



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

**DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROCESO PARA LA FABRICACIÓN DE  
SULFATO DE ZINC PENTAHIDRATADO A PARTIR DE ESMITSONITA  
EXTRAIDA DE LA MINA CAQUIPEC, COBÁN ALTA VERAPAZ**

**Joze Eduardo del Cid Castillo**

Asesorado por el Ing. Mariano Arturo José Eskenasy García

Guatemala, agosto de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROCESO PARA LA FABRICACIÓN DE SULFATO  
DE ZINC PENTAHIDRATADO A PARTIR DE ESMITSONITA EXTRAIDA DE LA  
MINA CAQUIPEC, COBÁN ALTA VERPAZ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JOZE EDUARDO DEL CID CASTILLO**

ASESORADO POR EL ING. MARIANO ARTURO JOSÉ ESKENASY GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Thelma Maricela Cano Morales
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Cesar Alfonzo Garcia Guerra
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## 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:

### **DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROCESO PARA LA FABRICACIÓN DE SULFATO DE ZINC PENTAHIDRATADO A PARTIR DE ESMITSONITA EXTRAIDA DE LA MINA CAQUIPEC, COBÁN ALTA VERAPAZ**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 10 de febrero de 2 010.



**José Eduardo del Cid Castillo**

Guatemala 02 de mayo de 2011

Ingeniero  
Williams Álvarez  
Director de Escuela  
Ingeniería Química  
Presente

Estimado Ingeniero Álvarez, reciba un cordial saludo, esperando sus actividades diarias se estén llevando con normalidad. El motivo de la presente es para hacerle saber que he revisado y doy por aprobado el informe final del trabajo de graduación titulado **“DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROCESO PARA LA FABRICACIÓN DE SULFATO DE ZINC PENTAHIDRATADO A PARTIR DE ESMITSONITA EXTRAIDA DE LA MINA CAQUIPEC, COBÁN ALTA VERAPAZ”**. Elaborado por el estudiante Joze Eduardo del Cid Castillo. Sin otro particular me despido de usted.

Atentamente,



Ing. Qco. Mariano Arturo José Eskenasy García

*Mariano Arturo Eskenasy*  
INGENIERO QUÍMICO  
Colegiado 415



Guatemala, 25 de mayo de 2011  
Ref.EIQ.TG.130.2011

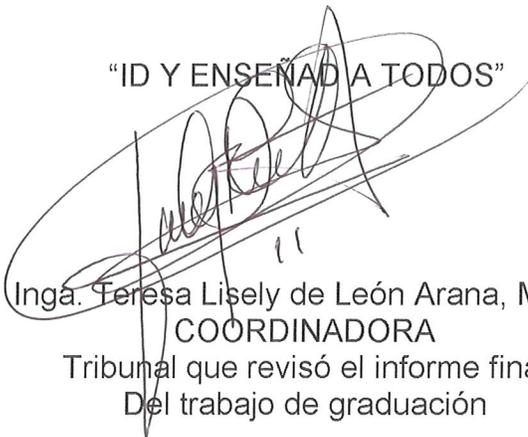
Ingeniero  
**Williams Guillermo Álvarez Mejía**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el **Acta TG-1622011-B-IF** le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERO QUÍMICO al estudiante universitario, **Joze Eduardo del Cid Castillo**, identificado con carné No. **2000-10432**, titulado: **“DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROCESO PARA LA FABRICACIÓN DE SULFATO DE ZINC PENTAHIDRATADO A PARTIR DE ESMITSONITA EXTRAÍDA DE LA MINA CAQUIPEC, COBÁN ALTA VERAPAZ”**, el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico **Mariano Arturo José Eskenasy García**.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice al estudiante **del Cid Castillo**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Ing. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.  
COORDINADORA  
Tribunal que revisó el informe final  
Del trabajo de graduación



ESCUELA DE  
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo



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, **JOZE EDUARDO DEL CID CASTILLO** titulado: "DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROCESO PARA LA FABRICACIÓN DE SULFATO DE ZINC PENTAHIDRATADO A PARTIR DE ESMITSONITA EXTRAIDA DE LA MINA CAQUIPEC, COBÁN ALTA VERAPAZ". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

  
Ing. William A. Alvarado Alvarado  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, agosto de 2011

Cc: Archivo  
WGAM/ale



DTG. 316.2011.

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: **DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROCESO PARA LA FABRICACIÓN DE SULFATO DE ZINC PENTAHIDRATADO A PARTIR DE ESMITSONITA EXTRAIDA DE LA MINA CAQUIPEC, COBÁN ALTA VERAPAZ**, presentado por el estudiante universitario **Jose Eduardo del Cid Castillo**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, 29 de agosto de 2011.

/gdech

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por darme vida y la bendición de poder estudiar y culminar esta etapa a nivel superior.
<b>Mi madre</b>	Libby Karin Castillo, por ser fuente de inspiración, lucha, dedicación, trabajo duro, superación y amor.
<b>Mi padre</b>	José María del Cid, por ser mi más grande mentor.
<b>Mis hermanos</b>	David, Linda y Melanny, por el amor y la base familiar que seremos.
<b>Mi sobrina</b>	Stephany, por ser la persona más bella de este planeta, y como parte de las futuras generaciones debe saber que la mejor herencia que puede tener es la educación.
<b>Mi abuela</b>	Cristobalina Dubón, quien me ha dado el ejemplo de ser pilar de una familia y el concepto más grande de unidad familiar.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **Mis tíos y primos**

Familias del Cid y Castillo, simple y sencillamente por ser los mejores tíos, los mejores primos que puedo tener y que existen en este planeta.

### **Mis amigos**

Francisco Solórzano, María José De León, David Vásquez, Lucía Canahuí, Adrián Soberanis, Mariela Recinos, Javier Vásquez, Marco Vásquez, Juan Pablo García y Víctor García. Porque el tesoro más grande y valioso que una persona puede acumular en esta vida son los amigos.

### **Mi novia**

María del Pilar, por su amor y apoyo durante esta etapa final.

### **Ing. Mariano Eskenasy**

Por el tiempo dedicado y los aportes realizados a este trabajo de graduación. Por creer en mí y guiarme en mi carrera profesional.

### **Ing. Cesar Alfonso García**

Por ser un profesional que ha guiado mi formación académica desde los primeros años hasta estas instancias finales.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN .....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
HIPÓTESIS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN .....	XXV
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO .....	3
2.1. Minería en Guatemala .....	3
2.1.1. Datos geológicos.....	3
2.1.1.1. Región Occidental .....	3
2.1.1.2. Región Norte .....	4
2.1.1.3. Región Oriental .....	6
2.1.1.4. Zona litoral del Pacífico .....	6
2.1.2. Ubicación y yacimientos.....	7
2.1.3. Minerales metálicos .....	7
2.1.3.1. Plomo, zinc, plata .....	7
2.2. Zinc.....	8
2.2.1. Química general.....	8
2.2.2. Zinc elemental.....	10
2.2.2.1. Color.....	11
2.2.2.2. Solubilidad.....	11

2.2.2.3.	Formación de complejos .....	12
2.2.2.4.	Propiedades electroquímicas .....	12
2.2.2.5.	Radioquímica .....	13
2.2.2.6.	Efectos Fisiológicos .....	13
2.2.2.6.1.	Plantas .....	14
2.2.2.6.2.	Animales .....	14
2.2.2.6.3.	Nutrición humana .....	15
2.2.2.7.	Geoquímica.....	15
2.3.	Carbonato de zinc ( $ZnCO_3$ ) .....	16
2.3.1.	Estructura .....	17
2.3.2.	Propiedades físicas .....	17
2.3.3.	Reacciones químicas.....	18
2.4.	Sulfato de zinc ( $ZnSO_4$ ).....	18
2.4.1.	Estructura .....	19
2.4.2.	Propiedades físicas .....	19
2.5.	Reglas de solubilidad .....	22
2.6.	Elementos de metalurgia.....	23
2.6.1.	Clasificación de los metales y minerales .....	23
2.6.2.	Procesos Metalúrgicos .....	25
2.6.2.1.	Procesos pirometalúrgicos.....	26
2.6.2.1.1.	Tostado .....	26
2.6.2.1.2.	Fundición metalúrgica .....	26
2.6.2.1.3.	Fundiciones de refinación .....	27
2.6.2.2.	Procesos hidrometalúrgicos.....	27
2.7.	Rol de la preparación mecánica en el tratamiento de minerales....	28
2.7.1.	Preparación del mineral .....	28
2.7.2.	Separación de los minerales.....	29
2.8.	Lixiviación.....	29
2.8.1.	Procesos de lixiviación para materiales inorgánicos.....	29

2.8.1.1.	Preparación de sólidos para la lixiviación.....	30
2.8.1.1.1.	Material inorgánico y orgánico.....	30
2.8.2.	Métodos de operación en la lixiviación.....	31
2.8.3.	Tipos de equipo para la lixiviación .....	32
2.8.3.1.	Lixiviación agitada del sólido .....	33
2.8.4.	Variables que afectan la velocidad de lixiviación .....	33
2.8.4.1.	Lixiviación agitada del sólido .....	33
2.8.4.2.	Concentraciones del solvente .....	33
2.8.4.3.	Tamaño de partícula .....	33
2.8.4.4.	Porosidad .....	34
2.8.4.5.	Agitación.....	34
2.9.	Agitación y mezclado.....	34
2.9.1.	Equipo para la agitación.....	35
2.9.2.	Trayectoria del flujo de agitación.....	36
2.10.	Filtración.....	37
2.10.1.	Clasificación de los filtros.....	38
2.10.1.1.	Medios filtrantes .....	39
2.10.1.1.1.	Geotextil .....	39
2.10.1.1.1.1.	Propiedades ....	40
2.10.2.	Filtración .....	40
2.10.3.	Ayudas de filtración.....	41
2.11.	Evaporación.....	41
2.11.1.	Operación de un proceso al vacío.....	42
2.12.	Cristalización .....	42
2.12.1.	Cristalización de vacío .....	43
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	45
3.1.	Variables.....	45
3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	46

3.2.1.	Condiciones de operación variables .....	46
3.2.1.1.	Reacción química .....	47
3.2.1.2.	Cantidad de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (98%) nivel laboratorio.....	47
3.2.1.3.	Cantidad de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (98 %) nivel planta piloto ....	47
3.2.1.4.	Constante de lixiviación para nivel laboratorio .....	48
3.2.1.5.	Constante de lixiviación para nivel planta piloto.....	48
3.2.1.6.	Sulfato de zinc relación laboratorio .....	48
3.2.1.7.	Sulfato de zinc relación planta piloto.....	48
3.2.2.	Condiciones de operación fijas .....	49
3.2.2.1.	Relación de lixiviación.....	49
3.2.2.2.	Condiciones de operación.....	49
3.2.2.3.	Agitación para nivel laboratorio y planta piloto .....	49
3.2.2.4.	Reactores.....	50
3.2.2.5.	Cristalizador .....	50
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	50
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	51
3.4.1.	Equipo operativo.....	51
3.4.2.	Equipo de medición .....	51
3.4.3.	Reactivos.....	52
3.4.4.	Materia prima.....	53
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	54
3.5.1.	Descripción del procedimiento para nivel laboratorio .....	54
3.5.2.	Descripción procedimiento para nivel planta piloto.....	55
3.5.3.	Determinación de la concentración de zinc .....	56
3.5.4.	Determinación de la concentración de metales pesados .....	57

3.5.5.	Diagrama de proceso fabricación de sulfato de zinc.....	59
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	60
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	60
3.8.	Análisis estadístico .....	61
4.	RESULTADOS.....	65
4.1.	Resultados de pruebas realizadas a nivel laboratorio .....	65
4.2.	Resultados de pruebas realizadas a nivel planta piloto.....	69
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	75
	CONCLUSIONES .....	79
	RECOMENDACIONES .....	81
	BIBLIOGRAFÍA .....	83
	APÉNDICE.....	85
	ANEXOS .....	143



## INDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Diagrama de Flujo del proceso.....	59
2.	Comportamiento del pH en función del volumen de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> adicionado durante la etapa de lixiviación del zinc presente en la esmitsonita en laboratorio .....	65
3.	Comportamiento de la densidad en función del volumen de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> adicionado durante la etapa de lixiviación del zinc presente en la esmitsonita en laboratorio .....	66
4.	Concentración de zinc en función del volumen de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> adicionado, durante la etapa de lixiviación del zinc presente en la esmitsonita en laboratorio .....	66
5.	Comportamiento del pH en función del volumen de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> adicionado durante la etapa de lixiviación del zinc presente en la esmitsonita en planta piloto .....	69
6.	Comportamiento de la densidad de la solución en función del volumen de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> adicionado durante la etapa de lixiviación del zinc presente en la esmitsonita en planta piloto .....	70
7.	Concentración de zinc en función del volumen de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> adicionado durante la etapa de lixiviación del zinc presente en la esmitsonita en planta piloto .....	70

## TABLAS

I.	Propiedades del zinc .....	10
II.	Potenciales de oxidación - reducción .....	13
III.	Distribución en la naturaleza de los cinco isotopos estables .....	16
IV.	Datos termodinámicos de sulfato de zinc hidratado .....	19
V.	Solubilidad del ZnSO <sub>4</sub> a varias temperaturas .....	20
VI.	Densidad de soluciones acuosas de ZnSO <sub>4</sub> a 20 °C .....	20
VII.	Reducción en la presión de vapor del agua en solución.....	21
VIII.	Concentración y cantidades de reactivos para nivel laboratorio .....	46
IX.	Concentración y cantidades de reactivos para nivel planta piloto....	47
X.	Relación de lixiviación para nivel laboratorio y planta piloto .....	49
XI.	Tamaño de partícula de la esmitsonita .....	49
XII.	Condiciones fijas de operación del sistema de agitación.....	49
XIII.	Reactor nivel laboratorio.....	50
XIV.	Reactor nivel planta piloto.....	50
XV.	Cristalizador por evaporación al vacío .....	50
XVI.	Descripción física y química del ácido sulfúrico .....	52
XVII.	Descripción química de la esmitsonita.....	53
XVIII.	Descripción física de la esmitsonita.....	54
XIX.	Proceso de lixiviación planta piloto .....	60
XX.	Tabulación de datos por etapa .....	61
XXI.	Resultados finales etapa de lixiviación laboratorio .....	67
XXII.	Resultados finales del proceso de filtración laboratorio .....	67
XXIII.	Zinc metálico necesario para la reducción de metales pesados en laboratorio.....	67
XXIV.	Comportamiento del plomo en los diferentes productos de cada etapa en laboratorio .....	68

XXV.	Comportamiento del cadmio en los diferentes productos de cada etapa en laboratorio .....	68
XXVI.	Sal de sulfato de zinc pentahidratado final obtenido en laboratorio.....	69
XXVII.	Rendimiento de obtención de sulfato de zinc en laboratorio.....	69
XXVIII.	Resultados finales etapa de lixiviación planta piloto .....	71
XXIX.	Resultados finales del proceso de filtración planta piloto.....	71
XXX.	Zinc metálico necesario para la reducción de metales pesados en planta piloto .....	71
XXXI.	Comportamiento del plomo en los diferentes productos de cada etapa en planta piloto .....	72
XXXII.	Comportamiento del cadmio en los diferentes productos de cada etapa en planta piloto .....	72
XXXIII.	Total agua evaporada a 22 pulgadas de vacío de mercurio y 45 °C.....	73
XXXIV.	Sal de sulfato de zinc pentahidratado final obtenida en planta piloto.....	73
XXXV.	Rendimiento de obtención de sulfato de zinc en planta piloto .....	73



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>abs</b>	Absoluta
<b>A</b>	Amperio
<b>Å</b>	Armstrong
<b>bar</b>	Bares
<b>HP</b>	Caballos de fuerza
<b>Cp</b>	Calor específico
$\Delta$	Cambio
<b>C</b>	Celsius
<b>cc</b>	Centímetros cúbicos
$\partial$	Covarianza
<b>S</b>	Desviación estándar

<b><math>\Delta H</math></b>	Entalpia
<b><math>\Delta F</math></b>	Entalpia de formación
<b>S</b>	Entropía
<b>°</b>	Grados
<b>GL</b>	Grados de libertad
<b>G</b>	Gramos
<b>Hi</b>	Hipótesis alternativa
<b>Ho</b>	Hipótesis nula
<b>Kpa</b>	Kilo pascuales
<b>Lb</b>	Libra
<b>Psig</b>	Libra por pulgada cuadrada manométrica
<b>L</b>	Litro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>µm</b>	Micrómetro
<b>mL</b>	Mililitro

<b>Min</b>	Minutos
<b>μ</b>	Nano
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>%</b>	Porcentaje
<b>w/w</b>	Porcentaje en peso
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno
<b>plg</b>	Pulgada
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>Ton</b>	Toneladas
<b>V</b>	Voltios



## **GLOSARIO**

<b>Aleación</b>	Mezcla sólida homogénea de dos o más metales, o de uno o más metales con algunos elementos no metálicos.
<b>Astringente</b>	Cualquier sustancia que con su aplicación externa local, hace que se retraigan los tejidos y pueden producir una acción cicatrizante, antiinflamatoria y antihemorrágica.
<b>Concentrado</b>	Producto con elevado contenido del elemento, que se obtiene después de incrementar la ley del mineral con valor económico o mena mediante operaciones de molienda y concentración.
<b>Cribado</b>	Proceso de separación de partículas finas de las gruesas.
<b>Depósitos</b>	Lugar donde se encuentra el concentrado.
<b>Electromotor</b>	Transformador de energía eléctrica en trabajo mecánico.
<b>Electropositivo</b>	Se presenta en los metales que tienden a ceder electrones transformándose en cationes.

<b>Emplazados</b>	Minerales que se encuentra en un determinado lugar.
<b>Epitermales</b>	Depósitos minerales en los que la mineralización ocurrió dentro de uno a dos kilómetros de profundidad desde la superficie terrestre y se depositó a partir de fluidos hidrotermales.
<b>Galvanizar</b>	Proceso electroquímico por el cual se puede cubrir un metal con otro.
<b>Ganga</b>	Material que se descarta al extraer la mena de un yacimiento de mineral por carecer de valor económico o ser demasiado costoso su aprovechamiento.
<b>Ígneo</b>	De procedencia por la formación cuando el magma se enfría y se solidifica.
<b>Isotopo</b>	Átomos de un mismo elemento, cuyos núcleos tienen cantidad diferente de neutrones y por tanto, difieren en masa.
<b>Latericos</b>	Suelo propio de las regiones caracterizadas por la pobreza de sílice y un elevado tenor de hierro y alúmina.

<b>Lotes</b>	Se conoce como sistema por lotes, o modo de <i>batch</i> , a la ejecución de un programa sin el control o supervisión directa del usuario. Se utiliza en tareas repetitivas sobre grandes conjuntos de información.
<b>Mena</b>	Mineral del que se puede extraer un elemento. Une metal generalmente, por contenerlo en cantidad suficiente para ser aprovechado. Así se dice que un mineral es mena de un metal cuando mediante minería es posible extraer ese mineral.
<b>Metasomatismo</b>	Proceso de sustitución de uno o más minerales por el aporte de nuevos minerales.
<b>Percolación</b>	Es el paso de las aguas a través de los materiales porosos o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio ambiente.
<b>Radiación</b>	Consiste en el paso lento de las aguas a través de los materiales porosos.
<b>Skarn</b>	Termino introducido para designar rocas metamórficas regionales o de contacto constituidas por silicatos de Ca, Mg y Fe, derivados de calizas y dolomitas.

**Yacimiento**

Es una formación en la que está presente una concentración estadísticamente anómala de minerales en la corteza terrestre o litosfera.

## RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se ha diseñado el proceso experimental para la fabricación de sulfato de zinc pentahidratado a partir del mineral esmitsonita la cual tiene en promedio 27,00 % w/w de zinc elemental.

El proceso ha sido dividido en dos niveles, laboratorio y planta piloto. En la etapa de laboratorio se definieron los puntos críticos del proceso, el equipo a emplear y las condiciones operativas. Evaluando las concentraciones de zinc, plomo y cadmio en los productos y sub productos obtenidos.

Realizando el mismo procedimiento para laboratorio y planta piloto. Reaccionado el mineral con ácido sulfúrico al 98,00% empleando una relación de 5,102 g esmitsonita/mL  $H_2SO_4$  para la extracción del zinc, obteniendo una solución de sulfato de zinc. Separando así la mayor cantidad de plomo en un sólido húmedo de sulfato de plomo y otros insolubles.

La solución de sulfato de zinc contenía 740 ppm de plomo en laboratorio y 626 ppm en planta piloto, de cadmio 66 ppm en laboratorio y 70,5 ppm en planta piloto. Utilizando la reducción adicionando zinc metálico con una relación para laboratorio de 6,1819 g esmitsonita/g  $Zn^0$  y para planta piloto de 9,3859 g esmitsonita/g  $Zn^0$  para eliminar el plomo y el cadmio. Eliminando completamente el plomo, el cadmio no es eliminado obteniendo 65 ppm para laboratorio y 68 ppm para planta piloto, se filtró la solución.

Esta última solución libre de plomo fue sometida a la evaporación de la mayor cantidad de agua y cristalizada a una presión de 22 pulgadas de mercurio y 45 °C, obteniendo sulfato de zinc pentahidratado libre de plomo con trazas de cadmio, 1 539 ppm en laboratorio y 1 603 ppm en planta piloto. El rendimiento de extracción para laboratorio fue de 40,77% y para planta piloto de 39,34%.

## OBJETIVOS

### General

Evaluar técnicamente el proceso extractivo de carbonato de zinc a partir del mineral esmitsonita mediante la técnica por lixiviación con ácido sulfúrico para la obtención de sulfato de zinc pentahidratado ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

### Específicos

1. Determinar el requerimiento de ácido sulfúrico concentrado para la lixiviación de zinc (Zn) del mineral esmitsonita en función de la extracción a nivel de laboratorio y nivel de planta piloto.
2. Determinar el requerimiento de agua para el agotamiento de zinc (Zn) y el número de ciclos de lavado necesarios.
3. Determinar el requerimiento de zinc metálico ( $\text{Zn}^0$ ) necesario para la reducción efectiva de metales pesados provenientes del mineral.
4. Determinar los requerimientos operativos para la cristalización por evaporación al vacío.
5. Determinar el rendimiento de sal de zinc obtenido en forma de sulfato de zinc pentahidratado. ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).



## HIPÓTESIS

El carbonato de zinc (esmitsonita) puede reaccionar con ácido sulfúrico para obtener una sal de sulfato, susceptible de ser purificada. Por lo que se tiene:

### Hipótesis nulas

**Ho<sub>1</sub>**: el promedio de los gramos de sulfato de zinc pentahidratado obtenidos a nivel laboratorio serán = 186 g de sulfato de zinc pentahidratado.

**Ho<sub>2</sub>**: la concentración promedio final de cadmio a nivel laboratorio será  $\leq 878$  ppm.

**Ho<sub>3</sub>**: la concentración promedio final de plomo a nivel laboratorio será  $\leq 24\ 892$  ppm.

**Ho<sub>4</sub>**: el promedio de los gramos de sulfato de zinc pentahidratado obtenidos a nivel planta piloto serán = 9 717 g de sulfato de zinc pentahidratado.

**Ho<sub>5</sub>**: la concentración promedio final de cadmio a nivel planta piloto será  $\leq 835$  ppm.

**Ho<sub>6</sub>**: la concentración promedio final de plomo a nivel planta piloto será  $\leq 24\ 454$ ppm.

## **Hipótesis alternativas**

**H1<sub>1</sub>:** el promedio de los gramos de sulfato de zinc pentahidratado obtenidos a nivel laboratorio serán  $\neq$  186 g de sulfato de zinc pentahidratado.

**H1<sub>2</sub>:** la concentración promedio final de cadmio a nivel laboratorio será  $>$  878 ppm.

**H1<sub>3</sub>:** la concentración promedio final de plomo a nivel laboratorio será  $>$  24 892 ppm.

**H1<sub>4</sub>:** el promedio de los gramos de sulfato de zinc pentahidratado obtenidos a nivel planta piloto serán  $\neq$  9 717 g de sulfato de zinc pentahidratado.

**H1<sub>5</sub>:** la concentración promedio final de cadmio a nivel planta piloto será  $>$  835 ppm.

**H1<sub>6</sub>:** la concentración promedio final de plomo a nivel planta piloto será  $>$  24 454 ppm.

## INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país con una gran diversidad de recursos los cuales el ser humano ha sido capaz de explotar. La extracción de materiales del subsuelo ha sido una de las actividades que se ha llevado a cabo principalmente, sin embargo el procesamiento del mineral ha quedado relegado a un segundo plano, limitándose en la mayoría de casos a procesos físicos, exclusivamente de reducción de tamaño de partícula. El zinc es un elemento esencial en cada uno de los procesos biológicos para plantas, animales y el ser humano. En Guatemala existen gran cantidad de yacimientos minerales con considerables concentraciones de zinc. Los minerales en la naturaleza se encuentran siempre con un acompañante, en el caso del zinc, éste viene acompañado con metales pesados, en este caso el plomo y el cadmio, los cuales si se hacen presentes en cantidades considerables pudiendo llegar a ser dañinos y perjudiciales para el ser humano y su entorno.

Por lo tanto se ha desarrollado un procedimiento para procesar el mineral y convertirlo en un producto que sea aceptable, sin la presencia de plomo y cadmio. Se han empleado conceptos de solubilidad y aplicando las operaciones unitarias específicas de lixiviación, evaporación y cristalización. EL objetivo principal será diseñar el proceso de fabricación de sulfato de zinc pentahidratado, partiendo del mineral esmitsonita rico en zinc, el cual también contiene plomo y cadmio, determinando así la cantidad específica de ácido sulfúrico concentrado grado industrial utilizado, la relación de lixiviación, el requerimiento de zinc metálico para la reducción del plomo y cadmio, los requerimientos operativos para la evaporación y cristalización de la solución final obtenida y el rendimiento final de extracción del proceso.



## 1. ANTECEDENTES

Actualmente en Guatemala se fundamenta sobre la actividad manufacturera, la importancia y la magnitud de ésta, depende de gran parte de los abastecimientos que le proporcionan las actividades primarias, a saber, la agricultura y la minería.

La minería nacional produce minerales para la exportación en forma de concentrados, y para consumo local en forma de metales. La minería de nuestro país está orientada pues, casi en su totalidad, a la elaboración de concentrados de minerales para la exportación, en tanto no se abran nuevas industrias que utilicen sus productos como materia prima.

Los principales renglones que comprende la producción minera para la exportación, son en orden de importancia, los siguientes:

- Concentrados de plomo
- Concentrados de zinc
- Concentrados de antimonio
- Concentrados de níquel
- Concentrados de oro

La explotación de yacimientos de zinc y plomo adquieren cierta importancia dentro de la producción minera en el país, teniendo en cuenta que prácticamente toda ha procedido de Huehuetenango, Alta y Baja Verapaz.

Dentro de la explotación de estos yacimientos especialmente los de zinc y plomo se trabajó inicialmente con un proceso el cual consistía en obtener como producto final óxido de zinc y óxido de plomo. Partiendo de la lixiviación del mineral con ácido sulfúrico, después de la reacción con éste se procedía a filtrar, el sólido restante con sulfato de plomo insoluble el cual se separaba para obtener el óxido de plomo. El filtrado se dirigía a la etapa de cementación en la cual se eliminaban las trazas de plomo en la solución. Después de la eliminación de las partículas de plomo se eliminaba el hierro presente en la solución agregando hipoclorito de sodio e hidróxido de calcio, separando por filtración el hierro presente en la solución. Este siguiente filtrado se procedía a precipitarle el zinc concentrado en la solución agregando hidróxido de sodio, obteniendo un precipitado blanco. Se filtraba la solución y el hidróxido de zinc se procedía a calcinar para obtener el óxido de zinc como producto final.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Minería en Guatemala**

#### **2.1.1. Datos geológicos**

En Guatemala se definen cuatro regiones donde ocurren los principales depósitos minerales: la Región Occidental, la Región Norte, la Región Oriental y la Zona Litoral del Pacífico en donde yacen grande volúmenes de arenas titaníferas y magnetita.

##### **2.1.1.1. Región occidental**

Destacan en importancia los depósitos de plomo y zinc (Pb-Zn) con asociaciones de plata y cobre (Ag-Cu) que yacen en los distritos mineros de Chiantla - San Sebastián y San Miguel Acatán, en el departamento de Huehuetenango.

Se distinguen en ambos distritos pirita, esfalerita, galena, calcopirita, pirargirita y cuarzo, como los minerales hipogénicos más frecuentes. Anglesita – cerusita, esmitsonita – calamina, óxidos de hierro y minerales secundarios de cobre, son el producto de la alta oxidación de los cuerpos minerales. Se observa un mayor contenido de cobre en la parte Noreste de los Altos Cuchumatanes, mientras que el contenido de plata (Ag), aumenta en la parte Sudeste.

No menos importantes son los depósitos de antimonio – tungsteno (Sb-Wo) que yacen en San Idelfonso Ixtahuacán, Huehuetenango. Actualmente es una de las minas que se explota, obteniéndose un concentrado de mineral con 60% de antimonio (Sb) con un grado de hasta 8% de tungsteno (Wo).

Otro distrito minero es el de Caníbal, al Oeste de Cuilco, Huehuetenango, en donde aflora un dique de ilmenita, buzante al Sur y paralelamente a la zona de la falla Cuilco – Chixoy – Polochic y se prolonga a territorio mexicano.

La mineralización consiste principalmente de ilmenita (mineral de titanio), que se encuentra en la fracción de minerales magnéticos y es la más abundante (85%), leucoxeno y rutilo. Análisis espectro gráficos indican una ley media de 0,012 hasta 0,15% de óxidos de titanio. Las reservas de mineral sobrepasan los 50 millones de toneladas con un contenido promedio de 19,43% de titanio.

#### **2.1.1.2. Región Norte**

En esta región la mineralización la constituyen una serie de yacimientos de plomo, zinc, plata (Pb – Zn – Ag), níquel – cobalto (Ni – Co) y cobre (Cu) ubicados en cuatro principales distritos mineros.

Los depósitos de plomo, zinc y plata (Pb – Zn – Ag) se localizan principalmente en el distrito minero de Cobán, en la región de las verapaces, pudiendo diferenciarse dos áreas principales. Una en la parte Norte de la falla de Cuilco – Chixoy – Polochic en donde yacen cuerpos irregulares de reemplazamiento emplazados en calizas y dolomitas. Destaca en importancia el depósito de la mina *Caquipec* al Sureste de Cobán, Alta Verapaz.

La mineralización presenta contenidos promedio de 12 % de Pb, 30 % de Zn y 10 onzas/ton de Ag. De aquí se han producido concentrados de plomo con 32 – 62 % de Pb y 15 a 20 onzas/ton de Ag. Se encuentran también depósitos cuyo valor comercial aún no ha sido agotado.

La otra área donde yacen depósitos de plomo, zinc y plata (Pb – Zn – Ag) se localiza al sur de la falla Cuilco – Chixoy – Polochic y se trata también de cuerpos irregulares de reemplazamiento emplazados en rocas calcáreas. Aquí sobresalen los depósitos de Suquinay, Repollal y Camelias al este de Purulhá, Baja Verapaz. De aquí se ha producido concentrados con 17 % de Pb y 40 % de Zn y 4 onzas/ton de Ag.

Revisten importancia, también, los depósitos de níquel y cobalto (Ni – Co), los cuales ocurren en dos distritos principales. El de mayor interés económico se localiza en la región del Estor, Izabal, en donde se ha evaluado un potencial de 50 millones de toneladas de laterita con 1,5 % de Ni y 0,05 % de Co. El otro yacimiento se localiza entre las localidades de Uspantán y San Cristóbal Verapaz de los departamentos de El Quiché y Alta Verapaz respectivamente. Aquí se han evaluado 40 millones de toneladas de suelos lateríticos con 1,25 % de Ni y 0,04 % de Co.

Yacimientos de cobre (Cu), se localizan únicamente en la mina de Oxec, al Oeste de Cahabón, Alta Verapaz. La mineralización principal consiste de calcopirita y piritita con cuarzo que ocurre en vetas asociadas a una zona de falla y una fuerte oxidación en la superficie.

### **2.1.1.3. Región oriental**

En esta región destaca la importancia la mineralización económica de oro con pequeñas cantidades de plata en venas de cuarzo y zonas silicificadas emplazadas en fracturas. La mineralogía más común es pirita y arsenopirita con calcopirita, covelita y oro nativo como minerales asociados y está relacionada a procesos epitermales asociados a intrusiones de cuerpos ígneos. Este yacimiento se localiza en el distrito minero de Chiquimula, en donde también ocurren depósitos de cobre (Cu) en Xororaguá Hacienda el Santo, plomo, zinc y plata (Pb – Zn – Ag) en Tercerón y zonas de óxidos de hierro en San José la Aranda, localidades aledañas a la ciudad de Chiquimula.

Los depósitos más importantes de cobre, plomo, zinc, plata y oro (Cu – Pb – Zn – Ag – Au) son los que ocurren en el distrito minero de Concepción las Minas, localizado en la parte sureste del departamento de Chiquimula. Aquí yacen depósitos de zinc, plomo y plata (Zn – Pb – Ag) en forma de lentes o mantos dentro de calizas alteradas a skarn, producto de un metasomatismo de contacto. También mineralización de plomo y zinc (Pb – Zn) ocurre en forma de vetas emplazadas en fracturas dentro de rocas volcánicas del Terciario.

### **2.1.1.4. Zona litoral del Pacífico**

Esta zona la constituyen una faja angosta a lo largo del océano Pacífico la mineralización económica la constituye los grandes volúmenes de arenas ricas en magnesita y titanio acumulados en la zona litoral y que forman parte del potencial minero de Guatemala.

### **2.1.2. Ubicación y yacimientos**

En Guatemala, existe una gran diversidad de minerales con reservas de considerable importancia, por lo que la minería a pequeña escala puede incentivarse en este sector.

### **2.1.3. Minerales metálicos**

En Guatemala, existe una cantidad considerable de afloramientos de minerales metálicos, sin embargo, de la mayoría de ellos no se conoce aún con certeza su valor económico y la factibilidad de explotación.

Las principales ocurrencias de minerales metálicos, de acuerdo a su importancia económica son:

#### **2.1.1.1. Plomo, zinc, plata**

Estos minerales se encuentran frecuentemente asociados. Los mismos han sido explotados desde la época colonial en los departamentos de Huehuetenango, Quiché, Baja y Alta Verapaz. Además recientemente se han localizado importantes depósitos en el Departamento de Chiquimula. EL zinc es usado para galvanizar acero, en aleaciones, en acumuladores eléctricos, pilas (baterías secas), en medicamentos en la industria química, en laminados. El plomo se usa en industria de armamento, en la industria de impresión como colorante y para tipos de impresión, para pinturas anticorrosivas, como blindajes para protección contra radiación, en la fabricación de acumuladores, etc.

## **2.2. Zinc**

El zinc y sus compuestos tienen un interés teórico considerable en la química, biología y física, un valor práctico en las industrias químicas, metalúrgicas, cerámica, fertilizantes, pinturas, papel, plásticos, gomas, textiles, electrónicos y otras industrias.

### **2.2.1. Química general**

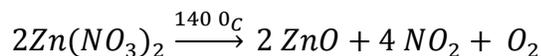
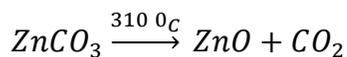
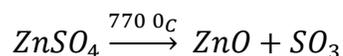
El zinc ocupa su posición en el grupo II y período 4 de la tabla periódica, está al final de los miembros de los metales de transición, o es el primer miembro de la serie de elementos normales empezando con el galio. El zinc en la literatura es nombrado un elemento de transición y en algunas ocasiones un elemento normal.

Los orbitales *d* en la tercera capa del átomo de zinc nunca se han usado para la formación de enlaces, y los metales no muestran una variable de valencia, que es una característica de un elemento de transición. En compuestos sólidos la valencia es invariable a dos, también hay evidencia de uno en fase de vapor. La uniformidad de la valencia es considerada con importancia en la práctica, particularmente en sales orgánicas y formulaciones que contribuye en la estabilidad en compuestos de zinc. Difiere en otras formas de los metales de transición. El metal, es suave, tiene un bajo punto de fusión y es considerablemente más electropositivo que sus vecinos del grupo de transición. Sin embargo, tiene semejanza con los elementos de transición en estabilidad para formar complejos, particularmente con el amonio, aminas, iones de aldehídos e iones de cianuros.

En general, la química del zinc se asemeja a la del berilio y particularmente al magnesio. Es considerablemente cercano a esos elementos en propiedades químicas generales con el calcio y los otros elementos del grupo II A.

Los radio iónicos del zinc y el magnesio son relativamente similares (0,74 A y 0,65 A) mientras el del berilio es mucho más pequeño (0,31 A). El zinc tiene una tendencia marcada a formar enlaces covalentes. El zinc es menos electropositivo que el magnesio. Los óxidos de zinc se disuelven en ácido en iones  $Zn^{+2}$ , y en álcalis para formar iones  $Zn(OH)_4^{2-}$ . El magnesio no es atacado por álcalis. Forma álcalis orgánicos y compuestos arilos en los cuales hay un enlace directo carbono – zinc. Ejemplo está el dietil zinc,  $(CH_3)_2Zn$ , difenil zinc,  $(C_6H_5)_2Zn$ .

Los carbonatos, nitratos y también los sulfatos de zinc son térmicamente inestables. Todos se descomponen a elevadas temperaturas a óxidos.



Fuente: FARNSWORTH, Marie. Zinc chemicals. p. 12.

### 2.2.2. Zinc elemental

Las principales propiedades del zinc elemental están dadas en la tabla Número I. El metal es azulado – blanco y lustroso, quebradizo a temperatura ordinaria pero maleable de 100 a 150 °C. El metal ebulle a 907 °C. Debajo del punto de ebullición tiene una apreciable presión de vapor.

Tabla I. **Propiedades del zinc**

Peso Atómico	65,37
Número Atómico	30,00
Valencia	2,00
Configuración electrónica externa	3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>
Radio atómico, Zn A	1,25
Radio iónico, Zn <sup>2+</sup> A	0,74
Potencial de ionización. Ev	
Primer	9,39
Segundo	17,87
Tercer	40,00
Potencial electrodo Zn <sup>2+</sup> /Zn, voltios	-0,76
Gravedad específica a 25 °C	7,13
Calor específico, cal/g	0,92
Calor de fusión, cal/mol	1 765,00
Calor de vaporización, cal/mol	27,43
Punto de fusión, °C	419,51
Punto de ebullición, °C	907,00
Resistividad, microohm-cm 20 °C	5,80
Disposición cristalina	Hexagonal cerca-empacada

Fuente: FARNSWORTH, Marie. Zinc Chemicals. p. 14.

El zinc es un alto electromotor de una serie de metales, por debajo del magnesio y aluminio, pero por encima del cadmio, hierro, níquel e hidrogeno. Reacciona con ácidos no oxidantes formando iones divalentes y liberando hidrógeno. Muy puro se disuelve lentamente en ácido clorhídrico. Adiciones de pequeñas cantidades de  $\text{Ni}^{2+}$  o  $\text{Co}^{2+}$  cataliza la reacción.

Es un agente reductor energético, especialmente en la forma de polvo de zinc. Grandes cantidades de polvo de zinc se emplean para reducir otros metales, para producir químicos como el sodio e hidrosulfitos de zinc y formaldehidos de zinc, y para llevar la reducción de síntesis orgánicas.

#### **2.2.2.1. Color**

El óxido de zinc se colora cuando se calienta. Por un lado del color limitado del óxido, los compuestos de zinc son blancos (incolores) excepto por las sales aniónicas coloradas – por ejemplo, cromato de zinc. Esta propiedad de color es una ventaja práctica en varias aplicaciones, particularmente en sistemas orgánicos como en recubrimientos o plásticos.

#### **2.2.2.2. Solubilidad**

La solubilidad de las sales de zinc son en general, similares a las del magnesio. El cloruro, ioduro, clorato, sulfato y nitrato son bastante solubles en agua. En efecto, las solubilidades de los aldehídos, con excepción de los fluoruros de zinc, son enormes. Son solubles en alcohol, acetonas y solventes similares, que muestran el considerablemente carácter covalente en los enlaces de los aldehídos de zinc. Los compuestos solubles en agua también incluyen los acetatos y tiocianatos, percloratos, fluorsilicatos, cianatos, metales alcalinos y sales complejas de amonio-zinc.

Óxidos de zinc, hidróxidos, sulfitos, carbonatos, fluoruros, yodatos, peryodatos, oxalatos y varias sales orgánicas son insolubles.

### **2.2.2.3. Formación de complejos**

El zinc tiene una gran tendencia a la formación de compuestos covalentes y coordinación con complejos con el berilio y magnesio. Forma un largo número de complejos; comúnmente con números de coordinación de 4 y tetraédricos; poco frecuentes los de número 6 y hexagonales; y ocasionalmente con 5 de coordinación y bipiramidal. El catión divalente de zinc forma varios complejos en solución. La naturaleza difusa del orbital *d* hace que el ion  $Zn^{2+}$  preparado para la deformación y favorece la formación de complejos covalentes estables con ligandos polarizables como el amonio, aminas y el ion cianato.

El oxígeno tiene una habilidad marcada de donar al zinc, como es evidente del número de sales básicas. Complejos de oxianiones son comunes para todos los complejos divalentes.

El azufre y nitrógeno, como sulfitos y aminas, son mejores donadores que el oxígeno. La adición de compuestos del tipo  $(R_2S)_2ZnX_2$  son formados a partir de sulfitos.

### **2.2.2.4. Propiedades electroquímicas**

Se encuentra una amplia aplicación en electro plantas y como componente de celdas.

Tabla II. **Potenciales de oxidación – reducción**

<b>Reacción</b>	<b>E (voltios)</b>
$Zn \leftrightarrow Zn^{2+} + 2e^{-}$	0.762
$Zn + 2(OH)^{-} \leftrightarrow Zn(OH)_2(c) + 2e^{-}$	1.245
$Zn + 4(OH)^{-} \leftrightarrow ZnO_2^{2-} + 2H_2O + 2e^{-}$	1.216
$Zn + 4NH_3 \leftrightarrow [Zn(NH_3)_4]^{2+} + 2e^{-}$	1.030
$Zn + 4CN^{-} \leftrightarrow [Zn(CN)_4]^{2-} + 2e^{-}$	1.260

Fuente: FARNSWORTH, Marie. Zinc Chemicals. p. 18.

Las capas depositadas contienen zinc solo o en muchas ocasiones son aleaciones de zinc – cadmio, zinc – níquel, zinc – estaño y zinc – cobre. Es usado comúnmente como el ánodo en baterías primarias.

#### **2.2.2.5. Radioquímica**

Forma diez isotopos radioactivos y cinco estables. Los isotopos radioactivos poseen vidas medias que varían desde 1.48 minutos a 245 días.

#### **2.2.2.6. Efectos fisiológicos**

Zinc es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas y animales. Su papel esencial fue reconocido en 1869 cuando se encontró que era necesario para el crecimiento de la *Aspergillus Niger*. Se demostró que es esencial para el crecimiento de plantas altas, en 1926 y para animales altos en 1934.

#### **2.2.2.6.1. Plantas**

El zinc tiene varios papeles esenciales en la vida de las plantas. Es un constituyente de las enzimas carbónicas anhídridas que sirven como catalizador en el rompimiento del ácido carbónico en dióxido de carbono y agua. Es necesario para la formación de triptófano, precursor del ácido indoleacético, la principal hormona natural de las plantas.

Las deficiencias de zinc difieren según la especie. Como en cítricos, maíz y algunas otras frutas son buenos indicadores. Deficiencias de zinc en maíz y en otras plantas es más pronunciada en los años en los cuales el clima es frío y húmedo. Síntomas visuales de las deficiencias de zinc ocurren más comúnmente en las hojas, pero en algunas ocasiones sucede en los frutos.

El zinc es comúnmente deficiente en suelos ácidos. En adición es no disponible para la planta en suelos que contienen cantidades significantes de zinc. La no disponibilidad se debe a varios factores, como alcalinidad, alto contenido de materia orgánica, alto contenido de fosfatos, fertilizantes nitrogenados, etc.

#### **2.2.2.6.2. Animales**

En animales podemos ver deficiencias de retraso del crecimiento, desordenes en los huesos y articulaciones, enfermedades en la piel, desordenes en plumas y capas. Baja fertilidad.

### **2.2.2.6.3. Nutrición humana**

Aparentemente el sexo masculino se ve más afectado por las deficiencias de zinc. El zinc tiene varios roles en la nutrición humana. Por ejemplo, deficiencias de zinc está involucrada en cirrosis post alcohólica del hígado.

El zinc y sus compuestos tomados por la vía oral son relativamente no tóxicos. Por esta razón, los compuestos de zinc son ampliamente usados en aditivos de comida y para empaque de alimentos. A pesar del amplio uso del zinc y sus compuestos en superficies de contacto con humanos y animales, no demuestra evidencia de la acumulación de sistemas crónicos por efectos de absorción a través de la piel. Ocasionalmente dificultades pueden ocurrir por el resultado de la ingestión cantidades tóxicas de zinc en la comida o bebida o por la inhalación de grandes humos de óxido de zinc recientemente formados. La ingestión en grandes cantidades de zinc soluble puede producir náusea, vómitos y diarrea.

### **2.2.2.7. Geoquímica**

Zinc es relativamente un elemento raro. Se podría decir que es el vigésimo quinto elemento con mayor abundancia en la superficie terrestre. Estimando su presencia en la corteza terrestre desde 0.005 a 0.02 %. Zinc tiene un carácter tiofilico y se concentra en las fases de sulfuros de magmas donde estos existen. El sulfuro, esfalerita,  $ZnS$  es el principal mineral de zinc. Esta ampliamente distribuido en rocas ígneas en cantidad de trazas. Las rocas ígneas componen el 95 % de la corteza de la tierra. El contenido de zinc de éstas está estimado a un 0.02 % pero se cree que es más cercano al 0.01 %. En la climatización de rocas el zinc pasa en solución y subsecuentemente precipita en varias formas ya sea como carbonato, fosfato o silicato.

La mayoría de estos compuestos son atacados por ácidos, y esto permite la disponibilidad en los suelos. En los suelos en los cuales el elemento no está presente en suficiente cantidad para el crecimiento de las plantas, debe ser aplicado un fertilizante.

Tabla III. **La distribución en la naturaleza de los cinco isotopos estables de zinc**

<b>Zn<sup>64</sup></b>	48,89 %
<b>Zn<sup>66</sup></b>	27,81 %
<b>Zn<sup>67</sup></b>	4,11 %
<b>Zn<sup>68</sup></b>	18,57 %
<b>Zn<sup>70</sup></b>	0,62 %
<b>Total</b>	100,00 %

Fuente: FARNSWORTH, Marie. Zinc Chemicals. p. 24.

El principal mineral de zinc es el sulfuro de zinc, ZnS. Pero también hay dos minerales de carbonatos de zinc principales, ZnCO<sub>3</sub> (Esmissonita) y el carbonato de zinc básico 2ZnCO<sub>3</sub>.3Zn(OH)<sub>2</sub> (Hidronzincita). El último raramente se encuentra a diferencia de la esmitsonita. También encontramos la hemimorfita, que es un silicato hidratado con formula Zn<sub>4</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>(OH)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O, que es el silicato de zinc más abundante.

### **2.3. Carbonato de zinc (ZnCO<sub>3</sub>)**

Mientras ambos minerales de carbonatos existen en menores cantidades, los minerales no se usan comercialmente como tales. El producto comercial del carbonato es la precipitación de un producto, básicamente una sal.

La composición varía de diferente manera, pero generalmente corresponde a la fórmula  $2\text{ZnCO}_3 \cdot 3\text{Zn(OH)}_2$ .

### **2.3.1. Estructura**

Carbonato de zinc (del mineral esmitsonita, algunas veces denominado calamina) tiene la estructura de la calcita con dos  $\text{ZnCO}_3$  celdas romboédricas por unidad y las dimensiones de la celda  $a = 5.683 \text{ \AA}$  y  $\alpha = 48^\circ 20'$ . Es uniaxial y ópticamente negativa.

### **2.3.2. Propiedades físicas**

Peso molecular: 125.39 ( $\text{ZnCO}_3$ )

Color: blanco (incolora); el mineral tiene color de las impurezas

Densidad: 4.40 (carbonato normal); 3.6 – 3.8 (hidrocincita)

Índice refractivo:  $\text{ZnCO}_3$  (esmitsonita)  $\epsilon = 1.84$ ,  $\omega = 1.63$ ;  $\text{ZnCO}_3$  básico (hidrocincita) 1.63 – 1.75

Calor específico,  $C_p = 19.05 \text{ cal/deg/mol}$

Calor de formación a  $25^\circ\text{C}$ :  $\Delta H = -194,260 \text{ cal/mol}$

Energía libre de formación:  $\Delta F = -174,850 \text{ cal/mol}$

Entropía:  $S = 19.7 \text{ cal/deg/mol}$

Dureza: esmitsonita 5.5 (inusual para un carbonato); hidrocincita 2 - 2.5

Solubilidad: ambos el normal y el componente básico son insolubles en agua y en alcohol.

### 2.3.3. Reacciones químicas

El carbonato de zinc es insoluble, se descompone lentamente por el agua con la formación de carbonato de zinc básico. En estado seco pierde  $\text{CO}_2$  a  $150^\circ\text{C}$ . En calentamiento el compuesto pierde  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  a temperaturas por encima de los  $200^\circ\text{C}$ , y se convierte completamente en óxido de zinc a  $300^\circ\text{C}$ . La reacción es no reversible. El resultado óxido de zinc es muy fino y poroso.

El carbonato de zinc se emplea como activador y relleno en mezclas de gomas. Se usa como pigmento en cerámica. La forma básica del carbonato de zinc se usa en farmacéuticos porque es un medio astringente y tiene propiedades de protección. Es un ingrediente en lociones, polvos, etc. El carbonato de zinc provee varios usos para la obtención de zinc en forma de solución pura.

### 2.4. Sulfato de zinc ( $\text{ZnSO}_4$ )

El sulfato de zinc forma 3 hidratos estables:  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (ortorrómbico),  $\text{ZnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . También forma tres sistemas inestables:  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (monoclínico),  $\text{ZnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{ZnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . El heptahidratado menos estable es apreciablemente más soluble que el de la forma estable, que es, 58.7 g en 100 g de agua a  $18^\circ\text{C}$  en lugar de 52.7 g en 100 g de agua.

El sulfato de zinc es el tercer compuesto de zinc más comercial después del óxido de zinc y el polvo de zinc.

### 2.4.1. Estructura

El sulfato de zinc heptahidratado cristaliza debajo de 39 °C de una solución incolora, vidriosa, cristales romboédricos isomorfos como la sal epsom  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ . La forma monoclinica inestable del  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  es isomorfa como la del  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ .

### 2.4.2. Propiedades físicas

Peso molecular: 161.43 (anhidro)

Color: blanco (incoloro)

Densidad: 3.74 (anhidro); 3.28 (monohidratado); 2.072 (hexahidratado); 1.966 (heptahidratado)

Punto de fusión: si el sulfato de zinc hidratado es calentado, pierde toda su agua de cristalización arriba de los 238 °C. Cuando es calentado arriba de los 680 °C, pierde  $SO_3$  formando oxysulfato  $3ZnO \cdot 2SO_3$ . Por encima de los 750 °C únicamente permanece el óxido de zinc. El heptahidratado se disuelve en su propia agua de hidratación si el calentamiento se da muy rápidamente.

Rango de cristalización: el heptahidratado cristaliza del agua de 0 – 39 °C; el hexahidratado de 39 – 60 °C; y el monohidratado de 60 a 100 °C.

Tabla IV. Datos termodinámicos de sulfato de zinc hidratado

	$ZnSO_4$	$ZnSO_4 \cdot H_2O$	$ZnSO_4 \cdot 6H_2O$	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$
<b>Cp cal/°C/mol</b>	28,00	34,70	85,50	91,60
<b>Δ H cal/mol</b>	-233 880,00	-310 600,00	-663 300,00	-735 100,00
<b>Δ F cal/mol</b>	-209 000,00	-269 900,00	-555 000,00	-611 900,00
<b>S cal/°C mol</b>	29,80	34,90	86,80	92,40

Fuente: FARNSWORTH, Marie. Zinc Chemicals. p. 153.

Solubilidad: soluble en glicerina y ligeramente soluble en alcohol.

Tabla V. **Solubilidad del ZnSO<sub>4</sub> a varias temperaturas**

<b>Temperatura °C</b>	<b>Solubilidad, g/100 ml H<sub>2</sub>O</b>
<b>0</b>	41,90
<b>10</b>	47,60
<b>20</b>	54,20
<b>30</b>	61,60
<b>40</b>	70,10
<b>50</b>	74,00
<b>60</b>	72,10
<b>80</b>	65,00

Fuente: FARNSWORTH, Marie. Zinc Chemicals. p. 154.

Tabla VI. **Densidad de soluciones acuosas de ZnSO<sub>4</sub> a 20 °C**

<b>Concentración (por ciento)</b>	<b>Densidad (g/ml)</b>
<b>2</b>	1,019
<b>4</b>	1,040
<b>6</b>	1,062
<b>8</b>	1,084
<b>10</b>	1,107
<b>12</b>	1,131
<b>14</b>	1,155
<b>16</b>	1,181

Fuente: FARNSWORTH, Marie. Zinc Chemicals. p. 154.

Tabla VII. Reducción en la presión de vapor del agua en solución

Concentración Mol/ L H <sub>2</sub> O	Reducción de la presión de vapor mm Hg
0.0	0,0
0.5	4,9
1.0	10,4
2.0	21,5
3.0	42,1
4.0	66,2

Fuente: FARNSWORTH, Marie. Zinc Chemicals. p. 155.

### Disponibilidad

El sulfato de zinc está disponible en, farmacéuticos y en grados puros. Se vende en solido comúnmente como ZnSO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O o ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O y también en solución.

### Aplicaciones

Es el más ampliamente usado de las sales inorgánicas acidas de zinc. Se emplea en agricultura y en la nutrición animal. Para corregir las deficiencias de zinc en los suelos es aplicado al suelo sólo o incorporado en fertilizantes, y en pesticidas. En nutrición animal es usado como en elemento traza en alimentación.

## 2.5. Reglas de solubilidad

- Todos los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), acetatos ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-$ ), Cloratos ( $\text{ClO}_3^-$ ), y Percloratos ( $\text{ClO}_4^-$ ), son sales solubles.
- Todas las sales metálicas del grupo 1 son solubles.
- Todos los compuestos de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) son solubles.
- Todas las sales de cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), bromuros ( $\text{Br}^-$ ), e ioduros ( $\text{I}^-$ ) son solubles menos las de plata ( $\text{Ag}^+$ ), plomo II ( $\text{Pb}^{+2}$ ) y mercurio I ( $\text{Hg}_2^{+2}$ ) las cuales son insolubles.
- Todas las sales de sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) son solubles excepto las de Calcio (Ca), estroncio ( $\text{Sr}^{+2}$ ), bario ( $\text{Ba}^{+2}$ ), plomo II ( $\text{Pb}^{+2}$ ), mercurio I ( $\text{Hg}_2^{+2}$ ) y sulfatos de plata ( $\text{Ag}^+$ ) son insolubles.
- Todos los carbonatos ( $\text{CO}_3^{-2}$ ), cromatos ( $\text{CrO}_4^{-2}$ ), oxalatos ( $\text{C}_2\text{O}_4^{-2}$ ), y fosfatos son insolubles excepto los del grupo I y las sales de amonio que son solubles.
- Todas las sales sulfito ( $\text{S}^{-2}$ ) son insolubles excepto las del grupo 1 y grupo 2 y las de amonio.
- Todos los hidróxidos y óxidos son insolubles excepto las sales del grupo 1 y 2 son solubles.

## **2.6. Elementos de metalurgia**

Por metalurgia se conoce el proceso productivo por el cual se obtienen metales o aleaciones a partir de minerales o de otros materiales que se refinan después de su obtención.

### **2.6.1. Clasificación de los metales y minerales**

Las clasificaciones de los metales y minerales frecuentemente son convencionales y en muchos casos responden a la estructura de industria, la organización de la actividad científico investigativa y la preparación de cuadros técnicos – ingenieriles.

Una clasificación muy difundida es la que divide a todos los metales en ferrosos y no ferrosos.

- Ferrosos
  - Hierro
  - Manganeso
  - Vanadio
  - Cromo
  
- No ferrosos
  - Pesados
    - Cobre
    - Níquel
    - Zinc
    - Estaño
    - Plomo

- Ligeros
  - Aluminio
  - Magnesio
  - Titanio
  - Sodio
- Preciosos
  - Oro
  - Plata
  - Platino
- Raros
  - Wolframio
  - Galio
  - Germanio
  - Indio
  - Renio
  - Rubidio
  - Cesio

Por su composición química los minerales se dividen en:

- Nativos, en los cuales el metal se encuentra en forma libre (oro, cobre, plata, platino).
- Oxidados, en los cuales los metales se encuentran en forma de óxido, carbonatos e hidratos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbCO}_3$  y  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ).

- Sulfuros ( $PbS$ ,  $Cu_2S$  y  $NiS$ ) en los cuales los metales se encuentran en forma de sulfuros (las aristas de los metales sulfurosos tienen un brillo metálico característico).

Por su estructura la mena no es homogénea y está formada por:

- Minerales metálicos del metal principal primario.
- Minerales metálicos de otros metales principales (polimetálicos), por ejemplo de plomo – zinc.
- Minerales asociados a los minerales metálicos principales, por ejemplo, el cobalto que acompaña siempre al níquel, o el oro, la plata y los metales raros, que acompañan con frecuencia a un mineral principal.
- Masa principal de la mena – ganga o estéril que no contienen metales valiosos y está compuesta por cuarzo, silicatos, aluminio – silicatos, etcétera.

### **2.6.2. Procesos metalúrgicos**

Se denominan metalúrgicos aquellos procesos cuyo objetivo es la extracción del metal a partir de la mena o de cualquier otro material. Los procesos metalúrgicos se dividen en dos grandes grupos: Pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos.

### **2.6.2.1. Procesos pirometalúrgicos**

En la mayoría de los casos transcurren con altas temperaturas y frecuentemente fundición de los materiales. Los procesos pirometalúrgicos se dividen en tostados y fundición metalúrgica.

#### **2.6.2.1.1. Tostado**

Procesos metalúrgicos que se lleva a cabo en una alta temperatura pero, con frecuencia, sin que se quiera, tiene lugar una fundición parcial de las fases que participan en el proceso. El tostado, en función de la esencia química del proceso, puede ser de calcinación, aglomeración, reducción, cloración y fluoración.

#### **2.6.2.1.2. Fundición metalúrgica**

En la fundición de minerales, como su nombre lo indica, se transforma o son concentrados los minerales metálicos y pueden ser de varios tipos:

- Fundición reductora
- Fundición oxidante concentrada
- Electrolisis de sales fundidas
- Fundición de polvos
- Fundiciones de interacción

### **2.6.2.1.3. Fundiciones de refinación**

Tienen como objetivo refinar los metales de sus impurezas. Para esto se utiliza la diferencia entre las propiedades de los principales metales y los contaminantes, la refinación puede ser:

- Licuación
- Destilación refinadora
- Refinación oxidante
- Refinación clorada
- Refinación sulfurosa
- Refinación carburante

### **2.6.2.2. Procesos hidrometalúrgicos**

Los procesos hidrometalúrgicos transcurren a relativas bajas temperaturas (100 – 300 °C), en las superficies de contacto de los gases, sólidos y líquidos. Los principales procesos de este tipo son:

- Lixiviación
- Depuración
- Sedimentación

## **2.7. Rol de la preparación mecánica en el tratamiento de minerales**

Debido a que la mayoría de los minerales están finamente diseminados e íntimamente asociados a la ganga (mineral estéril), antes de la separación, estos tienen que ser debidamente liberados; esto quiere significar que tanto los granos del componente útil como estéril deben quedar libres en la mezcla mineral.

De aquí se desprende que el objetivo principal de la preparación mecánica está relacionado con la liberación del componente útil del estéril y el aumento de la superficie de contacto. Ambos fines se logran mediante la reducción sucesiva, hasta lograr que el grano mineral sea monofásico, o monocomponente, lo cual en la práctica es verdaderamente difícil.

En las minas los explosivos son utilizados para remover la mena de su cama natural por lo cual puede considerarse como la primera etapa de trituración; la ulterior preparación del mineral tiene lugar en etapas sucesivas de trituración y molienda con el intercalamiento de las operaciones de cribado y clasificación.

### **2.7.1. Preparación del mineral**

La preparación del mineral, incluye los procesos de trituración y molienda, cuyo objetivo principal es la liberación del componente útil del estéril. Mientras mayor sea esta liberación, mayor será el grado de separación que potencialmente alcanzaran las partículas minerales. En la práctica el mineral sometido a la preparación puede alcanzar hasta < 30 mesh; sin embargo, por lo general, se necesita moler desde 80 hasta 200 – 325 mesh.

Esto último implica la necesidad de una reducción de tamaño multiestadial, utilizando para ello combinaciones de esquemas de trituración y molienda.

### **2.7.2. Separación de los minerales**

La segunda etapa incluye las operaciones básicas las cuales incluyen los procesos propiamente de beneficio de las partículas minerales: cribado, clasificación, métodos de flotación, gravitación y especiales (separación magnética, eléctrica, radiométrico y bio – beneficio).

## **2.8. Lixiviación**

Para separar el soluto deseado o eliminar un soluto indeseable de la fase sólida, ésta se pone en contacto con una fase líquida. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos se difunden desde el sólido a la fase líquida, lo que permite una separación de los componentes originales del sólido. Este proceso se llama lixiviación líquido sólido o simplemente, lixiviación. Cuando la lixiviación tiene por objeto eliminar con agua un componente indeseable de un sólido, el proceso recibe el nombre de lavado.

### **2.8.1. Procesos de lixiviación para materiales inorgánicos**

Los procesos de lixiviación son de uso común en la industria metalúrgica. Los metales útiles suelen encontrarse en mezclas con grandes cantidades de constituyentes indeseables, y la lixiviación permite extraerlos en forma de sales solubles. Las sales de cobre se disuelven o se lixivian de los minerales molidos que contienen otras sustancias por medio de soluciones de ácido sulfúrico o amoniacales.

Las sales de cobalto y níquel se lixivian de sus minerales con mezclas de ácido sulfúrico-amoniaco-oxígeno. La lixiviación de oro a partir de sus minerales, se basa en el uso de una solución acuosa de cianuro de sodio. El zinc se lixivia con ácido sulfúrico de la esmitsonita.

### **2.8.1.1. Preparación de sólidos para la lixiviación**

#### **2.8.1.1.1. Material inorgánico y orgánico**

El método de preparación del sólido depende en alto grado de la proporción del constituyente soluble presente, de su distribución en el mineral sólido original, de la naturaleza del sólido, que puede estar constituido por células vegetales o el material totalmente rodeado por una matriz de materia insoluble, y del tamaño de partícula original.

Si la materia soluble está rodeada de una matriz de materiales insolubles, el disolvente se debe difundir hacia el interior para ponerse en contacto y disolver el material soluble, y después difundirse hacia afuera. Esto ocurre en muchos procesos hidrometalúrgicos, en los que se lixivian sales metálicas de minerales metálicos. En estos casos se procede a una trituración y molienda previa de los materiales para aumentar la velocidad de lixiviación, pues de esta manera las porciones solubles quedan más accesibles a la acción del disolvente.

Si la sustancia soluble está en solución sólida o ampliamente distribuida en la totalidad del sólido, la acción de lixiviación del disolvente forma canales pequeños. Esto hace que el paso de disolvente adicional resulte más fácil, por lo cual se puede prescindir de la molienda a tamaños muy pequeños.

La molienda de las partículas es innecesaria cuando el material soluble está disuelto en una solución adherida al sólido. Entonces se puede emplear un simple lavado similar al de precipitados químicos.

### **2.8.2. Métodos de operación en la lixiviación**

Existen varios métodos generales de operación para realizar la lixiviación en sólidos, pueden llevarse a cabo en estado no estacionario (lotes), o en estado estacionario. También se pueden usar equipos de tipo continuo o por etapas, ya sea para la operación en estado estacionario o no estacionario.

En la lixiviación en estado no estacionario, uno de los métodos más comunes empleados en la industria mineral es la lixiviación in situ, donde se permite que el disolvente pase por el mineral por percolación. En otros casos, el licor de lixiviación se bombea sobre una pila de mineral triturado y se recolecta al nivel del suelo a medida que escurre de dicha pila. El cobre se lixivia por este procedimiento con soluciones de ácido sulfúrico, a partir de minerales de sulfuro.

Los sólidos triturados suelen lixivarse por percolación a través de lechos sólidos, estacionarios en recipientes con fondos perforados, para permitir el drenaje del disolvente. Los sólidos no deben ser demasiado finos, pues habría una alta resistencia al flujo. Algunas veces se colocan varios tanques en serie, que constituyen una batería de extracción, y se agrega disolvente nuevo al sólido que está casi extraído. Los tanques pueden ser de tipo abierto o bien cerrado, en cuyo caso se llaman difusores.

El disolvente fluye a través a través de los tanques en serie, y se extrae del tanque más recientemente cargado, lo que simula una operación continua a contracorriente. Después de que un tanque ha sido lixiviado por completo, se añade carga nueva al tanque del otro extremo, a través de tuberías múltiples, de manera que no hay necesidad de mover los tanques para la operación a contracorriente.

En otros procesos, las partículas de sólido triturado se desplazan en forma continua por medio de transportadores de cangilones o con alimentación de tornillo. El disolvente fluye a contracorriente al lecho móvil.

Los sólidos finamente molidos pueden lixiviarse en recipientes con agitación o en espesadores. El proceso pueden ser de tipo no estacionario, o bien, los recipientes se pueden colocar en serie para obtener un proceso a contracorriente por etapas.

### **2.8.3. Tipos de equipo para la lixiviación**

- Lixiviación en lechos fijos
- Lixiviación con lechos móviles
- Lixiviación agitada del sólido

### **2.8.3.1. Lixiviación agitada del sólido**

Cuando el sólido se puede moler hasta cerca de 200 mallas (0.047 mm), es posible mantenerlo en suspensión aplicándole agitación, y lograr una lixiviación continua a contracorriente, colocando varios agitadores en serie con tanques de sedimentación o espesadores entre cada agitador.

## **2.8.4. Variables que afectan la velocidad de lixiviación**

### **2.8.4.1. Lixiviación agitada del sólido**

Al sumar la temperatura se aumenta la velocidad porque la solubilidad es mayor, el aumento de temperatura es muy usado en procesos de reacción química. La temperatura máxima para cada sistema está limitada por: el punto de ebullición del solvente, el punto de degradación del producto o del solvente, solubilidad de impurezas y por economía.

### **2.8.4.2. Concentraciones del solvente**

La concentración del solvente es importante para soluciones acuosas, debido a la saturación y a la existencia de reacciones químicas, es de poca importancia cuando la extracción es controlada por difusión.

### **2.8.4.3. Tamaño de partícula**

La reducción de partículas tiene gran importancia, porque aumenta el área de contacto y disminuye el tiempo necesario para la extracción, sobre todo para sólidos de baja porosidad.

#### **2.8.4.4. Porosidad**

La porosidad permite que el líquido penetre a través de los canales formados por los poros dentro del sólido, aumentando así el área activa para la extracción.

#### **2.8.4.5. Agitación**

La agitación da una mayor eficiencia en la extracción debido a que disminuye la película de fluido que cubre la superficie del sólido en reposo y que actúa como una resistencia a la difusión.

### **2.9. Agitación y mezclado**

En las industrias de procesos y en otras semejantes, muchas operaciones dependen en alto grado de la agitación y mezclado eficaz de los fluidos, por lo general, la agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente. El mezclado implica partir de dos fases individuales, tales como un fluido y un sólido pulverizado o dos fluidos, y lograr que ambas fases se distribuyan al azar entre sí.

Existen varios objetivos en la agitación de fluidos y algunos de ellos son:

- Disolución de sólidos en líquidos, tales como sal en agua.

- Dispersión de un gas en un líquido en forma de burbujas pequeñas, como en el caso del oxígeno del aire en una suspensión de microorganismos para la fermentación, o para el proceso de activación de lodos en el tratamiento de aguas de desperdicio.
- Suspensión de partículas sólidas finas en un líquido, tal como en la hidrogenación catalítica de un líquido, donde las partículas del catalizador sólido y las burbujas de hidrógeno se dispersan en un líquido.
- Agitación de un fluido para aumentar la transferencia de calor entre dicho fluido y un serpentín o una camisa en las paredes del recipiente.

### **2.9.1. Equipo para la agitación**

Generalmente, los líquidos se agitan en un recipiente cilíndrico que puede estar cerrado o abierto. La altura del líquido debe equivaler en forma aproximada al diámetro del tanque. Un motor eléctrico impulsa al propulsor agitador, que está montado en un eje.

Tipos de agitadores:

- Agitador propulsor de tres aspas
- Agitadores de paletas
- Agitadores de turbina
- Agitadores de banda helicoidal

### **2.9.2. Trayectoria del flujo de agitación**

La trayectoria del flujo en un tanque de agitación depende de las propiedades del fluido, de la geometría del tanque, del tipo de deflectores y del propio agitador. Si el propulsor u otro agitador van montados verticalmente en el centro del tanque sin deflectores, casi siempre se desarrolla una trayectoria de flujo tipo remolino. Esto suele ser indeseable debido a que se atrapa aire, se desarrolla un vórtice considerable y ocurren oleadas y otros efectos perjudiciales, en especial cuando se opera a velocidades altas. Para evitar esto, puede usarse una posición angular desplazada del centro cuando se trata de propulsores de baja potencia. Sin embargo, para agitación vigorosa a potencias altas, las fuerzas no equilibradas pueden ser severas y limitar el uso de esas potencias.

Para lograr una agitación vigorosa con agitadores verticales, se acostumbra el empleo de deflectores para reducir el tamaño del remolino y obtener así un buen mezclado.

El impulsor de la turbina fuerza al líquido en dirección radial hasta las paredes donde se divide, en una posición que fluye hacia arriba, hasta tocar la superficie para regresar hacia el propulsor, mientras la otra porción fluye hacia abajo. Algunas veces, cuando se trata de tanques con grandes profundidades de líquido en comparación con el diámetro del tanque, se montan dos o tres propulsores en el mismo eje, y cada uno actúa como un mezclador individual. El propulsor inferior está cerca del diámetro del propulsor por arriba del fondo del tanque.

En un sistema de agitación, el gasto volumétrico del fluido que mueve el impulsor (esto es, la velocidad de circulación), es un factor muy importante para asegurarse de agitar la totalidad del volumen del mezclador en tiempo razonable. Además, la turbulencia en la corriente de agitación es decisiva para el mezclado, puesto que arrastra al material hacia la corriente. Algunos sistemas de agitación requieren una alta turbulencia con velocidades de circulación bajas; otros se basan en turbulencias bajas con altas velocidades de circulación. Esto casi siempre depende de los tipos de fluidos que se mezclan y del grado de mezclado que se solicite.

## **2.10. Filtración**

En la filtración, las partículas suspendidas en un fluido, ya sea líquido o gas, se separan mecánica o físicamente usando un medio poroso que retiene las partículas en forma de fase separada que permite el paso del filtrado sin sólidos. Las filtraciones comerciales cubren una amplia gama de aplicaciones. El fluido puede ser un gas o un líquido. Las partículas sólidas suspendidas pueden ser muy finas (del orden de micrómetros) o bastante grandes, muy rígidas o plásticas, esféricas o de forma muy irregular, agregados o partículas individuales. El producto valioso puede ser el filtrado sin sólidos o a torta sólida. En algunos casos, se requiere una eliminación completa de las partículas sólidas y en otros, basta con una eliminación parcial.

La alimentación o suspensión de entrada puede contener una gran carga de partículas sólidas o una proporción baja. Cuando la concentración es mínima, los filtros operan por tiempos muy largos, antes de que sea necesario limpiar el medio filtrante. Debido a la gran diversidad de problemas de filtración, se ha desarrollado un enorme número de equipos de filtración.

El equipo industrial de filtración difiere del de laboratorio únicamente en lo que respecta a la cantidad de materia que se maneja y en la necesidad de operar a costos bajos. En un embudo buchner el flujo del líquido a través de la tela o papel filtro se produce debido al vacío en el extremo de salida. Las pequeñas aberturas de los poros de la tela bloquean el paso de las partículas. Se usa un soporte con orificios bastante grandes, sobre el cual se apoya la tela filtrante.

Las partículas sólidas se acumulan en forma de una torta de filtrado a medida que se verifica el proceso, la cual también actúa como filtro de las partículas suspendidas. La resistencia al flujo aumenta a medida que la torta crece.

### **2.10.1. Clasificación de los filtros**

Existen diversos métodos para clasificar los equipos de filtración, en una de las agrupaciones, los filtros se clasifican dependiendo de que la torta de filtrado sea el producto deseado o bien el líquido transparente.

En cualquier caso, la suspensión puede tener un porcentaje de sólidos relativamente alto, lo que conduce a la formación de una torta, o a tener muy pocas partículas en suspensión. Los filtros también se clasifican de acuerdo con su ciclo de operación: por lotes, o de manera continua.

En otra clasificación, los filtros pueden ser de gravedad, donde el líquido simplemente fluye debido a la presencia de una carga hidrostática, o bien se puede usar presión o vacío para incrementar la velocidad de flujo. Un método de clasificación muy importante se basa en la colocación mecánica del medio filtrante.

La tela filtrante puede estar en serie, en forma de placas encerradas, como hojas individuales sumergidas en la suspensión, o sobre cilindros giratorios que penetran en la suspensión.

#### **2.10.1.1. Medios filtrantes**

El medio para filtraciones industriales debe tener ciertas características. La primera y más importante es que permita separar los sólidos de la suspensión y producir un filtrado transparente. Además, los poros no se deben obstruir con facilidad para que la velocidad del proceso no sea demasiado lenta. El medio filtrante debe permitir la extracción de la torta sin dificultades ni pérdidas.

Obviamente, debe tener una resistencia suficiente para no rasgarse y no ser afectado por los productos químicos presentes. Algunos medios filtrantes de uso común son telas gruesas de loneta o sargas, tejidos pesados, fibra de vidrio, papel, fieltro de celulosa, telas metálicas, de lana, de nylon, de dacrón y otros tejidos sintéticos. Las fibras de hilacha de materiales naturales son más eficaces para partículas finas que las fibras plásticas o metálicas.

Algunas veces, el filtrado sale un poco lechoso al principio, antes de que se depositen las primeras capas de partículas que ayudan al filtrado subsecuente. El filtrado se puede recircular para una nueva filtración.

##### **2.10.1.1.1. Geotextil**

Son telas que se pueden enrollar, cortar, coser. Se utilizan en obras de ingeniería, especialmente cuando se trata de construcciones donde intervienen diferentes tipos de suelo, cumpliendo con diversas funciones, como lo son:

- Separar estratos diferentes, evitando la mezcla indeseada de los materiales.
- Evitar la mezcla indeseada de suelos con características diversas.

Se fabrican una gran cantidad de geotextiles con las más variadas características.

#### **2.10.1.1.1.1. Propiedades**

Es una malla compuesta por fibras sintéticas cuyas funciones principales se basan en su resistencia mecánica a la perforación, tracción y a su capacidad drenante. Sirven en la construcción de sub – bases de carreteras y ferrocarriles, en presas, evitan posibles erosiones, realizan drenajes en canales, muros de contención, etc.

#### **2.10.2. Filtración**

Tienen la propiedad de retención de un material de ciertas partículas sometidas a fuerzas hidrodinámicas al tiempo que permite el pasaje de fluidos. En esta función de filtración se debe tener en cuenta la permeabilidad, abertura de los poros y el espesor del geotextil.

### **2.10.3. Ayudas de filtración**

En algunos casos se usan ayudas de filtración para acelerar el proceso. Por lo general, son tierras diatomáceas, que están constituidos principalmente por sílice no comprensible. También se usa celulosa de madera, asbesto y otros sólidos porosos inertes.

Estas ayudas se pueden usar de diferentes maneras; por ejemplo como recubrimiento previo de filtrar la suspensión, evitando que los sólidos gelatinosos obstruyan el medio filtrante y permite obtener un filtrado más transparente. También se pueden añadir a la suspensión antes de la filtración, aumentando la porosidad de la torta y reduciendo su resistencia durante el proceso.

### **2.11. Evaporación**

El objetivo de la evaporación es concentrar una disolución consistente en un soluto no volátil y un disolvente volátil. En la mayor parte de las evaporaciones el disolvente es agua. La evaporación se realiza vaporizando una parte del disolvente para producir una disolución concentrada.

Cuando a través de un tubo fluye vapor de agua y aquel se encuentra sumergido en un recipiente con líquido, se forman pequeñas burbujas de vapor de calor que pasa a través de la superficie del tubo donde no se forman burbujas, entra por convección al líquido que lo rodea.

### **2.11.1. Operación de un proceso al vacío**

Los evaporadores operan frecuentemente con el último efecto al vacío y una de las consideraciones importantes es establecer el método para mantener continuamente el vacío. Un eyector simple conectado a un condensador es capaz de mantener un vacío aproximado de 26.5 plg Hg abs y puede construirse con varias boquillas para reemplazar a la boquilla simple. Cuando se desea un vacío de 26.5 a 29.3 plg, esto se puede lograr mediante un eyector de dos pasos, para vacíos más altos se requiere el uso de un eyector de tres pasos.

La evaporación difiere del secado en que el residuo es un líquido, a veces altamente viscoso, en vez de un sólido, difiere de la destilación en que el vapor es generalmente un solo componente y aun cuando el vapor sea una mezcla, en la evaporación no se intenta separar el vapor de fracciones; difiere de la cristalización en que su interés reside en concentrar soluciones y no en formar y obtener cristales.

### **2.12. Cristalización**

Es la formación de partículas sólidas a partir de una fase homogénea. La formación de partículas sólidas puede tener lugar a partir de un vapor, como la nieve, mediante la solidificación de un líquido fundido, como ocurre en la formación de grandes mono cristales, o bien como cristalización de una disolución líquida.

La cristalización de disoluciones es industrialmente importante dada la gran variedad de materiales que se comercializan en forma cristalina.

Su amplia utilización se debe a dos razones: un cristal formado a partir de una disolución impura es esencialmente puro (excepto que se formen cristales mixtos), y la cristalización proporciona un método práctico para la obtención de sustancias químicas puras en una condición adecuada para su envasado y su almacenamiento.

### **2.12.1. Cristalización de vacío**

Los cristalizadores más modernos corresponden a las unidades de vacío que utilizan el enfriamiento por evaporación adiabática para generar la sobresaturación. En su forma original y más sencilla, un cristalizador de este tipo es un recipiente cerrado en el que se mantiene vacío por medio de un condensador. La alimentación se introduce como una disolución saturada caliente a una temperatura muy superior a la de ebullición para la existente en el cristalizador. La disolución de alimentación se enfría espontáneamente hasta la temperatura de equilibrio. Puesto que tanto la entalpia de enfriamiento como la de cristalización aparecen como calor latente de vaporización, se evapora una parte del disolvente. El producto se retira del fondo del cristalizador.



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Dentro del diseño experimental del proceso para la fabricación del sulfato de zinc pentahidratado, se midieron los siguientes parámetros.

- Densidad: lectura directa del densímetro.
- pH: lectura directa del potenciómetro.
- Concentración de zinc (Zn): por medio del método complejométrico titulación con EDTA, determinando la concentración del zinc elemental.
- Concentración de metales pesados: por medio de polarógrafo midiendo la concentración de plomo y cadmio.
- Determinación del requerimiento de ácido sulfúrico concentrado para la lixiviación del zinc del mineral esmitsonita a través de evaluaciones en triplicado, con una relación de 5,1 g de esmitsonita/ ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98%).
- Determinación de la cantidad de agua de agotamiento de zinc y los ciclos de lavado necesarios.
- Determinación de la cantidad de zinc metálico (Zn<sup>0</sup>) necesario para la reducción de metales pesados provenientes del mineral si estos

estuvieran presentes en la solución filtrada después de la lixiviación del Zinc.

- Determinación de los requerimientos operativos definiendo la presión de vacío a 22 pulgadas de mercurio, realizando ciclos de condensación, para la cristalización por evaporación al vacío.
- Determinación del rendimiento de sal de zinc obtenida en forma de sulfato de zinc pentahidratado.

### 3.2. Delimitación del campo de estudio

Realizando el diseño del proceso de fabricación del sulfato de zinc pentahidratado. A partir de esmitsonita con una concentración promedio de zinc elemental 22 – 24 % w/w, empleando las operaciones unitarias de lixiviación, evaporación – cristalización.

#### 3.2.1. Condiciones de operación variables

Tabla VIII. **Concentración y cantidades de reactivos para nivel Laboratorio**

<b>Concentración ácido ( % volumen)</b>	<b>Peso esmitsonita (g)</b>	<b>Cantidad de ZnCO<sub>3</sub> (g)</b>	<b>Volumen de ácido (ml)</b>	<b>Volumen de agua (ml)</b>
98,00	200,00	92,826	39,198	1134,00

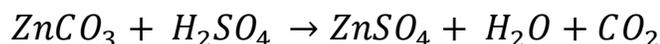
Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Concentración y cantidades de reactivos para nivel planta piloto**

<b>Concentración ácido ( % volumen)</b>	<b>Peso esmitsonita (g)</b>	<b>Cantidad de ZnCO<sub>3</sub> (g)</b>	<b>Volumen de ácido (ml)</b>	<b>Volumen de agua (ml)</b>
98,000	10 440	4 845,51	2 046,15	59 000,00

Fuente: elaboración propia.

### 3.2.1.1. Reacción química



### 3.2.1.2. Cálculo de la cantidad teórica de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98%) para nivel laboratorio

$$200 \text{ g H}_2\text{SO}_4 * \frac{0,46413 \text{ g ZnCO}_3}{1 \text{ g esmitsonita}} * \frac{1 \text{ mol ZnCO}_3}{125,4 \text{ g ZnCO}_3} * \frac{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{1 \text{ mol ZnCO}_3} * \frac{98,08 \text{ g H}_2\text{SO}_4 \text{ 98 \%}}{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4 \text{ 100 \%}} * \frac{100 \text{ g H}_2\text{SO}_4}{98 \text{ g H}_2\text{SO}_4} * \frac{1 \text{ ml H}_2\text{SO}_4 \text{ 98 \%}}{1,84 \text{ g H}_2\text{SO}_4 \text{ 98 \%}} = 39,19 \text{ ml H}_2\text{SO}_4 \text{ 98 \%}$$

### 3.2.1.3. Cálculo de la cantidad teórica de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98 %) para nivel planta piloto

$$10\ 440 \text{ g H}_2\text{SO}_4 * \frac{0,46413 \text{ g ZnCO}_3}{1 \text{ g esmitsonita}} * \frac{1 \text{ mol ZnCO}_3}{125,4 \text{ g ZnCO}_3} * \frac{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4}{1 \text{ mol ZnCO}_3} * \frac{98,08 \text{ g H}_2\text{SO}_4 \text{ 98 \%}}{1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4 \text{ 100 \%}} * \frac{100 \text{ g H}_2\text{SO}_4}{98 \text{ g H}_2\text{SO}_4} * \frac{1 \text{ ml H}_2\text{SO}_4 \text{ 98 \%}}{1,84 \text{ g H}_2\text{SO}_4 \text{ 98 \%}} = 2\ 046,15 \text{ ml H}_2\text{SO}_4 \text{ 98 \%}$$

**3.2.1.5. Constante de lixiviación para nivel laboratorio**

$$\text{Rel. Lixiviación} = \frac{200 \text{ g esmitsonita}}{39,198 \text{ ml H}_2\text{SO}_4} = 5,1023 \text{ g esmitsonita/ml H}_2\text{SO}_4$$

**3.2.1.5. Constante de lixiviación para nivel planta piloto**

$$\text{Rel. Lixiviación} = \frac{10\,440 \text{ g esmitsonita}}{2\,046,15 \text{ ml H}_2\text{SO}_4} = 5,1023 \text{ g esmitsonita/ml H}_2\text{SO}_4$$

**3.2.1.6. Determinación del sulfato de zinc, de acuerdo a la relación estequiométrica para nivel laboratorio**

$$200 \text{ g esmitsonita} * \frac{0,4613 \text{ g ZnCO}_3}{1 \text{ g esmitsonita}} * \frac{1 \text{ mol ZnCO}_3}{125,4 \text{ g ZnCO}_3} * \frac{1 \text{ mol ZnSO}_4}{1 \text{ mol ZnCO}_3} * \frac{161,453 \text{ g ZnSO}_4}{1 \text{ mol ZnSO}_4} = 119,51 \text{ g ZnSO}_4$$

**3.2.1.7. Determinación del sulfato de zinc, de acuerdo a la relación estequiométrica para planta piloto**

$$200 \text{ g esmitsonita} * \frac{0,4613 \text{ g ZnCO}_3}{1 \text{ g esmitsonita}} * \frac{1 \text{ mol ZnCO}_3}{125,4 \text{ g ZnCO}_3} * \frac{1 \text{ mol ZnSO}_4}{1 \text{ mol ZnCO}_3} * \frac{161,453 \text{ g ZnSO}_4}{1 \text{ mol ZnSO}_4} = 6\,238,65 \text{ g ZnSO}_4$$

### 3.2.2. Condiciones de operación fijas

#### 3.2.2.1. Relación de lixiviación

Tabla X. Relación de lixiviación para nivel laboratorio y planta piloto

<b>Relación de lixiviación respecto a la esmitsonita (g de esmitsonita/ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98 %))</b>	<b>5,102</b>
--	--------------

Fuente: elaboración propia.

#### 3.2.2.2. Condiciones de operación

Tabla XI. Tamaño de partícula de la esmitsonita

<b>Mesh (tamaño de partícula) de esmitsonita</b>	<b>100 (150 μm) – 200 (75 μm)</b>
--	-----------------------------------

Fuente: elaboración propia.

#### 3.2.2.3. Agitación para nivel laboratorio y nivel planta piloto

Tabla XII. Condiciones fijas de operación del sistema de agitación

<b>Angulo de agitación</b>	<b>0 °</b>
<b>Velocidad promedio de agitación</b>	<b>32 rpm</b>

Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2.4. Reactores

Tabla XIII. Reactor nivel laboratorio

<b>Tamaño de lote (esmitsonita) (g)</b>	200,000
<b>Cantidad de ZnCO<sub>3</sub> (g)</b>	92,826

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Reactor nivel planta piloto

<b>Tamaño de lote (esmitsonita) (g)</b>	10 440,00
<b>Cantidad de ZnCO<sub>3</sub> (g)</b>	4 845,51

Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2.5. Cristalizador

Tabla XV. Cristalizador por evaporación al vacío

<b>Presión (pulgadas de Hg)</b>	-22
<b>Temperatura de operación</b>	45 °C

Fuente: elaboración propia.

## 3.3. Recursos humanos disponibles

Estudiante: Joze Eduardo del Cid Castillo

Asesor: Ing. Qco. Mariano Arturo José Eskenasy García

Operador: Hugo Barrios

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

#### **3.4.1. Equipo operativo**

- Reactor para nivel laboratorio
- Mezcladora empleada para la agitación y mezclado a nivel laboratorio
- Agitador para nivel laboratorio
- Sistema filtración para nivel laboratorio
- Reactor para nivel planta piloto
- Agitador para nivel planta piloto
- Sistema de filtración para nivel planta piloto
- Cristalizador por evaporación al vacío

#### **3.4.2. Equipo de medición**

- Balanza analítica, marca Acculab con capacidad de 600 g de tres decimales
- Potenciómetro, marca Accument, Fisher Scientific
- Potenciómetro portátil marca Hanna

- Tamizadora, marca Tyler. Con motor de ¼ HP, 1 425/1 725 RPM. Con batería de tamices Mesh No. 50, 100, 200 y 325. Se empleó para pasar en 100 y se retiene en 200.
- Densímetro, de 1,000 a 2,000 gravedad específica (g/cc).

### 3.4.3. Reactivos

- Ácido sulfúrico

Tabla XVI. Descripción física y química del ácido sulfúrico

Nombre	Ácido sulfúrico 98 %
Formula química	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Solubilidad en agua (20 °C)	Soluble (liberación de calor)
Masa molar	98.08 g/mol
pH (20 °C)	Fuertemente ácido
Punto de fusión	15 °C
Punto de ebullición	330 °C
Clase de toxicidad	(CH)2
Presión de vapor (20 °C)	0.0001 mbar
Absorbencia de agua	Higroscópico
Color y consistencia	Líquido incoloro
Densidad específica (20 °C)	1,84 g/ml

Fuente: QUIMIPROVA. Etiqueta producto.

- Agua desmineralizada, Salvavidas®

- Zinc Metálico. Láminas de zinc electrolítico con 99,995 % de pureza
  - Peso Promedio: 1,1 g
  - Dimensiones 0,65 cm de ancho, 9,4 cm de largo y 0,05 mm de espesor.
- Geotextil: marca MACCAFERRI, producido por entrelazamiento en ángulo recto de filamentos de polipropileno, para aplicación en obras de ingeniería, geotecnia y medio ambiente. Tipo MT200. Densidad de 200 g/m<sup>2</sup>, con un espesor (carga 1,2 kPa) de 1,2 mm, con una resistencia a los rayos U.V. de 70%. Retiene hasta mesh 200.

#### 3.4.4. Materia prima

- Carbonato de Zinc, Esmitsonita

Tabla XVII. Descripción química de la esmitsonita

Elemento	Concentración (% w/w)	Concentración (ppm)
Zinc (Zn)	24,30	-
Plata (Ag)	-	149,0
Aluminio (Al)	0,29	-
Cobre (Cu)	-	227,0
Hierro (Fe)	1,17	-
Potasio (K)	0,05	-
Magnesio (Mg)	3,19	-
Calcio (Ca)	4,04	-
Plomo (Pb)	2,46	-
Cadmio (Cd)	-	440.4

Fuente: anexo 1.

Tabla XVIII. **Descripción física de la esmitsonita**

<b>Color</b>	<b>Gris claro</b>
<b>Consistencia</b>	Terroso
<b>Mesh (tamaño de partícula)</b>	100 (150 $\mu\text{m}$ ) – 200 (75 $\mu\text{m}$ )

Fuente: elaboración propia.

### **3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

#### **3.5.1. Descripción del procedimiento para nivel laboratorio**

- Pesar 200 g de mineral;
- Realizando una pre mezcla de acondicionamiento agregando un 85% (equivalente a 1 134 ml de agua) de agua y un 15% (200 g de Esmitsonita) de mineral, se mantuvo en agitación por un espacio de aproximadamente 5 min, para humedecer el mineral, este se mantuvo en suspensión y propició un mayor contacto entre el ácido y el mineral. Las aspás del agitador estuvieron completamente cubiertas;
- Adicionando el ácido sulfúrico, dosificando 3 mL cada minuto hasta completar 33 ml. Se midió la densidad de la solución y el pH. Se tomaron muestras para determinar concentraciones de zinc para encontrar el punto estequiométrico. Se determinó el requerimiento de ácido sulfúrico concentrado para la lixiviación del zinc presente en el mineral;
- Reaccionando el ácido con la solución de mineral y agua por 30 min más;

- Filtrando, empleando geotextil colocándolo en el embudo, se obtuvo un cake que contenía sulfato de calcio y sulfato de plomo insolubles. En el filtrado se obtuvo una solución de sulfato de zinc contaminada con trazas de metales pesados (plomo y cadmio), realizando ciclos de lavado para agotar la mayor cantidad de zinc y determinando cuántos ciclos eran necesarios;
- Eliminando las trazas de metales pesados en la solución adicionando Zinc metálico, se agregaron 10 láminas, por medio de agitación se llevará a cabo la reducción de metales pesados depositándose en las láminas de zinc. Mezclar esta solución por un espacio de 30 min. Determinar la cantidad de zinc metálico necesario para la reducción de los metales pesados que provienen del mineral;
- Filtrar la solución separando el zinc metálico con los depósitos de metales pesados;
- Evaporar la mayor cantidad de agua al vacío. Teniendo condiciones de vacío y temperatura definidas. Se obtuvo directamente el sulfato de zinc pentahidratado final.

### **3.5.2. Descripción procedimiento para nivel planta piloto**

- Pesar 10 440 g de mineral;
- Agregar al reactor 85% (equivalente a 59 000 ml de agua) de agua y 15% de mineral (10 440 g de esmitsonita), para acondicionamiento de la mezcla por 20 minutos como se realizó en laboratorio;

- Dosificando el ácido sulfúrico entre 20 y 50 mL cada 15 minutos para tener un ritmo aproximado de 5 mL/min, hasta llegar a 4 horas de reacción con agitación constante, las condiciones de densidad y pH se midieron y las determinadas en la práctica de laboratorio sirvieron de guía, se determinó el requerimiento de ácido sulfúrico para la lixiviación del zinc;
- Filtrar. Quedando en el cake sulfato de calcio y sulfato de plomo insolubles y se realizaron los ciclos de lavado que se determinaron en el laboratorio. En el filtrado, la solución de sulfato de zinc se determinó si hay contaminación de metales pesados. Eliminandose éstos agregando zinc metálico, la cantidad de zinc metálico que se empleó será la que se determinó en el laboratorio;
- Filtrar el zinc metálico con el depósito de metales pesados;
- Se evaporó la solución de sulfato de zinc a 22 pulgadas de vacío de mercurio y 50 °C. Se determinaron las condiciones de operación para la cristalización por evaporación para recuperar una sal de sulfato de zinc Pentahidratado.

### **3.5.3. Determinación de la concentración de zinc**

Método complejométrico.

Técnica de la determinación:

- La solución que tiene sales de zinc se diluye hasta 100 mL con agua destilada;

- Luego se añaden 0,05 mL de solución de ferrocianuro potásico, 0,15 mL de solución de 3,3'-dimetilnaftidina y unos 3 mL de solución molar de acetato sódico; el pH debe ser de unos 5 – 6. A veces hay que agregar un poco de ácido clorhídrico;
- La solución tendrá un color violeta. Se valora con solución 0,1 M de EDTA, hasta dejarla incolora; al final, el líquido reactivo se añadirá poco a poco, y debe esperarse alrededor de un minuto después de verter la última gota para que desaparezca del todo la coloración rosada y la solución sea incolora.

#### **3.5.4. Determinación de la concentración de metales pesados**

Determinación polarográfica de plomo (Pb) y cadmio (Cd).

Objetivo:

Este análisis tiene el propósito de determinar las concentraciones, como contaminantes del plomo y el cadmio.

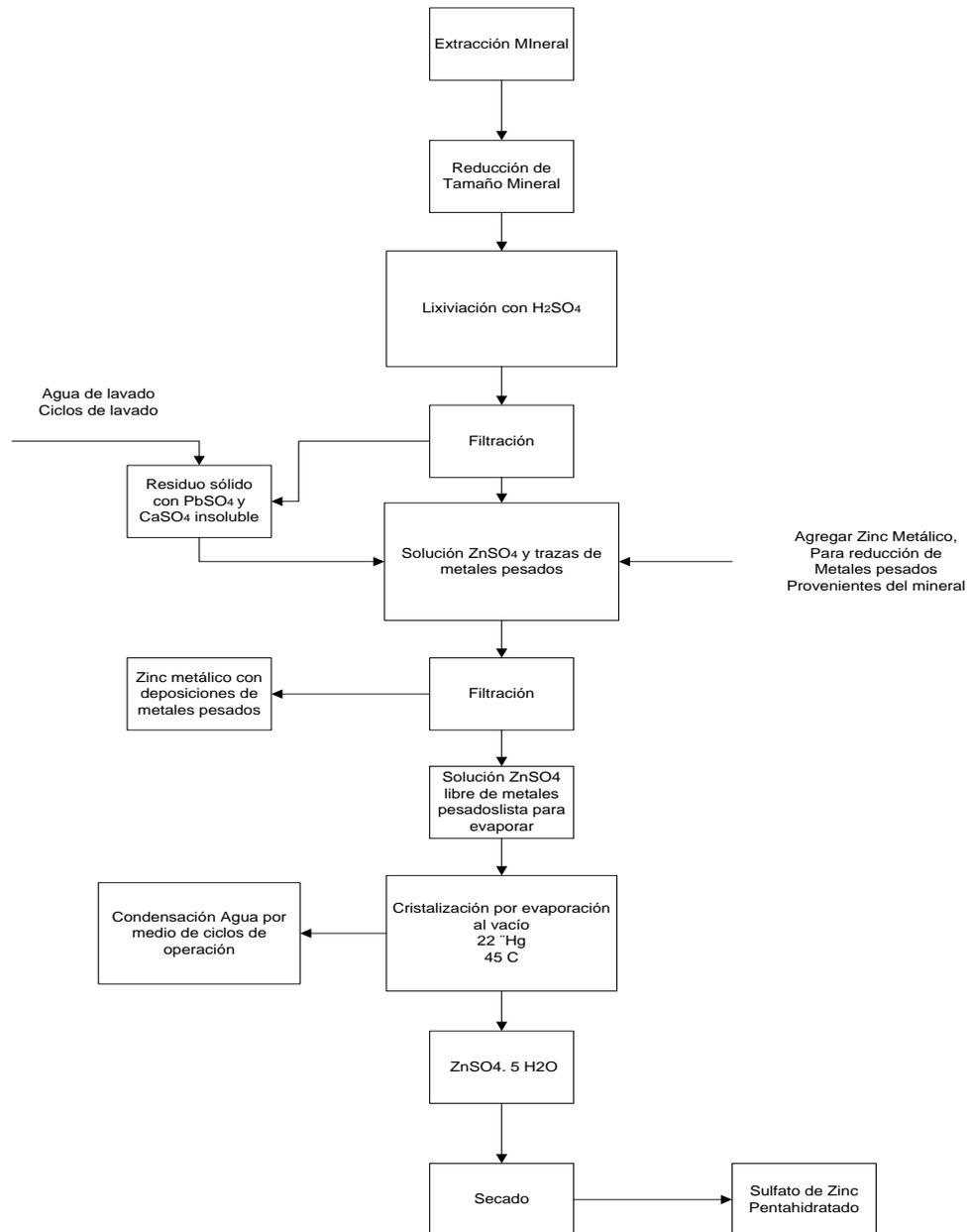
Teoría:

La técnica consiste en disolver la muestra por medio de la oxidación producida por el ácido clorhídrico produciendo iones:  $Pb^{+2}$  y  $Cd^{+2}$ , estos se el cloruro de cobalto actúa como catalizador de la disolución del HCl y no interfiere en las lecturas.

El polarógrafo proporciona las condiciones para que los iones sean reducidos y depositados en una gotita de mercurio, siendo éste el momento donde se genera la lectura en millonésimas de amperios. La corriente obtenida es proporcional a los iones analizados. En la solución hay gran cantidad de iones por lo tanto no afectará que se hagan varias lecturas de la misma muestra.

### 3.5.5. Diagrama de Proceso para la fabricación de sulfato de zinc pentahidratado

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso



Fuente: elaboración propia.

### 3.6. Recolección y ordenamiento de la Información

Tabla XIX. Proceso de lixiviación planta piloto

Lixiviación con Ácido Sulfúrico			
Fecha	Hora Inicio	-	
	Hora de Finalización	-	
Corrida No.	-		
Tiempo (min)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Adicionado	pH	Densidad (g/mL)
0	0	-	-
10	1	-	-
25	2	-	-

Fuente: elaboración propia.

### 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Para cada una de las etapas del diseño del proceso se realizó un balance de masa por operación, si lo requiere. Todos los datos se procesaron en programa Microsoft Excel.

Tabla XX. Tabulación de datos por etapa

<b>Lixiviación con Ácido Sulfúrico</b>			
<b>Fecha</b>	<b>Hora Inicio</b>	<b>-</b>	
	<b>Hora de Finalización</b>	<b>-</b>	
<b>Corrida No.</b>	<b>-</b>		
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> adicionado</b>	<b>pH</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>	<b>Concentración Zn (% w/w)</b>
31	4,5	-	-
32	4,6	-	-
33	5,07	-	-

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Análisis estadístico

Se utilizó un diseño aleatorio. Se involucraron, las variables de densidad, pH y concentración de cada uno de los elementos. Tomando en cada uno de los balances de masa, como resultados finales. Obteniendo lo siguiente:

- Concentración de zinc final promedio de cada etapa.
- Concentración de metales pesados promedio de cada etapa.
- pH promedio para punto final de la reacción con ácido sulfúrico.
- Densidad promedio para punto final de reacción con ácido sulfúrico.

A partir de estos resultados se obtuvo los valores promedio de:

- Cantidad en gramos promedio de Sulfato de Zinc Pentahidratado final obtenido en cada etapa.
- Concentración de Plomo promedio presente en los gramos de Sulfato de Zinc Pentahidratado final obtenido para cada etapa.
- Concentración de Cadmio promedio presente en los gramos de Sulfato de Zinc Pentahidratado final obtenido para cada etapa.

Utilizando pruebas para  $\mu$ , muestras pequeñas. Donde dice que si la muestra es pequeña,  $\sigma$  es desconocido y la población es normal o casi normal en cuanto a su distribución, se utilizará la distribución t. Se utilizó un  $\alpha = 5\%$  y los grados de libertad fueron  $GL = 3 - 1 = 2$ .

Por lo que:

- Se aprueba  $H_{11}$  ya que el valor obtenido de  $t = -93,68$ . Indicando que la cantidad en gramos promedio final obtenida es diferente de 186 g, siendo el promedio 75,5749 g.
- Se aprueba  $H_{12}$  ya que el valor obtenido de  $t = 59,19$ . La concentración final promedio de cadmio es  $> 878.66$  ppm siendo la concentración obtenida promedio de 1 539,03 ppm.
- Se aprueba  $H_{03}$  ya que el valor obtenido de  $t = -\infty$ . Indicando que la concentración de Plomo promedio es  $\leq 24 892$ .

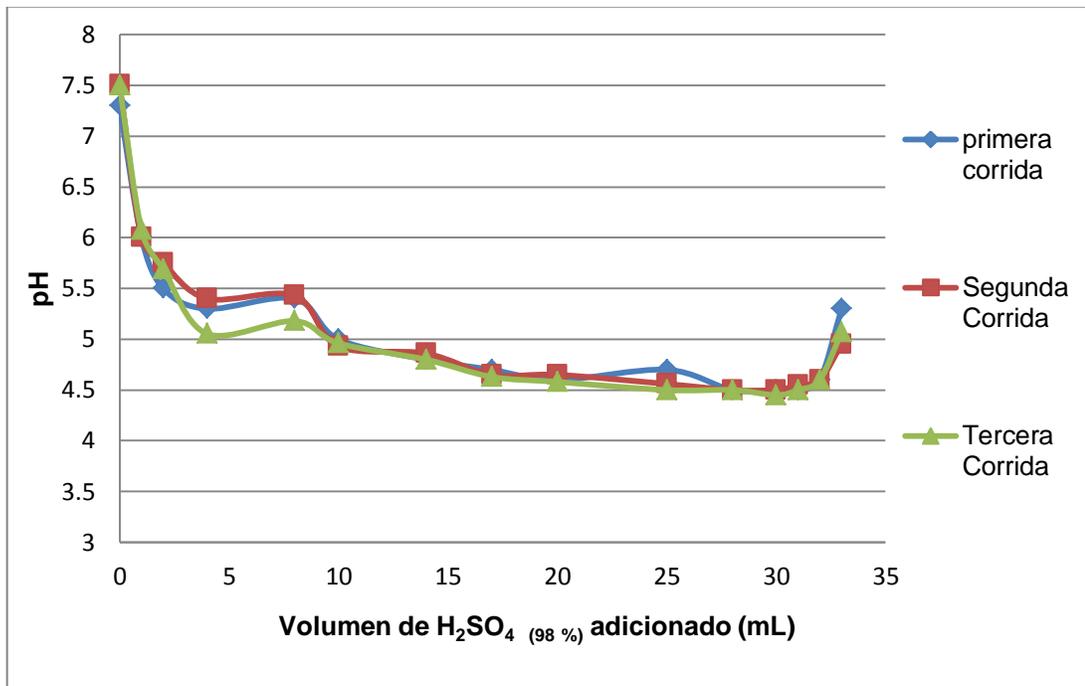
- Se aprueba  $H_{14}$  ya que el valor obtenido de  $t = -83,01$ . Indicando que la cantidad en gramos promedio final obtenida es diferente de  $9\ 717,24$  g, siendo el promedio  $3\ 645,4$  g.
- Se aprueba  $H_{15}$  ya que el valor obtenido de  $t = 27,21$ . La concentración final promedio de cadmio es  $> 835,37$  ppm siendo la concentración obtenida promedio de  $1\ 603,31$  ppm.
- Se aprueba  $H_{06}$  ya que el valor obtenido de  $t = -\infty$ . Indicando que la concentración de plomo promedio es  $\leq 24\ 454$ .



## 4. RESULTADOS

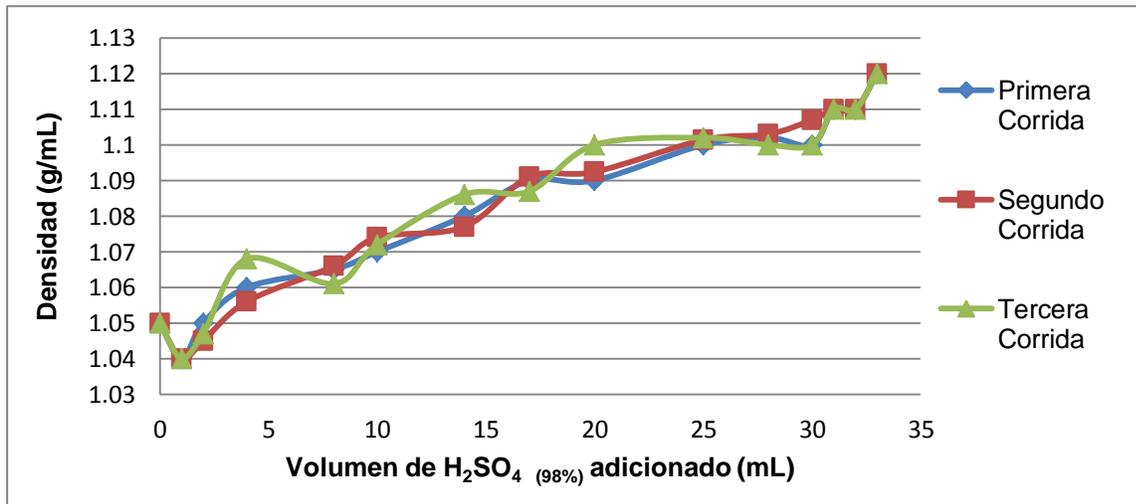
### 4.1. Resultados de pruebas realizadas a nivel laboratorio

Figura 2. Comportamiento del pH en función del volumen de  $H_2SO_4$  adicionado durante la etapa de lixiviación del zinc presente en la esmitsonita en laboratorio



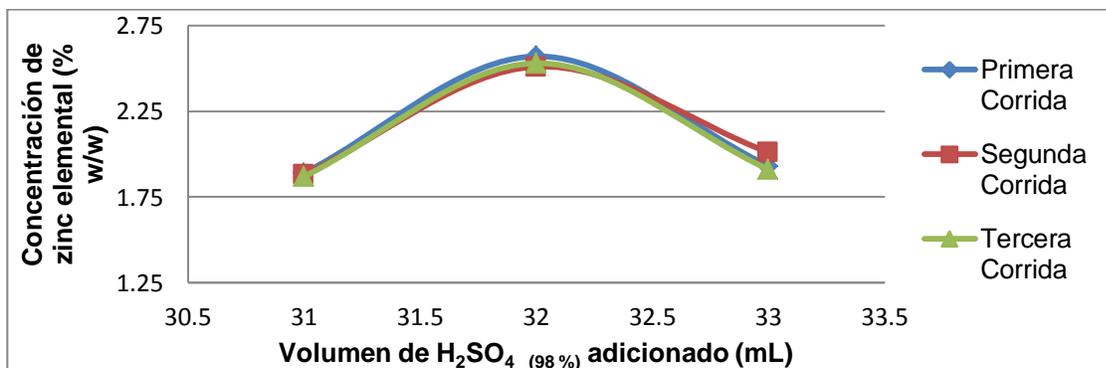
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Comportamiento de la densidad de la solución en función del volumen de  $H_2SO_4$  adicionado durante la etapa de lixiviación del zinc presente en la esmitsonita en laboratorio



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Concentración de zinc en función del volumen de  $H_2SO_4$  adicionado, durante la etapa de lixiviación del zinc presente en la esmitsonita en laboratorio



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Resultados finales etapa de lixiviación en laboratorio**

<b>Descripción</b>	<b>Resultado Final</b>
<b>Volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 98 %, final adicionado (mL)</b>	32,00
<b>Relación de lixiviación (g Esmitsonita/mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98%))</b>	6,25
<b>Concentración de zinc final en solución (Zn % w/w)</b>	2,53 +/- 0,0306
<b>pH final de la solución</b>	4,60
<b>Densidad final de la Solución (g/mL)</b>	1,1133 +/- 0,0058

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Resultados finales del proceso de filtración en laboratorio**

<b>Descripción</b>	<b>Resultado</b>
<b>Total de agua de agotamiento (mL)</b>	350
<b>Ciclos de lavado necesarios (ciclos)</b>	2

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Zinc metálico necesario para la reducción de metales pesados en laboratorio**

<b>Descripción</b>	<b>Resultado</b>
<b>Zinc metálico para la reducción de metales pesados (g)</b>	32,3154 +/- 0,2274
<b>Relación Tratamiento (g esmitsonita/g zinc metálico)</b>	6,1819 +/- 0,0434

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Comportamiento del plomo en los diferentes productos de cada etapa en laboratorio**

<b>Descripción del material</b>	<b>Concentración de plomo (Pb) en partes por millón (ppm)</b>
<b>Mineral esmitsonita</b>	24 892 +/- 2 243,7228
<b>Residuo filtrado</b>	22 926.6667 +/- 161,6581
<b>Solución de sulfato de zinc sin tratamiento con zinc metálico</b>	740,9667 +/- 218,8868
<b>Solución de sulfato de zinc después del tratamiento con zinc metálico</b>	No detectable
<b>Sulfato de zinc pentahidratado</b>	No detectable

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Comportamiento del cadmio en los diferentes productos de cada etapa en laboratorio**

<b>Descripción del material</b>	<b>Concentración de cadmio (Cd) en partes por millón (ppm)</b>
<b>Mineral esmitsonita</b>	878,6667 +/- 36,1951
<b>Residuo filtrado (Cake)</b>	331,6667 +/- 43,7302
<b>Solución de sulfato de zinc sin tratamiento con zinc metálico</b>	65,9933 +/- 2,219
<b>Solución de sulfato de zinc después del tratamiento con zinc metálico</b>	65,9933 +/- 2,219
<b>Sulfato de zinc pentahidratado</b>	1 539,0333 +/- 19,3236

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Sal de Sulfato de zinc pentahidratado final obtenida en laboratorio**

Descripción	Resultado
Sulfato de zinc pentahidratado (g)	75,5749 +/- 2,041
Concentración de zinc elemental (% w/w)	25,8467 +/- 0,050

Fuente: elaboración propia.

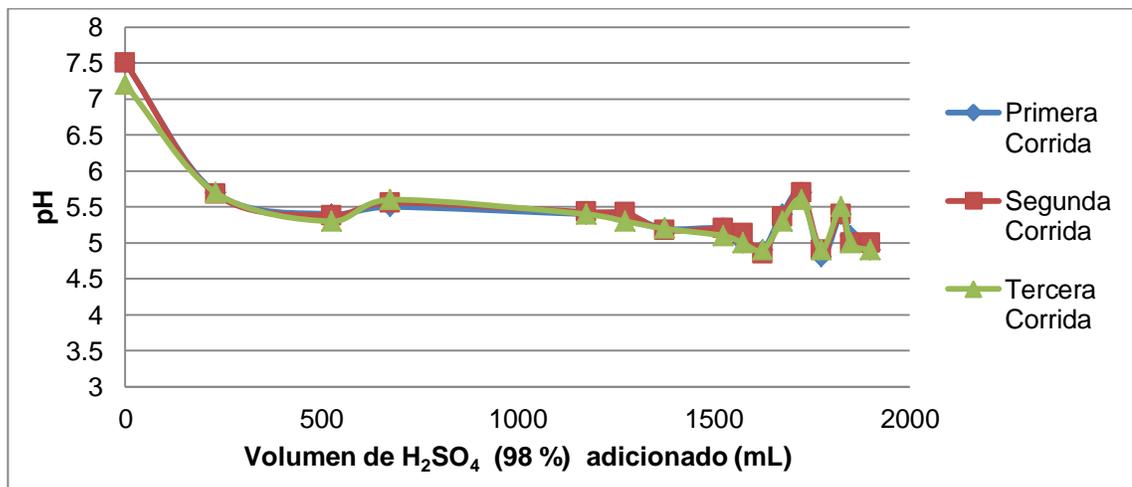
Tabla XXVII. **Rendimiento de obtención de sulfato de zinc en laboratorio**

Rendimiento (%)	40,7794 +/- 1,1859
-----------------	--------------------

Fuente: elaboración propia.

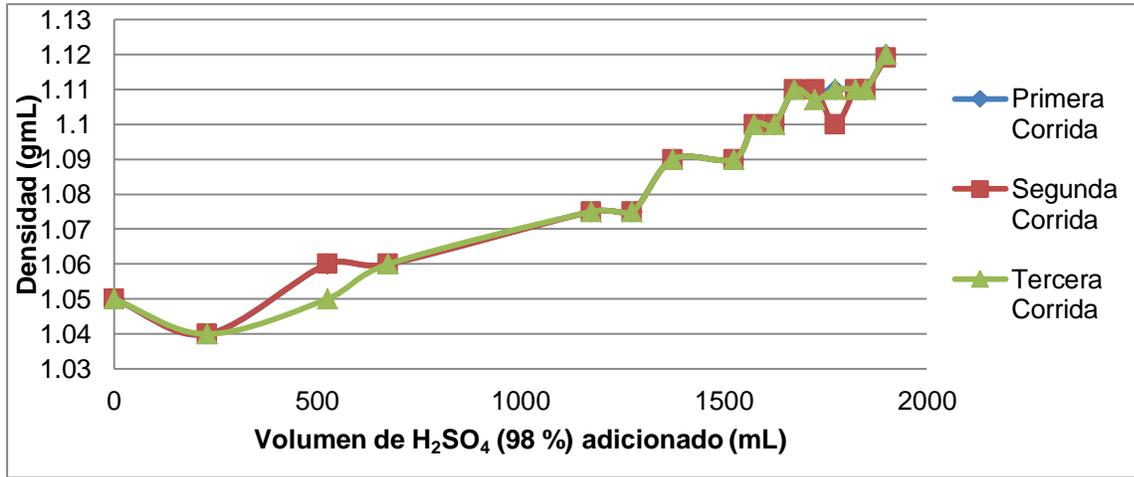
#### 4.2. Resultados de pruebas realizadas a nivel planta piloto

Figura 5. **Comportamiento del pH en función del volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> adicionado durante la etapa de lixiviación del zinc presente en la esmitsonita en planta piloto**



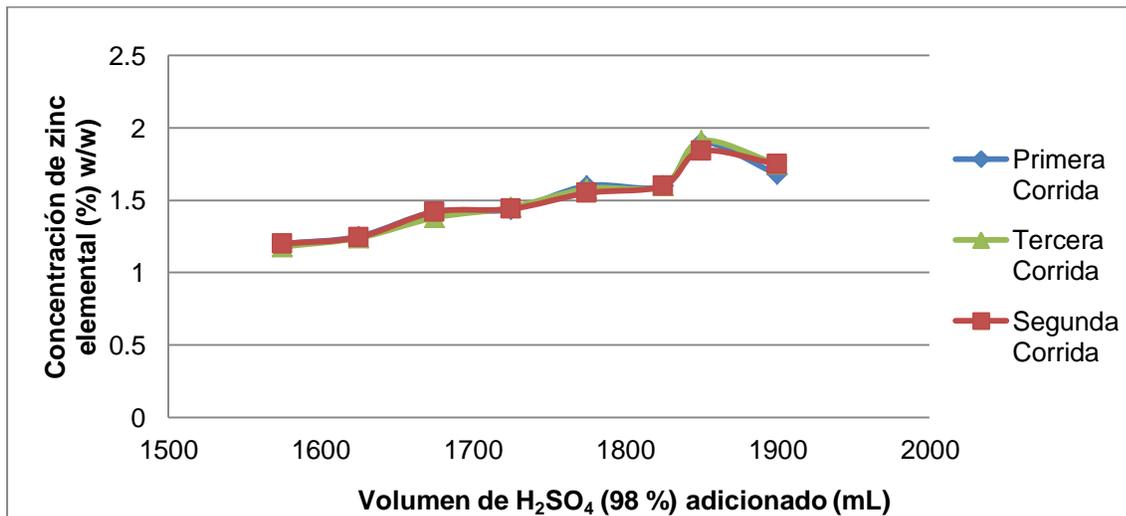
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Comportamiento de la densidad de la solución en función del volumen de  $H_2SO_4$  adicionado durante la etapa de lixiviación del zinc presente en la esmitsonita en planta piloto



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Concentración de zinc en función del volumen de  $H_2SO_4$  adicionado, durante la etapa de lixiviación del zinc presente en la esmitsonita en planta piloto



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Resultados finales etapa de lixiviación en planta piloto**

<b>Descripción</b>	<b>Resultado Final</b>
<b>Volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 98 %, final adicionado (mL)</b>	1 850,00
<b>Relación de lixiviación (g esmitsonita/mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98%))</b>	5,64
<b>Concentración de zinc final en solución (Zn % w/w)</b>	1 8833 +/- 0,0379
<b>pH final de la solución</b>	5 0333 +/- 0,0577
<b>Densidad final de la solución (g/mL)</b>	1,11

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Resultados finales del proceso de filtración en planta piloto**

<b>Descripción</b>	<b>Resultado</b>
<b>Total de agua de agotamiento (L)</b>	18
<b>Ciclos de lavado necesarios (ciclos)</b>	2

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Zinc metálico necesario para la reducción de metales pesados en planta piloto**

<b>Descripción</b>	<b>Resultado</b>
<b>Zinc metálico para la reducción de metales pesados (g)</b>	1 112,3333 +/- 7,6578
<b>Relación de tratamiento (g esmitsonita/g zinc metálico)</b>	9,3859 +/- 0,0648

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Comportamiento del plomo en los diferentes productos de cada etapa en planta piloto**

<b>Descripción del material</b>	<b>Concentración de plomo (Pb) en partes por millón (ppm)</b>
<b>Mineral esmitsonita</b>	24 454.1 +/- 47,9691
<b>Residuo filtrado (Cake)</b>	22 400 +/- 173,2051
<b>Solución de sulfato de zinc sin tratamiento con zinc metálico</b>	626,9147 +/- 14,3603
<b>Solución de sulfato de zinc después del tratamiento con zinc metálico</b>	No detectable
<b>Sulfato de zinc pentahidratado</b>	No detectable

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Comportamiento del cadmio en los diferentes productos de cada etapa en planta piloto**

<b>Descripción del material</b>	<b>Concentración de cadmio (Cd) en partes por millón (ppm)</b>
<b>Mineral esmitsonita</b>	835,371 +/- 4,8026
<b>Residuo filtrado (Cake)</b>	298,1317 +/- 0,9932
<b>Solución de sulfato de zinc sin tratamiento con zinc metálico</b>	70,5049 +/- 0,2491
<b>Solución de sulfato de zinc después del tratamiento con zinc metálico</b>	68,8296 +/- 3,1439
<b>Sulfato de zinc pentahidratado</b>	1 603,3136 +/- 48,8809

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Total agua evaporada a 22 pulgadas de vacío de mercurio y 45 °C en planta piloto**

<b>Agua evaporada (mL)</b>	67 315,17 +/- 308,192
----------------------------	-----------------------

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Sal de sulfato de zinc pentahidratado final obtenida en planta piloto**

<b>Descripción</b>	<b>Resultado</b>
<b>Sulfato de zinc pentahidratado (g)</b>	3 645,4 +/- 126,6863
<b>Concentración de zinc elemental (% w/w)</b>	25,8167 +/- 0,0252

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Rendimiento de obtención de sulfato de zinc en planta piloto**

<b>Rendimiento (%)</b>	39,3436 +/- 1,3289
------------------------	--------------------

Fuente: elaboración propia.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para la obtención de una sal libre de metales pesados a partir del mineral esmitsonita el cual es un mineral que contiene en promedio un 23% en peso de zinc. El mineral fue sometido a lixiviación utilizando ácido sulfúrico  $H_2SO_4$  al 98%, después se filtró la solución obteniéndose un residuo sólido el cual contenía la mayor cantidad de metales pesados, y una solución de sulfato de zinc con trazas de metales pesados, la solución fue tratada con láminas de zinc metálico para la reducción de estos, finalmente se evaporó la mayor cantidad de agua obteniendo una sal de sulfato de zinc pentahidratado. Estos procesos se realizaron tanto a nivel laboratorio como a nivel planta piloto.

Para el proceso de lixiviación tanto a nivel laboratorio como en planta piloto se preparó una solución de agua y mineral a la cual se le adicionaba el ácido sulfúrico por medio de dosis, después de agregar cierta cantidad de ácido se dejaba reaccionar y se medían el pH de la solución y la densidad. Esto hasta alcanzar el valor estequiométrico el cual determinó la mayor extracción del zinc presente en la esmitsonita, el comportamiento del pH durante la adición del ácido sulfúrico fue en disminución, en el punto final de la adición del ácido el pH en las pruebas de laboratorio fue de 4,6 y a nivel planta piloto 5,033. La densidad evolucionó en crecimiento para llegar a obtener un valor final a nivel laboratorio de 1,1133 g/mL y a nivel planta piloto de 1,11 g/mL.

La concentración final de zinc elemental fue de 2,5347% w/w a nivel laboratorio y a nivel planta piloto fue de 1,8833% w/w.

Según se puede observar en las figuras 4 y 7 el punto estequiométrico se logra a 32 mL de ácido adicionados, si se agrega más ácido esta concentración disminuye y el comportamiento se da tanto en laboratorio como en planta piloto.

Se procedió a filtrar la solución de la cual se obtuvo dos productos. Un residuo sólido en el cual contenía metales pesados, a nivel laboratorio la concentración de plomo fue de 22 926,66 ppm y de cadmio 331,66 ppm, la mayor cantidad de plomo se convirtió en material insoluble un 92% de este material quedó en el residuo y un 37% del cadmio, el resto quedó como trazas en la solución la cual contenía 740,96 ppm de plomo y 65,99 ppm de cadmio.

Con el tratamiento del zinc metálico se logra reducir todo el plomo, al contrario del cadmio el cual es un sulfato de cadmio soluble con una concentración de 65,99 ppm de cadmio. Para el residuo obtenido a nivel planta piloto el cual contenía 22 400 ppm de plomo y 298,13 ppm de cadmio y la solución de sulfato de zinc 626,91 ppm de plomo y 70,5049 ppm de cadmio, después del tratamiento con el zinc metálico se eliminó el plomo pero no el cadmio quedando en solución 68,83 ppm de cadmio como sulfato de cadmio soluble. El zinc metálico se determinó en función de la cantidad de la solución y la concentración de los metales pesados para laboratorio se determinó una relación de 6,1891 g esmitsonita/g  $Zn^0$  y para planta piloto 9,3859 g esmitsonita/g  $Zn^0$ .

Para la obtención final de la sal, se evaporó la mayor cantidad de agua de la solución de sulfato de zinc libre de metales pesados; a nivel laboratorio se trabajó evaporando el agua de la solución para obtener un producto final húmedo el cual se secó obteniendo 75,57 g de sulfato de zinc pentahidratado con una concentración de 25,85% en peso de zinc elemental.

La cual contiene un residuo de cadmio de 1 539,03 ppm. El rendimiento de extracción final fue de 40,7794%.

A nivel planta piloto se trabajó la cristalización de la solución al vacío trabajando a una presión de vacío de 22 pulgadas de mercurio y a una temperatura de 45 °C. Se evaporaron 67 315,17 mL de agua los cuales fueron condensados. Se obtuvo 3 645,4 g de sulfato de zinc pentahidratado con una concentración de zinc de 25,8167% en peso. Con lo cual se obtuvo un rendimiento de extracción del 39,34%.

Para ambos procedimientos se logró obtener una sal de sulfato de zinc pentahidratado, el cual se encontró libre de plomo, en el caso del cadmio no se logró eliminarlo de la solución, por lo que se debe de realizar otro procedimiento para eliminar este metal pesado y poder obtener una sal completamente libre de metales pesados.



## CONCLUSIONES

1. El mineral esmitsonita al ser reaccionado con ácido sulfúrico se obtiene una solución de sulfato de zinc, la cual es susceptible a purificarse.
2. Obtención de una relación de lixiviación para nivel laboratorio de 6,25 g esmitsonita / mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98 %).
3. Obtención de una relación de lixiviación para nivel planta piloto de 5,64 g esmitsonita / mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98 %).
4. Empleo de 350 mL para Laboratorio y para 1 800 mL para planta piloto de agua desmineralizada, los cuales se dividieron en dos ciclos de lavado para el agotamiento de zinc.
5. El plomo presente en trazas en la solución de sulfato de zinc es eliminado con el tratamiento de zinc metálico, logrando obtener una solución final libre de plomo empleando una relación para laboratorio de 6,1819 g esmitsonita / g Zn<sup>0</sup> y para planta piloto 9,3859 g esmitsonita / g Zn<sup>0</sup>.
6. El cadmio no se puede eliminar por medio del tratamiento de zinc metálico.
7. Se obtiene una sal de sulfato de zinc pentahidratado, con trazas de cadmio.

8. Por medio de evaporación y cristalización a una temperatura de 45 °C y 22 pulgadas de mercurio obteniendo una sal solida de sulfato de zinc.
9. Obtención de 75,5749 g de sal de sulfato de zinc a nivel laboratorio y 3645,4 g a nivel planta piloto.
10. El rendimiento de extracción de zinc fue de 40,7794% para nivel laboratorio y de 39,3436% a nivel planta piloto.

## RECOMENDACIONES

1. Se debe de adicionar el ácido sulfúrico por medio de dosis, pre establecidas, dejando un tiempo de reacción para que ésta no sea muy violenta, con lo cual se reduce la generación de vapores y una reacción exotérmica muy violenta.
2. La agitación debe de ser constante y continua en el proceso de lixiviación.
3. Para la eliminación del cadmio utilizar un electrodo de zinc metálico en el tanque de almacenaje, con un potencial aplicado de  $-0,63$  voltios D.C. para que se logre depositar el cadmio en el zinc metálico.
4. Realizar más ciclos de lavado para lograr agotar al máximo el zinc lixiviado remanente en residuo sólido.
5. Adicionar más ácido sulfúrico concentrado después de lograr el punto estequiométrico, para obtener una mayor cantidad de datos y poder definir un punto final de ácido concentrado adicionado.
6. Mantener constantes las condiciones de vacío y temperatura en la etapa de evaporación y cristalización logrando mantener sellado por completo el evaporador y cristalizador, para evitar pérdidas de sulfato de zinc evaporado no condensado.



## BIBLIOGRAFÍA

1. CHANG, Raymond. *Química*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 1984. 564 p. ISBN: 8448146263.
2. FARNSWORTH, Marie. *Zinc chemicals*. Londres: Mears Caldwell Hacker, 1973. 248 p. ISBN: ZZ000D4M9U.
3. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. México: Continental, 2003. p. 436-459. ISBN: 9682610400.
4. MCABE, Warren. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 4a ed. Mexico: McGraw-Hill, 1985. p. 618-949. ISBN: 8448119185.
5. WALPOLE, Ronal. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6a ed. México: Pearson Education, 1999. p. 461-468. ISBN: 9702609364.



## APÉNDICE

### Apéndice 1

#### Muestra de Calculo

1. **Volumen promedio de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$  98 %) adicionado para lixiviar el zinc presente en la esmitsonita**

$$\bar{X} = \frac{\sum X_n}{n}$$

Dónde:

$X_n$  = dato

n = Número de datos

Ejemplo:

(Volumen promedio de  $H_2SO_4$  98 %, a nivel laboratorio etapa de lixiviación)

$$Vol_{acido\ adicionado} = \frac{32 + 32 + 32}{3} = 32\ mL$$

De esta forma se calculó también para nivel planta piloto.

## 2. Concentración de zinc final promedio para cada uno de los productos de cada etapa

$$\bar{X} = \frac{\sum X_n}{n}$$

Dónde:

$X_n$  = dato

n = Número de datos

Ejemplo:

(Concentración promedio de Zn en porcentaje en peso, para cada uno de los productos de las diferentes etapas.

$$\text{Concentración Zn}_{promedio} = \frac{2,57 + 2,51 + 2,53}{3} = 2,5367 \% w/w$$

## 3. pH final promedio de la solución en etapa de lixiviación

$$\bar{X} = \frac{\sum X_n}{n}$$

Dónde:

$X_n$  = dato

n = Número de datos

Ejemplo:

(pH promedio solución final etapa de lixiviación laboratorio)

$$pH_{promedio} = \frac{5 + 5,1 + 5}{3} = 5,0333 \% w/w$$

#### 4. Densidad promedio final de la solución en etapa de lixiviación

$$\bar{X} = \frac{\sum X_n}{n}$$

Dónde:

$X_n$  = dato

n = Número de datos

Ejemplo:

(Densidad final promedio solución final etapa de lixiviación laboratorio)

$$Densidad_{promedio} = \frac{1,11 + 1,12 + 1,11}{3} = 1,1133 \text{ g/mL}$$

#### 5. Agua de agotamiento para planta piloto

- Se realizó un primer lavado de 150 mL el cual contenía 0,45 % Zn.
- Se realizó un segundo lavado de 200 mL el cual contenía 0,24 % Zn.
- Asumiendo que se tiene una proporción de escalamiento entre laboratorio y planta piloto de 50 unidades.

$$Primer Lavado = 50 \times 150 \text{ mL} = 7\,500 \text{ mL}$$

$$Segundo Lavado = 50 \times 200 \text{ mL} = 10\,000 \text{ mL}$$

#### 6. Zinc metálico adicionado para eliminar trazas de metales pesados (Pb y Cd).

Se toma una alícuota aproximadamente de 150 mL a la cual se agregará una lámina de zinc metálico, para comprobar la reducción de metales pesados con las láminas adicionadas.

- Calculo de factor para determinar la cantidad de zinc metálico necesaria para la reducción de metales pesados en solución.

$$Factor = \frac{Peso\ Promedio\ de\ láminas}{Vol\ 1 \times d} = F$$

Dónde:

Vol<sub>1</sub> = alícuota de solución

d= densidad (g/mL)

Ejemplo:

Calculo del factor para la primera corrida a nivel laboratorio.

$$F = \frac{3,3\ g}{155\ mL \times 1,12\ g/mL} = 0,019009$$

b. Determinación del peso de la solución final a partir de la densidad.

$$P_{solución} = Vol_2 \times d = g\ Solución$$

Dónde:

Vol<sub>2</sub>: Volumen de solución final

d= densidad (g/mL)

Ejemplo:

Calculo del peso de la solución para la primera corrida a nivel laboratorio.

$$P_{solución} = 1527\ mL \times 1,11\ \frac{g}{mL} = 1694,97\ g$$

c. Determinación del total de zinc metálico en gramos necesarios.

$$Peso_{Zinc\ Metálico} = P_{Solución} \times F = g_{zinc\ metálico}$$

Dónde:

P<sub>solución</sub>= peso de la solución final

F = factor multiplicativo para el zinc metálico

## Ejemplo

Determinación del total de zinc metálico para la primera corrida a nivel laboratorio

$$Peso_{zinc\ metálico} = 1694,97 \times 0,019009 = 32,2201g_{zinc\ metálico}$$

d. Total de láminas para reducción de trazas de metales pesados.

$$No. de láminas = \frac{P_{zinc\ metálico}}{P_{promedio}} = No. láminas$$

Dónde:

$P_{zinc\ metálico}$  = peso zinc metálico necesario

$P_{promedio}$  = peso promedio de cada lámina

Ejemplo:

Determinación del número de láminas para la primera corrida a nivel laboratorio

$$No. de láminas = \frac{32,2201}{3,3} = 9,7636 \approx 10\ láminas$$

## 7. Sulfato de zinc pentahidratado final obtenido

$$\bar{X} = \frac{\sum X_n}{n}$$

Dónde:

$X_n$  = dato

n = Número de datos

Ejemplo:

(Sulfato de zinc pentahidratado promedio obtenido)

$$ZnSO_4 \cdot 5H_2O_{promedio} = \frac{72,8 + 70,4306 + 74,494}{3} = 72,5749 \text{ g de } ZnSO_4 \cdot 5H_2O$$

## 8. Determinación de la concentración de Zinc

a. Determinación de gramos equivalentes a los mL de EDTA adicionado.

$$g \text{ Zn} = F_{Zn} \times F_{dil} \times Vol_{EDTA}$$

Dónde:

$F_{Zn}$  = factor de zinc = 0,006537

$F_{dil}$  = factor de dilución = 15,625

$Vol_{EDTA}$  = volumen de EDTA adicionado en titulación

Ejemplo:

Determinación de los gramos de Zn en la alícuota tomada de 1,001 g, para cuando se han agregado 31 mL de ácido sulfúrico.

$$g \text{ Zn} = 0,006537 \times 15,625 \times 0,185 = 0,01889 \text{ g Zn}$$

b. Determinación de la concentración de Zn en porcentaje en peso.

$$\% Zn = \frac{g Zn}{g Muestra} \times 100 = \% Zn$$

Dónde:

gZn = gramos de zinc determinados en la titulación.

gMuestra = gramos de la muestra en análisis.

Ejemplo:

Determinación del porcentaje de zinc presente en la solución cuando se han agregado 31 mL de ácido sulfúrico.

$$\% Zn = \frac{0,01889}{1,001} \times 100 = 1,887 \% Zn$$



## Apéndice 2

### Análisis estadístico

Se utilizó la prueba de  $\mu$ , para muestras pequeñas  $n < 30$ .

Si la población es normal o casi normal en cuanto a su distribución, se utilizará la distribución t. Se utilizó un  $\alpha = 5 \%$  con grados de libertad  $GL = n - 1$ .

Correspondiendo el valor de  $t = 4.303$

1. Determinación de t.

$$t = \frac{\mu - X}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

t= valor dentro de la curva.

$\mu$ = promedio de la muestra

X= valor promedio a evaluar

S= desviación estándar

n= número de muestras

Ejemplo:

Determinación de t para aceptación de la hipótesis para la cantidad de sulfato de zinc pentahidratado obtenido a nivel laboratorio.

$$t = \frac{75,57 - 186,15}{\frac{2,041}{\sqrt{3}}} = -93,68$$

### Apéndice 3

#### DATOS ORIGINALES

Datos obtenidos en etapa de lixiviación a nivel laboratorio primera corrida

Lixiviación con ácido sulfúrico			
Corrida No.	1		
Tiempo (min)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> adicionado	pH	Densidad (g/mL)
0	0	7,3	1,05
10	1	6,0	1,04
25	2	5,5	1,05
35	4	5,3	1,06
50	8	5,4	1,07
65	10	5,0	1,07
75	14	4,8	1,08
100	17	4,7	1,09
120	20	4,6	1,09
135	25	4,7	1,10
150	28	4,5	1,10
160	30	4,5	1,10
170	31	4,5	1,11
190	32	4,6	1,11
200	33	5,3	1,12

Fuente: elaboración propia.

**Datos obtenidos en etapa de lixiviación a nivel laboratorio segunda  
corrida**

<b>Lixiviación con ácido sulfúrico</b>			
<b>Corrida No.</b>	<b>2</b>		
<b>Tiempo (min)</b>	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> adicionado</b>	<b>pH</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>
0	0	7,51	1,0500
10	1	6.00	1,0400
25	2	5,75	1,0450
35	4	5,40	1,0560
50	8	5,43	1,0660
65	10	4,93	1,0740
75	14	4,86	1,0770
100	17	4,65	1,0910
120	20	4,65	1,0924
135	25	4,56	1,1014
150	28	4,50	1,1030
160	30	4,50	1,1070
170	31	4,55	1,1100
190	32	4,60	1,1100
200	33	4,95	1,1200

Fuente: elaboración propia.

**Datos obtenidos en etapa de lixiviación a nivel laboratorio tercera corrida**

<b>Lixiviación con ácido sulfúrico</b>			
<b>Corrida No.</b>	<b>3</b>		
<b>Tiempo (min)</b>	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> adicionado</b>	<b>pH</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>
0	0	7,50	1,050
10	1	6,08	1,040
25	2	5,69	1,047
35	4	5,05	1,068
50	8	5,18	1,061
65	10	4,96	1,072
75	14	4,80	1,086
100	17	4,63	1,087
120	20	4,58	1,100
135	25	4,50	1,102
150	28	4,50	1,100
160	30	4,45	1,100
170	31	4,50	1,110
190	32	4,60	1,110
200	33	5,07	1,120

Fuente: elaboración propia.

**Concentración de zinc según el volumen de ácido adicionado en laboratorio primera corrida**

<b>Lixiviación con ácido sulfúrico</b>			
<b>Corrida No.</b>	<b>1</b>		
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> adicionado</b>	<b>Ph</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>	<b>Concentración Zn (% w/w)</b>
31	4,5	1,11	1,89
32	4,6	1,11	2,57
33	5,3	1,12	1,93

Fuente: elaboración propia.

**Concentración de zinc según el volumen de ácido adicionado en laboratorio segunda corrida**

<b>Lixiviación con ácido sulfúrico</b>			
<b>Corrida No.</b>	<b>2</b>		
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> adicionado</b>	<b>Ph</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>	<b>Concentración Zn (% w/w)</b>
31	4,55	1,11	1,88
32	4,60	1,11	2,51
33	4,95	1,12	2,01

Fuente: elaboración propia.

**Concentración de zinc según el volumen de ácido adicionado en laboratorio tercera corrida**

<b>Lixiviación con ácido sulfúrico</b>			
<b>Corrida No.</b>	<b>3</b>		
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> adicionado</b>	<b>pH</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>	<b>Concentración Zn (% w/w)</b>
31	4,50	1,11	1,87
32	4,60	1,11	2,53
33	5,07	1,12	1,91

Fuente: elaboración propia.

**Datos obtenidos en etapa de filtración en laboratorio primera corrida**

<b>Etapa de Filtración</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Peso en libras</b>	<b>Peso en kilogramos</b>
<b>Peso del residuo (cake)</b>	0,94	0,43
<b>Agua filtrada (tamizadora)</b>	0,42	0,19
<b>Peso del residuo filtrado</b>	0,52	0,24

Fuente: elaboración propia.

### Datos obtenidos en etapa de filtración en laboratorio segunda corrida

<b>Etapa de Filtración</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Peso en libras</b>	<b>Peso en kilogramos</b>
<b>Peso del residuo (cake)</b>	0,9264	0,42
<b>Agua filtrada (tamizadora)</b>	0,4152	0,19
<b>Peso del residuo filtrado</b>	0,5112	0,23

Fuente: elaboración propia.

### Datos obtenidos en etapa de filtración en laboratorio tercera corrida

<b>Etapa de Filtración</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Peso en libras</b>	<b>Peso en kilogramos</b>
<b>Peso del residuo (cake)</b>	0,9478	0,43
<b>Agua filtrada (tamizadora)</b>	0,4462	0,20
<b>Peso del residuo filtrado</b>	0,5016	0,23

Fuente: elaboración propia.

### Agua de lavado utilizada en laboratorio primera corrida

Agua de lavado		
Lavado	Cantidad (litros)	% Zn retenido
Primer lavado	0,15	0,45
Segundo lavado	0,20	0,24
Total agua de lavado	0,35	0,69

Fuente: elaboración propia.

### Agua de lavado utilizada en laboratorio segunda corrida

Agua de lavado		
Lavado	Cantidad (litros)	% Zn retenido
Primer lavado	0,15	0,50
Segundo lavado	0,20	0,21
Total agua de lavado	0,35	0,71

Fuente: elaboración propia.

### Agua de lavado utilizada en laboratorio tercera corrida

Agua de lavado		
Lavado	Cantidad (litros)	% Zn retenido
Primer lavado	0,15	0,45
Segundo lavado	0,20	0,17
Total agua de lavado	0,35	0,62

Fuente: elaboración propia.

### Volumen total de soluciones en laboratorio primera corrida

<b>Volumen total final antes de evaporar</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Volumen (litros)</b>
<b>Solución de Zn</b>	0,985
<b>Agua de lavado</b>	0,350
<b>Agua filtrada</b>	0,190
<b>Total</b>	1,527

Fuente: elaboración propia.

### Volumen total de soluciones en laboratorio segunda corrida

<b>Volumen total final antes de evaporar</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Volumen (litros)</b>
<b>Solución de Zn</b>	0,985
<b>Agua de lavado</b>	0,350
<b>Agua filtrada</b>	0,190
<b>Total</b>	1,520

Fuente: elaboración propia.

### Volumen total de soluciones en laboratorio tercera corrida

<b>Volumen total final antes de evaporar</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Volumen (litros)</b>
<b>Solución de Zn</b>	0,991
<b>Agua de lavado</b>	0,350
<b>Agua filtrada</b>	0,200
<b>Total</b>	1,540

Fuente: elaboración propia.

### Relación de zinc metálico en la solución laboratorio primera corrida

<b>Determinación zinc metálico</b>		
<b>Volumen total</b>	<b>Densidad</b>	<b>Factor</b>
1 527	1,11	0,019
<b>Peso total</b>	1 694,970	
<b>Total zinc metálico</b>	32,220	
<b>Peso promedio anillo de zinc</b>	3,300	
<b>Anillos promedio</b>	9,764	
<b>Aproximación</b>	10,000	

Fuente: elaboración propia.

### Relación de zinc metálico en la solución laboratorio segunda corrida

<b>Determinación zinc metálico</b>		
<b>Volumen total</b>	<b>Densidad</b>	<b>Factor</b>
1 523,73	1,11	0,019
<b>Peso total</b>	1 691,337	
<b>Total zinc metálico</b>	32,151	
<b>Peso promedio anillo de zinc</b>	3,300	
<b>Anillos promedio</b>	9,743	
<b>Aproximación</b>	10,000	

Fuente: elaboración propia.

### Relación de zinc metálico en la solución laboratorio tercera corrida

<b>Determinación zinc metálico</b>		
<b>Volumen total</b>	<b>Densidad</b>	<b>Factor</b>
1 543,82	1,11	0,019
<b>Total peso</b>	1 713,638	
<b>Total zinc metálico</b>	32,575	
<b>Peso promedio anillo Zn</b>	3,300	
<b>anillos promedio</b>	9,871	
<b>Aproximación</b>	10,000	

Fuente: elaboración propia.

**Comportamiento de metales pesados después del tratamiento con el zinc metálico laboratorio primera corrida**

<b>Tratamiento zinc metálico</b>		
<b>Metal pesado</b>	<b>Solución sulfato de zinc sin tratamiento</b>	<b>Solución sulfato de zinc después</b>
<b>Plomo (g)</b>	0,000858	0,00000000
<b>Cadmio (g)</b>	0,000111	0,00011051

Fuente: elaboración propia.

**Comportamiento de metales pesados después del tratamiento con el zinc metálico laboratorio segunda corrida**

<b>Tratamiento zinc metálico</b>		
<b>Metal pesado</b>	<b>Solución sulfato de zinc sin tratamiento</b>	<b>Solución sulfato de zinc después</b>
<b>Plomo (g)</b>	0,000696800	0,000000000
<b>Cadmio (g)</b>	0,000094736	0,000094736

Fuente: elaboración propia.

**Comportamiento de metales pesados después del tratamiento con el zinc metálico laboratorio tercera corrida**

<b>Tratamiento zinc metálico</b>		
<b>Metal pesado</b>	<b>Solución sulfato de zinc sin tratamiento</b>	<b>Solución sulfato de zinc después</b>
<b>Plomo (g)</b>	0,000696800	0,000000000
<b>Cadmio (g)</b>	0,000094736	0,000094736

Fuente: elaboración propia.

**Total de agua a evaporar laboratorio primera corrida**

<b>Agua a evaporar</b>	
<b>Volumen solución después de tratamiento (ml)</b>	1 527,00
<b>Peso total solución (g)</b>	1 694,97
<b>Sulfato de zinc cristalizado (g)</b>	72,80
<b>Agua evaporada (ml)</b>	1 378,80

Fuente: elaboración propia.

### **Total de agua a evaporar laboratorio segunda corrida**

<b>Agua a evaporar</b>	
<b>Volumen solución después de tratamiento (ml)</b>	1 523,00
<b>Peso total solución (g)</b>	1 691,33
<b>Sulfato de zinc cristalizado (g)</b>	70,40
<b>Agua evaporada (ml)</b>	1 377,80

Fuente: elaboración propia.

### **Total de agua a evaporar laboratorio tercera corrida**

<b>Agua a evaporar</b>	
<b>Volumen solución después de tratamiento (ml)</b>	1 527,00
<b>Peso total solución (g)</b>	1 694,97
<b>Sulfato de zinc cristalizado (g)</b>	75,50
<b>Agua evaporada (ml)</b>	1 376,60

Fuente: elaboración propia.

### Datos obtenidos en etapa de lixiviación en planta piloto primera corrida

Lixiviación con ácido sulfúrico			
Corrida No.	1		
Tiempo (min)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Adicionado	pH	Densidad (g/mL)
0	0	7,5	1,050
35	230	5,7	1,040
70	525	5,4	1,060
105	675	5,5	1,060
175	1175	5,4	1,075
190	1275	5,4	1,075
200	1375	5,2	1,090
245	1525	5,2	1,090
250	1575	5,0	1,100
255	1625	4,9	1,100
260	1675	5,4	1,110
265	1725	5,7	1,109
270	1775	4,8	1,110
275	1825	5,4	1,110
280	1850	5,1	1,110
285	1900	4,9	1,120

Fuente: elaboración propia.

**Datos obtenidos en etapa de lixiviación en planta piloto segunda corrida**

<b>Lixiviación con ácido sulfúrico</b>			
<b>Corrida No.</b>	<b>2</b>		
<b>Tiempo (min)</b>	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Adicionado</b>	<b>pH</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>
0	0	7,50	1,050
35	230	5,68	1,040
70	525	5,38	1,060
105	675	5,56	1,060
175	1175	5,43	1,075
190	1275	5,42	1,075
200	1375	5,18	1,090
245	1525	5,20	1,090
250	1575	5,13	1,100
255	1625	4,85	1,100
260	1675	5,36	1,110
265	1725	5,70	1,110
270	1775	4,90	1,100
275	1825	5,40	1,110
280	1850	5,00	1,110
285	1900	5,00	1,119

Fuente: elaboración propia.

**Datos obtenidos en etapa de lixiviación en planta piloto tercera corrida**

<b>Lixiviación con ácido sulfúrico</b>			
<b>Corrida No.</b>	<b>3</b>		
<b>Tiempo (min)</b>	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Adicionado</b>	<b>pH</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>
0	0	7,2	1,050
35	230	5,7	1,040
70	525	5,3	1,050
105	675	5,6	1,060
175	1175	5,4	1,075
190	1275	5,3	1,075
200	1375	5,2	1,090
245	1525	5,1	1,090
250	1575	5,0	1,100
255	1625	4,9	1,100
260	1675	5,3	1,110
265	1725	5,6	1,107
270	1775	4,9	1,110
275	1825	5,5	1,110
280	1850	5,0	1,110
285	1900	4,9	1,120

Fuente: elaboración propia.

**Concentración de zinc según el volumen de ácido adicionado en planta piloto primera corrida**

<b>Lixiviación con ácido sulfúrico</b>			
<b>Corrida No.</b>	<b>1</b>		
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> adicionado</b>	<b>pH</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>	<b>Concentración Zn (% w/w)</b>
1 575	5,0	1,100	1,200
1 625	4,9	1,100	1,250
1 675	5,4	1,110	1,420
1 725	5,7	1,109	1,437
1 775	4,8	1,110	1,600
1 825	5,4	1,110	1,600
1 850	5,1	1,110	1,900
1 900	4,9	1,120	1,680

Fuente: elaboración propia.

**Concentración de zinc según volumen de ácido adicionado en planta piloto segunda corrida**

<b>Lixiviación con ácido sulfúrico</b>			
<b>Corrida No.</b>	<b>2</b>		
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> adicionado</b>	<b>pH</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>	<b>Concentración Zn (% w/w)</b>
1 575	5,13	1,100	1,200
1 625	4,85	1,100	1,245
1 675	5,36	1,110	1,420
1 725	5,70	1,110	1,440
1 775	4,90	1,100	1,550
1 825	5,40	1,110	1,600
1 850	5,00	1,110	1,840
1 900	5,00	1,119	1,750

Fuente: elaboración propia.

**Concentración de zinc según volumen de ácido adicionado en planta piloto tercera corrida**

<b>Lixiviación con ácido sulfúrico</b>				
<b>Corrida No.</b>	<b>3</b>			
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> adicionado</b>	<b>pH</b>	<b>Densidad (g/mL)</b>	<b>Concentración Zn (% w/w)</b>	
1 575	5,0	1,100	1,18	
1 625	4,9	1,100	1,24	
1 675	5,3	1,110	1,38	
1 725	5,6	1,107	1,45	
1 775	4,9	1,110	1,58	
1 825	5,5	1,110	1,60	
1 850	5,0	1,110	1,91	
1 900	4,9	1,120	1,75	

Fuente: elaboración propia.

**Datos obtenidos en etapa de filtración en planta piloto primera corrida**

<b>Etapa de Filtración</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Peso en Libras</b>	<b>Peso en kilogramos</b>
<b>Peso del Residuo (cake)</b>	47,00	21,36
<b>Agua Filtrada (tamizadora)</b>	21,12	9,60
<b>Peso del Residuo Filtrado</b>	25,88	11,76

Fuente: elaboración propia.

### Datos obtenidos en etapa de filtración en planta piloto segunda corrida

Descripción	Peso en Libras	Peso en kilogramos
Peso del Residuo (cake)	46,32	21,05
Agua Filtrada (tamizadora)	20,76	9,44
Peso del Residuo Filtrado	25,56	11,62

Fuente: elaboración propia.

### Datos obtenidos en etapa de filtración en planta piloto tercera corrida

Descripción	Peso en Libras	Peso en kilogramos
Peso del Residuo (cake)	47,39	21,54
Agua Filtrada (tamizadora)	22,31	10,14
Peso del Residuo Filtrado	25,08	11,40

Fuente: elaboración propia.

### Agua de lavado en planta piloto primera corrida

Lavado	Cantidad (litros)	% Zn retenido
Primer Lavado	8	0,54
Segundo Lavado	10	0,21
Total agua de lavado	18	0,75

Fuente: elaboración propia.

### Agua de lavado en planta piloto segunda corrida

Lavado	Cantidad (litros)	% Zn retenido
Primer Lavado	8	0,45
Segundo Lavado	10	0,24
Total agua de lavado	18	0,69

Fuente: elaboración propia.

### Agua de lavado en planta piloto tercera corrida

Lavado	Cantidad (litros)	% Zn retenido
Primer Lavado	8	0,50
Segundo Lavado	10	0,21
Total agua de lavado	18	0,71

Fuente: elaboración propia.

### Agua a evaporar primera corrida

Descripción	Volumen (litros)
Solución de Zn	48,05
Agua de Lavado	18,00
Agua Filtrada	9,60
Total	75,65

Fuente: elaboración propia.

### Agua a evaporar segunda corrida

Descripción	Volumen (litros)
Solución de Zn	47,45
Agua de Lavado	18,00
Agua Filtrada	9,44
<b>Total</b>	<b>74,89</b>

Fuente: elaboración propia.

### Agua a evaporar tercera corrida

Descripción	Volumen (litros)
Solución de Zn	47,25
Agua de Lavado	18,00
Agua Filtrada	10,14
<b>Total</b>	<b>75,39</b>

Fuente: elaboración propia.

### Zinc metálico utilizado primera corrida

Volumen total	Densidad	Factor
75 650	1,1	0.0134
<b>Total peso</b>	83 215,0000	
<b>Total zinc metálico</b>	1 116,4000	
<b>Peso Promedio anillo Zn</b>	3,3000	
<b>anillos promedio</b>	338,3000	
<b>Aproximación</b>	340,0000	

Fuente: elaboración propia.

### Zinc metálico utilizado segunda corrida

<b>Volumen total</b>	<b>Densidad</b>	<b>Factor</b>
74 886	1.1	0,0136
<b>Total peso</b>	82 375,0000	
<b>Total zinc metálico</b>	1 117,1000	
<b>Peso Promedio anillo Zn</b>	3,3000	
<b>anillos promedio</b>	338,5000	
<b>Aproximación</b>	340,0000	

Fuente: elaboración propia.

### Zinc metálico utilizado tercera corrida

<b>Volumen total</b>	<b>Densidad</b>	<b>Factor</b>
75 390	1,1	0,0133
<b>Total peso</b>	82 930,0000	
<b>Total zinc metálico</b>	1 103,5000	
<b>Peso Promedio anillo Zn</b>	3,3000	
<b>anillos promedio</b>	334,4000	
<b>Aproximación</b>	335,0000	

Fuente: elaboración propia.

**Comportamiento de metales pesados después del tratamiento con zinc  
metálico primera corrida**

<b>Metal pesado</b>	<b>Solución sulfato de zinc sin tratamiento</b>	<b>Solución sulfato de zinc después</b>
<b>Plomo (g)</b>	0,0512850	0,0000000
<b>Cadmio (g)</b>	0,0058439	0,0058439

Fuente: elaboración propia.

**Comportamiento de metales pesados después del tratamiento con zinc  
metálico segunda corrida**

<b>Metal pesado</b>	<b>Solución sulfato de zinc sin tratamiento</b>	<b>Solución sulfato de zinc después</b>
<b>Plomo (g)</b>	0,05117100	0,00000000
<b>Cadmio (g)</b>	0,00581432	0,00581432

Fuente: elaboración propia.

**Comportamiento de metales pesados después del tratamiento con zinc  
metálico tercera corrida**

<b>Metal pesado</b>	<b>Solución sulfato de zinc sin tratamiento</b>	<b>Solución sulfato de zinc después</b>
<b>Plomo (g)</b>	0,05334500	0,00000000
<b>Cadmio (g)</b>	0,00586362	0,00586362

Fuente: elaboración propia.

**Datos obtenidos en etapa de evaporación y cristalización al vacío primera  
corrida**

<b>Volumen solución después de tratamiento (ml)</b>	75 650,00
<b>Peso total solución (g)</b>	83 215,00
<b>Sulfato de zinc cristalizado (g)</b>	3 640,00
<b>Agua evaporada (ml)</b>	67 638,75
<b>Ritmo de evaporación y condensación (ml/min)</b>	140,00
<b>Tiempo de evaporación (H)</b>	8,05
<b>Mililitros por condensado</b>	2 800,00
<b>Ciclos de condensado</b>	24,16

Fuente: elaboración propia.

**Datos obtenidos en etapa de evaporación y cristalización al vacío segunda  
corrida**

<b>Volumen solución después de tratamiento (ml)</b>	74 890,00
<b>Peso total solución (g)</b>	82 375,00
<b>Sulfato de zinc cristalizado (g)</b>	3 522,00
<b>Agua evaporada (ml)</b>	67 025,05
<b>Ritmo de evaporación y condensación (ml/min)</b>	140,00
<b>Tiempo de evaporación (H)</b>	7,98
<b>Mililitros por condensado</b>	2 800,00
<b>Ciclos de condensado</b>	23,94

Fuente: elaboración propia.

**Datos obtenidos en etapa de evaporación y cristalización al vacío tercera  
corrida**

<b>Volumen solución después de tratamiento (ml)</b>	75 390,00
<b>Peso total solución (g)</b>	82 930,00
<b>Sulfato de zinc cristalizado (g)</b>	3 775,00
<b>Agua evaporada (ml)</b>	67 281,75
<b>Ritmo de evaporación y condensación (ml/min)</b>	140,00
<b>Tiempo de evaporación (H)</b>	8,01
<b>Mililitros por condensado</b>	2 800,00
<b>Ciclos de condensado</b>	24,03

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 4

### Datos calculados

#### Datos Calculados para etapa de lixiviación en laboratorio

Corrida	mL de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Final adicionado	Concentración de zinc elemental en solución final (% w/w)	pH final	Densidad final (g/mL)
1	32,0000	2,5700	4,6000	1,1100
2	32,0000	2,5100	4,6000	1,1200
3	32,0000	2,5300	4,6000	1,1100
<b>Promedio</b>	<b>32,0000</b>	<b>2,5367</b>	<b>4,6000</b>	<b>1,1133</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0306</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0058</b>

Fuente: elaboración propia.

#### Determinación de zinc metálico a utilizar, en laboratorio

Peso de mineral laboratorio			
200			
Peso inicial	Peso seco después de tratamiento	Peso final	Relación mineral/zinc metálico
32,2205	32,2825	31,3140	6,2072
32,1509	32,2169	31,6918	6,2207
32,5749	32,6394	32,3131	6,1397
<b>Promedio</b>	<b>32,3154</b>		<b>6,1892</b>
<b>Desviación Estándar</b>	<b>0,2274</b>		<b>0,0434</b>

Fuente: elaboración propia.

**Comportamiento de metales pesados durante el proceso de obtención de sulfato de zinc pentahidratado en laboratorio**

Material	Primera Corrida (ppm)		Segunda Corrida (ppm)		Tercera Corrida (ppm)		Promedio (ppm)		Desviación estándar (ppm)	
	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd
<b>Mineral Esmitsonita</b>	24 500	840,0	24 950,0	912,0	24 226,0	883,0	24 892,0	878,7	2 243,0	36,2
<b>Residuo proceso de lixiviación</b>	21 780	303,0	22 100,0	382,0	22 900,0	310,0	22 926,0	331,7	161,7	43,7
<b>Solución de sal sin tratamiento de zinc metálico</b>	506	65,2	939,1	64,3	777,8	68,5	741,0	66,0	218,9	2,2
<b>Solución después de tratamiento</b>	0	65,2	0,0	64,3	0,0	68,5	0,0	66,0	0,0	2,2
<b>Sulfato de zinc</b>	0	1 517	0,0	1 543,0	0,0	1 555,0	0,0	1 539,0	0,0	19,3

Fuente: elaboración propia.

### Sulfato de zinc pentahidratado obtenido en laboratorio

Corrida	Sal de zinc final (g)	Concentración de zinc (% w/w)	Gramos de Zinc en sal	Gramos de zinc en mineral	Rendimiento
1	72,80	25,90	18,86	46,00	40,99
2	70,43	25,80	18,17	46,00	39,50
3	74,49	25,84	19,25	46,00	41,85
<b>Promedio</b>	<b>72,57</b>	<b>25,85</b>	<b>Promedio</b>		<b>40,78</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>2,04</b>	<b>0,05</b>	<b>Desviación estándar</b>		<b>1,19</b>

Fuente: elaboración propia.

### Datos Calculados para etapa de lixiviación planta piloto

Corrida	mL de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> final adicionado	Concentración de zinc elemental en solución final (% w/w)	pH final	Densidad final (g/mL)
1	1 850,0000	1,9000	5,1000	1,1100
2	1 850,0000	1,8400	5,0000	1,1100
3	1 850,0000	1,9100	5,0000	1,1100
<b>Promedio</b>	<b>1 850,0000</b>	<b>1,8833</b>	<b>5,0333</b>	<b>1,1100</b>
<b>Desviación estandar</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0379</b>	<b>0,0577</b>	<b>0,0000</b>

Fuente: elaboración propia.

### Determinación de zinc metálico planta piloto

Peso de Mineral Planta Piloto			
10 440			
Peso Inicial	Peso Seco Después de Tratamiento	Peso Final	Relación mineral/zinc metálico
1 116,40	1 116,4513	1015.9753	9,3515
1 117,10	1 117,1512	1016.6122	9,3456
1 103,50	1 103,5533	1004.2383	9,4608
<b>Promedio</b>	1 112,3333		9,3860
<b>Desviación estándar</b>	7,6579		0,0649

Fuente: elaboración propia.

### Comportamiento de metales pesados durante el proceso de obtención de Sulfato de zinc pentahidratado planta piloto

Material	Primera corrida		Segunda corrida		Tercera corrida		Promedio		Desviación estándar	
	Pb (ppm)	Cd (ppm)	Pb (ppm)	Cd (ppm)	Pb (ppm)	Cd (ppm)	Pb (ppm)	Cd (ppm)	Pb (ppm)	Cd (ppm)
Mineral esmitsonita	24 500	840	24 458	831	24 404	835	24 454	835	48	5
Residuo de proceso de lixiviación	22 500	298	21 200	299	24 500	297	21 400	298	173	1
Solución de sal sin tratamiento de zinc metálico	616	70	621	71	643	71	627	71	14	0
Solución después de tratamiento	0	65	0	71	0	71	0	69	0	3
Sulfato de zinc	0	1 605	0	1 651	0	1 553	0	1 603	0	49

Fuente: elaboración propia.

### Sulfato de zinc pentahidrato obtenido en planta piloto

Corrida	Sal de zinc final (g)	Concentración de zinc (% w/w)
1	3 640,00	25,82
2	3 521,50	25,84
3	3 774,70	25,79
<b>Promedio</b>	<b>3 645,40</b>	<b>25,82</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>126,69</b>	<b>0,03</b>

Fuente: elaboración propia.

### Total de agua evaporada en planta piloto

Agua evaporada	
Corrida	volumen de agua (mL)
1	67 638,71
2	67 025,05
3	67 281,75
<b>Promedio</b>	<b>67 315,17</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>308,19</b>

Fuente: elaboración propia.

### Rendimiento de extracción de sulfato de zinc pentahidratado

Gramos zinc	Gramos zinc mineral	Rendimiento
939,85	2 392,00	39,29
909,96	2 392,00	38,04
973,50	2 392,00	40,70
<b>Promedio</b>		<b>39,34</b>
<b>Desviación estándar</b>		<b>1,33</b>

Fuente: elaboración propia.

### Determinación de la concentración zinc en la solución de etapa de lixiviación en Laboratorio

Volumen de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> adicionado (mL)	Concentración de zinc (% w/w) corrida No.1	Concentración de zinc (% w/w) corrida No. 2	Concentración de zinc (% w/w) corrida No. 3
<b>31</b>	1,887	1,873	1,865
<b>32</b>	2,566	2,502	2,523
<b>33</b>	1,938	2,006	1,916

Fuente: elaboración propia.

**Determinación de la concentración de zinc en sulfato de zinc pentahidratado obtenido en laboratorio**

<b>Corrida No.</b>	<b>Concentración de zinc (% w/w)</b>
<b>1</b>	25,906
<b>2</b>	25,800
<b>3</b>	25,846

Fuente: elaboración propia.

**Determinación de la concentración zinc en la solución de etapa de lixiviación en planta piloto**

<b>Volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> adicionado (mL)</b>	<b>Concentración de Zinc (% w/w) corrida No.1</b>	<b>Concentración de Zinc (% w/w) corrida No. 2</b>	<b>Concentración de Zinc (% w/w) corrida No. 3</b>
1 525	1,193	1,195	1,174
1 575	1,251	1,243	1,243
1 625	1,416	1,418	1,383
1 675	1,437	1,435	1,449
1 725	1,599	1,552	1,578
1 825	1,595	1,598	1,604
1 850	1,899	1,845	1,911
1 900	1,679	1,744	1,753

Fuente: elaboración propia.

**Determinación de la concentración de zinc en sulfato de zinc pentahidratado obtenido en planta piloto**

<b>Corrida No.</b>	<b>Concentración de zinc (% w/w)</b>
<b>1</b>	25,821
<b>2</b>	25,840
<b>3</b>	25,780

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 5

### Fotografías de la experimentación

#### Reactor para nivel laboratorio

Descripción	
Recipiente de acero inoxidable, para la realización de la lixiviación del zinc presente en la esmitsonita.	
Dimensiones y Capacidad	
Diámetro 23.5 cm	
Altura 20 cm	
Volumen de 8 674.72 mL	

Fuente: laboratorio Diamante.

#### Mezcladora empleada para la agitación y mezclado a nivel laboratorio

Descripción	
Mezcladora de flotación, 32 rpm	
Dimensiones y Capacidad	
Marca WEMCO	
Ratio: 25:1	
Torque de 50 kg/cm	

Fuente: laboratorio Diamante.

### Agitador para laboratorio

Descripción	
Agitador de tres aspas para flotación, dispuestas paralelamente.	
Dimensiones y Capacidad	
Largo 19 cm	
Ancho 21 cm	
Ancho de paletas, 1.5 cm, separadas 3 cm una de la otra dispuestas en sentido contrario	

Fuente: laboratorio Diamante.

### Sistema de filtración

Descripción	
Bomba de vacío marca WELCH, con un motor de 1/4 HP, de 500 - 2 300 rpm	
Manguera	
Kitazato de 1 000 mL	
Filtro Buchner	
Medio Filtrante geotextil	

Fuente: laboratorio Diamante.

## Reactor para planta piloto

Descripción		
Recipiente de acero inoxidable, chaqueta para calentamiento, con agitación. Sistema de dosificación de ácido.		
Dimensiones y capacidad		
Diámetro Interno 50 cm		
Diámetro Externo 60 cm		
Altura 74 cm		
Capacidad 35 gal		
Sistema de dosificación, bureta de 50 mL		
Motor para agitación: 1 740 rpm; 60 Hz; Motoreductor a 32 rpm		

Fuente: laboratorio Diamante.

## Agitador planta piloto

Dimensiones	
Largo 86 cm	
Ancho 48	
Altura del aspa 44 cm	
Paletas de 2.5 cm de ancho; 20 cm de largo.	
Separadas 11.5 cm una de la otra	

Fuente: laboratorio Diamante.

### Sistema de filtración planta piloto

Descripción	
<p>Consta de una unidad de filtración rectangular: 24 cm de alto; 50.5 cm de largo y 35 cm de ancho. Motor para sistema de agitación de 1 725 rpm. Medio Filtrante Geotextil</p>	

Fuente: laboratorio Diamante.

### Cristalizador por evaporación al vacío

<p><b>Se compone de un evaporador, sistema de vacío y condensación de vapor</b></p>	
<p>Diámetro Interno 50 cm</p>	
<p>Diámetro Externo 60 cm</p>	
<p>Altura 74 cm</p>	
<p>Capacidad 35 gal</p>	
<p>Sistema de calentamiento por medio de resistencia electricas, Temperatura de operación 50 °C</p>	
<p>Sistema de vacío presión de operación 22 pulg de Hg</p>	
<p>Sistema de condensación del agua de evaporación</p>	

Fuente: laboratorio Diamante.

### **Mineral Esmitsonita extraído de mina**



Fuente: laboratorio Diamante.

### **Mineral Esmitsonita secada y pulverizada**



Fuente: laboratorio Diamante.

### **Lixiviación laboratorio**



Fuente: laboratorio Diamante.

### **Lixiviación planta piloto**



Fuente: laboratorio Diamante.

## Cristalización por evaporación al vacío



Fuente: laboratorio Diamante.

## Sistema de condensación



Fuente: laboratorio Diamante.

**Condensado proceso de cristalización por evaporación al vacío**



Fuente: laboratorio Diamante.

**Sulfato de Zinc Pentahidratado obtenido en cristalización por evaporación al vacío**



Fuente: laboratorio Diamante.

**Sulfato de zinc pentahidratado final pulverizado**

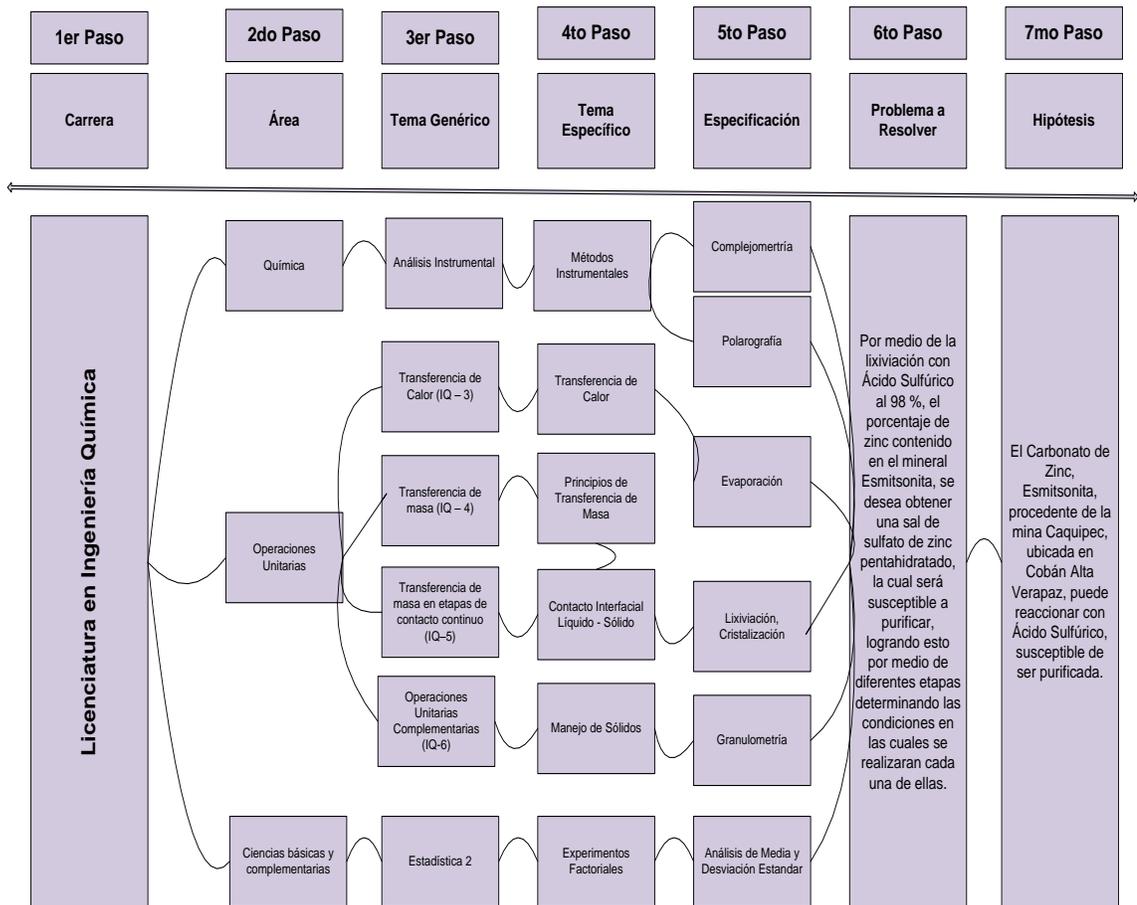


Fuente: laboratorio Diamante.



## Apéndice 6.

### Tabla de contenidos

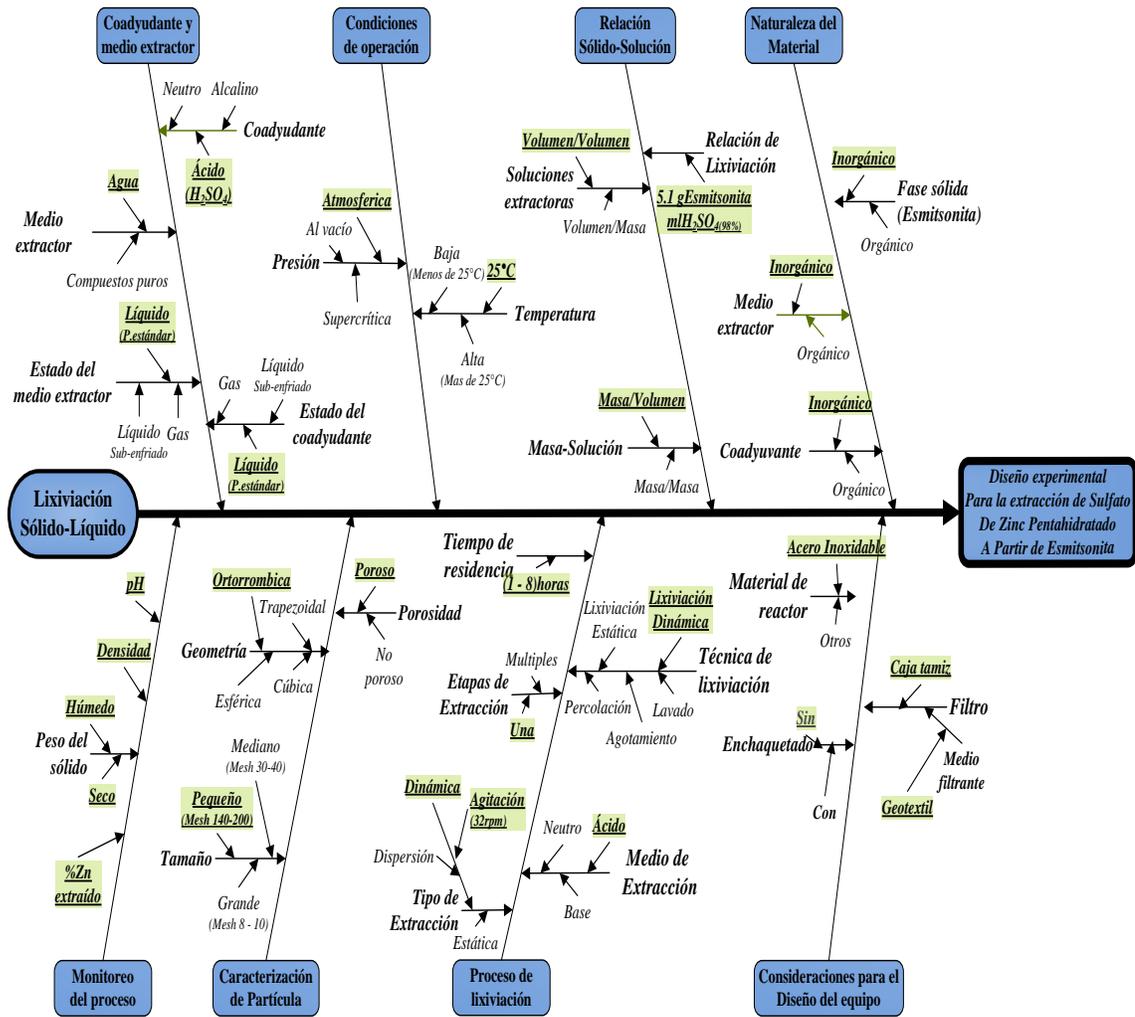


Fuente: elaboración propia.



## Apéndice 7.

### Diagrama de ixicagua



Fuente: elaboración propia.



## ANEXOS

### Anexo 1

**Análisis realizado a por medio de espectrofotometría de absorción atómica**

Descripción	Elementos (% w/w)	
	Plomo (Pb)	Zinc (Zn)
<b>Mineral sin tratamiento</b>	2,40	24,30
<b>Residuo después de lixiviación</b>	4,35	10,30
<b>Sulfato de zinc pentahidratado</b>	No detectable	25,00

Fuente: Inspectorate. Análisis.

### Anexo 2

**Análisis realizado por medio de ICP**

Descripción	Elementos (% w/w)						
	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	SiO <sub>2</sub>
<b>Mineral sin tratamiento</b>	0,29	4,04	1,17	0,05	3,19	0,44	15,30
<b>Residuo después de lixiviación</b>	0,18	3,68	0,88	0,07	-	0,21	26,60
<b>Sulfato de zinc pentahidratado</b>	0,01	0,20	0,04	<0,01	2,3	0,45	0,36

Fuente: Inspectorate. Análisis.

**Anexo 3.****Análisis realizado por medio de ICP**

Descripción	Elementos (ppm)									
	Ag	As	B	Ba	Bi	Ga	Cd	Co	Cr	Cu
<b>Mineral sin tratamiento</b>	149,0	385	9	223	11	4	840,4	5	6	227
<b>Residuo después de lixiviación</b>	190,2	296	8	21	7	3	434,2	3	72	112
<b>Sulfato de zinc pentahidratado</b>	0,2	10	5	10	<1	<1	768,6	2	18	50

Fuente: Inspectorate. Análisis.

**Anexo 4.****Análisis realizado por medio de ICP**

Descripción	Elementos (ppm)									
	La	Mn	Mo	Ni	P	Sb	Se	Sr	V	W
<b>Mineral sin tratamiento</b>	2	1176	32	12	67	57	<2	249	16	3
<b>Residuo después de lixiviación</b>	<2	359	18	21	72	48	<2	181	10	3
<b>Sulfato de zinc pentahidratado</b>	<2	1020	2	13	14	<2	<2	5	<2	2

Fuente: Inspectorate. Análisis.