

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE**

**GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y

Materiales

**REDUCCIÓN DE CRUDO GENERADO EN  
EXTRACCIÓN POR SOLVENTES  
DE COBRE**

**TESIS**

Presentada por:

**Bach. ERICK JAVIER DE LA CRUZ TAPIA**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO METALURGISTA**

TACNA – PERÚ

2022

# UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

## Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

### REDUCCIÓN DE CRUDO GENERADO EN EXTRACCIÓN POR SOLVENTES DE COBRE

Tesis sustentada y aprobada el día 19 de agosto de 2022, estando integrado el Jurado Calificador por:

**PRESIDENTE**

  
.....  
Dr. Alberto Savino Pacheco Pacheco

**SECRETARIO**

  
.....  
Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila

**VOCAL**

  
.....  
Mtro. Edgardo Teófilo Valdez Cortijo

**ASESOR**

  
.....  
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

## **DEDICATORIA**

A Dios, a mi esposa Gisenia e hijos Jacko y Samy, más que el motor de mi vida, fueron parte muy importante de lo que hoy puedo presentar como Tesis. Gracias por cada momento vivido, ellos fueron invertidos en el desarrollo de mi carrera y por entender que el éxito demanda sacrificios.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi profunda gratitud a los docentes involucrados en mi formación profesional; a cada uno de ellos, muchas gracias, por su orientación, su entusiasta aliento y sus útiles críticas durante mi etapa de alumno.

Al Dr. Luis Caso Palpa, por sus consejos que reforzaron el desarrollo de la presente tesis; del mismo modo, mi eterno agradecimiento al Ing. Robert Ale, por su admirable paciencia y mentoría.

## CONTENIDO

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>iv</b>
<b>CONTENIDO.....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>x</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xiii</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>2</b>
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.1.1. Antecedentes del problema.....	2
1.1.2. Problemática de la investigación.....	3
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	5
1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	6
1.5. OBJETIVOS.....	6

1.5.1. Objetivo general.....	6
1.5.2. Objetivos específicos .....	6
1.6. HIPÓTESIS.....	7
1.6.1. Hipótesis general .....	7
1.6.2. Hipótesis específicas .....	7
<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....	8
2.2. BASES TEÓRICAS .....	9
2.2.1. Conceptos de extracción por solventes .....	9
2.2.2. Química de extracción por solventes.....	11
2.2.3. Principales variables operativas .....	15
2.2.4. Estudio de reactivos en extracción por solventes .....	20
2.2.5. Formación de la interfase de crudo .....	21
2.2.6. Tratamiento de crudo.....	25
2.2.7. Variador de frecuencia o velocidad.....	28
2.2.8. Diseños factoriales $2^k$ con puntos al centro .....	30
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS .....	32

<b>CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>35</b>
3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	35
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	35
3.2.1. Muestreo de soluciones.....	35
3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....	36
3.3.1. Variables independientes.....	36
3.3.2. Variable dependiente.....	36
3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS .....	37
3.4.1. Preparación de plantilla para el diseño experimental .....	37
3.4.2. Matriz de prueba.....	38
3.4.3. Cálculos preliminares.....	38
3.4.4. Materiales e instrumentos.....	40
3.5. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	41
<b>CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>42</b>
4.1. RESULTADOS .....	42
4.1.1. Transferencia de cobre en re-extracción en planta.....	42

4.1.2. Transferencia de cobre en función de la agitación .....	47
4.1.3. Generación de crudo .....	54
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	73
4.2.1. Disminución de la agitación .....	73
4.2.2. Reducción de crudo generado.....	74
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>75</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>76</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>81</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Descripción de caudales y agitación.....	4
<b>Tabla 2</b>	Operacionalización de variables .....	36
<b>Tabla 3</b>	Descripción de niveles .....	37
<b>Tabla 4</b>	Esquema DOE utilizado .....	38
<b>Tabla 5</b>	Volumen de soluciones a contactar .....	39
<b>Tabla 6</b>	Adición de sólidos al orgánico de prueba .....	40
<b>Tabla 7</b>	Data mensual de cobre en electrolitos.....	42
<b>Tabla 8</b>	Resumen de estadísticos obtenidos .....	47
<b>Tabla 9</b>	Matriz de transferencia de cobre.....	48
<b>Tabla 10</b>	Cálculo de volumen del cajón mezclador.....	49
<b>Tabla 11</b>	Cálculo del tiempo de residencia del cajón mezclador .....	49
<b>Tabla 12</b>	Resumen de resultados en transferencia de cobre.....	50
<b>Tabla 13</b>	Matriz de evaluación para generación de crudo .....	54
<b>Tabla 14</b>	Medición de alturas.....	58
<b>Tabla 15</b>	Resumen de medias .....	59
<b>Tabla 16</b>	Matriz de datos DOE.....	60
<b>Tabla 17</b>	Crudo e incremento de ley vs. agitación .....	66
<b>Tabla 18</b>	Resumen de simulaciones.....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Diagrama de flujo típico en SX.....	15
<b>Figura 2</b>	Tanque mezclador.....	26
<b>Figura 3</b>	Separador de fases Tricanter .....	27
<b>Figura 4</b>	Esquema VFD.....	30
<b>Figura 5</b>	Representación geométrica del diseño $2^2$ con tres puntos centrales.....	32
<b>Figura 6</b>	Test de normalidad a electrolito pobre mensual.....	44
<b>Figura 7</b>	Test de normalidad a electrolito rico mensual .....	45
<b>Figura 8</b>	Test de normalidad de incremento de cobre mensual.....	46
<b>Figura 9</b>	Test normalidad de transferencia de cobre .....	51
<b>Figura 10</b>	Test ANOVA en variación de agitación .....	52
<b>Figura 11</b>	Incremento de cobre con respecto a la agitación .....	53
<b>Figura 12</b>	Reactor con regleta de referencia .....	56
<b>Figura 13</b>	Seteo de escala en ImageJ.....	56
<b>Figura 14</b>	Medición de altura de crudo en ImageJ .....	57
<b>Figura 15</b>	Análisis de significancia .....	61
<b>Figura 16</b>	Efecto de variables para la generación de crudo .....	62
<b>Figura 17</b>	Resumen de estadísticos en los términos de la ecuación .	63

<b>Figura 18</b>	Ecuación para generación de crudo.....	64
<b>Figura 19</b>	Determinación de coeficiente de correlación.....	65
<b>Figura 20</b>	Gráfica de contorno crudo, incremento y agitación .....	67
<b>Figura 21</b>	Niveles de crudo y agitación para transferencia mínima ..	68
<b>Figura 22</b>	Optimización de agitación .....	69
<b>Figura 23</b>	Predicción de respuesta múltiple.....	70
<b>Figura 24</b>	Comparación en porcentaje de disminución de crudo.....	72

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación trata sobre el estudio de la agitación como variable principal para la generación de crudo en una planta de extracción por solventes de cobre, ubicada en la región sur del Perú. Se determinó a la agitación como la variable con mayor significancia estadística para la generación de crudo por encima de los sólidos en suspensión presentes en la fase orgánica, también, se evaluó el impacto de reducir la agitación en la transferencia de cobre hacia el electrolito rico en la etapa de re-extracción. Respecto a los parámetros adecuados para la atenuación en la generación de crudo, se determinó decrecimiento de hasta 28,73% con respecto a los parámetros actuales utilizados en planta, al disminuir la agitación hasta un valor crítico de 45 RPM sin que obtenga valores menores de transferencia de cobre en re-extracción.

**Palabras clave:** Crudo, PLS, electrolito rico, electrolito pobre, orgánico cargado, extracción por solventes, emulsión, extractante, variadores de velocidad.

## **ABSTRACT**

This research work is about the study of the main variable for the generation of copper solvent extraction plant's crude emulsion, it was determined that agitation as the variable with the highest statistical significance for the generation of crude emulsion above the suspended solids present in the organic phase, also was abording the impact of decrease the agitation on the transfer of copper to the rich electrolyte in the re-extraction stage. Regarding the appropriate parameters for the reduction of crude emulsion, reductions of up to 29% were determined with respect to the current parameters used in the plant, reducing the agitation to a critical value of 45 RPM without obtaining lower values of copper transfer in re-extraction.

**Keywords:** Crude, PLS, advance electrolyte, spent electrolyte, loaded organic, solvent extraction, emulsion, extractant, variable frequency drive.

## INTRODUCCIÓN

La presente Tesis tiene como objetivo atenuar la generación de crudo presentando una alternativa sencilla en términos operativos, se pretende demostrar que disminuyendo la agitación durante la etapa de mezclado se generará menor cantidad de crudo.

El desarrollo del trabajo se ha integrado en cuatro capítulos. Es así que, en el I capítulo, se aborda el planteamiento del problema, en tanto que, en el capítulo II, en base a la revisión bibliográfica, trata sobre el fundamento teórico que permite dar el sustento científico necesario para el desarrollo de la presente investigación.

En el III capítulo se detalla el marco metodológico, donde se precisa el diseño y metodología de la investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos para la recolección de datos, así como el análisis y procesamiento de datos.

Mientras que en el capítulo IV, se detallan los resultados, obtenidos del desarrollo experimental, finalmente las conclusiones y recomendaciones.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

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

El funcionamiento adecuado de la Etapa de Extracción por Solventes es determinado por la capacidad de extracción y despojamiento del elemento de interés del reactivo orgánico, esta capacidad se ve disminuida por sustancias que van degradándolo. Esta degradación promueve la generación de emulsión, denominado “crudo” por su traducción en inglés crude, dentro del proceso de extracción por solventes; la generación de esta sustancia supone, la disminución de inventario de orgánico en el sistema, a su vez, por el alto contenido de Fe y Mn inmersos en el crudo, este debe ser retirado del sistema para evitar los efectos corrosivos sobre las planchas de acero inoxidable y ánodos de plomo usados en el proceso de electro-obtención, así como la disminución de eficiencia de corriente en la electrodeposición de cobre.

Una vez retirado de la etapa de extracción por solventes, el crudo debe ser tratado para recuperar el orgánico contenido en esta emulsión, actualmente, existe dos procedimientos usados en la planta en mención para el rompimiento del crudo; la primera, se basa en el rompimiento mecánico por

efecto de coalescencia usando “agitación mecánica” y adición de fase orgánica; el segundo, se basa en la separación de las fases usando la fuerza centrífuga. Ambos cumplen el objetivo de recuperar la solución orgánica contenida, la experiencia operativa ha demostrado al segundo procedimiento como el más eficiente; sin embargo, ambos presentan desventajas sobre todo en la parte de generación de residuos y en el consumo energético.

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

A fin de concentrar y purificar la solución de cobre proveniente de lixiviación PLS (Pregnant Leach Solution), en el proceso de extracción por solventes se utiliza dos etapas de extracción (E1 y E2) y una etapa de re-extracción (S1); la configuración mostrada en la Figura 1 es adoptada en la mayoría de los procesos de extracción por solventes.

La Tabla 1 muestra que a pesar de que en las tres etapas existe diferencia en los caudales de ingreso, las tres etapas utilizan el mismo tipo de motor y el mismo nivel de agitación durante el mezclado de las fases o soluciones.

**Tabla 1**

*Descripción de caudales y agitación*

Etapa	Caudal de orgánico	Caudal de acuoso	Agitación
	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h	RPM
E1	900	900	60
E2	900	1300	60
S1	900	300	60

*Nota:* Parámetros habituales de planta en evaluación

A partir de esta premisa, se plantea demostrar que “la sobre-agitación” en la etapa de re-extracción (S1), es el principal factor en la generación de crudo, al mismo tiempo se asegurará la transferencia de cobre hacia el electrolito rico al variar adecuadamente el nivel de agitación.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

Según la problemática antes referida, se plantea la siguiente interrogante:

¿De qué forma se puede disminuir la generación de crudo en el proceso de extracción por solventes?

Las plantas de extracción por solventes al igual que cualquier otra industria, requieren de constantes innovaciones en sus operaciones de esta manera se asegura la optimización de sus procesos.

Basado en esta deducción, una alternativa es la instalación de variadores de frecuencia en los motores de agitación que se encuentran actualmente en operación, a fin de garantizar adecuadamente la agitación de mezclado, entendiendo que este parámetro es vital para la transferencia iónica durante la mezcla de fases; por otra parte, el nivel de agitación debe ser el adecuado para la generación mínima de crudo; se demostrará a la agitación como principal variable en la generación de crudo.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Es importante el desarrollo de la presente investigación al brindar la oportunidad de optimizar el proceso de mezclado en la etapa de re-extracción, de esta manera, la energía necesaria para la mezcla de fases estaría más enfocada en la transferencia iónica y menos en la generación de crudo que es un producto inherente de esta etapa, repercutiendo finalmente en la disminución de costos operativos al tratar una menor cantidad de crudo. En ese sentido, se pretende aportar a la industria hidro-metalúrgica con este nuevo enfoque.

Se plantea preliminarmente pruebas a nivel laboratorio del tipo batch; esta investigación está orientada a demostrar a la agitación como la principal variable y su posterior control a fin de generar la menor cantidad de crudo.

#### **1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES**

Esta investigación es desarrollada en los laboratorios de una planta de extracción de solventes de cobre ubicada al sur de Perú.

Las limitaciones están sujetas a la reproducibilidad de todos los factores de campo en las pruebas de laboratorio, si bien es cierto, que no se puede replicar lo mencionado, las pruebas a nivel de laboratorio desarrolladas de forma adecuada, brindarán preliminarmente oportunidades de mejor entendimiento en los parámetros con significancia estadística para la generación de crudo.

#### **1.5. OBJETIVOS**

##### **1.5.1. Objetivo general**

- Demostrar a la agitación como variable con mayor relevancia en la generación de crudo.

##### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Estimar el rango de agitación más adecuado a fin de generar la menor cantidad de crudo.
- Estimar los porcentajes de crudo disminuido.

## **1.6. HIPÓTESIS**

### **1.6.1. Hipótesis general**

- Aplicando solo la agitación de mezclado necesaria para la transferencia iónica es posible disminuir la tasa de formación de crudo en re-extracción.

### **1.6.2. Hipótesis específicas**

- Existe una relación significativa entre la velocidad de agitación y la cantidad de crudo generado.
- La cantidad de crudo generado al disminuir la agitación es significativa.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO**

Durante el ciclo de lixiviación, cantidades significativas de sílice son transferidas desde el mineral hacia el PLS en medio ácido, un estudio sobre los efectos de mitigación de sílice en extracción por solventes de cobre, realizado por la Universidad de Pretoria en Sudáfrica (Sole et al., 2018) sostiene que, cantidades significativas de sílice en la alimentación de PLS al circuito de extracción por solvente da lugar a problemas operativos considerables, incluyendo formación severa de crudo, dificultades para mantener la continuidad de la fase orgánica, alto arrastre acuoso-en-orgánico y transferencia de impurezas al circuito electro-obtención.

El estudio realizado sobre la caracterización y los orígenes de las sustancias en interfase (crudo) en un circuito de extracción por solventes de renio de una fundición de cobre (Zagorodnyaya et al., 2010), sostiene que hay una fuerte razón para considerar que el proceso de formación de sustancias en interfase es función de muchas variables y en cada caso en particular; esto quiere decir, que cada proceso tiene características específicas, asociadas principalmente a las características propias de cada PLS, reactivo orgánico

utilizado y condiciones medio-ambientales; por lo tanto, corresponde un estudio en particular para cada proceso.

En la publicación de CYTEC sobre la formación de crudo y como tratarlo, se hace referencia al impacto del crudo en las plantas de extracción por solventes de cobre, se afirma que la formación de cantidades promedio de crudo dificulta la habilidad de las plantas para reducir costos de operación, que incluso en casos donde no hay formación excesiva de crudo este puede impactar directamente en la producción de cobre (CYTEC, 2006).

## **2.2. BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1. Conceptos de extracción por solventes**

El proceso de extracción por solventes, conocido por sus siglas en inglés “SX extraction solvents”, consiste en mezclar una solución orgánica y una solución acuosa proveniente de lixiviación a fin de extraer de forma selectiva el contenido metálico de interés en forma de iones (intercambio iónico); este proceso hidrometalúrgico tiene un amplio campo de desarrollo principalmente en la producción de cobre y uranio (Uceda, 2016).

La extracción con solventes (SX) purifica y mejora la solución de lixiviación cargada (PLS) producida por la operación de lixiviación para generar un electrolito a partir del cual el cátodo de cobre se puede electro-obtener. La

mayoría de los licores de lixiviación, independientemente del proceso de lixiviación por el que se producen, presentan concentraciones de cobre menores a 10 g/L, esto representa un nivel de concentración muy bajo e impuro (ley de hierro < 20 g/L) para la aplicación de electrodeposición directa al ser soluciones con baja conductividad eléctrica, estas concentraciones producirían cátodos de baja calidad, pulverulentos y blandos (Schlesinger et al., 2011).

Otra definición de este proceso hidrometalúrgico sería la extracción de metales de interés desde soluciones de lixiviación para purificarlas y separarlas dejando en ellas las impurezas (Uceda, 2016).

La electro-obtención industrial (EW) necesita electrolitos con alta concentración de cobre, promedios de 45 a 55 g/L a fin de asegurar una alta conductividad eléctrica en estas soluciones. Esta alta concentración de cobre asegura que: (a) los iones  $\text{Cu}^{2+}$  estén siempre disponibles para el recubrimiento en la superficie del cátodo a densidades de corriente que permiten tasas económicas de recubrimiento, siendo rápidamente renovado por transferencia de masa, y (b) proporciona un cátodo de cobre de alta densidad y pureza fácilmente comercializable. La alta conductividad del

electrolito es proporcionada por una alta concentración de ácido, típicamente 175-190 g/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Schlesinger et al., 2011).

Se denomina extracción por solventes al proceso donde ocurre la transferencia de cobre a soluciones concentradas y purificadas de sulfato de cobre, conocidos como electrolito rico, a partir de la transferencia selectiva de este metal desde soluciones de lixiviación mediante un solvente orgánico (Universidad de Atacama, 2021).

Este proceso proporciona los medios para producir electrolitos de Cu puros y concentrados a partir de soluciones de lixiviación diluidas e impuras. La tecnología combinada de SX-EW continúa creciendo en importancia a medida que se produce más cobre por lixiviación y se tratan materiales de menor ley para recuperar cobre (Schlesinger et al., 2011).

### **2.2.2. Química de extracción por solventes**

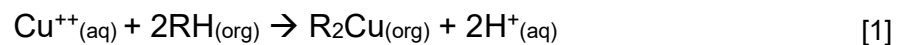
Afortunadamente para el metalúrgico, la química básica para la extracción por solventes de cobre es resumido por una ecuación simple que necesita ser invertida dependiendo de si se describe la etapa de extracción o re-extracción (Jergensen, 1999).

### a. Extracción

La extracción de cobre, ocurre cuando la solución de lixiviación que contiene cobre se mezcla con una solución orgánica depurada que contiene el extractante. El extractante libera sus protones y se coordina con el cobre para que la cantidad de cobre en la solución acuosa disminuya, el nivel de ácido aumente y el cobre se transfiera a la fase orgánica como el complejo cobre/extractante (Jergensen, 1999).

Se denomina extracción o etapa de carga selectiva de iones metálicos cuando la reacción de extracción se aproxima al equilibrio, es decir cuando las dos fases en mezcla (orgánica y acuosa) dejan de intercambiar carga iónica, es en este momento donde empieza la separación y colección de fases (Uceda, 2016).

Se puede representar lo descrito bajo la siguiente ecuación:



donde:

$\text{Cu}^{++}_{(\text{aq})}$  es cobre en el PLS

$2\text{RH}_{(\text{org})}$  es el extractante, i.e., orgánico descargado

$\text{R}_2\text{Cu}_{(\text{org})}$  es el complejo cobre/extractante, i.e., orgánico cargado

$2H^+_{(aq)}$  es el ácido en el raff

### **b. Re-extracción**

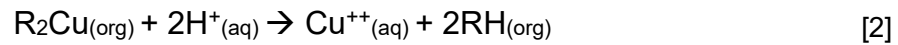
Se entiende por re-extracción a la etapa donde por efecto de alta concentración de ácido, la fase acuosa revierte la reacción de extracción, esto permite despojar el cobre contenido en el orgánico cargado u orgánico de avance para generar electrolito rico, cuya característica principal es la alta concentración y pureza de cobre (Universidad de Atacama, 2021).

En la etapa de re-extracción se da el contacto entre el electrolito pobre o agotado proveniente de EW y el orgánico cargado para generar una solución acuosa donde se extrae la carga iónica del metal denominado electrolito rico, esta alimenta nuevamente a las celdas de electrodeposición, y al mismo tiempo se genera una solución de orgánico descargado, denominado así por el despojamiento de su carga metálica, este es enviado nuevamente hacia extracción (Uceda, 2016).

La separación del cobre ocurre cuando una solución fuertemente ácida, por ejemplo, electrolito pobre de 180 g/L de ácido (acidez promedio de planta en estudio) se mezcla con el complejo de cobre orgánico cargado. El complejo libera su cobre y toma el ácido, de modo que el nivel de cobre en la solución

acuosa (electrolito) aumenta y el nivel de ácido disminuye a medida que el cobre sale de la fase orgánica y es reemplazado por ácido.

Se puede representar lo descrito bajo la siguiente ecuación:



Donde:

$R_2Cu_{(org)}$  es el complejo cobre/extractante, i.e., orgánico cargado

$2H^+_{(aq)}$  es el ácido en el electrolito pobre

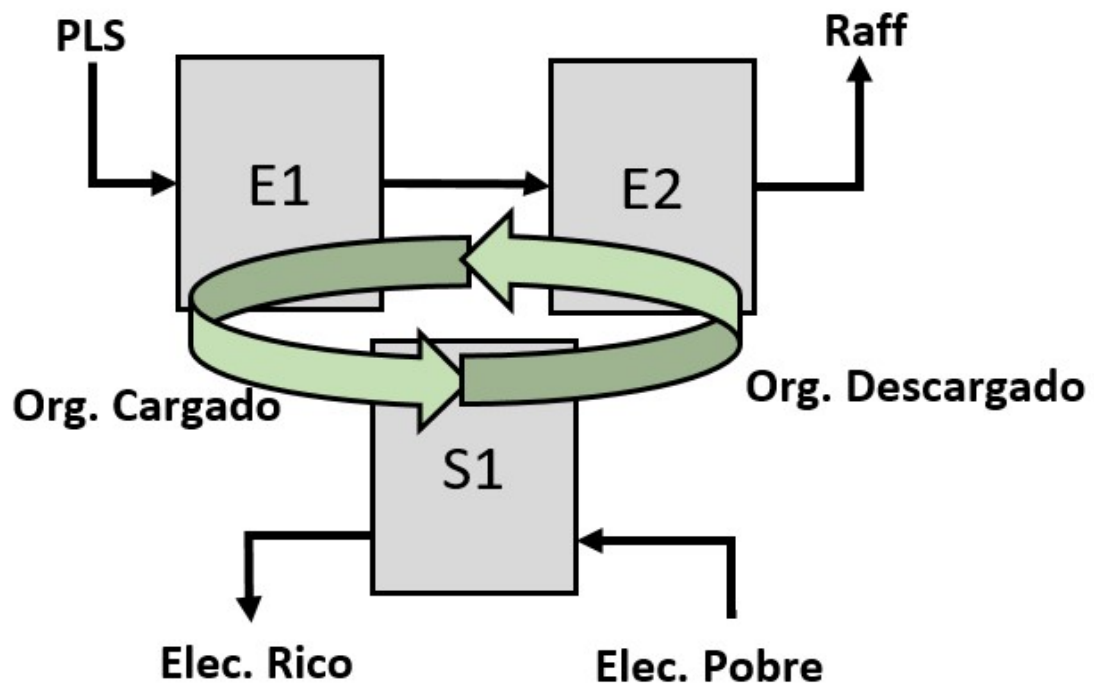
$Cu^{++}_{(aq)}$  es cobre en el electrolito rico

$2RH_{(org)}$  es el extractante regenerado, i.e., orgánico descargado

Un diagrama de flujo SX de cobre típico constará de dos etapas de extracción y una sola etapa de extracción.

**Figura 1**

*Diagrama de Flujo Típico en SX*



*Nota:* Adaptación del esquema de trabajo de planta en evaluación

### **2.2.3. Principales variables operativas**

Se consideró como más influyentes a las siguientes variables de operación:

#### **a. Capacidad máxima del extractante**

Para la determinación de la concentración del extractante presente en la fase orgánica (orgánico de planta) se utiliza el valor de la carga o capacidad máxima del extractante (ClubEnsayos, 2015).

Un rango general de operación está comprendido entre 8 y 25% v/v de extractante. (Cáceres, 2016).

#### **b. Concentración del extractante**

Este parámetro depende propiamente de la concentración del extractante en el diluyente, una mayor concentración asegura una mejor captación del metal de interés, en contraparte una mayor concentración aumenta la viscosidad del orgánico dificultando la separación de las dos fases acuosa y orgánica.

A fin de maximizar la eficiencia de extracción, es decir captar la mayor cantidad de cobre proveniente de lixiviación se opta por aumentar la concentración del reactivo extractante (incremento de la carga máxima), es muy usual, modificar la composición del reactivo a fin de otorgarle propiedades especiales según las exigencias y requisitos operacionales (Navarro & Vargas, 2009).

### **c. pH del PLS**

La experiencia operativa en los circuitos de extracción por solvente de cobre demuestra que a pH cercano a 2 la extracción será mayor, esto es la razón para considerar al pH del PLS como variable de suma importancia.

El descontrol del pH en PLS que se alimenta a SX puede provocar baja eficiencia de extracción por presencia de contaminantes propios del proceso de lixiviación de minerales oxidados, en ese sentido el pH determina la selectividad o preferencia del metal a extraer (Romero, 2017).

### **d. Relación de volumen en mezcladores**

A esta relación de volumen se le denomina relación O/A, es decir, la razón existente entre el volumen de acuoso y el volumen de orgánico; la experiencia operativa demuestra que la extracción disminuye cuando la relación O/A de trabajo es baja.

Las relaciones O/A de trabajo de la planta en evaluación son:

$$E1 \text{ y } E2 = 1/1$$

$$S1 = 2 \text{ a } 3$$

### **e. Tiempo de mezcla**

El tiempo de mezclado influye de manera directamente proporcional en la extracción o re-extracción del ion cobre; es importante, considerar que un

tiempo excesivo de mezcla acarrea problemas de arrastres que son indeseables por generar pérdidas de inventario, principalmente del reactivo orgánico.

Para lograr una extracción eficiente en el mezclador se debe poner en contacto íntimo a las dos fases, de tal manera que, una de las fases se dispersa en forma de gotas en la otra, de esta forma, aumenta el área interfacial considerablemente manteniéndose así el tiempo suficiente para que se lleve a cabo la extracción.

#### **f. Tiempo de separación de fases**

A fin de evitar los arrastres de orgánico y acuoso (pérdidas de inventario) se debe considerar un adecuado tiempo de retención de las fases dentro del sedimentador para alcanzar una adecuada separación.

Es el tiempo necesario que se debe dejar en reposo la mezcla para la separación adecuada de ambas fases. Es deseable separar totalmente las fases para evitar los atrapamientos de orgánico y acuoso. El control periódico de este parámetro permite determinar posibles cambios en la calidad del orgánico (degradación) o presencia de contaminantes (Ayala et al., 2020).

#### **g. Continuidad de fases**

La continuidad de fases en los mezcladores en las etapas: E1 y E2 generalmente corresponden a acuoso continuo, esto permite evitar arrastres de orgánico (atrapamientos de acuoso en el orgánico) ya que la separación de fases es más rápida y, mientras que en la re-extracción es conveniente trabajar en continuidad orgánica.

Para disminuir los atrapamientos de fases y su efecto en las etapas siguientes, se debe determinar correctamente la continuidad con la que se va a operar (Castillo, 2012).

#### **h. Pérdida del extractante**

Al ser un reactivo muy caro, es deseable en cualquier operación de extracción por solventes, minimizar las pérdidas de extractante generadas por arrastre mecánico o físico en la fase acuosa agotada, es decir, en el raff, pudiendo tolerarse atrapamientos de 50 ppm de orgánico.

#### **i. Atrapamientos de acuoso**

El control adecuado de arrastre de acuoso en el orgánico cargado evita el incremento de impurezas en el electrolito rico, de esta manera, se evita su ingreso a la nave de electrodeposición, podemos señalar al hierro y manganeso, como impurezas más perjudiciales.

## **2.2.4. Estudio de reactivos en extracción por solventes**

### **a. Reactivos extractantes**

Se define cuatro tipos de reactivos: (a) extractantes ácidos; (b) extractantes quelantes ácidos; (c) extractantes básicos; (d) extractantes por solvatación (Uceda, 2016).

El rendimiento de un extractante, independientemente de su clase, a menudo se expresa en términos de ciertos indicadores: (a) Constante de extracción  $K_{ex}$ : Constante de equilibrio para la reacción de extracción; (b) Coeficiente de distribución o extracción  $D_{Mn+}$ : Relación de la concentración de iones metálicos en la fase orgánica a la concentración de iones de metal en la fase acuosa; (c) Separación o factor de selectividad  $S_{M1/M2}$ : Relación de los coeficientes de distribución de dos metales (Uceda, 2016).

El solvente no participa directamente en las reacciones químicas de extracción o re-extracción, de ahí su denominación de solvente inerte; por el contrario, el extractante es considerado como soluto orgánico activo al permitir la transferencia de masa (Sulla, 2013).

Un extractante de cobre exitoso debe reunir los siguientes requisitos: (a) Extraer el cobre del PLS en forma eficiente, de tal manera que, la concentración de cobre en el raff sea la menor posible teniendo como

referencia la concentración promedio del raff obtenida en planta que es de 0,1 g/L; (b) Re-extraer el cobre en forma eficiente, de tal manera que, la concentración de cobre en el electrolito rico sea la mayor posible teniendo como referencia la concentración promedio de planta que es de 35 g/L; (c) Extraer selectivamente el cobre, en especial del hierro, la presencia de este elemento disminuye la eficiencia de corriente en EW; (d) Ser soluble en un diluyente, para que se forme una mezcla homogénea con el extractante; (e) Poseer extracción de cobre y cinética de re-extracción aceptables; es decir, que a mayor tiempo de agitación mayor será la eficiencia de extracción y re-extracción de cobre respectivamente; (f) No absorber ácido sulfúrico, ya que le resta acidez al electrolito pobre y baja la eficiencia de re-extracción; (g) Mantener sus propiedades estables que permitan obtener buenos resultados y trabajar en forma segura (Sulla, 2013).

### **2.2.5. Formación de la interfase de crudo**

#### **a. Generación de crudo**

Cuando los sólidos finos en suspensión, el material coloidal o los precipitados químicos entran en al circuito de extracción por solventes, existe una gran probabilidad de que estos materiales, cuando se mezclen con las

fases orgánica y acuosa, formen un material estable llamado crudo (Jergensen, 1999).

Casi todos los circuitos de SX experimentan un fenómeno conocido como formación de crudo, que es una emulsión sólida estabilizada que se forma a partir de varios contaminantes en el circuito SX.

Estos pueden incluir sólidos en el PLS (sílice coloidal del polvo o de sílice presente en el PLS), vegetación, moho, precipitados de degradación orgánica, constituyentes orgánicos menores e ingreso de aire (Schlesinger et al., 2011).

La formación de esta nueva fase, también conocida como tercera fase o fase intermedia, contiene cantidades variables de orgánico y acuoso propias de cada proceso.

Esta nueva fase generada es estabilizada por cantidades muy pequeñas de los sólidos mencionados (es decir, normalmente menos del 5% en peso). El tipo de crudo formado y sitio específico dónde aparecerá dentro del circuito es difícil de predecir (Jergensen, 1999).

Los diferentes problemas asociados al crudo son:

- Reduce la cantidad efectiva de orgánico disponible para la extracción y re-extracción.

- Se acumulan en el sedimentador y da como resultado la disminución de su capacidad, lo que incurre en el incremento de arrastres.
- Se desplaza a través del circuito y transfiere las impurezas desde la etapa de extracción hasta la etapa de re-extracción, llevando cantidades significativas de PLS que incluyen Fe, Mn y otros componentes del PLS.
- Consecuentemente a lo anterior, se necesitará purgar el electrolito para reducir los niveles de estos contaminantes; esto, incurre en gastos asociados con el mantenimiento de concentración de cobalto, supresores de niebla, concentraciones de ácido, etc.
- Cuando el crudo formado en la etapa de re-extracción pasa hacia las etapas de extracción, genera disminución en la eficiencia de extracción por alteración del pH del medio acuoso.
- En la mayoría de las plantas de extracción por solventes, el crudo es removido a través de bombas de diafragma, esto requiere grandes cantidades de orgánico fresco disponible para reemplazar el volumen de orgánico contenido en el crudo.

Cuando se hacen funcionar mezcladores en continuidad acuosa, la suciedad generada tiende a flotar a través de la fase orgánica debido al aire que entra. En el decantador o sedimentador, la impureza puede luego transferirse al vertedero de orgánico y en la siguiente etapa. Al cambiar el mezclador a continuidad orgánica, la suciedad tiende a compactarse en la interfase acuosa/orgánica en el sedimentador. El crudo generado a partir de sólidos en suspensión generalmente se acumula en las etapas de extracción, mientras que el crudo generado a partir de material coloidal o los precipitados químicos se acumulan en re-extracción (Jergensen, 1999).

#### **b. Control de la generación de crudo**

La formación de crudo podría minimizarse controlando la cantidad de sólidos en el PLS, este tipo de control es muy difícil de dominar por los grandes volúmenes manejados; sin embargo, aumentando el tiempo de residencia en los estanques contenedores de PLS se puede promover la sedimentación natural de las partículas, también es común el uso de floculantes que ayudan a la sedimentación de estas partículas.

La entrada de aire a los mezcladores y el control de entrada de polvo al circuito (mediante techos instalados sobre los mezcladores-sedimentadores),

una cuidadosa selección de extractante y diluyente también puede ser útil para mitigar los efectos perjudiciales del crudo (Schlesinger et al., 2011).

### **2.2.6. Tratamiento de crudo**

#### **a. Rompimiento mecánico**

El procedimiento tradicional para la recuperación de orgánico contenido en el crudo a tratar, es el denominado “Tratamiento o Rompimiento Mecánico” que está basado en el contacto físico entre la emulsión y orgánico fresco por efecto de agitación mecánica.

Este contacto induce a la separación del orgánico contenido en el crudo por efecto de coalescencia, por lo que es conveniente la adición de un volumen considerable de orgánico fresco.

Esta separación se efectúa en tanques de forma cónica, esto facilita la decantación de las fases una vez se haya dado su separación, para ello una vez mezclado las soluciones iniciales por espacio de 1 hora (depende del volumen a tratar) se deja sedimentar por espacio de 2 a 4 horas.

**Figura 2**

*Tanque mezclador*



*Nota:* Fotografía de tanques agitadores de planta en estudio.

### **b. Rompimiento centrífugo**

Se alcanza la separación en las tres fases iniciales de la emulsión basado en la diferencia de densidades; se logra la separación simultánea de los líquidos inmiscibles orgánico y acuoso más una tercera fase sólida la cual es la más pesada de todas las fases (Sulla, 2013).

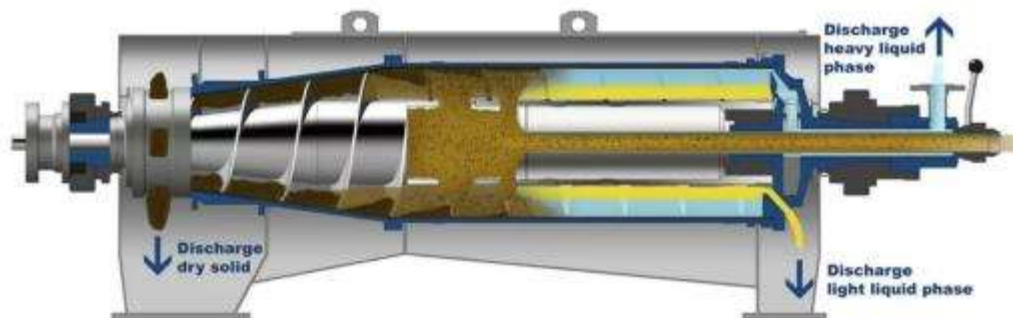
La disposición de las fases separadas se da de acuerdo a su naturaleza, los sólidos deshidratados se retiran para su eliminación o combustión, la fase orgánica se puede volver a utilizar en el proceso SX previo tratamiento con

arcilla y la fase acuosa es descartada hacia la poza de colección de raff (Flottweg, 2022).

El equipo utilizado es denominado Tricanter, este permite alcanzar el más alto grado de pureza de los líquidos en la separación de los componentes del crudo, de manera tal que, no se requieran realizar etapas de separación posteriores, este descarga el líquido más denso a presión mediante un rodamiento ajustable y la fase ligera la descarga por gravedad. La ventaja que ofrece el rodamiento ajustable es que permite ajustar la posición de la zona de separación en la máquina y por consiguiente el grado de separación mientras la máquina está en funcionamiento (Sulla, 2013).

**Figura 3**

*Separador de Fases Tricanter*



*Nota:* Reproducida del esquema de equipo Tricanter, por Flottweg SE, 2022, Flottweg (<https://www.flottweg.com/es/la-gama-de-productos/tricanter/>). De dominio público.

### **2.2.7. Variador de frecuencia o velocidad**

Es el sistema que permite el control de la velocidad rotacional de un motor, denominado VFD por sus siglas en inglés: Variable Frequency Drive, este control de velocidad se da por medio de la variación de la frecuencia de alimentación suministrada al motor (Suarez, 2017).

La ventaja principal en la utilización de un variador de frecuencia, en el arranque y control de motores, corresponde al ahorro de energía, esto permite justificar el costo de adquisición y mantenimiento del equipo; otras ventajas serían: (a) Eliminación de componentes de accionamiento mecánico de altos precios; (b) Aumento de vida del motor; (c) Reducción en el nivel de alteraciones en las líneas de energía; (d) Reducción de riesgo de daños en el motor durante el encendido y el apagado (Motorex, 2017).

Con el control de velocidad en diferentes aplicaciones, un variador de frecuencia permite: (a) Controlar la velocidad de un motor durante todo el proceso de funcionamiento; (b) Eliminar las sacudidas mecánicas y los golpes de ariete durante los arranques y paradas en diferentes tipos de motores y bombas; (c) Integrar su funcionamiento con un PLC a fin de realizar movimientos complejos y secuencias de funcionamiento en función de ciertos parámetros del entorno (Igueren, 2015).

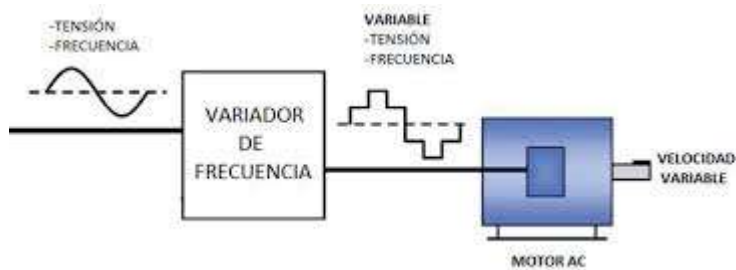
### **a. Composición de los variadores de frecuencia**

Durante la conversión de tensión alterna en continua, se establece la primera etapa denominada rectificadora; en la etapa intermedia la conversión alcanzada en la primera etapa requiere rectificación, así como la eliminación de la mayor cantidad de armónicos mediante filtros. En la siguiente etapa el inversor convierte a la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos, finalmente durante la etapa de control los IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistors) generan los pulsos variables de tensión y frecuencia además controlan los parámetros externos en general (Galindo, 2014).

Los equipos más modernos utilizan IGBT's inteligentes que incorporan un microprocesador con todas las protecciones por sobre corriente, sobretensión, baja tensión, cortocircuitos, puesta a masa del motor, sobre temperaturas, etc. Los variadores utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) y usan en la etapa rectificadora puente de diodos rectificadores. En la etapa intermedia se usan condensadores y bobinas para disminuir las armónicas y mejorar el factor de potencia a través de cálculos matemáticos (Suarez, 2017).

**Figura 4**

*Esquema VFD*



Nota: Reproducida del esquema de equipo VFD, por Opac, Opac ([http://opac.pucv.cl/pucv\\_txt/txt-000/UCC1495\\_01.pdf](http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-000/UCC1495_01.pdf)). De dominio público.

### **2.2.8. Diseños factoriales $2^k$ con puntos al centro**

En un sistema  $2^k$ , la suposición de linealidad en los efectos de los factores cuando se trabaja solo con dos niveles (alto y bajo) en cada factor requiere ser verificada, una forma muy efectiva es replicar ciertos puntos en el diseño factorial  $2^k$ , esto protegerá contra la curvatura (falta de linealidad) además de permitir obtener estimaciones de error de manera independiente (Adidex, 2018).

Se recomienda implementar la combinación del nivel intermedio de los factores conocidos como puntos centrales cuando en un diseño factorial  $2^k$  los  $k$  factores admitan un nivel de prueba intermedio (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

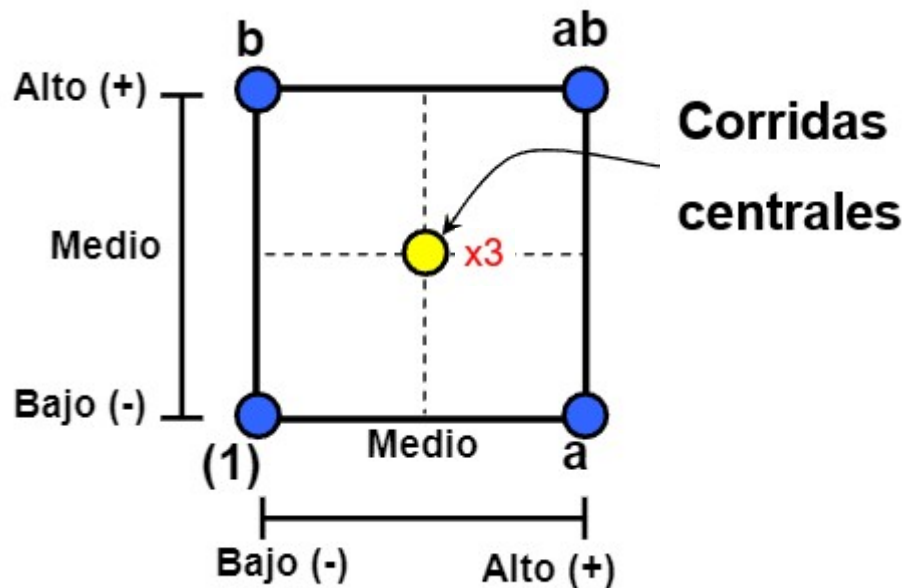
A fin de obtener más grados de libertad que expliquen de forma más adecuada el error en la tabla ANOVA, así como también la posible detección de presencia de curvaturas en alguno de los factores en estudio, es deseable correr el punto central con cierto número de réplicas. La curvatura a la que nos referimos son los efectos cuadráticos  $A^2$ ,  $B^2$ , etc. Una vez detectados estos efectos, el experimento se aumenta con más puntos experimentales para analizar dicha curvatura (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

La Figura 5 ilustra este enfoque, considérese un diseño  $2^k$  donde  $k=2$ ; con una observación en cada uno de los puntos factoriales (bajo, bajo); (alto, bajo); (bajo, alto) y (alto, alto), y tres observaciones en los puntos centrales (0, 0).

**Figura 5**

*Representación geométrica del diseño  $2^2$  con tres puntos centrales*

Nota: Adaptada del diagrama DOE  $2k$  con puntos centrales, por Docplayer,



Nota: 2022, Docplaye (<https://docplayer.es/23931714-Capítulo-6-disenos-factoriales-2-k.html>). De dominio público.

### 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

- **SX:** Siglas de extracción por solventes cuyo objetivo principal es la purificación y concentración del metal de interés mediante el intercambio iónico entre soluciones provenientes de la etapa de lixiviación y el reactivo denominado orgánico que contiene al extractante selectivo según sea el proceso.

- **EW:** Siglas de electrowinning o electrodeposición, el electrolito rico proveniente de la etapa de SX es procesado en esta etapa para la formación de cobre catódico de alta pureza resultado del paso de altas intensidades de corriente a través del electrolito.
- **PLS:** Solución impregnada de cobre que producto de la lixiviación, contiene: cobre, hierro, ácido libre e impurezas, esta solución alimenta de solución acuosa a la etapa de SX para su posterior tratamiento.
- **RAFF:** Solución empobrecida de cobre, que producto del intercambio iónico con el orgánico en la etapa de extracción, contiene valores superiores de acidez en comparación al PLS, esta solución es recirculada hacia las canchas de lixiviación por su contenido de ácido.
- **ORGÁNICO:** Esta solución está conformada por la mezcla líquida de hasta 12% de extractante y el complemento porcentual de diluyente cuya de alta inflamabilidad, es el reactivo más caro dentro del proceso de SX, una correcta operación debe procurar pérdidas mínimas por arrastres hacia las pozas de raff o por efectos de evaporación.
- **ELECTROLITO RICO:** Solución ácida con alta concentración de cobre, valores típicos de cobre se encuentran en el orden 40 a 45 g/L de Cu, esta solución alimenta las celdas de EW después de un paso intermedio de calentamiento y filtrado que minimiza el arrastre de orgánico contenido en esta solución.
- **ELECTROLITO POBRE:** Solución ácida con baja concentración de cobre, valores típicos de cobre se encuentran en el orden 30

a 35 g/L de Cu, esta solución desgastada por el paso de corriente en las celdas de EW es bombeada hacia SX para elevar su concentración de cobre y repetir el proceso.

- **CRUDO:** Es una emulsión estable formada por electrolito, orgánico, aire y finas partículas sólidas, esta emulsión representa una fase intermedia en la separación de fases orgánica y acuosa, aunque su formación es inherente al sistema es posible tratarlo a fin de recuperar el orgánico contenido.
- **VFD:** Se refiere al variador de frecuencia, traducido literalmente como regulador/variador de frecuencia variable. Se puede reducir entre 20 y 70% el consumo energético de un motor ajustando la demanda real de corriente al regular la velocidad del motor variando adecuadamente la frecuencia.
- **DOE:** El diseño de experimentos es definido como una herramienta estadística donde con un número mínimo de pruebas se puede obtener conclusiones con niveles de significancia variables, según sea el contexto de análisis, y que a partir de estas conclusiones se puede optimizar la configuración de un proceso o producto.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

La presente investigación es del tipo Aplicativo-Experimental.

Las pruebas experimentales aplicadas buscan encontrar la variable estadísticamente significativa en la generación de crudo, esto permite buscar el parámetro adecuado a fin de reducir la emulsión sin afectar la transferencia de cobre.

#### **3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA**

Para la presente investigación, la muestra corresponde a volúmenes de 10 litros de electrolito pobre y orgánico cargado, ambas propias de planta en estudio, del mismo modo se toma una muestra representativa de mineral que es depositado en las canchas de lixiviación, este mineral es pulverizado hasta malla 100% -400 para emular el tipo de sólido presente en el crudo, los muestreos mencionados se realizan de acuerdo con el procedimiento de muestreo establecido en planta.

##### **3.2.1. Muestreo de soluciones**

Se realizaron salidas de campo para recolectar muestras de electrolito pobre, orgánico cargado y mineral de lixiviación a fin de obtener una pequeña

cantidad, pero representativas. Las muestras fueron recolectadas y almacenadas en recipientes adecuados para su correcta manipulación.

### 3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

**Tabla 2**

*Operacionalización de variables*

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
Crudo generado	Altura	$\mu\text{m}$
Agitación	Velocidad de mezclado	RPM
Cantidad de Sólidos	Sólidos suspendidos en el orgánico	ppm

Se indica a continuación las variables con las que se realizaron las pruebas metalúrgicas:

#### 3.3.1. Variables independientes

- Velocidad de agitación
- Sólidos en suspensión en el orgánico

#### 3.3.2. Variable dependiente

- Altura de crudo generado

### 3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

#### 3.4.1. Preparación de plantilla para el diseño experimental

Se propone el uso de una matriz basada en un diseño factorial  $2^k$  con tres puntos centrales, a fin de encontrar los variables con significancia estadística, posteriormente, se evaluará los resultados juntamente con los datos obtenidos de transferencia de cobre a fin de encontrar los valores de agitación más adecuados para minimizar la generación de crudo.

Se representa en la Tabla 3 los niveles utilizados para las variables predictoras utilizadas en el diseño experimental:

**Tabla 2**

*Descripción de niveles*

Nivel	SS Orgánico	Agitación
BAJO	1000	30
CENTRAL	1500	45
ALTO	2000	60

En el caso de la variable sólidos en el orgánico, el rango operativo de esta variable en la planta en estudio promedia los 200 ppm, se entiende que por la naturaleza de las pruebas a nivel de laboratorio, el poco volumen de orgánico usado generaría crudo casi imperceptible, motivo por el cual, se optó por estos valores (1000, 1500 y 2000) a fin de que el crudo generado pueda ser lo suficientemente visible para ser medido; en el caso del nivel de agitación,

al corresponder el valor operacional de 60 RPM utilizado en planta para la mezcla de fases tanto en extracción como en re-extracción, se optó para ser considerado como el nivel más alto.

### 3.4.2. Matriz de prueba

En base a lo anterior, el planteamiento del diseño factorial utilizando el software Minitab19 queda de la siguiente manera:

**Tabla 3**

*Esquema DOE utilizado*

TEST	SS ORGÁNICO	AGITACIÓN
	Ppm	RPM
1	1500	45
2	2000	60
3	1000	30
4	1500	45
5	2000	30
6	1000	60
7	1500	45

### 3.4.3. Cálculos preliminares

#### a. Volumen de soluciones de contacto

Para el cálculo de las soluciones de prueba, se toma como referencia la relación O/A operativa en la etapa de re-extracción en la planta en

evaluación; esta relación O/A debe ser escalado a la capacidad del reactor de 0,5 L.

Los flujos calculados quedan detallados en la Tabla 5

**Tabla 4**

*Volumen de soluciones a contactar*

VOLÚMENES DE CONTACTO		
Relación O/A	3	
Volumen del vaso	0.5	L
Orgánico	0,375	L
Electrolito	0,125	L

**b. Adición de sólidos al orgánico de prueba**

La medición efectuada de sólidos a la solución muestreada corresponde a 140 ppm, a partir de este valor calculamos la diferencia a adicionar a cada solución de prueba antes de ser contactada con el electrolito.

El cálculo de las cantidades a adicionar queda detallado en la Tabla 6.

**Tabla 5**

*Adición de sólidos al orgánico de prueba*

N° de prueba	SS			
	Actual	Orgánico	Requerido	Adicionar
	g	Ppm	g	g
1	0,053	1500	0,563	0,510
2	0,053	2000	0,750	0,698
3	0,053	1000	0,375	0,323
4	0,053	1500	0,563	0,510
5	0,053	2000	0,750	0,698
6	0,053	1000	0,375	0,323
7	0,053	1500	0,563	0,510

### **3.4.4. Materiales e instrumentos**

#### **a. Equipos**

- Reactor Pirex
- Agitador de laboratorio
- Balanza analítica
- Laptop o computadora de escritorio
- Cronómetro

#### **b. Materiales**

- Vaso precipitado de 1 L

- Probetas graduadas
- Baldes para coleccionar soluciones muestreadas
- Matraz Erlenmeyer
- Pipetas graduadas

**c. Reactivos**

- Solución orgánico cargado
- Solución electrolito pobre
- Solución valorada de tiosulfato de sodio
- Sal de yoduro de potasio
- Indicador almidón

**3.5. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS**

En el análisis estadístico de la información obtenida de la experimentación, se utilizó los siguientes programas:

- MINITAB 19
- MS EXCEL

Para el procesamiento de las imágenes se utilizó el programa:

- ImageJ

**CAPÍTULO IV**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**4.1. RESULTADOS**

**4.1.1. Transferencia de cobre en re-extracción en planta**

Se detalla en la Tabla 7 el promedio diario de análisis de cobre en los electrolitos pobre y rico, respectivamente, correspondiente al mes en el que se efectuó el muestreo.

**Tabla 6**

*Data mensual de cobre en electrolitos*

Fecha	Electrolito pobre	Electrolito rico	Incremento
	g/L	g/L	g/L
01-nov-21	30,02	36,22	6,20
02-nov-21	30,13	36,62	6,49
03-nov-21	29,85	36,01	6,16
04-nov-21	30,58	36,49	5,91
05-nov-21	31,06	37,64	6,58
06-nov-21	31,62	38,53	6,91
07-nov-21	31,88	38,51	6,63
08-nov-21	32,04	38,89	6,85
09-nov-21	32,68	39,61	6,93
10-nov-21	32,11	39,08	6,96
11-nov-21	32,24	38,99	6,74
12-nov-21	31,86	38,42	6,56

13-nov-21	30,36	36,69	6,32
14-nov-21	29,89	36,45	6,56
15-nov-21	30,77	36,85	6,09
16-nov-21	31,04	37,33	6,29
17-nov-21	31,04	37,33	6,29
18-nov-21	37,58	41,53	3,95
21-nov-21	32,52	39,11	6,59
22-nov-21	31,54	37,74	6,20
23-nov-21	29,86	35,94	6,09
24-nov-21	30,25	36,52	6,27
25-nov-21	30,85	36,92	6,07
26-nov-21	31,54	37,92	6,38
27-nov-21	31,58	38,17	6,59
28-nov-21	31,27	37,65	6,38
29-nov-21	31,41	37,63	6,21
30-nov-21	31,74	37,99	6,25

*Nota:* Data de laboratorio químico de planta en evaluación.

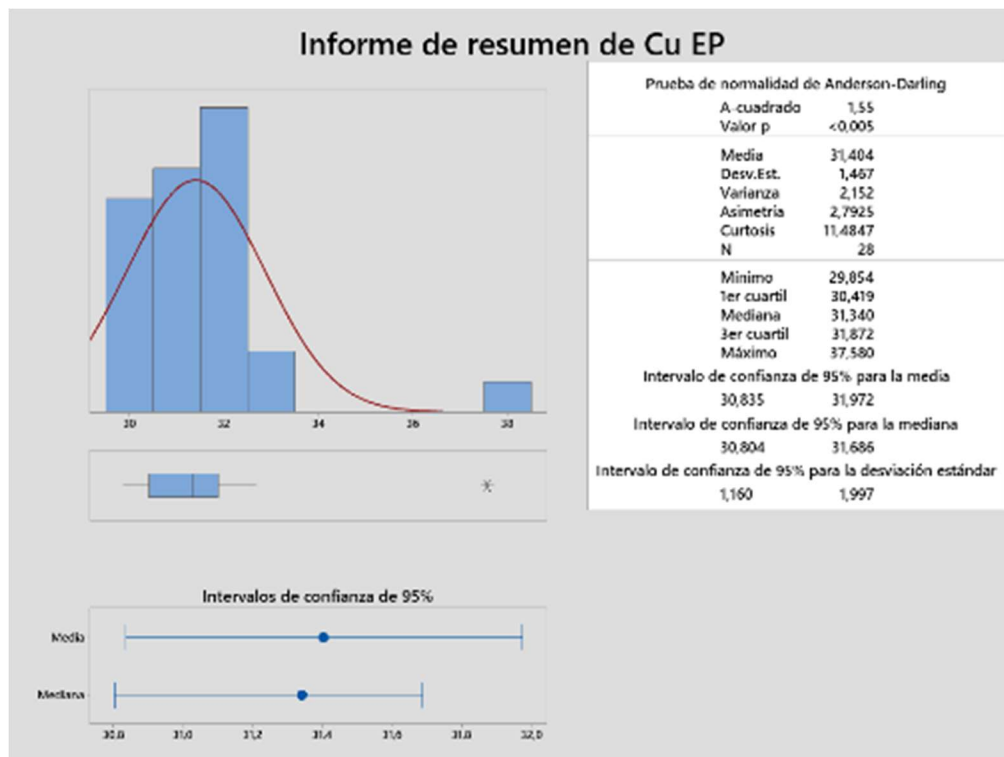
Se calculó el incremento de ley en el electrolito rico a partir de la diferencia de ley de ambos electrolitos; se realiza el análisis estadístico de la tabla anterior con nivel de significancia  $\alpha=0,05$  a fin de utilizar adecuadamente un estadístico representativo de incremento de ley, el cual se usará como elemento comparativo con los resultados obtenidos.

### a. Análisis de leyes de electrolito pobre

Se tomó el valor de la mediana 31,34 g/L como estadístico de comparación debido a que los datos analizados en la figura 6 corresponden a una distribución no-normal sustentado en el valor de  $p < 0,05$ .

**Figura 6**

*Test de normalidad a electrolito pobre mensual*

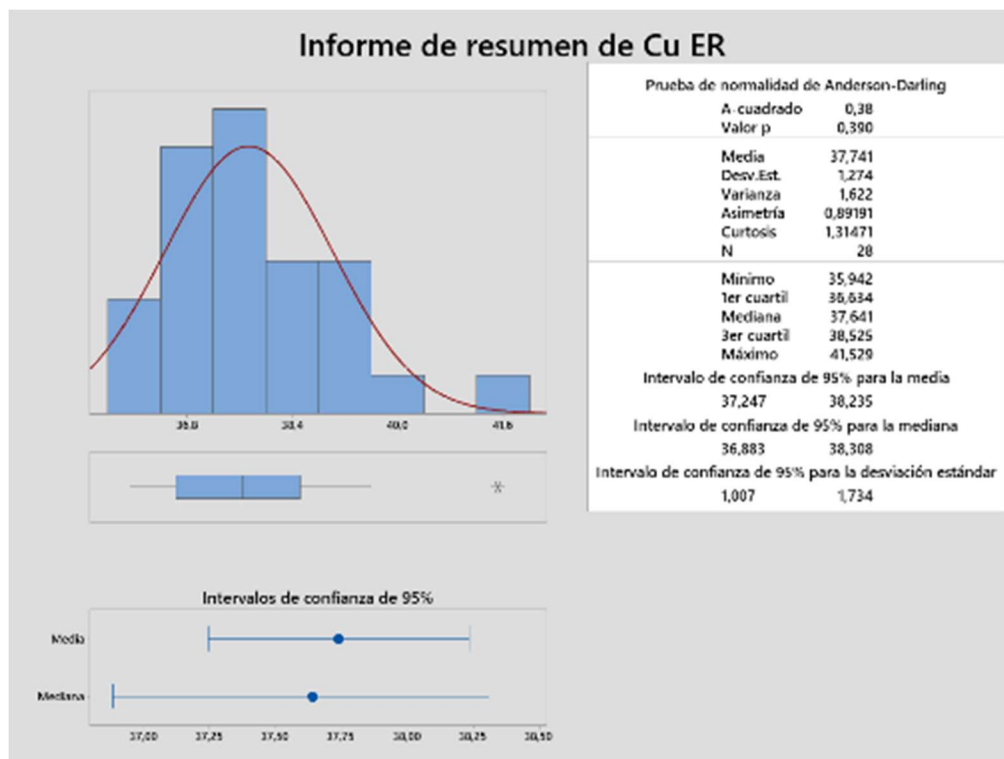


## b. Análisis de leyes de electrolito rico

Se tomó el valor de la media 37,74 g/L como estadístico de comparación debido a que los datos analizados en la Figura 7 corresponden a una distribución normal sustentado en el valor de  $p > 0,05$ .

Figura 7

*Test de normalidad a electrolito rico mensual*

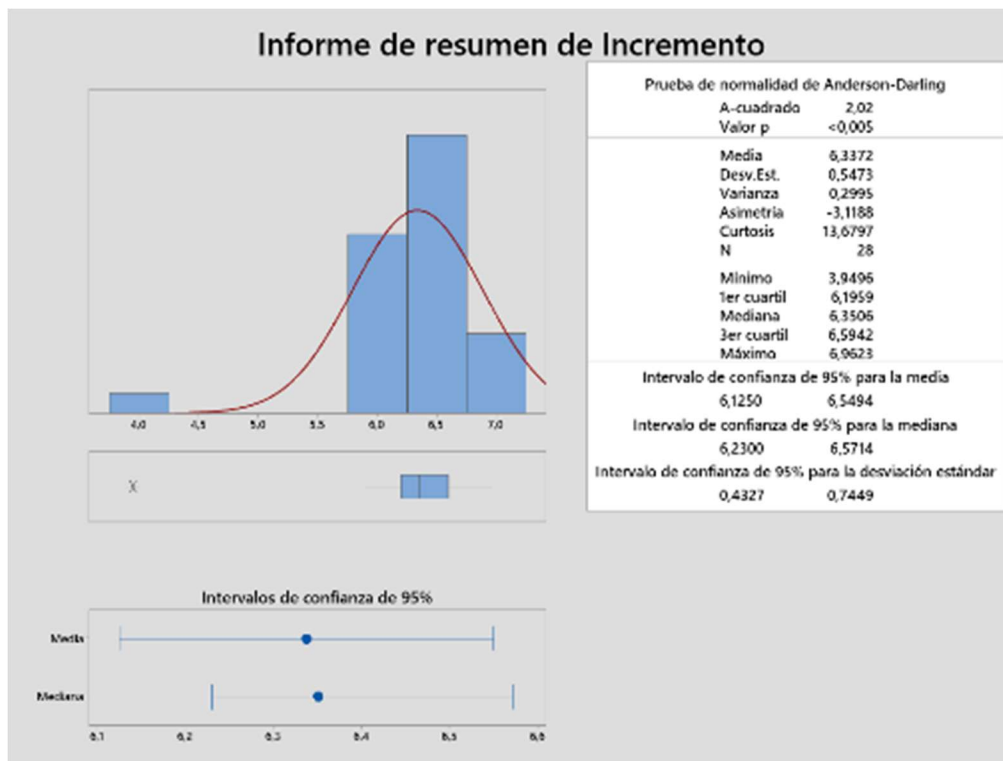


### c. Análisis de Incremento de ley

Se tomó el valor de la mediana 6,35 g/L como estadístico de comparación debido a que los datos analizados en la Figura 8 corresponden a una distribución no normal sustentado en el valor de  $p < 0,05$ .

**Figura 8**

Test de normalidad de incremento de cobre mensual



La Tabla 8 muestra el resumen de los datos obtenidos experimentalmente del incremento de cobre.

**Tabla 7**

*Resumen de estadísticos obtenidos*

Cu Electrolito pobre	Cu Electrolito rico	Cu Incremento
g/L	g/L	g/L
31,34	37,74	6,35

A partir del resumen anterior, se deduce el valor referencial de 6,35 g/L en el incremento de cobre, este valor se establecerá como punto límite en la variación de la agitación para minimizar el crudo generado, entendiendo que valores inferiores afectarían directamente a la transferencia promedio alcanzado en planta.

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio.

#### **4.1.2. Transferencia de cobre en función de la agitación**

La presente investigación pretende reducir la generación de crudo, considerando que en las etapas de extracción y re-extracción, el parámetro más importante es el grado de transferencia del metal de interés, siendo en

este caso el cobre, dicho de otro modo, cualquier variación a implementarse debe hacerse teniendo el menor impacto posible en la eficiencia de re-extracción o en su defecto buscar el menor impacto negativo posible.

Partiendo de esta premisa, se procedió a evaluar el incremento de cobre hacia el electrolito rico bajo el esquema de la tabla 9.

**Tabla 8**

*Matriz de transferencia de cobre*

N° Test	Relación O/A	Tiempo	Agitación
		s	RPM
1	3	105	45
2	3	105	60
3	3	105	30
4	3	105	45
5	3	105	30
6	3	105	60
7	3	105	45

Se utiliza la misma relación O/A de planta debido a que en este estudio no se evalúa la variación de flujos; para el parámetro tiempo, se utilizó el tiempo de residencia del cajón mezclador en la etapa de re-extracción utilizado en planta, el cálculo de su valor corresponde a la relación volumen del

mezclador con respecto a la sumatoria de flujos de alimentación, se resume los datos en las Tablas 10 y 11.

**Tabla 9**

*Cálculo de volumen del cajón mezclador*

DIMENSIONES DEL CAJÓN		
Largo	Ancho	Altura
m	M	M
3,64	3,50	2,75
<b>Volumen</b>	<b>35,03</b>	<b>m<sup>3</sup></b>

*Nota:* Dimensiones del cajón mezclador de planta en evaluación.

**Tabla 10**

*Cálculo del tiempo de residencia del cajón mezclador*

ALIMENTACIÓN DEL CAJÓN		
Orgánico	Electrolito	Recirculación
m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
900	150	150
<b>Tiempo de residencia</b>	<b>105,11</b>	<b>s</b>

*Nota:* Caudales en re-extracción de planta en evaluación.

#### **a. Resultados obtenidos**

Las soluciones son contactadas durante el mismo tiempo antes calculado, se varía la agitación según cada caso.

Los valores obtenidos son resumidos en la siguiente Tabla:

**Tabla 11**

*Resumen de resultados en transferencia de cobre*

N° Test	Agitación	Cobre EP	Cobre ER	Incremento
	RPM	g/L	g/L	g/L
1	<b>45</b>	28,28	33,64	<b>5,36</b>
2	<b>60</b>	28,28	35,43	<b>7,14</b>
3	<b>30</b>	28,28	32,11	<b>3,83</b>
4	<b>45</b>	28,28	33,64	<b>5,36</b>
5	<b>30</b>	28,28	32,00	<b>3,72</b>
6	<b>60</b>	28,28	35,17	<b>6,89</b>
7	<b>45</b>	28,28	33,52	<b>5,24</b>

Como ya se mencionó anteriormente, el análisis de los resultados será en base al nivel de agitación y al incremento de ley de cobre hacia el electrolito rico.

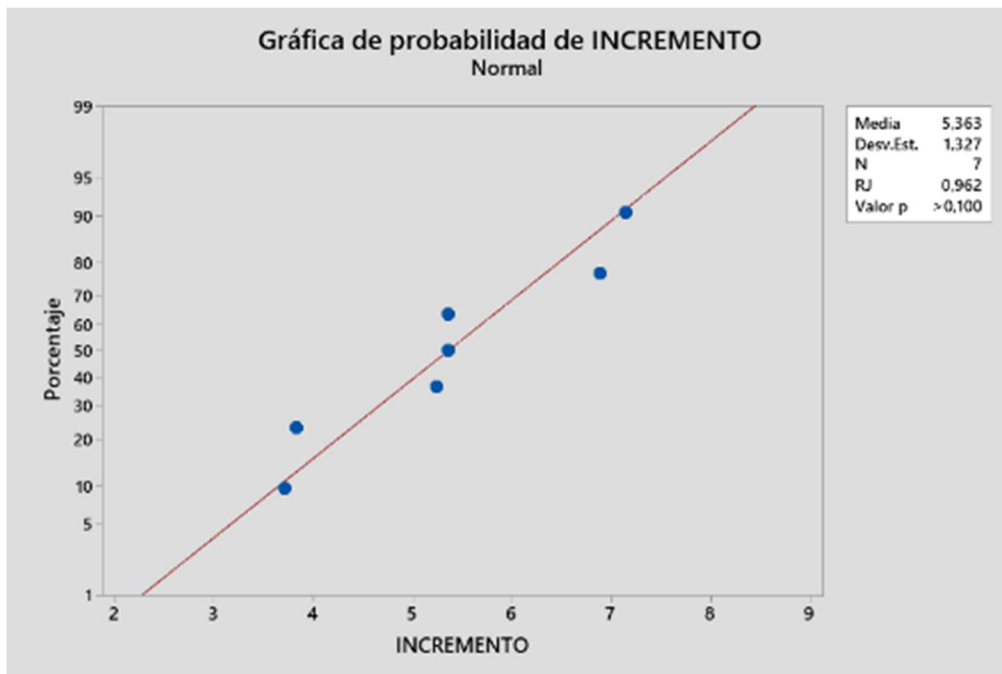
**b. Test de normalidad**

Debido al pequeño número de datos, el método más conveniente para test de normalidad es a través del método Shapiro Wilk con nivel de significancia  $\alpha=0,05$ .

La media representativa del incremento de cobre es 5,36 g/L según el análisis de normalidad de la Figura 9 donde se aprecia el valor  $p > 0,1$  concluyendo que los datos siguen una distribución normal.

**Figura 9**

*Test Normalidad de transferencia de cobre*

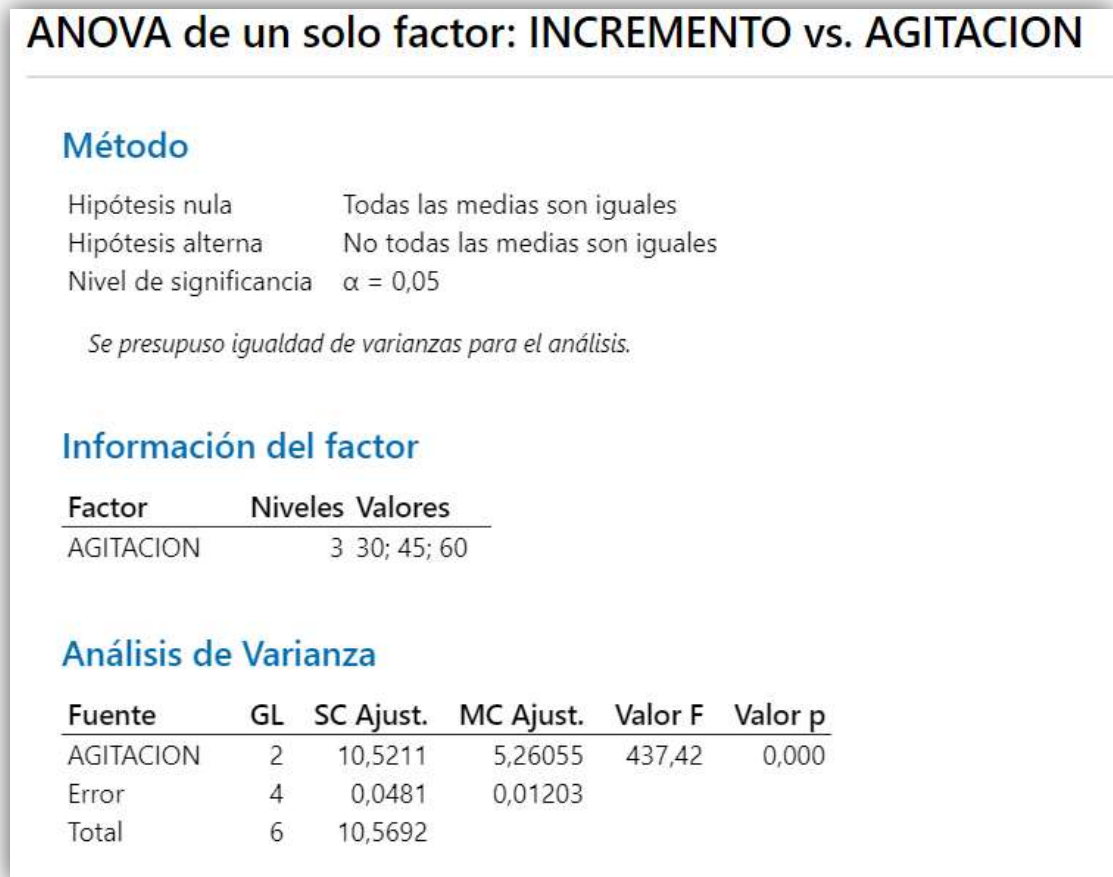


### c. Análisis de varianza

A través del análisis de varianza ANOVA en el software MINITAB19, determinamos si las medias en los tres niveles de agitación tienen diferencias significativas:

**Figura 10**

*Test ANOVA en variación de agitación*

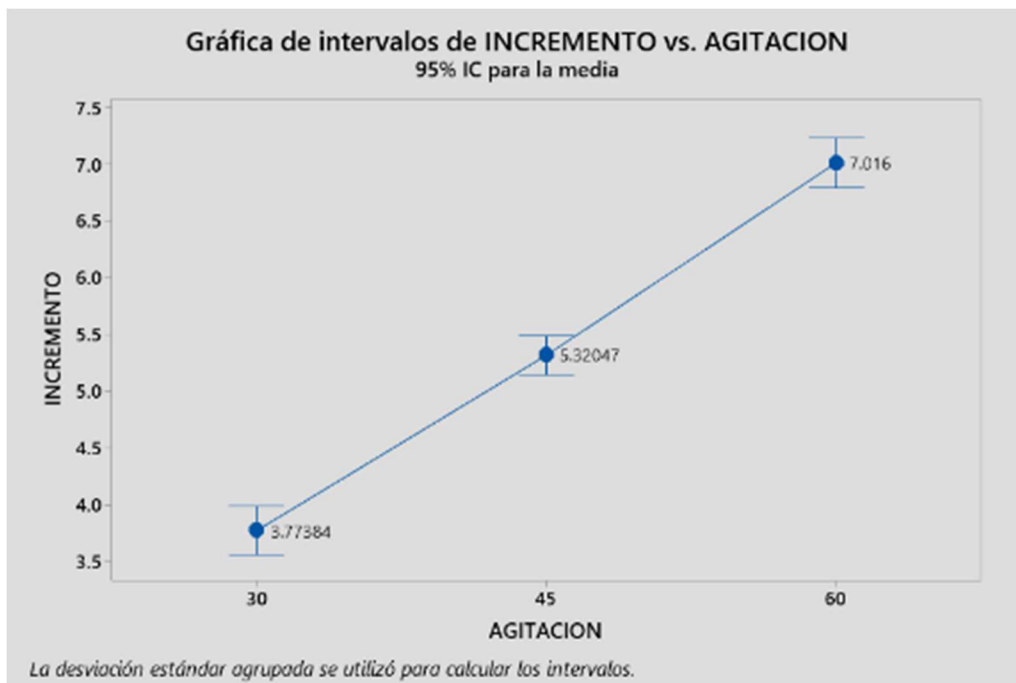


Se determinó que existe diferencia significativa en las medias al variar la agitación según el análisis mostrado en la Figura 10, se sustenta esta afirmación en base al valor de  $p < 0,05$ .

Se aprecia en la Figura 11 que las medias incrementan conforme aumenta la agitación; por tanto, se debe tener en cuenta que el incremento de cobre se verá afectado de forma negativa al bajar considerablemente la agitación.

**Figura 11**

*Incremento de cobre con respecto a la agitación*



### 4.1.3. Generación de crudo

En la evaluación de generación de crudo como variable dependiente, se utilizó el diseño experimental factorial de dos factores con tres puntos centrales apoyado del Software Minitab19.

Se evaluó a las variables independientes, nivel de agitación y sólidos suspendidos en el orgánico, mediante la siguiente matriz:

**Tabla 12**

*Matriz de evaluación para generación de crudo*

Orden Est.	N° Test	Punto Central	Bloques	SS Orgánico	Agitación
6	1	0	1	1500	45
4	2	1	1	2000	60
1	3	1	1	1000	30
7	4	0	1	1500	45
2	5	1	1	2000	30
3	6	1	1	1000	60
5	7	0	1	1500	45

Para la evaluación del crudo obtenido, se procedió a medir las alturas obtenidas en el reactor una vez separada las fases apoyado de fotografías de los niveles obtenidos, estas alturas son difíciles de medir a simple vista. En ese sentido, para la correcta cuantificación de las alturas obtenidas se procedió a digitalizar y analizar cada imagen mediante el software ImageJ, se puede apreciar las fotografías indexadas para cada prueba en el anexo A de este trabajo.

**a. Resultados obtenidos de cada medición:**

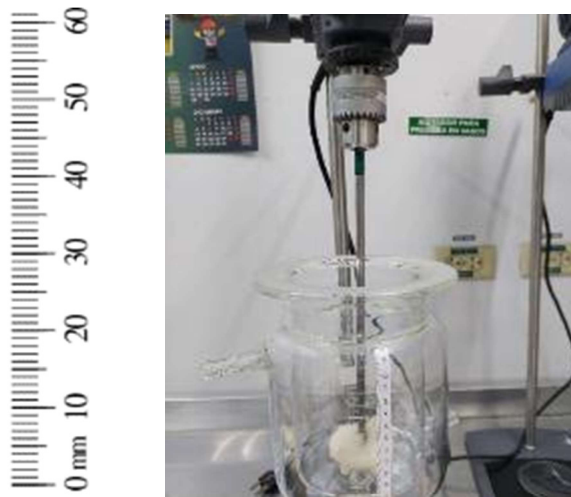
Para proceder a la medición de las imágenes con el software ImageJ, se asignó una escala de medición a fin de que el programa pueda extrapolar las mediciones en base a esta escala, de esta forma las mediciones procesadas por el software son más exactas.

La Figura 12 muestra la escala utilizada, una regleta cuya unidad mínima representa 1 mm, se utilizó esta regleta en el reactor a fin de que sirva como referencia al momento de hacer las mediciones.

La Figura 13 ilustra el seteo de la escala, según esta escala, cada valor de 1 mm equivale a 1000  $\mu\text{m}$ .

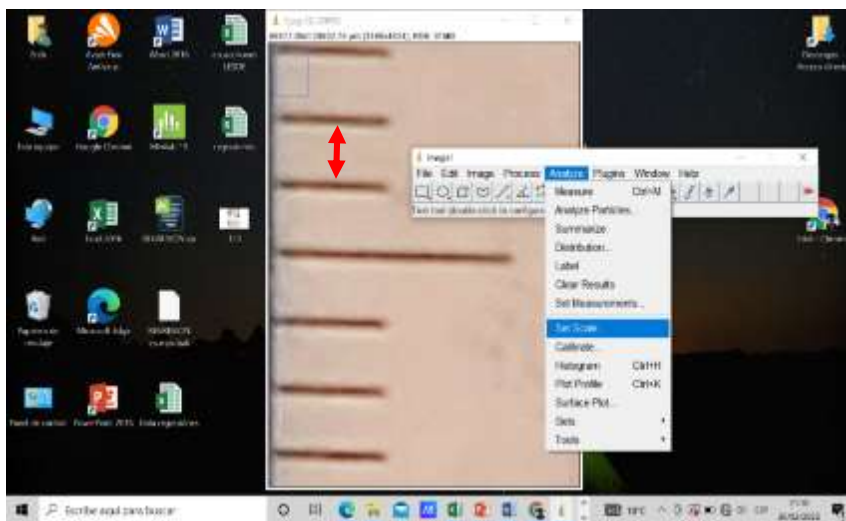
**Figura 12**

*Reactor con regleta de referencia*



**Figura 13**

*Seteo de escala en ImageJ*



A fin de obtener un promedio representativo en todas las mediciones, se tomó diez puntos de medición en cada imagen, la Figura 14 representa la medición efectuada en cada una de las 7 imágenes correspondientes a cada prueba.

**Figura 14**

*Medición de altura de crudo en ImageJ*



## b. Resumen estadístico de mediciones

La Tabla 14 muestra los valores obtenidos en las mediciones de todas las pruebas, a cada uno de los resultados, se le aplicó el test de normalidad correspondiente a fin de determinar el estadístico descriptivo más adecuado.

**Tabla 13**

Medición de alturas

N° medición	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$
1	1223,96	1910,43	910,93	1462,68	1016,67	2060,61	1522,45
2	1253,81	1950,26	910,44	1417,98	1078,34	2030,30	1552,26
3	1238,89	1890,56	865,79	1417,98	1105,38	1939,39	1492,56
4	1238,89	1960,29	835,95	1418,61	1106,08	1939,39	1473,16
5	1268,74	1870,87	835,82	1417,90	1087,09	1969,70	1532,36
6	1209,04	1930,57	880,72	1477,68	1030,82	2060,61	1503,30
7	1254,08	1960,82	850,87	1447,75	1062,32	1969,70	1532,36
8	1223,96	1910,43	835,95	1477,60	1092,10	2030,30	1512,95
9	1253,81	1870,66	865,79	1433,14	1089,95	1969,70	1532,33
10	1238,89	1920,41	880,72	1403,06	1122,97	2030,53	1552,52

Todos los gráficos correspondientes a cada test de normalidad (véase anexo B) presentan distribución normal; en la Tabla 15 se muestra las medias de alturas obtenidos en las diferentes pruebas.

**Tabla 14**

*Resumen de medias*

N° Test	Crudo
	$\mu\text{m}$
1	1240,41
2	1917,53
3	867,30
4	1437,44
5	1079,17
6	2000,02
7	1520,63

### c. Análisis del diseño experimental

La estructura final queda representada en la Tabla 16, esta matriz es utilizada por el software Minitab19 para el análisis del diseño experimental respectivo, en esta Tabla se representa los resultados obtenidos (altura de crudo) en la interacción de los sólidos en el orgánico con la agitación en cada una de las 7 evaluaciones.

**Tabla 15**

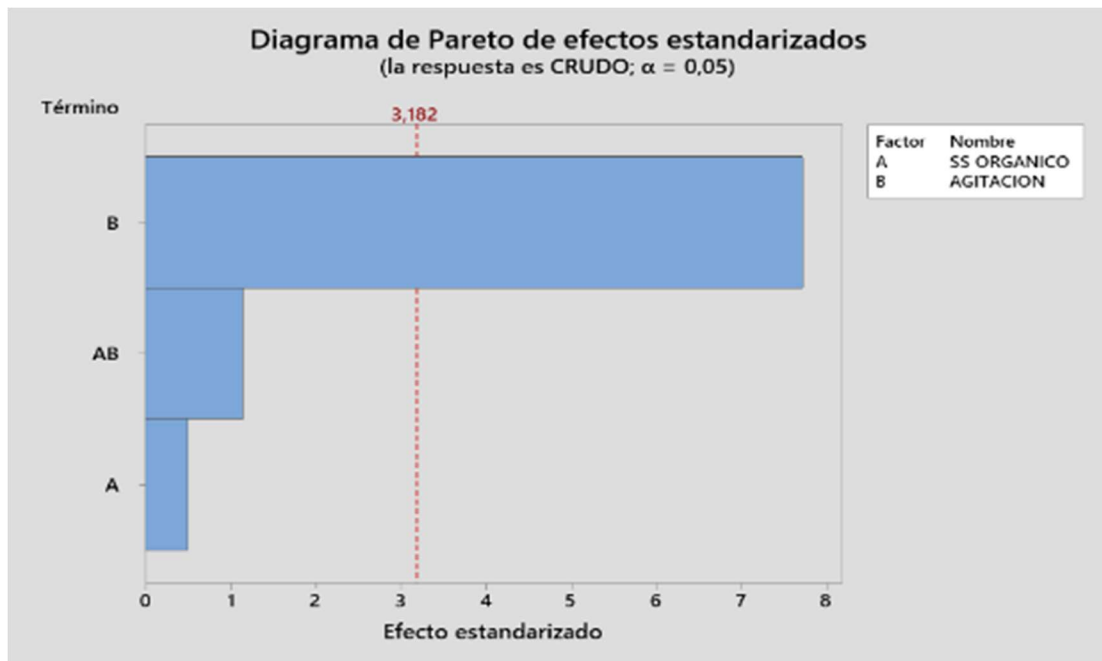
*Matriz de datos DOE*

Orden Corrida	Punto Central	Bloques	SS Orgánico ppm	Agitación RPM	Crudo µm
1	0	1	1500	45	1240,41
2	1	1	2000	60	1917,53
3	1	1	1000	30	867,30
4	0	1	1500	45	1437,44
5	1	1	2000	30	1079,17
6	1	1	1000	60	2000,02
7	0	1	1500	45	1520,63

La Figura 15 representa un diagrama tipo Pareto con nivel de significancia  $\alpha=0,05$  (error tipo 1), se utiliza este diagrama para determinar la variable con mayor significancia en la generación de crudo. Se determinó a la agitación como la variable determinante para la generación de crudo, esto quiere decir que la generación de crudo estará determinada por la variación del nivel de agitación más que por el ingreso de sólidos al sistema.

**Figura 15**

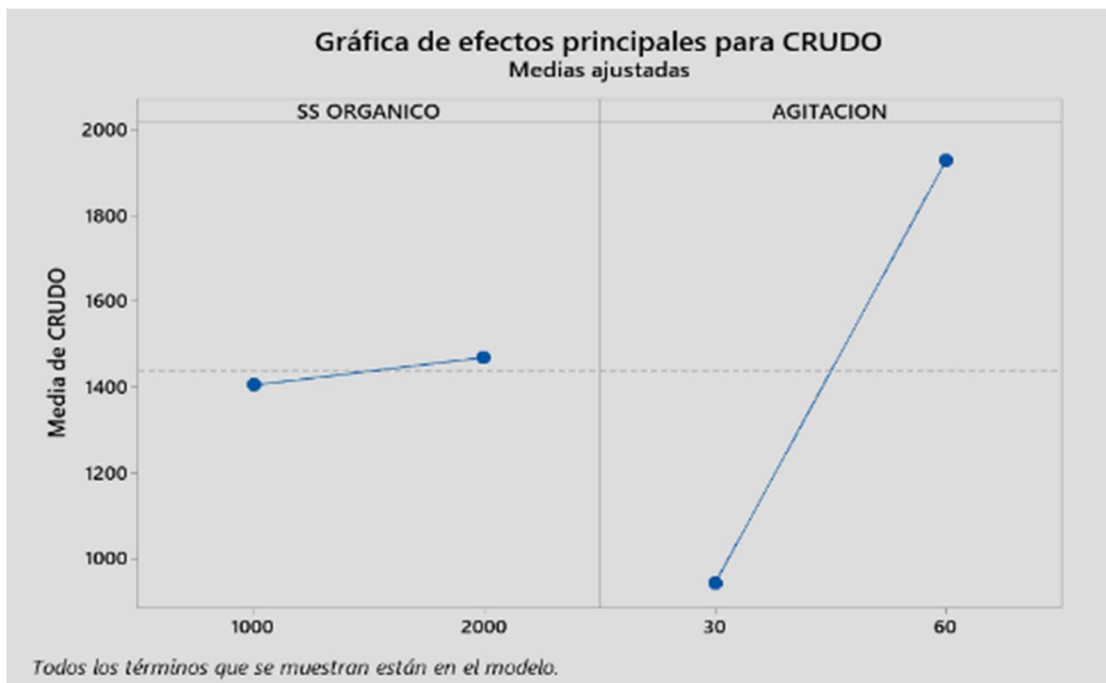
*Análisis de significancia*



La Figura 15 determinó la relevancia del nivel de agitación; sin embargo, no explica la relación directa o inversa que tiene la agitación para generar crudo. La Figura 16 muestra la dependencia marcada que tiene la agitación en comparación a la otra variable para la la generación de crudo.

**Figura 16**

*Efecto de variables para la generación de crudo*



El aumento de nivel para ambas variables causa un efecto directo en la generación de crudo; sin embargo, como ya se mencionó el efecto que tiene la agitación es claramente superior al efecto de sólido en el orgánico.

#### d. Modelamiento matemático

Se determinó el modelo matemático que describe la altura de crudo mediante la interpretación de los siguientes resultados:

**Figura 17**

*Resumen de estadísticos en los términos de la ecuación*

Coeficientes codificados						
Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		1437,5	48,3	29,76	0,000	
SS ORGANICO	64,7	32,3	63,9	0,51	0,648	1,00
AGITACION	985,5	492,8	63,9	7,71	0,005	1,00
SS ORGANICO*AGITACION	-147,2	-73,6	63,9	-1,15	0,333	1,00

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	997140	332380	20,35	0,017
Lineal	2	975477	487738	29,86	0,010
SS ORGANICO	1	4185	4185	0,26	0,648
AGITACION	1	971292	971292	59,46	0,005
Interacciones de 2 términos	1	21663	21663	1,33	0,333
SS ORGANICO*AGITACION	1	21663	21663	1,33	0,333
Error	3	49006	16335		
Curvatura	1	7585	7585	0,37	0,607
Error puro	2	41421	20711		
Total	6	1046146			

Resumen del modelo			
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
127,810	95,32%	90,63%	66,98%

El análisis de los términos de la ecuación en la Figura 17, corrobora lo ya mencionado mediante el diagrama Pareto, se tiene que el término constante de la ecuación y el nivel de agitación son estadísticamente significativos al tener valor p inferiores a 0,05.

Se determinó la siguiente ecuación:

### Figura 18

*Ecuación para generación de crudo*

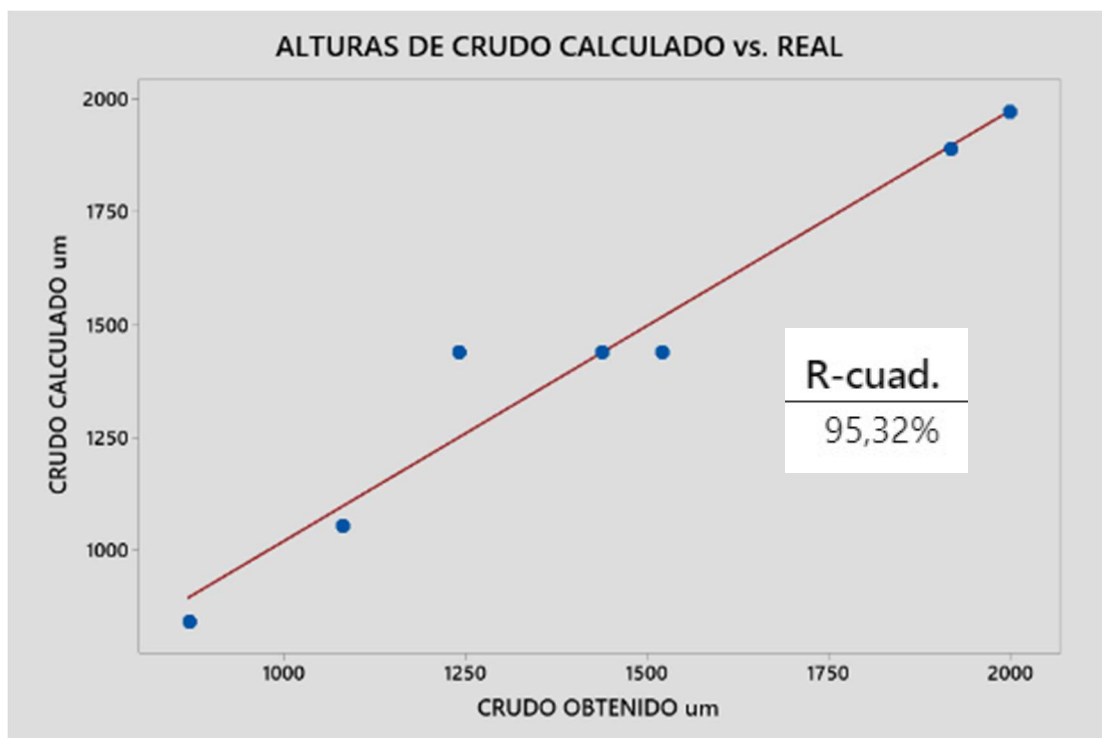
#### Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\text{CRUDO} = -800 + 0,506 \text{ SS ORGANICO} + 47,6 \text{ AGITACION} - 0,00981 \text{ SS ORGANICO*AGITACION}$$

El coeficiente de determinación queda determinado mediante el análisis de la Figura 19 donde se aprecia los valores de predicción frente a los valores obtenidos en cada prueba, se obtuvo un valor de 95,32% de correlación, con este valor podemos afirmar que el modelo propuesto es muy predictivo.

**Figura 19**

*Coeficiente de determinación*



### a. Reducción de crudo variando la agitación

Con la ecuación resultante determinamos un punto óptimo en el nivel de agitación, de tal manera que, nos permita disminuir la generación de crudo con el menor impacto posible en la transferencia de cobre hacia el electrolito rico.

Se determinó los parámetros óptimos a partir del análisis del nivel de agitación frente a la generación de crudo y el grado de incremento de ley en el electrolito (transferencia de cobre), estos valores se representan en la Tabla 17.

**Tabla 16**

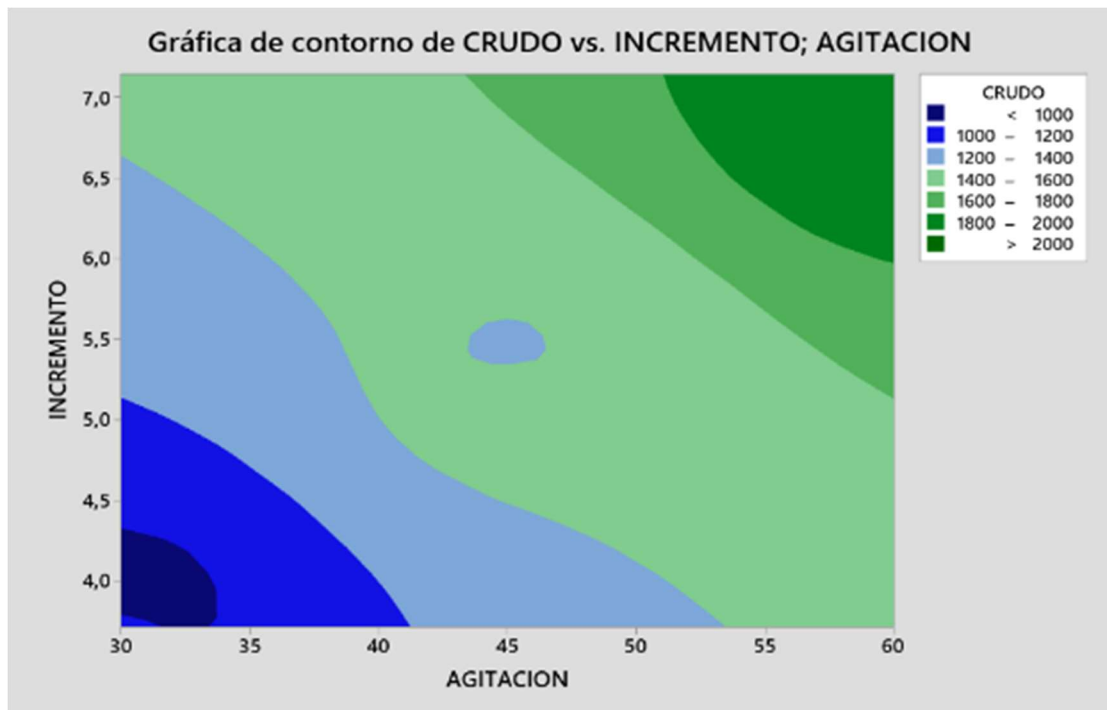
*Crudo e incremento de ley vs. agitación*

Agitación	Crudo	Incremento
RPM	µm	g/L
45	1240,41	5,36
60	1917,53	7,14
30	867,30	3,83
45	1437,44	5,36
30	1079,17	3,72
60	2000,02	6,89
45	1520,63	5,24

Con la interacción de los tres parámetros mostrados en la Tabla 17, se construyó el siguiente gráfico de contornos ilustrado en la Figura 20.

**Figura 20**

*Gráfica de contorno crudo, incremento y agitación*

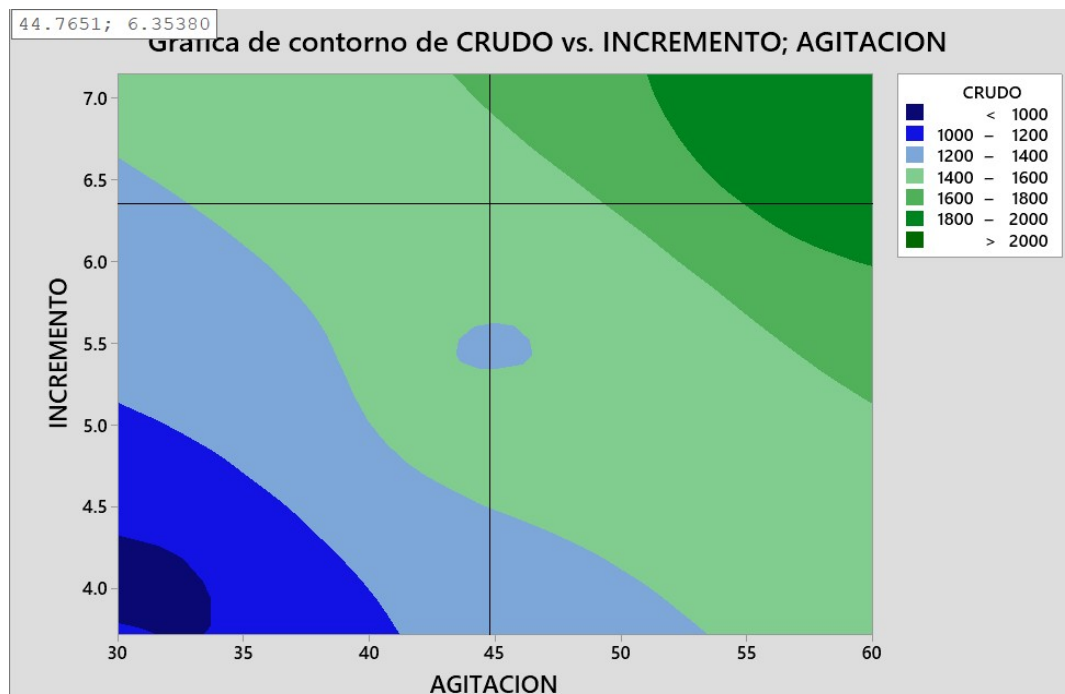


En la Figura 20, la región donde se genera la menor cantidad de crudo está representado por el color azul más oscuro; por el contrario, la zona de mayor generación de crudo queda representada por el color verde más oscuro.

En el análisis de la transferencia de cobre, se determinó como media representativa del incremento de ley en el electrolito rico el valor de 6,35 g/L; este valor será el límite de ley mínima deseable al disminuir el nivel de agitación.

**Figura 21**

*Niveles de crudo y agitación para transferencia mínima*

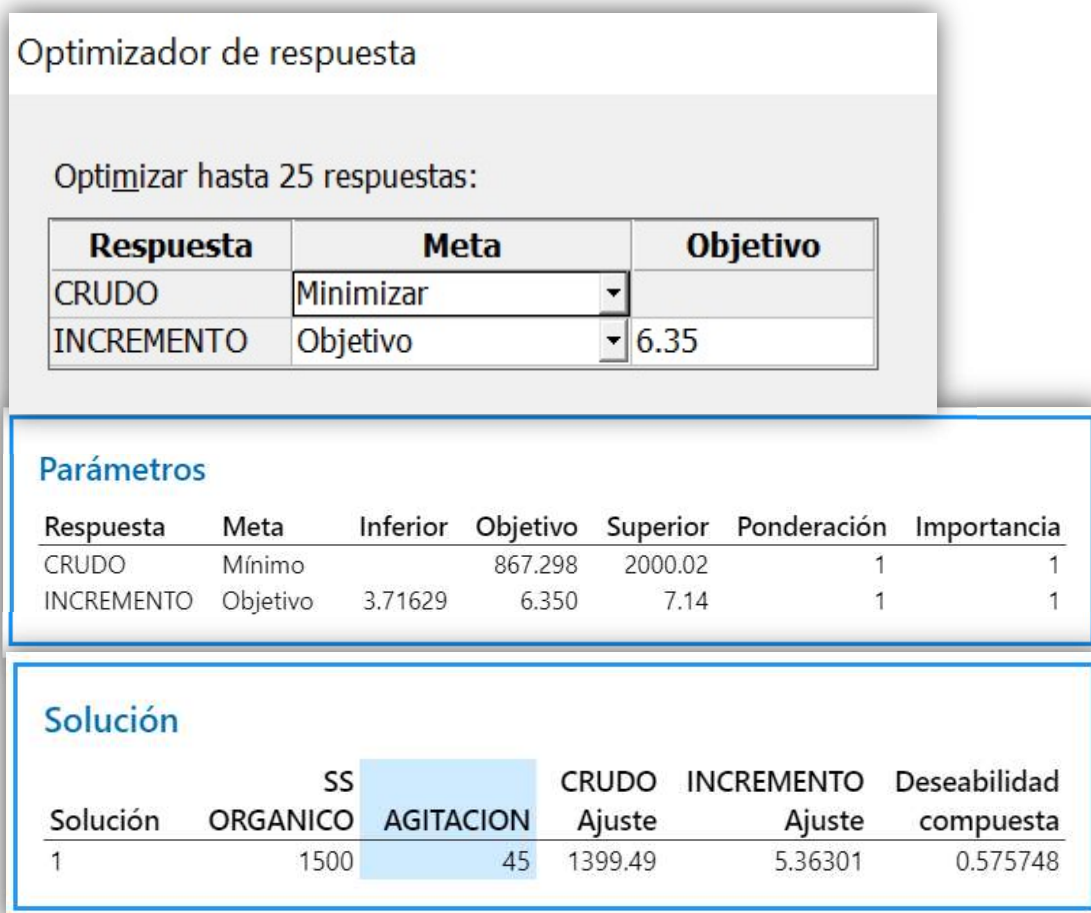


Según las líneas que intersectan a la Figura 21, la generación mínima de crudo se obtiene aproximadamente en el rango de 45 RPM con un nivel de promedio mínimo de ley de incremento.

Se determina la agitación ideal a través de la herramienta de Optimización de respuestas de Minitab19; la Figura 22 muestra el detalle de este procedimiento.

**Figura 22**

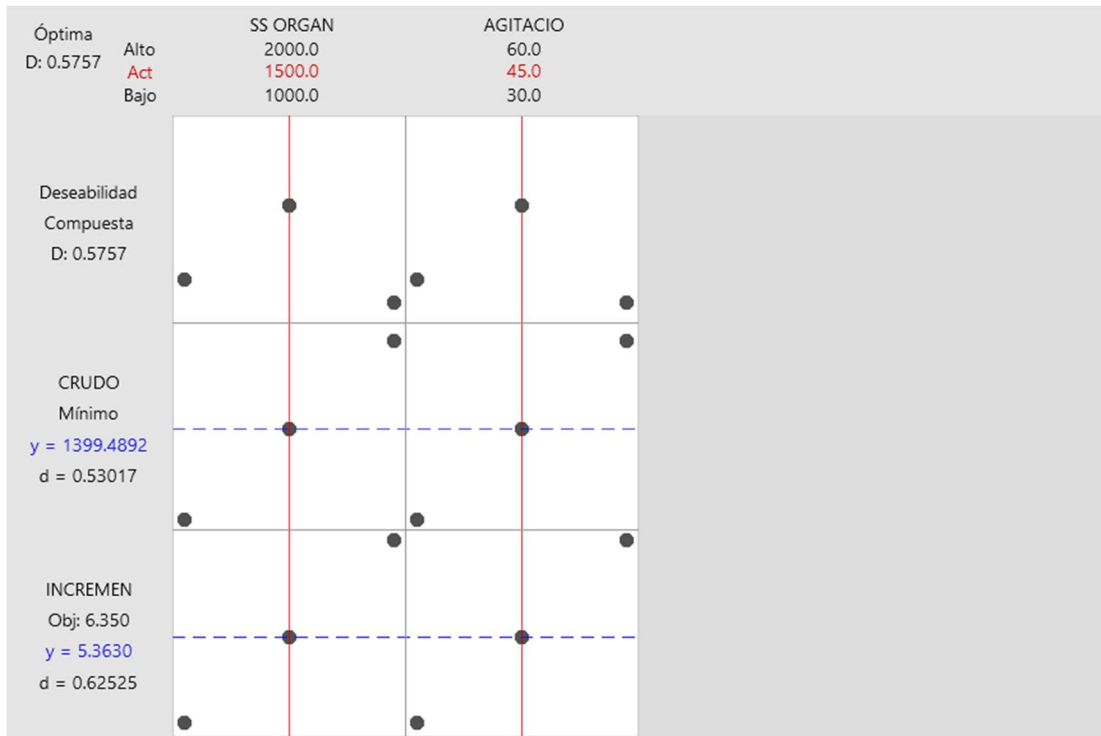
*Optimización de agitación*



Se determinó el valor de 45 RPM como agitación óptima según la predicción mostrada en la Figura 23 donde también puede apreciarse la relación lineal existente entre las variables y la generación de crudo.

**Figura 23**

*Predicción de respuesta múltiple*



### e. Simulaciones de generación de crudo

A partir del modelo matemático establecido, se comparó los diferentes resultados en la generación de crudo a un nivel mínimo constante de sólidos en el orgánico; pues como ya se demostró, es conveniente mantener bajo el nivel de sólidos, el resultado de cada uno de las simulaciones puede apreciarse en la parte correspondiente al anexo C.

Se resume los valores obtenidos en la Tabla 18, es notorio el decrecimiento del nivel de crudo conforme se va disminuyendo la agitación

**Tabla 17**

*Resumen de simulaciones*

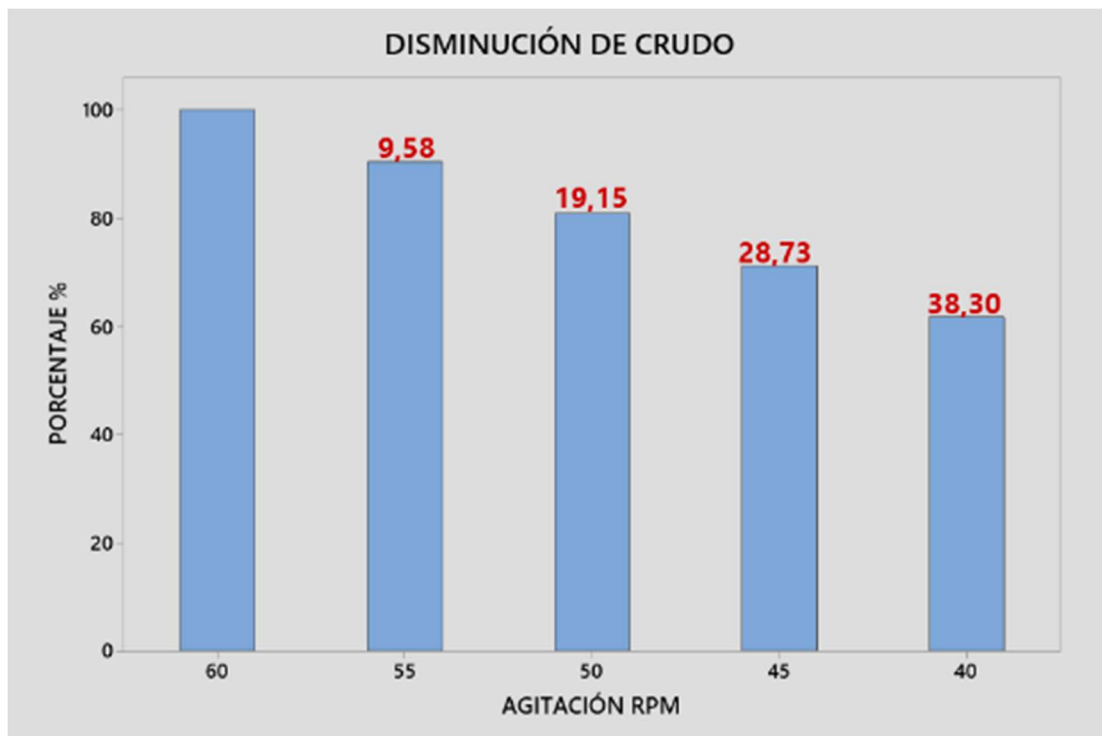
Agitación	SS Orgánico	Nivel de crudo
RPM	ppm	$\mu\text{m}$
60	1000	1971,52
55	1000	1782,73
50	1000	1593,94
45	1000	1405,15
40	1000	1216,37

Se distingue con mayor facilidad este decrecimiento en la Figura 24 mediante el gráfico de barras presentado, donde además se establece la

diferencia porcentual en cada simulación, para este cálculo, se toma como base porcentual al nivel de crudo generado con la agitación máxima de 60 RPM.

**Figura 24**

Comparación en porcentaje de disminución de crudo



Se determina un decrecimiento de 28,73% al disminuir la agitación hasta 45 RPM, que es el valor de agitación crítica para no afectar sustancialmente la transferencia de cobre hacia el electrolito rico.

En la presente investigación no se contempló la validación de datos debido a que el objetivo es determinar a la variable con mayor significancia en la generación de crudo, cualquier validación de la ecuación a este nivel de prueba serían solo referenciales y carecerían de valor o significancia al pasar a un estudio más detallado como es en el caso de desarrollar pruebas a nivel piloto.

## **4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

La información bibliográfica sobre pruebas similares en otras plantas es escasa, por lo que, los resultados obtenidos no pueden ser comparados con otras operaciones; sin embargo, en base a lo obtenido puede afirmarse lo siguiente:

### **4.2.1. Disminución de la agitación**

La disminución de la variable agitación de 60 a 45 RPM operativamente podría verse reflejado inmediatamente en un menor costo de energía al necesitar menor cantidad de potencia para procesar los mismos volúmenes, pues, como ya se demostró, no hay variación en la relación O/A usada en planta.

#### **4.2.2. Reducción de crudo generado**

La disminución de crudo generado en re-extracción de hasta casi 29% representaría ahorro por la conservación de inventario de orgánico que no se convertiría en crudo; es decir, la no pérdida y degradación de orgánico.

Si se toma en cuenta que el volumen aproximado de crudo generado en la planta en estudio es de 30 m<sup>3</sup> diarios y considerando que en la caracterización de crudo se promedia un valor de 70% de contenido de orgánico, este porcentaje de crudo no generado representaría 21 m<sup>3</sup> diarios de orgánico fresco.

Esto representa, un menor costo de operación al necesitar menor cantidad de reactivo extractante a reponer; según el análisis de carga máxima en la planta en evaluación, el porcentaje de extractante en el orgánico es de 4%, dentro de los 21 m<sup>3</sup> anteriormente mencionados existe 0,84 m<sup>3</sup> de extractante fresco; una tasa de degradación aproximada de 12,5% de extractante que no se logra recuperar en el tratamiento de crudo, implica reposición de 0,11 m<sup>3</sup> de extractante diarios o el equivalente a \$31500.00 mensuales los cuales pueden ser reducidos hasta US \$22,365.00 mensuales generando un ahorro US\$109,620.00 anuales por reposición de extractante si se considera un costo promedio de US \$110,000.00 / m<sup>3</sup> de extractante.

## CONCLUSIONES

1. Se determinó estadísticamente a un nivel de significancia de 0,05 a la velocidad de agitación como la variable con mayor relevancia en el estudio de reducción de crudo generado en la planta en evaluación.
2. El rango de variación de agitación puede decrecer hasta 45 RPM, disminuyendo la agitación hasta estas revoluciones no se afecta la media de incremento de ley en el electrolito rico en planta.
3. Mediante la reducción de la agitación se puede disminuir hasta 28,73% el crudo generado con respecto a la cantidad que se genera con el nivel actual de agitación en planta.

## **RECOMENDACIONES**

1. Complementar el presente estudio con pruebas piloto en sistemas continuos de evaluación, este tipo de estudios permiten una mejor simulación de procesos dinámicos como lo es la extracción por solventes.
2. Del presente estudio, se afirma la posibilidad de implementar variadores de frecuencia en los motores que proporcionan la agitación en re-extracción debido a que se ha demostrado agitación innecesaria en esta etapa al procesar volúmenes menores en comparación a extracción, en ese sentido, el pilotaje debe contemplar el uso de variadores de frecuencia instalados en los motores, a fin de poder variar, según sea necesario, la velocidad de agitación.
3. El presente estudio solo puede ser usado como referencia para la reducción de crudo en otras plantas de extracción por solventes, debido a que los reactivos utilizados en extracción por solventes y el tipo de sólidos que se caracteriza en el crudo son propios de cada proceso.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adidex. (2018). *Diseños 2k con puntos al centro*.  
<http://adidex.com/files/disenos-2-k-con-puntos-al-centro.pdf>
- Ayala, C., Gallardo, J., & Vásquez, R. (2020). *Analizador en línea para un proceso de Extracción por Solvente*. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 28(4), 585–595. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052020000400585>
- Cáceres, G. (2016). *Hidrometalurgia Avanzada*. Universidad Andrés Bello, 28.
- Castillo, J. (2012). *Separación de fases en sistema líquido/líquido para extracción por solventes de cobre*.
- ClubEnsayos. (2015). *Carga máxima de orgánico*.  
<https://www.clubensayos.com/Ciencia/Carga-máxima-de-organico/2971539.html>
- CYTEC. (2006). *CRUD: How It Forms and Techniques for ... - CYTEC Industries*. <https://www.yumpu.com/en/document/view/8357094/crud-how-it-forms-and-techniques-for-cytec-industries>
- Flottweg. (2022). *Tratamiento de crudo en la extracción por solventes*.  
<https://www.flottweg.com/es/aplicaciones/aguas-residuales-industriales-y-aceites-minerales/recuperacion-de-metales/>

- Galindo, V. (2014). *Aplicación de variadores de velocidad en el proceso de elaboración de muebles en una PYME.*
- Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos.*  
[https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis\\_y\\_diseno\\_experimentos.pdf](https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf)
- Iguren. (2015). *Aplicaciones y Usos de los variadores de frecuencia.*  
<https://iguren.es/blog/aplicaciones-y-usos-de-los-variadores-de-frecuencia/>
- Jergensen, G. (1999). *Copper Leaching, Solvent Extraction, and Electrowinning Technology.*
- Motorex. (2017). *Ventajas y uso de variadores de velocidad.*  
<https://www.motorex.com.pe/blog/variadores-de-velocidad-ventajas-uso/>
- Navarro, P. y Vargas, C. (2009). *Estabilidad química de reactivos de extracción por solvente de cobre del tipo hidroxioxima bajo diferentes condiciones operacionales.* 12, 88–96.
- Romero, C. (2017). *Diseño de planta de extracción por solventes a escala banco como proceso complementario para tecnología ewtech-led.* Techniques in Endocrine Research, 87–104. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4832-2867-9.50013-7>

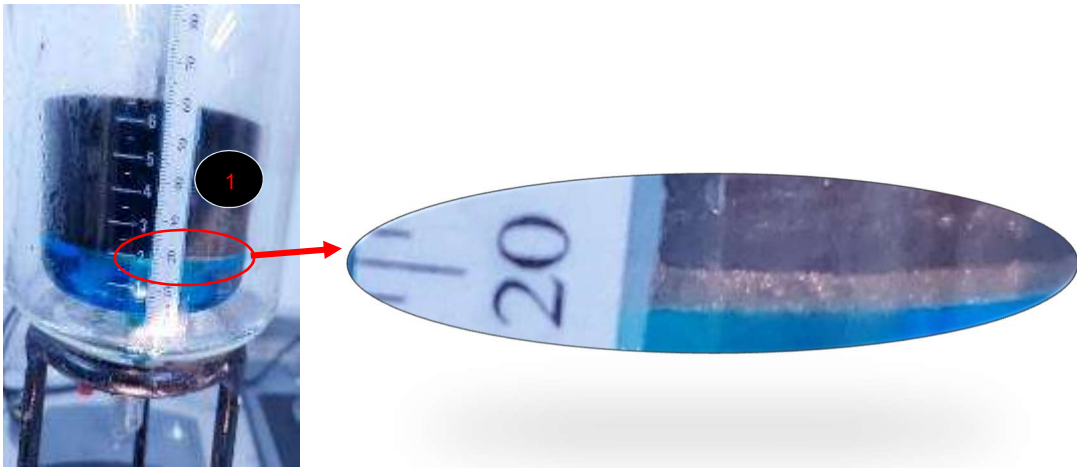
- Schlesinger, M., Matthew, K., Kathryn, S., & Davenport, W. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper fifth edition*.
- Sole, K. C., Crundwell, F. K., Dlamini, N., & Kruger, G. (2018). *Mitigating Effects of Silica in Copper Solvent Extraction*. Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 331(July), 10–12.
- Suarez, L. X. A. (2017). *Variadores de Frecuencia para el Control De Velocidad de Motores Asíncronos Jaula De Ardilla*. Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/12956/1/T-UC-0010-002-2017.pdf>
- Sulla, M. (2013). *Estudio de la planta de óxidos Xstrata Tintaya S.A. para optimizar la planta de extracción por solventes*. Universidad Nacional de San Agustín.
- Uceda, D. (2016). *Hidrometalurgia Química e Ingeniería*.
- Universidad de Atacama. (2021). *Introducción a la hidrometalurgia*. <https://docer.com.ar/doc/8vex0x0>
- Zagorodnyaya, A. N., Abisheva, Z. S., Sadykanova, S. E., Bobrova, V. V., & Sharipova, A. S. (2010). The characterisation and origins of interphase substances (cruds) in the rhenium solvent extraction circuit of a copper smelter. *Hydrometallurgy*, 104(2), 308–312.

<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.05.013>

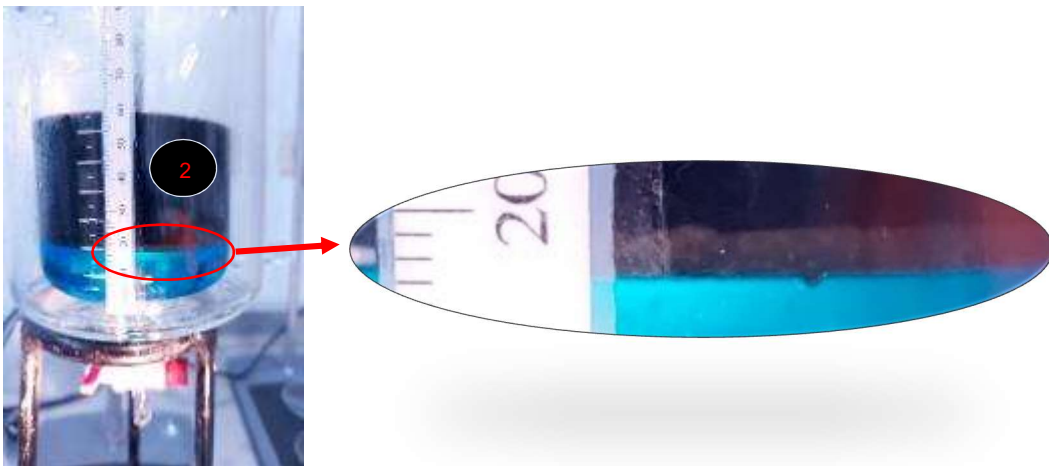
# **ANEXOS**

## ANEXO A

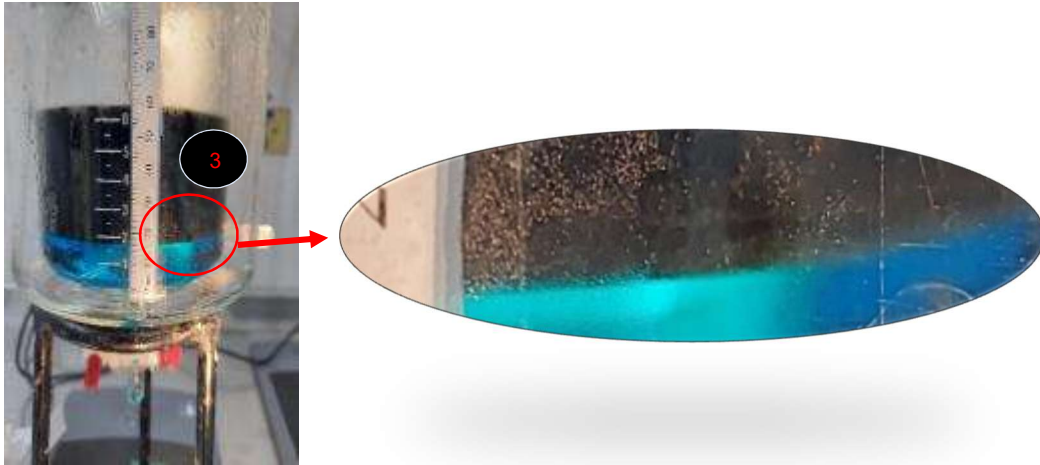
### Ampliación de la altura de crudo generado en el Test N°1



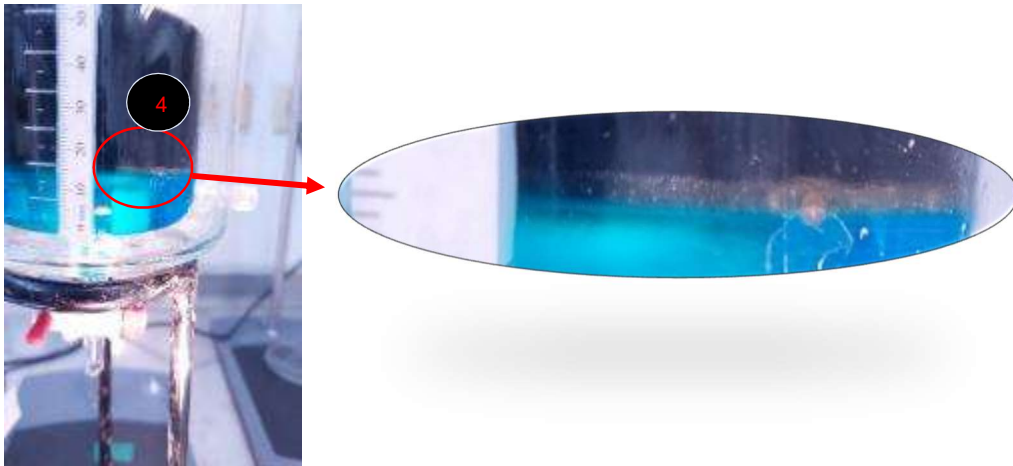
### Ampliación de la altura de crudo generado en el Test N°2



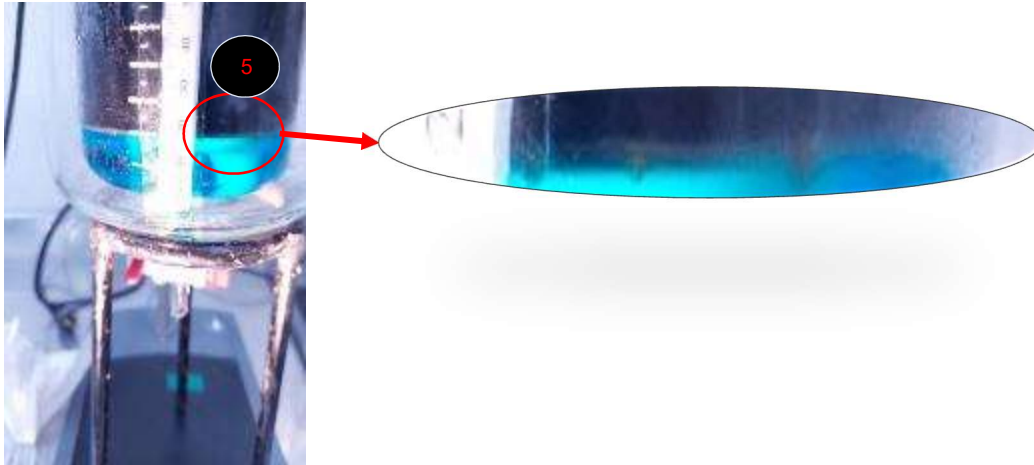
**Ampliación de la altura de crudo generado en el Test N°3**



**Ampliación de la altura de crudo generado en el Test N°4**



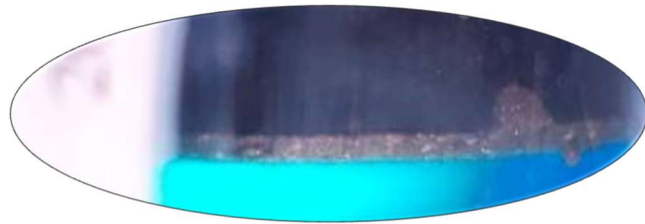
**Ampliación de la altura de crudo generado en el Test N°5**



**Ampliación de la altura de crudo generado en el Test N°6**

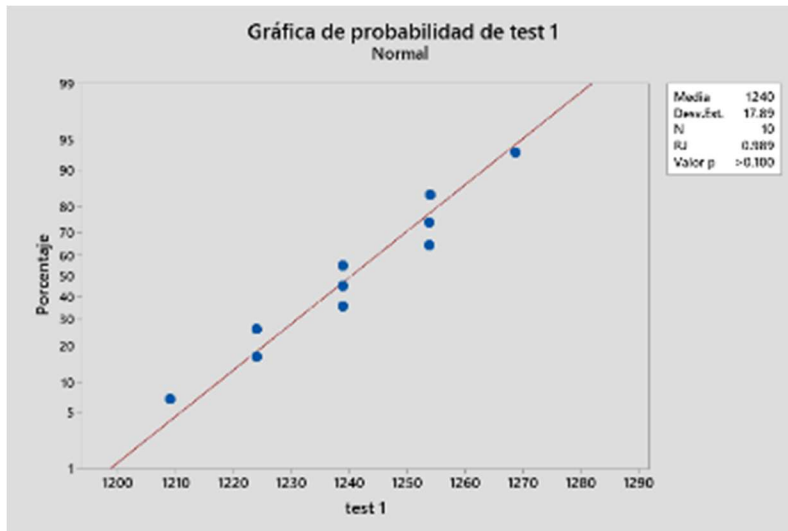


**Ampliación de la altura de crudo generado en el Test N°7**

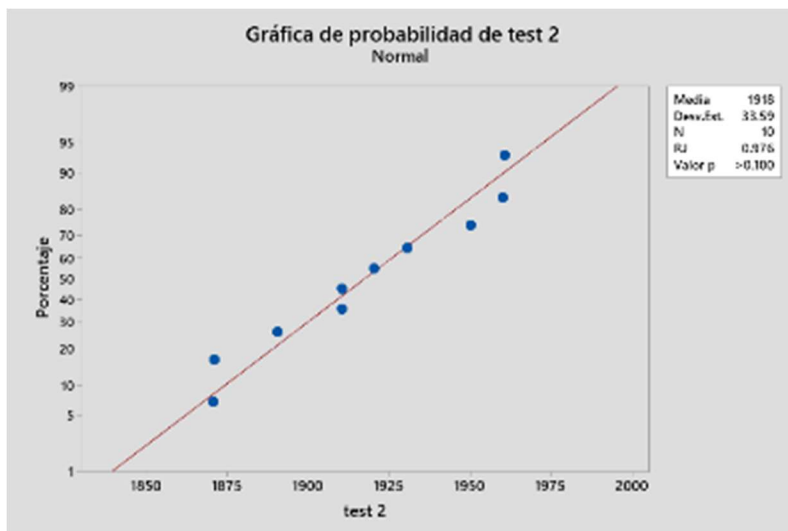


## ANEXO B

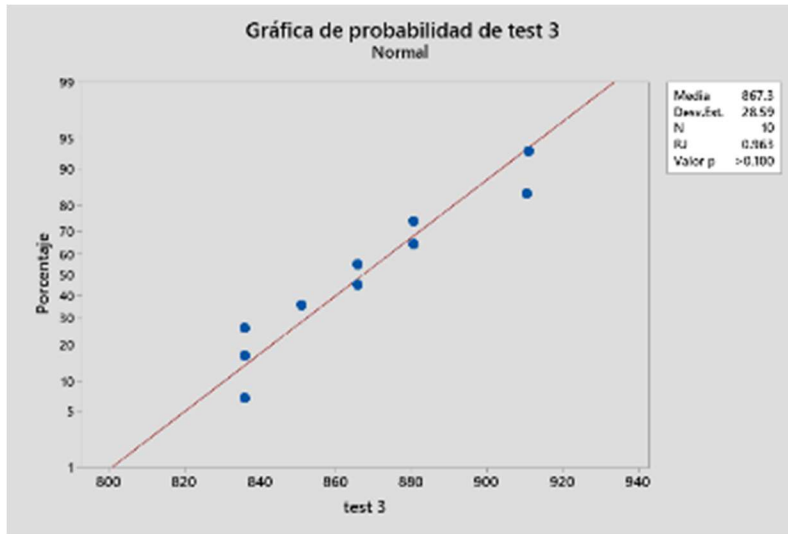
### Test de normalidad en mediciones de altura de la prueba 1



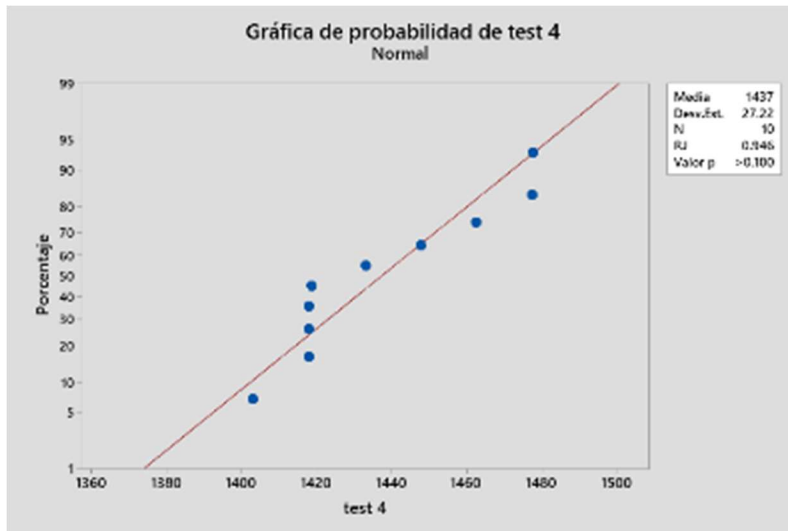
### Test de normalidad en mediciones de altura de la prueba 2



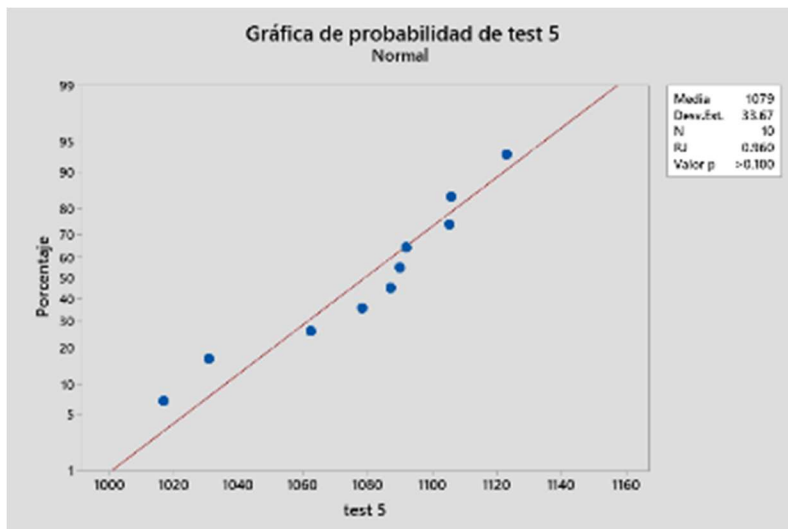
### Test de normalidad en mediciones de altura de la prueba 3



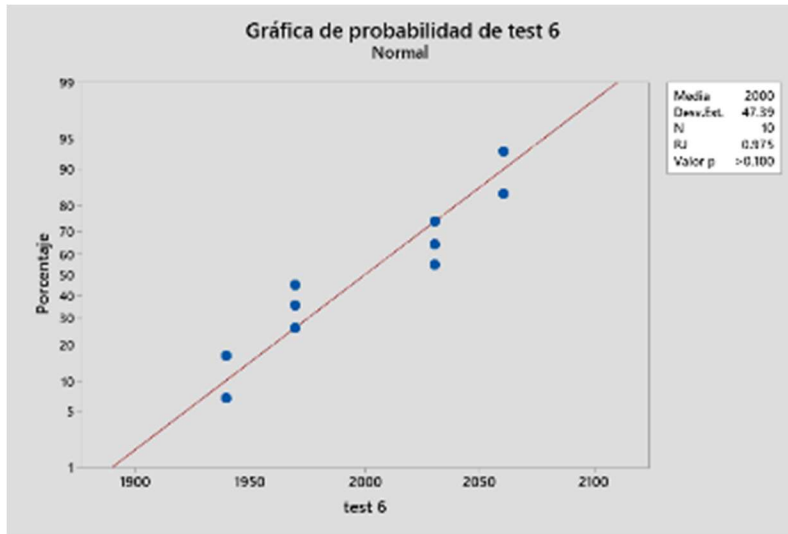
### Test de normalidad en mediciones de altura de la prueba 4



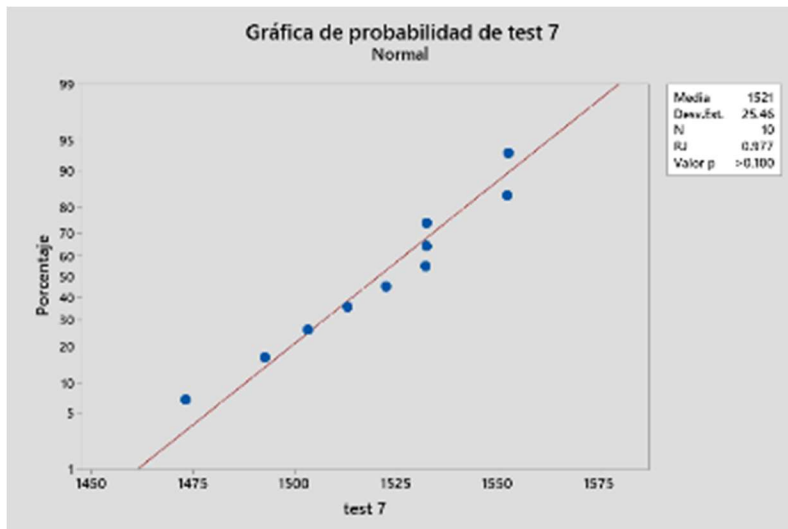
### Test de normalidad en mediciones de altura de la prueba 5



## Test de normalidad en mediciones de altura de la prueba 6



## Test de normalidad en mediciones de altura de la prueba 7



## ANEXO C

### Simulación a 60 RPM

Configuración	
Variable	Valor de configuración
SS ORGANICO	1000
AGITACION	60

Predicción			
Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
1971,52	120,769	(1587,18; 2355,86)	(1411,91; 2531,12)

### Simulación a 55 RPM

Configuración	
Variable	Valor de configuración
SS ORGANICO	1000
AGITACION	55

Predicción			
Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
1782,73	100,237	(1463,73; 2101,73)	(1265,81; 2299,65)

## Simulación a 50 RPM

Configuración	
Variable	Valor de configuración
SS ORGANICO	1000
AGITACION	50

Predicción			
Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
1593,94	85,5861	(1321,57; 1866,31)	(1104,42; 2083,46)

## Simulación a 45 RPM

Configuración	
Variable	Valor de configuración
SS ORGANICO	1000
AGITACION	40

Predicción			
Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
1216,37	85,5861	(943,993; 1488,74)	(726,845; 1705,89)

## Simulación a 40 RPM

Configuración	
Variable	Valor de configuración
SS ORGANICO	1000
AGITACION	45

Predicción			
Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
1405,15	80,1090	(1150,21; 1660,10)	(925,112; 1885,19)

MATRIZ DE CONSISTENCIA							
TITULO: REDUCCIÓN DE CRUDO GENERADO EN EXTRACCIÓN POR SOLVENTES DE COBRE							
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES e INDICADORES	TIPO, DISEÑO y NIVEL de INVESTIGACIÓN	MUESTRA	INSTRUMENTOS	ESTADISTICA A UTILIZAR
<p><b>Problema general</b> ¿De qué forma se puede disminuir la generación de crudo en el proceso de extracción por solventes?</p> <p><b>Problemas específicos</b> ¿Cuál es la rango de agitación más adecuado a fin de generar la menor cantidad de crudo?  ¿Cuál es porcentaje de crudo disminuido al variar la agitación al rango más adecuado?</p>	<p><b>Objetivo general</b> Demostrar a la agitación como variable con mayor relevancia en la generación de crudo.</p> <p><b>Objetivos específicos</b> Estimar el rango de agitación más adecuado a fin de generar la menor cantidad de crudo.  Estimar los porcentajes de crudo disminuido.</p>	<p><b>Hipótesis general</b> Aplicando solo la agitación de mezclado necesaria para la transferencia iónica es posible disminuir la tasa de formación de crudo en re-extracción.</p> <p><b>Hipótesis específicas</b> Existe una relación significativa entre la velocidad de agitación y la cantidad de crudo generado..  La cantidad de crudo generado al disminuir la agitación es significativa</p>	<p><b>Variables independiente:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad de agitación</li> </ul> <p>Indicador: RPM</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sólidos en suspensión en el orgánico</li> </ul> <p>Indicador: ppm</p> <p><b>Variable dependiente</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Altura de crudo generado</li> </ul> <p>Indicador: µm</p>	<p><b>Tipo:</b> Experimental</p> <p><b>Diseño:</b> Experimental Cuantitativo</p> <p><b>Nivel:</b> Explicativo</p>	<p><b>Muestras</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Volúmenes de 10 L de electrolito pobre y orgánico cargado, ambas propias de planta en estudio.</li> <li>• Mineral de lixiviación pulverizado hasta malla 100% -400</li> </ul>	<p><b>Instrumentos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reactor de Agitación mecánica</li> <li>• Material de laboratorio para medición de volumen.</li> <li>• Balanza analítica</li> <li>• Laptop o computadora de escritorio</li> <li>• Cronómetro</li> </ul>	<p>Estadística Bivariable</p> <p>DOE factorial 2<sup>k</sup> con tres puntos centrales.</p> <p>Datos cuantitativos</p>