

## Recuperación de cobre a partir de placas de circuitos electrónicos

G.G. González Robles<sup>1</sup>, G. Merino Aguilar<sup>1</sup>, J.A. Moreno León<sup>1</sup>, Z. Gamiño Arroyo<sup>1\*</sup>, L.E. Sánchez Cadena<sup>2</sup>, F.I. Gómez Castro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Química, DCNE, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Col. Noria Alta, Guanajuato, Gto., México C.P. 36050

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, DI, Universidad de Guanajuato, Juárez 77, Col. Centro, Guanajuato, Gto., México C.P. 36000

\* [gaminoz@ugto.mx](mailto:gaminoz@ugto.mx)

### RESUMEN

Se presentan los resultados de la recuperación de cobre a partir de placas de circuitos impresos desechadas. Se comienza con la molienda del material y clasificación de acuerdo al tamaño de partícula, posteriormente se realiza la etapa de lixiviación para obtener el cobre en solución, para separar el cobre de la solución se lleva a cabo la etapa de extracción líquido-líquido usando como agente extractor ACORGA M5774 diluido en queroseno, finalmente se realizó una reextracción (stripping) poniendo en contacto la fase orgánica con una solución de ácido sulfúrico con la finalidad de regenerar el extractante y separar el cobre de la fase orgánica. Para este caso se realizaron estudios sobre la concentración del metal al final de la lixiviación para distintos tamaños de partícula, así como pruebas a distintos valores de pH en la extracción y distintas concentraciones de ácido sulfúrico para la reextracción con la finalidad de determinar las mejores condiciones para cada etapa.

**PALABRAS CLAVE:** *Cobre, placas de circuitos impresos, molienda, lixiviación, extracción, reextracción.*

## ANTECEDENTES

El avance tecnológico ha contribuido al aumento de la diversidad de aparatos y dispositivos que al término de su vida útil finalizan siendo desechos muy complejos, que contaminan el medio ambiente. El crecimiento en la producción de aparatos eléctricos y electrónicos que gracias a la innovación tecnológica y a la globalización del mercado ha acelerado su sustitución lo que produce diariamente toneladas de residuos electrónicos, denominados Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) o WEEE por sus siglas en inglés (*Waste Electrical and Electronic Equipment*). El cual abarca todos los residuos eléctricos y electrónicos que han sido desechados o descartados sin reutilización aparente, los cuales comprenden una amplia de productos tales como las computadoras, televisores, celulares y electrodomésticos, que van desde el uso del hogar como en oficina o industria que en general contenga componentes eléctricos y/o que se alimenten directamente de electricidad o batería. En el año 2016, se generaron alrededor de 44.7 millones de toneladas de RAEE a nivel mundial con un incremento del 3 al 5% anual (Sánchez González, J. et al., 2021). En América, el principal productor de residuos de esta índole es Estados Unidos seguido de Brasil y México como segundo y tercer lugar respectivamente. En México, no existe una regulación específica para la manipulación de estos residuos, así como su disposición lo cual podría ser un problema a futuro ya que los RAEE contribuyen a un problema ambiental emergente debido al volumen que ocupan y generan actualmente. Estimándose así que en nuestro país se generan entre 150 mil y 180 mil toneladas por año, siendo que esta cifra equivale hasta 5 veces el Estadio Azteca mostrándose así la magnitud del problema (Rubio Campos, N., et al., 2021). Asimismo, los RAEE presentan un gran desafío en términos de almacenamiento, disposición y manejo ya que son residuos con contenido de elementos peligrosos para la salud y el medio ambiente tal como lo es el plomo, antimonio, mercurio, entre otros; de igual forma se consideran residuos tóxicos por lo que disponerlos de la manera convencional no es una opción. Las tarjetas de circuitos impresos (TCI) contribuyen en gran número a los RAEE, siendo éstas tarjetas las más habituales a encontrar en los residuos electrónicos que estas contienen elementos representativos en diferentes porcentajes como lo es el Cu en un 20%, Sn en 5.94%, Pb en 3.2% y Fe en 2.24%, además contiene los siguientes elementos, pero a porcentajes más bajos como lo son el Au en 0.0025%, Ag en 0.1% y Pd en 0.01% (Rubio Campos, N. et al., 2020). Como se puede observar el cobre se encuentra en una proporción más alta con respecto a los otros elementos por lo cual se puede considerar las TCI una fuente para la obtención de este metal. Para llevar a cabo la concentración de cobre, se pueden emplear procesos a altas temperaturas (pirometalúrgicos), pero estos generan emisiones de gases de efecto invernadero por las cuales contribuirían significativamente en la contaminación ambiental, además que el requerimiento energético sería elevado y por lo tanto muy costoso. Otra forma de obtener el cobre es a través de los procesos hidrometalúrgicos, los cuales presentan una economía más viable, impactos ambientales menores y recuperaciones altas del metal en cuestión. Estos procesos son llevados a cabo en dos etapas, la primera en donde se realiza una lixiviación en medio ácido o alcalino y en una segunda

etapa, la cual consiste en la concentración o separación del metal de interés, los métodos más utilizados para esta etapa son la precipitación, la adsorción, el intercambio iónico y la extracción con solventes.

En este trabajo se propone utilizar las TCI como una fuente de obtención de cobre y proponer un método para el tratamiento de estos residuos (RAEE), y contribuir en disminuir el impacto ambiental de estos materiales y obteniendo un beneficio económico. El método se basa en realizar una extracción líquido-líquido para separar el cobre obtenido a partir de una solución lixiviada. La extracción líquido-líquido, a menudo llamada extracción con solventes, consiste en la separación de los constituyentes de una mezcla líquida por contacto con otro líquido inmiscible (parcial o totalmente inmiscible). Esta técnica es recomendable cuando los componentes tienen puntos de ebullición muy próximos, son sensibles a la temperatura y ha sido utilizado en la separación de metales como cobre, cobalto (Treybal, R., 2003).

## **METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

### ***Preparación y molienda de muestras***

El material con el que se trabajó en la investigación se obtuvo a través de la recolección de tarjetas de circuito impresas provenientes de la recolección de residuos electrónicos en la ciudad de Guanajuato capital. Se desmantelaron las tarjetas con ayuda de pinzas retirando capacitores, resistencias, entre otros. Después se cortaron en pequeños cuadros y se trituraron con la ayuda de una licuadora en periodos de 1 minuto durante 10 veces, de ahí se pasó a un molino por 2 veces para obtener mejores resultados. Por último, se tamizaron las muestras para clasificar el material por su tamaño de partícula.

### ***Lixiviación***

Con base a la investigación y revisión bibliográfica en diversos trabajos se encontraron condiciones a las cuales se obtiene un mayor porcentaje de disolución. Se determinaron las condiciones para una primera lixiviación utilizando una mezcla de 270 mL de ácido sulfúrico 2 mol/L y 30 g del tamiz de 0.500 mm en un matraz fondo redondo de 3 bocas de 500 mL, a reflujo con agua de enfriamiento. El proceso fue llevado a cabo a una temperatura entre 70-80°C, la cual fue controlada con un baño de arena y agitación magnética de 750 rpm. El tiempo de lixiviación fue de 180 minutos y a los 80 minutos se empezó a adicionar 30 mL de peróxido de hidrógeno al 30% lo durante un tiempo de 30 minutos. Se recolectaron muestras cada 20 minutos durante la lixiviación. Al término de la lixiviación se dejó enfriar por 22 horas recolectando una última muestra etiquetándola como tiempo infinito. Para la segunda lixiviación se utilizó una mezcla de 450 mL de ácido sulfúrico 2 mol/L y 50 g del tamiz de 0.250 mm en un matraz de 3 bocas fondo redondo de 500 mL, a reflujo con agua de enfriamiento. El proceso fue llevado a cabo a una temperatura entre 70-80°C, la cual fue controlada con un baño de arena y agitación magnética de 750 rpm. El tiempo de lixiviación fue de 180 minutos y a los 80 minutos se empezó a adicionar 50 mL de peróxido de hidrógeno al 30% en

un tiempo de 44 minutos. Se recolectaron muestras cada 20 minutos durante la lixiviación. Al término de la lixiviación se dejó enfriar por 30 minutos. Al término de ambas lixivitaciones, estas fueron filtradas con ayuda de papel filtro y un embudo para retirar cualquier producto sólido. De igual forma se filtraron las muestras recolectadas cada 20 minutos de ambas lixivitaciones. Se realizaron las diluciones pertinentes en el rango de la curva de calibración. Para luego obtener una lectura de las concentraciones de las muestras con la ayuda del Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) *AAAnalyst 200 Perkin Elmer*.

### **Extracción líquido-líquido**

Se hizo una extracción líquido-líquido para obtener una fase acuosa y una fase orgánica. Para el estudio de la extracción de cobre se empleó la solución filtrada de la primera lixiviación como fase acuosa y para la fase orgánica se preparó una solución en queroseno al 30% (v/v) con el extractante recomendado por la bibliografía (Romero Rosinelli, C. 2017), ACORGA M5774. También se preparó una solución de hidróxido de sodio 10 mol/L. Se realizó un primer ensayo sin agregar hidróxido de sodio, el tiempo de contacto fue durante 15 minutos con agitación magnética de 1150 RPM y la ayuda de un pHmetro para determinar su pH. Al término del tiempo de contacto con un embudo de separación se obtuvieron la fase acuosa y la fase orgánica. Una vez obtenida la fase acuosa se realizó su respectiva dilución y a su vez su análisis de concentración de cobre por EAA. Para los siguientes experimentos, se realizaron pruebas a diferentes valores de pH con ayuda de hidróxido de sodio 10 mol/L. De igual manera, se realizaron las separaciones de las fases por decantación, así como la preparación de las diluciones y las lecturas de concentración de cobre por EAA. Dando como resultado el pH de extracción de 2. Por lo tanto, se fijó como base un pH de 2, las distintas relaciones de fases A/O fueron llevadas a ese pH con ayuda del hidróxido de sodio a un tiempo de 20 minutos con agitación magnética de 1150 RPM. Se realizaron las separaciones correspondientes, así como sus diluciones y lecturas de concentraciones por medio del EAA. La determinación de la concentración de cobre en la fase acuosa se obtuvo por medio de un balance de materia.

Balance total:

$$R_{(n-1)} + S_n = E_n + R_n \quad (1)$$

Balance por componente:

$$R_{(n-1)}X_{(n-1)} + S_nY_s = E_nY_n + R_nx_n \quad (2)$$

Rendimiento de extracción:

$$\%Ext = [Cu_{org}] / ([Cu_{ac}] + [Cu_{org}]) \times 100\% \quad (3)$$



Donde  $[Cu_{org}]$  corresponde a la concentración total que hay en la fase orgánica de cobre y  $[Cu_{ac}]$  en la fase acuosa respectivamente.

### **Reextracción (stripping)**

Para la reextracción de cobre se preparó ácido sulfúrico 2 mol/L (fase acuosa) poniéndola en contacto con las fases orgánicas obtenidas en los ensayos de pH y de la isoterma de extracción con concentraciones de cobre similares, utilizando vasos de precipitados con agitación magnética de 1150 rpm durante 20 minutos para cada una de las muestras. El pH aquí no era una condición por estudiar, así que no se considera. Las distintas relaciones de fases A/O fueron llevadas a esas condiciones. Una vez concluido el tiempo de contacto se separaron ambas fases por decantación. Se realizaron las diluciones pertinentes y se determinaron las concentraciones de cobre de todas las muestras con EAA. La determinación de la concentración de cobre en la fase acuosa se obtuvo por medio de un balance de materia.

Rendimiento de reextracción:

$$\%Ext = [Cu_{ac}]/([Cu_{ac}] + [Cu_{org}]) \times 100\% \quad (4)$$

Donde  $[Cu_{org}]$  corresponde a la concentración total que hay en la fase orgánica de cobre y  $[Cu_{ac}]$  en la fase acuosa respectivamente.

Con las mejores condiciones de extracción y reextracción se obtuvieron ambas isotermas ajustándolas con modelos matemáticos para poder determinar el número de etapas presentes en ambos procesos con ayuda del método McCabe-Thiele. Con la concentración inicial y final del metal en la fase acuosa, las condiciones de extracción y un proceso iterativo se determinaron dichas etapas de operación.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Preparación y molienda de muestras**

Las placas libres de capacitores, resistencias y demás materiales se cortaron en cuadrados pequeños como se muestra en la Figura 1, después se trituraron con ayuda de una licuadora y finalmente se molieron en un molino.



**Figura 1.-** Preparación de las tarjetas de circuitos impresos para su molienda.

Se tamizó el resultado de la molienda y se obtuvieron las siguientes masas de cada tamaño de partícula:

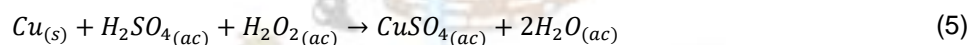
**Tabla 1.-** Distribución de masas de cada muestra después del tamizado.

Diámetro (mm)	Masa obtenida(g)
0.105	24.01
0.105	45.84
0.250	57.78
0.500	33.03
1.000	240.00

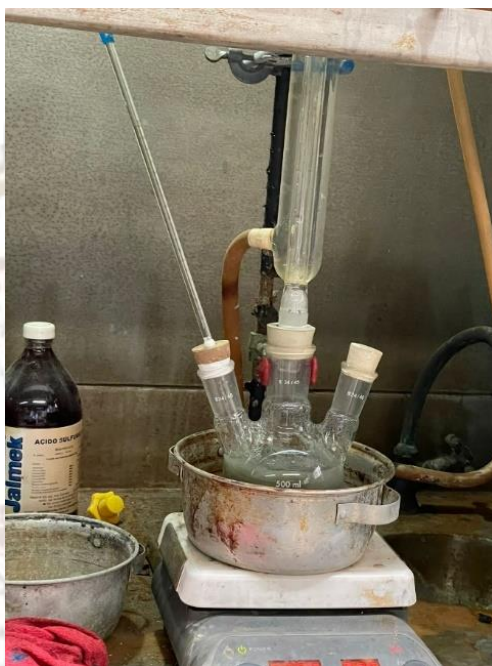
### **Lixiviación**

Se realizó la etapa de lixiviación para dos tamaños de partícula distintas: 0.250 mm y 0.500 mm.

La lixiviación se realizó en una proporción de 1:10 de sólido-líquido, la reacción realizada está representada por la siguiente ecuación:



El sistema utilizado en las lixiviaciones se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.-** Sistema utilizado para la etapa de lixiviación.

Lixiviación 1. Diámetro de partícula 0.500 mm.

La Tabla 2 muestra la variación de la concentración de Cu en la solución lixiviado a diferentes tiempos durante el proceso de lixiviación.

**Tabla 2.-** Evolución de la concentración de cobre en lixiviación para un tamaño de partícula de 0.500 mm.

Muestra	Tiempo (min)	[Cu] (mg/L)
0	0	1164.0
1	20	6110.0
2	40	9066.0
3	60	10960.0
4	80	9160.0
5	120	9400.0
6	1020	8427.5

Lixiviación 2. Diámetro de partícula 0.250 mm.

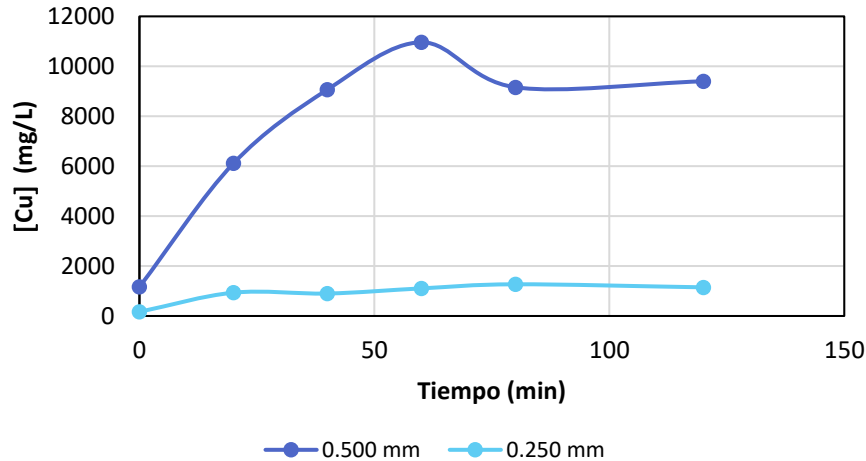
La Tabla 3 muestra la variación de la concentración de Cu en la solución lixiviado a diferentes tiempos durante el proceso de lixiviación.

**Tabla 3.-** Evolución de la concentración de cobre en lixiviación para un tamaño de partícula de 0.250 mm.

Muestra	Tiempo (min)	[Cu] (mg/L)
0	0	167.5
1	20	934
2	40	899
3	60	1104.5
4	80	1269.5
5	120	1147.5

Los resultados de la lixiviación para ambos tamaños de partícula a través del tiempo se muestran en la Figura 3.

Concentración de Cu respecto al tiempo



**Figura 3.-** Concentración de Cu a diferentes tiempos durante la etapa de lixiviación

En la Figura 3 se observa que para el tamaño de partícula de 0.500 mm las concentraciones de cobre son mayores por lo que las siguientes etapas del proceso se llevaron a cabo con la solución resultante de este tamaño de partícula. En la Figura 4a y 4b, se presentan las soluciones lixiviadas para los dos tamaños de partículas utilizados en este estudio.





**Figura 4a.-** Solución lixiviada para un tamaño de muestra de 0.500 mm.



**Figura 4b.-** Solución lixiviada para un tamaño de muestra de 0.250 mm.

### **Extracción líquido-líquido**

La solución filtrada de la lixiviación 1 se puso en contacto con la solución del agente extractor ACORGA M5774 diluido en queroseno al 30% v/v durante 20 minutos a temperatura ambiente con agitación magnética de 1150 rpm. La reacción que se lleva a cabo es la siguiente:

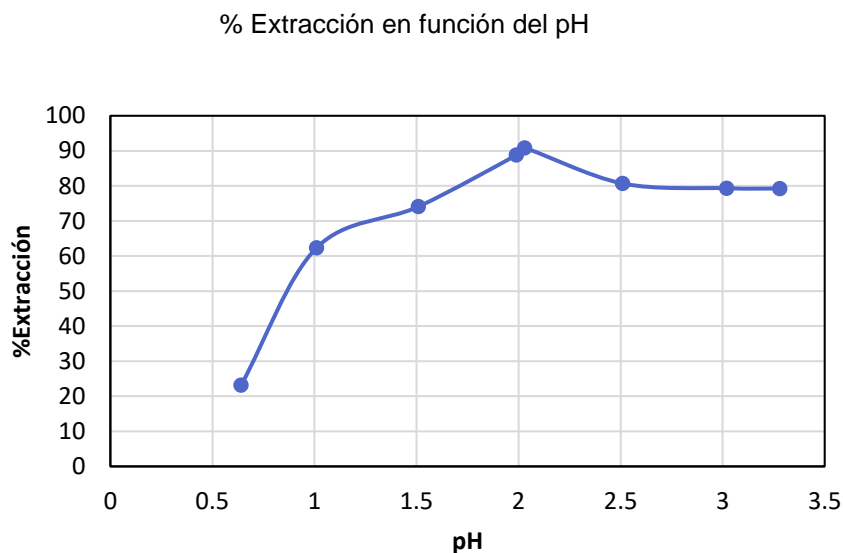


Primero se realizaron distintas pruebas con una relación 1:1 de fase acuosa y orgánica, variando el valor de pH con una solución de NaOH 10 mol/L para determinar el pH idóneo para la extracción. En la Figura 5, se presenta el sistema utilizado para este estudio.



**Figura 5.-** Sistema de extracción para la variación de pH.

El porcentaje de extracción a distintos valores de pH se muestra en la Figura 6.



**Figura 6.-** Porcentaje de extracción a distintos valores de pH.

En la Figura 6 se puede observar que el pH idóneo es 2 aproximadamente por lo que fue el pH que se eligió para la construcción de la isoterma de extracción. Las condiciones de extracción empleadas fueron las que se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.-** Condiciones empleadas para la extracción.

<b>Concentración ACORGA M5774</b>	30% v/v
<b>pH</b>	2
<b>Tiempo de contacto</b>	20 minutos

Para la construcción de la isoterma de extracción se realizaron experimentos a distintas relaciones de volumen de fase acuosa y fase orgánica como se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5.-** Concentraciones de cobre en la fase acuosa y orgánica a diferentes relaciones de volumen.

Vol. Acuosa (mL)	Vol. Orgánica (mL)	A/O	[Cu] Acuosa (mg/L)	[Cu] Orgánica (mg/L)
0	0	0	0	0
5	20	1/4	310.2	2990.1
5	15	1/3	402.9	3885.2
5	10	1/2	496.7	5955.7
10	10	1	1156.0	10721.7
10	10	1	1096.0	10883.1
10	10	1	904.0	11123.1
10	5	2	1762.5	20260.8
10	4	2.5	2838.0	21589.9
15	5	3	3716.0	24102.5
20	5	4	5062.0	23607.7
10	2	5	6133.0	22750.9
10	2	5	5967.0	23780.1

Con el programa *CurveExpert Professional 2.7.1* se determinó una función que se ajustara a los datos experimentales obtenidos, en la Tabla 6 se describe el modelo.

**Tabla 6.-** Descripción del modelo que ajusta los datos obtenidos experimentalmente para la construcción de la isoterma de extracción.

<b>Modelo</b>	$y = b(1 - e^{-ax})$
<b>Modelo en función a la fase orgánica</b>	$x = \frac{-\ln\left(1 - \frac{y}{b}\right)}{a}$
<b>a</b>	$6.2282023 \times 10^{-4}$
<b>b</b>	$2.4910335 \times 10^4$
<b>Factor de correlación</b>	0.9791855

La Figura 7 muestra la función que se ajusta a los datos obtenidos experimentalmente. Mediante el programa Excel, se realizó el cálculo de las etapas de extracción necesarias a distintos valores de A/O. Los diagramas con diferentes relaciones de fases se presentan en las Figuras 8, 9, 10, 11, 12 y 13. Estos diagramas representan alternativas para la extracción mediante el método de McCabe-Thiele

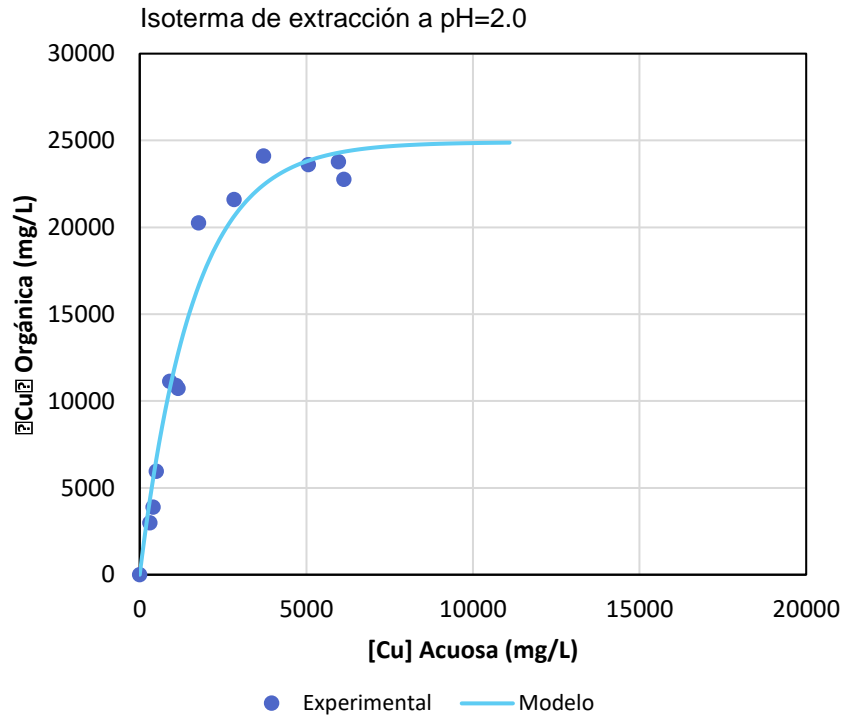


Figura 7.- Isoterma experimental y curva que ajusta los datos obtenida mediante el programa *Curve Expert*.

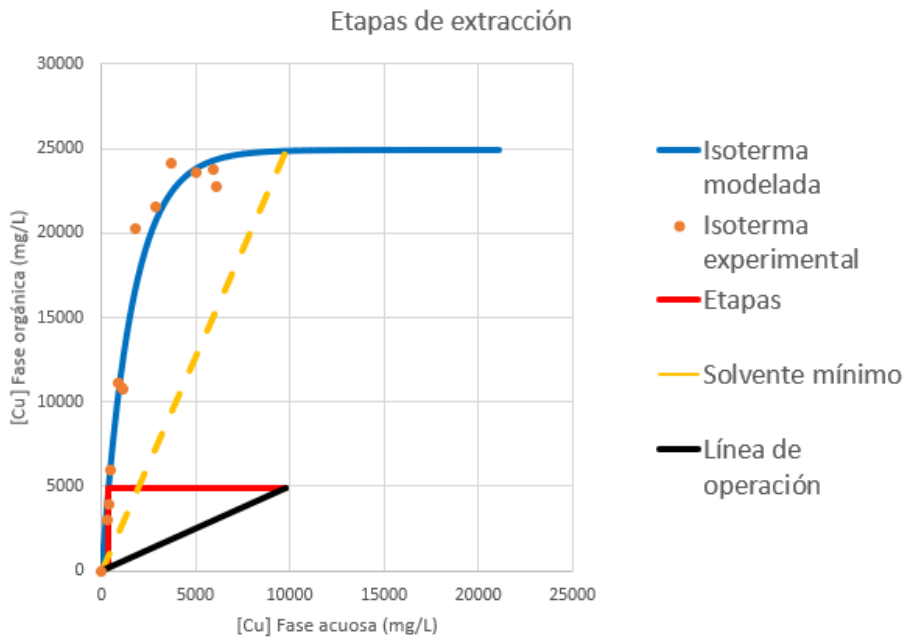
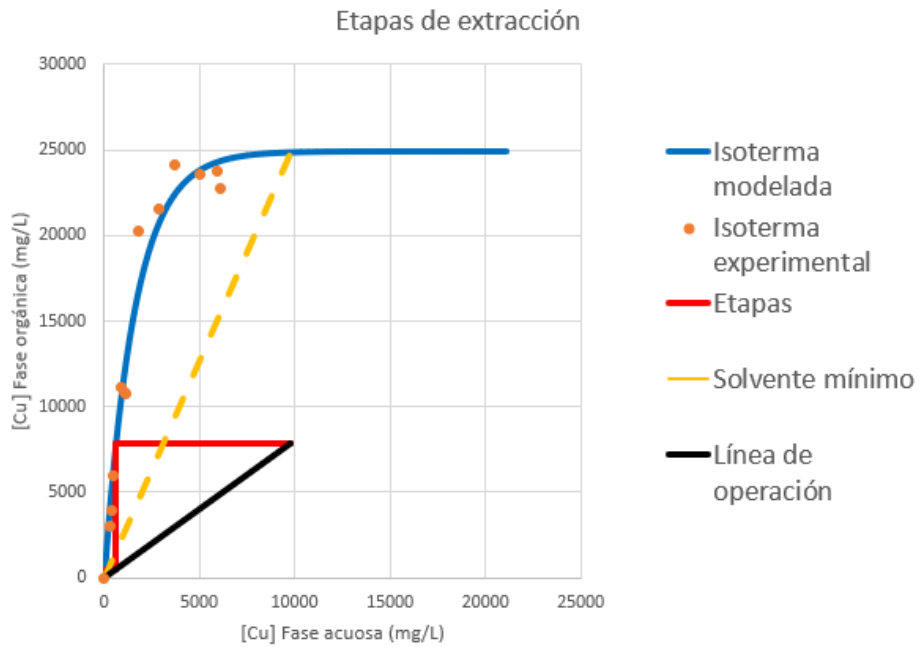
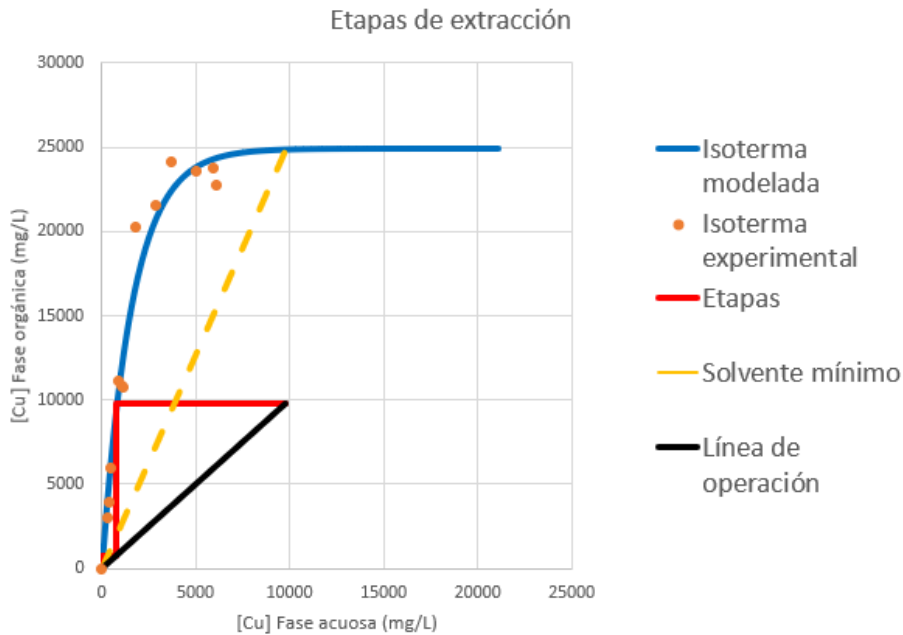


Figura 8.- Etapas de extracción a relación A/O=1/2;  $X_i = 9802.5$  mg/L;  $X_r = 11.009$  mg/L; [ACORGA M5774]=30%; pH=2; tiempo= 20 min.

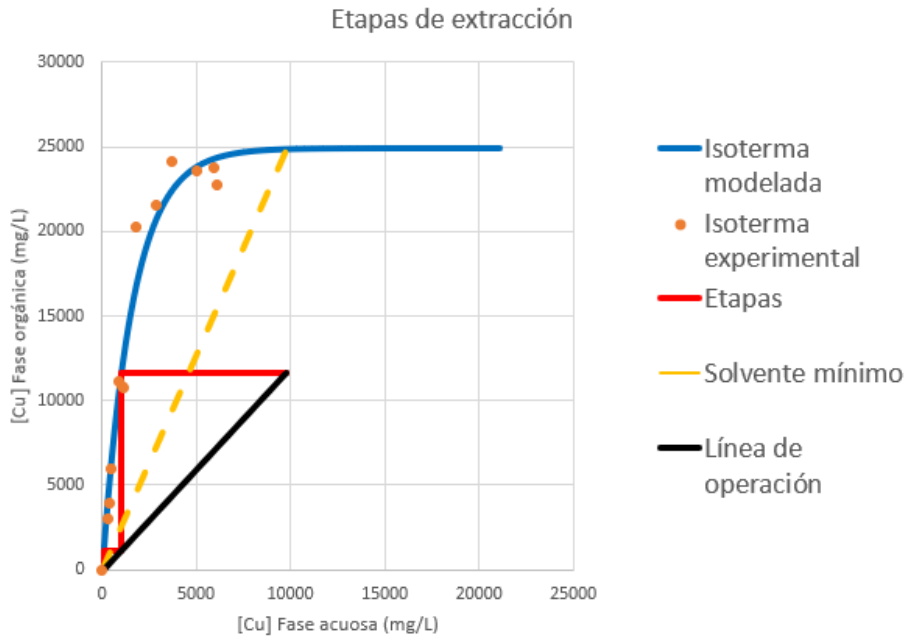




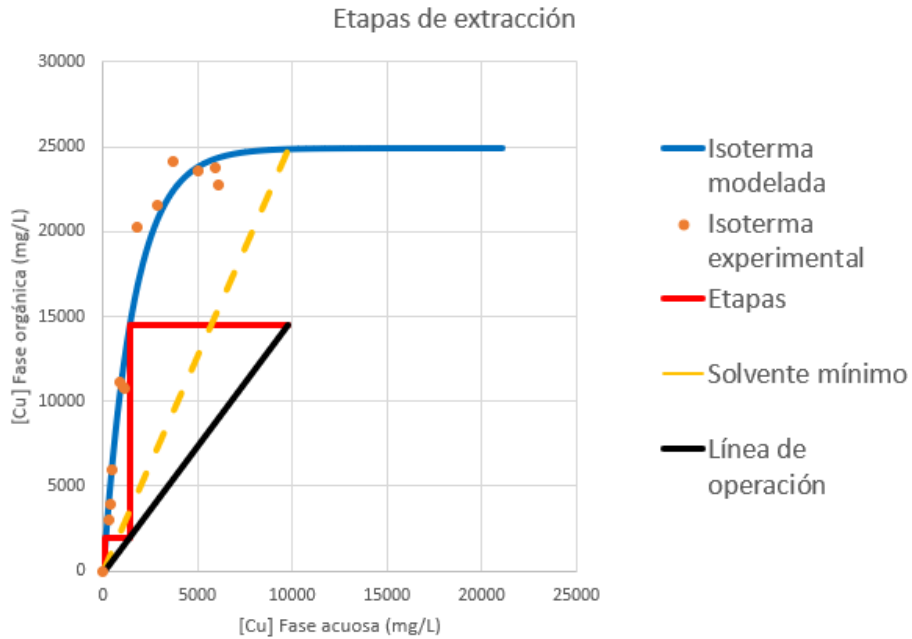
**Figura 9.-** Etapas de extracción a relación A/O=4/5;  $X_i = 9802.5$  mg/L;  $X_f = 29.928$  mg/L; [ACORGA M5774]=30%; pH=2; tiempo= 20 min.



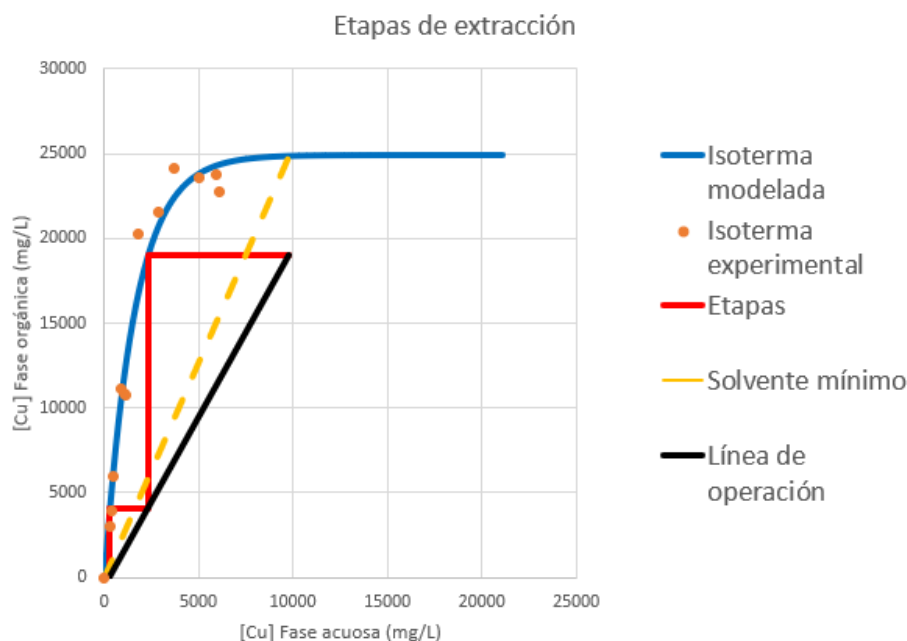
**Figura 10.-** Etapas de extracción a relación A/O=1;  $X_i = 9802.5$  mg/L;  $X_f = 47.153$  mg/L; [ACORGA M5774]=30%; pH=2; tiempo= 20 min.



**Figura 11.-** Etapas de extracción a relación A/O= 1.2;  $X_i = 9802.5$  mg/L;  $X_f = 74.49$  mg/L; [ACORGA M5774]=30%; pH=2; tiempo= 20 min.



**Figura 12.-** Etapas de extracción a relación A/O=1.5;  $X_i = 9802.5$  mg/L;  $X_f = 128.26$  mg/L; [ACORGA M5774]=30%; pH=2; tiempo= 20 min.



**Figura 13.-** Etapas de extracción a relación A/O=2;  $X_i = 9802.5$  mg/L;  $X_f = 286.29$  mg/L; [ACORGA M5774]=30%; pH=2; tiempo= 20 min.

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos a diferentes relaciones de A/O y el porcentaje de extracción logrado en dos etapas.

**Tabla 7.-** Porcentaje de extracción a distintas relaciones de A/O.

A/O	Etapas	$X_n$	$Y_1$	%
1/2	2	11.009	4895.7455	99.89
4/5	2	29.928	7818.0576	99.69
1	2	47.153	9755.347	99.50
1.2	2	74.49	11673.612	99.24
1.5	2	128.26	14511	98.69
2	2	286.29	19032.42	97.08

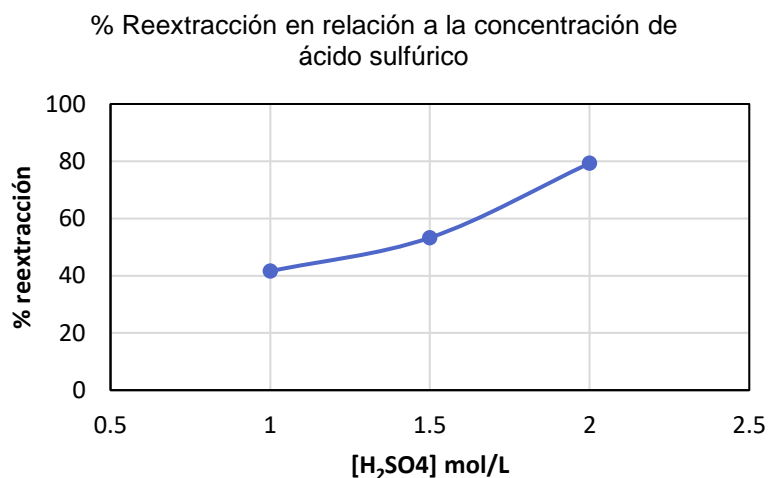
A partir de la aplicación del método de McCabe-Thiele se obtuvieron dos etapas para la etapa de extracción, la línea de operación está limitada por la recta de solvente mínimo, la cual representa la cantidad mínima de solvente que se requiere para obtener la mayor concentración de cobre en la fase orgánica. El porcentaje de extracción disminuye al aumentar la relación A/O, a mayor relación de A/O se concentra más

cobre en la fase orgánica y se utiliza una menor cantidad de agente extractor. La mayor concentración que se logró en la fase orgánica fue de 19032.42 mg/L con una relación de A/O de 2 y un porcentaje de extracción de 97.08%.

### Reextracción (stripping)

Se hizo uso de las fases orgánicas obtenidas de los experimentos de pH y de la isoterma de extracción que tuvieran concentraciones de cobre similares. La reacción de reextracción está representada por la ecuación 6 en el sentido de derecha a izquierda. Primero se realizaron pruebas con soluciones de ácido sulfúrico a diferente concentración para determinar la concentración que permitiera un mayor porcentaje de reextracción. Se puso en contacto la fase orgánica cargada de cobre con ácido sulfúrico a distintas concentraciones durante 20 minutos a temperatura ambiente y con agitación magnética de 1150 rpm.

El porcentaje de reextracción a distintas concentraciones de ácido sulfúrico se muestra en la Figura 14.



**Figura 14.-** Porcentaje de reextracción con soluciones de ácido sulfúrico a distintas concentraciones.

En la figura 10 se puede observar que la concentración de ácido sulfúrico que permite una mayor reextracción es la de 2 mol/L por lo que se eligió para la construcción de la isoterma de reextracción.

Las condiciones de reextracción empleadas se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8.-** Condiciones empleadas en la reextracción.

Concentración de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2 mol/L
Tiempo de contacto	20 minutos



Para la construcción de la isoterma de reextracción se realizaron experimentos a distintas relaciones de volumen de fase acuosa y fase orgánica como se muestra en la tabla 9.

**Tabla 9.-** Concentraciones de cobre en la fase acuosa y orgánica a diferentes relaciones de volumen.

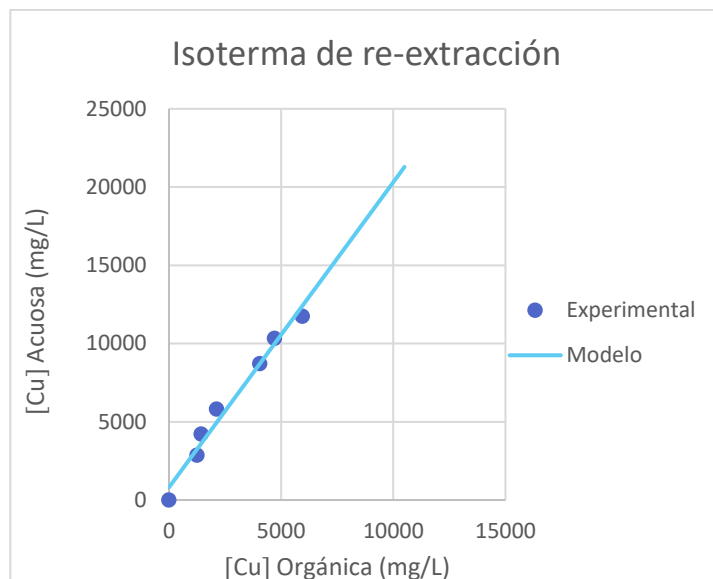
Vol. Acuosa (mL)	Vol. Orgánica (mL)	O/A	[Cu] Acuosa (mg/L)	[Cu] Orgánica (mg/L)
0	0	0	0	0
15	5	1/3	2870.0	1252.7
10	5	1/2	4215.0	1432.7
4	3	3/4	5810.0	2116.0
3	4.5	1.5	8722.5	4047.7
5	10	2	10322.5	4701.4
4	12	3	11742.5	5948.5

Haciendo uso del programa *CurveExpert Professional 2.7.1* se encontró una función que se ajustara a los datos experimentales obtenidos, en la Tabla 10 se describe el modelo, que para este caso, es una función lineal ya que a diferencia de la isoterma de extracción no se muestra una saturación a determinada concentración.

**Tabla 10.-** Descripción del modelo que ajusta los datos obtenidos experimentalmente para la construcción de la isoterma de reextracción.

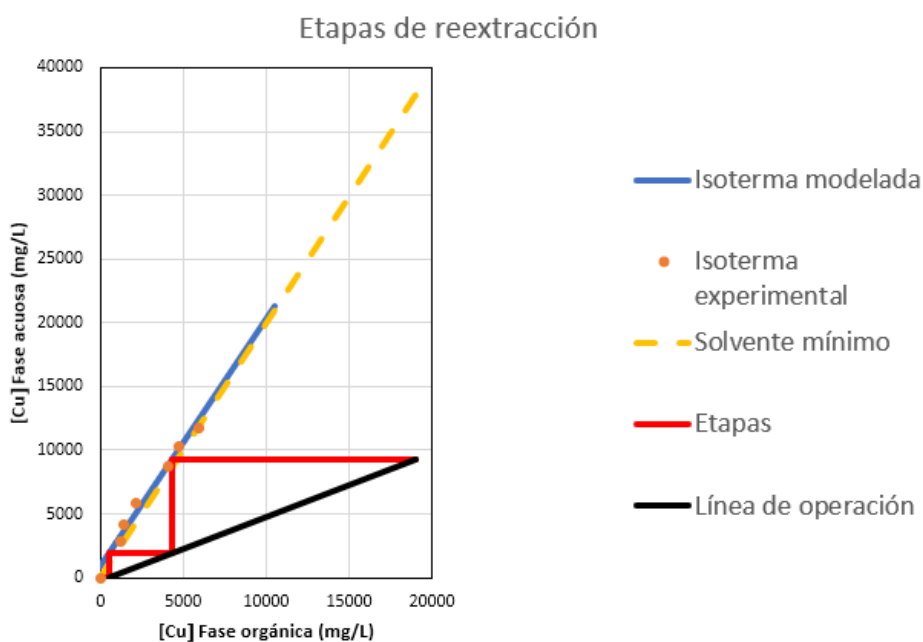
<b>Modelo</b>	$y = a + bx$
<b>Modelo en función a la fase orgánica</b>	$x = \frac{y - a}{b}$
<b>a</b>	$8.0785553 \times 10^2$
<b>b</b>	1.9502131
<b>Factor de correlación</b>	0.9883

La Figura 15, muestra la función que se ajusta a los datos obtenidos experimentalmente.

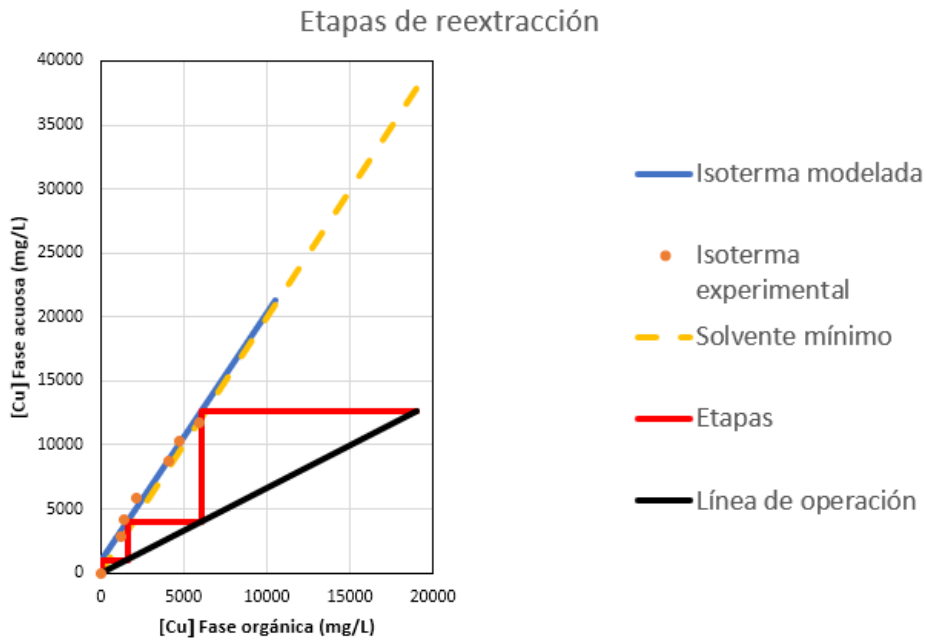


**Figura 15.-** Isoterma experimental y curva que ajusta los datos obtenida mediante el programa *Curve Expert*.

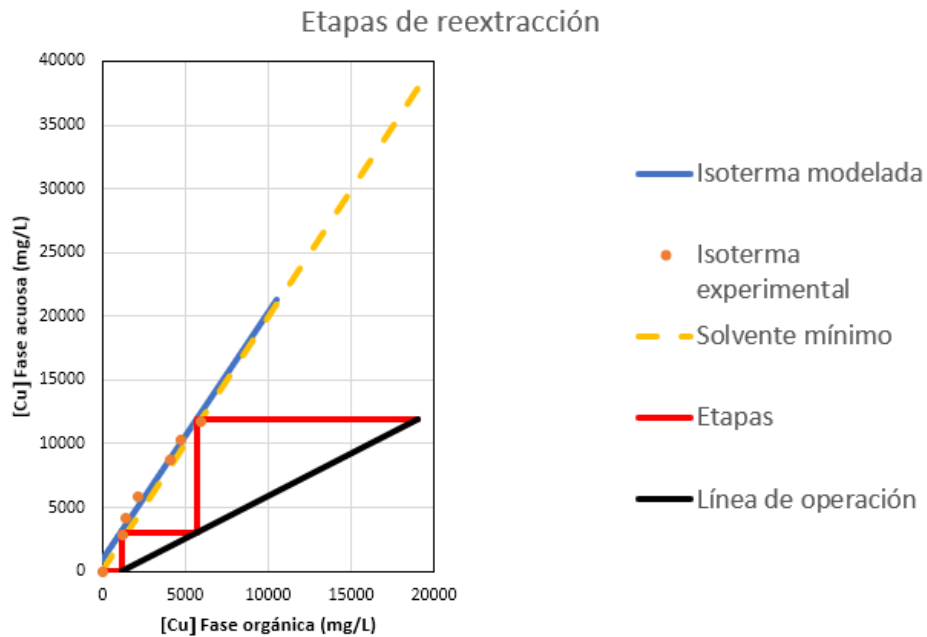
Los diagramas con diferentes relaciones de fases se presentan en las Figuras 16, 17, 18, 19, 20 y 21. Estos diagramas representan alternativas para la extracción mediante el método de McCabe-Thiele.



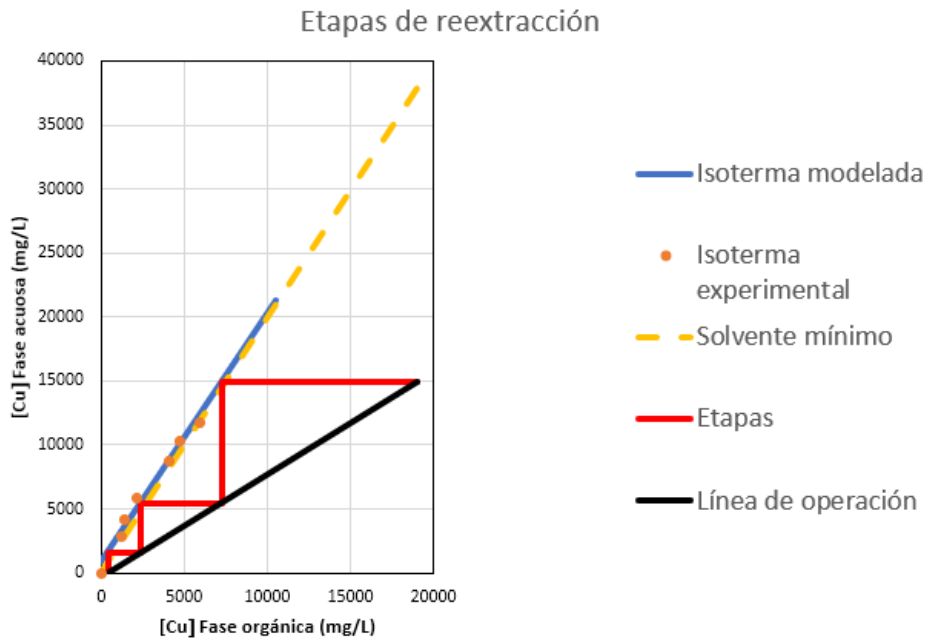
**Figura 16.-** Etapas de reextracción a relación  $O/A=1/2$ ;  $X_i= 19035$  mg/L;  $X_f= 552.7$  mg/L;  $[ACORGA\ M5774]=30\%$ ;  $pH=2$ ; tiempo= 20 min.



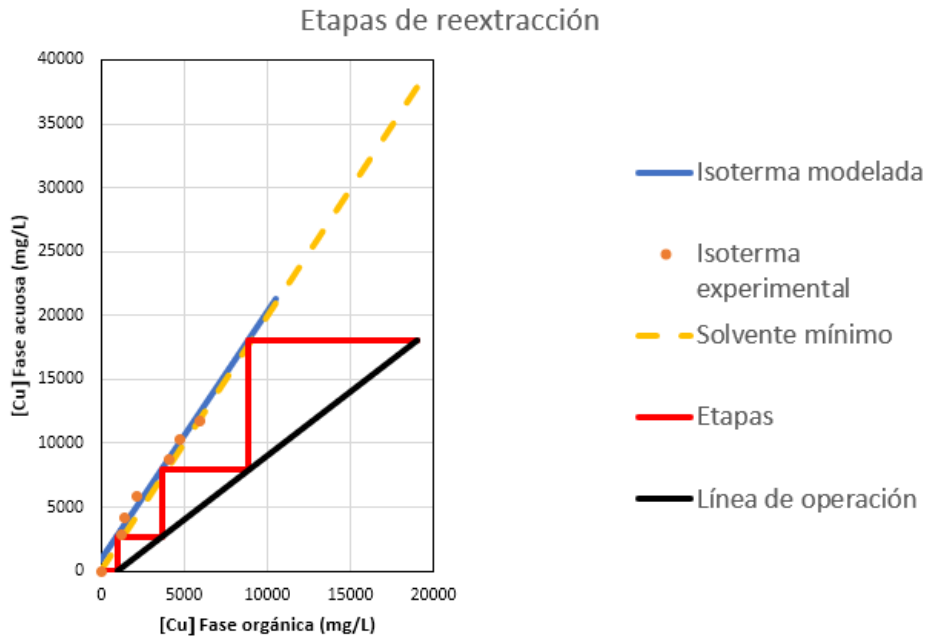
**Figura 17.-** Etapas de reextracción a relación O/A=2/3;  $X_i= 19035$  mg/L;  $X_f= 104.17$  mg/L; [ACORGA M5774]=30%; pH=2; tiempo= 20 min.



**Figura 18.-** Etapas de reextracción a relación O/A=2/3;  $X_i= 19035$  mg/L;  $X_f= 1143.8$  mg/L; [ACORGA M5774]=30%; pH=2; tiempo= 20 min.

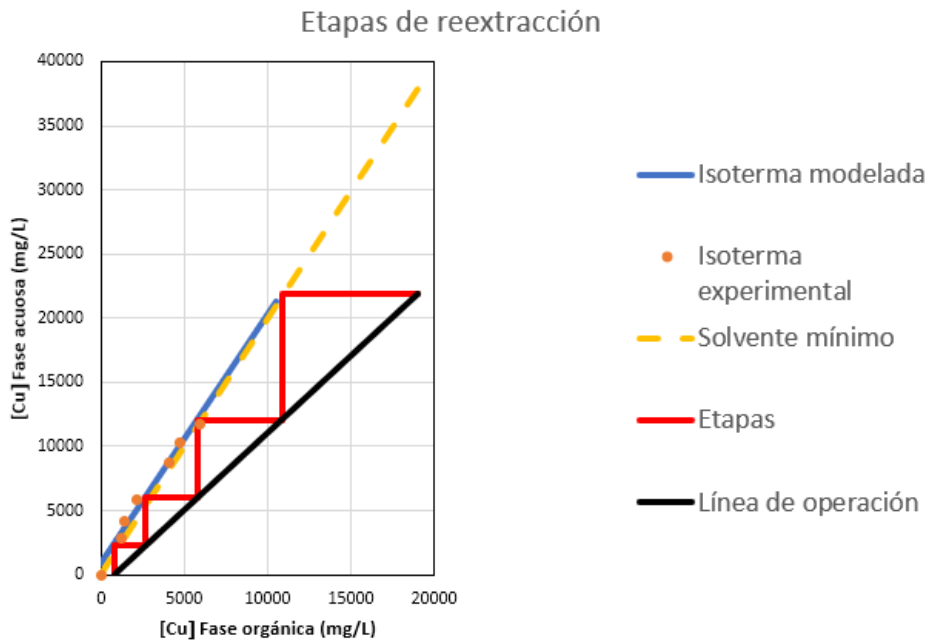


**Figura 19.-** Etapas de reextracción a relación O/A=4/5;  $X_i = 19035$  mg/L;  $X_f = 400.65$  mg/L; [ACORGA M5774]=30%; pH=2; tiempo= 20 min.



**Figura 20.-** Etapas de reextracción a relación O/A= 1;  $X_i = 19035$  mg/L;  $X_f = 958$  mg/L; [ACORGA M5774]=30%; pH=2; tiempo= 20 min.





**Figura 21.-** Etapas de reextracción a relación O/A= 1.2;  $X_i= 19035$  mg/L;  $X_f= 762$  mg/L; [ACORGA M5774] = 30%; pH=2; tiempo= 20 min.

En la tabla 11 se muestran los resultados obtenidos a diferentes relaciones de O/A y el porcentaje de extracción logrado a distinto número de etapas.

**Tabla 11.** Porcentaje de extracción a distintas relaciones de O/A.

O/A	Etapas	$X_n$	$Y_1$	%
1/2	2	552.7	9241.15	97.10
2/3	3	104.17	12620.55	99.45
2/3	2	1143.8	11927.46	93.99
4/5	3	400.65	14907.48	97.90
1	3	958.0	18077	94.96
1.2	4	762.0	21927.6	96.00

A mayor relación de O/A el cobre se concentra en mayor cantidad en la fase acuosa a la salida de la última etapa, la mayor concentración obtenida fue de 21927.6 mg/L a una relación de O/A de 1.2 y un porcentaje de reextracción de 96%. Sin embargo, estos resultados se obtienen con cuatro etapas de reextracción lo que resulta poco conveniente al llevar el proceso a mayores escalas.

## CONCLUSIONES

En este trabajo, se lograron determinar condiciones para la extracción de cobre a partir de residuos de circuitos impresos. Se estudiaron condiciones distintas a las reportadas por la bibliografía y se realizaron nuevas isotermas de extracción y reextracción para estas nuevas condiciones, las cuales fueron: pH de 2 y tiempo de contacto de 20 minutos. Contrario a lo que se esperaba, el tamaño de partícula que permite una mayor concentración del metal en la solución lixiviada es la de mayor tamaño lo cual es notorio desde la coloración azul final de la solución. En general, los resultados muestran la alta eficiencia del proceso para la extracción de cobre de los residuos de circuitos impresos bajo ciertas condiciones que se deben controlar cuidadosamente. Si bien este trabajo se llevó a escala de laboratorio puede proporcionar la pauta para una alternativa en el tratamiento de este tipo de residuos y con ello reducir el impacto ambiental.

## AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Enrique Villegas de la empresa Cytec-Solvay Group por el suministro del extractante Acorga M5774 utilizado en esta investigación.

## REFERENCIAS

- Romero Rosinelli, C. T. (2017). *DISEÑO DE PLANTA DE EXTRACCIÓN POR SOLVENTES A ESCALA BANCO COMO PROCESO COMPLEMENTARIO PARA TECNOLOGÍA EWTECH-LED* (Licenciatura). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. [file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/Dise%C3%B1o-de-planta-de-extraccion-por-solventes-a-escala-banco-como-proceso-complementario%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/Dise%C3%B1o-de-planta-de-extraccion-por-solventes-a-escala-banco-como-proceso-complementario%20(1).pdf) Consultado 10-julio 2022.
- Rubio Campos, N. Y., Gamiño Arroyo, Z., Gómez Castro, F. I., Sánchez Cadena, L. E., & Rubio Campos, B. E. (2021). DESARROLLO DE MODELO TERMODINAMICO PARA LA RECUPERACION DE COBRE DE RESIDUOS ELECTRONICOS POR EXTRACCION LIQUIDO-LIQUIDO. *AMIDIQ*.
- Sánchez González, J. C. (2020). *RECUPERACIÓN DE COBRE A PARTIR DE RESIDUOS DE TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS* (Licenciatura). Universidad de Guanajuato. [Tesis Juanita-del-Carmen-Sanchez-Gonzalez.pdf](#)
- Sánchez González, J. d., Gamiño Arroyo, Z., Gómez Castro, F. I., Rubio Campos, B. E., Sánchez Cadena, L. E., & Uribe Ramírez, A. R. (2021). Recuperación hidrometalúrgica de cobre a partir placas de circuitos impresos (PCI) desechadas. *Racam*, 149-159.
- Treybal, R. (2003), Operaciones de Transferencia de Masa. México. Mc.Graw-Hill.