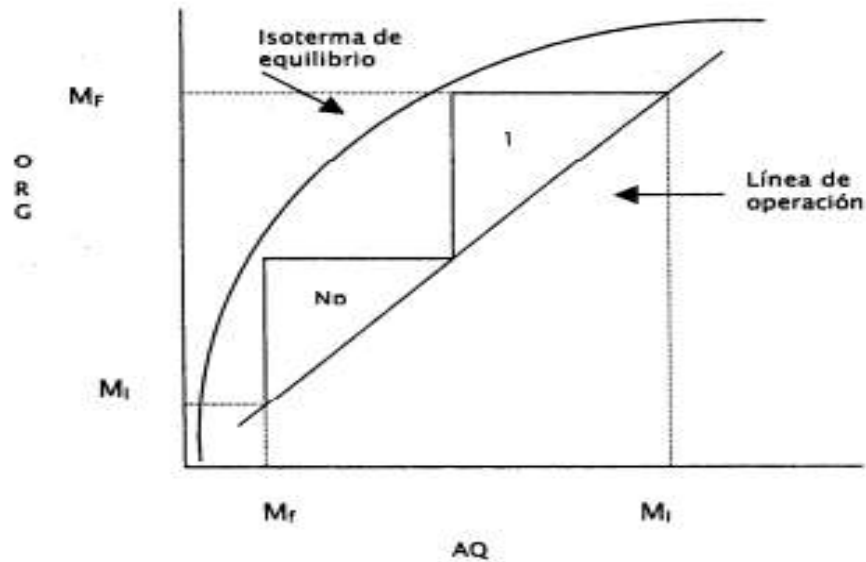


Figura 5. Cosntrucción del diagrama de McCabe-Thiele. Concentraciones de  $M_F$ ,  $M_I$  en mg/L.

## 1.7 ELECTRO-OBTENCIÓN

La Electro-obtención consiste en llevar la sustancia rica en iones del metal obtenida de la etapa de extracción por solventes a celdas electrolíticas, en ellas se encuentran sumergidas ánodos (de acero inoxidable o plomo) y cátodos (de acero inoxidable). Estos se conectan en forma de circuito eléctrico siendo los ánodos el polo positivo (entrada) y el cátodo el polo negativo (salida). La operación consiste en pasar una corriente eléctrica de baja intensidad a través del circuito donde los iones de cobre disueltos en la solución se verán atraídos por el cátodo (polo negativo) depositándose cobre en forma metálica sobre la superficie [22]. "Tras siete días de este ciclo en el que cobre se traslada a los cátodos por efecto de la

electricidad, comienza la tan esperada cosecha, en la que se obtienen cátodos de metal rojo de 99,99% de pureza [23].

### **1.7.1 REFINACIÓN DEL COBRE**

La refinación del cobre no es más que un proceso cuyo principal objetivo es aumentar la pureza del metal obtenido por ambas vías, existiendo dos tipos de refinación.

### **1.7.2 PIRO-REFINACIÓN**

Este proceso se hace mediante hornos, este tipo equipos son cíclicos (batch) pasando por etapas de llenado, oxidación, escoriado, reducción y vaciado. Una vez el horno cargado con el cobre blíster (98% Cu) fundido se le inyecta aire enriquecido con oxígeno el cual se encargará de oxidar el baño eliminando los sulfuros restantes a un rango de partículas por millón. Después se le agrega cal para formar escoria y eliminar impurezas a través de ella. En la etapa de reducción al baño se le inyecta gas natural con vapor, después de la inyección pasaba al vaciado. Los ánodos obtenidos por la piro-refinación cuentan con una pureza del 99.6% [15].

### **1.7.3 ELECTRO-REFINACIÓN**

La electro-refinación es otro proceso de refino muy similar a la Electro-obtención, teniendo el mismo principio. Los ánodos de cobre blíster son llevados a celdas electrolíticas siendo estas el ánodo (polo positivo) y el cátodo (polo negativo) son placas de acero inoxidable. El ánodo de cobre impuro se disuelve y se adhiere en la placa de acero inoxidable; el cobre depositado es un cobre de 99.99% de pureza

[23], las impurezas del cobre blíster se quedan en la cuba electrolítica formando lodos electrolíticos, estos son llevados a otro proceso para poder recuperar gran parte de las impurezas. Este proceso llega a ser cíclico si se busca obtener un cobre de mayor pureza.

## **1.8 RECICLAJE DE METALES**

El reciclaje de metales es un proceso que se encarga de reutilizar nuevamente todo aquel desecho metálico a través de su recolección, clasificación y reacondicionamiento para volver a ser usado, disminuyendo así el consumo de recursos naturales, los costos de energía, materiales requeridos y el impacto ambiental que estos generan al procesarlos desde el mineral, también se toma en cuenta que los yacimientos de dichos metales están siendo agotados; este procesamiento tiene como ventaja que el material puede ser reciclado ilimitadamente; los principales metales reciclados en el mundo son el acero, aluminio y cobre. Este tipo de reciclaje también es conocido como minería urbana dado que busca obtener estos materiales a partir bienes de consumo humano e infraestructuras, así como edificios o casas; los principales países que se dedican a este tipo de reciclaje son Alemania, Japón, Austria y Suiza [24].

### **1.8.1 RECICLAJE DE COBRE**

El cobre es uno de los metales más reciclados a nivel mundial, el cual requiere pasar por procesos de recolección, clasificación y obtención. Las ventajas que tiene este proceso a comparación de la producción de cobre a través de mineral son muy amplias; entre ellas se encuentra un alto ahorro de energía eléctrica que se

consigue al omitir las etapas de la preparación del mineral y refinación del metal [25].

### **1.8.2 DESECHOS URBANOS**

El reciclaje de cobre a través de desechos urbanos se obtiene a partir de la industria o a partir de objetos los cuales ya hayan cumplido con su tiempo de vida; generalmente son estos los que se generan más y son mayormente utilizados para el proceso de reciclaje. Este tipo de objetos proceden de recortes resultantes de la elaboración de un producto (sobrantes), residuos de construcción (instalaciones eléctricas, tubos de cobre utilizados en la plomería, cables eléctricos, etc.) y objetos que han finalizado su vida útil (desechos electrónicos) [25].

El proceso empieza en la recolección y clasificación de estos desechos (chatarra de cobre). Se tomando en cuenta la pureza y tipo de chatarra; ya sean piezas de cobre u aleaciones de este. La chatarra de cobre y aleaciones pasan por separado a un proceso de fundición, donde las aleaciones se ajustan y se vuelven a vaciar en forma de lingotes. El cobre fundido es sometido a pruebas de análisis químico para determinar el grado de pureza. Si los residuos llegan a tener óxidos, el metal fundido pasa a un proceso de desoxidación para la eliminación de ciertas impurezas y mejorar la calidad del metal. Una vez confirmada la pureza del material este es vaciado en forma de lingotes, placas, cables, etc. En caso de que se requiera un metal de aun más alta pureza, este es vaciado en forma de ánodos de cobre los cuales pasaran por un proceso de electro refinación para alcanzar el grado de pureza deseado.

Cuando se trata de chatarra que está contaminada con otros metales o residuos se opta por analizar la relación "costo-beneficio" [26] la cual determinara si es viable o no llevar esa chatarra a procesos de refinación. En caso de que esta relación sea baja la chatarra de cobre es destinada para fines que no requieran un cobre de alta pureza, esto debido a que no es costeable el proceso para poder refinar dicho material contaminado.

### **1.8.3 CHATARRA ELECTRÓNICA**

El reciclaje de metales a través de la chatarra electrónica es un tema bastante llamativo en este tiempo dado al impacto ambiental que se genera al obtener estos metales de manera tradicional minimizando el daño ambiental; así mismo reduciendo costos en los procesos y tomando en cuenta el agotamiento de estos recursos naturales. También se puede controlar la problemática del aumento de la contaminación a partir de este tipo de desechos. Actualmente es un tema ampliamente investigado buscando óptimos procesos de obtención partiendo de la de vía Hidrometalúrgica.

## **1.9 PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE**

El proceso de obtención comienza a partir del acondicionamiento de los CEI, los cuales fueron manualmente tratados, con pinzas de corte y desarmadores se desmontan tornillos, disipadores de calor y condensadores electrolíticos. En algunos casos estas tablillas también se llegan a trabajar sin acondicionamiento previo, lo cual no es muy óptimo ya que se obtiene un producto bastante contaminado, cabe mencionar que estas tablillas también están cubiertas con un

polímero que protege el cobre que estas poseen, en algunos procesos para la eliminación de este polímero se somete a las tablillas a temperaturas relativamente altas quemando el material para dejar expuesto el cobre y como resultado obtenemos un gas altamente contaminante y dañino para la salud humana.

Después del acondicionamiento de las tablillas estas pasan por un proceso de trituración y molienda esto con el fin de reducir el tamaño de partícula teniendo un tamaño de liberación de cobre óptimo menor a 2 mm [27], formando un concentrado de tablillas electrónicas. Dicho concentrado pasa por un separador magnético con el objetivo de remover aquellas impurezas férricas y trabajar con los elementos no ferrosos. Una vez concentrado se pasa a lixiviación donde disuelve el cobre de los CEI con sustancias ácidas obteniendo un licor rico en iones de Cu. Ya después de la lixiviación se busca una mayor concentración de iones de cobre en el licor, mediante la extracción por solventes se separó la mayor parte de iones de cobre que se haya disuelto en la lixiviación, generalmente este proceso se repite varias veces para asegurar una mayor extracción, en este caso de Cu. Finalmente, el licor obtenido rico en iones de cobre pasa a electrólisis donde en cubas electrolíticas se vierte el licor rico en iones y mediante un circuito eléctrico con un cátodo y ánodo se reduce y recupera cobre metálico con 99.99% de pureza.

### **1.9.1 RECUPERACIÓN DE COBRE DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS IMPRESOS**

Desde hace más de una década, la recuperación de metales presentes en Circuitos Electrónicos Impresos (CEI) ha despertado interés en los sectores productivos y de investigación [28-30]. Los CEI de computadoras de escritorio llegan a contener aproximadamente 40 % en peso de diversos metales, entre ellos destacan Cu, Zn,

Sn, Pb, Ag y Au [31]. Es por lo anterior, que el principal propósito de reciclar CEI se considera atractivo para la recuperación de la mayoría de esos metales [32]. Por su presencia en % peso, el cobre es el principal metal de interés cuando se trata de recuperar valores metálicos por medio del reciclaje de circuitos electrónicos impresos de desecho [33, 34].

Se han desarrollado diferentes métodos y se han implementado diferentes tecnologías con la finalidad de recuperar el cobre que se encuentra en chatarra electrónica, incluyendo por supuesto el cobre presente en CEI. Los procesos de acondicionamiento mecánico se utilizan previo a la aplicación de técnicas metalúrgicas. Estos consisten en el desmantelamiento, retiro de elementos peligrosos, reducción de tamaño y concentración de la fracción metálica de interés. Lo anterior tiene como objetivo exponer y facilitar la recuperación de metales unidos o encapsulados con resina y cerámicos, permitiendo que los metales sean alcanzados, por ejemplo, por los reactivos utilizados en las reacciones de lixiviación e incrementar así la cinética del proceso de recuperación. Se ha estudiado la aplicación de diferentes métodos de separación y concentración, entre ellos se encuentran la separación magnética y electrostática, flotación, separación neumática, entre otros [35-42].

La recuperación de valores metálicos se logra a través del uso de tecnologías integradas en las rutas de procesamiento piro e hidrometalúrgico. En la ruta pirometalúrgica, se procede a la incineración y fundición de CEI, lo que permite la recuperación efectiva de cobre y cierta cantidad de metales preciosos. Sin embargo, durante el procesamiento se producen conjuntamente contaminantes en fase



gaseosa, así como una escoria con un contenido múltiple de metales de la cual se hace complicado la recuperación final [43].

En la vía hidrometalúrgica, las principales propuestas consisten en lixiviaciones de metales base con soluciones ácidas, seguidas de la lixiviación de metales preciosos usando cianuro, tiosulfato, tiourea o haluros [44]. En el procesamiento hidrometalúrgico de recuperación de metales en chatarra electrónica, los metales contenidos en CEI se solubilizan por diferentes métodos de lixiviación ácida o biolixiviación y el licor se puede purificar con disolvente extracción, precipitación selectiva y electrodeposición [44].

Es importante resaltar que el cobre es el principal metal presente (en % peso) en los CEI y su lixiviación se puede realizar utilizando ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno como agente oxidante. La lixiviación de níquel, zinc y hierro es posible con ácido sulfúrico. Varios estudios han evaluado el proceso de lixiviación de CEI y han estudiado las condiciones, como la relación sólido-líquido, la concentración de ácido y la temperatura [45, 46].

Yang analizó la lixiviación de cobre de los CEI usados. El estudio reportó una extracción de cobre superior al 90% en peso utilizando ácido sulfúrico, peróxido de hidrógeno y una relación sólido: líquido de 1:10 (g/mL), luego de 3 ha 23°C [46]. Según Birloaga el 90% en peso de cobre se puede lixiviar de los PCB después de dos etapas de lixiviación con ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno. Silvas y col investigaron la lixiviación de cobre con ácido sulfúrico + peróxido de hidrógeno y

una relación sólido / líquido 1:10 a 75°C durante 4 h. Después de dos etapas sucesivas de lixiviación, se lixivió 100% del cobre de los CEI triturados [45].

La separación de los metales contenidos en un licor de lixiviación ácida se puede lograr mediante el proceso de extracción por solventes. El extractante ácido di-2-etilhexil fosfórico (D2EHPA) pertenece a la clase de ácidos fosforados orgánicos y su principal característica es la formación de enlace de hidrógeno entre moléculas extractantes, provocando la formación de estructuras diméricas como se ve en la **Figura 6** [47].

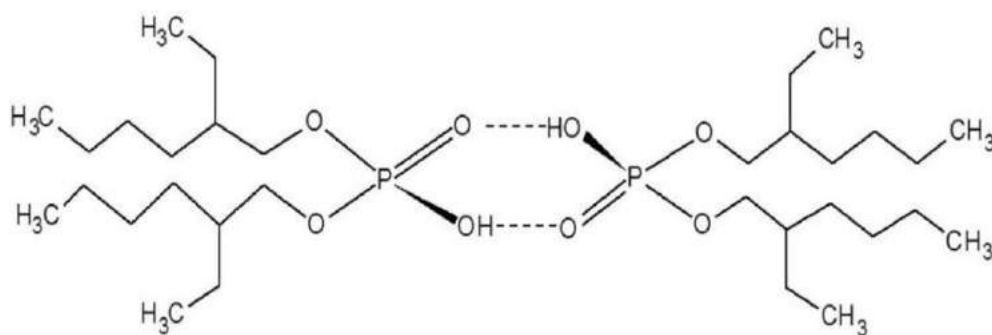


Figura 6. Estructura dimérica del ácido di-2-etilhexilfosfórico (D2EHPA).

En los métodos bio-hidrometalúrgicos se emplea cianuro generado a partir de extracto de levadura y polipeptona con glicina (*Chromobacterium violaceum*), con una extracción del 24.6% para Cu durante 8 días, con oxígeno disuelto en el medio para la respiración bacteriana durante la fase de crecimiento [48]. Recuperaciones de cobre mayores al 95% se han alcanzado cuando se emplea como medio bio-

lixiviante la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* y una concentración de  $\text{Fe}^{3+}$  de 6.66 g/L después de 36 horas de procesamiento [49].

Otra alternativa para recuperar metales presentes en CEI es por vía electroquímica con la cual se han alcanzado también altos porcentajes de recuperación de cobre, entre ellos se encuentra el trabajo de Kim et al. [33] quien reportó una recuperación del 97% de cobre a partir del reciclaje de teléfonos móviles, aplicando el método directo de electro generación de cloro (in situ). La recuperación de metales por medio de fluidos supercríticos [50-52], han alcanzado recuperaciones del 94% de cobre presente en CEI por medio de la oxidación de agua supercrítica combinándolo con un proceso electrocinético. Xiaonan et. al [53] recuperaron por medio de electrólisis entre el 97.3 y 99.8 % de cobre a partir de CEI pulverizados y compactados con un adhesivo conductor especial. Havlik et. al. [54] presenta un procedimiento experimental de preparación de CEI para la posterior recuperación de cobre y estaño por vía hidrometalúrgica. Sin embargo, en las propuestas anteriormente mencionadas, los CEI deben ser tratados previo a la etapa hidrometalúrgica de recuperación de cobre, para lo cual se han utilizado procesos de combustión de CEI, molienda mecánica o la aplicación de algún método de concentración, lo que conlleva insumos de materiales y energía, entre otros.

## **CAPITULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

Tomando como referencia la información bibliográfica disponible sobre la recuperación de cobre que se encuentra para CEI y en general de chatarra electrónica, y con la finalidad de desarrollar una alternativa de ruta de procesamiento, con la cual se pretende ofrecer un proceso relativamente sencillo, que contemplé un acondicionamiento básico del material de ingreso (CEI), y que su implementación resulte práctica, se propone el siguiente desarrollo experimental, en donde se aplica la técnica de extracción por solventes para separar y recuperar el cobre presente en CEI, esta técnica presenta la ventaja de emplear reactivos químicos que se regeneran por lo que su uso se realiza de manera cíclica. A continuación, se mencionan los materiales, reactivos químicos y técnicas de análisis que fueron empleados en el desarrollo del presente trabajo.

### **2.1 MATERIALES**

Para la recuperación de cobre a partir de CEI en medio nítrico con D2EHPA-Queroseno, se emplearon los siguientes materiales y reactivos químicos:

Circuitos electrónicos de desecho.

Cautín de lápiz.

Pinzas de punta.

Pinzas de plástico para laboratorio.

Papel filtro.

Vaso de precipitados de 250, 500 y 1,000 mL.

Matraz volumétrico de 50, 100 y 250 mL.

Pipetas de vidrio de 1, 5, 10 y 20 mL.

Embudo de separación de 250 mL.

Mortero de ágata.

Balanza granataria.

Parrilla de agitación magnética.

Embudo de cristal.

Soporte universal.

Desoldador de succión.

Cobre.

### 2.1.1 REACTIVOS QUÍMICOS

Tabla 3. Reactivos químicos empleados en la experimentación.

<b>Nombre</b>	<b>% Pureza</b>	<b>Marca</b>
Alcohol isopropílico	99.5	J.T. Baker
Ácido nítrico	70	J.T. Baker
Ácido sulfúrico	96	J.T. Baker
Ácido di-2-etilhexil fosfórico (D2EHPA)	96	Sigma-Aldrich
Queroseno	98	Sigma-Aldrich
Solución Buffer pH 4, 7 y 10	-	Fermont
Agua Destilada	-	-

## 2.2 TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Las técnicas de análisis empleadas en el desarrollo del presente trabajo de tesis fueron de Espectrometría de Absorción Atómica (equipo Perkin Elmer, modelo AA400) para análisis químico, Difracción de Rayos X para la determinación de compuestos precipitados (equipo Brucker, modelo D8 Discover), finalmente el pH de las soluciones acuosas se midió por medio de un potenciómetro de hidrógeno (equipo Conductronic, modelo PH10).

El desarrollo experimental de este trabajo consistió en la recuperación de cobre por medio del tratamiento del CEI para obtener tablillas despobladas, libres de soldadura y resina epóxica, posteriormente se llevaron a cabo pruebas de lixiviación con soluciones a diferentes concentraciones de  $\text{HNO}_3$  y de agente lixivante, tiempo de reacción y la relación adecuada de peso de CEI/solución lixivante para la remoción de cobre. Las mejores condiciones experimentales obtenidas en la etapa de lixiviación se utilizaron de partida para determinar la relación de solución orgánico/acuoso, la concentración adecuada de D2EHPA y la isoterma de extracción para la extracción de cobre. Finalmente se desarrollaron experimentos para la re-extracción de cobre de la fase orgánica a la fase acuosa para obtener un electrólito susceptible a ser tratado en un proceso de electrolisis convencional para cobre.

En la **Figura 7** se muestra el diagrama de flujo del proceso propuesto para la recuperación y purificación de cobre a partir de circuitos electrónicos impresos des poblados mediante extracción por solventes y electrolisis.

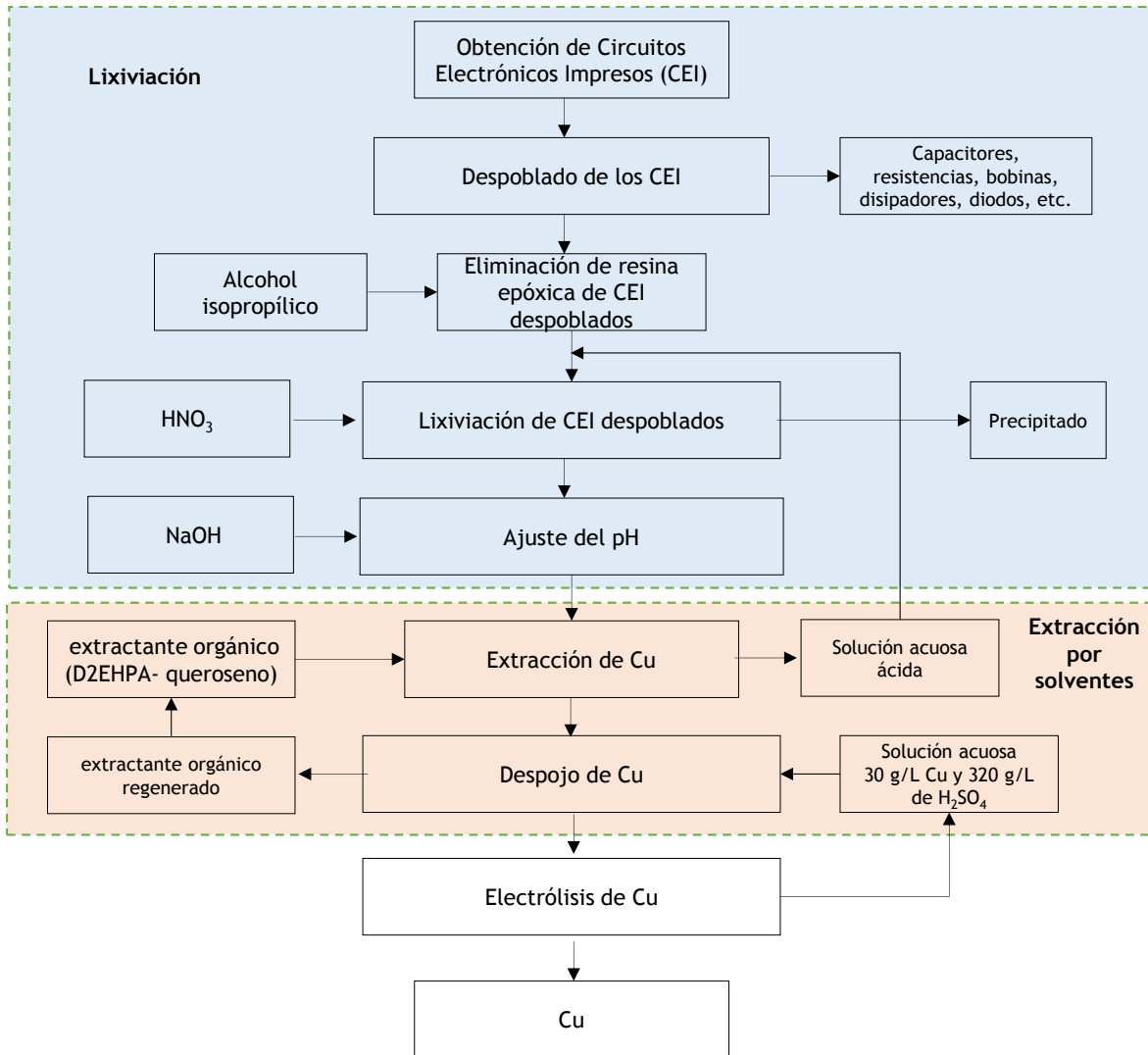


Figura 7: Diagrama de flujo experimental para la recuperación de cobre a partir de Circuitos Electrónicos Impresos de desecho en medio nítrico con D2EHPA-Queroseno.

## 2.3 ACONDICIONAMIENTO DE CEI

Se extrajeron manualmente 2 Kg de CEI de diferentes equipos de cómputo inservibles. Los componentes y dispositivos electrónicos, así como la mayor parte de la soldadura se removieron con ayuda de un cautín de lápiz para obtener CEI libre de componentes, los cuales se cortaron en tablillas con dimensiones menores a 5 cm por lado. Las tablillas de CEI fueron inmersas por 72 horas en alcohol isopropílico anhidro (99.5%, marca Sigma-Aldrich) para remover la resina epóxica protectora que se encuentra sobre su superficie. Transcurrido el tiempo de inmersión en alcohol isopropílico, las tablillas de CEI fueron extraídas manualmente con ayuda de unas pinzas de plástico para laboratorio y expuestas al intemperie para su secado por 24 horas.

## 2.4 LIXIVIACIÓN DE CEI EN MEDIO NÍTRICO

Se seleccionaron tablillas de CEI del mismo peso y configuración en cuanto al diseño de las pistas de cobre. Las tablillas se colocaron en vasos de precipitados de 1L y se pusieron en contacto con soluciones de  $\text{HNO}_3$  a diferentes concentraciones (1, 2, 3 y 4 N) a temperatura ambiente y una agitación de 50 rpm durante 12 horas. Con el propósito de observar el efecto de la concentración de  $\text{HNO}_3$  en el proceso de lixiviación, se obtuvieron alícuotas de 1 mL a 0.5, 1, 2, 6 y 12 horas. La relación sólido/líquido (peso en gramos de CEI/volumen de solución lixivante en mL) fue de 1:2 para cada experimento. La **Tabla 4** muestra las condiciones experimentales para la lixiviación de CEI despoblados con  $\text{HNO}_3$ .



Tabla 4: Condiciones experimentales en el proceso de lixiviación con HNO<sub>3</sub> y CEI despoblados y sin resina epóxica.

<b>Exp. No.</b>	<b>Peso de CEI [g]</b>	<b>Volumen de solución lixiviante [mL]</b>	<b>Concentración de HNO<sub>3</sub> [N]</b>
L 1	300	600	1
L 2	300	600	2
L 3	300	600	3
L 4	300	600	4

Al término de 12 horas se culminó el proceso de lixiviación en cada caso, para lo cual se detuvo la agitación, las tablillas fueron extraídas manualmente de los vasos de precipitados con ayuda de unas pinzas de plástico para laboratorio y enjuagadas con agua destilada. El pH final de cada solución de lixiviación fue medido y registrado.

Es importante mencionar que, para todos los experimentos, al término del proceso de lixiviación se observó la aparición de un precipitado, en mayor proporción en los experimentos L3 y L4, el cual fue decantado, filtrado y enjuagado con agua destilada. Para identificar los compuestos presentes, se realizaron estudios por medio de la técnica de difracción de rayos X.

Las soluciones de lixiviación fueron preparadas para ser analizadas por la técnica de Absorción Atómica para determinar la concentración de Cu, Al, Fe, Ni, Pb, Sn y Zn.

## **2.5 EXTRACCIÓN POR SOLVENTES DE COBRE CON D2EHPA-QUEROSENO**

A partir de la solución original obtenida en los experimentos de lixiviación, resultado como producto del proceso de lixiviación, previo al inicio del proceso de extracción por solventes se tomaron alícuotas de 300 mL para cada caso y se diluyeron con agua destilada hasta un volumen de 3 L respectivamente. Los 300 mL restantes de cada experimento se resguardaron como referencia. La concentración de cobre en las soluciones de lixiviación diluidas fue analizada por medio de la técnica instrumental de Absorción Atómica y el valor de pH fue medido y registrado para cada caso.

En el presente trabajo se empleó como agente extractante ácido di-2-etilhexil fosfórico (D2EHPA), un compuesto perteneciente a la familia de los extractantes ácidos organofosforados, diluido en queroseno.

Para determinar el efecto de la concentración del extractante orgánico empleado (D2EHPA) en la extracción de iones de cobre presentes en las soluciones de lixiviación de CEI de desecho con  $\text{HNO}_3$ , se llevaron a cabo experimentos de extracción por solventes. Primero se prepararon soluciones orgánicas con 5, 10 y 15% volumen de D2EHPA como agente extractante y queroseno como diluyente. En embudos de separación con capacidad de 250 mL, fueron puestos en contacto durante 5 minutos, con agitación manual a temperatura ambiente, soluciones

acuosas y orgánicas, a diferentes % volumen. La suma de ambos volúmenes, acuoso y orgánico, para cada experimento fue de 100 mL. De manera semejante, para determinar el efecto de la relación de volúmenes entre las fases orgánico/acuoso (O/A), que representa el %volumen de extractante más el %volumen de diluyente, con respecto al % volumen de solución acuosa, en la extracción de iones cobre de la fase acuosas a la fase orgánica, se llevaron a cabo experimentos variando el % volumen de la fase orgánica en la relación (O/A), desde 10 hasta 50% volumen. Transcurrido el tiempo de contacto con agitación manual entre soluciones orgánicas y acuosas para todos los experimentos, se dejaron reposar dichas soluciones por un tiempo de 30 minutos, provocando su separación, posteriormente las soluciones acuosas y orgánicas fueron vertidas por separado en frascos de vidrio. La concentración de cobre para las soluciones acuosas se determinó por medio de la técnica de Absorción Atómica.

En la **Tabla 5**, se muestra el arreglo experimental que se desarrolló en el presente trabajo para conocer el efecto tanto del % volumen de extractante empleado (D2EHPA), así como el efecto de la relación orgánico/acuoso (O/A) en la extracción con D2EHPA diluido en queroseno, de iones de cobre presentes en una solución de lixiviación de CEI con  $\text{HNO}_3$ .

Tabla 5. Condiciones experimentales para el proceso de extracción de iones de cobre con D2EHPA diluido en queroseno.

<b>Exp. No.</b>	<b>Vol. Sol. acuosa (mL)</b>	<b>Vol. Sol. orgánica (mL)</b>	<b>D2EHPA (% Volumen)</b>	<b>Queroseno (% Volumen)</b>
EPS 1	90	10	5	95
EPS 2	90	10	10	90
EPS 3	90	10	15	85
EPS 4	80	20	5	95
EPS 5	80	20	10	90
EPS 6	80	20	15	85
EPS 7	70	30	5	95
EPS 8	70	30	10	90
EPS 9	70	30	15	85
EPS 10	60	40	5	95
EPS 11	60	40	10	90
EPS 12	60	40	15	85
EPS 13	50	50	5	95
EPS 14	50	50	10	90
EPS 15	50	50	15	85

## 2.6 EFECTO DEL pH EN LA EXTRACCIÓN DE COBRE

Para determinar el efecto del pH inicial de las soluciones acuosas en el proceso de extracción por solventes para la extracción de iones de cobre en solución provenientes de un proceso de lixiviación de CEI con  $\text{HNO}_3$ , se tomaron alícuotas de 100 mL de soluciones diluidas de los experimentos de lixiviación y se ajustaron a diferentes valores de pH entre 1 y 6, evitando la formación de precipitados y segundas fases, mediante la adición de una solución saturada de NaOH a temperatura ambiente. Se realizaron contactos por un tiempo de 5 minutos con agitación manual entre fases acuosas y diferentes valores de pH y fases orgánicas, las cuales fueron vertidas en embudos de separación de 250 mL. Los experimentos se realizaron temperatura ambiente, la relación O/A fue de 1 para todos los casos, como se muestra en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Condiciones experimentales para determinar el efecto del valor inicial de pH de soluciones de lixiviación de CEI en la extracción de cobre con D2EHPA-Quersoeno.

<b>Exp. No.</b>	<b>pH inicial</b>	<b>Vol. Acuoso [mL]</b>	<b>Vol. Orgánico [mL]</b>
E 1	1.2	100	100
E 2	1.5	100	100
E 3	1.8	100	100
E 4	2.1	100	100
E 5	2.8	100	100
E 6	3.2	100	100
E 7	3.8	100	100
E 8	4.1	100	100
E 9	4.3	100	100
E 10	5.2	100	100

Transcurrido el tiempo de agitación, se dejaron en reposo los embudos de separación durante 30 minutos con la finalidad de permitir la separación de las soluciones acuosas y orgánicas, posteriormente las soluciones acuosas y orgánicas fueron vertidas por separado en frascos de vidrio. Al igual que los experimentos de extracción por solventes, la concentración de cobre para las soluciones acuosas se determinó por medio de la técnica de Absorción Atómica.

## CAPITULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados y su discusión de cada una de las variables analizadas en la etapa de experimentación del presente trabajo.

### 3.1 ETAPA DE LIXIVIACIÓN

En la **Figura 8**, se muestra como ejemplo un CEI, A) previo al proceso de lixiviación y B) posterior al proceso de lixiviación (experimento L 3). Se observa que tanto las pistas conformadas principalmente de cobre, así como los residuos de soldadura (aleación Pb-Sn) fueron en su mayoría disueltos después de 12 horas de exposición en una solución 3 N de  $\text{HNO}_3$ , con agitación de 50 rpm a temperatura ambiente y una relación sólido/líquido 1:2. Para los casos en que fueron puestos en contacto CEI con soluciones de  $\text{HNO}_3$  a 1 y 2 N (Exp. L1 y L2), al término de 12 horas aún se observaron residuos de pistas de cobre y de soldadura en los CEI.

Los valores de pH obtenidos para las soluciones al término del tiempo del proceso de lixiviación fueron cercanos a 0. Para los experimentos L1 y L2 el valor de pH fue cercano a 1.2, mientras que para los experimentos L3 y L4 el valor de pH fue 0.3 y - 0.1 respectivamente.

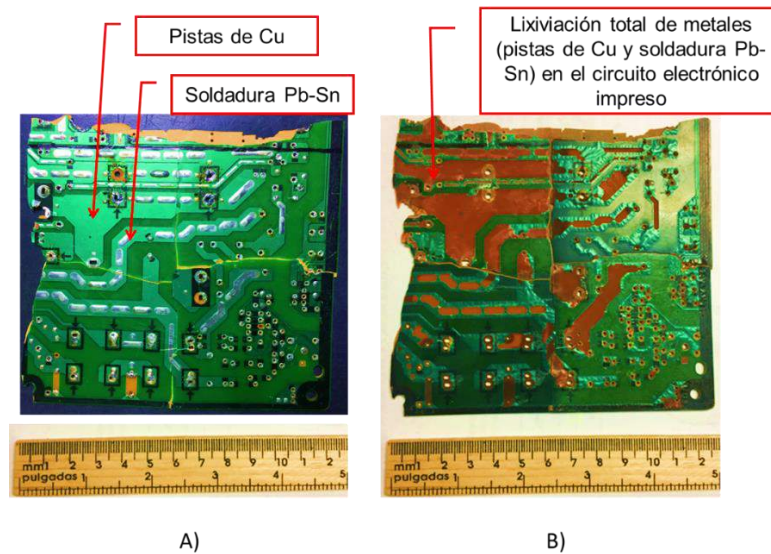


Figura 8: Circuito Electrónico Impreso (CEI), A) previo al proceso de lixiviación y B) posterior al proceso de lixiviación (experimento L 3).

La **Figura 9** muestra el efecto de la concentración de  $\text{HNO}_3$  en la lixiviación de cobre en CEI a temperatura ambiente y una agitación de 50 rpm. Cuando se emplea una concentración de 1 N de  $\text{HNO}_3$ , después de 12 horas a temperatura ambiente y una agitación de 50 rpm, la concentración de cobre en solución alcanza un valor de 3.8 g/L. A medida que se incrementa la concentración de  $\text{HNO}_3$ , se incrementa el % de cobre disuelto de manera notable en la solución acuosa. Para una concentración de 2 N de  $\text{HNO}_3$  después de 12 horas de lixiviación, se alcanza una concentración de 6.7 g/L de cobre, a ese mismo tiempo para una concentración de 4 N, la concentración de cobre es de 9.8 g/L. Cuando la concentración de  $\text{HNO}_3$  es 3 N, después de 6 horas se obtienen concentraciones de cobre mayores a 9.1 g/L. Transcurridas 12 horas de lixiviación a temperatura ambiente y agitación de 50 rpm, las soluciones 3 y 4 N de  $\text{HNO}_3$ , disolvieron las pistas de cobre de los CEI, obteniéndose soluciones con una concentración de cobre en solución de 9.8 g/L.



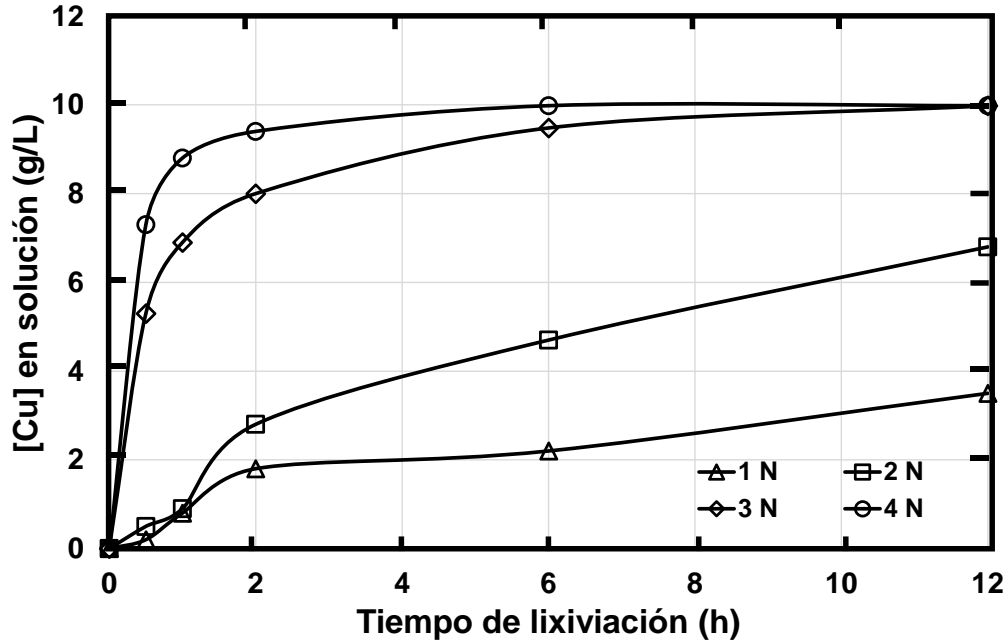


Figura 9. Efecto de la concentración de HNO<sub>3</sub> en la lixiviación de cobre presente en CEI des poblados a temperatura ambiente, relación sólido/líquido 1:2 y agitación de 50 rpm.

Como se mencionó anteriormente y considerando los resultados de la **Figura 8**, se decidió seleccionar la concentración de 3 N de HNO<sub>3</sub> para la lixiviación de cobre presente en CEI, lo anterior por razones de acidez de la solución final de lixiviación que se obtendrá. A medida que disminuye la concentración de HNO<sub>3</sub>, disminuye también la acidez de la solución acuosa (se incrementa el valor de pH), lo que implicaría, por una parte un menor consumo de agente lixivante y por otra, presumiblemente facilitar el proceso extracción, ya que la reacción química que se espera se desarrollará durante éste proceso en la etapa de extracción por solventes, produce iones hidronio (H<sup>+</sup>), por lo tanto, cuando los cationes metálicos son extraídos por el extractante empleado, en este caso el D2EHPA, se producirán iones hidronio (H<sup>+</sup>), que incrementarán el grado de acidez de la solución acuosa, procediendo como se mencionó anteriormente en la reacción química 1.

En la solución que se obtuvo después del proceso de lixiviación de CEID despoblados para el experimento L3, la concentración de cobre obtenida fue de 9.8 g/L. La concentración de iones de cobre en la solución de lixiviación se podría incrementar, si se incrementa la relación sólido/líquido (peso de CEI/vol. Solución lixivante). En la **Figura 10** se muestra el licor de lixiviación y un precipitado, obtenido del proceso de lixiviación de CEI con una solución de  $\text{HNO}_3$  después de 12 horas a temperatura ambiente y 50 rpm (Exp. L3).



Figura 10. Lixiviación de CEI con una solución de  $\text{HNO}_3$  - 3 N a temperatura ambiente.

El segundo subproducto que se obtuvo del proceso de lixiviación de CEI en los experimentos en dónde se lixivió notablemente el cobre (L 3 y L 4), fue un precipitado de color gris, el cual fue separado del licor de lixiviación por decantación, posteriormente fue lavado con agua destilada, filtrado en un embudo de vidrio y papel filtro, posteriormente fue secado en una mufla de resistencia eléctrica durante 12 horas a  $100^\circ\text{C}$ , finalmente el producto precipitado fue pesado en seco. Como ejemplo, para el experimento L3 se obtuvo un peso del precipitado en seco de 3.8

gramos. El precipitado, producto del proceso de lixiviación de CEI despoblados se muestra en la **Figura 11**.

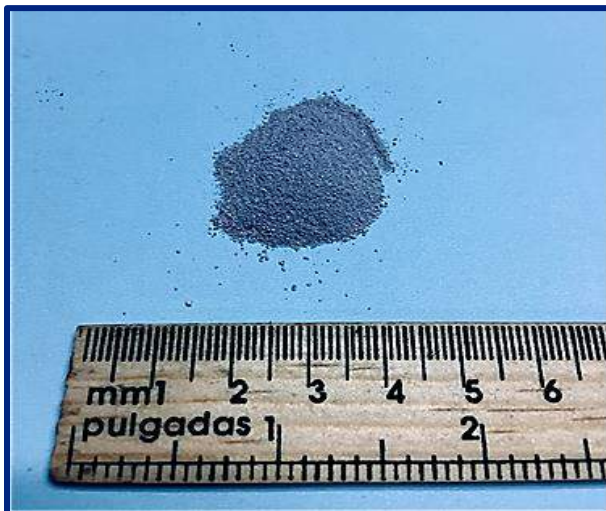


Figura11. Precipitado formado en el proceso de lixiviación de CEI con una solución de  $\text{HNO}_3$  a una concentración de 3 N durante 12 horas a temperatura ambiente (Exp. L3).

Los 3.8 gramos que se obtuvieron del proceso de lixiviación en forma de precipitado, fueron molidos finamente en un mortero de ágata para su posterior análisis por la técnica de Difracción de Rayos X. En la **Figura 12** muestra el difractograma del precipitado, producto del proceso de lixiviación de CEI obtenido en el experimento L3.

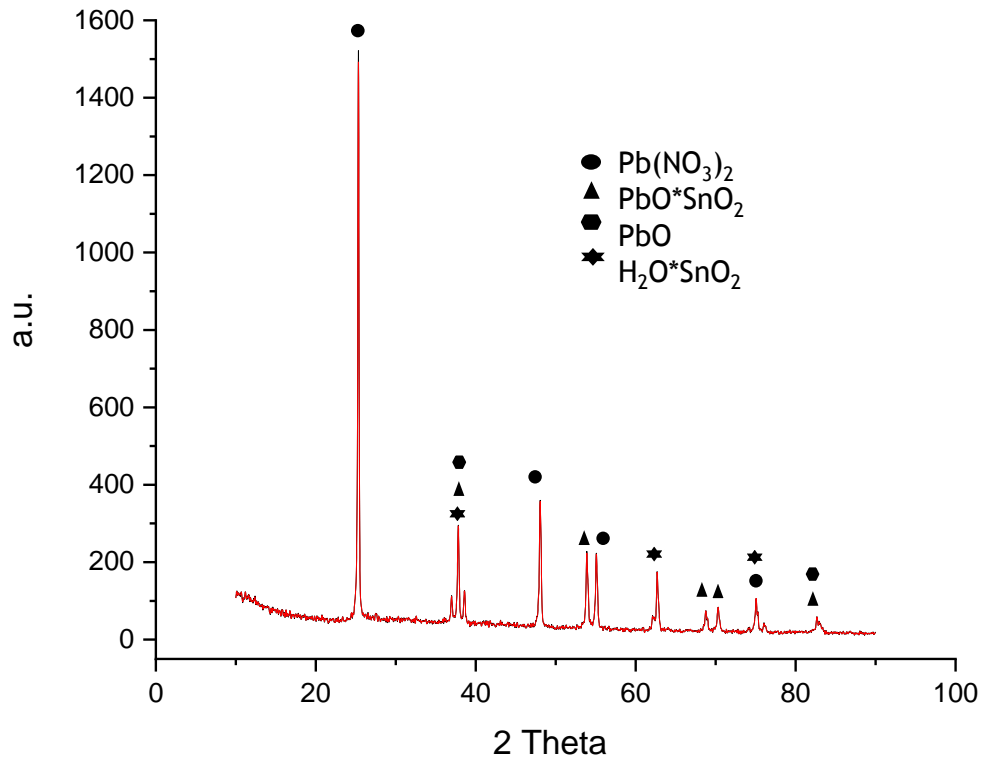
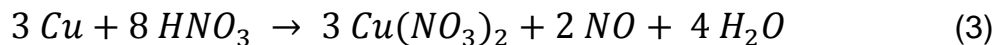
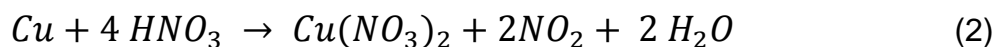


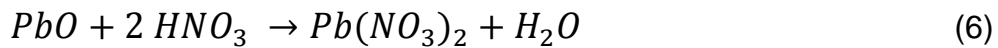
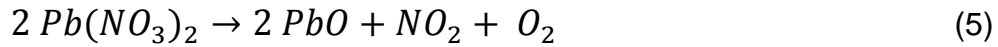
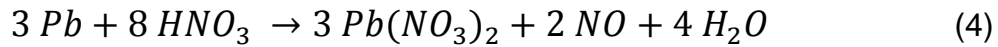
Figura 12. Difractograma del precipitado obtenido en el experimento L3, como producto del proceso de lixiviación de CEI con una solución de  $\text{HNO}_3$  a una concentración de 3 N después de 12 horas.

De acuerdo con la **Figura 12**, el producto precipitado está compuesto básicamente de nitrato de Plomo anhídrido y óxidos de Plomo y Estaño:  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}\cdot\text{SnO}_2$  y  $\text{PbO}\cdot\text{SnO}_2$ . Debido a la solubilidad del cobre en  $\text{HNO}_3$ , este fue totalmente disuelto de los CEI, con base en las reacciones químicas 2 y 3.

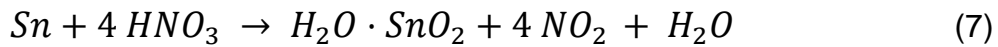


Mientras que la fracción residual de soldadura en los CEI, compuesta por Pb y Sn precipitó al fondo en forma de compuestos insolubles. Los compuestos insolubles que fueron identificados por la técnica de Difracción de Rayos X en el precipitado

obedecen a las reacciones químicas que ocurren entre el Pb y Sn contenidos en la soldadura y el agente lixivante (HNO<sub>3</sub>). Para la reacción del medio lixivante con plomo se llevan a cabo las siguientes reacciones químicas 4, 5 y 6):



Para la interacción del HNO<sub>3</sub> con el estaño, se forma un precipitado de dióxido de estaño hidratado, de acuerdo con la reacción química 7:



El producto precipitado de estaño presente en la soldadura, como resultado del proceso de lixiviación, corresponde a H<sub>2</sub>O•SnO<sub>2</sub>, el cual concuerda con lo reportado por Hoang Long, et. al. [55] quienes lixiviaron circuitos electrónicos impresos con soluciones de HNO<sub>3</sub> y analizaron el precipitado obtenido por la técnica de microanálisis en microscopía electrónica de barrido.

El precipitado obtenido en este trabajo de acuerdo con los resultados de Rayos X tiene potencial de aplicación en la manufactura de fósforos o a la industria de explosivos, también puede enviarse directamente a una planta productora de plomo crudo (plomo de obra) para la recuperación de los valores metálicos a través del proceso convencional de refinación de plomo.

### 3.2 EXTRACCIÓN POR SOLVENTES

En la **Figura 13** se observa el % de extracción de iones de cobre a diferentes % volumen de fase orgánica (D2EHPA/queroseno) y fase acuosa, de 10 a 50 % volumen, así como a diferentes concentraciones de D2EHPA en la fase orgánica: 5, 10 y 15 % volumen. Para este caso el pH de la solución acuosa inicial registró un valor inicial cercano a 1.2. Cuando se incrementa el % volumen de la fase orgánica, se incrementa la extracción de iones de cobre. Dentro del intervalo que se experimentó, se observa que los porcentajes de extracción de iones de cobre son muy parecidos cuando se emplean 10 y 15 % en volumen de D2EHPA en la fase orgánica, mientras que, a un volumen menor, disminuye el porcentaje de extracción.

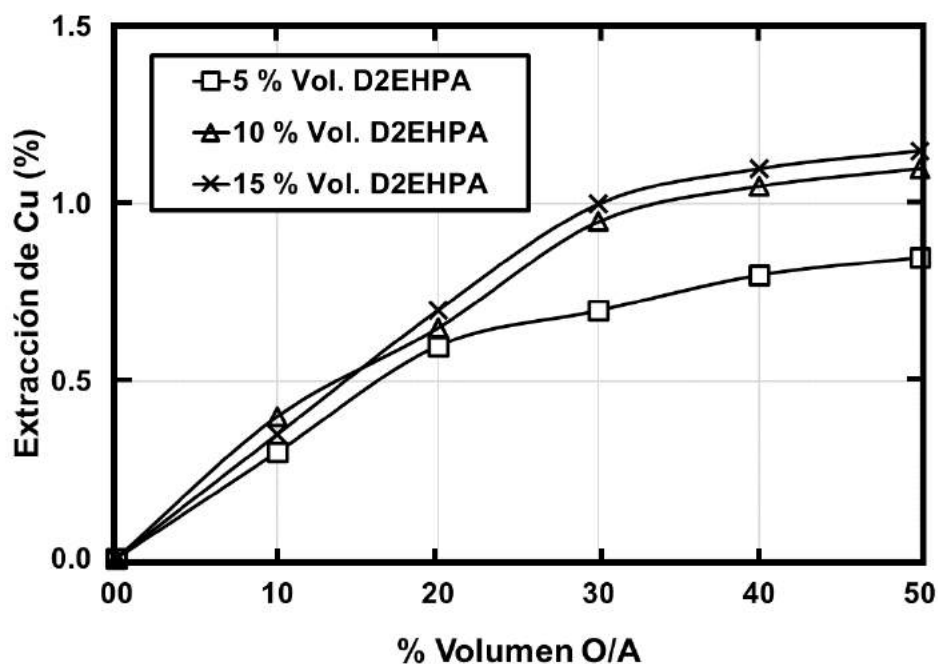


Figura 13. Efecto del % de extractante (D2EHPA) en la extracción de iones de cobre de una solución acuosa con pH inicial de 1.2.

Se observa que con un pH inicial de 1.2, las extracciones de iones de cobre con una fase orgánica compuesta por D2EHPA y queroseno son bajas, a pesar del uso de volúmenes hasta del 15% de D2EHPA en la solución orgánica y proporciones de hasta 1:1 de O/A, ya que cuando se empleó 10 y 15% volumen de D2EHPA en la fase orgánica a una relación 1:1 de O/A, el valor máximo de extracción alcanzado fue de aproximadamente 1.2%, valor que coincide razonablemente con los reportados por Kathryn C. Sole [56], los cuales muestran que la extracción de iones de Cu con D2EHPA inicia cuando el pH es superior a 1.5, alcanzando los mayores porcentajes de extracción (cerca del 90%) a valores de pH aproximados a 4. Cuando el %volumen de la fase orgánica con respecto a la fase acuosa es 10 (10 mL fase acuosa y 90 mL fase orgánica) y 20 (20 mL fase acuosa y 80 mL fase orgánica), las extracciones de cobre fueron muy parecidas cuando se emplea 5, 10 y 15 % volumen de D2EHPA en la fase orgánica.

De los resultados obtenidos a partir de la experimentación, es posible establecer que el D2EHPA no tiene una alta capacidad de extraer iones de cobre en soluciones con un valor de pH cercano a 1, por lo cual fue necesario evaluar el efecto de la variación de pH en la extracción de iones de cobre con D2EHPA-Queroseno.

### **3.3 EFECTO DEL pH INICIAL**

El análisis del efecto del pH en la extracción de cobre con D2EHPA se llevó a cabo considerando los parámetros de 10% volumen de D2EHPA en la fase orgánica, tomando en cuenta que los valores de extracción de cobre obtenidos para 10 y 15

% volumen de D2EHPA en la fase orgánica fueron muy cercanos entre sí. La relación de volumen entre la fase orgánica y la fase acuosa que fue (O/A) = 1:1.

En la **Figura 14** se muestra el efecto del pH inicial de la solución acuosa en la extracción de cobre con D2EHPA (al 10% en volumen), diluido con queroseno a temperatura ambiente, a partir de una solución de lixiviación de CEI con HNO<sub>3</sub> (solución diluida con valor de 0.98 g/L de cobre y una relación O/A = 1).

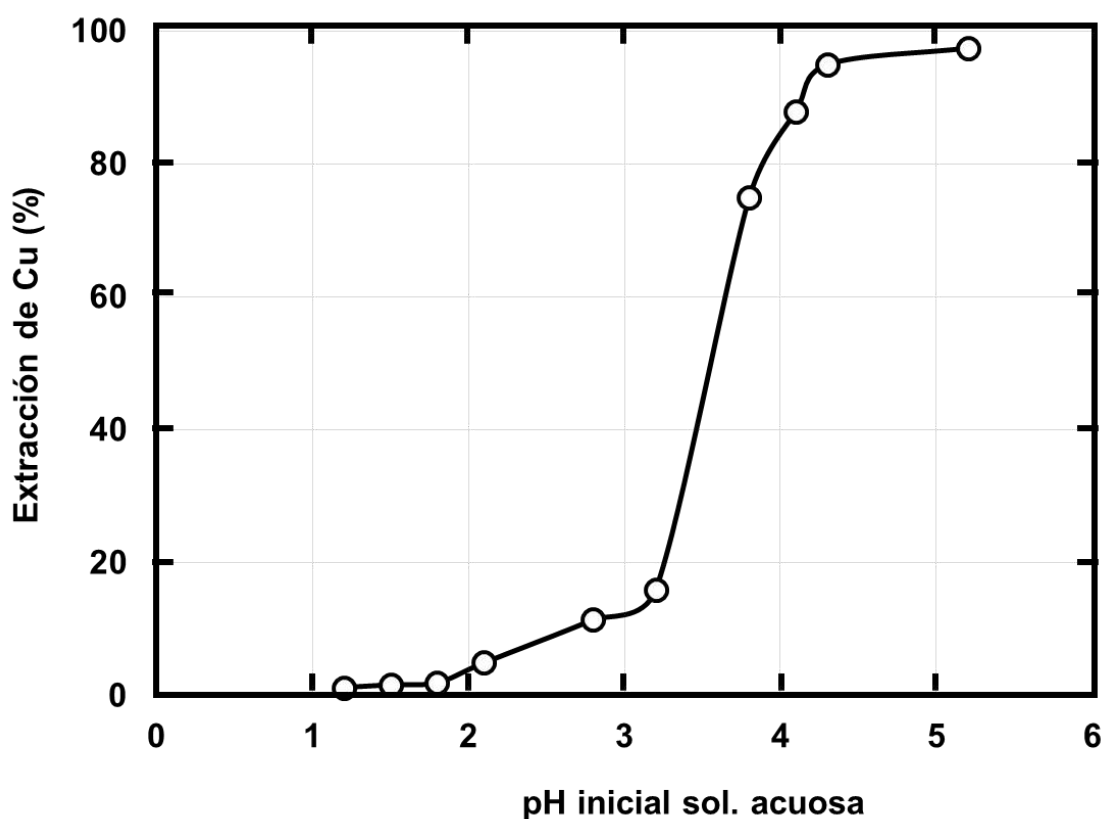


Figura 14 Efecto del pH inicial en la extracción de cobre con D2EHPA (al 10% en volumen), diluido con queroseno a temperatura ambiente, a partir de una solución de lixiviación de CEI con HNO<sub>3</sub> ([Cu] = 0.98 g/L y una relación O/A = 1).



En la **Figura 14** se observa que para valores iniciales de pH menores a 3.3 en las soluciones acuosas, las eficiencias de extracción de iones de cobre con D2EHPA-querseno al 10% volumen, son menores al 20%. Cuando el pH inicial de la solución acuosa se encuentra en valores entre 3.5 y 4 se observa un incremento notable en la extracción de iones de cobre. Cuando el valor de pH aumenta a 4.4 se alcanza un valor de extracción por arriba del 90%. Finalmente, cuando el valor de pH inicial es de 5.2 se alcanzan extracciones de cobre de hasta 95%, además de no generar segundas fases (fases suspendidas) en la solución acuosa. Esto permite permitiendo que el proceso de extracción se realice de manera adecuada. Los resultados anteriores concuerdan con el hecho que los extractantes ácidos producen iones hidronio ( $H^+$ ) durante el proceso de extracción de iones metálicos, por lo tanto, cuando los cationes metálicos son extraídos por el extractante empleado, en este caso el D2EHPA, se producirán iones hidronio ( $H^+$ ), que incrementarán el grado de acidez de la solución acuosa.

### **3.4 ISOTERMA DE EXTRACCIÓN**

Para conocer el número teórico de etapas que son requeridas para el proceso de extracción de cobre con D2EHPA diluido en queroseno, se construyó la isoterma de extracción correspondiente. Para lo cual se realizó una serie experimental de extracción por solventes, empleando la solución original (volumen de reserva) de lixiviación obtenida del experimento L3, es decir  $[Cu] = 9.8 \text{ g/L}$ , el valor de pH inicial de 0.3 se ajustó a 5.2 con una solución saturada de NaOH, empleando 10% volumen de D2EHPA en la fase orgánica. El volumen total para cada experimento (volumen de fase orgánica, más volumen de fase acuosa) fue de 100 mL. La

relación A/O en volumen %, fue variada: 1:5, 1:2, 1:1, 2:1 y 5:1. La manera de realizar la experimentación fue la misma que se llevó a cabo en la primera parte de extracción por solventes del presente trabajo. La concentración de cobre en las soluciones acuosas se determinó por medio de la técnica de Absorción Atómica, mientras que la concentración de cobre en la fase orgánica se determinó teóricamente mediante la **ecuación 8**, la cual puede ser utilizada en el balance de masa para la construcción de isothermas de distribución, cuando se ponen en contacto A mL de solución acuosa rica en cobre, conteniendo  $X_0$  g/L de metal disuelto con O mL de solución orgánica (sin contenido inicial de iones metálicos). Después de la puesta en equilibrio, el refino contiene  $X_1$  g/L, mientras que la fase orgánica contiene  $Y_1$  g/L de metal.

$$Y_n = -\frac{A}{O}(X_n - X_0) \quad (6)$$

Con la información anterior, fue posible determinar la concentración teórica de cobre en la fase orgánica, como se muestran en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Determinación de la concentración teórica de cobre en la fase orgánica, posterior al proceso de extracción con una solución al 10% vol. D2EHPA-Queroseno a diferentes relaciones de fases A/O.

Exp. No.	Relación A/O (%Vol.)	[Cu] en la Sol. acuosa final (g/L)	[Cu] en la Sol. orgánica teórica final (g/L)
IE 1	1:5	0.05	1.99
IE 2	1:2	0.38	4.81
IE 3	1:1	1.80	8.31
IE 4	2:1	5.16	8.9
IE 5	5:1	8.04	9.8

La construcción del diagrama Mc Cabe – Thiele se realizó tomando en consideración las concentraciones de cobre en las fases acuosas y orgánicas para cada caso, así como la relación entre el volumen de fase acuosas y orgánica, la cual fue 1:1 y 10 % volumen de D2EHPA en la fase orgánica a temperatura ambiente, como se muestra en la **Figura 15**.

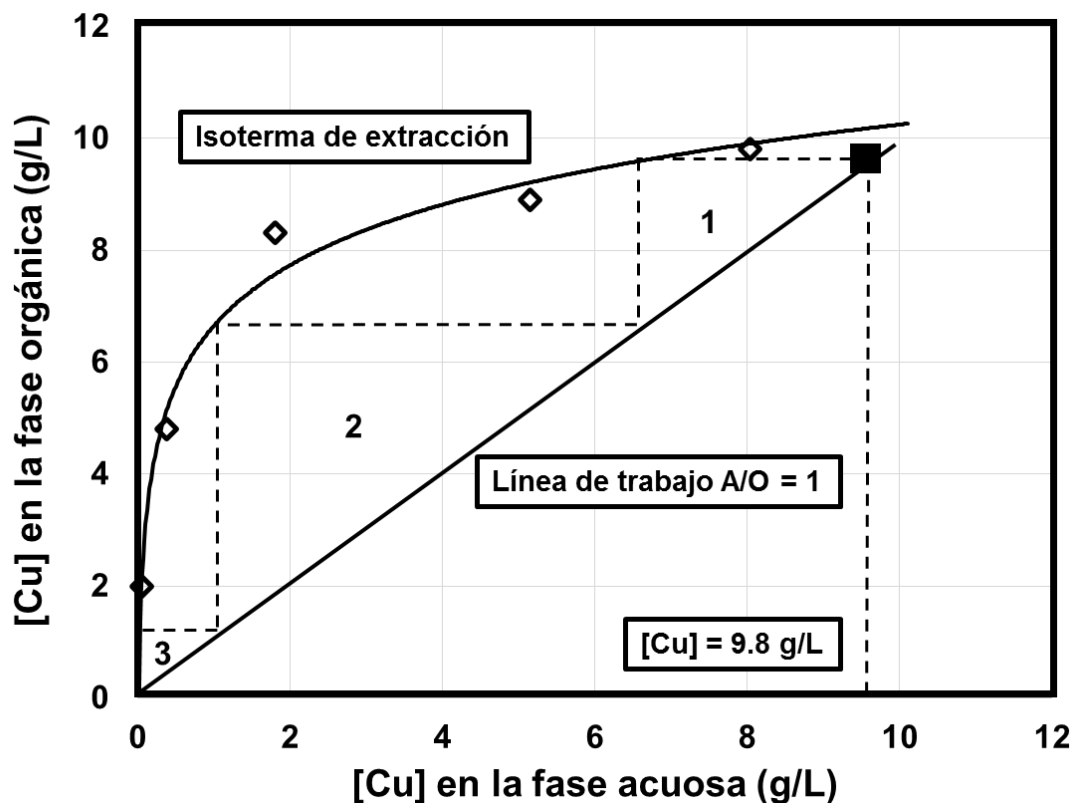


Figura 15. Diagrama Mc Cabe - Thiele para la extracción de iones de cobre presentes en una solución de lixiviación de CEI con una concentración inicial de 9.8 g/L, con %vol. A/O = 1 a temperatura ambiente.

Para una solución procedente de un proceso de lixiviación que contiene 9.8 g/L de cobre, que se recupera por medio de extracción por solventes, empleando una solución orgánica compuesta por 10% D2EHPA y 90% volumen de queroseno como diluyente, así como una relación entre fases acuosa y orgánica (A/O) = 1, a temperatura ambiente y con un pH inicial de la solución acuosa de 5.2, el diagrama obtenido Mc Cabe – Thiele, indica que serán necesarios tres contactos de extracción, con lo cual será posible teóricamente extraer prácticamente la totalidad de iones de cobres desde la fase acuosa hacia la fase orgánica. La solución acuosa de alimentación dispone de una concentración de cobre de 9.8 g/L, después de un

primer, la extracción de cobre hacia la fase orgánica dejaría una solución acuosa (primer refino) con aproximadamente 6.5 g/L de cobre. Para un segundo contacto bajo las mismas condiciones: A/O = 1, 10 %vol. D2EHPA y 90 %vol. Queroseno, a temperatura ambiente y pH inicial de la solución acuosa de 5.2, la extracción de cobre dejaría una solución acuosa (segundo refino) con cerca del 1% de cobre. Para extraer prácticamente la totalidad de cobre presente en la solución acuosa (tercer refino) bajo las mismas condiciones, sería necesario un tercer contacto.

En la **Figura 16** se observa la secuencia de extracción en dos contactos de iones de cobre con 10% D2EHPA y 90% volumen de queroseno como diluyente, así como una relación entre fases acuosa y orgánica (A/O) = 1, a temperatura ambiente y con un pH inicial de la solución acuosa de 5.2.



Figura 16 Secuencia de dos contactos de extracción de cobre con D2EHPA-Queroseno (10:90% Vol.) a temperatura ambiente y pH de la solución acuosa = 5.2. El número de contactos para la extracción de cobre bajo las mismas condiciones se puede modificar, realizando cambios en las condiciones de operación (línea de trabajo), ya que al modificar la relación A/O se modificarían también el número de

contactos necesarios. Por ejemplo, al incrementar la relación A/O a 2:1, los contactos necesarios para la extracción de iones de cobre disminuirían, como se muestra en la **Figura 17**.

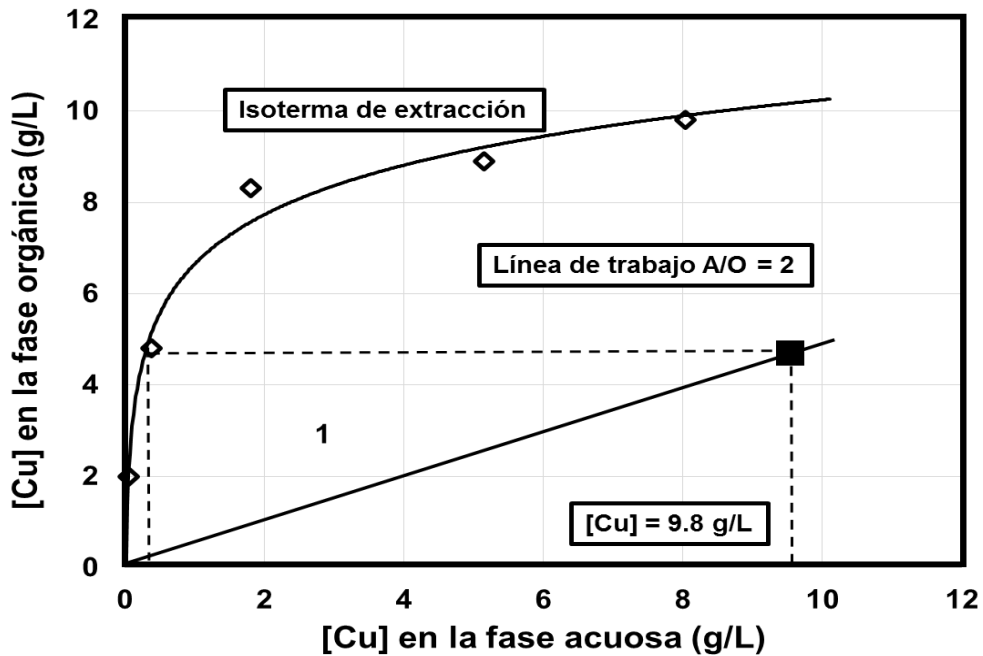


Figura 17. Diagrama Mc Cabe - Thiele para la extracción de iones de cobre presentes en una solución de lixiviación de CEI con una concentración inicial de 9.8 g/L, con %vol. A/O=2 a temperatura ambiente.

De la **figura 17** se puede observar que al modificar la línea de trabajo y duplicar el volumen de solución acuosa con una concentración de 9.8 g/L de cobre con respecto al volumen de la fase orgánica, por medio de un solo contacto se puede obtener un refino con una concentración de 0.2 g/L de cobre. La solución final de refino (solución acuosa con baja concentración de iones de cobre, en dónde se regenera el grado de acidez) se envía nuevamente al proceso de lixiviación, en este caso de CEI.

La concentración final deseada en la solución de refino, dependerá de las condiciones necesarias de operación en el proceso de recuperación de cobre, ya que para sistemas productivos, no sería necesariamente obligatorio extraer la totalidad de iones de cobre de la solución acuosa (refino), bastará con tener la menor concentración posible de cobre, con el menor número de contactos, lo que permitiría evaluar posibles ahorros en tiempos de producción, menores volúmenes de soluciones desplazados, menor cantidad de equipos como agitadores, motores eléctricos, etc.

### **3.5 RE-EXTRACCIÓN DE IONES DE COBRE**

Los iones de cobre extraídos en la solución orgánica fueron re-extraídos (despojados) nuevamente a una solución acuosa, mediante un procedimiento experimental semejante al proceso de extracción, con la finalidad de obtener las características más cercanas posibles a un electrólito que se procesa en una planta de electro refinación de cobre.

Se diseñaron experimentos empleando la solución orgánica proveniente del proceso de extracción (10% en volumen de D2EHPA, diluido en queroseno) con una concentración calculada igual a 8.31 g/L de cobre (experimento IE 3). Esta solución representa la concentración inicial de cobre en el proceso de re-extracción. Por otra parte, la solución acuosa empleada para re-extraer (despojar) los iones de cobre a partir de la fase orgánica, fue preparada sintéticamente una solución acuosa con las características en concentración de cobre y acidez semejantes a las presentes en soluciones electrolíticas de cobre agotadas, posterior al proceso de electrolisis: 30 g/L de cobre y 320 g/L de  $H_2SO_4$  [57]. La relación volumétrica que se

empleó entre las fases orgánica y acuosa (O/A) fue de 2:1 (50 mL fase orgánica y 25 mL fase acuosa). Ambas soluciones, acuosa y orgánica fueron puestas en contacto para realizar la re-extracción de iones de cobre de la fase orgánica a la fase acuosa. Ambas soluciones fueron colocadas en un embudo de separación de 250 mL durante 5 minutos con agitación manual. Posteriormente se detuvo la agitación y las soluciones se dejaron reposar para su separación durante 30 minutos. Las soluciones acuosa y orgánica fueron vertidas en frascos de vidrio por separado. Las soluciones acuosas fueron preparadas y se determinó la concentración de cobre mediante la técnica de Absorción Atómica. Los resultados mostraron que con una relación O/A de 2:1, es posible re-extraer el 94% de cobre presente en la fase orgánica, como se muestra en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Re-extracción (despojo) de iones de una solución orgánica al 10% en volumen de D2EHPA, con una solución acuosa de 320 g/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y una concentración inicial de cobre de 30 g/L.

Exp. No.	Relación (O/A) en % volumen	[Cu] fase acuosa inicial en g/L	[Cu] fase acuosa final en g/L	% de re-extracción (Cu <sub>Org.</sub> → Cu <sub>Ac.</sub> )
RE 1	2:1	30	44.3	94



El % de cobre re-extraído (despojando) de la fase orgánica a la fase acuosa, con un solo contacto, empleando una relación O/A 2:1 alcanzó un valor cercano al 94%, permitiendo obtener así una concentración de cobre en la fase acuosa de 44.3 g/L. La concentración alcanzada en la solución acuosa dispone de un valor suficiente (> 40 g/L de Cu) para proceder a una recuperación de cobre por medio de electrólisis, con lo cual la solución acuosa (electrolito) obtenida, tiene las condiciones de ser procesado mediante electrólisis convencional para la obtención de cobre metálico electrolítico, en este caso proveniente de un proceso de reciclaje de cobre presente en CEI, lo que permitiría obtener cobre metálico con una pureza mayor al 99.9%.

## CONCLUSIONES

1. El cobre presente en CEI, libres de resina epóxica, es lixiviado con una solución 3 N de  $\text{HNO}_3$  en un tiempo de 12 horas a temperatura ambiente.
2. Al lixiviar CEI con una solución 3 N de  $\text{HNO}_3$  a temperatura ambiente durante 12 horas, el Sn y Pb procedentes de la soldadura residual precipitan en forma de compuestos.
3. En el proceso de lixiviación, con una proporción entre peso de CEI y volumen de solución lixivante (sólido/líquido 1:2), fue posible alcanzar una concentración de 9.8 g/L de cobre, la cual se podría incrementar, aumentando la relación sólido/líquido.
4. Para una solución con una concentración de 9.8 g/L de Cu y pH inicial de 5.2, teóricamente es posible extraer cerca del 95% de Cu con una solución orgánica al 10% en D2EHPA en queroseno y una relación A/O = 1 por medio de tres contactos de extracción. Incrementando la relación A/O = 2, se requiere un solo contacto para obtener una solución de refino con 0.2 g/L de cobre.
5. En la fase de despojo, con una solución acuosa inicial de 30 g/L de cobre, así como una concentración de 320 g/L de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y una relación O/A 2:1, fue posible obtener un electrolito de cobre con una concentración de 44.3 g/L de cobre.

## REFERENCIAS

1. Roa, M. M. (2 de Marzo de 2021). statista. Recuperado el 08 de Marzo de 2021, de statista: <https://es.statista.com/grafico/12308/mayores-generados-de-basura-tecnologica-del-mundo/>
2. Salas, E. B. (26 de Febrero de 2021). statista. Recuperado el 08 de Marzo de 2021, de statista: <https://es.statista.com/estadisticas/1215707/generacion-residuos-electronicos-america-latina->
3. SGM. (s.f.). gob.mx. Recuperado el 30 de enero de 2020, de [https://www.sgm.gob.mx/SINEMGobMx/produccion\\_minera.jsp](https://www.sgm.gob.mx/SINEMGobMx/produccion_minera.jsp)
4. Sevilla, B. (Marzo de 2019). statista. Recuperado el 30 de Enero de 2020, de <https://es.statista.com/estadisticas/635359/paises-lideres-en-la-produccion-de-cobre-a-nivel-mundial/>
5. INEGI. (Octubre de 2019). INEGI. Recuperado el 31 de enero de 2020, de <https://www.inegi.org.mx/temas/mineria/>
6. Index mundi. (diciembre de 2019). Recuperado el 31 de enero de 2020, de <https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=cobre&moneda=mxn&mercancia=cobre>
7. Suárez, P. (31 de enero de 2020). Tematicas.org. Recuperado el 31 de enero de 2020, de <https://tematicas.org/indicadores-economicos/economia-internacional/precios/precio-cobre/>

8. Principe, A. (2014). SlidePlayer. Recuperado el 31 de Enero de 2020, de <https://slideplayer.es/slide/159188>
9. Bell , T. (26 de Septiembre de 2019). ThoughtCo. Recuperado el 31 de enero de 2020, de <https://www.thoughtco.com/copper-production-2340114>
10. Donoso Muñoz, M. J. (2013). SciELO. Recuperado el 31 de enero de 2020, de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-33052013000200008&script=sci\\_arttext](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-33052013000200008&script=sci_arttext)
11. Cardenas Triana, C. D. (s.f.). Academia. Recuperado el 10 de febrero de 2020, de [https://www.academia.edu/11800613/PIROMETALURGIA\\_DEL\\_COBRE](https://www.academia.edu/11800613/PIROMETALURGIA_DEL_COBRE)
13. Payno Herrera, M. L., & Setién Marquinez, J. (s.f.). Metalurgia y Siderurgia. Cantabria, España. Recuperado el 12 de Febrero de 2020, de [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/12231/VargasMu%F1oz\\_Mariana\\_2017.pdf;jsessionid=F5EBFCECC8ADA9B977EBC52C3BA1A67A?sequence=2](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/12231/VargasMu%F1oz_Mariana_2017.pdf;jsessionid=F5EBFCECC8ADA9B977EBC52C3BA1A67A?sequence=2)
14. uniovideo.es. (s.f.). Recuperado el 11 de 02 de 2020, de [https://www.uniovideo.es/sid-met-mat/TECNOLOGIASIDEROMETALURGICA/La%20Metalurgia%20del%20Cobre%20\(web\).pdf](https://www.uniovideo.es/sid-met-mat/TECNOLOGIASIDEROMETALURGICA/La%20Metalurgia%20del%20Cobre%20(web).pdf)

15. CODELCO EDUCA. (s.f.). Recuperado el 12 de febrero de 2020, de [https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/2019010905205/fundicion\\_media\\_tecnico\\_060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/2019010905205/fundicion_media_tecnico_060119.pdf)
16. Schafer, J. A. (s.f.). Metalúrgia extractiva del cobre. Recuperado el 14 de Febrero de 2020, de <http://recursosbiblio.url.edu.gt/Libros/2013/cmll/4.pdf>
17. Solvent Extraction Process - Classical and Novel Approaches. Autor: Vladimir S. Kislik. Institute of Applied Chemistry, University of Jerusalem. Editorial: British Library Catalog. ISBN: 978-04444-53778-2
18. Muñoz Portero, M. J. (s.f.). riunet.upv.es. Recuperado el 12 de febrero de 2020, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68321/Mu%C3%B1oz%20-%20Extracci%C3%B3n%20de%20metales%20por%20hidrometalurgia%3A%20Procesamiento%20de%20cobre%20y%20cinc.pdf?sequence=1>
19. COLDECO EDUCA. (2019). LIXIVIACIÓN "El riego". Chile. Recuperado el 09 de Marzo de 2021, de COLDECO EDUCA: [https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/2019010905316/lixiviacion\\_media\\_tecnico\\_080119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/2019010905316/lixiviacion_media_tecnico_080119.pdf)
20. Sole K.C. (2018) The Evolution of Cobalt–Nickel Separation and Purification Technologies: Fifty Years of Solvent Extraction and Ion Exchange. In: Davis B. et al. (eds) Extraction 2018. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8\\_95](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8_95)

21. Hydrometallurgy in Extraction Processes, Volumen 1. Escrito por C. K. Gupta, T. K. Mukherjee. CRC Press, 15 ago. 1990 - 248 páginas.
22. Ministerio de Minería. (s.f.). Recuperado el 12 de febrero de 2020, de <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-e/electroobtencion/>
23. CODELCO EDUCA. (s.f.). Recuperado el 12 de febrero de 2020, de <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/electroobtencion.html>
24. Müller, F. (26 de Octubre de 2018). La minería urbana, en auge. (M. Orth, Entrevistador) Recuperado el 08 de Marzo de 2021, de <https://www.deutschland.de/es/topic/medio-ambiente/mineria-urbana-las-materias-primas-del-futuro-estan-en-la-ciudad>
25. ALSIMET. (5 de Octubre de 2017). Recuperado el 08 de Marzo de 2021, de ALSIMET Web site: <http://alsimet.es/es/noticias/reciclaje-cobre-recuperacion-reutilizacion>
26. Recemsa. (14 de Febrero de 2015). Recuperado el 20 de Febrero de 2020, de <https://www.elchatarrero.com/uno-de-los-mejores-metales-para-el-reciclaje-el-cobre/>

27. Tuncuk, A., Stazi, V., Akcil, A., Yazici, E. Y., & Deveci, H. (2012). Minerals Engineering (Vol. 25). ELSEVIER. Recuperado el 13 de marzo de 2020, de [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687511003669?via%3Dihubmat/TECNOLOGIASIDEROMETALURGICA/La%20Metalurgia%20del%20Cobre%20\(web\).pdf](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687511003669?via%3Dihubmat/TECNOLOGIASIDEROMETALURGICA/La%20Metalurgia%20del%20Cobre%20(web).pdf)
28. Rebolledo, R. A. (19 de Marzo de 2017). EL ECONOMISTA. Recuperado el 02 de Abril de 2020, de EL ECONOMISTA: <https://www.economista.com.mx/tecnologia/Como-usamos-los-mexicanos-la-tecnologia-20170319-0030.html>
29. Zeng X L, Yang C R, Chiang J F, Li J H. Innovating e-waste, management: From macroscopic to microscopic scales. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1–5
30. Tan Q Y, Dong Q Y, Liu L L, Song Q B, Liang Y Y, Li J H. Potential recycling availability and capacity assessment on typical metals in waste mobile phones: A current research study in China. Journal of Cleaner Production, 2017, 148: 509–517.
31. Jadhav U, Su C, Hocheng H. Leaching of metals from large pieces of printed circuit boards using citric acid and hydrogen peroxide. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, 23(23): 24384–24392.
32. Yang C R, Li J H, Tan Q Y, Liu L L, Dong Q Y. Green process of metal recycling: Coprocessing waste printed circuit boards and spent tin stripping solution. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(4): 3524–3534.

33. Kim E Y, Kim MS, Lee J C, Jeong J, Pandey B D. Leaching kinetics of copper from waste printed circuit boards by electro-generated chlorine in HCl solution. *Hydrometallurgy*, 2011, 107(3–4): 124–132.
34. Xia MC, Wang Y P, Peng T J, Shen L, Yu R L, Liu Y D, Chen M, Li J K, Wu X L, Zeng WM. Recycling of metals from pretreated waste printed circuit boards effectively in stirred tank reactor by a moderately thermophilic culture. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2017, 123(6): 714–721.
35. Das, A., Vidyadhar, A., Mehrotra, S.P., 2009. A novel flowsheet for the recovery of metal values from waste printed circuit boards. *Resour. Conserv. Recycl.* 53, 464–469.
36. 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.* 166, 478–482.
37. Guo, C., Wang, H., Liang, W., Fu, J., Yi, X., 2011. Liberation characteristic and physical separation of printed circuit board (PCB). *Waste Manag.* 31, 2161–2166.
38. Li, J., Xu, Z., Zhou, Y., 2007. Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards. *J. Electrostat.* 65, 233–238.
39. Ogunniyi, I.O., Vermaak, M.K.G., 2009. Investigation of froth flotation for beneficiation of printed circuit board comminution fines. *Miner. Eng.* 22, 378–385.



40. Veit, H.M., Bernardes, A.M., Ferreira, J.Z., Tenório, J.A.S., Malfatti, C. de F., 2006. Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy. *J. Hazard. Mater.* 137, 1704–1709.
41. Wu, J., Li, J., Xu, Z., 2008. Electrostatic separation for multi-size granule of crushed printed circuit board waste using two-roll separator. *J. Hazard. Mater.* 159, 230–234.
42. Yoo, J.-M., Jeong, J., Yoo, K., Lee, J., Kim, W., 2009. Enrichment of the metallic components from waste printed circuit boards by a mechanical separation process using a stamp mill. *Waste Manag.* 29, 1132–1137.
43. Long, L., Sun, S., Zhong, S., Dai, W., Liu, J., Song, W., 2010. Using vacuum pyrolysis and mechanical processing for recycling waste printed circuit boards. *J. Hazard. Mater.* 177, 626–632.
44. Tuncuk, A., Stazi, V., Akcil, A., Yazici, E. Y., and Deveci, H., Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*, 25-28-37 (2012). doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.019>.
45. Birloaga, I., De Michelis, I., Ferella, F., Buzatu, M., and Vegliò, F., Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery. *Waste Management*, 33(4), 935- 941 (2013). doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.003>.
46. Yang, H., Liu, J., and Yang, J., Leaching copper from shredded particles of waste printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*, 187(1-3), 393-400(2011). doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.051>.

47. Pereira, D. D., Rocha S. D. F., and Mansur M. B., Recovery of zinc sulphate from industrial effluents by liquid-liquid extraction using D2EHPA (di-2-ethylhexyl phosphoric acid). *Separation and Purification Technology*, 53(1), 89-96 (2007). doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2006.06.013>.
48. Liang, G., Mo, Y., Zhou, Q., 2010. Novel strategies of bioleaching metals from printed circuit boards (PCBs) in mixed cultivation of two acidophiles. *Enzyme Microb. Technol.* 47, 322–326.
49. Li J H, Duan H B, Yu K L, Liu L L, Wang S T. Characteristic of low temperature pyrolysis of printed circuit boards subjected to various atmosphere. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(11): 810–815.
50. Duan H B, Li J H, Liu Y C, Yamazaki N, Jiang W. Characterizing the emission of chlorinated/brominated dibenzo-p-dioxins and furans from low-temperature thermal processing of waste printed circuit board. *Environmental Pollution*, 2012, 161(1): 185–191.
51. Xiu F R, Zhang F S. Recovery of copper and lead from waste printed circuit boards by supercritical water oxidation combined with electrokinetic process. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165 (1–3): 1002–1007.
52. Xionan Xiaonan Liu , Qiuxia Tan , Yungui Li , Zhonghui Xu and Mengjun Chen. Copper recovery from waste printed circuit boards concentrated metal scraps by electrolysis. *Environ. Sci. Eng.* 2017 11(5): 1-5.
53. Havlik T, Orac D, Berwanger M, Maul A. The effect of mechanical–physical pretreatment on hydrometallurgical extraction of copper and tin in residue from

printed circuit boards from used consumer equipment. *Minerals Engineering*, 2014, 65(2): 163–171.

54. Hoang Long, et. al. Hydrometallurgical Process for Copper Recovery from Waste Printed Boards. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*. 2011, 32: 90-104.

55. Kathryn C. Sole. *Solvent Extraction in the hydrometallurgical processing and purification of metals: process design and selected applications*. CRC Press by Press is an imprint of Taylor & Francis Group P.p. 159-160, 2008.

56. Reddy, B. R., Park, K. H., and Mohapatra, D., 2007. "Process Development for the Separation and Recovery of Cooper from sulfate leach liquors of Synthetic Cu-Ni-Co-Fe matte using LIX 84 and LIX 973 N", *Hydrometallurgy*, 87, pp. 51-57.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
<b>1</b>	Mapa Mundial de la producción de cobre en 2018.	6
<b>2</b>	Ranking de los principales países productores de cobre a nivel mundial en 2018.	6
<b>3</b>	Diagrama de flujo de la producción primaria de Cu, incluyendo las rutas Hidrometalúrgica y Pirometalúrgica.	9
<b>4</b>	Orden de selectividad de extracción de cationes de metales base por ácido di-2-etilhexilfosfórico (D2EHPA).	18
<b>5</b>	Cosntrucción del diagrama de McCabe-Thiele. Concentraciones de MF, MI en mg/L.	20
<b>6</b>	Estructura dimérica del ácido di-2-etilhexilfosfórico (D2EHPA).	28
<b>7</b>	Diagrama de flujo experimental para la recuperación de cobre a partir de Circuitos Electrónicos Impresos de desecho en medio nítrico con D2EHPA-Queroseno.	33
<b>8</b>	Circuito Electrónico Impreso (CEI), A) previo al proceso de lixiviación y B) posterior al proceso de lixiviación (experimento L3).	42
<b>9</b>	Efecto de la concentración de HNO <sub>3</sub> en la lixiviación de cobre presente en CEI despoblados a temperatura ambiente, relación sólido/líquido 1:2 y agitación de 50 rpm.	43
<b>10</b>	Productos del proceso de lixiviación de CEI despoblados con una solución de HNO <sub>3</sub> a una concentración de 3 N.	45

<b>11</b>	Precipitado formado en el proceso de lixiviación de CEI con una solución de HNO <sub>3</sub> a una concentración de 3 N durante 12 horas a temperatura ambiente (Exp. L3).	46
<b>12</b>	Difractograma del precipitado obtenido en el experimento L3, como producto del proceso de lixiviación de CEI con una solución de HNO <sub>3</sub> a una concentración de 3 N después de 12 horas.	47
<b>13</b>	Efecto del % de extractante (D2EHPA) en la extracción de iones de cobre de una solución acuosa con pH inicial de 1.2.	49
<b>14</b>	Efecto del pH inicial en la extracción de cobre con D2EHPA (al 10% en volumen), diluido con queroseno a temperatura ambiente, a partir de una solución de lixiviación de CEI con HNO <sub>3</sub> ([Cu] = 0.98 g/L y una relación O/A = 1).	51
<b>15</b>	Diagrama Mc Cabe - Thiele para la extracción de iones de cobre presentes en una solución de lixiviación de CEI con una concentración inicial de 9.8 g/L, con %vol. A/O = 1 a temperatura ambiente.	55
<b>16</b>	Secuencia de tres contactos de extracción de cobre con D2EHPA-Queroseno (10:90% Vol.) a temperatura ambiente y pH de la solución acuosa = 5.2.	56
<b>17</b>	Diagrama Mc Cabe - Thiele para la extracción de iones de cobre presentes en una solución de lixiviación de CEI con una concentración inicial de 9.8 g/L, con %vol. A/O=2 a temperatura ambiente.	57

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
1	Volumen de Producción de cobre Nacional 2019.	7
2	Nombre comercial y descripción química de algunos extractantes usados en la industria de la metalurgia para recuperación de metales.	17
3	Reactivos químicos empleados en la experimentación.	31
4	Condiciones experimentales en el proceso de lixiviación con HNO <sub>3</sub> y CEI despoblados y sin resina epóxica.	35
5	Condiciones experimentales para el proceso de extracción de iones de cobre con D2EHPA diluido en queroseno.	38
6	Condiciones experimentales para determinar el efecto del valor inicial de pH de soluciones de lixiviación de CEI en la extracción de cobre con D2EHPA-Queroseno.	40
7	Determinación de la concentración teórica de cobre en la fase orgánica, posterior al proceso de extracción con una solución al 10% vol. D2EHPA-Queroseno a diferentes relaciones de fases A/O.	54
8	Re-extracción (despojo) de iones de una solución orgánica al 10% en volumen de D2EHPA, con una solución acuosa de 320 g/L H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> y una concentración inicial de cobre de 30 g/L.	59