



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DE CRISTALES DE  
SULFATO DE SODIO PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS  
LÍQUIDOS DEL ENSAYO DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO**

**José Ricardo de León Solís**  
Asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra

Guatemala, octubre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DE CRISTALES DE  
SULFATO DE SODIO PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS  
LÍQUIDOS DEL ENSAYO DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

^  
POR

**JOSÉ RICARDO DE LEÓN SOLÍS**

ASESORADO POR EL ING. CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl De León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdés
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert de León
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DE CRISTALES DE  
SULFATO DE SODIO PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS  
LÍQUIDOS DEL ENSAYO DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha mayo de 2012

**José Ricardo de León Solís**



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 27 de mayo de 2013

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
Dirección  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Respetable Ing. Monzón:

Deseando que sus labores se realicen con éxito, dirijo la presente para hacer de su conocimiento que he revisado y aprobado el informe final del Trabajo de Graduación titulado **“EVALUACIÓN DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DE CRISTALES DE SULFATO DE SODIO PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS LÍQUIDOS DEL ENSAYO DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO”**, el cual se llevó a cabo por el estudiante de Ingeniería Química **José Ricardo de León Solís**, identificado con el carné No. **2005-11782**.

Considerando que dicho documento cumple satisfactoriamente con los requisitos exigidos, solicito sirva darle continuidad al proceso para su aprobación.

Agradeciendo su atención, me suscribo atentamente,

Ing. César Alfonso García Guerra

Colegiado No. 145

Asesor de Trabajo de Graduación

*César Alfonso García Guerra*  
INGENIERO QUÍMICO  
COLEGIADO No. 145



Guatemala, 22 de agosto de 2013  
Ref. EI.Q.TG-IF.045.2013

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-018-2012-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **José Ricardo de León Solís.**

Identificado con número de carné: **2005-11782.**

Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO.**


Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

#### EVALUACIÓN DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DE CRISTALES DE SULFATO DE SODIO PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS LÍQUIDOS DEL ENSAYO DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **César Alfonso García Guerra.**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Jaime Domingo Carranza González  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ACREDITADO POR  
Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería  
Período 2009 - 2015



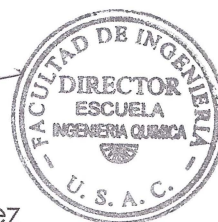
ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **JOSÉ RICARDO DE LEÓN SOLÍS** titulado: **"EVALUACIÓN DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DE CRISTALES DE SULFATO DE SODIO PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS LÍQUIDOS DEL ENSAYO DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre 2013

Cc: Archivo  
VMMV/dle



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DE CRISTALES DE SULFATO DE SODIO PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS LÍQUIDOS DEL ENSAYO DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO**, presentado por el estudiante universitario: **José Ricardo de León Solís**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Murphy Glympto Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, octubre de 2013

/cc



## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Dios** Por abrir las puertas que yo no puedo abrir por mi cuenta y por brindarme fortaleza y paz cuando más lo requerí.
- Mis padres** Pablo de León y Leslie Solís, por la dedicación y el amor que siempre hemos recibido mi hermana y yo, y por los sacrificios que realizaron para que ambos tuviésemos la mejor educación posible.
- Mi hermana** Claudia de León, por el ejemplo inmejorable que ha sido para mí como persona, estudiante y hermana mayor.
- Ing. Jorge Godínez** Por mostrar siempre un deseo genuino de que sus estudiantes entiendan lo impartido en clase, y por todas las preguntas respondidas sin importar lo fácil o difícil que fuese cada una.
- Ing. Otto Raúl de León** Por el entusiasmo mostrado en clase, tanto por el contenido del curso como por la carrera en general, y por ser ejemplo de ética profesional.

**Ing. César García**

Por todo el conocimiento compartido en el salón y fuera de él, y por toda la retroalimentación brindada como asesor, que hizo posible esta tesis.

**Mis compañeros**

Augusto Barrientos, César García, Hugo Rubio, Mario Pinto y muchos otros más, por los momentos convividos, que difícilmente se olvidan.

**USAC**

Por la educación y la subvención brindadas; siempre he de estar en deuda con esta institución y espero devolver un poco de lo mucho que recibí de mi *alma mater*.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. DISEÑO METODOLÓGICO .....	3
2.1. Variable de la investigación .....	3
2.2. Delimitación del campo de estudio... ..	3
2.2.1. Campo de investigación .....	3
2.2.2. Área de investigación .....	4
2.3. Definición de enfoque, nivel y tipo de investigación .....	4
2.3.1. Enfoque de la investigación .....	4
2.3.2. Nivel de la investigación. ....	4
2.3.3. Tipo de la investigación.....	5
2.4. Recursos materiales disponibles .....	5
2.4.1. Equipo .....	5
2.4.1.1. Instrumentos de medición.....	5
2.4.1.2. Equipos y materiales auxiliares .....	6
2.4.2. Cristalería .....	6
2.4.3. Reactivos .....	6
2.5. Recursos humanos disponibles.....	7

2.6.	Técnica cuantitativa.....	7
2.7.	Recolección y ordenamiento de la información.....	7
2.7.1.	Proceso de purificación.....	8
2.7.2.	Toma y análisis de muestra.....	8
2.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	8
2.9.	Análisis estadístico.....	9
3.	MARCO TEÓRICO.....	11
3.1.	Cristalización.....	11
3.1.1.	Redes y sistemas cristalinos.....	11
3.1.2.	Nucleación.....	13
3.1.3.	Crecimiento de los cristales.....	14
3.2.	Electroquímica.....	14
3.2.1.	Potenciales estándar de semicelda.....	15
3.2.2.	Constantes de equilibrio.....	15
3.2.3.	Potenciales fuera del equilibrio y actividad de los electrones.....	16
3.3.	Amalgamas.....	17
3.4.	Metales pesados en lodos.....	18
3.5.	Equilibrio de solubilidad del aluminio y zinc.....	19
3.5.1.	Solubilidad del hidróxido de zinc en función del pH.....	19
3.5.2.	Solubilidad del hidróxido de aluminio en función del pH.....	21
4.	RESULTADOS.....	25
4.1.	Resultados compilados en el análisis de la concentración de cromo.....	25

4.2.	Resultados compilados en el análisis de la concentración de mercurio.....	27
4.3.	Resultados compilados en el análisis de metales pesados.....	29
4.4.	Resultados compilados en el análisis del porcentaje de carbonatos.....	31
4.5.	Resultados compilados en el análisis de la cantidad de agua de cristalización.....	32
4.6.	Resultados compilados en el análisis del porcentaje de sulfato de sodio.....	35
4.7.	Análisis de la cantidad de metales recuperados.....	38
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	41
5.1.	Criterios estadísticos.....	41
5.2.	Cromo.....	42
5.3.	Mercurio.....	43
5.4.	Cromo y mercurio como porcentaje de plomo.....	44
5.5.	Carbonatos.....	45
5.6.	Agua de cristalización.....	46
5.7.	Sulfato de sodio.....	47
5.8.	Síntesis.....	50
	CONCLUSIONES .....	53
	RECOMENDACIONES.....	55
	BIBLIOGRAFÍA.....	57
	APÉNDICES .....	59



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Diagrama de flujo del proceso desarrollado en el proyecto FODECYT No. 047-2009.....	2
2.	Solubilidad del $\text{Al}(\text{OH})_3$ en función del Ph .....	23
3.	Evaluación de la cantidad de agua de cristalización en función del pH y del reductor .....	34
4.	Evaluación del porcentaje de sulfato de sodio en función del pH y del reductor .....	36

### TABLAS

I.	Diseño experimental .....	9
II.	Sistemas cristalinos .....	12
III.	Límites máximos de metales pesados en lodos.....	18
IV.	Tabulación de la concentración de cromo residual en los cristales de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ refinados en función de los factores .....	25
V.	Tabulación para la evaluación de la significatividad de los factores en la concentración de cromo residual.....	26
VI.	Probabilidad que la diferencia entre el promedio de la concentración de cromo residual y la concentración de cromo inicial sea insignificante.....	27
VII.	Tabulación de la concentración de mercurio residual en los cristales de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ refinados en función de los factores .....	27

VIII.	Tabulación para la evaluación de la significatividad de los factores en la concentración de mercurio residual .....	28
IX.	Probabilidad que la diferencia entre el promedio de la concentración de mercurio residual y la concentración de mercurio inicial sea insignificante .....	29
X.	Porcentaje de metales pesados residuales en cristales de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ reportados como porcentaje de plomo .....	30
XI.	Probabilidad que la diferencia entre el promedio del porcentaje de metales pesados residual y el porcentaje de metales pesados en el reactivo puris sea insignificante .....	30
XII.	Tabulación del porcentaje de carbonatos residual en los cristales de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ refinados en función de los factores .....	31
XIII.	Tabulación para la evaluación de la significatividad de los factores en el porcentaje de carbonatos residual .....	32
XIV.	Probabilidad que la diferencia entre el promedio del porcentaje de carbonatos residual y el porcentaje de carbonatos inicial sea insignificante.....	32
XV.	Evaluación experimental del agua de cristalización en los cristales refinados de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....	33
XVI.	Tabulación para la evaluación de la significatividad de los factores en la cantidad de agua de cristalización .....	34
XVII.	Tabulación del porcentaje de sulfato de sodio en los cristales refinados en función de los factores .....	35
XVIII.	Tabulación para la evaluación de la significatividad de los factores en el porcentaje de sulfato de sodio .....	37
XIX.	Prueba de diferencia honesta significativa para la interacción 1 y 3.....	37
XX.	Comparación de promedios de la interacción 1 y 3 con los promedios individuales de cada factor .....	38



XXI.	Cantidad de metales recuperados en la etapa de amalgamado en función de los factores .....	38
XXII.	Tabulación para la evaluación de la significatividad de los factores en la cantidad de metales pesados recuperados .....	39
XXIII.	Evaluación del porcentaje final del reductor utilizado para la purificación de sulfato de sodio en base al contenido de mercurio original.....	40
XXIV.	Cantidad de contaminantes presentes antes del proceso.....	40



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\Delta G^\circ$	Cambio estándar en la energía libre de Gibbs
$F$	Constante de Faraday, 96 498.3399 C/mol
$CM$	Cuadrados Medios o varianza
$s$	Desviación estándar, raíz cuadrada de la varianza
$DHS$	Diferencia Honesta Significativa
$gl$	Grados de libertad
$\mu g$	Microgramo, millonésima parte de un gramo
$ppm$	Partes por millón
%	Porcentaje, relación de dos valores de mismas dimensiones multiplicados por cien
$pH$	Potencial de hidrógeno, logaritmo del inverso de la actividad del ion hidrógeno
$E^\circ$	Potencial estándar de celda o semi celda
$\bar{x}$	Promedio o media aritmética de una muestra
$\partial^2 G / \partial x^2$	Segunda derivada de la energía libre de Gibbs con respecto de la concentración de sal
$SC$	Suma de Cuadrados
$\mu_0$	Valor de prueba para el valor de la t de <i>student</i>
$F$	Valor o estadística F, obtenido de la distribución F de Fisher

**$q, q_k$**

Valor o estadística  $q$ , obtenido de la distribución studentizada de rangos  $q$

## GLOSARIO

<b>Amalgama</b>	Aleación de mercurio con otro metal.
<b>Constante de equilibrio</b>	Cantidad termodinámica que predice la relación entre productos y reactivos de una reacción química cuando alcanza el equilibrio químico.
<b>Cristalización</b>	Operación unitaria endotérmica en el que se produce sólidos cristalinos a partir de una solución sobresaturada del sólido.
<b>Diferencia</b>	Resultado de la resta de dos números.
<b>Energía de Gibbs</b>	Energía química liberada o absorbida máxima capaz de realizar trabajo.
<b>Grados de libertad</b>	Diferencia entre los sujetos de muestra o grupos totales y el número de sujetos o grupos estadísticamente dependientes.
<b>Mesh</b>	Escala de tamices con aberturas estandarizadas.
<b>Nucleación</b>	Etapas que origina la cristalización.

<b>Operación unitaria</b>	Parte simple de un proceso que transforma una materia prima en un otro producto intermedio o el producto final
<b>Potencial de celda</b>	Voltaje que produce una celda galvánica.
<b>Reductor</b>	Sustancia capaz de ceder electrones.
<b>Significativo</b>	En estadística, un resultado es significativo cuando no es probable que éste se deba al azar.
<b>Variable de control</b>	Magnitud que se establece o controla a fin de tener cantidades conocidas y estables de ella.
<b>Variable de medición</b>	Magnitud de interés en un experimento y se mide en respuesta de la o las variable(s) de control.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación, evaluó un proceso de purificación de cristales de sulfato de sodio, provenientes de un tratamiento del residuo líquido del análisis de la demanda química de oxígeno por espectrofotometría. Éstos contenían mercurio, cromo y carbonatos, la eliminación del cromo y el mercurio, se realizó por medio de la reducción de sus formas iónicas a sus formas metálicas por medio de agentes reductores. La eliminación de los carbonatos, se realizó usando su equilibrio ácido base o desplazando el equilibrio al calentar la solución.

El proceso consistió en disolver los cristales en agua destilada, ajustar el pH, agregar el reductor y realizar la reacción de oxidorreducción, filtrar la solución de sulfato de sodio y recrystalizar el compuesto. En el proceso se estudió 2 reductores; (aluminio y zinc), 3 cantidades de reductor y 2 valores de pH. Una vez obtenido el sulfato de sodio recrystalizado y purificado, se midió la concentración de cromo y mercurio en los cristales, así como el porcentaje de iones carbonato, el porcentaje de sulfatos y la cantidad de agua de cristalización.

Los datos obtenidos fueron analizados mediante análisis de varianza, prueba t de única muestra y de ser necesario la diferencia honesta significativa. El análisis estadístico mostro que el proceso disminuyó significativamente la cantidad de cromo y mercurio. Sin embargo los cristales tenían significativamente más cromo y mercurio que el reactivo empleado en laboratorio. Los carbonatos se eliminaron al realizar el proceso a pH 2,2. La cantidad de agua de cristalización aumento significativamente a pH 7,0 y la

cantidad de sulfatos disminuyó significativamente cuando el proceso se realizó empleando aluminio y llevando a cabo la reacción a pH 7,0.



## OBJETIVOS

### General

Desarrollar y evaluar un tratamiento químico de oxidorreducción que permita disminuir los metales pesados, como cromo (III) y mercurio (II), presentes en los cristales de sulfato de sodio provenientes del tratamiento del residuo de la demanda química de oxígeno.

### Específicos

1. Evaluar el requerimiento de aluminio y zinc como agentes reductores de los iones cromo y mercurio presentes en los cristales hidratados de sulfato de sodio.
2. Evaluar el rendimiento de amalgama ( $\text{Cr}_x\text{Hg}_y$ ,  $\text{Zn}_x\text{Hg}_y$ ,  $\text{Al}_x\text{Hg}_y$ ), producida por reducción de los metales con aluminio o zinc en función del pH.
3. Registrar el pH y el potencial de oxidorreducción durante la reducción de los iones mercurio y cromo mediante el agente reductor.



## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de un proceso para purificar cristales de sulfato de sodio, no sería relevante si no fuese por la naturaleza de los contaminantes presentes en éstos. Los cristales de sulfato de sodio estudiados, provienen de la neutralización del ácido sulfúrico en el reactivo para el ensayo de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Este reactivo contiene ácido sulfúrico, dicromato de potasio, sulfato de plata y sulfato de mercurio. El cromo hexavalente, además de un fuerte oxidante, es un conocido agente carcinógeno que afecta el material genético. El mercurio afecta el sistema nervioso y se acumula en animales y humanos. El proceso para tratar este residuo elimina la mayor parte de estos contaminantes. No obstante, la concentración remanente en dichos cristales justifica un estudio para su purificación.

La ingeniería química cuenta con diversas operaciones unitarias y métodos químicos para llevar a cabo procesos de separación. Para eliminar los contaminantes antes descritos, se empleará aluminio y zinc como agentes reductores, la operación de filtración y la operación de cristalización.

En el ámbito del manejo de desechos, las 3 erres se han convertido en estrategias fundamentales para la minimización de desechos. Permiten obtener el máximo beneficio de un producto y generar la menor cantidad posible de desechos. En orden de importancia las 3 erres son reducir, reutilizar y reciclar. El proyecto de investigación tomó en cuenta estos aspectos al desarrollar el proceso para la purificación de los cristales de sulfato de sodio.



## 1. ANTECEDENTES

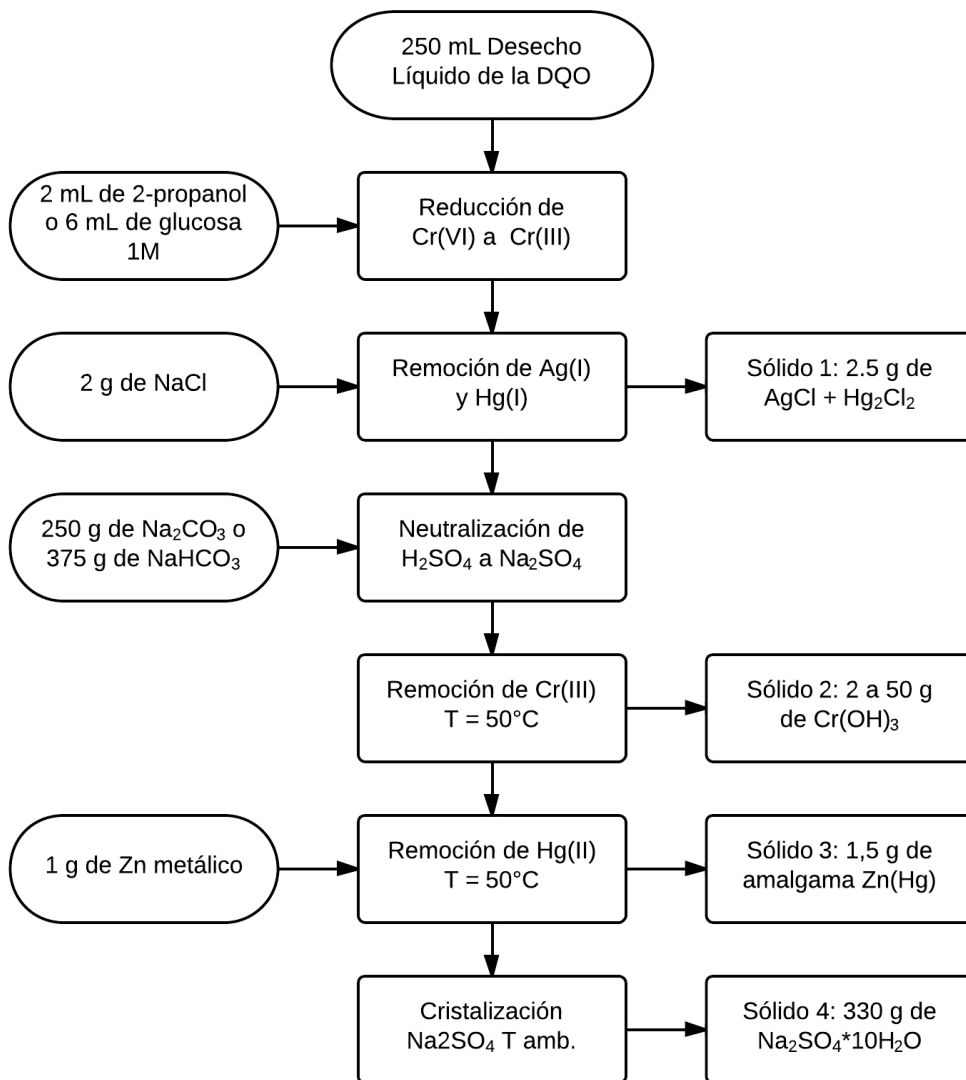
En el proceso desarrollado como parte del proyecto FODECYT No. 047-2009; Evaluación de la técnica de tratamiento del desecho líquido del análisis instrumental de la demanda química de oxígeno (DQO) generado por laboratorios analíticos guatemaltecos para atenuar el impacto ambiental, se genera sulfato de sodio como producto de la neutralización del ácido sulfúrico. Éste se recupera en forma de cristales decahidratados.

Un litro del reactivo de DQO se prepara disolviendo 10,216 gramos de  $K_2Cr_2O_7$ , 167 mililitros de  $H_2SO_4$  concentrado y 33,3 gramos de  $HgSO_4$  (1-395). El cromo hexavalente y los iones mercúricos son nocivos para el ambiente y para la salud. El proceso desarrollado para el tratamiento de estos contaminantes, elimina el cromo hexavalente de forma satisfactoria pero deja residuos de iones mercúricos en los cristales. El proceso para la purificación de los cristales debe eliminar estos contaminantes.

Debido a la alta concentración de ácido sulfúrico, 9 molar, en el reactivo de DQO, la masa recuperada de cristales de sulfato de sodio, es invariablemente elevada. Por cada litro de desechos provenientes de los ensayos de DQO que se trata con el proceso mencionado anteriormente, se producen entre 400 y 600 gramos de cristales de sulfato de sodio decahidratado. Debido a la cantidad que se recupera de estos cristales, el Laboratorio de Físico Química (LAFIQ) no puede permitirse desecharlos por medio de encapsulamiento en concreto.

Para la neutralización del ácido sulfúrico se emplea bicarbonato de sodio. Este se agrega en exceso y cristaliza junto con el sulfato de sodio. El proceso a desarrollar debe eliminar el exceso agregado de bicarbonato de sodio.

Figura 1. **Diagrama de flujo del proceso desarrollado en el proyecto FODECYT No. 047-2009**



Fuente: elaboración propia.

## **2. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **2.1. Variable de la investigación**

En el capítulo anterior, se indicó que los cristales de sulfato de sodio contenían impurezas de cromo mercurio y carbonatos. Por esta razón, para el estudio se evaluaron las siguientes variables:

- Porcentaje de sulfato de sodio de los cristales purificados ( $V_1$ ).
- Concentración de mercurio residual en los cristales purificados ( $V_2$ ).
- Concentración de cromo residual en los cristales purificados ( $V_3$ ).
- Grado hidratación de los cristales de sulfato de sodio purificados ( $V_4$ ).
- Porcentaje de carbonatos y bicarbonatos en los cristales purificados ( $V_5$ ).

### **2.2. Delimitación del campo de estudio**

A continuación se delimita el campo de estudio del trabajo de investigación. Primeramente se especifica el campo de investigación, es decir uno de los campos de estudio de la ingeniería química; a continuación se especifica el área de investigación, es decir una de las aéreas del campo definido previamente.

#### **2.2.1. Campo de investigación**

El estudio elegido se enmarca dentro del campo de la ingeniería de procesos. Este campo provee el fundamento fisicoquímico, aplicaciones y

equipos de diversas operaciones unitarias empleadas tanto a nivel industrial como a nivel laboratorio.

### **2.2.2. Área de investigación**

El área de investigación del estudio, es la Ingeniería de las Separaciones. Esta rama de la Ingeniería Química, se encarga de estudiar las diferentes técnicas de separación disponibles para los procesos industriales.

Debido a que se desea eliminar contaminantes de los cristales de sulfato de sodio, se justifica que el área de investigación sea la Ingeniería de las Separaciones.

### **2.3. Definición de enfoque, nivel y tipo de investigación**

A continuación se presenta el enfoque, el nivel y el tipo de investigación, realizado para que el lector sepa que debe esperar del presente trabajo de investigación.

#### **2.3.1. Enfoque de la investigación**

El enfoque es cuantitativo, dado que existe una normativa que rige los desechos de mercurio y cromo y por ello es necesario cuantificar los contaminantes presentes inicialmente en los cristales.

#### **2.3.2. Nivel de la investigación**

El nivel es descriptivo, debido a que el estudio refiere de la literatura procesos físicos y químicos que han sido estudiados previamente para hacer



separaciones, con el fin de establecer un proceso particular para purificar los cristales de sulfato de sodio.

### **2.3.3. Tipo de la investigación**

La investigación es aplicada porque el estudio no pretende desarrollar una teoría ni un modelo matemático, sino busca aplicar técnicas conocidas para solucionar un problema en particular.

## **2.4. Recursos materiales disponibles**

A continuación se enlista el equipo, la cristalería y los reactivos empleados para realizar la investigación y el trabajo de graduación.

### **2.4.1. Equipo**

En esta sección, se separan los equipos de medición necesarios para la medición de las variables antes mencionadas y el equipo auxiliar necesario para realizar cada corrida. No todo el equipo de medición mencionado a continuación fue operado por el investigador.

#### **2.4.1.1. Instrumentos de medición**

Los instrumentos de medición necesarios para la investigación, son el espectrofotómetro uv visible; para medir la concentración de cromo y la cantidad de sulfatos, zinc y aluminio en los cristales, el espectrómetro de absorción atómica; para medir la concentración de mercurio, la bureta de 25 mililitros; para titular los carbonatos y bicarbonatos, el potenciómetro Hanna HI-255; para medir el pH durante la reacción con el zinc o el aluminio, el

termómetro de mercurio de escala centígrada, para controlar la temperatura de la reacción y la balanza analítica; para pesar cada muestra de sulfato de sodio impuro y para realizar la gravimetría de la cantidad de agua de cristalización.

#### **2.4.1.2. Equipos y materiales auxiliares**

Para realizar cada corrida, fue necesario emplear una plancha; para calentar la disolución de sulfato de sodio, un agitador magnético; para disolver los cristales de sulfato de sodio, una unidad de calcinación; para remover el agua de cristalización de los cristales purificados, papel filtro; para retener la amalgama formada durante la reacción, horno de secado; para evaporar el agua y realizar la operación de cristalización, y una bandeja plástica, para contener la solución supersaturada.

#### **2.4.2. Cristalería**

En cada corrida se empleó un *beaker* de 500 mililitros, para disolver los cristales de sulfato de sodio impuros, un embudo para líquidos, para soportar el papel filtro y verter la solución supersaturada a un nuevo *beaker*, un gotero, para agregar la solución de ácido sulfúrico y un vidrio de reloj para contener el reductor en la balanza analítica.

#### **2.4.3. Reactivos**

Se empleó durante la fase experimental, aluminio en polvo limado de una pieza sólida y zinc en polvo fino Merck CAS 7440-66-6, como los reductores estudiados en la investigación, ácido sulfúrico al 97 por ciento, para ajustar el pH antes de efectuar la reacción, un kit para análisis de sulfatos, un kit para

análisis de zinc y un kit para análisis de aluminio para medir la cantidad residual de reductor en los cristales purificados.

## **2.5. Recursos humanos disponibles**

Los recursos humanos empleados para llevar a cabo la investigación, son los profesionales que se listan a continuación.

- Asesor: Ing. César Alfonso García Guerra
- Investigador: Br. José Ricardo de León Solís

## **2.6. Técnica cuantitativa**

A continuación se identifican las técnicas cuantitativas que se emplearon en la investigación, con el fin de efectuar la medición de las variables deseadas:

- Espectroscopia de absorción atómica para cuantificar la concentración de cromo y mercurio en los cristales de sulfato de sodio purificados.
- Espectrofotometría UV-visible para cuantificar la concentración de sulfatos en los cristales de sulfato de sodio purificados.
- Gravimetría para determinar el grado de hidratación del sulfato sodio.
- Titrimetría para determinar carbonatos
- Potenciometría para determinar el potencial de oxidorreducción

## **2.7. Recolección y ordenamiento de la información**

La recolección de los datos se hizo en 2 etapas. La primera, consiste en realizar el proceso completo para purificar los cristales. La segunda, consiste en tomar muestras para realizar los análisis necesarios.

### **2.7.1. Proceso de purificación**

En esta etapa se llevó a cabo los diferentes tratamientos de purificación descritos en la sección 2.9. Para eliminar el exceso de mercurio y cromo de los cristales, se empleó una reacción de oxidorreducción con el fin de reducir el cromo hexavalente y trivalente a cromo elemental y reducir los iones mercúricos y mercuriosos a mercurio elemental. Una vez formado el mercurio elemental, éste se puede amalgamar con la mayoría de metales, facilitando su separación.

Para eliminar el exceso de carbonatos, se disminuyó el pH a 2,2 para transformar los carbonatos en anhídrido carbónico o bien se evapora el anhídrido carbónico para desplazar el equilibrio. En todos los tratamientos, la reacción se realizó a 50 grados Celsius. En la figura 5, se muestra el diagrama de bloques del proceso empleado.

### **2.7.2. Toma y análisis de muestras**

En esta etapa se prepararon muestras que se tomó de los cristales de sulfato de sodio obtenidos al final de cada corrida y se analizaron. Es en esta etapa, donde se llevó a cabo las mediciones de las variables descritas en la sección 2.1 con las técnicas cuantitativas descritas en la sección 2.6.

## **2.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

La información que se genera, proviene exclusivamente de los análisis necesarios para determinar los valores de las variables que se desean medir. Estos datos se clasificaron en función de las corridas realizadas. Una vez clasificados, se inspeccionaron y si se sospecha que se tiene un valor atípico,

se aplicará la prueba de la Q de Dixon para aceptar o rechazar el valor con un 95 por ciento de confianza.

## 2.9. Análisis estadístico

El diseño experimental fue factorial de 3 factores: el reductor (aluminio o zinc), la cantidad de moles de reductor (0,00382 mol, 0,00535 mol ó 0,00688 mol) y el pH de la reacción (7,0 ó 2,2). La tabla I, muestra el diseño experimental del proyecto de investigación. La cifra después de la variable designa el tratamiento. Cada tratamiento fue repetido 2 veces. Todos los datos obtenidos fueron analizados mediante un análisis de varianza y de ser necesario se calculó la diferencia honesta significativa. Adicionalmente se calculó pruebas t para muestra única para comparar los promedios de ciertas variables de medición con otros valores de interés.

Tabla I. **Diseño experimental**

Reductor	pH <sub>1</sub>	pH <sub>2</sub>
Masa 1	V <sub>1.1</sub> , V <sub>2.1</sub> , V <sub>3.1</sub> , V <sub>4.1</sub> , V <sub>5.1</sub>	V <sub>1.2</sub> , V <sub>2.2</sub> , V <sub>3.2</sub> , V <sub>4.2</sub> , V <sub>5.2</sub>
Masa 2	V <sub>1.3</sub> , V <sub>2.3</sub> , V <sub>3.3</sub> , V <sub>4.3</sub> , V <sub>5.3</sub>	V <sub>1.4</sub> , V <sub>2.4</sub> , V <sub>3.4</sub> , V <sub>4.4</sub> , V <sub>5.4</sub>
Masa 3	V <sub>1.5</sub> , V <sub>2.5</sub> , V <sub>3.5</sub> , V <sub>4.5</sub> , V <sub>5.5</sub>	V <sub>1.6</sub> , V <sub>2.6</sub> , V <sub>3.6</sub> , V <sub>4.6</sub> , V <sub>5.6</sub>

Fuente: elaboración propia.



### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1. Cristalización**

Es una técnica de separación y purificación empleada para producir una amplia variedad de materiales. Puede ser definida como un cambio de fase en el que se obtiene un producto sólido cristalino a partir de una solución. Virtualmente todos los procesos industriales de cristalización involucran soluciones (9-1). Los cristales son sólidos en los cuales los átomos, iones o moléculas están arreglados en un patrón periódico y repetitivo que se extiende en 3 dimensiones.

Mientras que todos los cristales son sólidos, no todos los sólidos son cristales. Materiales que tienen un ordenamiento de corto alcance en lugar de un ordenamiento de largo alcance, como el vidrio, son sólidos no cristalinos. Adicionalmente algunos materiales pueden formar cristales de la misma composición pero con sistemas cristalinos diferentes, es decir con diferente estructura tridimensional.

##### **3.1.1. Redes y sistemas cristalinos**

Los cristales tienen una estructura tridimensional periódica y repetitiva. Si se omiten los átomos, iones o moléculas que conforman el cristal y se representa éste último como una red de puntos de tal forma que cada punto tenga un entorno idéntico, se puede emplear esta red de puntos para caracterizar el cristal. Dentro de la red de puntos existen 3 dimensiones espaciales características  $a$ ,  $b$  y  $c$  y tres ángulos característicos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ . Estas

longitudes y ángulos son conocidos como los parámetros de la red. Si se construye una sola celda con estas magnitudes, a ésta se le conoce como la celda unitaria (9-33).

Existen diferentes arreglos posibles de redes de puntos y celdas unitarias que se pueden construir. En 1848, Bravais demostró que existen únicamente 14 redes de puntos que se pueden realmente construir (9-33). Estas 14 redes de puntos se pueden dividir en 7 categorías llamadas sistemas cristalinos. Los sistemas cristalinos se describen en la tabla II. La red de Bravais para el sulfato de sodio anhidro, es ortorrómbica y la del sulfato de sodio decahidratado es monoclinica (7-91).

Tabla II. **Sistemas cristalinos**

<b>Sistema</b>	<b>Longitudes axiales y ángulos</b>	<b>Red de Bravais</b>
Cúbico	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simple Centrado en el cuerpo Centrado en las caras
Tetragonal	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simple Centrado en el cuerpo
Ortorrómbico	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simple Centrado en el cuerpo Centrado en la base Centrado en las caras
Romboédrico	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Simple
Hexagonal	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Simple
Monoclinico	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	Simple Centrado en la base
Triclinico	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Simple

Fuente: Mullin, p.8.



### 3.1.2. Nucleación

La cristalización puede concebirse como un proceso de 2 etapas. La primera, es la separación de fases, es decir la formación de nuevos cristales. La segunda, es el crecimiento de estos cristales para formar cristales de mayor tamaño. A estas etapas se les conoce como nucleación y crecimiento respectivamente.

Una condición necesaria para que se dé la cristalización, es que se cuente con una solución supersaturada (9-44). Una solución supersaturada no está en equilibrio. Para eliminar la supersaturación y estar en equilibrio, ocurre la cristalización. Una vez iniciada la cristalización, la supersaturación puede ser removida por una combinación de nucleación y crecimiento. La relación entre nucleación y crecimiento, determina el tamaño de los cristales y la distribución de tamaños, por lo que es un factor determinante en la cristalización.

Las soluciones supersaturadas exhiben una zona metaestable en la que la cristalización usualmente no es espontánea (9-44). Cuando aumenta la supersaturación se llega a un punto en el que se da espontáneamente la nucleación. A esto se le conoce como límite metaestable. Una definición precisa del límite metaestable, es la posición de los puntos donde  $\partial^2 G / \partial x^2 = 0$ . Este conjunto de puntos es conocido como la curva espinodal y es la frontera entre la región metaestable y la región inestable. El conocimiento del ancho de la zona metaestable, es importante en la cristalización porque ayuda a entender el comportamiento de la nucleación en cada sistema.

### **3.1.3. Crecimiento de los cristales**

En la nucleación, las moléculas del soluto forman las partículas más pequeñas que se pueden formar bajo las condiciones presentes en la solución. La segunda etapa de la cristalización requiere que estos núcleos crezcan en tamaño, añadiendo partículas de la solución supersaturada. A esto se le conoce como crecimiento.

Tanto la nucleación como el crecimiento controlan la distribución final del tamaño de partícula obtenido. Además las condiciones y la razón de crecimiento del cristal, repercuten en la pureza final del producto.

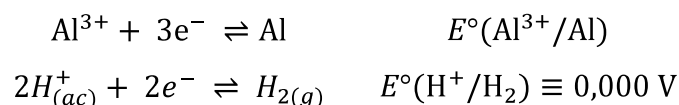
La razón de crecimiento del cristal se describe usualmente como el cambio en la magnitud de una dimensión del cristal con respecto del tiempo. A esto se le conoce como la tasa de crecimiento lineal. Esto se debe a que los cristales poseen diferentes caras que pueden crecer a diferentes velocidades. Por ello, una expresión fundamental de la tasa de crecimiento es la tasa de crecimiento lineal de una cara en particular. Esta tasa se define como el crecimiento de la cara en la dirección normal a esta cara (9-53).

### **3.2. Electroquímica**

Es la rama de la ciencia que trata la relación entre la corriente eléctrica (o potencial eléctrico) y los sistemas químicos. Abarca un buen número de áreas, incluyendo la física electroquímica, la electroquímica analítica, la bioelectroquímica y la electroquímica orgánica. También abarca áreas aplicadas como corrosión, baterías, pilas de combustible y conversión de energía solar (10-1).

### 3.2.1. Potenciales estándar de semicelda

Una celda electroquímica está compuesta por dos semiceldas electroquímicas. A cada semicelda se le puede asignar un potencial de semicelda, el potencial de la celda es la suma de los potenciales de semicelda. La forma estándar de realizar este cálculo es usando potenciales estándar de reducción y la escala de hidrógeno (el potencial estándar de reducción de los iones hidrógeno con a dihidrógeno se define arbitrariamente como cero) (10-7). Al electrodo (semicelda), donde se produce la reducción de iones hidrógeno a hidrógeno gaseoso se le llama el electrodo estándar de hidrógeno. A continuación se muestra un ejemplo de una celda compuesta por una semicelda de  $\text{Al}^{3+}/\text{Al}$  conectada al electrodo estándar de hidrógeno:



Donde:  $E^{\circ}$  es un potencial estándar de electrodo. El voltaje medido en esta celda es de -1,676 voltios por lo que este valor corresponde al potencial estándar de reducción del electrodo  $\text{Al}^{3+}/\text{Al}$  (3-124). El potencial estándar del zinc es -0,7618 voltios.

### 3.2.2. Constantes de equilibrio

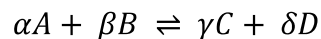
Cuando todos los reactivos en una reacción de oxidorreducción reversible están en sus estados estándar (con actividad igual a la unidad), el potencial de la celda es su valor estándar  $E^{\circ}$ . Si la reacción ocurre cuando pasan  $n$  faradios, entonces el cambio de energía libre de Gibbs estándar  $\Delta G^{\circ}$  es igual a  $-nFE^{\circ}$ . Como  $\Delta G^{\circ}$ ; es igual a  $-RT \ln K$  entonces se deduce que:

$$nFE^\circ = RT \ln K \quad (1.1)$$

Donde K, es la constante de equilibrio de la reacción de la celda. A partir de la ecuación (1.1), el cálculo de la constante de equilibrio de la reacción de reducción del ion mercúrico con aluminio, da el valor  $3,68 \times 10^{254}$  y con zinc, es  $3,09 \times 10^{54}$ . Igualmente, la constante para la reducción de cromo (III) a cromo elemental con aluminio, es  $4,50 \times 10^{46}$  y con zinc, es 162,55.

### 3.2.3. Potenciales fuera del equilibrio y actividad de los electrones

Si los reactivos y los productos están en concentraciones o actividades arbitrarias el potencial estándar de la celda, es  $E$  y el cambio de energía libre de Gibbs correspondiente  $\Delta G$  es igual a  $-nFE$  (4-226). Para la reacción:



que se lleva a cabo en la celda con transferencia de  $n$  faradios se tiene que:

$$\begin{aligned} \Delta G &= \Delta G^\circ + RT \ln \frac{a_C^\gamma a_D^\delta}{a_A^\alpha a_B^\beta} \\ -nFE &= -nFE^\circ + RT \ln \frac{a_C^\gamma a_D^\delta}{a_A^\alpha a_B^\beta} \\ \therefore E &= E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_C^\gamma a_D^\delta}{a_A^\alpha a_B^\beta} \end{aligned} \quad (1.2)$$

Si se define  $Q$  como

$$Q = \frac{a_C^\gamma a_D^\delta}{a_A^\alpha a_B^\beta}$$

entonces la ecuación (1.2) se puede reescribir como

$$E = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln Q \quad (1.3)$$

La ecuación (1.3) es la ecuación general para calcular el potencial de cualquier celda reversible a temperatura constante y en donde la actividad de cada reactivo y producto tiene un valor arbitrario  $a_A^\alpha$ ,  $a_B^\beta$ ,  $a_C^\gamma$  y  $a_D^\delta$  (4-226).

Los potenciales calculados mediante la ecuación (1.3), permiten calcular la actividad de los electrones durante el transcurso de una reacción de oxidorreducción. Sin embargo esta magnitud se reporta como el logaritmo en base 10 del inverso de la actividad de los electrones o pE. Partiendo de la reacción de una semicelda y usando la ecuación (3.1) se puede determinar que:

$$pE = \frac{E}{2.303RTF^{-1}} \quad (1.4)$$

### 3.3. Amalgamas

Es la aleación de un metal con mercurio, el nombre amalgama se debe a los alquimistas, y significa plasticidad o blandura, porque el mercurio en exceso disuelve un gran número de metales.

El mercurio forma amalgamas con casi todos los metales. Se une directamente y con relativa facilidad, en frío o en caliente; con potasio, sodio, bario, estroncio, calcio, magnesio, cinc, cadmio, estaño, antimonio, plomo, bismuto, plata y oro (6-182), también se une directamente pero con mayor dificultad con aluminio, cobre y paladio.

Las amalgamas son líquidas cuando predomina el mercurio; sólidas cuando predomina el metal amalgamado, aunque se pueden fundir fácilmente. Presentan brillo y estructura metálicas. Forman combinaciones metálicas cristalizadas, con composición constante cuando el mercurio está en exceso (6-183).

### 3.4. Metales pesados en lodos

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), regula en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 (5-13) la concentración máxima de cromo, mercurio y otros metales pesados que se tolera en aguas residuales y lodos vertidos por industrias y domicilios. Estos valores se presentan en la tabla III, estos serán la referencia para establecer las concentraciones máximas que se permitirán en los residuos y cristales obtenidos al final del proceso.

Tabla III. Límites máximos de metales pesados en lodos

Disposición Final	En Suelo ppm <sup>a</sup>	Rellenos Sanitarios ppm <sup>a</sup>	Confinamiento ppm <sup>a</sup>
Arsénico	50	100	>100
Cadmio	50	100	>100
Cromo	1500	3000	>3000
Mercurio	25	50	>50
Plomo	500	1000	>1000

a: partes por millón

Fuente: MARN, p. 13.

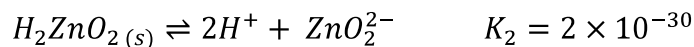
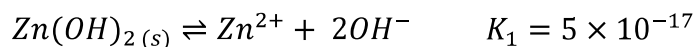
### 3.5. Equilibrio de solubilidad del aluminio y zinc

Los hidróxidos pueden comportarse como ácidos o álcalis en función de la naturaleza del catión. Los cationes menos electronegativos como el sodio y el potasio, forman álcalis fuertes, mientras que los cationes más electronegativos como el cloro y el azufre, forman ácidos fuertes. Sin embargo, ciertos cationes forman hidróxidos que reaccionan tanto con ácidos como con álcalis. Los cationes que poseen esta dualidad, se denominan anfóteros.

El comportamiento ácido, alcalino o anfotérico de un hidróxido, se debe a la capacidad del catión de polarizar el grupo  $OH^-$  (2-201). Los cationes menos electronegativos no son capaces de polarizar este grupo, y por ende el enlace entre el grupo  $OH^-$  y el catión es iónico. Inversamente, los cationes más electronegativos polarizan este grupo, y forman enlaces covalentes. Los cationes anfóteros como el aluminio (III) polarizan débilmente el grupo  $OH^-$  y por lo tanto no poseen una estructura cristalina como los hidróxidos alcalinos ni una estructura polimérica como los hidróxidos ácidos.

#### 3.5.1. Solubilidad del hidróxido de zinc en función del pH

Para un estudio cuantitativo de los equilibrios involucrados cuando el hidróxido de zinc es suspendido en agua, se debe considerar la disociación del  $Zn(OH)_2$  como base y como ácido. Las reacciones de disociación pueden representarse por las ecuaciones:



asi como;



Combinando cada equilibrio de solubilidad del zinc con el equilibrio de disociación del agua, se puede obtener expresiones que den las concentraciones en equilibrio de las especies de zinc, como función de  $H^+$  o de  $OH^-$ . Para encontrar  $[Zn^{2+}]$ , se puede dividir la primera expresión de equilibrio con el cuadrado de la expresión de equilibrio de disociación del agua:

$$\frac{K_1}{K_w^2} = \frac{Zn^{2+} OH^{-2}}{H^{+2} OH^{-2}} = \frac{Zn^{2+}}{H^{+2}}$$

$$\frac{Zn^{2+}}{H^{+2}} = \frac{5 \times 10^{-17}}{1 \times 10^{-14}^2} = 5 \times 10^{11}$$

y resolviendo para  $[Zn^{2+}]$

$$Zn^{2+} = 5 \times 10^{11} H^+ \quad (1.5)$$

Para encontrar  $[ZnO_2^{2-}]$ , se puede rearrreglar la segunda expresión de equilibrio y se obtiene lo siguiente:

$$K_2 = H^{+2} ZnO_2^{2-}$$

$$2 \times 10^{-30} = H^{+2} ZnO_2^{2-}$$

y resolviendo para  $[ZnO_2^{2-}]$

$$ZnO_2^{2-} = \frac{2 \times 10^{-30}}{H^{+2}} \quad (1.6)$$



Si se desprecian los pares iónicos disueltos en la solución, se tiene que la solubilidad del hidróxido de zinc es:

$$S = Zn^{2+} + ZnO_2^{2-} \quad (1.7)$$

$$S = 5 \times 10^{11} H^+ + \frac{2 \times 10^{-30}}{H^{+ 2}} \quad (1.8)$$

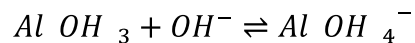
### 3.5.2. Solubilidad del hidróxido de aluminio en función del pH

Si se disuelve hidróxido de aluminio ( $Al(OH)_3$ ) en una solución ácida y se agrega una solución con un hidróxido, el pH aumenta hasta que el  $Al(OH)_3$  precipita. Usando el producto de solubilidad del aluminio se tiene:

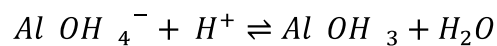
$$Al^{3+} = \frac{K_{ps}}{OH^{- 3}} = \frac{K_{ps}}{K_w^3} H^{+ 3} = \frac{10^{-32}}{10^{-14 3}} H^{+ 3}$$

$$Al^{3+} = 10^{10} H^{+ 3}$$

Como el  $Al(OH)_3$  es una sustancia anfótera, entonces en medio alcalino se tiene el equilibrio:



El valor de  $[Al(OH)_4^-]$  se puede obtener mediante el equilibrio



que está caracterizado por una constante  $K$ :

$$K = \frac{Al(OH)_4^-}{H^+} = 10^{-11}$$

Esta constante es determinable experimentalmente y su valor es conocido para muchas reacciones. Entonces:

$$Al(OH)_4^- = \frac{10^{-11}}{H^+}$$

Si se desprecian los pares iónicos de  $Al(OH)_3$  disueltos, la solubilidad del hidróxido de aluminio es:

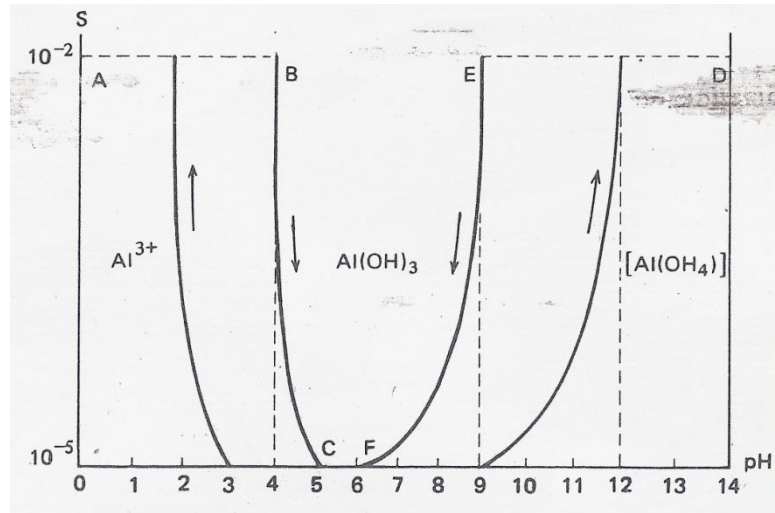
$$S = Al^{3+} + Al(OH)_4^-$$

Por lo que la solubilidad en función del pH es:

$$S = 10^{10} H^+{}^3 + \frac{10^{-11}}{H^+} \quad (1.9)$$

Al graficar la ecuación anterior, se obtienen las curvas BC y EF representadas en la figura 2. Nótese sin embargo, que aparecen 2 ramificaciones adicionales en esta figura. La ramificación derecha representa la redisolución de  $Al(OH)_3$  formado a partir de una solución de  $Al^{3+}$ . La ramificación izquierda representa la redisolución de  $Al(OH)_3$  formado a partir de una solución de  $Al(OH)_4^-$ . Este fenómeno se produce cuando se deja flocular el  $Al(OH)_3$ , por lo que requiere un pH diferente para redisolverse.

Figura 2. Solubilidad del  $\text{Al(OH)}_3$  en función del pH



Fuente: Araneo, p. 204.



## 4. RESULTADOS

### 4.1. Resultados compilados en el análisis de la concentración de cromo

La tabla IV, muestra la concentración de cromo en los cristales de sulfato de sodio al final del proceso de purificación. Las condiciones del proceso (el reductor empleado, la cantidad de reductor y el pH del proceso), también se encuentran en la tabla. La tabla V, muestra el resumen de los cálculos del análisis de varianza de los datos presentados en la tabla IV. La probabilidad de rechazar la hipótesis nula, es de 0,05.

La tabla VI compara el promedio de la concentración de cromo (véase la tabla IV) en los cristales de sulfato de sodio después de ser tratados, y la concentración de cromo en los cristales antes de ser tratados (véase la tabla XXIV), estableciendo la probabilidad que la diferencia entre ambos valores sea insignificante mediante la prueba t de *student* de muestra única.

Tabla IV. **Tabulación de la concentración de cromo residual en los cristales de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> refinados en función de los factores**

corrida	Factor 1 reductor	Factor 2 equivalentes	Factor 3 pH	C. Cromo (ug/g)
1	zinc	3,82E-03	7,000	0,16
3	zinc	5,35E-03	7,000	0,6
5	zinc	6,88E-03	7,000	0,58
7	zinc	3,82E-03	2,200	0,54
9	zinc	5,35E-03	2,200	0,35
11	zinc	6,88E-03	2,200	0,58
13	aluminio	3,82E-03	2,200	0,45

Continuación de la tabla IV.

15	aluminio	5,35E-03	2,200	0,36
17	aluminio	6,88E-03	2,200	0,11
19	aluminio	3,82E-03	7,000	0,26
21	aluminio	5,35E-03	7,000	0,24
23	aluminio	6,88E-03	7,000	0,38
2	zinc	3,82E-03	7,000	0,46
4	zinc	5,35E-03	7,000	0,3
6	zinc	6,88E-03	7,000	0,11
8	zinc	3,82E-03	2,200	0,08
10	zinc	5,35E-03	2,200	0,47
12	zinc	6,88E-03	2,200	0,17
14	aluminio	3,82E-03	2,200	0,26
16	aluminio	5,35E-03	2,200	0,89
18	aluminio	6,88E-03	2,200	0,43
20	aluminio	3,82E-03	7,000	0,12
22	aluminio	5,35E-03	7,000	0,61
24	aluminio	6,88E-03	7,000	0,78
$x$				0,3871 (r=2)

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla XXV.

Tabla V. **Tabulación para la evaluación de la significatividad de los factores en la concentración de cromo residual**

	SC	gl	CM	F	Fc (p=0,05)
total	1,09970	23			
F1	0,01000	1	0,01000	0,15684	4,75
F2	0,13911	2	0,06955	1,09040	3,89
F3	0,00034	1	0,00034	0,00529	4,75
F1-F2	0,01931	2	0,00965	0,15135	3,89
F1-F3	0,00070	1	0,00070	0,01104	4,75
F2-F3	0,06528	2	0,03264	0,51166	3,89
F1-F2-F3	0,09951	2	0,04975	0,78000	3,89
error	0,76545	12	0,06379		

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla XXXIV.

Tabla VI. **Probabilidad que la diferencia entre el promedio de la concentración de cromo residual y la concentración de cromo inicial sea insignificante**

Variable	Valor
$x$	0,387083
$\mu_0$	101
s	0,218662
t	2254,172
p	<0.0001

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla XXXV.

#### 4.2. **Resultados compilados en el análisis de la concentración de mercurio**

La tabla VII, muestra la concentración de mercurio en los cristales de sulfato de sodio al final del proceso de purificación, así como las condiciones del proceso. La tabla VIII, muestra el resumen de los cálculos del análisis de varianza de los datos presentados en la tabla VII. La probabilidad de rechazar la hipótesis nula, es de 0,05. La tabla IX, compara la concentración de mercurio inicial (antes de la purificación) y final (después de ser purificados), estableciendo la probabilidad que la diferencia entre ambos valores no sea significativa.

Tabla VII. **Tabulación de la concentración de mercurio residual en los cristales de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  refinados en función de los factores**

corrida	Factor 1 reductor	Factor 2 equivalentes	Factor 3 pH	C. Mercurio (ug/g)
1	zinc	3,82E-03	7,000	15,1

Continuación de la tabla VII.

3	zinc	5,35E-03	7,000	431
5	zinc	6,88E-03	7,000	306
7	zinc	3,82E-03	2,200	67
9	zinc	5,35E-03	2,200	20
11	zinc	6,88E-03	2,200	41
13	aluminio	3,82E-03	2,200	164
15	aluminio	5,35E-03	2,200	164
17	aluminio	6,88E-03	2,200	94
19	aluminio	3,82E-03	7,000	212
21	aluminio	5,35E-03	7,000	47
23	aluminio	6,88E-03	7,000	142
2	zinc	3,82E-03	7,000	93,8
4	zinc	5,35E-03	7,000	37,3
6	zinc	6,88E-03	7,000	2,01
8	zinc	3,82E-03	2,200	15
10	zinc	5,35E-03	2,200	99
12	zinc	6,88E-03	2,200	10
14	aluminio	3,82E-03	2,200	40
16	aluminio	5,35E-03	2,200	140
18	aluminio	6,88E-03	2,200	130
20	aluminio	3,82E-03	7,000	59
22	aluminio	5,35E-03	7,000	276
24	aluminio	6,88E-03	7,000	546
$x$				131,3 (r=2)

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla XXXVI.

Tabla VIII. **Tabulación para la evaluación de la significatividad de los factores en la concentración de mercurio residual**

	SC	gl	CM	F	Fc (p=0,05)
total	438577,6	23			
F1	32031,7	1	32031,7	1,47889	4,75
F2	27921,5	2	13960,8	0,64456	3,89
F3	58332,7	1	58332,7	2,69320	4,75
F1-F2	16479,2	2	8239,6	0,38042	3,89
F1-F3	288,5	1	288,5	0,01332	4,75
F2-F3	24706,9	2	12353,5	0,57035	3,89
F1-F2-F3	18905,4	2	9452,7	0,43643	3,89
error	259911,7	12	21659,3		

Fuente: elaboración propia, con resultados de la XLV.



Tabla IX. **Probabilidad que la diferencia entre el promedio de la concentración de mercurio residual y la concentración de mercurio inicial sea insignificante**

Variable	Valor
$x$	131,3004
$\mu_0$	2541
s	138,0891
t	85,4888
p	<0.0001

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla XLVI.

#### 4.3. Resultados compilados en el análisis de metales pesados

La tabla X, muestra el contenido de cromo y mercurio combinado en los cristales de sulfato de sodio. Debido a que Merck KGaA, reporta el contenido de metales pesados como porcentaje de plomo, se calculó la masa de plomo que equivale a las cantidades presentadas en las tablas IV y VII y se sumó ambos valores para obtener el porcentaje de plomo equivalente en los cristales. El promedio de la tabla X se comparó con el máximo permitido por Merck en el sulfato de sodio anhidro puris. La comparación y la probabilidad, de que la diferencia entre ambos valores no sea significativa está en la tabla XI.

Tabla X. **Porcentaje de metales pesados residuales en cristales de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  reportados como porcentaje de plomo**

corrida	Porcentaje de metales (% de Pb)
1	0,00162
2	0,00987
3	0,04476
4	0,00397
5	0,03184
6	0,00025
7	0,00714
8	0,00158
9	0,00221
10	0,01041
11	0,00447
12	0,00110
13	0,01712
14	0,00424
15	0,01708
16	0,01482
17	0,00975
18	0,01360
19	0,02200
20	0,00614
21	0,00495
22	0,02875
23	0,01482
24	0,05671
$x$	0,013717

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla XLVII.

Tabla XI. **Probabilidad que la diferencia entre el promedio del porcentaje de metales pesados residual y el porcentaje de metales pesados en el reactivo puris sea insignificante**

Variable	Valor
$x$	0,013717
$\mu_0$	0,001
$s$	0,01432
$t$	4,3506
$p$	0,0002

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla XLVIII.

#### 4.4. Resultados compilados en el análisis del porcentaje de carbonatos

La tabla XII, muestra el porcentaje de carbonatos en los cristales de sulfato de sodio al final de proceso de purificación, así como las condiciones del proceso. La tabla XIII, muestra el resumen de los cálculos del análisis de varianza de los datos presentados en la tabla XII. La probabilidad de rechazar la hipótesis nula, es de 0,05. La tabla XIV, compara la concentración de mercurio inicial (antes de la purificación) y final (después de ser purificados), estableciendo la probabilidad que la diferencia entre ambos valores no sea significativa.

Tabla XII. **Tabulación del porcentaje de carbonatos residual en los cristales de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> refinados en función de los factores<sup>α</sup>**

corrida	Factor 1 reductor	Factor 2 equivalentes	volumen (ml)	moles (mol)	masa (g)	masa muestra	porcentaje
1	zinc	3,82E-03	15,2	0,00015	0,00912	0,851	1,072
Continuación de la tabla XII.							
3	zinc	5,35E-03	10,0	0,00010	0,00600	0,853	0,703
5	zinc	6,88E-03	17,5	0,00018	0,01050	0,848	1,238
2	zinc	3,82E-03	8,3	0,00008	0,00498	0,85	0,586
4	zinc	5,35E-03	13,0	0,00013	0,00780	0,851	0,917
6	zinc	6,88E-03	5,4	0,00005	0,00324	0,852	0,380
19	aluminio	3,82E-03	16,0	0,00016	0,00960	0,849	1,131
21	aluminio	5,35E-03	34,1	0,00034	0,02046	0,85	2,407
23	aluminio	6,88E-03	12,5	0,00013	0,00750	0,851	0,881
20	aluminio	3,82E-03	23,4	0,00023	0,01404	0,851	1,650
22	aluminio	5,35E-03	12,0	0,00012	0,00720	0,85	0,847
24	aluminio	6,88E-03	17,9	0,00018	0,01074	0,852	1,261
						x	1,090 (r=2)

<sup>α</sup> Se excluyó el pH como factor (el ion CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> no existe a pH 2,2)

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla XLIX.

Tabla XIII. **Tabulación para la evaluación de la significatividad de los factores en el porcentaje de carbonatos residual**

	SC	gl	CM	F	Fc (p=0,05)
total	3,14187	11			
F1	0,89707	1	0,89707	2,78493	5,99
F2	0,15752	2	0,07876	0,24451	5,14
F1-F2	0,15459	2	0,07730	0,23996	5,14
error	1,93269	6	0,32212		

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla LIV.

Tabla XIV. **Probabilidad que la diferencia entre el promedio del porcentaje de carbonatos residual y el porcentaje de carbonatos inicial sea insignificante**

Variable	Valor
$x$	1,090
$\mu_0$	4,121
s	0,534439
t	19,6463
p	<0.0001

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla LV.

#### 4.5. **Resultados compilados en el análisis de la cantidad de agua de cristalización**

La tabla XV, muestra la cantidad de agua de cristalización en los cristales de sulfato de sodio al final de proceso de purificación, así como las condiciones del proceso. La tabla XVI, muestra el resumen de los cálculos del análisis de

varianza de los datos presentados en la tabla XV. La probabilidad de rechazar la hipótesis nula, es de 0,05.

Tabla XV. **Evaluación experimental del agua de cristalización en los cristales refinados de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**

<b>corrida</b>	<b>Factor 1 reductor</b>	<b>Factor 2 equivalentes</b>	<b>Factor 3 pH</b>	<b>mol H<sub>2</sub>O/mol Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>
1	zinc	3,82E-03	7,000	0
2	zinc	3,82E-03	7,000	8
3	zinc	5,35E-03	7,000	11
4	zinc	5,35E-03	7,000	1
5	zinc	6,88E-03	7,000	1
6	zinc	6,88E-03	7,000	0
7	zinc	3,82E-03	2,200	0
8	zinc	3,82E-03	2,200	8
9	zinc	5,35E-03	2,200	0
10	zinc	5,35E-03	2,200	0
11	zinc	6,88E-03	2,200	0
12	zinc	6,88E-03	2,200	0
13	aluminio	3,82E-03	2,200	3
14	aluminio	3,82E-03	2,200	1
15	aluminio	5,35E-03	2,200	0
16	aluminio	5,35E-03	2,200	0
17	aluminio	6,88E-03	2,200	1
18	aluminio	6,88E-03	2,200	2
19	aluminio	3,82E-03	7,000	9
20	aluminio	3,82E-03	7,000	3
21	aluminio	5,35E-03	7,000	10
22	aluminio	5,35E-03	7,000	4
23	aluminio	6,88E-03	7,000	9
24	aluminio	6,88E-03	7,000	1
			<i>x</i>	3,021 (r=2)

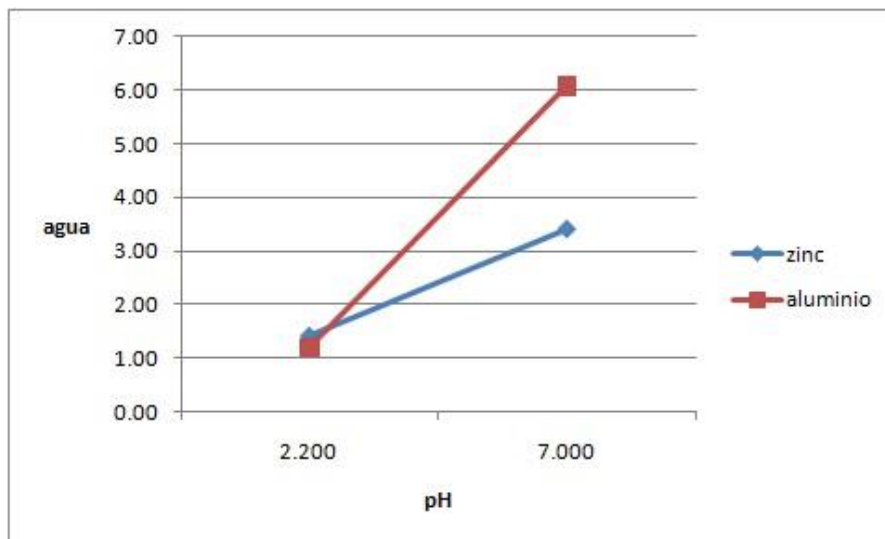
Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla LVI.

Tabla XVI. **Tabulación para la evaluación de la significatividad de los factores en la cantidad de agua de cristalización**

	SC	gl	CM	F	Fc (p=0,05)
total	325,1666	23			
F1	9,0657	1	9,06568	0,61926	4,75
F2	17,2955	2	8,64777	0,59071	3,89
F3	70,3641	1	70,36406	4,80640	4,75
F1-F2	9,8825	2	4,94123	0,33752	3,89
F1-F3	12,5651	1	12,56507	0,85829	4,75
F2-F3	26,3121	2	13,15603	0,89866	3,89
F1-F2-F3	4,0059	2	2,00294	0,13682	3,89
error	175,6759	12	14,63966		

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla LXV.

Figura 3. **Evaluación de la cantidad de agua de cristalización en función del pH y del reductor**



Fuente: elaboración propia

#### 4.6. Resultados compilados en el análisis del porcentaje de sulfato de sodio

La tabla XVII, muestra el porcentaje de sulfato de sodio en los cristales refinados al final de proceso de purificación, así como las condiciones del proceso. La tabla XVIII, muestra el resumen de los cálculos del análisis de varianza de los datos presentados en la tabla XVII. La probabilidad de rechazar la hipótesis nula, es de 0,05.

La tabla XIX, muestra el valor de la estadística q (necesario para el cálculo de la diferencia honesta significativa), la diferencia honesta significativa (con una probabilidad de 0,05 de rechazar la hipótesis nula) y la diferencia entre los promedios de la interacción entre el tipo de reductor y el pH de la reacción. La tabla XX muestra los promedios de la interacción entre el tipo de reductor y el pH de la reacción junto con los promedios de estos factores considerados individualmente. Esta tabla permite ver si la diferencia honesta significativa aporta información adicional al aportado por el análisis de varianza. La figura 4 muestra la gráfica de los promedios de la interacción entre el tipo de reductor y el pH de la reacción con el fin de visualizar la información de la tabla XX.

Tabla XVII. **Tabulación del porcentaje de sulfato de sodio en los cristales refinados en función de los factores**

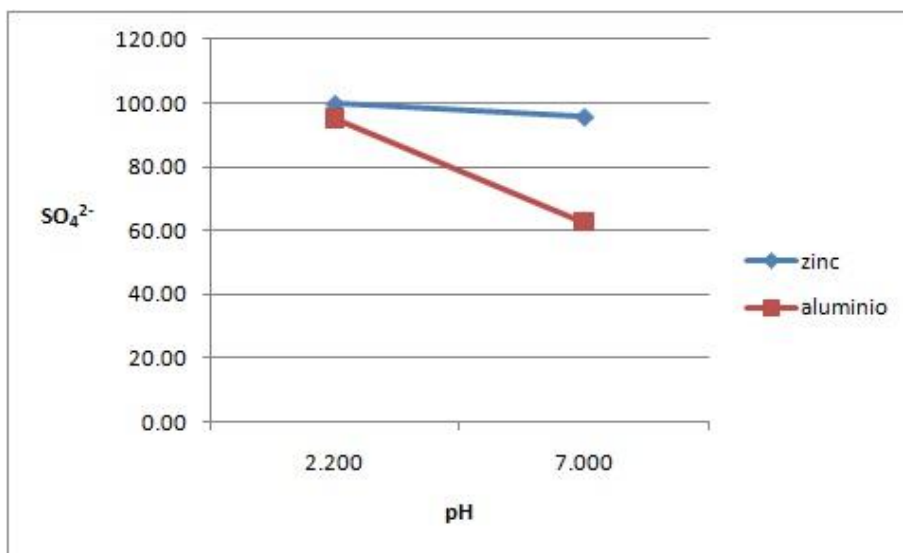
corrida	Factor 1 reductor	Factor 2 equivalentes	Factor 3 pH	Sulfato de sodio (% p/p)
1	zinc	3,82E-03	7,000	100,55
2	zinc	3,82E-03	7,000	100,55
3	zinc	5,35E-03	7,000	75,41
4	zinc	5,35E-03	7,000	94,63
5	zinc	6,88E-03	7,000	99,07
6	zinc	6,88E-03	7,000	103,51
7	zinc	3,82E-03	2,200	100,55
8	zinc	3,82E-03	2,200	91,68
9	zinc	5,35E-03	2,200	103,51

Continuación de la tabla XVII.

10	zinc	5,35E-03	2,200	100,55
11	zinc	6,88E-03	2,200	99,07
12	zinc	6,88E-03	2,200	103,51
13	aluminio	3,82E-03	2,200	100,55
14	aluminio	3,82E-03	2,200	100,55
15	aluminio	5,35E-03	2,200	90,20
16	aluminio	5,35E-03	2,200	100,55
17	aluminio	6,88E-03	2,200	88,72
18	aluminio	6,88E-03	2,200	90,20
19	aluminio	3,82E-03	7,000	53,23
20	aluminio	3,82E-03	7,000	65,06
21	aluminio	5,35E-03	7,000	45,84
22	aluminio	5,35E-03	7,000	62,10
23	aluminio	6,88E-03	7,000	51,75
24	aluminio	6,88E-03	7,000	97,59
			<i>x</i>	88,29 (r=2)

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla LXVI.

Figura 4. **Evaluación del porcentaje de sulfato de sodio en función del pH y del reductor**



Fuente: elaboración propia.



Tabla XVIII. **Tabulación para la evaluación de la significatividad de los factores en el porcentaje de sulfato de sodio**

	SC	gl	CM	F	F <sub>c</sub> (p=0,05)
total	7881,934	23			
F1	2132,574	1	2132,574	16,4505	4,75
F2	237,408	2	118,704	0,9157	3,89
F3	2022,525	1	2022,525	15,6015	4,75
F1-F2	0,547	2	0,273	0,0021	3,89
F1-F3	1204,806	1	1204,806	9,2937	4,75
F2-F3	475,727	2	237,864	1,8349	3,89
F1-F2-F3	252,713	2	126,357	0,9747	3,89
error	1555,634	12	129,636		

Fuente: elaboración propia, con resultados de la LXXV.

Tabla XIX. **Prueba de diferencia honesta significativa para la interacción 1 y 3**

Magnitud	Valor
q (3;12;0,05)	3,773
DHS	17,5378
1.3 <sup>α</sup> -3.3 <sup>α</sup>	4,68
3.3 <sup>α</sup> -3.1 <sup>α</sup>	32,53
1.3 <sup>α</sup> -1.1 <sup>α</sup>	4,19
1.1 <sup>α</sup> -3.1 <sup>α</sup>	33,02

<sup>α</sup> los números x.y representan los promedios de las corridas donde el nivel x y coinciden. Véase la tabla LXXXVIII

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla LXXVI.

Tabla XX. **Comparación de promedios de la interacción 1 y 3 con los promedios individuales de cada factor**

		factor 3		Promedio simple
		pH 7	pH 2.2	
factor 1	zinc	95,62*	99,81*	97,71*
	aluminio	62,60	95,13*	78,86
Promedio simple		79,11	97,47*	

\* los promedios resaltados son significativamente diferentes a los otros promedios del mismo grupo

Fuente: elaboración propia.

#### 4.7. Análisis de la cantidad de metales recuperados

La tabla XXI, muestra la cantidad de amalgama recuperada después de la operación de filtración (véase la figura 5). La tabla XXII, muestra el resumen de los cálculos del análisis de varianza de los datos presentados en la tabla XXI. La tabla XXIII, muestra la cantidad residual de reductor (zinc o aluminio) en los cristales purificados. Se tomó seis muestras, de forma que la cantidad de mercurio residual en los cristales fuese alta o baja.

Tabla XXI. **Cantidad de metales recuperados en la etapa de amalgamado en función de los factores**

Factor 1	Factor 2	Factor 3	masa	masa	masa	
corrida	reductor	equivalentes	pH	reductor (g)	amalgama (g)	metales (g)
1	zinc	3,82E-03	7,000	0,250	1,532	1,282
2	zinc	3,82E-03	7,000	0,250	1,528	1,278
3	zinc	5,35E-03	7,000	0,350	1,533	1,183
4	zinc	5,35E-03	7,000	0,350	1,221	0,871
5	zinc	6,88E-03	7,000	0,450	2,382	1,932

Continuación de la tabla XXI.

6	zinc	6,88E-03	7,000	0,450	1,711	1,261
7	zinc	3,82E-03	2,200	0,250	1,307	1,057
8	zinc	3,82E-03	2,200	0,250	1,513	1,263
9	zinc	5,35E-03	2,200	0,350	1,794	1,444
10	zinc	5,35E-03	2,200	0,350	1,580	1,23
11	zinc	6,88E-03	2,200	0,450	2,217	1,767
12	zinc	6,88E-03	2,200	0,450	1,463	1,013
13	aluminio	3,82E-03	2,200	0,103	0,950	0,847
14	aluminio	3,82E-03	2,200	0,103	0,751	0,648
15	aluminio	5,35E-03	2,200	0,144	0,874	0,73
16	aluminio	5,35E-03	2,200	0,144	1,116	0,972
17	aluminio	6,88E-03	2,200	0,186	1,334	1,148
18	aluminio	6,88E-03	2,200	0,186	1,159	0,973
19	aluminio	3,82E-03	7,000	0,103	1,586	1,483
20	aluminio	3,82E-03	7,000	0,103	1,068	0,965
21	aluminio	5,35E-03	7,000	0,144	1,729	1,585
22	aluminio	5,35E-03	7,000	0,144	0,765	0,621
23	aluminio	6,88E-03	7,000	0,186	0,994	0,808
24	aluminio	6,88E-03	7,000	0,186	1,590	1,404
					x	1,156875

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla LXXVIII.

Tabla XXII. **Tabulación para la evaluación de la significatividad de los factores en la cantidad de metales pesados recuperados**

	SC	gl	CM	F	Fc (p=0,05)
total	2,62805	23			
F1	0,48082	1	0,48082	3,99851	4,75
F2	0,20930	2	0,10465	0,87027	3,89
F3	0,10415	1	0,10415	0,86611	4,75
F1-F2	0,04918	2	0,02459	0,20449	3,89
F1-F3	0,09563	1	0,09563	0,79530	4,75
F2-F3	0,10719	2	0,05360	0,44571	3,89
F1-F2-F3	0,13879	2	0,06940	0,57711	3,89
error	1,44299	12	0,12025		

Fuente: elaboración propia, con resultados de la tabla LXXXVII.

Tabla XXIII. **Evaluación del porcentaje final del reductor utilizado para la purificación de sulfato de sodio en base al contenido de mercurio original**

corrida	reductor	mercurio	Porcentaje (% p/p)
2	Zinc	Alto	0,0082
3	Zinc	Alto	0,032
12	Zinc	Bajo	0,028
14	Aluminio	Bajo	0,0092
19	Aluminio	Alto	0,002
21	aluminio	Bajo	0,002

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Cantidad de contaminantes presentes antes del proceso**

Concentración	Valor
Cromo ( $\mu\text{g/g}$ )	101
Mercurio ( $\mu\text{g/g}$ )	2541
Carbonatos (% p/p)	4,121

Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 5.1. Criterios estadísticos

En las tablas V, VIII, XIII, XVIII y XVI., están resumidos los cálculos para el análisis de varianza de las variables de respuesta estudiadas (concentración de cromo, mercurio, porcentaje de carbonatos, sulfatos y cantidad de agua de cristalización). Se muestra la suma de cuadrados de cada factor, así como de interacciones posibles y del error entre muestras, sus grados de libertad y varianza.

A continuación se muestra el valor F de los factores y de sus interacciones. Este representa el cociente entre la varianza de un factor dado y la varianza del error entre muestras. Este cociente indica cuanta varianza existe en los datos de un factor con respecto del error entre muestras. Cuanto más elevado es este valor, más es la varianza que el factor ha contribuido a la varianza total del experimento y más significativo es su efecto en el experimento y en los resultados medidos en la variable de medición. Por el contrario cuanto más bajo es este valor, menos es la varianza que el factor ha contribuido a la varianza total y más probable es que los resultados obtenidos sean producto del azar.

Para determinar si los resultados son significativos o producto del azar, se emplea la distribución de probabilidad F. Esta función de probabilidad tiene como dominio  $0, +\infty$  y en ella se calcula el área bajo la curva que va desde el valor F calculado en el análisis de varianza hasta el infinito. Cuanto más grande sea el valor F, más pequeña es el área bajo la curva, y por ende, más pequeña

es la probabilidad de obtener resultados debidos al azar. La probabilidad máxima para que los resultados sean considerados significativos, se establece previamente por el experimentador.

En las tablas antes mencionadas no se ha calculado el valor de la probabilidad. Se ha determinado el valor de F, para el cual la probabilidad de que los resultados sean debido al azar, es igual a 0,05. A este valor se le ha denominado  $F_c$ . Por encima de este valor los resultados son considerados significativos; por debajo de este valor los resultados son considerados no significativos o producto del azar. El valor  $F_c$  calculado, es función no sólo de la probabilidad deseada. También depende de los grados de libertad del factor analizado y de los grados de libertad del error. Lo primero varía y lo segundo es común para todos los factores analizados.

## **5.2. Cromo**

En la tabla V, se analiza el efecto del reductor (factor 1), la cantidad de moles de reductor (factor 2), el pH (factor 3) y las interacciones de estos factores en la concentración de cromo presente en los cristales de sulfato de sodio. Comparando la estadística F de los factores e interacciones con los valores  $F_c$ , se observa que los primeros son inferiores a los segundos. Esto implica que la probabilidad de que los resultados sean debidos al azar, es mayor que 0,05 y por lo tanto se considera que ningún factor es estadísticamente significativo. De los resultados se puede inferir que la concentración final de cromo no se ve beneficiada o perjudicada por ninguna de las condiciones estudiadas.

En la tabla VI, se muestra el cálculo de la prueba t para muestra única de la concentración de cromo. El valor  $\bar{x}$ , representa el promedio general de la

concentración de cromo. Se toma el promedio general debido a que el análisis de varianza no muestra un efecto significativo de algún factor en los resultados, por lo que todos los valores de concentración de cromo son una muestra de la misma población y tienen un mismo promedio y desviación estándar. El valor  $s$ , es la desviación estándar de la muestra, el valor  $\mu_0$ , representa la concentración de cromo antes de tratar los cristales de sulfato de sodio. Éste se encuentra en la tabla XXIV.

Al calcular la probabilidad de que  $x$  y  $\mu_0$  sean iguales, se observa que esta es inferior a 0,0001, es decir que el promedio de la muestra y la concentración inicial de cromo son significativamente diferentes. Esto implica que la disminución en la concentración de cromo, es estadísticamente significativa, independientemente del reductor, la cantidad usada de este o el pH de la reacción. Al examinar los resultados de la tabla VI, se observa que el proceso de purificación disminuyó aproximadamente 259 veces la cantidad de cromo en los cristales.

### **5.3. Mercurio**

En la tabla VIII, se analiza el efecto del reductor (factor 1), la cantidad de moles de reductor (factor 2), el pH (factor 3) y las interacciones de estos factores en la concentración de mercurio. Comparando el valor F de los factores e interacciones con los valores  $F_c$ , se observa que los primeros son inferiores a los segundos. Esto implica que la probabilidad de que los resultados sean debidos al azar, es mayor que 0,05 y por lo tanto se considera que ningún factor es estadísticamente significativo. De los resultados se puede inferir que la concentración final de mercurio no se ve beneficiada o perjudicada por ninguna de las condiciones estudiadas.

En la tabla IX, se muestra el cálculo de la prueba t para muestra única de la concentración de mercurio. Como ningún factor y ninguna interacción es significativa, se compara el promedio general de la concentración de mercurio con la concentración de mercurio en el sulfato de sodio antes del proceso que se encuentra en la tabla XXIV (denominada  $\mu_0$  en la tabla IX).

Al hacer el cálculo de la probabilidad que ambos valores puedan ser considerados iguales, es inferior a 0,0001, lo cual quiere decir que la diferencia entre ambos valores es estadísticamente significativa. Esto implica que la disminución en la concentración de mercurio es estadísticamente significativa, independientemente de las condiciones del proceso. Al examinar los resultados de la tabla IX, se observa que el proceso de purificación disminuyó aproximadamente 19 veces la cantidad de mercurio en los cristales.

#### **5.4. Cromo y mercurio como porcentaje de plomo**

La casa de productos químicos Merck, especifica que los cristales de sulfato de sodio puris deben contener como máximo 0,001 por ciento de metales pesados, reportados como porcentaje de plomo. En la tabla X, se encuentra el porcentaje de plomo en el sulfato de sodio que equivale al porcentaje combinado de cromo y mercurio en cada corrida realizada. En la tabla XI, se muestra el cálculo de la prueba t para muestra única donde se compara el promedio de los valores de la tabla X con el valor especificado por Merck.

La probabilidad que ambos valores sean estadísticamente iguales es 0,0002, lo cual quiere decir que la diferencia entre ambos valores es significativa. Esto implica que los cristales de sulfato de sodio obtenidos con el



proceso empleado tienen apreciablemente más metales pesados (14 veces más) que el sulfato de sodio de Merck.

## **5.5. Carbonatos**

En la tabla XIII, se encuentra el resumen del análisis de varianza para el porcentaje de carbonatos en los cristales de sulfato de sodio tratados. A diferencia de los otros análisis de varianza realizados, para esta variable de respuesta sólo se analiza el efecto del reductor y de la cantidad de este. Todos los datos provienen de las corridas a pH 7,0. A pH 2,2 el ion carbonato se convierte por completo en anhídrido carbónico y no se puede medir por titulación, y por ese motivo se excluye del análisis de varianza. A pH 7,0 se observa que ningún factor influye significativamente en el porcentaje final de carbonatos.

En la tabla XIV, se muestra el cálculo de la prueba t para muestra única del porcentaje de carbonatos. Como ningún factor afecta significativamente el porcentaje de carbonatos, se compara el promedio de las corridas con el porcentaje de carbonatos en los cristales sin tratar que se encuentra la tabla XXIV. El cálculo de la probabilidad, de que ambos valores, puedan ser considerados estadísticamente iguales es inferior a 0,0001, lo cual implica que la diferencia entre ambos valores es significativa. Esto implica que a pH 7,0, el proceso redujo el porcentaje de carbonatos significativamente (aproximadamente 4 veces). Esto se debe a que el  $\text{CO}_2$ , que se forma a pH 7,0 y está en equilibrio con los carbonatos, se evapora y para estar en equilibrio se debe reemplazar el  $\text{CO}_2$  evaporado, desplazando así el equilibrio.

En la sección 5.4 se mencionó que Merck publica las especificaciones del sulfato de sodio puris. En ellas no se menciona un porcentaje máximo de carbonatos en los cristales, lo que implica que este reactivo contiene cantidades traza o no tiene carbonatos. Dado que se puede medir por titulación la cantidad de carbonatos, se considera significativa la cantidad de carbonatos presente a pH 7,0. Por el contrario, cuando el proceso se lleva a cabo a pH 2,2, el hecho que la cantidad de carbonatos no se pueda medir por titulación, indica que en esta condición el porcentaje de carbonatos está por debajo de lo medido a pH 7,0 y por ende cumpla con lo requerido por Merck.

## **5.6. Agua de cristalización**

En la tabla XVI, se encuentra el resumen del análisis de varianza para la cantidad de agua de cristalización en los cristales de sulfato de sodio tratados. En la tabla se observa que el valor F del reductor, y de la cantidad de moles de reductor, es inferior a su valor  $F_c$  respectivo. Esto implica que ninguno de estos factores es significativo, sin embargo el valor F del pH supera a su valor  $F_c$ , lo cual indica que este factor afecta significativamente la cantidad de agua de cristalización.

Para validar este resultado, normalmente se emplea el cálculo de la diferencia honesta significativa. Sin embargo este cálculo se puede obviar cuando sólo se tiene que comparar 2 promedios y se puede afirmar que su diferencia es estadísticamente significativa. Al examinar la tabla LVII, se puede concluir que al realizar el proceso a pH 7,0 se obtienen cristales con más agua de cristalización que a pH 2,2. En promedio, los cristales de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  tienen 4,73 aguas de cristalización a pH 7,0 y 1,31 a pH 2,2.

## 5.7. Sulfato de sodio

En la tabla XVIII, se encuentra el resumen del análisis de varianza para el porcentaje de sulfato de sodio en los cristales de sulfato de sodio tratados. Tras analizar los valores F y los valores Fc de los factores se advierte que el tipo de reductor y el pH afectan significativamente el porcentaje de sulfato de sodio en los cristales. No así la cantidad de reductor que se agregue.

Cómo se indicó en la sección anterior, normalmente es necesario validar lo significativo de los resultados, calculando la diferencia honesta significativa pero como en ambos casos, sólo se comparan 2 promedios, entonces no es necesario este cálculo. En la tabla LXVII, se observa que el porcentaje de sulfato de sodio es mayor cuando el reductor, es el zinc y cuando el pH de la reducción es 2,2.

En la figura 4, se muestra la interacción entre el reductor y el pH al que se efectuó la reacción, cuando la reacción se efectuó a pH 2,2, los promedios del porcentaje de sulfato no difieren mucho si se usa zinc o aluminio como reductor, sin embargo, a pH 7,0 la diferencia entre usar zinc y aluminio es apreciable. El porcentaje de sulfatos es mayor cuando el reductor es el zinc. Al aumentar el pH, el promedio del porcentaje de sulfatos se mantiene estable si el reductor es el zinc. Sin embargo, cuando el reductor es el aluminio, el promedio de porcentaje de sulfatos disminuye notablemente cuando se aumenta el pH a 7,0. Al analizar el valor F y Fc de esta interacción, se observa que el primero es mayor que el segundo. Esto implica que esta interacción sí afecta significativamente los resultados.

Como deben compararse 4 promedios, es necesario calcular la diferencia honesta significativa. Este cálculo requiere calcular primero el valor q de la

interacción. Este valor se calcula a partir de la distribución studentizada  $q$ . Este valor depende del número de promedios que se pueden comparar sin confusión, los grados de libertad de la componente de error del análisis de varianza y la probabilidad deseada de que el resultado obtenido sea falso.

Cómo se tienen 4 promedios, las comparaciones posibles son 6. Sin embargo en 2 comparaciones hay confusión, esta es la comparación que se hace de promedios que no poseen un nivel en común en algún factor, es decir que no se puede comparar el promedio del porcentaje de sulfatos a pH 7,0 y con reductor empleado de aluminio con el promedio a pH 2,2 y con reductor empleado de zinc, se dice que hay confusión porque no se puede establecer si la diferencia se debe al uso de uno u otro reductor o a uno u otro valor de pH. Para interacciones con 2x2 niveles el número de promedios que se puede comparar sin confusión es 3.

Una vez calculado el valor  $q$ , se puede calcular la diferencia honesta significativa. Este valor representa la diferencia mínima necesaria para que 2 promedios sean considerados significativamente diferentes. En la tabla XIX, se muestra el valor  $q$  para 3 promedios a comparar, 12 grados de libertad en el error y una probabilidad de que el resultado sea falso de 0,05; la diferencia honesta significativa (DHS) y la diferencia de promedios sin confusión.

Los valores resaltados, son las diferencias entre promedios que superan la diferencia honesta significativa. El primer valor resaltado, representa la diferencia del promedio de reductor aluminio y pH 2,2 con el promedio de reductor aluminio y pH 7,0 (comparación de pH). El segundo valor resaltado representa la diferencia del promedio de reductor de zinc y pH 7,0 con el promedio de reductor aluminio y pH 7,0 (comparación de reductor).

Para poder interpretar los resultados de la tabla XIX, se creó la tabla XX. Esta última muestra los promedios de la interacción y los promedios de cada factor individualmente. Anteriormente se determinó que el reductor y el pH afectan significativamente los resultados; y que es mejor usar zinc que aluminio, toda vez que es mejor realizar la reacción a pH 2,2 que a pH 7,0. En la tabla XX, se observa que usar zinc y realizar la reacción a pH 2,2 no es significativamente mejor que usar zinc y realizar la reacción a pH 7,0.

Usar zinc y realizar la reacción a pH 2,2 tampoco es significativamente mejor que usar aluminio y realizar la reacción a pH 2,2. Sin embargo, usar zinc y realizar la reacción a pH 7,0 sí es significativamente mejor que usar aluminio y realizar la reacción a pH 7,0. También es significativamente mejor usar aluminio y realizar la reacción a pH 2,2 que usar aluminio y realizar la reacción a pH 7,0.

Teniendo en cuenta toda esta información, se puede concluir que se debe evitar usar aluminio y realizar la reacción a pH 7,0. Cuando se emplea aluminio y se realizó la reducción a pH 7,0, el porcentaje de sulfato de sodio promedio, es de 62,6 por ciento; en las condiciones restantes, el promedio se mantiene entre 95,1 por ciento y 99,8 por ciento.

Cabe advertir que la disminución en el porcentaje de sulfatos en estas condiciones, coincide con el aumento de agua de cristalización a pH 7,0 determinado en la sección anterior y con lo observado en la figura 3, donde se aprecia que cuando el pH es 7,0 y se emplea aluminio, la cantidad de agua de cristalización es máxima para esa interacción.

## 5.8. Síntesis

El proceso evaluado disminuye significativamente el cromo y el mercurio independientemente de la elección del reductor, la cantidad de reductor o el pH. Aunque la cantidad de ambos esté por encima de la especificación de sulfato de sodio puris, el sulfato de sodio obtenido puede clasificarse como grado industrial. Por el contrario, la cantidad de carbonatos en los cristales, la cantidad de agua de cristalización y el porcentaje de sulfatos en los cristales sí fueron afectados por el pH de la reacción.

A pH 7,0, la cantidad de agua de cristalización fue mayor, el porcentaje de sulfato de sodio fue menor y se detectó un residuo de carbonatos en los cristales purificados. A pH 2,2, la cantidad de agua de cristalización fue significativamente más baja, el porcentaje de sulfato de sodio estuvo siempre cerca del 100 por ciento y no se pudo detectar carbonatos residuales en los sulfatos. Por lo tanto, el mejor pH para realizar el proceso, es el segundo, aún cuando no afecte a todas las variables estudiadas.

La tabla XXI, muestra la cantidad de amalgama producida y la cantidad neta de metales eliminados en el proceso. Los metales fueron separados en la etapa de filtración. Los valores fueron determinados por gravimetría. Estos valores corroboran que el proceso propuesto funciona, separando los metales pesados del sulfato de sodio. La tabla XXII, muestra el análisis de varianza de los datos de la tabla XXI.

Se observa que el pH, el reductor y la cantidad de reductor no afectan significativamente la cantidad de metales recuperados. Sin embargo cabe destacar que la estadística F del reductor, es cercana a su valor  $F_c$ , esto hace pensar que si se aumenta el número de repeticiones, entonces se pueda

determinar que el reductor afecta de forma significativa el rendimiento de separación de los metales. Aumentar el número de repeticiones a 3, duplicaría los grados de libertad en los cuadrados medios del error. En la tabla LXXIX, se observa que el promedio de masa de metales recuperados para el zinc, es mayor que para el aluminio y posiblemente el zinc sea significativamente mejor que el aluminio.

La tabla XXIII, muestra la cantidad de reductor residual en los cristales de sulfato de sodio. La medición se realizó en corridas seleccionadas donde la cantidad de mercurio final fue alta o baja. En la tabla no se observa una correlación entre la cantidad de reductor residual y la relativa efectividad del proceso. Sin embargo se observa que la cantidad de reductor residual es mínima, lo cual indica que la adición de contaminantes a los cristales de sulfato de sodio, también lo es.

En la sección 3.4 del capítulo 3, se incluyó el límite máximo permitido de metales pesados en lodos establecido por el MARN. En la tabla III, se observa que el máximo de cromo que se puede verter en el suelo, es 1 500 partes por millón, que equivalen aproximadamente a 1 500 microgramos por gramo. Si se compara este valor con el promedio de cromo en los cristales purificados, estos tienen 3 876 veces menos cromo que lo especificado por el MARN, sin embargo, el máximo de mercurio que se puede verter en el suelo, es 25 partes por millón y los cristales purificados tienen en promedio 131,3 .

Al comparar cada corrida de la tabla VII, con el límite máximo de mercurio, se observa que no en todas las corridas se excede este límite. En particular, en las corridas 1, 6, 8, 9 y 12, la concentración de mercurio está por debajo. No obstante, para las corridas restantes, esto implica que si no fuese posible su reutilización, los cristales no se pueden verter en el suelo.

Uno de los resultados inesperados, fue el que la cantidad de reductor no influyó en la concentración de ambos metales. Aún cuando la cantidad de reductor está por encima de lo calculado estequiométricamente, es posible que sea necesario agregar más reductor para aumentar aún más el área de contacto entre el reductor y los iones metálicos.

Otro problema que afecta la eficacia de un reductor, es el fenómeno de pasivación. Este fenómeno se produce en metales propensos a oxidarse (como el zinc y el aluminio). Cuando un metal es susceptible de pasivarse, se forma en su superficie una capa de óxido que retrasa el contacto entre el metal y el oxidante. Finalmente, la estabilidad termodinámica del agua, limita el rango de potenciales en los que se puede trabajar; y metales como el zinc y el aluminio, bajo las condiciones adecuadas, pueden reaccionar con el agua para formar hidrógeno u oxígeno gaseosos.

Estos factores hacen conveniente que se realicen cálculos de minimización de energía libre de Gibbs, para determinar qué especies químicas intervienen en la reacción y determinar los rangos de pH y de potencial eléctrico dónde la reacción se produzca de forma óptima. Sin embargo, como se debe considerar el mayor número de especies químicas posibles (para descartar las que no intervengan y tomar en cuenta las que sí), el cálculo requiere el uso de programas especializados y tiempo para completar los cálculos.

Para simplificar los cálculos estadísticos, se mezcló los cristales a purificar con el fin de crear una mezcla homogénea. Sin embargo, el tamaño de partícula de los cristales es grande (con Mesh entre 2 y 6) por lo que obtener una mezcla homogénea es más difícil. Reducir el tamaño de partícula por debajo del Mesh 18 (aproximadamente 1 mm de abertura) permitiría obtener una mezcla mejor homogeneizada.



## CONCLUSIONES

1. El proceso evaluado para purificar los cristales de sulfato de sodio, disminuye significativamente la cantidad de cromo y mercurio, independientemente del reductor, la cantidad de reductor o el pH empleado para realizar la reacción. La concentración de cromo, es 259 veces más baja al final del proceso y la concentración de mercurio lo es 19 veces.
2. El proceso evaluado para purificar los cristales de sulfato de sodio, produce cristales de sulfato de sodio grado industrial y no purís, que es el nivel deseado de pureza.
3. El proceso evaluado elimina los carbonatos presentes con mayor eficacia cuando la reacción se realiza a pH 2,2, donde los carbonatos se transforman en anhídrido carbónico gaseoso.
4. La cantidad de agua de cristalización aumenta significativamente cuando la reacción se realiza a pH 7,0.
5. El aumento de agua de cristalización disminuye el porcentaje de sulfatos de los cristales obtenidos con el proceso evaluado.
6. El proceso evaluado produce un porcentaje de sulfato de sodio significativamente más bajo cuando simultáneamente se emplea aluminio como reductor y se realiza la reacción a pH 7,0.

7. El análisis estadístico demostró que el proceso evaluado, es efectivo al reducir la cantidad de cromo, mercurio y carbonatos presentes en el sulfato de sodio. Sin embargo, el proceso debe ser mejorado antes de implementarse para reducir aún más la concentración de mercurio debido a los requerimientos del MARN.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar el proceso con cantidades mayores de reductor o repetir el proceso con las cantidades estudiadas para generar cristales de sulfato de sodio con niveles de metales pesados más cercanos a los del reactivo puris.
2. Aumentar a 3 el número de repeticiones del experimento para mejorar la exactitud de la información compilada; esto duplica los grados de libertad en los cuadrados medios del error en el análisis de varianza.
3. Estudiar el proceso con mayor detenimiento únicamente a pH 2,2 para reducir el número de tratamientos y permitir la optimización del proceso para esta condición.
4. Los cristales de sulfato de sodio obtenidos son de grado industrial, que pueden ser empleados en el ensayo de solidez ASTM C88-05 que se realiza en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería o para el ensayo de durabilidad de roca ASTM D5240.
5. La cantidad de amalgama recuperada promedio (1,16 gramos), es aproximadamente 300 veces más pequeña que la cantidad de sulfato de sodio tratada en cada corrida (350 gramos), por lo que se puede encapsular en concreto de forma más económica.



## BIBLIOGRAFÍA

1. American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20a. ed. Estados Unidos : APHA, 1999. 1220 p. ISBN: 0-8755-3235-7
2. ARANEO, A. *Química Analítica Cualitativa*. 2a. ed. México : McGraw-Hill, 1981. 542 p. ISBN: 968-451-172-8.
3. DEAN, John A. *Lange's Handbook of Chemistry*. 15a. ed. Estados Unidos : McGraw-Hill, 1999. 1291 p. ISBN: 0-07-016384-7.
4. GLASSTONE, Samuel. *An Introduction to Electrochemistry*. Estados Unidos : Van Nostrand, 1942. 557 p.
5. Guatemala. Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la deposición de lodos. *Diario de Centro América*, 2006, núm. 26, 17 p.
6. HISCOX, G. D.; HOPKINS, A. A. *El Recetario Industrial*. 2a. ed. España : Gustavo Gili SL, 2007. 1348 p. ISBN: 978-84-252-2193-4.
7. LIDE, David R. Physical Constants of Inorganic Compounds. En: D.R. LIDE (ed). *CRC Handbook of Chemistry and Physics, Internet Version 2007*. 87a. ed. Estados Unidos : Taylor and Francis, 2007, 2712 p. ISBN: 0-8493-0487-3.

8. MULLIN, John W. *Crystallization*. 4a. ed. Estados Unidos : Butterworth-Heinemann, 2001. 612 p. ISBN: 0-7506-4833-3.
9. MYERSON, Allan S. *Handbook of Industrial Crystallization*. 2a. ed. Estados Unidos : Butterworth-Heinemann, 2002. 329 p. ISBN: 0-7506-7012-6.
10. RUBINSTEIN, Israel. *Physical Electrochemistry: principles, methods, and applications*. Estados Unidos : CRC Press, 1995. 583 p. ISBN: 0-7506-7012-6.

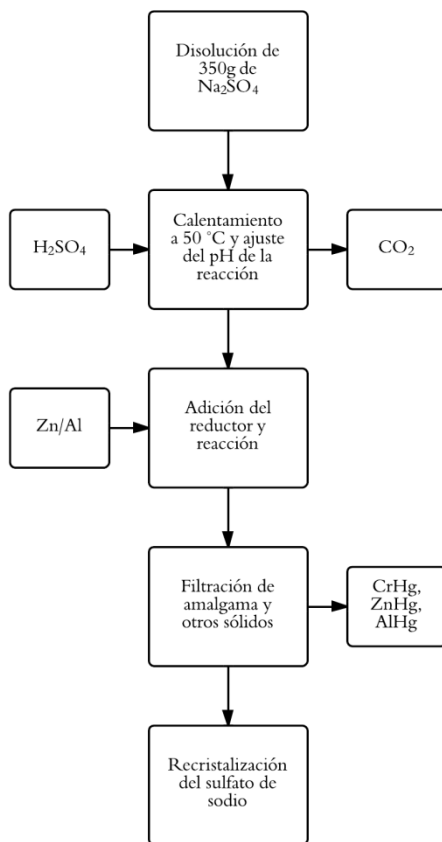
## **APÉNDICES**





## DIAGRAMA DEL PROCESO DE PURIFICACIÓN

Figura 5. Diagrama del proceso de purificación de sulfato de sodio



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Ajuste del pH de la reacción



Fuente: Laboratorio de fisicoquímica, sección de química industrial.

Figura 7. **Adición del reductor y reacción**



Fuente: Laboratorio de fisicoquímica, sección de química industrial.

Figura 8. **Filtración de amalgama y otros sólidos**



Fuente: laboratorio de química, escuela de ingeniería química.

## MUESTRA DE CÁLCULO

- Cálculo de resultados
  - Cálculo de porcentaje de sulfato de sodio

El porcentaje de sulfato de sodio se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$P_s = \frac{C_x}{C_0} \times 100$$

Donde:

$P_s$ : porcentaje de sulfato de sodio

$C_x$ : concentración de sulfatos en la muestra ( $\text{mg.L}^{-1}$ )

$C_0$ : concentración de sulfatos teórica ( $\text{mg.L}^{-1}$ )

Ejemplo: tabla LXVI, corrida 1

$$P_s = \frac{68}{67,629} \times 100$$

$$P_s = 100,55 \%$$

- Cálculo de porcentaje de carbonatos
  - Cálculo de la cantidad de moles de carbonatos

La cantidad de moles de carbonatos se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$n_c = C_t \times V_t$$

Donde:

$n_c$ : cantidad de moles en la muestra (mol)

$C_t$ : concentración del titulante ( $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )

$V_t$ : volumen del titulante (L)

Ejemplo: tabla XLIX, corrida 1

$$n_c = 0,01 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \quad 15,2 \text{ mL} \times \frac{1\text{L}}{1000 \text{ mL}}$$
$$n_c = 0,000152 \text{ mol}$$

- Cálculo de la masa de carbonatos

La masa de carbonatos se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$m_c = n_c \times M_c$$

Donde:

$m_c$ : masa de carbonatos (g)

$M_c$ : masa molar del ion carbonato ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ )

Ejemplo: tabla XLIX, corrida 1

$$m_c = 0,000152 \text{ mol} \quad 60,01 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$
$$m_c = 0,00912122\text{g}$$

- Cálculo del porcentaje de carbonatos

El porcentaje de carbonatos se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$P_c = \frac{m_c}{m_0} \times 100$$

Donde:

$P_c$ : porcentaje de carbonatos

$m_0$ : masa de la muestra (g)

Ejemplo: tabla XLIX, corrida 1

$$P_c = \frac{0,00912122g}{0,851g} \times 100$$
$$P_c = 1,072\%$$

- Cálculo de la cantidad de agua de cristalización
  - Cálculo de la masa de agua

La masa de agua se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$m_a = m_{ci} - m_{cf}$$

Donde:

$m_a$ : masa de agua (g)

$m_{ci}$ : masa inicial del crisol con la muestra (g)

$m_{cf}$ : masa final del crisol con la muestra (g)

Ejemplo: tabla LVI, corrida 1

$$m_a = 30,583g - 30,555g$$

$$m_a = 0,028g$$

- Cálculo de la cantidad de moles de agua

La cantidad de moles de agua se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$n_a = \frac{m_a}{M_a}$$

Donde:

$n_a$ : cantidad de moles de agua (mol)

$M_a$ : masa molar de agua ( $g \cdot mol^{-1}$ )

Ejemplo: tabla LVI, corrida 1

$$n_a = \frac{0,028g}{18,015g/mol}$$

$$n_a = 0,002 mol$$

- Cálculo de la masa de sulfato de sodio anhidro

La masa de sulfato de sodio anhidro se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$m_s = m_{cf} - m_t$$

Donde:

$m_s$ : masa de sulfato de sodio (g)

$m_t$ : masa del crisol (tara) (g)



Ejemplo: tabla LVI, corrida 1

$$m_s = 30,555g - 24,499g$$

$$m_s = 6,056g$$

- Cálculo de la cantidad de moles de sulfato de sodio

La cantidad de moles de sulfato de sodio se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$n_s = \frac{m_s}{M_s}$$

Donde:

$n_s$ : cantidad de moles de sulfato de sodio (mol)

$M_s$ : masa molar del sulfato de sodio ( $g \cdot mol^{-1}$ )

Ejemplo: tabla LVI, corrida 1

$$n_s = \frac{6,056g}{142,04 g/mol}$$

$$n_s = 0,043 mol$$

- Cálculo de la cantidad de agua de cristalización

La cantidad de agua de cristalización se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$i = \frac{n_a}{n_s}$$

Donde:

$i$ : cantidad de agua de cristalización

Ejemplo: tabla LVI, corrida 1

$$i = \frac{0,002 \text{ mol}}{0,043 \text{ mol}}$$
$$i \approx 0$$

- Cálculo del porcentaje de metales pesados como plomo
  - Masa equivalente de plomo

La masa equivalente de plomo se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$m_{pbx} = m_x \frac{M_{pb}}{M_x}$$

Donde:

$m_{pbx}$ : masa de plomo que equivale a la masa del metal x (g/g muestra)

$m_x$ : masa del metal x en la muestra (g/g muestra)

$M_{pb}$ : masa molar de plomo (g.mol<sup>-1</sup>)

$M_x$ : masa molar del metal x (g.mol<sup>-1</sup>)

De la tabla XXV, se toma el valor de la concentración de cromo en la corrida 1 y se calcula el valor de la corrida 1 de la tabla XLVII

$$m_{pbx} = \frac{0,16 \mu g}{g} \times \frac{1g}{1\ 000\ 000 \mu g} \frac{207,2g/mol}{51,9961g/mol}$$
$$m_{pbx} = 6,37588 \times 10^{-7} g/g \text{ muestra}$$

- Porcentaje de metales pesados como plomo

El porcentaje de metales pesados se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$P_{pb} = m_{pbc} + m_{pbm} \times 100$$

Donde:

$P_{pb}$ : porcentaje de metales pesados como plomo

$m_{pbc}$ : masa de plomo equivalente a la masa de cromo (g/g muestra)

$m_{pbm}$ : masa de plomo equivalente a la masa de mercurio (g/g muestra)

Ejemplo: tabla XLVII, corrida 1

$$P_{pb} = 6,37588 \times 10^{-7} + 1,5598 \times 10^{-5} \times 100$$

$$P_{pb} = 1,62352 \times 10^{-5}$$

$$P_{pb} = 0,001623517\%$$

- Estadística
  - Promedio

El promedio se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Donde:

$x$ : promedio

$\sum_{i=1}^n$  : suma desde  $i$  igual a 1, hasta  $n$

$x_i$ :  $i$ -ésimo dato

$n$ : número total de datos

Ejemplo: al sumar todas las concentraciones de cromo en la tabla XXV y dividir las dentro de 24 se obtiene 0,3871

- Efecto

El efecto se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$EF_i = x_i - x$$

Donde:

$EF_i$ : efecto del i-ésimo dato

Ejemplo: tabla XXVII, factor 1, nivel 1

$$EF_1 = 0,3667 - 0,3897$$

$$EF_1 = -0,02041667$$

- Varianza muestral

La varianza muestral se calculó empleando la siguiente ecuación

$$CM = \frac{\sum_{i=1}^n EF_i^2}{gl}$$

Donde:

$CM$ : varianza muestral (o cuadrados medios)

$gl$ : grados de libertad

- Desviación estándar muestral

La desviación estándar se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$s = \overline{CM}$$

Donde:

$s$ : desviación estándar muestral

- Prueba t para muestra única

La prueba t para muestra única se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$t = \frac{x - \mu_0}{\frac{s}{n}}$$

Donde:

$\mu_0$ : valor de prueba

- Diferencia honesta significativa

La diferencia honesta significativa se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$DHS = q_k \frac{\overline{CM_e}}{n_i}$$

Donde:

$DHS$ : diferencia honesta significativa

$q_k$ : valor q del factor o interacción para k promedios a comparar

$CM_e$ : varianza del error en el análisis de varianza

$n_i$ : número de valores promediados para cada promedio a comparar



## DATOS CALCULADOS

**Datos calculados para la variable de medición concentración de cromo**

Tabla XXV. **Concentración de cromo determinada en cada corrida**

corrida	Factor 1 reductor	Factor 2 equivalentes	Factor 3 pH	C. Cromo (ug/g)
1	zinc	3,82E-03	7,000	0,16
3	zinc	5,35E-03	7,000	0,6
5	zinc	6,88E-03	7,000	0,58
7	zinc	3,82E-03	2,200	0,54
9	zinc	5,35E-03	2,200	0,35
11	zinc	6,88E-03	2,200	0,58
13	aluminio	3,82E-03	2,200	0,45
15	aluminio	5,35E-03	2,200	0,36
17	aluminio	6,88E-03	2,200	0,11
19	aluminio	3,82E-03	7,000	0,26
21	aluminio	5,35E-03	7,000	0,24
23	aluminio	6,88E-03	7,000	0,38
2	zinc	3,82E-03	7,000	0,46
4	zinc	5,35E-03	7,000	0,3
6	zinc	6,88E-03	7,000	0,11
8	zinc	3,82E-03	2,200	0,08
10	zinc	5,35E-03	2,200	0,47
12	zinc	6,88E-03	2,200	0,17
14	aluminio	3,82E-03	2,200	0,26
16	aluminio	5,35E-03	2,200	0,89
18	aluminio	6,88E-03	2,200	0,43
20	aluminio	3,82E-03	7,000	0,12
22	aluminio	5,35E-03	7,000	0,61
24	aluminio	6,88E-03	7,000	0,78
promedio				0,38708333

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Promedio de la concentración de cromo por factor y nivel**

nivel	F1	F2	F3
1	0,36667	0,29125	0,38333
2		0,47750	
3	0,40750	0,39250	0,39083

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Efectos de los factores individuales**

nivel	F1	F2	F3
1	-0,02042	-0,09583	-0,00375
2		0,09042	
3	0,02042	0,00542	0,00375

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Efectos de las interacciones de los factores 1 y 2**

interaccion	promedio	EF1	EF2	GM	E F1-F2
1.1	0,31000	-0,02042	-0,09583	0,38708	0,03917
1.2	0,43000	-0,02042	0,09042	0,38708	-0,02708
1.3	0,36000	-0,02042	0,00542	0,38708	-0,01208
3.1	0,27250	0,02042	-0,09583	0,38708	-0,03917
3.2	0,52500	0,02042	0,09042	0,38708	0,02708
3.3.	0,42500	0,02042	0,00542	0,38708	0,01208

Fuente: elaboración propia.



**Tabla XXIX. Efectos de las interacciones de los factores 1 y 3**

interacción	promedio	EF1	EF3	GM	E F1-F3
1.3	0,36500	-0,02042	0,00375	0,38708	-0,00542
1.1	0,36833	-0,02042	-0,00375	0,38708	0,00542
3.3	0,41667	0,02042	0,00375	0,38708	0,00542
3.1	0,39833	0,02042	-0,00375	0,38708	-0,00542

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XXX. Efectos de las interacciones de los factores 2 y 3**

interacción	promedio	EF2	EF3	GM	E F2-F3
1.1	0,25000	-0,09583	-0,00375	0,38708	-0,03750
1.2	0,43750	0,09042	-0,00375	0,38708	-0,03625
1.3	0,46250	0,00542	-0,00375	0,38708	0,07375
3.1	0,33250	-0,09583	0,00375	0,38708	0,03750
3.2	0,51750	0,09042	0,00375	0,38708	0,03625
3.3	0,32250	0,00542	0,00375	0,38708	-0,07375

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XXXI. Efectos de las interacciones de los factores 1, 2 y 3**

interacción	promedio	EF1	EF2	EF3	E F1-F2	E F1-F3	E F2-F3	GM	E F1-F2-F3
1.1.1	0,31000	-0,02042	-0,09583	-0,00375	0,03917	0,00542	-0,03750	0,38708	0,03583
1.2.1	0,45000	-0,02042	0,09042	-0,00375	-0,02708	0,00542	-0,03625	0,38708	0,05458
1.3.1	0,34500	-0,02042	0,00542	-0,00375	-0,01208	0,00542	0,07375	0,38708	-0,09042
1.1.3	0,31000	-0,02042	-0,09583	0,00375	0,03917	-0,00542	0,03750	0,38708	-0,03583
1.2.3	0,41000	-0,02042	0,09042	0,00375	-0,02708	-0,00542	0,03625	0,38708	-0,05458
1.3.3	0,37500	-0,02042	0,00542	0,00375	-0,01208	-0,00542	-0,07375	0,38708	0,09042
3.1.3	0,35500	0,02042	-0,09583	0,00375	-0,03917	0,00542	0,03750	0,38708	0,03583
3.2.3	0,62500	0,02042	0,09042	0,00375	0,02708	0,00542	0,03625	0,38708	0,05458
3.3.3	0,27000	0,02042	0,00542	0,00375	0,01208	0,00542	-0,07375	0,38708	-0,09042
3.1.1	0,19000	0,02042	-0,09583	-0,00375	-0,03917	-0,00542	-0,03750	0,38708	-0,03583
3.2.1	0,42500	0,02042	0,09042	-0,00375	0,02708	-0,00542	-0,03625	0,38708	-0,05458
3.3.1	0,58000	0,02042	0,00542	-0,00375	0,01208	-0,00542	0,07375	0,38708	0,09042

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Cálculos para suma de cuadrados y análisis de varianza de los factores individuales**

corrida	X-E	An cuadrado	E F1	An cuadrado	E F2	An cuadrado	E F3	An cuadrado
1	-0,22708	0,05157	-0,02042	0,00042	-0,09583	0,00918	-0,00375	0,00001
3	0,21292	0,04533	-0,02042	0,00042	0,09042	0,00818	-0,00375	0,00001
5	0,19292	0,03722	-0,02042	0,00042	0,00542	0,00003	-0,00375	0,00001
7	0,15292	0,02338	-0,02042	0,00042	-0,09583	0,00918	0,00375	0,00001
9	-0,03708	0,00138	-0,02042	0,00042	0,09042	0,00818	0,00375	0,00001
11	0,19292	0,03722	-0,02042	0,00042	0,00542	0,00003	0,00375	0,00001
13	0,06292	0,00396	0,02042	0,00042	-0,09583	0,00918	0,00375	0,00001
15	-0,02708	0,00073	0,02042	0,00042	0,09042	0,00818	0,00375	0,00001
17	-0,27708	0,07678	0,02042	0,00042	0,00542	0,00003	0,00375	0,00001
19	-0,12708	0,01615	0,02042	0,00042	-0,09583	0,00918	-0,00375	0,00001
21	-0,14708	0,02163	0,02042	0,00042	0,09042	0,00818	-0,00375	0,00001
23	-0,00708	0,00005	0,02042	0,00042	0,00542	0,00003	-0,00375	0,00001
2	0,07292	0,00532	-0,02042	0,00042	-0,09583	0,00918	-0,00375	0,00001
4	-0,08708	0,00758	-0,02042	0,00042	0,09042	0,00818	-0,00375	0,00001
6	-0,27708	0,07678	-0,02042	0,00042	0,00542	0,00003	-0,00375	0,00001
8	-0,30708	0,09430	-0,02042	0,00042	-0,09583	0,00918	0,00375	0,00001
10	0,08292	0,00688	-0,02042	0,00042	0,09042	0,00818	0,00375	0,00001
12	-0,21708	0,04713	-0,02042	0,00042	0,00542	0,00003	0,00375	0,00001
14	-0,12708	0,01615	0,02042	0,00042	-0,09583	0,00918	0,00375	0,00001
16	0,50292	0,25293	0,02042	0,00042	0,09042	0,00818	0,00375	0,00001
18	0,04292	0,00184	0,02042	0,00042	0,00542	0,00003	0,00375	0,00001
20	-0,26708	0,07133	0,02042	0,00042	-0,09583	0,00918	-0,00375	0,00001
22	0,22292	0,04969	0,02042	0,00042	0,09042	0,00818	-0,00375	0,00001
24	0,39292	0,15438	0,02042	0,00042	0,00542	0,00003	-0,00375	0,00001

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Cálculos para suma de cuadrados y análisis de varianza de las interacciones de los factores**

corrida	E F1-F2	An cuadrado	E F1-F3	An cuadrado	E F2-F3	An cuadrado	E F1-F2-F3	An cuadrado
1	0,03917	0,00153	0,00542	0,00003	-0,03750	0,00141	0,03583	0,00128
3	-0,02708	0,00073	0,00542	0,00003	-0,03625	0,00131	0,05458	0,00298
5	-0,01208	0,00015	0,00542	0,00003	0,07375	0,00544	-0,09042	0,00818
7	0,03917	0,00153	-0,00542	0,00003	0,03750	0,00141	-0,03583	0,00128
9	-0,02708	0,00073	-0,00542	0,00003	0,03625	0,00131	-0,05458	0,00298
11	-0,01208	0,00015	-0,00542	0,00003	-0,07375	0,00544	0,09042	0,00818
13	-0,03917	0,00153	0,00542	0,00003	0,03750	0,00141	0,03583	0,00128
15	0,02708	0,00073	0,00542	0,00003	0,03625	0,00131	0,05458	0,00298
17	0,01208	0,00015	0,00542	0,00003	-0,07375	0,00544	-0,09042	0,00818
19	-0,03917	0,00153	-0,00542	0,00003	-0,03750	0,00141	-0,03583	0,00128
21	0,02708	0,00073	-0,00542	0,00003	-0,03625	0,00131	-0,05458	0,00298
23	0,01208	0,00015	-0,00542	0,00003	0,07375	0,00544	0,09042	0,00818
2	0,03917	0,00153	0,00542	0,00003	-0,03750	0,00141	0,03583	0,00128
4	-0,02708	0,00073	0,00542	0,00003	-0,03625	0,00131	0,05458	0,00298
6	-0,01208	0,00015	0,00542	0,00003	0,07375	0,00544	-0,09042	0,00818
8	0,03917	0,00153	-0,00542	0,00003	0,03750	0,00141	-0,03583	0,00128
10	-0,02708	0,00073	-0,00542	0,00003	0,03625	0,00131	-0,05458	0,00298
12	-0,01208	0,00015	-0,00542	0,00003	-0,07375	0,00544	0,09042	0,00818
14	-0,03917	0,00153	0,00542	0,00003	0,03750	0,00141	0,03583	0,00128
16	0,02708	0,00073	0,00542	0,00003	0,03625	0,00131	0,05458	0,00298
18	0,01208	0,00015	0,00542	0,00003	-0,07375	0,00544	-0,09042	0,00818
20	-0,03917	0,00153	-0,00542	0,00003	-0,03750	0,00141	-0,03583	0,00128
22	0,02708	0,00073	-0,00542	0,00003	-0,03625	0,00131	-0,05458	0,00298
24	0,01208	0,00015	-0,00542	0,00003	0,07375	0,00544	0,09042	0,00818

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Análisis de Varianza de la variable de medición concentración de cromo**

	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>F<sub>c</sub> (p=0,05)</b>
total	1,09970	23			
F1	0,01000	1	0,01000	0,15684	4,75
F2	0,13911	2	0,06955	1,09040	3,89
F3	0,00034	1	0,00034	0,00529	4,75
F1-F2	0,01931	2	0,00965	0,15135	3,89
F1-F3	0,00070	1	0,00070	0,01104	4,75
F2-F3	0,06528	2	0,03264	0,51166	3,89
F1-F2-F3	0,09951	2	0,04975	0,78000	3,89
error	0,76545	12	0,06379		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Prueba t para muestra única de la concentración de cromo antes del proceso**

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
x	0,387083
u	101
s	0,218662
t	2254,172
p	<0.0001

Fuente: elaboración propia.

**Datos calculados para la variable de medición concentración de mercurio**

Tabla XXXVI. **Concentración de mercurio determinada en cada corrida**

corrida	Factor 1 reductor	Factor 2 equivalentes	Factor 3 pH	C. Mercurio (ug/g)
1	zinc	3,82E-03	7,000	15,1
3	zinc	5,35E-03	7,000	431
5	zinc	6,88E-03	7,000	306
7	zinc	3,82E-03	2,200	67
9	zinc	5,35E-03	2,200	20
11	zinc	6,88E-03	2,200	41
13	aluminio	3,82E-03	2,200	164
15	aluminio	5,35E-03	2,200	164
17	aluminio	6,88E-03	2,200	94
19	aluminio	3,82E-03	7,000	212
21	aluminio	5,35E-03	7,000	47
23	aluminio	6,88E-03	7,000	142
2	zinc	3,82E-03	7,000	93,8
4	zinc	5,35E-03	7,000	37,3
6	zinc	6,88E-03	7,000	2,01
8	zinc	3,82E-03	2,200	15
10	zinc	5,35E-03	2,200	99
12	zinc	6,88E-03	2,200	10
14	aluminio	3,82E-03	2,200	40
16	aluminio	5,35E-03	2,200	140
18	aluminio	6,88E-03	2,200	130
20	aluminio	3,82E-03	7,000	59
22	aluminio	5,35E-03	7,000	276
24	aluminio	6,88E-03	7,000	546
promedio				131,3004

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Promedio de la concentración de mercurio por factor y nivel**

nivel	F1	F2	F3
1	94,7675	83,2375	180,6008
2		151,7875	
3	167,8333	158,8763	82,0000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Efectos de los factores individuales nivel F1 F2 F3**

nivel	F1	F2	F3
1	-36,5329	-48,0629	49,3004
2		20,4871	
3	36,5329	27,5758	-49,3004

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Efectos de las interacciones de los factores 1 y 2**

interaccion	promedio	EF1	EF2	GM	E F1-F2
1.1	47,7250	-36,5329	-48,0629	131,3004	1,0204
1.2	146,8250	-36,5329	20,4871	131,3004	31,5704
1.3	89,7525	-36,5329	27,5758	131,3004	-32,5908
3.1	118,7500	36,5329	-48,0629	131,3004	-1,0204
3.2	156,7500	36,5329	20,4871	131,3004	-31,5704
3.3.	228,0000	36,5329	27,5758	131,3004	32,5908

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XL. Efectos de las interacciones de los factores 1 y 3**

interaccion	promedio	EF1	EF3	GM	E F1-F3
1.3	42,0000	-36,5329	-49,3004	131,3004	-3,4671
1.1	147,5350	-36,5329	49,3004	131,3004	3,4671
3.3	122,0000	36,5329	-49,3004	131,3004	3,4671
3.1	213,6667	36,5329	49,3004	131,3004	-3,4671

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XLI. Efectos de la interacciones de los factores 2 y 3**

interaccion	promedio	EF2	EF3	GM	E F2-F3
1.1	94,9750	-48,0629	49,3004	131,3004	-37,5629
1.2	197,8250	20,4871	49,3004	131,3004	-3,2629
1.3	249,0025	27,5758	49,3004	131,3004	40,8258
3.1	71,5000	-48,0629	-49,3004	131,3004	37,5629
3.2	105,7500	20,4871	-49,3004	131,3004	3,2629
3.3	68,7500	27,5758	-49,3004	131,3004	-40,8258

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XLII. Efectos de las interacciones de los factores 1, 2 y 3**

interaccion	promedio	EF1	EF2	EF3	E F1-F2	E F1-F3	E F2-F3	GM	E F1-F2-F3
1.1.1	54,4500	-36,5329	-48,0629	49,3004	1,0204	3,4671	-37,5629	131,3004	-8,4796
1.2.1	234,1500	-36,5329	20,4871	49,3004	31,5704	3,4671	-3,2629	131,3004	37,8204
1.3.1	154,0050	-36,5329	27,5758	49,3004	-32,5908	3,4671	40,8258	131,3004	-29,3408
1.1.3	41,0000	-36,5329	-48,0629	-49,3004	1,0204	-3,4671	37,5629	131,3004	8,4796
1.2.3	59,5000	-36,5329	20,4871	-49,3004	31,5704	-3,4671	3,2629	131,3004	-37,8204
1.3.3	25,5000	-36,5329	27,5758	-49,3004	-32,5908	-3,4671	-40,8258	131,3004	29,3408
3.1.3	102,0000	36,5329	-48,0629	-49,3004	-1,0204	3,4671	37,5629	131,3004	-8,4796
3.2.3	152,0000	36,5329	20,4871	-49,3004	-31,5704	3,4671	3,2629	131,3004	37,8204
3.3.3	112,0000	36,5329	27,5758	-49,3004	32,5908	3,4671	-40,8258	131,3004	-29,3408
3.1.1	135,5000	36,5329	-48,0629	49,3004	-1,0204	-3,4671	-37,5629	131,3004	8,4796
3.2.1	161,5000	36,5329	20,4871	49,3004	-31,5704	-3,4671	-3,2629	131,3004	-37,8204
3.3.1	344,0000	36,5329	27,5758	49,3004	32,5908	-3,4671	40,8258	131,3004	29,3408

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Cálculos para suma de cuadrados y análisis de varianza de los factores individuales**

corrida	X-E	An cuadrado	E F1	An cuadrado	E F2	An cuadrado	E F3	An cuadrado
1	-116,2004	13502,54	-36,5329	1334,654	-48,0629	2310,044	49,3004	2430,531
3	299,6996	89819,84	-36,5329	1334,654	20,4871	419,721	49,3004	2430,531
5	174,6996	30519,94	-36,5329	1334,654	27,5758	760,427	49,3004	2430,531
7	-64,3004	4134,54	-36,5329	1334,654	-48,0629	2310,044	-49,3004	2430,531
9	-111,3004	12387,78	-36,5329	1334,654	20,4871	419,721	-49,3004	2430,531
11	-90,3004	8154,17	-36,5329	1334,654	27,5758	760,427	-49,3004	2430,531
13	32,6996	1069,26	36,5329	1334,654	-48,0629	2310,044	-49,3004	2430,531
15	32,6996	1069,26	36,5329	1334,654	20,4871	419,721	-49,3004	2430,531
17	-37,3004	1391,32	36,5329	1334,654	27,5758	760,427	-49,3004	2430,531
19	80,6996	6512,42	36,5329	1334,654	-48,0629	2310,044	49,3004	2430,531
21	-84,3004	7106,56	36,5329	1334,654	20,4871	419,721	49,3004	2430,531
23	10,6996	114,48	36,5329	1334,654	27,5758	760,427	49,3004	2430,531
2	-37,5004	1406,28	-36,5329	1334,654	-48,0629	2310,044	49,3004	2430,531
4	-94,0004	8836,08	-36,5329	1334,654	20,4871	419,721	49,3004	2430,531
6	-129,2904	16716,01	-36,5329	1334,654	27,5758	760,427	49,3004	2430,531
8	-116,3004	13525,79	-36,5329	1334,654	-48,0629	2310,044	-49,3004	2430,531
10	-32,3004	1043,32	-36,5329	1334,654	20,4871	419,721	-49,3004	2430,531
12	-121,3004	14713,79	-36,5329	1334,654	27,5758	760,427	-49,3004	2430,531
14	-91,3004	8335,77	36,5329	1334,654	-48,0629	2310,044	-49,3004	2430,531
16	8,6996	75,68	36,5329	1334,654	20,4871	419,721	-49,3004	2430,531
18	-1,3004	1,69	36,5329	1334,654	27,5758	760,427	-49,3004	2430,531
20	-72,3004	5227,35	36,5329	1334,654	-48,0629	2310,044	49,3004	2430,531
22	144,6996	20937,97	36,5329	1334,654	20,4871	419,721	49,3004	2430,531
24	414,6996	171975,74	36,5329	1334,654	27,5758	760,427	49,3004	2430,531

Fuente: elaboración propia.



**Tabla XLIV. Cálculos para suma de cuadrados y análisis de varianza de las interacciones de los factores**

corrida	E F1-F2	An cuadrado	E F1-F3	An cuadrado	E F2-F3	An cuadrado	E F1-F2-F3	An cuadrado
1	1,0204	1,0413	3,4671	12,0207	-37,5629	1410,9727	-8,4796	71,9033
3	31,5704	996,6912	3,4671	12,0207	-3,2629	10,6466	37,8204	1430,3839
5	-32,5908	1062,1624	3,4671	12,0207	40,8258	1666,7487	-29,3408	860,8845
7	1,0204	1,0413	-3,4671	12,0207	37,5629	1410,9727	8,4796	71,9033
9	31,5704	996,6912	-3,4671	12,0207	3,2629	10,6466	-37,8204	1430,3839
11	-32,5908	1062,1624	-3,4671	12,0207	-40,8258	1666,7487	29,3408	860,8845
13	-1,0204	1,0413	3,4671	12,0207	37,5629	1410,9727	-8,4796	71,9033
15	-31,5704	996,6912	3,4671	12,0207	3,2629	10,6466	37,8204	1430,3839
17	32,5908	1062,1624	3,4671	12,0207	-40,8258	1666,7487	-29,3408	860,8845
19	-1,0204	1,0413	-3,4671	12,0207	-37,5629	1410,9727	8,4796	71,9033
21	-31,5704	996,6912	-3,4671	12,0207	-3,2629	10,6466	-37,8204	1430,3839
23	32,5908	1062,1624	-3,4671	12,0207	40,8258	1666,7487	29,3408	860,8845
2	1,0204	1,0413	3,4671	12,0207	-37,5629	1410,9727	-8,4796	71,9033
4	31,5704	996,6912	3,4671	12,0207	-3,2629	10,6466	37,8204	1430,3839
6	-32,5908	1062,1624	3,4671	12,0207	40,8258	1666,7487	-29,3408	860,8845
8	1,0204	1,0413	-3,4671	12,0207	37,5629	1410,9727	8,4796	71,9033
10	31,5704	996,6912	-3,4671	12,0207	3,2629	10,6466	-37,8204	1430,3839
12	-32,5908	1062,1624	-3,4671	12,0207	-40,8258	1666,7487	29,3408	860,8845
14	-1,0204	1,0413	3,4671	12,0207	37,5629	1410,9727	-8,4796	71,9033
16	-31,5704	996,6912	3,4671	12,0207	3,2629	10,6466	37,8204	1430,3839
18	32,5908	1062,1624	3,4671	12,0207	-40,8258	1666,7487	-29,3408	860,8845
20	-1,0204	1,0413	-3,4671	12,0207	-37,5629	1410,9727	8,4796	71,9033
22	-31,5704	996,6912	-3,4671	12,0207	-3,2629	10,6466	-37,8204	1430,3839
24	32,5908	1062,1624	-3,4671	12,0207	40,8258	1666,7487	29,3408	860,8845

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Análisis de varianza de la variable de medición concentración de mercurio**

	SC	gl	CM	F	Fc (p=0,05)
total	438577,6	23			
F1	32031,7	1	32031,7	1,47889	4,75
F2	27921,5	2	13960,8	0,64456	3,89
F3	58332,7	1	58332,7	2,69320	4,75
F1-F2	16479,2	2	8239,6	0,38042	3,89
F1-F3	288,5	1	288,5	0,01332	4,75
F2-F3	24706,9	2	12353,5	0,57035	3,89
F1-F2-F3	18905,4	2	9452,7	0,43643	3,89
error	259911,7	12	21659,3		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. **Prueba t para muestra única de la concentración de mercurio antes del proceso**

Variable	Valor
x	131,3004
u	2541
s	138,0891
t	85,4888
p	<0.0001

Fuente: elaboración propia.

## Datos calculados para el porcentaje de metales pesados

Tabla XLVII. **Porcentaje de metales pesados como porcentaje equivalente de plomo**

corrida	masa Cr (g de Pb/g muestra)	masa Hg (g de Pb/g muestra)	masa total (g de Pb/g muestra)	Porcentaje de metales (% de Pb)
1	6,38E-07	1,56E-05	1,62E-05	0,00162
2	1,83E-06	9,69E-05	9,87E-05	0,00987
3	2,39E-06	0,000445	0,000448	0,04476
4	1,2E-06	3,85E-05	3,97E-05	0,00397
5	2,31E-06	0,000316	0,000318	0,03184
6	4,38E-07	2,08E-06	2,51E-06	0,00025
7	2,15E-06	6,92E-05	7,14E-05	0,00714
8	3,19E-07	1,55E-05	1,58E-05	0,00158
9	1,39E-06	2,07E-05	2,21E-05	0,00221
10	1,87E-06	0,000102	0,000104	0,01041
11	2,31E-06	4,24E-05	4,47E-05	0,00447
12	6,77E-07	1,03E-05	1,1E-05	0,00110
13	1,79E-06	0,000169	0,000171	0,01712
14	1,04E-06	4,13E-05	4,24E-05	0,00424
15	1,43E-06	0,000169	0,000171	0,01708
16	3,55E-06	0,000145	0,000148	0,01482
17	4,38E-07	9,71E-05	9,75E-05	0,00975
18	1,71E-06	0,000134	0,000136	0,01360
19	1,04E-06	0,000219	0,00022	0,02200
20	4,78E-07	6,09E-05	6,14E-05	0,00614
21	9,56E-07	4,85E-05	4,95E-05	0,00495
22	2,43E-06	0,000285	0,000288	0,02875
23	1,51E-06	0,000147	0,000148	0,01482
24	3,11E-06	0,000564	0,000567	0,05671

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Prueba t para muestra única del porcentaje de metales pesados**

Variable	Valor
x	0,013717
s	0,01432
u	0,001
t	4,3506
p	0,0002

Fuente: elaboración propia.

**Datos calculados para la variable de medición porcentaje de carbonatos**

Tabla XLIX. **Porcentaje de carbonatos determinado en cada corrida**

corrida	Factor 1	Factor 2	volumen (ml)	moles (mol)	masa (g)	masa muestra	porcentaje
	reductor	equivalentes					
1	zinc	3,82E-03	15,2	0,00015	0,00912	0,851	1,072
3	zinc	5,35E-03	10,0	0,00010	0,00600	0,853	0,703
5	zinc	6,88E-03	17,5	0,00018	0,01050	0,848	1,238
2	zinc	3,82E-03	8,3	0,00008	0,00498	0,85	0,586
4	zinc	5,35E-03	13,0	0,00013	0,00780	0,851	0,917
6	zinc	6,88E-03	5,4	0,00005	0,00324	0,852	0,380
19	aluminio	3,82E-03	16,0	0,00016	0,00960	0,849	1,131
21	aluminio	5,35E-03	34,1	0,00034	0,02046	0,85	2,407
23	aluminio	6,88E-03	12,5	0,00013	0,00750	0,851	0,881
20	aluminio	3,82E-03	23,4	0,00023	0,01404	0,851	1,650
22	aluminio	5,35E-03	12,0	0,00012	0,00720	0,85	0,847
24	aluminio	6,88E-03	17,9	0,00018	0,01074	0,852	1,261
						promedio	1,090

Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **Promedio del porcentaje de carbonatos por factor y nivel**

nivel	F1	F2
1	0,81611	1,10968
2		1,21868
3	1,36294	0,94022

Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. **Efectos de los factores individuales**

nivel	F1	F2
1	-0,27341	0,02015
2		0,12916
3	0,27341	-0,14931

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Efectos de las interacciones de los factores**

interaccion	promedio	EF1	EF2	GM	E F1-F2
1,1	0,82889	-0,27341	0,02015	1,08953	-0,00737
1,2	0,81009	-0,27341	0,12916	1,08953	-0,13518
1,3	0,80935	-0,27341	-0,14931	1,08953	0,14255
3,1	1,39047	0,27341	0,02015	1,08953	0,00737
3,2	1,62728	0,27341	0,12916	1,08953	0,13518
3,3	1,07108	0,27341	-0,14931	1,08953	-0,14255

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Cálculos para suma de cuadrados y análisis de varianza para todos los factores e interacciones**

corrida	X-E	An cuadrado	E F1	An cuadrado	E F2	An cuadrado	E F1-F2	An cuadrado
1	-0,01770	0,00031	-0,27341	0,07476	0,02015	0,00041	-0,00737	0,00005
3	-0,38603	0,14902	-0,27341	0,07476	0,12916	0,01668	-0,13518	0,01827
5	0,14885	0,02215	-0,27341	0,07476	-0,14931	0,02229	0,14255	0,02032
2	-0,50357	0,25358	-0,27341	0,07476	0,02015	0,00041	-0,00737	0,00005
4	-0,17284	0,02987	-0,27341	0,07476	0,12916	0,01668	-0,13518	0,01827
6	-0,70919	0,50296	-0,27341	0,07476	-0,14931	0,02229	0,14255	0,02032
19	0,04137	0,00171	0,27341	0,07476	0,02015	0,00041	0,00737	0,00005
21	1,31785	1,73674	0,27341	0,07476	0,12916	0,01668	0,13518	0,01827
23	-0,20809	0,04330	0,27341	0,07476	-0,14931	0,02229	-0,14255	0,02032
20	0,56052	0,31418	0,27341	0,07476	0,02015	0,00041	0,00737	0,00005
22	-0,24236	0,05874	0,27341	0,07476	0,12916	0,01668	0,13518	0,01827
24	0,17120	0,02931	0,27341	0,07476	-0,14931	0,02229	-0,14255	0,02032

Fuente: elaboración propia

Tabla LIV. **Análisis de varianza de la variable de medición porcentaje de carbonatos**

	SC	gl	CM	F	Fc (p=0,05)
total	3,14187	11			
F1	0,89707	1	0,89707	2,78493	5,99
F2	0,15752	2	0,07876	0,24451	5,14
F1-F2	0,15459	2	0,07730	0,23996	5,14
error	1,93269	6	0,32212		

Fuente: elaboración propia.

Tabla LV. **Prueba t para muestra única del porcentaje de carbonatos antes del proceso**

Variable	Valor
x	1,090
u	4,121
s	0,534439
t	19,6463
p	<0.0001

Fuente: elaboración propia.

**Datos calculados para la determinación de la cantidad de agua de cristalización**

Tabla LVI. **Cálculos y resultados para la cantidad de agua de cristalización**

corrida	masa crisol	masa inicial	masa final	masa agua	n agua	masa na2so4	n na2so4	mol H <sub>2</sub> O/mol Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
1	24,499	30,583	30,555	0,028	0,002	6,056	0,043	<b>0</b>
2	25,048	31,826	28,452	3,374	0,187	3,404	0,024	<b>8</b>
3	24,850	31,388	27,637	3,751	0,208	2,787	0,020	<b>11</b>
4	24,921	28,675	28,175	0,500	0,028	3,254	0,023	<b>1</b>
5	24,493	28,113	27,852	0,261	0,014	3,359	0,024	<b>1</b>
6	25,049	29,235	29,189	0,046	0,003	4,140	0,029	<b>0</b>
7	24,850	28,460	28,434	0,026	0,001	3,584	0,025	<b>0</b>
8	24,921	27,787	26,349	1,438	0,080	1,428	0,010	<b>8</b>
9	24,493	27,373	27,359	0,014	0,001	2,866	0,020	<b>0</b>
10	25,047	28,416	28,381	0,035	0,002	3,334	0,023	<b>0</b>
11	24,847	27,950	27,921	0,029	0,002	3,074	0,022	<b>0</b>
12	24,920	27,240	27,150	0,090	0,005	2,230	0,016	<b>0</b>
13	24,493	29,183	27,788	1,395	0,077	3,295	0,023	<b>3</b>
14	25,049	28,398	27,934	0,464	0,026	2,885	0,020	<b>1</b>
15	24,847	27,268	27,220	0,048	0,003	2,373	0,017	<b>0</b>

Continuación de la tabla LVI.

16	24,921	27,746	27,709	0,037	0,002	2,788	0,020	<b>0</b>
17	24,881	31,705	31,293	0,412	0,023	6,412	0,045	<b>1</b>
18	24,493	28,704	27,912	0,792	0,044	3,419	0,024	<b>2</b>
19	25,057	30,423	27,570	2,853	0,158	2,513	0,018	<b>9</b>
20	24,942	30,038	28,575	1,463	0,081	3,633	0,026	<b>3</b>
21	25,007	26,833	25,833	1,000	0,056	0,826	0,006	<b>10</b>
22	25,113	30,262	28,448	1,814	0,101	3,335	0,023	<b>4</b>
23	24,493	32,716	28,244	4,472	0,248	3,751	0,026	<b>9</b>
24	25,039	26,434	26,267	0,167	0,009	1,228	0,009	<b>1</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVII. **Promedio de la cantidad de agua de cristalización por factor y nivel**

nivel	F1	F2	F3
1	2,41	3,70	4,73
2		3,26	
3	3,64	1,74	1,31

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVIII. **Efectos de los factores individuales**

nivel	F1	F2	F3
1	-0,61460	0,67636	1,71226
2		0,23360	
3	0,61460	-1,28449	-1,71226

Fuente: elaboración propia.



Tabla LIX. **Efectos de las interacciones de los factores 1 y 2**

interaccion	promedio	EF1	EF2	GM	E F1-F2
1.1	3,96218	-0,61460	0,67636	3,02179	0,87863
1.2	2,98618	-0,61460	0,23360	3,02179	0,34539
1.3	0,27321	-0,61460	-1,28449	3,02179	-0,84948
3.1	4,18320	0,61460	0,67636	3,02179	-0,12956
3.2	3,52460	0,61460	0,23360	3,02179	-0,34539
3.3.	3,20139	0,61460	-1,28449	3,02179	0,84948

Fuente: elaboración propia.

Tabla LX. **Efectos de las interacciones de los factores 1 y 3**

interaccion	promedio	EF1	EF3	GM	E F1-F3
1.3	1,41849	-0,61460	-1,71226	3,02179	0,72356
1.1	3,39589	-0,61460	1,71226	3,02179	-0,72356
3.3	1,20057	0,61460	-1,71226	3,02179	-0,72356
3.1	6,07222	0,61460	1,71226	3,02179	0,72356

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXI. **Efectos de las interacciones de los factores 2 y 3**

interaccion	promedio	EF2	EF3	GM	E F2-F3
1.1	4,99455	0,67636	1,71226	3,02179	-0,41586
1.2	6,41443	0,23360	1,71226	3,02179	1,44678
1.3	2,79318	-1,28449	1,71226	3,02179	-0,65638
3.1	3,15082	0,67636	-1,71226	3,02179	1,16494
3.2	0,09635	0,23360	-1,71226	3,02179	-1,44678
3.3	0,68142	-1,28449	-1,71226	3,02179	0,65638

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXII. Efectos de las interacciones de los factores 1, 2 y 3

interaccion	promedio	EF1	EF2	EF3	E F1-F2	E F1-F3	E F2-F3	GM	E F1-F2-F3
1.1.1	3,92581	-0,61460	0,67636	1,71226	0,87863	-0,72356	-0,41586	3,02179	-0,60920
1.2.1	5,91172	-0,61460	0,23360	1,71226	0,34539	-0,72356	1,44678	3,02179	0,49006
1.3.1	0,35013	-0,61460	-1,28449	1,71226	-0,84948	-0,72356	-0,65638	3,02179	-0,25540
1.1.3	3,99854	-0,61460	0,67636	-1,71226	0,87863	0,72356	1,16494	3,02179	-0,13988
1.2.3	0,06064	-0,61460	0,23360	-1,71226	0,34539	0,72356	-1,44678	3,02179	-0,49006
1.3.3	0,19630	-0,61460	-1,28449	-1,71226	-0,84948	0,72356	0,65638	3,02179	0,25540
3.1.3	2,30311	0,61460	0,67636	-1,71226	-0,12956	-0,72356	1,16494	3,02179	-0,60920
3.2.3	0,13206	0,61460	0,23360	-1,71226	-0,34539	-0,72356	-1,44678	3,02179	0,49006
3.3.3	1,16654	0,61460	-1,28449	-1,71226	0,84948	-0,72356	0,65638	3,02179	-0,25540
3.1.1	6,06328	0,61460	0,67636	1,71226	-0,12956	0,72356	-0,41586	3,02179	-0,13988
3.2.1	6,91714	0,61460	0,23360	1,71226	-0,34539	0,72356	1,44678	3,02179	-0,49006
3.3.1	5,23624	0,61460	-1,28449	1,71226	0,84948	0,72356	-0,65638	3,02179	0,25540

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIII. Cálculos para suma de cuadrados y análisis de varianza de los factores individuales

corrida	X-E	An cuadrado	E F1	An cuadrado	E F2	An cuadrado	E F3	An cuadrado
1	-2,98534	8,91224	-0,61460	0,37774	0,67636	0,45746	1,71226	2,93184
2	4,79338	22,97649	-0,61460	0,37774	0,67636	0,45746	1,71226	2,93184
3	7,59011	57,60972	-0,61460	0,37774	0,23360	0,05457	1,71226	2,93184
4	-1,81026	3,27704	-0,61460	0,37774	0,23360	0,05457	1,71226	2,93184
5	-2,40914	5,80396	-0,61460	0,37774	-1,28449	1,64992	1,71226	2,93184
6	-2,93419	8,60945	-0,61460	0,37774	-1,28449	1,64992	1,71226	2,93184
7	-2,96459	8,78882	-0,61460	0,37774	0,67636	0,45746	-1,71226	2,93184
8	4,91808	24,18754	-0,61460	0,37774	0,67636	0,45746	-1,71226	2,93184
9	-2,98328	8,89995	-0,61460	0,37774	0,23360	0,05457	-1,71226	2,93184
10	-2,93902	8,63784	-0,61460	0,37774	0,23360	0,05457	-1,71226	2,93184
11	-2,94741	8,68722	-0,61460	0,37774	-1,28449	1,64992	-1,71226	2,93184
12	-2,70358	7,30933	-0,61460	0,37774	-1,28449	1,64992	-1,71226	2,93184
13	0,31633	0,10006	0,61460	0,37774	0,67636	0,45746	-1,71226	2,93184
14	-1,75369	3,07542	0,61460	0,37774	0,67636	0,45746	-1,71226	2,93184
15	-2,86231	8,19279	0,61460	0,37774	0,23360	0,05457	-1,71226	2,93184

Continuación de la tabla LXIII.

16	-2,91715	8,50979	0,61460	0,37774	0,23360	0,05457	-1,71226	2,93184
17	-2,51517	6,32607	0,61460	0,37774	-1,28449	1,64992	-1,71226	2,93184
18	-1,19534	1,42883	0,61460	0,37774	-1,28449	1,64992	-1,71226	2,93184
19	5,92964	35,16057	0,61460	0,37774	0,67636	0,45746	1,71226	2,93184
20	0,15334	0,02351	0,61460	0,37774	0,67636	0,45746	1,71226	2,93184
21	6,52380	42,55999	0,61460	0,37774	0,23360	0,05457	1,71226	2,93184
22	1,26690	1,60502	0,61460	0,37774	0,23360	0,05457	1,71226	2,93184
23	6,37842	40,68426	0,61460	0,37774	-1,28449	1,64992	1,71226	2,93184
24	-1,94953	3,80067	0,61460	0,37774	-1,28449	1,64992	1,71226	2,93184

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIV. **Cálculos para suma de cuadrados y análisis de varianza de las interacciones de los factores**

corrida	E F1-F2	An cuadrado	E F1-F3	An cuadrado	E F2-F3	An cuadrado	E F1-F2-F3	An cuadrado
1	0,87863	0,77199	-0,72356	0,52354	-0,41586	0,17294	-0,60920	0,37112
2	0,87863	0,77199	-0,72356	0,52354	-0,41586	0,17294	-0,60920	0,37112
3	0,34539	0,11930	-0,72356	0,52354	1,44678	2,09317	0,49006	0,24016
4	0,34539	0,11930	-0,72356	0,52354	1,44678	2,09317	0,49006	0,24016
5	-0,84948	0,72162	-0,72356	0,52354	-0,65638	0,43083	-0,25540	0,06523
6	-0,84948	0,72162	-0,72356	0,52354	-0,65638	0,43083	-0,25540	0,06523
7	0,87863	0,77199	0,72356	0,52354	1,16494	1,35708	-0,13988	0,01957
8	0,87863	0,77199	0,72356	0,52354	1,16494	1,35708	-0,13988	0,01957
9	0,34539	0,11930	0,72356	0,52354	-1,44678	2,09317	-0,49006	0,24016
10	0,34539	0,11930	0,72356	0,52354	-1,44678	2,09317	-0,49006	0,24016
11	-0,84948	0,72162	0,72356	0,52354	0,65638	0,43083	0,25540	0,06523
12	-0,84948	0,72162	0,72356	0,52354	0,65638	0,43083	0,25540	0,06523
13	-0,12956	0,01678	-0,72356	0,52354	1,16494	1,35708	-0,60920	0,37112
14	-0,12956	0,01678	-0,72356	0,52354	1,16494	1,35708	-0,60920	0,37112
15	-0,34539	0,11930	-0,72356	0,52354	-1,44678	2,09317	0,49006	0,24016
16	-0,34539	0,11930	-0,72356	0,52354	-1,44678	2,09317	0,49006	0,24016
17	0,84948	0,72162	-0,72356	0,52354	0,65638	0,43083	-0,25540	0,06523
18	0,84948	0,72162	-0,72356	0,52354	0,65638	0,43083	-0,25540	0,06523
19	-0,12956	0,01678	0,72356	0,52354	-0,41586	0,17294	-0,13988	0,01957
20	-0,12956	0,01678	0,72356	0,52354	-0,41586	0,17294	-0,13988	0,01957

Continuación de la tabla LXIV.

21	-0,34539	0,11930	0,72356	0,52354	1,44678	2,09317	-0,49006	0,24016
22	-0,34539	0,11930	0,72356	0,52354	1,44678	2,09317	-0,49006	0,24016
23	0,84948	0,72162	0,72356	0,52354	-0,65638	0,43083	0,25540	0,06523
24	0,84948	0,72162	0,72356	0,52354	-0,65638	0,43083	0,25540	0,06523

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXV. **Análisis de varianza de la variable de medición agua de cristalización**

	SC	gl	CM	F	Fc (p=0,05)
total	325,1666	23			
F1	9,0657	1	9,06568	0,61926	4,75
F2	17,2955	2	8,64777	0,59071	3,89
F3	70,3641	1	70,36406	4,80640	4,75
F1-F2	9,8825	2	4,94123	0,33752	3,89
F1-F3	12,5651	1	12,56507	0,85829	4,75
F2-F3	26,3121	2	13,15603	0,89866	3,89
F1-F2-F3	4,0059	2	2,00294	0,13682	3,89
error	175,6759	12	14,63966		

Fuente: elaboración propia.

**Datos calculados para la variable de medición porcentaje de sulfato de sodio**

Tabla LXVI. **Porcentaje de sulfatos determinado en cada corrida**

corrida	Factor 1	Factor 2	Factor 3	ppmN2S	ppm SO4	ppm teorico	porcentaje
	reductor	equivalentes	pH				
1	zinc	3,82E-03	7,000	100	68	67,629	100,55
2	zinc	3,82E-03	7,000	100	68		100,55

Continuación de la tabla LXVI.

3	zinc	5,35E-03	7,000	100	51	75,41
4	zinc	5,35E-03	7,000	100	64	94,63
5	zinc	6,88E-03	7,000	100	67	99,07
6	zinc	6,88E-03	7,000	100	70	103,51
7	zinc	3,82E-03	2,200	100	68	100,55
8	zinc	3,82E-03	2,200	100	62	91,68
9	zinc	5,35E-03	2,200	100	70	103,51
10	zinc	5,35E-03	2,200	100	68	100,55
11	zinc	6,88E-03	2,200	100	67	99,07
12	zinc	6,88E-03	2,200	100	70	103,51
13	aluminio	3,82E-03	2,200	100	68	100,55
14	aluminio	3,82E-03	2,200	100	68	100,55
15	aluminio	5,35E-03	2,200	100	61	90,20
16	aluminio	5,35E-03	2,200	100	68	100,55
17	aluminio	6,88E-03	2,200	100	60	88,72
18	aluminio	6,88E-03	2,200	100	61	90,20
19	aluminio	3,82E-03	7,000	100	36	53,23
20	aluminio	3,82E-03	7,000	100	44	65,06
21	aluminio	5,35E-03	7,000	100	31	45,84
22	aluminio	5,35E-03	7,000	100	42	62,10
23	aluminio	6,88E-03	7,000	100	35	51,75
24	aluminio	6,88E-03	7,000	100	66	97,59

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVII. **Promedio del porcentaje de sulfatos por factor y nivel**

nivel	F1	F2	F3
1	97,71	89,09	79,11
2		84,10	
3	78,86	91,68	97,47

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVIII. **Efectos de los factores individuales**

nivel	F1	F2	F3
1	9,42641	0,80094	-9,17997
2		-4,18952	
3	-9,42641	3,38858	9,17997

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXIX. **Efectos de las interacciones de los factores 1 y 2**

interaccion	promedio	EF1	EF2	GM	E F1-F2
1.1	98,3304	9,4264	0,8009	88,2879	-0,1848
1.2	93,5248	9,4264	-4,1895	88,2879	0,0000
1.3	101,2877	9,4264	3,3886	88,2879	0,1848
3.1	79,8473	-9,4264	0,8009	88,2879	0,1848
3.2	74,6720	-9,4264	-4,1895	88,2879	0,0000
3.3.	82,0652	-9,4264	3,3886	88,2879	-0,1848

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXX. **Efectos de las interacciones de los factores 1 y 3**

interaccion	promedio	EF1	EF3	GM	E F1-F3
1.3	99,8091	9,4264	9,1800	88,2879	-7,0852
1.1	95,6196	9,4264	-9,1800	88,2879	7,0852
3.3	95,1267	-9,4264	9,1800	88,2879	7,0852
3.1	62,5963	-9,4264	-9,1800	88,2879	-7,0852

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXI. **Efectos de las interacciones de los factores 2 y 3**

interaccion	promedio	EF2	EF3	GM	E F2-F3
1.1	79,8473	0,8009	-9,1800	88,2879	-0,0616
1.2	69,4967	-4,1895	-9,1800	88,2879	-5,4217
1.3	87,9799	3,3886	-9,1800	88,2879	5,4833
3.1	98,3304	0,8009	9,1800	88,2879	0,0616
3.2	98,7001	-4,1895	9,1800	88,2879	5,4217
3.3	95,3731	3,3886	9,1800	88,2879	-5,4833

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXII. **Efectos de las interacciones de los factores 1, 2 y 3**

interaccion	promedio	EF1	EF2	EF3	E F1-F2	E F1-F3	E F2-F3	GM	E F1-F2-F3
1.1.1	100,548	9,426	0,801	-9,180	-0,185	7,085	-0,062	88,288	4,374
1.2.1	85,023	9,426	-4,190	-9,180	0,000	7,085	-5,422	88,288	-0,986
1.3.1	101,288	9,426	3,389	-9,180	0,185	7,085	5,483	88,288	-3,389
1.1.3	96,112	9,426	0,801	9,180	-0,185	-7,085	0,062	88,288	-4,374
1.2.3	102,027	9,426	-4,190	9,180	0,000	-7,085	5,422	88,288	0,986
1.3.3	101,288	9,426	3,389	9,180	0,185	-7,085	-5,483	88,288	3,389
3.1.3	100,548	-9,426	0,801	9,180	0,185	7,085	0,062	88,288	4,374
3.2.3	95,373	-9,426	-4,190	9,180	0,000	7,085	5,422	88,288	-0,986
3.3.3	89,459	-9,426	3,389	9,180	-0,185	7,085	-5,483	88,288	-3,389
3.1.1	59,146	-9,426	0,801	-9,180	0,185	-7,085	-0,062	88,288	-4,374
3.2.1	53,971	-9,426	-4,190	-9,180	0,000	-7,085	-5,422	88,288	0,986
3.3.1	74,672	-9,426	3,389	-9,180	-0,185	-7,085	5,483	88,288	3,389

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXIII. **Cálculos para suma de cuadrados y análisis de varianza de los factores individuales**

corrida	X-E	An cuadrado	E F1	An cuadrado	E F2	An cuadrado	E F3	An cuadrado
1	12,2605	150,320	9,4264	88,8573	0,8009	0,6415	-9,1800	84,2719
2	12,2605	150,320	9,4264	88,8573	0,8009	0,6415	-9,1800	84,2719
3	-12,8766	165,807	9,4264	88,8573	-4,1895	17,5521	-9,1800	84,2719
4	6,3459	40,270	9,4264	88,8573	-4,1895	17,5521	-9,1800	84,2719
5	10,7818	116,248	9,4264	88,8573	3,3886	11,4825	-9,1800	84,2719
6	15,2178	231,582	9,4264	88,8573	3,3886	11,4825	-9,1800	84,2719
7	12,2605	150,320	9,4264	88,8573	0,8009	0,6415	9,1800	84,2719
8	3,3886	11,482	9,4264	88,8573	0,8009	0,6415	9,1800	84,2719
9	15,2178	231,582	9,4264	88,8573	-4,1895	17,5521	9,1800	84,2719
10	12,2605	150,320	9,4264	88,8573	-4,1895	17,5521	9,1800	84,2719
11	10,7818	116,248	9,4264	88,8573	3,3886	11,4825	9,1800	84,2719
12	15,2178	231,582	9,4264	88,8573	3,3886	11,4825	9,1800	84,2719
13	12,2605	150,320	-9,4264	88,8573	0,8009	0,6415	9,1800	84,2719
14	12,2605	150,320	-9,4264	88,8573	0,8009	0,6415	9,1800	84,2719
15	1,9099	3,648	-9,4264	88,8573	-4,1895	17,5521	9,1800	84,2719
16	12,2605	150,320	-9,4264	88,8573	-4,1895	17,5521	9,1800	84,2719
17	0,4313	0,186	-9,4264	88,8573	3,3886	11,4825	9,1800	84,2719
18	1,9099	3,648	-9,4264	88,8573	3,3886	11,4825	9,1800	84,2719
19	-35,0564	1228,951	-9,4264	88,8573	0,8009	0,6415	-9,1800	84,2719
20	-23,2272	539,502	-9,4264	88,8573	0,8009	0,6415	-9,1800	84,2719
21	-42,4497	1801,974	-9,4264	88,8573	-4,1895	17,5521	-9,1800	84,2719
22	-26,1845	685,627	-9,4264	88,8573	-4,1895	17,5521	-9,1800	84,2719
23	-36,5351	1334,810	-9,4264	88,8573	3,3886	11,4825	-9,1800	84,2719
24	9,3032	86,549	-9,4264	88,8573	3,3886	11,4825	-9,1800	84,2719

Fuente: elaboración propia.



Tabla LXXIV. **Cálculos para suma de cuadrados y análisis de varianza de las interacciones de los factores**

corrida	E F1-F2	An cuadrado	E F1-F3	An cuadrado	E F2-F3	An cuadrado	E F1-F2-F3	An cuadrado
1	-0,1848	0,0342	7,0852	50,2002	-0,0616	0,0038	4,3743	19,1349
2	-0,1848	0,0342	7,0852	50,2002	-0,0616	0,0038	4,3743	19,1349
3	0,0000	0,0000	7,0852	50,2002	-5,4217	29,3951	-0,9858	0,9717
4	0,0000	0,0000	7,0852	50,2002	-5,4217	29,3951	-0,9858	0,9717
5	0,1848	0,0342	7,0852	50,2002	5,4833	30,0670	-3,3886	11,4825
6	0,1848	0,0342	7,0852	50,2002	5,4833	30,0670	-3,3886	11,4825
7	-0,1848	0,0342	-7,0852	50,2002	0,0616	0,0038	-4,3743	19,1349
8	-0,1848	0,0342	-7,0852	50,2002	0,0616	0,0038	-4,3743	19,1349
9	0,0000	0,0000	-7,0852	50,2002	5,4217	29,3951	0,9858	0,9717
10	0,0000	0,0000	-7,0852	50,2002	5,4217	29,3951	0,9858	0,9717
11	0,1848	0,0342	-7,0852	50,2002	-5,4833	30,0670	3,3886	11,4825
12	0,1848	0,0342	-7,0852	50,2002	-5,4833	30,0670	3,3886	11,4825
13	0,1848	0,0342	7,0852	50,2002	0,0616	0,0038	4,3743	19,1349
14	0,1848	0,0342	7,0852	50,2002	0,0616	0,0038	4,3743	19,1349
15	0,0000	0,0000	7,0852	50,2002	5,4217	29,3951	-0,9858	0,9717
16	0,0000	0,0000	7,0852	50,2002	5,4217	29,3951	-0,9858	0,9717
17	-0,1848	0,0342	7,0852	50,2002	-5,4833	30,0670	-3,3886	11,4825
18	-0,1848	0,0342	7,0852	50,2002	-5,4833	30,0670	-3,3886	11,4825
19	0,1848	0,0342	-7,0852	50,2002	-0,0616	0,0038	-4,3743	19,1349
20	0,1848	0,0342	-7,0852	50,2002	-0,0616	0,0038	-4,3743	19,1349
21	0,0000	0,0000	-7,0852	50,2002	-5,4217	29,3951	0,9858	0,9717
22	0,0000	0,0000	-7,0852	50,2002	-5,4217	29,3951	0,9858	0,9717
23	-0,1848	0,0342	-7,0852	50,2002	5,4833	30,0670	3,3886	11,4825
24	-0,1848	0,0342	-7,0852	50,2002	5,4833	30,0670	3,3886	11,4825

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXV. **Análisis de varianza de la variable de medición porcentaje de sulfatos**

	SC	gl	CM	F	Fc (p=0,05)
total	7881,934	23			
F1	2132,574	1	2132,574	16,4505	4,75
F2	237,408	2	118,704	0,9157	3,89
F3	2022,525	1	2022,525	15,6015	4,75
F1-F2	0,547	2	0,273	0,0021	3,89
F1-F3	1204,806	1	1204,806	9,2937	4,75
F2-F3	475,727	2	237,864	1,8349	3,89
F1-F2-F3	252,713	2	126,357	0,9747	3,89
error	1555,634	12	129,636		

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXVI. **Prueba de diferencia honesta significativa para la interaccion 1 y 3**

Magnitud	Valor
q (3;12;0,05)	3,773
DHS	17,5378
1.3-3.3	4,68
3.3-3.1	<b>32,53</b>
1.3-1.1	4,19
1.1-3.1	<b>33,02</b>

Fuente: elaboración propia.

## Datos calculados para la cantidad de metales recuperados

Tabla LXXVIII. **Cantidad de metales recuperados en la etapa de amalgamado**

corrida	Factor 1	Factor 2	Factor 3	masa reductor	masa amalgama	masa metales
	reductor	equivalentes	pH			
1	zinc	3,82E-03	7,000	0,250	1,532	1,282
2	zinc	3,82E-03	7,000	0,250	1,528	1,278
3	zinc	5,35E-03	7,000	0,350	1,533	1,183
4	zinc	5,35E-03	7,000	0,350	1,221	0,871
5	zinc	6,88E-03	7,000	0,450	2,382	1,932
6	zinc	6,88E-03	7,000	0,450	1,711	1,261
7	zinc	3,82E-03	2,200	0,250	1,307	1,057
8	zinc	3,82E-03	2,200	0,250	1,513	1,263
9	zinc	5,35E-03	2,200	0,350	1,794	1,444
10	zinc	5,35E-03	2,200	0,350	1,580	1,23
11	zinc	6,88E-03	2,200	0,450	2,217	1,767
12	zinc	6,88E-03	2,200	0,450	1,463	1,013
13	aluminio	3,82E-03	2,200	0,103	0,950	0,847
14	aluminio	3,82E-03	2,200	0,103	0,751	0,648
15	aluminio	5,35E-03	2,200	0,144	0,874	0,73
16	aluminio	5,35E-03	2,200	0,144	1,116	0,972
17	aluminio	6,88E-03	2,200	0,186	1,334	1,148
18	aluminio	6,88E-03	2,200	0,186	1,159	0,973
19	aluminio	3,82E-03	7,000	0,103	1,586	1,483
20	aluminio	3,82E-03	7,000	0,103	1,068	0,965
21	aluminio	5,35E-03	7,000	0,144	1,729	1,585
22	aluminio	5,35E-03	7,000	0,144	0,765	0,621
23	aluminio	6,88E-03	7,000	0,186	0,994	0,808
24	aluminio	6,88E-03	7,000	0,186	1,590	1,404
					promedio	1,156875

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXIX. **Promedio de la cantidad de metales recuperados por factor**

nivel	F1	F2	F3
1	1,30	1,10	1,22
2		1,08	
3	1,02	1,29	1,09

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXX. **Efectos de los factores individuales**

nivel	F1	F2	F3
1	0,14154	-0,05400	0,06587
2		-0,07738	
3	-0,14154	0,13138	-0,06588

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXI. **Efectos de las interacciones de los factores 1 y 2**

interaccion	promedio	EF1	EF2	GM	E F1-F2
1.1	1,22	0,14154	-0,05400	1,15688	-0,02442
1.2	1,18	0,14154	-0,07738	1,15688	-0,03904
1.3	1,49	0,14154	0,13138	1,15688	0,06346
3.1	0,99	-0,14154	-0,05400	1,15688	0,02442
3.2	0,98	-0,14154	-0,07738	1,15688	0,03904
3.3.	1,08	-0,14154	0,13138	1,15688	-0,06346

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXII. **Efectos de las interacciones de los factores 1 y 3**

interaccion	promedio	EF1	EF3	GM	E F1-F3
1.3	1,30	0,14154	-0,06588	1,15688	0,06313
1.1	1,30	0,14154	0,06587	1,15688	-0,06312
3.3	0,89	-0,14154	-0,06588	1,15688	-0,06312
3.1	1,14	-0,14154	0,06587	1,15688	0,06313

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXIII. **Efectos de las interacciones de los factores 2 y 3**

interaccion	promedio	EF2	EF3	GM	E F2-F3
1.1	1,25	-0,05400	0,06587	1,15688	0,08325
1.2	1,07	-0,07738	0,06587	1,15688	-0,08038
1.3	1,35	0,13138	0,06587	1,15688	-0,00287
3.1	0,95	-0,05400	-0,06588	1,15688	-0,08325
3.2	1,09	-0,07738	-0,06588	1,15688	0,08038
3.3	1,23	0,13138	-0,06588	1,15688	0,00288

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXIV. **Efectos de las interacciones de los factores 1, 2 y 3**

interaccion	promedio	EF1	EF2	EF3	E F1-F2	E F1-F3	E F2-F3	GM	E F1-F2-F3
1.1.1	1,28	0,14154	-0,05400	0,06587	-0,02442	-0,06312	0,08325	1,15688	-0,02600
1.2.1	1,03	0,14154	-0,07738	0,06587	-0,03904	-0,06312	-0,08038	1,15688	-0,07738
1.3.1	1,60	0,14154	0,13138	0,06587	0,06346	-0,06312	-0,00287	1,15688	0,10338
1.1.3	1,16	0,14154	-0,05400	-0,06588	-0,02442	0,06313	-0,08325	1,15688	0,02600
1.2.3	1,3370	0,14154	-0,07738	-0,06588	-0,03904	0,06313	0,08038	1,15688	0,07738
1.3.3	1,39	0,14154	0,13138	-0,06588	0,06346	0,06313	0,00288	1,15688	-0,10338
3.1.3	0,75	-0,14154	-0,05400	-0,06588	0,02442	-0,06312	-0,08325	1,15688	-0,02600
3.2.3	0,85	-0,14154	-0,07738	-0,06588	0,03904	-0,06312	0,08038	1,15688	-0,07738
3.3.3	1,06	-0,14154	0,13138	-0,06588	-0,06346	-0,06312	0,00288	1,15688	0,10338
3.1.1	1,22	-0,14154	-0,05400	0,06587	0,02442	0,06313	0,08325	1,15688	0,02600

Continuación de la tabla LXXXIV.

3.2.1	1,10	-0,14154	-0,07738	0,06587	0,03904	0,06313	-0,08038	1,15688	0,07738
3.3.1	1,11	-0,14154	0,13138	0,06587	-0,06346	0,06313	-0,00287	1,15688	-0,10338

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXV. **Cálculos para suma de cuadrados y análisis de varianza de los factores individuales**

corrida	X-E	An cuadrado	E F1	An cuadrado	E F2	An cuadrado	E F3	An cuadrado
1	0,12513	0,01566	0,14154	0,02003	-0,05400	0,00292	0,06587	0,00434
2	0,12113	0,01467	0,14154	0,02003	-0,05400	0,00292	0,06587	0,00434
3	0,02612	0,00068	0,14154	0,02003	-0,07738	0,00599	0,06587	0,00434
4	-0,28588	0,08172	0,14154	0,02003	-0,07738	0,00599	0,06587	0,00434
5	0,77513	0,60082	0,14154	0,02003	0,13138	0,01726	0,06587	0,00434
6	0,10413	0,01084	0,14154	0,02003	0,13138	0,01726	0,06587	0,00434
7	-0,09988	0,00998	0,14154	0,02003	-0,05400	0,00292	-0,06588	0,00434
8	0,10613	0,01126	0,14154	0,02003	-0,05400	0,00292	-0,06588	0,00434
9	0,28713	0,08244	0,14154	0,02003	-0,07738	0,00599	-0,06588	0,00434
10	0,07312	0,00535	0,14154	0,02003	-0,07738	0,00599	-0,06588	0,00434
11	0,61013	0,37225	0,14154	0,02003	0,13138	0,01726	-0,06588	0,00434
12	-0,14388	0,02070	0,14154	0,02003	0,13138	0,01726	-0,06588	0,00434
13	-0,30988	0,09602	-0,14154	0,02003	-0,05400	0,00292	-0,06588	0,00434
14	-0,50888	0,25895	-0,14154	0,02003	-0,05400	0,00292	-0,06588	0,00434
15	-0,42688	0,18222	-0,14154	0,02003	-0,07738	0,00599	-0,06588	0,00434
16	-0,18488	0,03418	-0,14154	0,02003	-0,07738	0,00599	-0,06588	0,00434
17	-0,00887	0,00008	-0,14154	0,02003	0,13138	0,01726	-0,06588	0,00434
18	-0,18388	0,03381	-0,14154	0,02003	0,13138	0,01726	-0,06588	0,00434
19	0,32613	0,10636	-0,14154	0,02003	-0,05400	0,00292	0,06587	0,00434
20	-0,19188	0,03682	-0,14154	0,02003	-0,05400	0,00292	0,06587	0,00434
21	0,42813	0,18329	-0,14154	0,02003	-0,07738	0,00599	0,06587	0,00434
22	-0,53588	0,28716	-0,14154	0,02003	-0,07738	0,00599	0,06587	0,00434
23	-0,34888	0,12171	-0,14154	0,02003	0,13138	0,01726	0,06587	0,00434
24	0,24713	0,06107	-0,14154	0,02003	0,13138	0,01726	0,06587	0,00434

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXVI. **Cálculos para suma de cuadrados y análisis de varianza de las interacciones de los factores**

corrida	E F1-F2	An cuadrado	E F1-F3	An cuadrado	E F2-F3	An cuadrado	E F1-F2-F3	An cuadrado
1	-0,02442	0,00060	-0,06312	0,00398	0,08325	0,00693	-0,02600	0,00068
2	-0,02442	0,00060	-0,06312	0,00398	0,08325	0,00693	-0,02600	0,00068
3	-0,03904	0,00152	-0,06312	0,00398	-0,08038	0,00646	-0,07738	0,00599
4	-0,03904	0,00152	-0,06312	0,00398	-0,08038	0,00646	-0,07738	0,00599
5	0,06346	0,00403	-0,06312	0,00398	-0,00287	0,00001	0,10338	0,01069
6	0,06346	0,00403	-0,06312	0,00398	-0,00287	0,00001	0,10338	0,01069
7	-0,02442	0,00060	0,06313	0,00398	-0,08325	0,00693	0,02600	0,00068
8	-0,02442	0,00060	0,06313	0,00398	-0,08325	0,00693	0,02600	0,00068
9	-0,03904	0,00152	0,06313	0,00398	0,08038	0,00646	0,07738	0,00599
10	-0,03904	0,00152	0,06313	0,00398	0,08038	0,00646	0,07738	0,00599
11	0,06346	0,00403	0,06313	0,00398	0,00288	0,00001	-0,10338	0,01069
12	0,06346	0,00403	0,06313	0,00398	0,00288	0,00001	-0,10338	0,01069
13	0,02442	0,00060	-0,06312	0,00398	-0,08325	0,00693	-0,02600	0,00068
14	0,02442	0,00060	-0,06312	0,00398	-0,08325	0,00693	-0,02600	0,00068
15	0,03904	0,00152	-0,06312	0,00398	0,08038	0,00646	-0,07738	0,00599
16	0,03904	0,00152	-0,06312	0,00398	0,08038	0,00646	-0,07738	0,00599
17	-0,06346	0,00403	-0,06312	0,00398	0,00288	0,00001	0,10338	0,01069
18	-0,06346	0,00403	-0,06312	0,00398	0,00288	0,00001	0,10338	0,01069
19	0,02442	0,00060	0,06313	0,00398	0,08325	0,00693	0,02600	0,00068
20	0,02442	0,00060	0,06313	0,00398	0,08325	0,00693	0,02600	0,00068
21	0,03904	0,00152	0,06313	0,00398	-0,08038	0,00646	0,07738	0,00599
22	0,03904	0,00152	0,06313	0,00398	-0,08038	0,00646	0,07738	0,00599
23	-0,06346	0,00403	0,06313	0,00398	-0,00287	0,00001	-0,10338	0,01069
24	-0,06346	0,00403	0,06313	0,00398	-0,00287	0,00001	-0,10338	0,01069

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXVII. **Análisis de varianza de la cantidad de metales recuperados**

	<b>SC</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>Fc (p=0,05)</b>
total	2,62805	23			
F1	0,48082	1	0,48082	3,99851	4,75
F2	0,20930	2	0,10465	0,87027	3,89
F3	0,10415	1	0,10415	0,86611	4,75
F1-F2	0,04918	2	0,02459	0,20449	3,89
F1-F3	0,09563	1	0,09563	0,79530	4,75
F2-F3	0,10719	2	0,05360	0,44571	3,89
F1-F2-F3	0,13879	2	0,06940	0,57711	3,89
error	1,44299	12	0,12025		

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXXXVIII. **Código de niveles**

nivel	Factor 1 (F1) reductor	Factor 2 (F2) moles (mol)	Factor 3 (F3) pH
1	zinc	3,82E-03	7,000
2		5,35E-03	
3	aluminio	6,88E-03	2,200

Fuente: elaboración propia.