



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

**ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL LABORATORIO Y PLANTA PILOTO PARA EL PROCESO DE
REFINACIÓN DE SMITHSONITA ($ZnCO_3$) DE UNA MINA EN ALTA VERAPAZ UTILIZANDO
OPERACIONES UNITARIAS FÍSICAS Y PROCESOS QUÍMICOS DE SEPARACIÓN Y
CONCENTRACIÓN FAVORABLES CON EL MEDIO AMBIENTE**

Adolfo Waldemar de la Cruz Cano

Asesorado por el Ing. Mariano Arturo Eskenasy

Guatemala, febrero de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL LABORATORIO Y PLANTA PILOTO PARA EL PROCESO DE
REFINACIÓN DE SMITHSONITA ($ZnCO_3$) DE UNA MINA EN ALTA VERAPAZ UTILIZANDO
OPERACIONES UNITARIAS FÍSICAS Y PROCESOS QUÍMICOS DE SEPARACIÓN Y
CONCENTRACIÓN FAVORABLES CON EL MEDIO AMBIENTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ADOLFO WALDEMAR DE LA CRUZ CANO

ASESORADO POR EL ING. MARIANO ARTURO ESKENASY

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2013

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	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL LABORATORIO Y PLANTA PILOTO PARA EL PROCESO DE REFINACIÓN DE SMITHSONITA ($ZnCO_3$) DE UNA MINA EN ALTA VERAPAZ UTILIZANDO OPERACIONES UNITARIAS FÍSICAS Y PROCESOS QUÍMICOS DE SEPARACIÓN Y CONCENTRACIÓN FAVORABLES CON EL MEDIO AMBIENTE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 09 de marzo de 2011.



Adolfo Waldemar de la Cruz Cano

Guatemala, 29 de agosto de 2012

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
Director Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Monzón:

Por este medio hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del Trabajo de Graduación, del estudiante ADOLFO WALDEMAR DE LA CRUZ CANO, con carné 2005-16322, el cual se titula: **“Estudio técnico a nivel laboratorio y planta piloto para el proceso de refinación de smithsonita ($ZnCO_3$) de una mina en Alta Verapaz utilizando operaciones unitarias físicas y procesos químicos de separación y concentración favorables con el medio ambiente”**.

En base a lo anterior, lo someto a su consideración a efecto de continuar con el trámite respectivo para su aprobación.

Sin otro particular, me suscribo de usted,

Atentamente,



Ing. Qco. Mariano Arturo Eskenasy
ASESOR
Colegiado 415

Mariano Arturo Eskenasy
INGENIERO QUÍMICO
Colegiado 415



Guatemala, 21 de noviembre de 2012
 Ref. EI.Q.TG-IF.056.2012

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

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-078-2010-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Adolfo Waldemar de la Cruz Cano**

Identificado con número de carné: **2005-16322**

Previo a optar al título de INGENIERO QUÍMICO.

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

ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL LABORATORIO Y PLANTA PILOTO PARA EL PROCESO DE REFINACIÓN DE SMITHSONITA (ZnCO₃) DE UNA MINA EN ALTA VERAPAZ UTILIZANDO OPERACIONES UNITARIAS FÍSICAS Y PROCESOS QUÍMICOS DE SEPARACIÓN Y CONCENTRACIÓN FAVORABLES CON EL MEDIO AMBIENTE

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Mariano Arturo Eskenasy**.

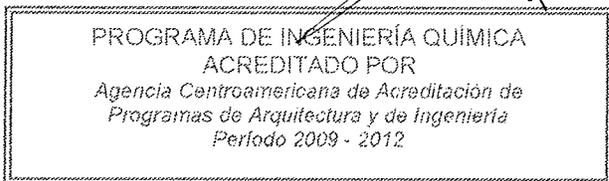
Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

[Handwritten signature]
 "ID Y ENSEÑADA A TODOS"

Ing. César Alfonso García Guerra
 COORDINADOR DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





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

Ref.EIQ.TG.039.2013

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, **ADOLFO WALDEMAR DE LA CRUZ CANO** titulado: **"ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL LABORATORIO Y PLANTA PILOTO PARA EL PROCESO DE REFINACIÓN SMITHSONITA ($ZnCO_3$) DE UNA MINA EN ALTA VERAPAZ UTILIZANDO OPERACIONES UNITARIAS FÍSICAS Y PROCESOS QUÍMICOS DE SEPARACIÓN Y CONCENTRACIÓN FAVORABLES CON EL MEDIO AMBIENTE"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, febrero 2013



Cc: Archivo
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 108 .2013

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: **ESTUDIO TÉCNICO A NIVEL LABORATORIO Y PLANTA PILOTO PARA EL PROCESO DE REFINACIÓN DE SMITHSONITA ($ZnCO_3$) DE UNA MINA EN ALTA VERAPAZ UTILIZANDO OPERACIONES UNITARIAS FÍSICAS Y PROCESOS QUÍMICOS DE SEPARACIÓN Y CONCENTRACIÓN FAVORABLES CON EL MEDIO AMBIENTE**, presentado por el estudiante universitario: **Adolfo Waldemar de la Cruz Cano**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 19 de febrero de 2013

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por llenar de bendiciones mi vida.
La Virgen María	Por cuidarme y guiarme.
Mis padres	Por el amor y apoyo brindado. Sus enseñanzas son ejemplo de vida. Sin su ayuda no hubiera alcanzado este logro.
Mis hermanas	Por su cariño, comprensión y apoyo.
Mis amigos y compañeros	Por su apoyo incondicional y compartir esta y las futuras etapas de mi vida.
Centro Universitario Ciudad Vieja	Por ayudarme a buscar la excelencia académica y la calidad humana. Ser una persona íntegra.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios en donde he vivido las mejores etapas de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

**Ing. Mariano Arturo
Eskenasy**

Por su tiempo, paciencia y compartir sus conocimientos durante la realización de este trabajo de graduación.

**Ing. César Alfonso
García**

Por su aporte en este trabajo de graduación e inculcar el trabajo bien hecho.

Inga. Lisely de León

Por su ayuda en este trabajo de graduación y en la vida estudiantil. Gracias por sus consejos.

**Personal de la Finca
Caquipec**

Por su contribución en este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS/HIPÓTESIS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. La tierra y los minerales	3
2.2. La industria minera y los procesos de producción	4
2.3. Clasificación de las minas	4
2.3.1. Por tamaño	4
2.3.2. Por metal producido	5
2.3.3. Por grado de transformación al que se llega	5
2.4. Minería y metalurgia	5
2.5. Minería en Guatemala	6
2.6. Smithsonita	6
2.6.1. Etimología	6
2.6.2. Cristalografía	6
2.6.3. Propiedades físicas	7
2.6.4. Diagnóstico	7
2.6.5. Yacimiento	7
2.7. Uso industrial del mineral de zinc	7

2.8.	Procesamiento de minerales	9
2.9.	Operaciones y procesos para el tratamiento de minerales	9
2.9.1.	Preparación del mineral.....	10
2.9.1.1.	Trituración.....	10
2.9.1.2.	Molienda	11
2.9.1.3.	Tamizado.....	12
2.9.1.4.	Clasificación	13
2.9.2.	Métodos de concentración.....	14
2.9.2.1.	Flotación	14
2.9.2.2.	Gravimetría.....	17
2.9.2.3.	Magnetismo	17
2.9.2.4.	Electrostática	18
2.9.2.5.	Escogido o pallaqueo	19
2.9.3.	Operaciones de separación.....	19
2.9.3.1.	Sedimentación	19
2.9.3.2.	Espesamiento	20
2.9.3.3.	Clarificación	27
2.9.3.4.	Filtración	27
2.9.3.5.	Secado	29
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	31
3.1.	Variables	31
3.1.1.	Variables independientes	33
3.1.2.	Variables dependientes	33
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	34
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	34
3.4.	Recursos materiales disponibles	34
3.4.1.	Materia prima y reactivos.....	34
3.4.2.	Cristalería	35

3.4.3.	Equipos.....	35
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	40
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	41
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	43
3.7.1.	Contenido de zinc	43
3.7.2.	Concentración de zinc.....	44
3.7.3.	Determinación de zinc.....	47
3.7.4.	Determinación de pH	47
3.7.5.	Tabulación de datos.....	47
3.8.	Análisis estadístico	50
4.	RESULTADOS.....	53
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	63
	CONCLUSIONES.....	67
	RECOMENDACIONES.....	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	APÉNDICES.....	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figuras

1.	Curva de sedimentación	20
2.	Prueba de sedimentación de sólidos	21
3.	Comparación de espesadores	22
4.	Esquema superior de un espesador de puente	23
5.	Esquema lateral de un espesador de puente	24
6.	Flujo en un espesador continuo	25
7.	Espesador de puente para concentrado de cobre en minera Candelaria, Chile	26
8.	Vista acotada espesador a nivel industrial mina Caquipec (longitud en metros).....	37
9.	Vista lateral espesador a nivel industrial mina Caquipec.....	38
10.	Vista isométrica espesador a nivel industrial mina Caquipec	39
11.	Vista en 3D espesador a nivel industrial mina Caquipec	40
12.	Diseño general técnica cuantitativa.....	41
13.	Eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 12, 18, 24, 30 y 36RPM y concentración de pulpa del 25%, 30% y 50%.....	58
14.	Eficiencia del espesador para 12, 18, 24, 30 y 36 RPM y concentración de pulpa del 25%, 30% y 50%.....	59
15.	Vista en 3D de la eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 12, 18, 24, 30 y 36 RPM y concentración de pulpa del 25%, 30% y 50%.....	60

Tablas

I.	Definición operacional de las variables para la concentración del porcentaje de zinc	31
II.	Evaluación de la velocidad de agitación y la concentración de la pulpa para el lote 204 de smithsonita	42
III.	Determinación de la masa en el fondo y rebalse para cada velocidad de agitación y concentración de la pulpa	48
IV.	Determinación de zinc porcentual por medio de EDTA para el fondo y rebalse del espesador a cada velocidad de agitación y concentración de la pulpa	49
V.	Ecuaciones para el análisis de varianza de dos factores	50
VI.	Ecuaciones para el análisis de varianza de un factor para la velocidad de agitación	51
VII.	Ecuaciones para el análisis de varianza de un factor para la concentración de la pulpa	52
VIII.	Eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 12 RPM y concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%	53
IX.	Eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 18 RPM y concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%	54
X.	Eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 24 RPM y concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%	54
XI.	Eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 30 RPM y concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%	55
XII.	Eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 36 RPM y concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%	55
XIII.	Eficiencia del espesador operando a 12 RPM para concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%	56

XIV.	Eficiencia del espesador operando a 18 RPM para concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%	56
XV.	Eficiencia del espesador operando a 24 RPM para concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%	57
XVI.	Eficiencia del espesador operando a 30 RPM para concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%	57
XVII.	Eficiencia del espesador operando a 36 RPM para concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%	58
XVIII.	Eficiencia promedio en el aumento de concentración de zinc para velocidad de agitación de 12, 18, 24, 30 y 36 RPM y concentración de pulpa del 25%, 30% y 50% para el lote 204 de smithsonita.....	61
XIX.	Eficiencia promedio en la recuperación de zinc para velocidad de agitación de 12, 18, 24, 30 y 36 RPM y concentración de pulpa del 25%, 30% y 50% para el lote 204 de smithsonita.....	62
XX.	Condiciones propuestas para la operación del espesador	62

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados Celsius
g	Gramo
H1	Hipótesis investigación
Ho	Hipótesis nula
Ha	Hipótesis alternativa
h	Hora
L	Litro
m	Masa
\bar{X}	Media aritmética (promedio)
mL	Mililitros
min	Minuto
mmHg	Milímetros de mercurio

M	Molar
n	Número de datos
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrógeno
rev h⁻¹	Revoluciones por hora
RPM	Revoluciones por minuto
T	Temperatura
V	Volumen

GLOSARIO

Arcilla	Roca sedimentaria clásica poco consolidada, constituida por una mayoría de partículas de tamaño inferior. La arcilla se utiliza como materia prima en la industria ladrillera y cerámica.
Carbonatos	Sal resultante de la combinación del ácido carbónico con un radical simple o compuesto. Se llama neutro cuando los dos hidrógenos del ácido han sido sustituidos por metales, y ácido o bicarbonato cuando sólo ha sido sustituido un átomo de hidrógeno.
Calamina	Término que usaban los mineros para designar a la mezcla que aparecía frecuentemente de hemimorfita, smithsonita e hidrocincita, en las minas de zinc.
Concentrado	Se usa para nominar la fracción con mayor contenido de metal a la salida del proceso de concentración del mineral.
Concentración	Proceso metalúrgico mediante el cual se elimina la ganga obteniéndose el concentrado del mineral respectivo.

EDTA	Es una abreviatura cómoda del ácido etilendiaminotetraacético un compuesto que forma complejos 1:1 fuertes con la mayoría de los iones metálicos y que se usa ampliamente en análisis cuantitativo (también llamado ácido etilendinitrilotetraacético).
Espesador	Tanque redondo y grande que se usa en las minas para separar sólidos y líquidos; el tanque deja transbordar un fluido claro y las partículas gruesas y pesadas se hunden.
Ganga	Minerales sin valor económico y que acompañan a los que contienen los elementos metálicos que se recuperan en el proceso industrial.
Ley	Parámetro que expresa la calidad de un mineral, un concentrado o cualquier producto que contenga especies metálicas. Es una medida cuantitativa de lo que existe aprovechable en la roca al momento de extraerla.
Mena	Material de un depósito mineral que puede ser minado con un provecho bajo las condiciones económicas existentes.
Mina	Explotación de un mineral a base de pozos, perforaciones y galerías o a cielo abierto.

Mineral	Mezcla de minerales metalíferos de mena y de ganga, de los cuales al menos uno de los metales puede ser extraído con un provecho.
Minería	Actividad desarrollada por el hombre para la extracción de productos minerales que se encuentran en la corteza terrestre y que tienen algún valor económico.
Pasivo minero	Material considerado residuo, por no ser útil para el fin principal de la operación minera, que puede ser recuperado y aprovechado desarrollando procesos mineros adicionales.
Pulpa	Mezcla de mineral más agua.
Proceso favorable con el medio ambiente	Actividad que se desarrolla reduciendo o eliminando el impacto negativo al medio ambiente de un proyecto.
Sedimentación	Operación unitaria de separación sólido-líquido en la que las partículas sólidas se separan debido a la diferencia de densidad entre dos fases presentes.
Zinc	Elemento químico de número atómico 30 (símbolo Zn). Se encuentra en forma de sulfuro, carbonato o silicato. De color blanco, brillante y blando, se usa en la fabricación de pilas eléctricas y para formar aleaciones como el latón y para el hierro y acero.

RESUMEN

El objetivo principal de este estudio fue aumentar el contenido de zinc en mineral de carbonatos de un yacimiento de arcilla proveniente de la mina Caquipec por medio de la operación unitaria de sedimentación. El material es considerado un pasivo minero proveniente de las colas de un tanque espesador.

Para llevar a cabo dicho objetivo, se evaluó a nivel planta piloto el efecto individual y en conjunto de la velocidad de agitación y la concentración de la pulpa en un espesador de puente operado en forma convencional y favorable con el medio ambiente. Posteriormente se midió a nivel laboratorio la concentración de zinc en el fondo y en el rebalse del espesador por complejometría utilizando EDTA como titulante y 3,3 dimetilnaftidina como indicador.

El estudio se realizó en el laboratorio y planta piloto de la mina Caquipec ubicado en la ciudad de Guatemala y con base en los resultados se determinó que la eficiencia en el aumento de zinc varía significativamente al cambiar la concentración de la pulpa y la velocidad de agitación, siendo esta última, la variable dominante y con mayor efecto en el estudio. El mejor resultado se obtuvo operando el espesador a 24 RPM y 30% de pulpa y el peor a 36 RPM y 50% de pulpa.

OBJETIVOS

General

Aumentar el contenido de zinc en mineral de carbonatos por medio de operaciones unitarias físicas y procesos químicos de separación y concentración, basados en sus propiedades físicas y químicas de forma favorable con el medio ambiente.

Específicos

1. Concentrar el mineral utilizando un espesador de puente operado en forma convencional, variando concentración de la pulpa y velocidad de agitación.
2. Operar el espesador en forma favorable con el medio ambiente, utilizando material considerado un pasivo minero.
3. Determinar la eficiencia del proceso de concentración y la eficiencia de recuperación de material.
4. Proporcionar las condiciones óptimas para la operación del espesador y el efecto del cambio de las variables del proceso.

HIPÓTESIS

Investigación

H1

- Por medio de estudios técnicos, a nivel planta piloto y laboratorio, es posible obtener la información para el proceso de concentración de zinc, en el mineral de carbonatos.

Estadística

Ho

- El cambio en la velocidad de agitación en el espesador, sí afecta en la eficiencia del aumento de zinc.
- La composición de la pulpa, dentro del espesador, sí afecta en la eficiencia del aumento de zinc.

Ha

- El cambio en la velocidad de agitación en el espesador, no afecta en la eficiencia del aumento de zinc.
- La composición de la pulpa, dentro del espesador, no afecta en la eficiencia del aumento de zinc.

INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país rico en recursos naturales, entre ellos los minerales. Los mismos pueden ser extraídos y explotados de tal forma que exista un equilibrio entre el beneficio económico, rentabilidad de la operación, y la conciencia ambiental con que se opere.

En Guatemala, también se cuenta con pasivos mineros que pueden ser recuperados y aprovechados en la sociedad por medio de operaciones y procesos favorables con el medio ambiente.

Por lo anterior, se realizó un estudio técnico a nivel laboratorio y planta piloto para la concentración de zinc, que es fundamento para procesos de este tipo a nivel industrial en los que se puede aplicar la conciencia ambiental.

A nivel industrial y planta piloto, el agua de proceso puede ser reutilizada, el uso de sustancias cuya disposición final sea compleja se puede eliminar o minimizar.

El valor de utilizar pasivos mineros es que luego de darles un valor económico de interés para el inversionista, se descontaminan áreas que contienen residuos de minerales y que al ser retirados mejoran el efecto visual en el paisaje. Por otro parte se genera empleo directo e indirecto y divisas para el país.

1. ANTECEDENTES

Es común que las industrias mineras utilicen operaciones físicas y químicas de separación y concentración para los materiales que extraen, con el fin de obtener productos valiosos (menas) y desechar los no deseados (gangas).

La Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en los últimos años, ha avalado estudios técnicos a nivel planta piloto y laboratorio de estudiantes en la industria minera como proyectos de graduación:

Estudio técnico a nivel planta piloto para la extracción de hierro (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ por lixiviación con ácido sulfúrico a partir de hematita proveniente de la mina Quebrada María, Camotán, Chiquimula de Mónica Saraí Soto Pivaral, 2008.

Evaluación técnica a nivel planta piloto para la refinación de arcillas, mediante lixiviación de hierro con ácido sulfúrico, a partir de hematita proveniente de la mina Quebrada María, Camotán, Chiquimula de Ginger Kim Elinor Starlight Méndez Marroquín, 2008.

Diseño experimental del proceso para la fabricación de sulfato de zinc pentahidratado a partir de smitsonita extraída de la mina Caquiepec, Cobán, Alta Verapaz de José Eduardo del Cid Castillo, 2011.

Aplicación y propuesta de una metodología en la determinación de zinc por complejometría utilizando edta como titulante y 3,3 dimetilnaftidina como indicador para su uso dentro del análisis de muestras procedentes de minas con contenido de hierro y material orgánico de Gerardo Antonio de León Izeppi, 2012.

La mina Caquipec apoya estudios técnicos mineros con la visión de desarrollar esta industria con métodos y procesos que sean favorables con el ambiente.

En lo social, la mina Caquipec genera empleo directo e indirecto así como divisas para el país; contribuye al bienestar y salud de las personas que habitan el entorno de los espacios mineros.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. La tierra y los minerales

La tierra tiene una gran variedad de elementos metálicos y no metálicos de interés, los cuales se distribuyen aleatoriamente en la corteza terrestre. La forma en que se encuentran se denomina minerales y se presentan en una capa llamada corteza terrestre y tiene entre 5 a 20 km de espesor aproximadamente.

Sólo ocho elementos constituyen más del 99% de la corteza terrestre. El oxígeno y el silicio constituyen cerca del 75%. Tres de los metales industrialmente importantes (Al, Fe y Mg) están presentes en cantidades superiores al 2%.

Los ocho elementos más comunes (98%) son:

- Oxígeno 47,3%
- Silicio 27,7%
- Aluminio 7,9%
- Hierro 4,5%
- Calcio 3,5%
- Sodio 2,5%
- Potasio 2,5%
- Magnesio 2,2%
- Zinc 0,5%

2.2. La industria minera y los procesos de producción

Cuando se extraen los recursos minerales, éstos no se renuevan, por esta razón la minería es una actividad que se maneja con responsabilidad y tecnología para lograr el mayor aprovechamiento de estos recursos escasos. Para lograr este mayor aprovechamiento, las empresas mineras tienen como objetivo conseguir la óptima extracción de las reservas minerales con el mayor beneficio económico y con la máxima seguridad de las operaciones.

La extracción de recursos minerales implica extraer recursos valiosos de la corteza terrestre los cuales están en contenidos muy bajos, esto implica el desarrollar todo un proceso de separación de contenidos valiosos y no valiosos, en los que, lógicamente, la cantidad de material no valioso supera en cantidad a los valiosos, dando en consecuencia una alta relación de desperdicio/producto, lo que origina diseñar todo un proceso de disposición de estos materiales no valiosos, dependiente con el proceso tecnológico seguido.

2.3. Clasificación de las minas

Las minas se pueden clasificar por: tamaño, metal producido y grado de transformación, al que se llega de acuerdo a los planes y objetivos de la empresa.

2.3.1. Por tamaño

- Gran minería
- Mediana minería
- Pequeña minería

2.3.2. Por metal producido

- Minas de cobre (cobre principalmente)
- Minas auríferas (oro básicamente y plata como subproducto)
- Minas polimetálicas (zinc, plomo, cobre y plata principalmente)
- Minas de estaño (estaño como producto principal)

2.3.3. Por grado de transformación al que se llega

- Productoras de concentrados
- Fundidoras
- Refinadoras

2.4. Minería y metalurgia

Para producir o concentrar un mineral se necesita un esfuerzo conjunto del geólogo, minero, metalurgista y del laboratorio de análisis, sin olvidar la parte económica y ambiental.

- El geólogo: realiza las exploraciones, evalúa las reservas y controla la calidad del material.
- El minero: realiza la extracción y transporte del mineral.
- El metalurgista: realiza el enriquecimiento o concentración de minerales, logra que sea comerciable de acuerdo a la demanda del mercado.

2.5. Minería en Guatemala

Guatemala es un país rico en variedad de recursos naturales, entre los cuales se encuentran los minerales. El potencial mineral del territorio nacional es una fuente de riqueza y presenta una oportunidad de desarrollo técnico, económico y social para los guatemaltecos.

2.6. Smithsonita

Es un mineral compuesto de carbonato de zinc. Se caracteriza por presentarse en una amplia variedad de colores, aunque el más conocido es el azul-verdozo.

2.6.1. Etimología

Denominada smithsonita en honor de James Smithson (1754-1829), fundador de la Smithsonian Institution de Washington. Al principio, los mineralogistas ingleses llamaron a este mineral Calamina.

2.6.2. Cristalografía

Hexagonal, raras veces en pequeños cristales romboédricos o escalonoédricos. Generalmente, reniforme, botrioidal o estaláctítico y en incrustaciones cristalinas o en masas aplanadas conocidas como calaminas.

2.6.3. Propiedades físicas

Exfoliación perfecta que rara vez se observa. Brillo vítreo. Translúcido. Color generalmente pardo sucio. Puede ser incoloro, blanquecino, verdoso, azulado o rosado. La variedad amarillenta contiene cadmio.

2.6.4. Diagnóstico

Infusible. Soluble en ácido clorhídrico con efervescencia. Se distingue por su efervescencia en los ácidos, sus ensayos de zinc, su dureza y su gran peso específico. Un fragmento calentado en la llama reductora da chispas verde-azuladas por arder el zinc volatilizado.

2.6.5. Yacimiento

La smithsonita es una mena de zinc de origen supergénico; se encuentra generalmente, con los depósitos de zinc en calizas y asociada a galena, blenda, hemimorfita, cerusita, calcita y limonita.

2.7. Uso industrial del mineral de zinc

El zinc es un elemento esencial para la salud humana y para el desarrollo y mantenimiento de la sociedad moderna. El zinc se ha usado por más de 2 000 años y sus usos van desde medicinas y hule a productos metálicos.

Su principal uso es para proporcionar protección a la corrosión de hierro y acero (galvanizado). En todo tipo de construcción se usa recubrimiento de zinc para lámina de acero, formas estructurales, cercas, tanques de almacenamiento, clavos y laso de acero.

El zinc se encuentra en una gran cantidad de productos manufacturados, pero su papel no es obvio porque tiende a perder su identidad en los productos. Se usan ánodos de sacrificio de zinc para proteger cascos de barcos, plataformas de perforación marítimas, tubos y tanques sumergidos o enterrados.

Otro uso importante es en la forma de óxido de zinc, para alimentación de animales, propósitos de agricultura, medicinal y como pigmentos. El latón (aleación de cobre y zinc) se usa en cartuchos de municiones y en tubos, válvulas, motores, equipo de refrigeración, intercambiadores de calor y aparatos electrónicos.

Las partes troqueladas de zinc, tales como: manecillas, parrillas, biseles, abrazaderas, chapas, bisagras, medidores, bombas, montajes y cajas se usan extensamente en vehículos, maquinaria, electrodomésticos, equipo científico, entre otros.

El polvo de zinc se usa en imprimados y pinturas, en baterías secas, galvanizado de tuercas, tornillos y partes pequeñas, para la precipitación de metales nobles de sus soluciones y en la producción de monedas. La funda de metal de las baterías secas de carbón-zinc se hace de este metal.

Se usan compuestos de zinc en imprimados (fondos) de pinturas inhibitorias de la corrosión, catalizadores químicos, flujos para soldadura, fungicidas, farmacéuticos, hule, fósforos, tubos catódicos, cerámicas y aditivos para aceites y grasas lubricantes. Las ferritas de zinc se utilizan en aparatos eléctricos como transformadores, bobinas, amplificadores, motores, sintonizadores en radio televisión y computadoras.

2.8. Procesamiento de minerales

El mineral que se extrae de mina, generalmente no se puede comercializar, por lo que hay que someterlo a un tratamiento para elevar su porcentaje de contenido metálico para hacer posible su venta, o prepararlo para el proceso posterior de fundición y refinación.

2.9. Operaciones y procesos para el tratamiento de minerales

Se denomina beneficio al conjunto de procesos físicos, químicos y/o fisicoquímicos que se realizan para extraer o concentrar las partes valiosas de un agregado de minerales y/o para purificar, fundir o refinar metales; comprende las siguientes etapas:

- Preparación mecánica: proceso por el cual se reduce de tamaño, se clasifica y/o lava en mineral siendo el 50% de los costos del proceso.
- Metalurgia: conjunto de procesos físicos, químicos y/o fisicoquímicos que se realizan para concentrar y/o extraer las sustancias valiosas de los minerales.
- Refinación: proceso para purificar los metales de los productos obtenidos de los procedimientos metalúrgicos anteriores.

2.9.1. Preparación del mineral

El mineral extraído de la mina es recibido en una cancha o patio, acondicionados para la clasificación del mineral, que luego pasará al proceso de triturado y los bloques de mineral demasiados grandes, previamente serán tratados para reducir sus dimensiones para pasar a la trituradora primaria. En este proceso se utilizan perforadoras, cargadores y otros equipos necesarios con sus respectivos operadores.

2.9.1.1. Trituración

Es aquella operación unitaria o grupos de operaciones concernientes a la reducción de trozos grandes de rocas hasta fragmentos, donde las partículas más grandes en el producto son del orden de 1/4" a 3/8". En general, la trituración puede dividirse en:

- Triturado grueso ↔ triturador primario: triturador giratorio, de mandíbulas, de rodillos.
- Triturado fino ↔ triturador secundario, terciario, 4°, 5°: triturador de cono, de cono cabeza corta, de rodillos, de martillo, de impacto.

El mineral clasificado es llevado a la trituradora primaria en donde se produce el primer proceso de trituración, reduciendo el tamaño del mineral a dimensiones determinadas, de allí pasa a la trituradora secundaria en donde el mineral se reduce a diámetros menores, pasando inmediatamente a la trituradora terciaria, en donde el mineral triturado, queda reducido y listo para pasar al proceso de molienda.

La decisión, en cuanto a qué tipo de triturador utilizar, dependerá del tipo de material y aplicación que se quiera dar al material. Los trituradores son clasificados de acuerdo al tamaño del material tratado, con subdivisiones en cada tamaño y de acuerdo a las formas de aplicación de fuerzas.

La reducción de tamaño de minerales se realiza, normalmente, para liberar los minerales de valor desde la roca donde están depositados. Esto significa que se debe lograr un tamaño de liberación, normalmente en un intervalo de 100 a 10 micrones. Si el material es no metálico como calcita, feldespato u otros, el valor está normalmente en la producción de polvo muy fino. Para poder maximizar el valor en la reducción de tamaño de rocas y minerales se necesita la trituración (chancado) y molienda en combinaciones.

2.9.1.2. Molienda

Mediante la molienda, la otra etapa después de la trituración, se continúa reduciendo el tamaño de las partículas que componen el mineral, para obtener la granulometría máxima de 180 micrones (0,18 mm), la que permite finalmente la liberación de la mayor parte de los minerales metálicos en forma de partículas individuales recuperables por flotación.

Este proceso se realiza utilizando grandes equipos giratorios o molinos de forma cilíndrica que existen y se disponen en tres esquemas diferentes de molienda:

- Convencional
- Unitaria
- Semi autógena (SAG)

En esta etapa, al material mineralizado se le agrega agua en cantidades suficientes para formar un fluido y los reactivos necesarios para realizar una flotación.

Esta operación representa una parte significativa del costo del proyecto por la energía necesaria para impulsar los molinos. El seleccionar el molino adecuado hará eficaz la operación. Los principales tipos de molinos utilizados son:

- De bolas
- De barras
- De martillo
- De chorro

2.9.1.3. Tamizado

Es una operación destinada a la separación por tamaños de las partículas de una mezcla sólida. Se basa en hacer pasar las partículas de menor tamaño a través de una malla de paso definido que se conoce como luz de la malla.

Las partículas se clasifican en cernido o partículas que atraviesan la malla y rechazo o partículas que quedan retenidas. Es el separador sólido-sólido más clásico.

Hay de muchos tipos, fijos o vibrantes, horizontales o inclinados, secos o húmedos, de trama cuadrada, redonda o de otras formas usuales. Un tamiz redondo se le dice criba.

Las máquinas cribadoras se pueden dividir en cinco clases principales: rejillas, cribas giratorias, cribas o tamices con agitación, tamices vibratorios y tamices oscilantes.

2.9.1.4. Clasificación

Es una operación de separación de una mezcla de sólidos en distintas fracciones, basada en la diferente forma, tamaño y densidad de las partículas que constituyen la mezcla. Esta separación se efectúa en medio acuoso. Cuando la separación ocurre en corriente de aire se denomina separación neumática.

La clasificación en húmedo es el proceso de separación de partículas por tamaño en dos o más productos según sea su comportamiento en el aire o en el agua. Los métodos de clasificación en húmedo son:

- Clasificación con hidrociclones: utilizando separación por fuerza centrífuga cubriendo una gama de tamaños típicos de 10 a 100 micrones.
- Clasificación con clasificadores en espiral: utilizando separación por gravedad, cubriendo una gama de tamaños típicos de 100 a 1 000 micrones.

La cantidad de agua hidráulica se controla de modo que, en cada compartimiento sucesivo las partículas más gruesas se mantienen en condiciones de asentamiento obstaculizado y las fracciones más finas siguen adelante para recibir un tratamiento similar.

Entre los clasificadores hidráulicos están: Jet Sizer y SuperSorter; la descarga de arena está controlada por válvulas accionadas por aire en el Jet Sizer y válvulas de tipo de estrangulación accionadas con motor en el SuperSorter.

También existe otro tipo de clasificador hidráulico el SiphonSizer D-O, de alta eficiencia, desarrollado originalmente para lavar y clasificar por tamaños la roca fosfórica.

Entre las aplicaciones usuales está la clasificación cuidadosa por tamaños de arenas de vidrios de sílice, el lavado de roca fosfórica, la distribución en tamaños de abrasivo, polvo sin humo, aluminato de sodio, entre otras.

2.9.2. Métodos de concentración

Como se ha mencionado anteriormente, es necesario realizar operaciones de concentración para obtener minerales de alta pureza que serán llevados a fundidoras.

2.9.2.1. Flotación

Es el método fisicoquímico que consiste en la concentración de minerales finamente molidos. Este proceso comprende el tratamiento químico de una pulpa de mineral que crea condiciones de adherencia de las partículas minerales a las burbujas de aire. Estas burbujas emergen con los minerales seleccionados a la superficie de la pulpa y forman una espuma estabilizada, que es recogida mientras los otros minerales permanecen sumergidos en la pulpa.

El método de recuperación de minerales por flotación es actualmente el más eficaz y el más extensamente usado en todo el mundo. Se distingue entre flotación colectiva (separación de minerales distintos, como los sulfurados y los no sulfurados) y flotación diferencial (separación de tipos similares de mineral, como la separación de sulfuros de cobre, plomo y zinc).

En la flotación por espumas, la separación mineral tiene lugar utilizando las diferencias en las propiedades de superficie de los minerales. Dichas propiedades son específicas para cada especie mineral y vienen determinadas por su composición química y tipo de enlace químico. Por ello, la flotación ofrece una capacidad de separación muy selectiva.

La importancia de la flotación reside en su relativa eficiencia y selectividad, su aplicabilidad a la mayor parte de las especies minerales y a sus altas capacidades por unidad de flotación.

La flotación ha permitido el tratamiento de menas con leyes muy bajas que, de lo contrario, no hubiesen podido ser explotadas. La aplicación de esta técnica, como método de separación, es la más utilizada, esperándose, en el futuro el mantenimiento de esta tendencia.

Inicialmente desarrollada para el beneficio de los sulfuros de cobre, plomo y zinc, su utilización se ha expandido a otras especies minerales, como la hematita y la casiterita en el campo de los óxidos, e inclusive especies como carbonatos tipo malaquita y cerusita, como ejemplo de fases oxidadas, e incluso, para menas no metálicas como la fluorita, los fosfatos o el carbón. La importancia económica de la flotación puede evaluarse al tener en cuenta que se utiliza en un 80% de los minerales que se tratan mediante operaciones de concentración.

El procedimiento se basa en el hecho de que ciertos minerales (los térreos) son hidrófilos, es decir, se adhieren al agua, mientras que otros (los metálicos) son hidrófobos, o sea, no tienen afinidad por el agua (no son impregnables o mojables por ésta o lo son en menor medida).

Por el contrario, el comportamiento de estos minerales frente al aceite es totalmente opuesto, es decir, los térreos actúan de forma hidrófoba y los metálicos hidrófilamente.

De esta forma, si en un líquido con ambos tipos de partículas (estéril y mena) se introduce un líquido oleaginoso y se crean burbujas, las partículas metálicas se adherirán por afinidad a las burbujas aceitosas y sobrenadarán con éstas (ya que el bloque formado tendrá menos densidad que el agua, debido a la presencia del aire contenido en la burbuja, que ocupa mucho volumen en relación con masa). Con ello, se habrá conseguido la deseada operación de separación de las partículas estériles de las de interés económico.

Los mecanismos de separación que operan en la flotación están fuertemente condicionados por el tamaño de las partículas. Éste debe ser suficientemente pequeño como para que las fuerzas de superficie que sostienen a la partícula adherida a la burbuja, no sean superadas por la fuerza de gravedad.

Si lo anterior ocurriese, el material se separaría de la burbuja y no tendría lugar el proceso de separación. El límite superior de tamaño de partícula que permite llevar a cabo la flotación oscila alrededor de las 500 micras, (0,5 mm o 35 mesh).

El método descrito se compone de los siguientes procesos: colección; activación y depresión, espumación, además hay que considerar el pH, las celdas de flotación y las nuevas tecnologías de columnas de flotación y celdas Jameson.

Los reactivos de flotación están en función del tipo de mena que se procesa y toman la denominación del proceso en que intervienen; la clasificación habitual (sin carácter científico, pero de utilidad práctica) distingue entre promotores o colectores (procesos de colección), espumantes (proceso de espumación), modificadores (procesos de activación, depresión) y floculantes (para dispersión, sulfuración, estabilización y regulación del pH).

2.9.2.2. Gravimetría

Consiste en la separación sólido – sólido utilizando la diferencia entre las gravedades específicas de los minerales. Se utiliza especialmente, en la concentración de minerales de oro, estaño, tungsteno, plata, plomo y otros.

2.9.2.3. Magnetismo

La propiedad que se utiliza en las separaciones magnéticas es la diferente susceptibilidad magnética de los minerales. Según sea esta susceptibilidad, los minerales pueden incluirse en uno de los tres grupos siguientes:

- Ferromagnéticos: tienen muy alta susceptibilidad y experimentan fuertes fuerzas magnéticas en un campo no uniforme (ejemplo la magnetita).
- Diamagnéticos: los minerales poseen fuerzas de separación muy débiles, por ejemplo, la galena o el cuarzo.

- Paramagnéticos: son débilmente magnéticos, aunque sus susceptibilidades magnéticas son un orden de magnitud mayor que las de los diamagnéticos y varios órdenes de magnitud menores que las de los ferromagnéticos. Ejemplos serían la pirita, la hematites y los sulfuros de cobre.

Las fuerzas presentes en los minerales diamagnéticos y paramagnéticos dependen de las correspondientes susceptibilidades, por lo que éstas pueden ser utilizadas para la separación entre estos tipos de minerales.

Por el contrario, en el caso de los ferromagnéticos, las partículas de diferente susceptibilidad no pueden ser separadas pues experimentan las mismas fuerzas. Éstas son considerablemente mayores que las que poseen los día y paramagnéticos, por lo que la separación entre éstos y los ferromagnéticos es posible; pero no entre los diamagnéticos o paramagnéticos que necesitan la presencia de los campos magnéticos de muy alta intensidad.

2.9.2.4. Electrostática

La fuerza de separación se produce por la acción que un campo eléctrico efectúa sobre una partícula cargada. El proceso supone dos funciones: primeramente, las partículas de interés económico deben ser cargadas selectivamente frente a las partículas estériles y, a continuación, se exponen a la acción de un campo eléctrico en el que la respuesta (trayectoria) es diferente según el tipo de partícula cargada.

El proceso de carga selectiva se lleva a cabo de dos formas: por inducción o por bombardeo iónico. De acuerdo con esto, la propiedad que se explota en las separaciones electrostáticas es la diferente conductividad eléctrica de los minerales. Una consecuencia importante, por lo tanto, es que los materiales deben estar completamente secos.

2.9.2.5. Escogido o pallaqueo

Es el método más antiguo de concentración y consiste, como su nombre lo indica, en el escogido a mano o mediante la ayuda de aparatos, de un mineral valioso aprovechando su diferenciación en color, brillo, fluorescencia, de los minerales estériles.

2.9.3. Operaciones de separación

Son las operaciones utilizadas en la industria minera para separar el mineral de interés del material inerte. Se fundamentan en el estado de agregación del material y sus propiedades, físicas, químicas y fisicoquímicas.

2.9.3.1. Sedimentación

Es una operación unitaria de separación sólido-líquido en la que las partículas sólidas se separan debido a la diferencia de densidad entre dos fases presentes.

En minería es la separación de partículas sólidas en suspensión de un líquido que se verifica por asentamiento gravitacional. Se pueden dividir en espesamiento y clarificación.

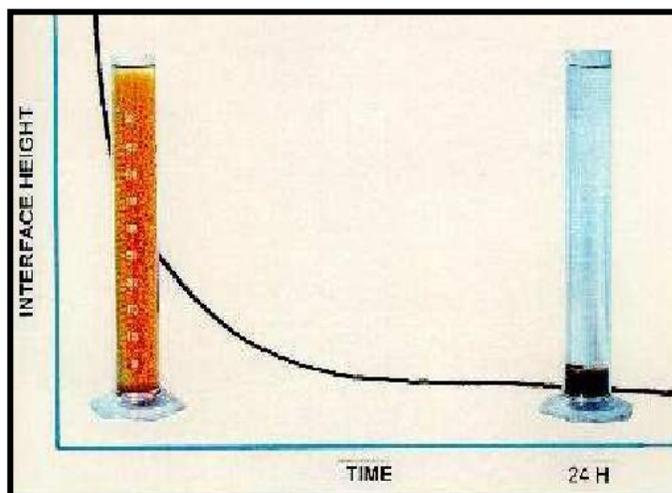
En función de la concentración y de la tendencia a la interacción de las partículas, se pueden producir cuatro tipos de sedimentación:

- Discreta
- Floculenta
- Retardada (también llamada zonal)
- Compresión

2.9.3.2. Espesamiento

El objetivo primario del espesamiento es incrementar la concentración de sólidos. Consiste en la sedimentación de sólidos de una pulpa a través de un efecto gravitacional, el que permite la decantación del sólido en la descarga inferior y el agua limpia o clara por el rebalse superior. Esto genera 2 pulpas o flujos, una con mayor y otra con menor concentración de sólidos que la alimentación.

Figura 1. **Curva de sedimentación**



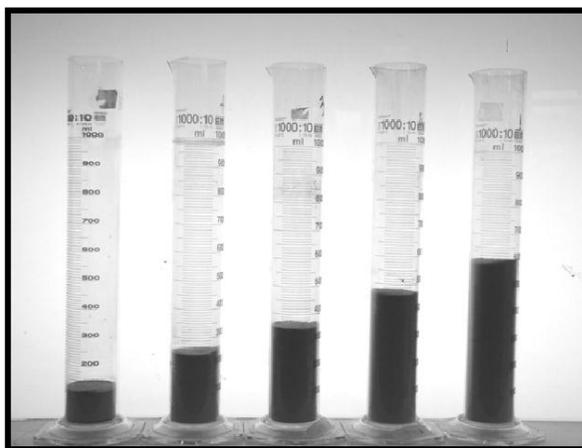
Fuente: BUSTOS, Pablo. *Clase 07: espesamiento y floculación*. p. 20.

Es la técnica de desagüado que más se aplica en el procesamiento de minerales, ya que es un proceso de alta capacidad relativamente barato, que implica fuerzas de corte muy bajas, proporcionando de este modo buenas condiciones para la floculación de las partículas. Las dos funciones primarias del espesador son la producción de un derrame clarificado y una descarga espesa con la concentración necesaria.

Las variables en la sedimentación son: pH de la pulpa, temperatura de la pulpa, dosis y tipo de floculantes, gravedad específica del sólido, viscosidad de la pulpa, granulometría del mineral o material, porcentaje de sólido en el fondo y la descarga.

La sedimentación se puede acelerar mediante el uso de floculantes, los cuales forman redes poliméricas que atrapan las partículas sólidas finas y aceleran la sedimentación.

Figura 2. **Prueba de sedimentación de sólidos**



Fuente: BUSTOS, Pablo. *Clase 07: espesamiento y floculación*. p. 21.

La tecnología de los espesadores se ha desarrollado en los últimos años con el fin de lograr la mayor eficiencia posible para la reducción de los costos de operación y mantenimiento. Se clasifican de acuerdo a dos formas que son:

- Su estructura: puente, columna, tracción periférica, sin mecanismo o acondicionamiento.
- Su operación: convencional, *high rate*, pasta.

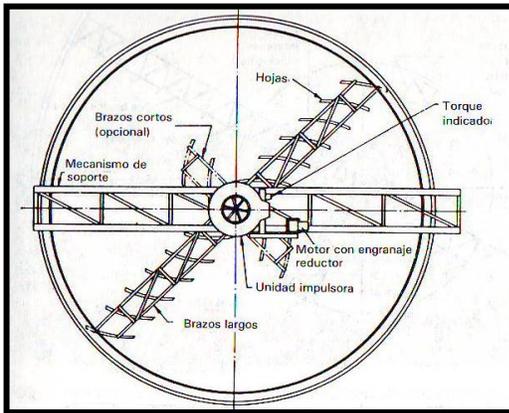
Figura 3. **Comparación de espesadores**

Parámetro	Convencional	High Rate	PASTA
Diámetro, ft.	210	210	210
Tratamiento, Ton/Día	10,000 - 20,000	25,000 - 50,000	25,000 - 50,000
Area Unitaria, m ² /TMSPD	0.15 - 0.30	0.05 - 0.15	0.05 - 0.15
Altura Muro, mt	2.8	2.8	4.0
Profundidad Parte Cónica, mt	2.66	2.66	5.33
Pendiente Piso	1 : 12	1 : 12	2 -5 : 12
Sistema Alimentación Pulpa	Cañería Libre	E-DUC® Feed System	E-DUC® Feed System
%Sólido Alimentación Feedwell	25 - 30%	3 - 17 %	3 - 17 %
%Sólido Descarga	45 - 55	50 - 60%	60 - 75 %
Dosis de Floculantes, gr/Ton	5 - 10	2 - 8	5 - 10
Rango Factor F	15 - 25	20- 50	50 - 150
Drive	C108 B2P	C108B2P	C120B4P
Torque, lb-ft	1,200,000	1,200,000	4,000,000
Factor K, lb-ft/ft ²	27	27	90

Fuente: BUSTOS, Pablo. *Clase 07: espesamiento y floculación*. p. 73.

Los espesadores pueden ser unidades intermitentes o contínuas y consisten de tanques de relativamente poca profundidad desde los cuales se separa el líquido claro de su parte superior y la suspensión espesa queda en el fondo. El clarificador es similar en diseño, pero es menos robusto, la que maneja suspensiones de menor contenido de sólidos que el espesador.

Figura 4. **Esquema superior de un espesador de puente**



Fuente: WILLIS, Barry Alan. *Tecnología de procesamiento de minerales*. p. 21.

En el espesador convencional la pulpa de alimentación al espesador no se diluye, puede o no usar floculante, en general la mezcla del floculante con la pulpa no es homogénea.

El espesador se usa para aumentar la concentración de la suspensión por sedimentación, acompañada de la formación de líquido claro. En la mayoría de los casos la concentración de la suspensión es alta y se presenta un asentamiento obstruido.

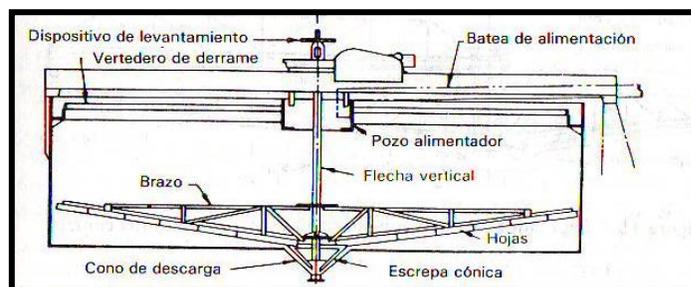
El espesador continuo consiste de un tanque cilíndrico, el diámetro varía de 2 a 200 m y profundidad de 1 a 7 m. La pulpa se alimenta al centro por un pozo de alimentación colocado hasta 1 m debajo de la superficie, para causar la menor perturbación posible. El líquido clarificado derrama por un canal periférico, mientras que los sólidos que se asientan sobre el fondo entero del tanque se sacan como una pulpa espesa a través de una salida central.

El interior del tanque tiene uno o más brazos giratorios radiales, desde cada uno de ellos está suspendida una serie de espas condicionadas para arrastrar los sólidos asentados hacia la salida central.

En la mayor parte de los espesadores modernos estos brazos se elevan automáticamente si el momento de torsión excede un cierto valor, evitando de este modo el daño debido a la sobrecarga. Las espas también ayudan a la compactación de las partículas asentadas y producen una descarga más espesa que la que se pueda alcanzar por el asentamiento simple.

Los tanques espesadores se construyen de acero, concreto o una combinación de ambos, el acero resulta más económico en los tamaño de diámetro menores de 25 m. Frecuentemente el fondo del tanque es plano mientras que los brazos mecánicos se inclinan hacia la descarga central. Con este diseño, los sólidos asentados se encaman para formar un falso fondo inclinado. Los fondos de acero de los espesadores raramente se inclinan para concordar con los brazos debido al costo que ello implica.

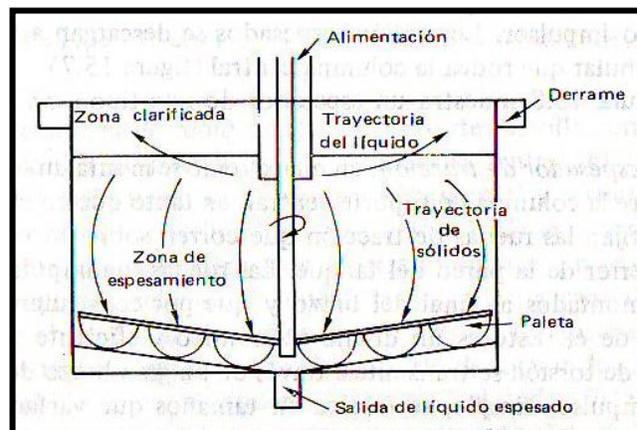
Figura 5. **Esquema lateral de un espesador de puente**



Fuente: WILLIS, Barry Alan. *Tecnología de procesamiento de minerales*. p. 21.

El método de apoyar el mecanismo depende, principalmente del diámetro del tanque. En los espesadores relativamente pequeños, menores de 45 m de diámetro, la cabeza de la transmisión, generalmente se sostiene sobre una estructura que atraviesa el tanque, con los brazos fijos a la matriz. A tales máquinas se les conoce como espesadores de vigueta o de puente. Generalmente la descarga se saca desde el vértice de un cono localizado en el centro del fondo inclinado.

Figura 6. **Flujo en un espesador continuo**

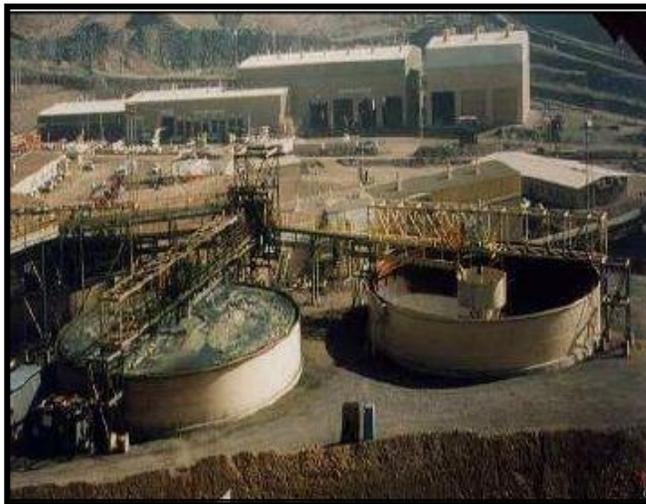


Fuente: WILLIS, Barry Alan. *Tecnología de procesamiento de minerales*. p. 21.

Los sólidos se mueven continuamente hacia abajo y después hacia la salida de la descarga espesa, mientras tanto el líquido se mueve hacia arriba y radialmente hacia afuera. En general, en el espesador no hay región de composición constante.

En todos los espesadores la velocidad del mecanismo de rastrillado en el perímetro normalmente es de 8 rev h^{-1} para un espesador de 15 m de diámetro. De este modo el consumo de energía es extremadamente bajo, de manera que para una unidad de 60 m se requiere solamente un motor de 10 kW. El desgaste y los costos de mantenimiento son correspondientemente bajos.

Figura 7. **Espesador de puente para concentrado de cobre en minera Candelaria, Chile**



Fuente: Minera Candelaria, Chile.

El lodo asentado, generalmente se saca de la descarga central por bombeo, aunque en los clarificadores el material se puede descargar en el tanque bajo la carga hidrostática. Normalmente la descarga se junta en un pozo de lamas en el centro del fondo del tanque, desde donde se envía por una tubería a través de un túnel de descarga.

Las líneas de descarga deben ser tan cortas y rectas como sea posible para reducir el riesgo de obstrucción y esto se logra en los grandes tanques, tomando la descarga arriba del pozo de lama a través de la columna central hasta las bombas colocadas en la parte superior o colocando las bombas en la base de la columna y bombeando hacia arriba desde el fondo.

Las bombas para el lodo asentado (descarga), frecuentemente son del tipo de diafragma; estas bombas son de acción positiva para cargas (alturas) y volúmenes medios y son apropiadas para manejar fluidos viscosos espesos.

2.9.3.3. Clarificación

La clarificación se rige por principios semejantes al espesamiento, pero este proceso se diferencia en que sirve para separar los sólidos de una corriente relativamente diluida; en realidad un clarificador es un clasificador y debe analizarse como tal.

2.9.3.4. Filtración

Es una etapa posterior al espesamiento. Consiste en la aplicación de diversos principios físicos (compresión, tensión superficial, entre otros) para eliminar el H₂O. Uno de los productos que se obtienen es un sólido semi-seco con 8%-10% de humedad, que se seca y envía a fundición (o se vende como concentrado). El otro producto es el líquido filtrado que se recircula a la planta concentradora.

Por filtrado se entiende el proceso de separación de la fase sólida y líquida presente en la pulpa a través de un medio poroso. Dicho medio poroso retiene los sólidos y permite la evacuación de la fase líquida.

Los sólidos se van acumulando en la pantalla de filtrado formando una torta (*cake*), que a su vez actúa en sí misma como un nuevo medio de filtrado, permitiendo sólo el paso de la fase líquida.

El tamaño de los poros en el panel de filtrado se selecciona en función del tamaño y proporción de las partículas más finas presentes en la pulpa que va a ser filtrada. Tanto la torta como el panel de filtrado ofrecen una importante resistencia al paso del líquido, con lo que se disminuye el caudal de filtrado y, por ende, la formación de la torta.

Esta resistencia viene determinada por la viscosidad del líquido, el tamaño de poros del panel y el tamaño de los intersticios dentro de la torta. Para evitar esta resistencia e incrementar la evacuación del líquido hasta caudales razonables, se aplica una presión al sistema, la cual fuerza la salida de la fase líquida, generándose una torta más seca. Posteriormente, la torta es extraída del sistema de diferentes formas, según la máquina que se utilice.

De acuerdo con lo dicho, es evidente que la filtración no es un proceso que tenga lugar en una fase, sino más bien se lleva a cabo en tres estadios: formación de la torta, secado y extracción.

La filtración por vacío es la más común a nivel industrial, existiendo diferentes aparatos que la realizan. El principio básico de funcionamiento reside en la creación de una presión diferencial efectiva a través del panel de filtrado y la torta por la acción de un vacío.

2.9.3.5. Secado

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua y otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo.

El secado es por lo común, la etapa final de una serie de operaciones y, con frecuencia el producto que se extrae de un secador está listo para ser empaquetado.

Hay varias maneras de clasificar los equipos de secado. Las tres clasificaciones más útiles son:

- Secado en los que el sólido se encuentra directamente expuesto a un gas caliente (por lo general aire), estos secadores se llaman secadores directos o adiabáticos.
- Secadores en los que el calor es transferido al sólido desde un medio externo tal como vapor de agua condensante, generalmente a través de una superficie metálica con la que el sólido está en contacto, estos secadores se llaman indirecto o no adiabáticos.
- Secadores que son calentados por energía dieléctrica, radiante o de microondas.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Como resultado de la revisión bibliográfica sobre aquellos factores que influyen en la concentración del porcentaje de zinc en el mineral de carbonatos, se establecieron las variables de entrada a modificar para medir el efecto sobre los resultados, además se determinaron qué factores se mantendrían constantes:

Tabla I. **Definición operacional de las variables para la concentración del porcentaje de zinc**

No.	Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
			Constante	Variable	Controlables	Ruido
Análisis de proceso						
1	Masa de muestra	g	X			
2	Humedad de la muestra	%	X			
3	Porcentaje inicial de zinc	%	X			
4	Concentración de la pulpa	%		X		

Continuación de la tabla I.

5	Agua de acondicionamiento	L		X		
6	Agua de lavado	L	X			
7	Velocidad de agitación	RPM		X		
8	Porcentaje final de zinc	%		X		
9	Temperatura de la pulpa	°C	X			
10	pH de la pulpa	pH	X			
11	Tiempo de acondicionamiento	h	X			
12	Tiempo de lavado	min	X			
Análisis de ambiente externo						
13	Temperatura	°C				X
14	Presión	mmHg				X
15	Humedad	%				SIE

Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Variables independientes

- Masa de muestra: la masa de muestra se refiere al peso inicial tomado por medio de una balanza.
- Humedad de la muestra: se refiere al contenido de agua en el mineral.
- Agua de acondicionamiento: es el agua agregada al espesador para preparar la pulpa.
- Agua de lavado: agua dosificada al espesador durante su operación.
- Velocidad de agitación: velocidad de agitación durante el acondicionamiento de la pulpa.
- Temperatura de la pulpa: es la temperatura de la pulpa en el espesador.
- pH de la pulpa: corresponde al potencial de hidrógeno en la pulpa acondicionada.
- Tiempo de acondicionamiento: tiempo asignado para preparar la pulpa.
- Tiempo de lavado: corresponde al tiempo para lavar el mineral en el espesador.

3.1.2. Variables dependientes

- Porcentaje inicial de zinc: el porcentaje inicial de zinc presente en la muestra dependió de las características del suelo, de la cual procede cada muestra.
- Porcentaje final de zinc: corresponde al contenido del mineral en el fondo y descarga del espesador que dependió de las variables de operación.
- Concentración de la pulpa: es la concentración de material en el espesador luego de agregar el agua de acondicionamiento.

3.2. Delimitación de campo de estudio

- Área: minería.
- Industria: minera.
- Proceso: concentración de zinc de las muestras procedentes de distintas partes de la mina por espesamiento.
- Ubicación: la materia prima se obtuvo de la mina Caquipec ubicada en el departamento de Alta Verapaz, Guatemala. La concentración del mineral fue realizada en el laboratorio y planta piloto del ingeniero químico Mariano Arturo Eskenasy, ubicado en la zona 1 de la ciudad de Guatemala.
- Clima: semicálido (15 °C – 25 °C), tanto en la ciudad de Guatemala, como en el departamento de Alta Verapaz.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Persona que realiza el estudio: Adolfo Waldemar de la Cruz Cano
- Asesor: Ing. Qco. Mariano Arturo Eskenasy

3.4. Recursos materiales disponibles

Con el objeto de llegar a los logros esperados por esta investigación se utilizó las materias primas, reactivos, cristalería y equipos que a continuación se detallan:

3.4.1. Materia prima y reactivos

- Muestras de minas
- Ácido clorhídrico

- EDTA
- Hidróxido de sodio
- Ferricianuro de potasio
- 3,3' dimetilnaftdina
- Acetato de sodio
- Agua destilada

3.4.2. Cristalería

- 10 beackers de 500 mL
- 10 varillas de agitación
- 10 erlenmeyer de 300 mL
- 2 vidrios reloj
- 2 cajas de papel filtro
- 1 microbureta de 5 mL
- 3 pisetas
- 10 embudos
- 2 balones aforados de 1 L
- 2 pipetas serológicas de 10 mL
- 3 probetas de 10 mL
- 1 espátula

3.4.3. Equipos

- Balanza marca Adventur, serie: G1231202040133, voltaje 8,0-14,5, frecuencia 50/60 Hz. máxima capacidad 150 g, lectura mínima 0,001 g. hecha en U.S.A.

- 2 planchas de calentamiento con agitación, marca Corning, modelo PC-620, voltaje 120/100, frecuencia 60 Hz, Potencia 1113 Watts, rango 0 – 4800 °C, giro 0 – 1100 rpm.
- Potenciómetro marca Orión Research.
- Campana de extracción.
- Espesador a nivel planta piloto con las siguientes relaciones de dimensión:

$$\frac{\text{Diámetro del tanque}}{\text{Diámetro cono de descarga}} = 7,28$$

$$\frac{\text{Profundidad del tanque}}{\text{Diámetro del tanque}} = 0,32$$

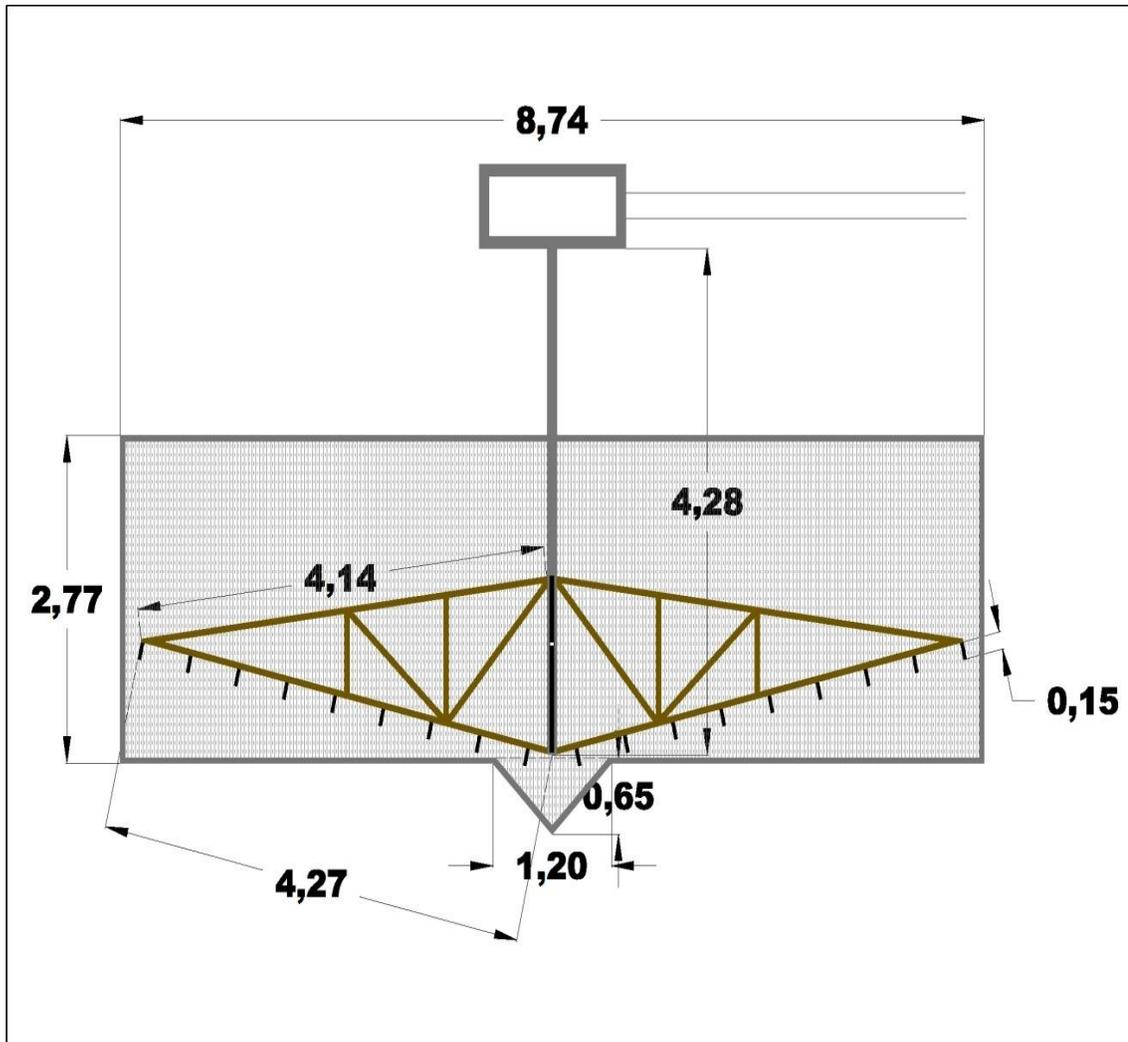
$$\frac{\text{Longitud de brazo}}{\text{Longitud del aspa}} = 27,6$$

$$\frac{\text{Altura del soporte central}}{\text{Altura del tanque}} = 1,55$$

$$\frac{\text{Altura del cono de descarga}}{\text{Altura del tanque}} = 1,23$$

A continuación se presenta la figura 8 que ejemplifica las dimensiones del espesador a nivel industrial y que es de utilidad para obtener las relaciones de dimensión para elaborar el espesador a nivel planta piloto.

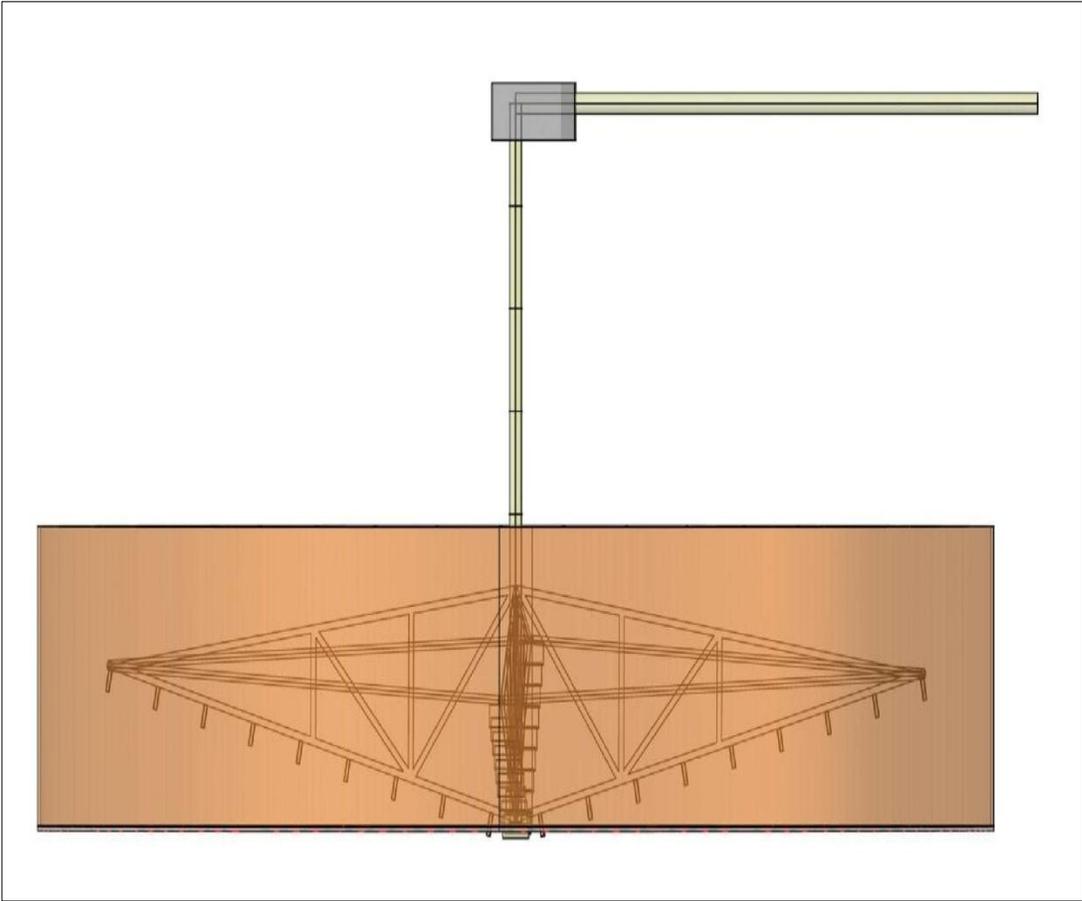
Figura 8. Vista acotada espesador a nivel industrial mina Caquipec (longitud en metros)



Fuente: elaboración propia.

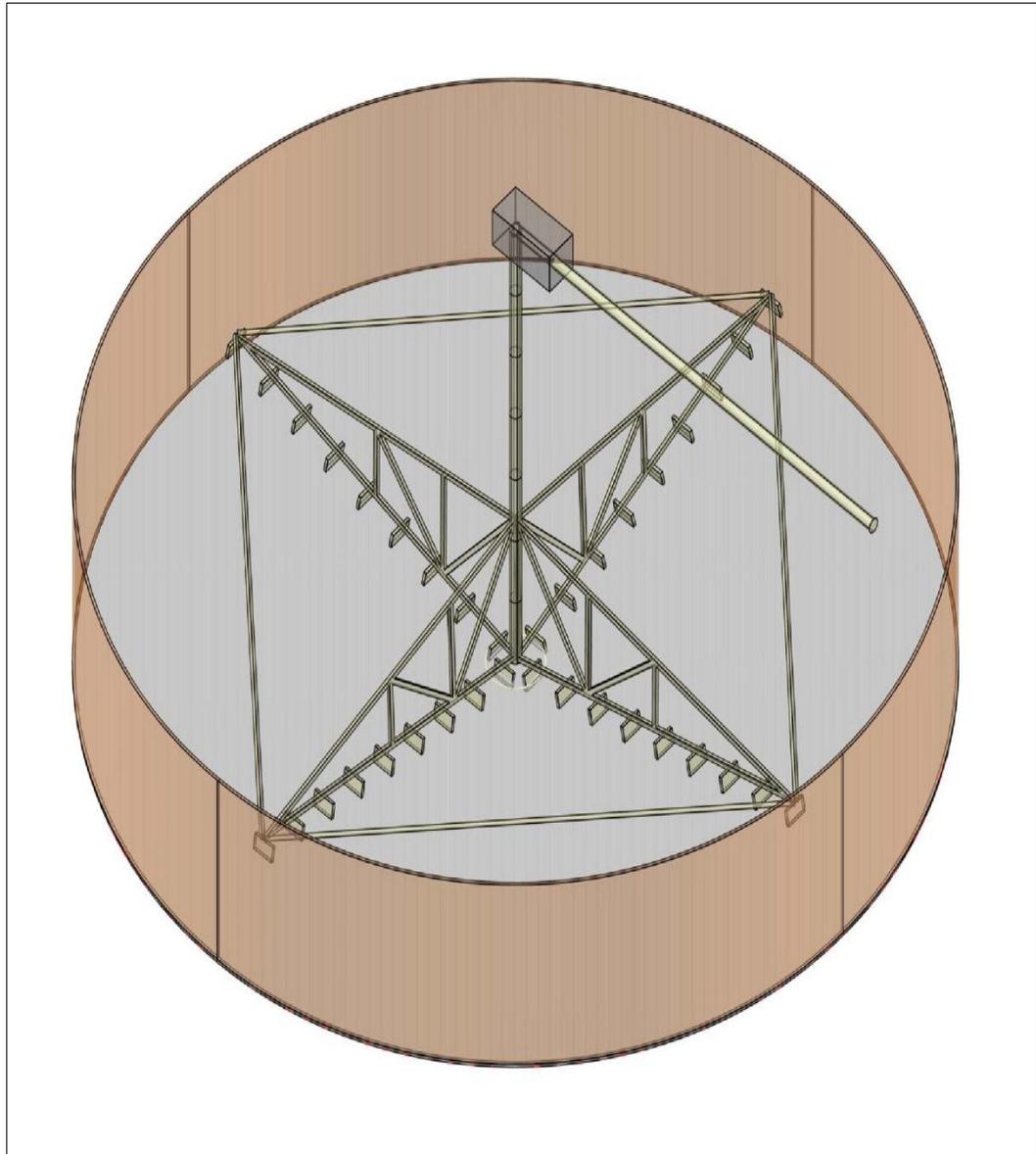
A continuación, se presentan las figuras de la 9 hasta la 11 en las que se muestran diferentes vistas del espesador a nivel industrial que se encuentra en la mina Caquipec.

Figura 9. **Vista lateral espesador a nivel industrial mina Caquipec**



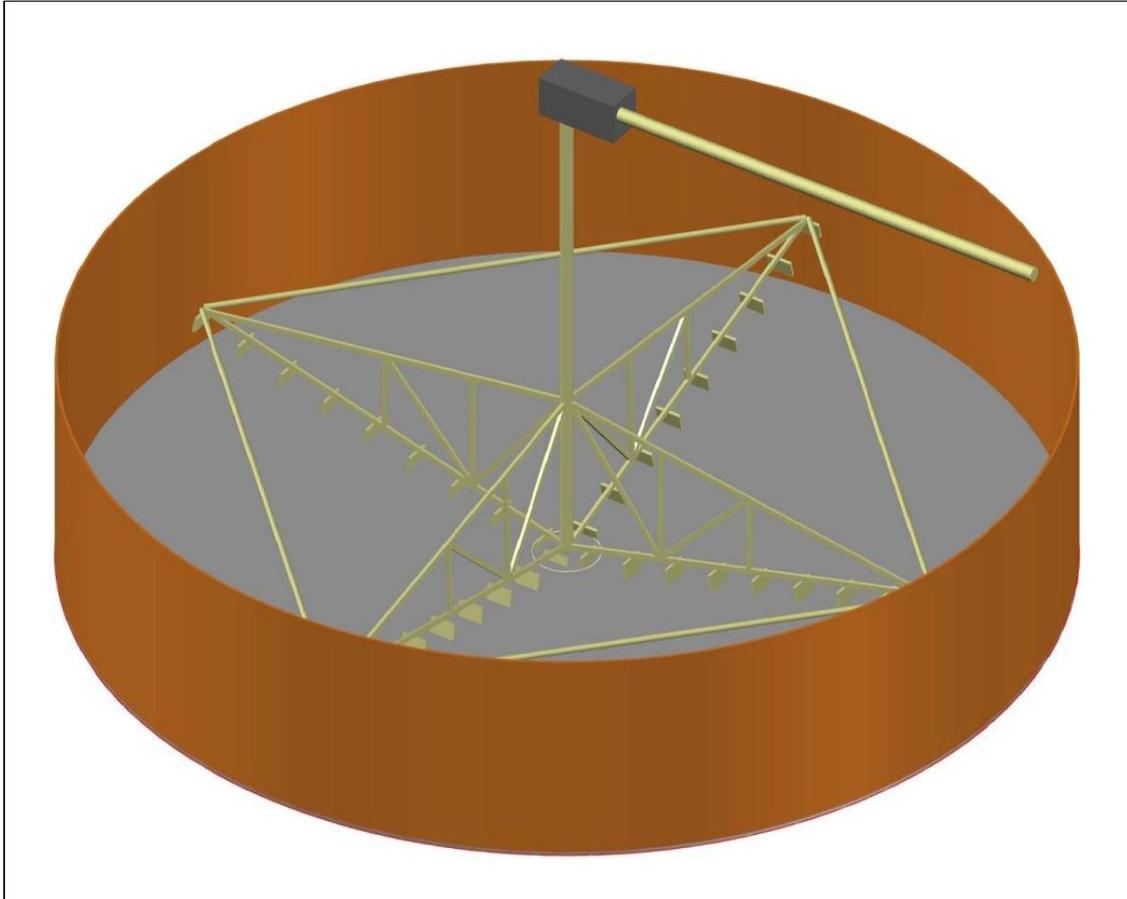
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Vista isométrica espesador a nivel industrial mina Caquipec**



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Vista en 3D espesador a nivel industrial mina Caquipec



Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Se utilizó una técnica cuantitativa para buscar las causas del fenómeno a través de hipótesis. Esto se realizó por medio de las variables preestablecidas anteriormente, agrupadas como muestras.

Figura 12. **Diseño general técnica cuantitativa**



Fuente: elaboración propia.

3.6. **Recolección y ordenamiento de la información**

La concentración del porcentaje de zinc en forma de mineral de carbonatos de un yacimiento de arcilla se trabajó con muestras de los puntos A, B, C, D, E, F, G, H, I, J del lote 204 procedentes de la mina Caquipec, Alta Verapaz.

Para ello se modificó variables como concentración de la pulpa y velocidad de agitación, y se mantuvo constante el contenido inicial de zinc, el pH dentro del rango de 8-9, el tiempo de acondicionamiento de 1 hora y el tiempo de lavado de 30 min.

Se realizaron un total de 3 variaciones de concentración de la pulpa en el espesador con 5 velocidades de agitación en triplicado, haciendo un total de 45 tratamientos, con el objetivo de evaluar el efecto por separado y en conjunto de la concentración de la pulpa y la velocidad de agitación rotacional en la eficiencia del aumento de zinc al utilizar un espesador.

Tabla II. **Evaluación de la velocidad de agitación y la concentración de la pulpa para el lote 204 de smithsonita**

		CONCENTRACIÓN		
		C ₁	C ₂	C ₃
VELOCIDAD	RPM	25%	30%	50%
	V ₁	12	R ₁ R ₂ R ₃	R ₁ R ₂ R ₃
	V ₂	18	R ₁ R ₂ R ₃	R ₁ R ₂ R ₃
	V ₃	24	R ₁ R ₂ R ₃	R ₁ R ₂ R ₃
	V ₄	30	R ₁ R ₂ R ₃	R ₁ R ₂ R ₃
	V ₅	36	R ₁ R ₂ R ₃	R ₁ R ₂ R ₃

Fuente: elaboración propia, con datos de la mina Caquipec, Alta Verapaz.

El diseño de la tabla paramétrica sirvió para orientar las tendencias experimentales lógicas siguientes:

- A: mayor concentración es mejor o lo contrario a velocidad constante
- B: mayor velocidad es mejor o lo contrario a concentración constante
- C: mayor concentración y velocidad es mejor o lo contrario

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Consiste en determinar qué resultados de las variables se presentan, los procedimientos y las relaciones entre las variables para dar respuesta al problema.

3.7.1. Contenido de zinc

Consiste en medir el contenido inicial de las muestras del lote 204 y el contenido final en el material en el rebalse y fondo luego de operar el espesador.

El procedimiento se describe a continuación:

- Tomar una muestra de 0,04 – 0,06 g.
- Agregar la muestra del paso anterior en un erlenmeyer de 500 mL.
- Adicionar 20 mL de agua destilada.
- Adicionar 3 mL de ácido clorhídrico al 37%.
- Colocar el erlenmeyer en una plancha de calentamiento hasta que el volumen disminuya a aproximadamente 5 mL.
- Agregar 15 mL de agua destilada al erlenmeyer.
- Colocar en plancha de calentamiento nuevamente y esperar ebullición.

- Agregar 8 mL de NH_4OH .
- Filtrar y lavar con agua caliente hasta alcanzar un volumen de aproximadamente 100 mL.
- Neutralizar con ácido clorhídrico.
- Agregar 3 mL de solución de acetato de sodio 1 M.
- Ajustar pH en el rango de 5 – 6.
- Agregar 2 gotas de ferricianuro de concentración 0,006 g/muestra y menor a 4 días de preparación.
- Agregar 3 gotas de solución de amina.
- Títular con EDTA 0,05 M hasta observar viraje.
- Anotar el volumen consumido de EDTA.

3.7.2. Concentración de zinc

Consiste en la concentración de zinc, respecto a distintos procedimientos con el fin de obtener el porcentaje de zinc dentro de cada muestra:

El procedimiento se describe a continuación:

- Lote 204 con velocidad de agitación de 12 RPM, concentración del mineral en el espesador de 25% y muestra con contenido inicial de zinc al 19,11%:
 - Agregar 6 L de agua de grifo en el espesador.
 - Tomar una muestra de 2700,00 – 2740,00 g.
 - Adicionar la muestra.
 - Agregar 2,160 L de agua de grifo al espesador.
 - Medir pH y temperatura.

- Encender el equipo, asignar 12 RPM al agitador y dejar funcionando durante 1 hora.
 - Agregar 8 L durante 30 min para hacer el lavado. Recuperar el agua de rebalse con el mineral de arrastre en una cubeta.
 - Apagar el equipo.
 - Abrir la válvula de descarga para vaciar el espesador y recuperar el material del fondo.
 - Dejar reposar el agua de rebalse y el agua de descarga durante 3 horas.
 - Recuperar el material asentado en las cubetas y dejar secar durante 1 día.
 - Pesar el material de rebalse y material de fondo seco.
 - Determinar la concentración de zinc en el material del rebalse y fondo.
- Lote 204 con velocidad de agitación de 12 RPM, concentración del mineral en el espesador de 30% y muestra con contenido inicial de zinc al 19,11%:
 - Agregar 5 L de agua de grifo en el espesador.
 - Tomar una muestra de 2700,00 – 2740,00 g.
 - Adicionar la muestra.
 - Agregar 1,347 L de agua de grifo al espesador.
 - Medir pH y temperatura.
 - Encender el equipo, asignar 12 RPM al agitador y dejar funcionando durante una hora.
 - Agregar 8 L durante 30 min para hacer el lavado. Recuperar el agua de rebalse con el mineral de arrastre en una cubeta.
 - Apagar el equipo.

- Abrir la válvula de descarga para vaciar el espesador. Recuperar el material del fondo.
 - Dejar reposar el agua de rebalse y el agua de descarga durante 3 horas.
 - Recuperar el material asentado en las cubetas. Dejar secar durante 1 día.
 - Pesar el material de rebalse y material de fondo seco.
 - Determinar la concentración de zinc en el material del rebalse y fondo.
- Lote 204 con velocidad de agitación de 12 RPM, concentración del mineral en el espesador de 50% y muestra con contenido inicial de zinc al 19,11%:
 - Agregar 3 L de agua de grifo en el espesador.
 - Tomar una muestra de 2700,00 – 2740,00 g.
 - Adicionar la muestra.
 - Medir pH y temperatura.
 - Encender el equipo, asignar 12 RPM al agitador y dejar funcionando durante 1 hora.
 - Agregar 8 L durante 30 min para hacer el lavado. Recuperar el agua de rebalse con el mineral de arrastre en una cubeta.
 - Apagar el equipo.
 - Abrir la válvula de descarga para vaciar el espesador. Recuperar el material del fondo.
 - Dejar reposar el agua de rebalse y el agua de descarga durante 3 horas.
 - Recuperar el material asentado en las cubetas. Dejar secar durante 1 día.

- Pesar el material de rebalse y material de fondo seco.
- Determinar la concentración de zinc en el material del rebalse y fondo.

Se repite el anterior procedimiento para las velocidades de 18, 24, 30 y 36 RPM.

3.7.3. Determinación de zinc

El contenido inicial y final del zinc en el mineral es determinado por medio de complejometría utilizando EDTA como titulante y 3,3 dimetilnaftidina como indicador.

3.7.4. Determinación de pH

El pH es un valor que representa la concentración de los iones hidrógeno dentro de una solución acuosa, es importante la toma del mismo, debido a que el zinc no precipita en un pH con extremo básico o ácido.

3.7.5. Tabulación de datos

Consiste en presentar los datos en tablas o cuadros, necesarios para alcanzar los objetivos planteados.

Tabla III. **Determinación de la masa en el fondo y rebalse para cada velocidad de agitación y concentración de la pulpa**

	Velocidad de agitación								
	Concentración 1			Concentración 2			Concentración 3		
	Número muestra	Número muestra	Número muestra	Número muestra	Número muestra	Número muestra	Número muestra	Número muestra	Número muestra
Masa de muestra (g)	mm ₁	mm ₂	mm ₃	mm ₄	mm ₅	mm ₆	mm ₇	mm ₈	mm ₉
pH	pH ₁	pH ₂	pH ₃	pH ₄	pH ₅	pH ₆	pH ₇	pH ₈	pH ₉
Temperatura (°C)	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₉
Zinc inicial (%)	Zn ₁	Zn ₂	Zn ₃	Zn ₄	Zn ₅	Zn ₆	Zn ₇	Zn ₈	Zn ₉
Masa en el rebalse(g)	mr ₁	mr ₂	mr ₃	mr ₄	mr ₅	mr ₆	mr ₇	mr ₈	mr ₉
Masa en el fondo (g)	mf ₁	mf ₂	mf ₃	mf ₄	mf ₅	mf ₆	mf ₇	mf ₈	mf ₉

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Determinación de zinc porcentual por medio de EDTA para el fondo y rebalse del espesador a cada velocidad de agitación y concentración de la pulpa**

Muestra	Concentración pulpa (% peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (mL)	Temperatura (°C)	Factor
1	Concentración 1	m_1	v_1	T_1	F_1
2		m_2	v_2	T_2	F_2
3		m_3	v_3	T_3	F_3
4	Concentración 2	m_4	v_4	T_4	F_4
5		m_5	v_5	T_5	F_5
6		m_6	v_6	T_6	F_6
7	Concentración 3	m_7	v_7	T_7	F_7
8		m_8	v_8	T_8	F_8
9		m_9	v_9	T_9	F_9

Fuente: elaboración propia.

Nota: esta tabla se realizó para todos los procedimientos anteriormente descritos.

3.8. Análisis estadístico

Los modelos de análisis de varianza factorial (ANOVA), sirven para evaluar el efecto individual y conjunto de dos o más factores (variables independientes categóricas) sobre una variable dependiente cuantitativa.

En un modelo de dos factores, los efectos de interés son tres: (los dos efectos principales (uno por cada factor) y el efecto de la interacción entre los factores).

Se utilizó una ANOVA de dos factores para determinar la relación entre la velocidad de agitación y la concentración de la pulpa, para el cual se utilizan las ecuaciones mostradas en la tabla V.

Tabla V. Ecuaciones para el análisis de varianza de dos factores

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Velocidad de agitación	$SSA = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^i x_i^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	I-1	SSA/(I-1)	MSA/MSE
Concentración de la pulpa	$SSB = \frac{1}{I} \sum_{j=1}^J x_j^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	J-1	SSB/(J-1)	MSB/MSE
Error	$SSE = SST - SSA - SSB$	(I-1)(J-1)	SSE/((I-1)(J-1))	
Total	$SST = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij}^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	IJ-1		

Fuente: DEVORE, Jay. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p. 446.

La finalidad del análisis de varianza es comprobar cuál hipótesis es la que mejor se ajusta a la parte experimental del estudio, aceptando la hipótesis nula o la alternativa.

Se utilizó un análisis de varianza de un factor para evaluar el efecto individual de la concentración de pulpa y la velocidad de agitación en la eficiencia del aumento de concentración del mineral. Las ecuaciones utilizadas en cada factor se presentan en las tablas VI y VII.

Tabla VI. **Ecuaciones para el análisis de varianza de un factor para la velocidad de agitación**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Velocidad de agitación	$SSTr = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^I x_i^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	I-1	SSTr/(I-1)	MSA/MSE
Error	$SSE = SST - SSTr$	I(J-1)	SSE/(I(J-1))	
Total	$SST = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij}^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	IJ-1		

Fuente: DEVORE, Jay. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p. 418.

Tabla VII. Ecuaciones para el análisis de varianza de un factor para la concentración de la pulpa

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Concentración de la pulpa	$SSTr = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^I x_i^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	I-1	SSTr/(I-1)	MSA/MSE
Error	$SSE = SST - SSTr$	I(J-1)	SSE/(I(J-1))	
Total	$SST = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij}^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	IJ-1		

Fuente: DEVORE, Jay. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. p. 418.

4. RESULTADOS

Para mejor presentación de los resultados, se resume de la tabla VIII a la tabla XII, la eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 12, 18, 24, 30 y 36 RPM.

Tabla VIII. **Eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 12 RPM y concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%**

Velocidad de agitación (RPM)	Concentración de la pulpa (% peso/peso)	Eficiencia promedio (%)
12	25	18,35
	30	31,09
	50	20,41

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 54, apéndice 6.

Tabla IX. **Eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 18 RPM y concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%**

Velocidad de agitación (RPM)	Concentración de la pulpa (% peso/peso)	Eficiencia promedio
18	25	28,18
	30	32,76
	50	30,04

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 55, apéndice 6.

Tabla X. **Eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 24 RPM y concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%**

Velocidad de agitación (RPM)	Concentración de la pulpa (% peso/peso)	Eficiencia promedio
24	25	43,92
	30	38,50
	50	30,58

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 56, apéndice 6.

Tabla XI. **Eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 30 RPM y concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%**

Velocidad de agitación (RPM)	Concentración de la pulpa (% peso/peso)	Eficiencia promedio
30	25	30,10
	30	34,47
	50	6,32

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 57, apéndice 6.

Tabla XII. **Eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 36 RPM y concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%**

Velocidad de agitación (RPM)	Concentración de la pulpa (% peso/peso)	Eficiencia promedio
36	25	25,91
	30	34,16
	50	1,48

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 58, apéndice 6.

Los resultados correspondientes a la eficiencia del espesador operado 12, 18, 24, 30 y 36 RPM se resumen de la tabla XIII a la tabla XVII.

Tabla XIII. Eficiencia del espesador operando a 12 RPM para concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%

Velocidad de agitación	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	Eficiencia promedio
12	25	69,35
	30	73,56
	50	76,83

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 59, apéndice 6.

Tabla XIV. Eficiencia del espesador operando a 18 RPM para concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%

Velocidad de agitación	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	Eficiencia promedio
18	25	70,25
	30	78,30
	50	74,38

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 60, apéndice 6.

Tabla XV. **Eficiencia del espesador operando a 24 RPM para concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%**

Velocidad de agitación	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	Eficiencia promedio
24	25	71,05
	30	73,21
	50	64,66

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 61, apéndice 6.

Tabla XVI. **Eficiencia del espesador operando a 30 RPM para concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%**

Velocidad de agitación	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	Eficiencia promedio
30	25	64,54
	30	53,40
	50	58,84

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 62, apéndice 6.

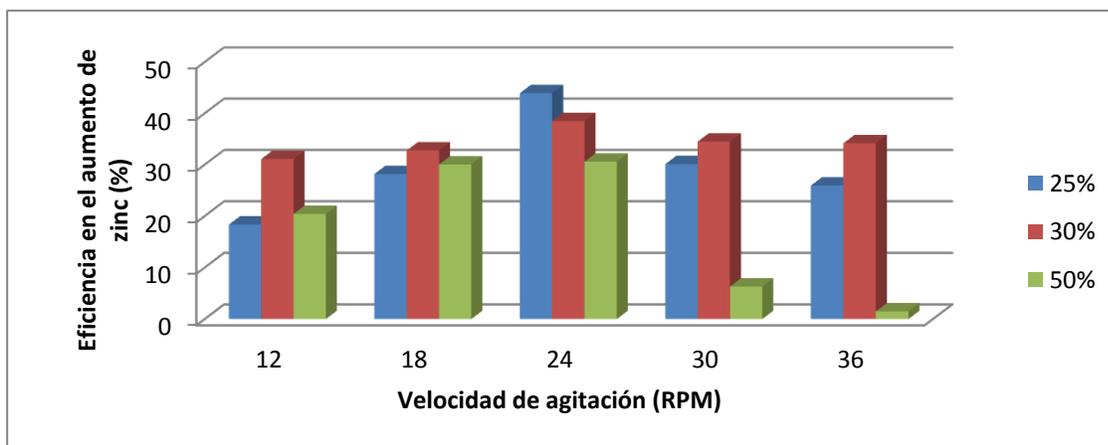
Tabla XVII. **Eficiencia del espesador operando a 36 RPM para concentración de la pulpa de 25%, 30% y 50%**

Velocidad de agitación	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	Eficiencia promedio
36	25	51,73
	30	49,98
	50	50,12

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 63, apéndice 6.

A continuación se presenta la figura 13 con el fin de comparar la relación de la concentración de la pulpa y la velocidad de agitación, en la tendencia de la eficiencia en el proceso del aumento de zinc.

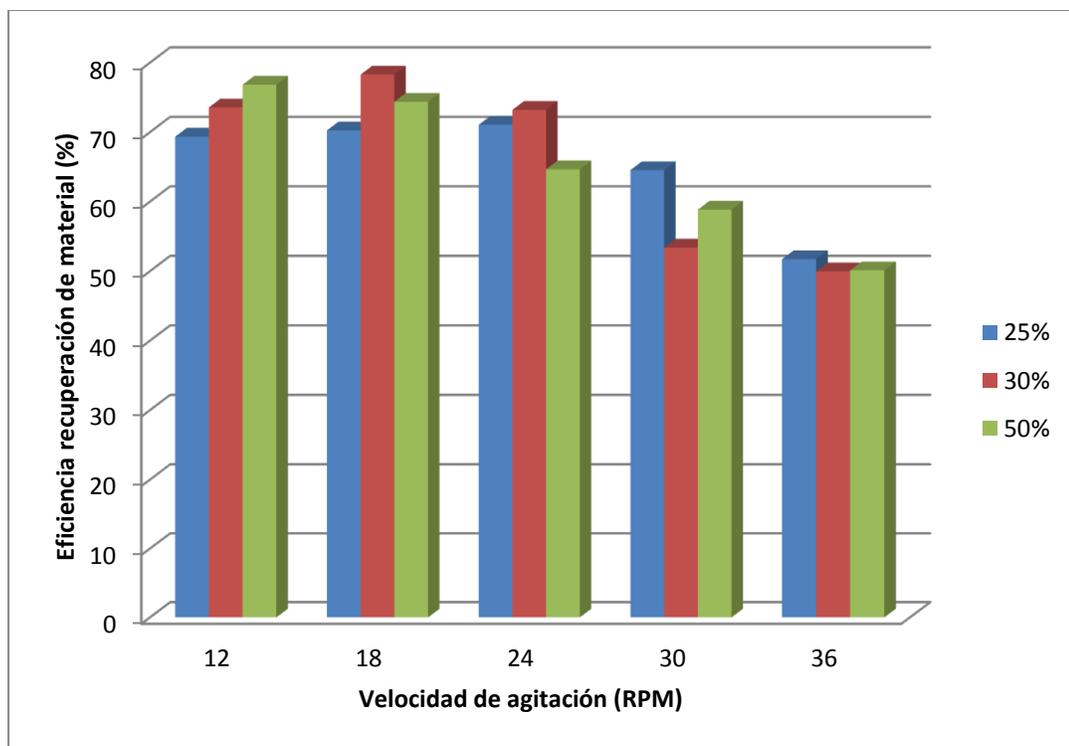
Figura 13. **Eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 12, 18, 24, 30 y 36 RPM y concentración de pulpa del 25%, 30% y 50%**



Fuente: elaboración propia, basado en tablas de la 54 hasta la 58, apéndice 6.

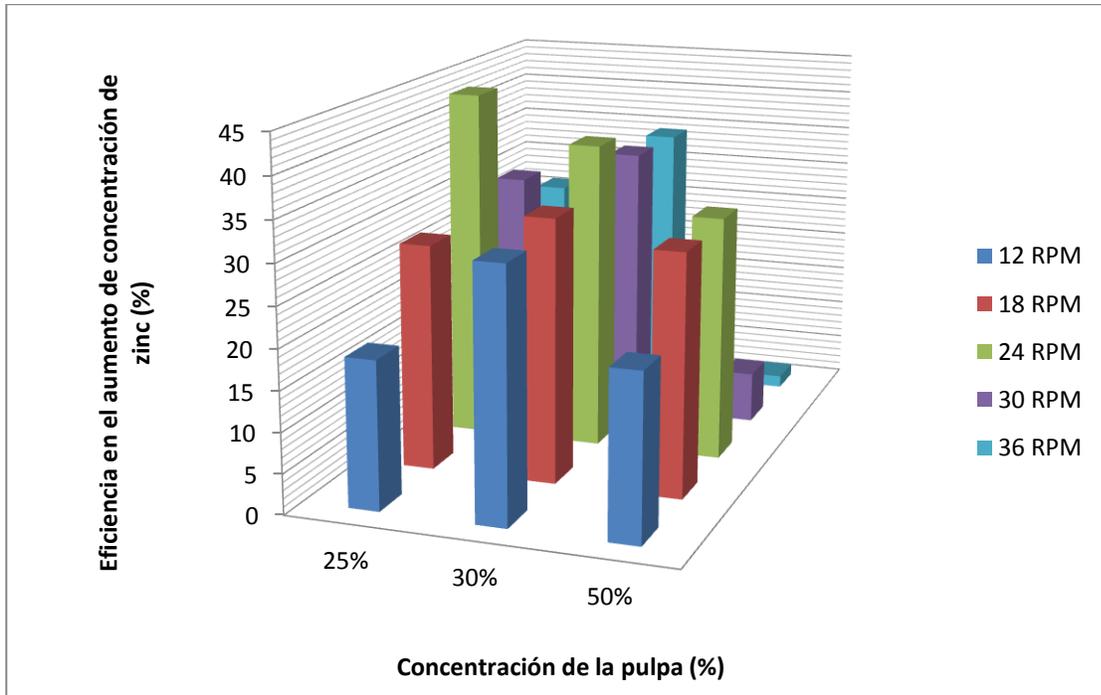
A continuación se presenta la figura 14 con el fin de comparar la relación de la concentración de la pulpa y la velocidad de agitación, en la tendencia de la eficiencia del espesador.

Figura 14. **Eficiencia del espesador para 12, 18, 24, 30 y 36 RPM y concentración de pulpa del 25%, 30% y 50%**



Fuente: elaboración propia, basado en tablas de la 59 hasta la 63, apéndice 6.

Figura 15. Vista en 3D de la eficiencia en el proceso del aumento de zinc para 12, 18, 24, 30 y 36 RPM y concentración de pulpa del 25%, 30% y 50%



Fuente: elaboración propia, basado en tablas de la 54 hasta la 58, apéndice 6.

Las tablas XVIII y XIX muestran los resultados de la experimentación según el diseño de la tabla paramétrica, con el propósito de observar las tendencias experimentales lógicas obtenidas.

Tabla XVIII. **Eficiencia promedio en el aumento de concentración de zinc para velocidad de agitación de 12, 18, 24, 30 y 36 RPM y concentración de pulpa del 25%, 30% y 50% para el lote 204 de smithsonita**

			Concentración		
			C ₁	C ₂	C ₃
			25%	30%	50%
Velocidad	V ₁	12	18,35	31,09	20,41
	V ₂	18	28,18	32,76	30,04
	V ₃	24	43,92	38,50	30,58
	V ₄	30	30,10	34,47	6,32
	V ₅	36	25,91	34,16	1,48

Fuente: elaboración propia, basado en tablas de la 54 hasta la 58, apéndice 6.

Tabla XIX. **Eficiencia promedio en la recuperación de zinc para velocidad de agitación de 12, 18, 24, 30 y 36 RPM y concentración de pulpa del 25%, 30% y 50% para el lote 204 de smithsonita**

			Concentración		
			C ₁	C ₂	C ₃
			25%	30%	50%
Velocidad	V ₁	12	69,35	73,56	76,83
	V ₂	18	70,25	78,30	74,38
	V ₃	24	71,05	73,21	64,66
	V ₄	30	64,54	53,40	58,84
	V ₅	36	51,73	49,98	50,12

Fuente: elaboración propia, basado en tablas de la 59 hasta la 63, apéndice 6.

Tabla XX. **Condiciones propuestas para la operación del espesador**

Variable	Valor
Concentración de la pulpa	30%
Velocidad de agitación	24 rpm

Fuente: elaboración propia, basado en tablas de la 54 hasta la 63, apéndice 6.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo del presente trabajo de investigación fue aumentar la recuperación de zinc en smithsonita por medio de una unidad de sedimentación operada en forma convencional (mezclado y agitación) a velocidad rotacional continua.

El estudio es favorable con el medio ambiente, porque demuestra que es factible recuperar lotes de material considerado pasivo minero, ya que luego del proceso de sedimentación optimizado reduce el volumen de estos residuos mejorando el efecto visual en el paisaje. Sin la adecuada gestión de estos residuos su acumulación en época de verano y con vientos moderados causan contaminación del aire por arrastre de polvos y en época de invierno causan erosión o arrastre de material.

La realización de la investigación se llevó a cabo en el laboratorio y planta piloto de la mina Caquipeq ubicados en la ciudad de Guatemala y las muestras provienen de pasivos mineros de la mina Caquipec, ubicada en Alta Verapaz. El contenido de las muestras a estudiar se basa en la diferencia de profundidad y sector de estudio en que fueron seleccionadas y recolectadas.

Para cumplir este objetivo se midió el efecto, independiente y en conjunto de las variables velocidad de agitación y concentración de la pulpa según tabla II para la evaluación de la variable respuesta eficiencia en el aumento de zinc y la eficiencia de operación del espesador.

Se elaboró un diseño experimental mediante un arreglo combinatorio de concentración de pulpa en el espesador y velocidad de agitación consistente en 3 concentraciones y 5 velocidades de operación por triplicado. A los resultados obtenidos se realizó dos análisis de varianza (ANOVA) de un factor y de dos factores para la evaluación de significancia.

Se estableció que la tendencia de la eficiencia de concentración de zinc aumenta conforme el incremento en la velocidad de agitación hasta un máximo de 24 RPM y luego se reduce. La tendencia estudiada es similar para cada una de las tres concentraciones del espesador estudiadas y corresponde al inciso A de la tendencia experimental lógica de la tabla paramétrica.

Así, la velocidad de agitación establecida de 24 RPM en el estudio presenta la mayor eficiencia en el aumento de concentración de zinc respectivamente. Las condiciones de operación permiten a las partículas disponer del tiempo suficiente de separación y sedimentación.

Por el contrario, se observó que a velocidades superiores de 24 RPM establecidas en el estudio disminuye la eficiencia en el aumento de concentración y la eficiencia de recuperación de $ZnCO_3$, la tendencia experimental lógica corresponde al inciso B de la tabla paramétrica. La alta velocidad genera turbulencia en todo el espesador y no permite que se impulse la sedimentación y separación del caso. Por lo tanto, la unidad de sedimentación separa en dos fracciones el $ZnCO_3$ que se recupera por asentamiento en el fondo y que se distribuye también en el rebalse generando problemas de separación.

Se determinó la eficiencia en la recuperación del material en el fondo del espesador para cada velocidad de agitación y concentración de pulpa estudiada, la cual presenta una tendencia a disminuir conforme aumenta la velocidad de operación del espesador.

El anterior resultado coincide con el principio operacional de la unidad de sedimentación que recomienda la literatura. El principio operacional nos dice que el espesador debe funcionar a velocidades restringidas para que se dé el fenómeno de la sedimentación.

Por último, se evaluó el efecto en conjunto de las dos variables (inciso C de la tendencia experimental lógica de la tabla paramétrica), velocidad y concentración, para los 45 tratamientos por medio de ANOVA de dos factores utilizando un nivel de significancia de 0,05. Este análisis demostró que el efecto dominante es la velocidad y es el que ejerce mayor influencia en la sedimentación del $ZnCO_3$ estudiado.

La experimentación evidenció las tres tendencias lógicas de la tabla paramétrica, por lo tanto las condiciones óptimas para la operación del espesador son los valores intermedios en velocidad de agitación y en concentración de pulpa. Esto se puede observar en las tablas XVIII y XIX.

CONCLUSIONES

1. El hallazgo experimental demuestra que es posible aumentar el contenido de zinc en la smithsonita mediante procesos de separación y concentración optimizados.
2. Es adecuado el uso de material de smithsonita considerado pasivo minero para procesos de concentración de ZnCO_3 utilizando un espesador de puente.
3. La mayor eficiencia para el aumento de ZnCO_3 , se obtuvo a concentración de pulpa a 25% (peso/peso) y velocidad de agitación a 24 RPM.
4. La mayor eficiencia para la recuperación de ZnCO_3 , se obtuvo a concentración de pulpa a 30% (peso/peso) y velocidad de agitación a 18 RPM.
5. La mayor pérdida de smithsonita en el rebalse de la unidad de sedimentación, se obtuvo a concentración de pulpa a 50% (peso/peso) y velocidad de agitación a 36 RPM.
6. La condición óptima de operación se obtuvo a concentración de pulpa a 30% (peso/peso) y velocidad de agitación a 24 RPM.
7. Existe variación significativa en la eficiencia de recuperación de ZnCO_3 en función de la concentración de la pulpa y la velocidad de agitación.

RECOMENDACIONES

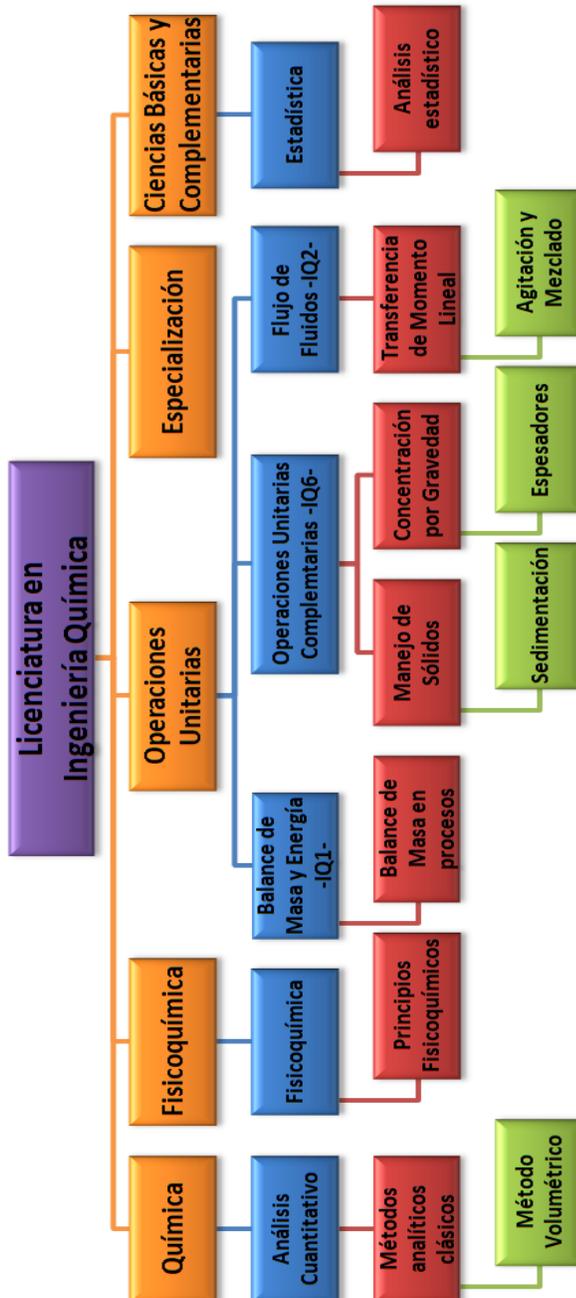
1. Operar el espesador un 20% debajo de su capacidad, debido a que puede dañar la estructura del equipo, el agitador estará obstruido por el material y se verá forzado el motor impulsor.
2. Controlar que el rebose sea líquido claro lo que significa que el material está decantando.
3. Estudiar el efecto que tiene la adición de floculantes en la concentración del mineral.
4. Aplicar el concepto de proceso favorable con el medio ambiente a otras etapas del proceso minero con diferentes tipos de pasivos mineros.
5. Estudiar los procesos de filtración y secado para reducir el contenido de humedad en el mineral obtenido en el fondo del espesador para minimizar los costos de traslado.

BIBLIOGRAFÍA

1. BUSTOS, Pablo. *Clase 07: espesamiento y floculación*. [en línea]. <<http://es.scribd.com/doc/62959658/Clase-07-Espesamiento-y-Floculacion>>. [Consulta: febrero de 2012].
2. DEVORE, Jay. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 6a. ed. México: Thomson, 2005. 744 p. ISBN 9789706868312.
3. Estudios mineros del Perú. *Manual de minería*. [en línea]. <<http://es.scribd.com/doc/29987008/Manual-Mineria>>. [Consulta: febrero de 2012].
4. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto. *Metodología de la investigación*. [en línea]. < www.conacyt.gov.bo>. [Consulta: agosto de 2010].
5. PORTAL MINERO. *Manual general de minería y metalurgia*. [en línea]. <<http://mineralogia.argentinaforo.net/t140-manual-general-de-mineria-y-metalurgia>>. [Consulta: febrero de 2012].
6. WILLIS, Barry Alan. *Tecnología de procesamiento de minerales*. México: Limusa, 1987. 568 p. ISBN 9789681819866.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Muestra de cálculo

1. Determinación del porcentaje de zinc en las muestras:

[Ecuación 1]

$$\% Zn = F \frac{V}{m}$$

Donde:

%Zn = porcentaje de zinc [%]

V = volumen de EDTA consumido [mL]

m = masa de la muestra [g]

F = factor [g/mL]

Ejemplo: determinación del porcentaje de zinc para muestra del punto A de la tabla 27.

$$\% Zn = (0,305307) \frac{(3,76 \text{ mL})}{0,0530 \text{ g}}$$

$$\% Zn = 21,66$$

Nota: de la misma forma como se determinó en el ejemplo, se determinaron los valores del contenido de zinc en las tablas de la 43 hasta la 53 del apéndice 6.

2. Determinación del valor promedio:

[Ecuación 2]

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

Donde:

\bar{x} = valor promedio

n = número de datos totales

x_i = valor dato i

Ejemplo: determinación del contenido de zinc promedio para el mineral en el fondo del espesador operado a 12 RPM y concentración de la pulpa al 25% según datos de la tabla 44.

$$\overline{Zn\%} = \frac{22,91 + 22,96 + 22,90}{3}$$
$$\overline{Zn\%} = 22,92$$

Nota: de la misma forma como se determinó en el ejemplo, se determinaron los valores promedio en las tablas de la 44 hasta la 63 del apéndice 6.

3. Determinación de la eficiencia en el aumento de zinc:

[Ecuación 3]

$$n\Delta Zn\% = \frac{Zn\%_f - Zn\%_r}{Zn\%_o} * 100$$

Donde:

$n\Delta Zn\%$ = eficiencia en el aumento de Zinc

$Zn\%_f$ = zinc porcentual en el fondo del espesador

$Zn\%_r$ = zinc porcentual en el rebalse del espesador

$Zn\%_o$ = zinc porcentual inicial en el material

Ejemplo: determinación de la eficiencia en el aumento de zinc para la muestra 1 en el espesador operado a 12 RPM y concentración de la pulpa al 25% según datos de la tabla 54.

$$n\Delta Zn\% = \frac{22,91 - 18,84}{21,66} * 100$$

$$n\Delta Zn\% = 18,82$$

Nota: de la misma forma como se determinó en el ejemplo, se determinaron los valores en las tablas de la 54 hasta la 58 del apéndice 6.

4. Determinación de la eficiencia del espesador:

[Ecuación 4]

$$nE\% = \frac{m}{m_f} * 100$$

Donde:

$nE\%$ = eficiencia del espesador

m = masa de mineral agregada al espesador en gramos

m_f = masa de mineral recuperada en el fondo del espesador en gramos

Ejemplo: determinación de la eficiencia del espesador para la muestra 1 operado a 12 RPM y concentración de la pulpa al 25% según datos de la tabla 28.

$$n\% = \frac{2724}{1888} * 100$$

$$n\% = 69,31$$

Nota: de la misma forma como se determinó en el ejemplo, se determinaron los valores en las tablas de la 59 hasta la 63 del apéndice 6.

Apéndice 4. Análisis estadístico

1. Análisis de varianza de un factor

Se realizaron dos análisis de varianza de un factor: primero se evaluó la velocidad de agitación para cada concentración de la pulpa y luego se evaluó la concentración de pulpa para cada velocidad de agitación. Los dos miden el efecto en la eficiencia del proceso en el aumento de zinc.

Tabla 1. Celda arreglo para el análisis de varianza de un factor

A	1	2	3	n	Media	σ
n_1	n_{11}	n_{12}	n_{13}	n_{1n}	\bar{n}_1	σ_1
n_2	n_{21}	n_{22}	n_{23}	n_{2n}	\bar{n}_2	σ_2
n_n	n_{n1}	n_{n2}	n_{n3}	n_{nn}	\bar{n}_3	σ_3
Gran media					\bar{n}_t	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Ecuaciones para el análisis de varianza de un factor

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Agitación o concentración	$SSTr = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^I x_i^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	I-1	SSTr/(I-1)	MSA/MSE
Error	$SSE = SST - SSTr$	I(J-1)	SSE/(I(J-1))	
Total	$SST = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij}^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	IJ-1		

Fuente: elaboración propia.

Para el primer análisis de varianza de un factor con un nivel de significancia de 0,05 se buscó probar las siguientes hipótesis:

Ho: el cambio en la velocidad de agitación en el espesador, sí afecta en la eficiencia del aumento de zinc

Ha: el cambio en la velocidad de agitación en el espesador, no afecta en la eficiencia del aumento de zinc

Con base en los datos de eficiencia en el aumento de Zn se construyó la siguiente tabla:

Tabla 3. **Análisis de varianza de la velocidad de agitación para concentración de pulpa al 25%**

Velocidad	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio	Varianza
12	18,82	17,79	18,45	18,35204	0,273149
18	28,18	27,97	28,39	28,18124	0,042648
24	44,00	43,85	43,93	43,92484	0,005868
30	29,31	29,61	31,39	30,10415	1,259879
36	26,02	25,73	25,99	25,91251	0,026389
Gran media				29,29495	

Fuente: elaboración propia, basado en tablas de la 54 hasta la 58, apéndice 6.

Tabla 4. **Fuente de variación de la velocidad de agitación para concentración de pulpa al 25%**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculada	F tabulada
Velocidad	1041,351	4	260,3379	809,5422	3,47805
Error	3,215865	10	0,321587		
Total	1044,567	14			

Fuente: elaboración propia.

El F calculado es 809,5422 que es mayor al F de tabla, por lo cual se rechaza la hipótesis alterna y se confirma la hipótesis nula: el aumento en la eficiencia del aumento de zinc sí depende de la velocidad de agitación para una pulpa del 25% de sólidos.

Tabla 5. **Análisis de varianza de la velocidad de agitación para concentración de pulpa al 30%**

Velocidad	Corrida 1	corrida 2	corrida 3	Promedio	Varianza
12	30,87	30,84	31,55	31,08772	0,1606
18	33,09	33,04	32,15	32,75999	0,284062
24	38,11	38,81	38,57	38,49573	0,126846
30	34,89	34,38	34,14	34,47233	0,146924
36	34,51	33,40	34,58	34,16441	0,442561
Gran media				34,19604	

Fuente: elaboración propia, basado en tablas de la 54 hasta la 58, apéndice 6.

Tabla 6. **Fuente de variación de la velocidad de agitación para concentración de pulpa al 30%**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculada	F tabulada
Velocidad	90,86572	4	22,71643	97,83187	3,47805
Error	2,321987	10	0,232199		
Total	93,18771	14			

Fuente: elaboración propia.

El F calculado es 97,83187 que es mayor al F de tabla, por lo cual se rechaza la hipótesis alterna y se confirma la hipótesis nula: la eficiencia en el aumento de zinc sí depende de la velocidad de agitación para una pulpa del 30% de sólidos.

Tabla 7. **Análisis de varianza de la velocidad de agitación para concentración de pulpa al 50%**

Velocidad	Corrida 1	corrida 2	corrida 3	Promedio	Varianza
12	20,12	20,60	20,50	20,40655	0,063827
18	29,85	31,61	28,65	30,03815	2,220633
24	30,58	30,14	31,02	30,58136	0,195422
30	6,35	6,45	6,15	6,318275	0,023593
36	1,75	1,11	1,57	1,478823	0,109
Gran media				17,76463	

Fuente: elaboración propia, basado en tablas de la 54 hasta la 58, apéndice 6.

Tabla 8. **Fuente de variación de la velocidad de agitación para concentración de pulpa al 50%**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculada	F tabulada
Velocidad	2154,402	4	538,6006	1030,824	3,47805
Error	5,224951	10	0,522495		
Total	2159,627	14			

Fuente: elaboración propia.

El F calculado es 1030,824 que es mayor al F de tabla, por lo cual se rechaza la hipótesis alterna y se confirma la hipótesis nula: la eficiencia en el aumento de zinc sí depende de la velocidad de agitación para una pulpa del 50% de sólidos.

Para el segundo análisis de varianza de un factor con un nivel de significancia de 0,05 se buscó probar las siguientes hipótesis:

Ho: el cambio en la concentración de la pulpa en el espesador, sí afecta en la eficiencia del aumento de zinc.

Ha: el cambio en la concentración de la pulpa el espesador, no afecta en la eficiencia del aumento de zinc.

Con base en los datos de la eficiencia en el aumento de Zn se construyó la siguiente tabla:

Tabla 9. **Análisis de varianza de la concentración de la pulpa para 12 RPM de agitación**

Concentración de la pulpa	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio	Varianza
25	18,82	17,79	18,45	18,35204	0,273149
30	30,87	30,84	31,55	31,08772	0,1606
50	20,12	20,60	20,50	20,40655	0,063827
Gran media				23,2821	

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 54, apéndice 6.

Tabla 10. **Fuente de variación de la concentración de la pulpa para 12 RPM de agitación**

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculada	F tabulada
Concentración	280,5062	2	140,2531	845,618	5,143253
Error	0,995152	6	0,165859		
Total	281,5014	8			

Fuente: elaboración propia.

El F calculado es 845,618 que es mayor al F de tabla, por lo cual se rechaza la hipótesis alterna y se confirma la hipótesis nula: la eficiencia en el aumento de zinc sí depende de la concentración de la pulpa para una velocidad de agitación de 12 RPM.

Tabla 11. **Análisis de varianza de la concentración de la pulpa para 18 RPM de agitación**

Concentración de la pulpa	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio	Varianza
25%	28,18	27,97	28,39	28,18124	0,042648
30%	33,09	33,04	32,15	32,75999	0,284062
50%	29,85	31,61	28,65	30,03815	2,220633
Gran media				30,32646	

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 55, apéndice 6.

Tabla 12. **Fuente de variación de la concentración de la pulpa para 18 RPM de agitación**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculada	F tabulada
Concentración	31,82146	2	15,91073	18,73803	5,143253
Error	5,094687	6	0,849114		
Total	36,91615	8			

Fuente: elaboración propia.

El F calculado es 18,73803 que es mayor al F de tabla, por lo cual se rechaza la hipótesis alterna y se confirma la hipótesis nula: la eficiencia en el aumento de zinc sí depende de la concentración de la pulpa para una velocidad de agitación de 18 RPM.

Tabla 13. **Análisis de varianza de la concentración de la pulpa para 24 RPM de agitación**

Concentración de la pulpa	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio	Varianza
25	44,00	43,85	43,93	43,92484	0,005868
30	38,11	38,81	38,57	38,49573	0,126846
50	30,58	30,14	31,02	30,58136	0,195422
Gran media				37,66731	

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 56, apéndice 6.

Tabla 14. **Fuente de variación de la concentración de la pulpa para 24 RPM de agitación**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculada	F tabulada
Concentración	270,1609	2	135,0804	1234,981	5,143253
Error	0,656272	6	0,109379		
Total	270,8171	8			

Fuente: elaboración propia.

El F calculado es 1234,981 que es mayor al F de tabla, por lo cual se rechaza la hipótesis alterna y se confirma la hipótesis nula: la eficiencia en el aumento de zinc sí depende de la concentración de la pulpa para una velocidad de agitación de 24 RPM.

Tabla 15. **Análisis de varianza de la concentración de la pulpa para 30 RPM de agitación**

Concentración de la pulpa	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio	Varianza
25%	29,31	29,61	31,39	30,10415	1,259879
30%	34,89	34,38	34,14	34,47233	0,146924
50%	6,35	6,45	6,15	6,318275	0,023593
Gran media				23,63159	

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 57, apéndice 6.

Tabla 16. **Fuente de variación de la concentración de la pulpa para 30 RPM de agitación**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculada	F tabulada
Concentración	1377,5	2	688,7499	1444,53	5,143253
Error	2,860791	6	0,476799		
Total	1380,361	8			

Fuente: elaboración propia.

El F calculado es 1444,53 que es mayor al F de tabla, por lo cual se rechaza la hipótesis alterna y se confirma la hipótesis nula: la eficiencia en el aumento de zinc sí depende de la concentración de la pulpa para una velocidad de agitación de 30 RPM.

Tabla 17. **Análisis de varianza de la concentración de la pulpa para 36 RPM de agitación**

Concentración de la pulpa	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio	Varianza
25%	26,02	25,73	25,99	25,91251	0,026389
30%	34,51	33,40	34,58	34,16441	0,442561
50%	1,75	1,11	1,57	1,478823	0,109
Gran media				20,51858	

Fuente: elaboración propia, basado en tabla 58, apéndice 6.

Tabla 18. **Fuente de variación de la concentración de la pulpa para 36 RPM de agitación**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculada	F tabulada
Concentración	1733,447	2	866,7233	4498,949	5,143253
Error	1,155901	6	0,19265		
Total	1734,602	8			

Fuente: elaboración propia.

El F calculado es 4498,949 que es mayor al F de tabla, por lo cual se rechaza la hipótesis alterna y se confirma la hipótesis nula: la eficiencia en el aumento de zinc sí depende de la concentración de la pulpa para una velocidad de agitación de 36 RPM.

2. Análisis de varianza de dos factores

Se realizaron dos análisis de varianza de dos factores para evaluar el efecto en conjunto de los factores velocidad de agitación y concentración de la pulpa en la eficiencia del proceso de aumento de zinc y de la eficiencia del espesador.

Tabla 19. **Celda arreglo para el análisis de varianza de dos factores**

A	B		Total
	1	2	
1	K_{11}	K_{12}	T_1
2	K_{21}	K_{22}	T_2
Total	T_1	T_2	T

Fuente: elaboración propia.

Tabla 20. Ecuaciones para el análisis de varianza de dos factores

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Aumento de zinc	$SSA = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^I x_i^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	I-1	SSA/(I-1)	MSA/MSE
Eficiencia espesador	$SSB = \frac{1}{I} \sum_{j=1}^J x_j^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	J-1	SSB/(J-1)	MSB/MSE
Error	$SSE = SST - SSA - SSB$	(I-1)(J-1)	SSE/((I-1)(J-1))	
Total	$SST = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij}^2 - \frac{1}{IJ} x^2$	IJ-1		

Fuente: elaboración propia.

Con base en los datos promedio de la eficiencia para el aumento de Zn se construyó la siguiente tabla:

Tabla 21. Eficiencia en el aumento de Zn para cada concentración de la pulpa y la velocidad de agitación

Velocidad de agitación (RPM)	Concentración de la pulpa (%)		
	25%	30%	50%
12	18,35	31,09	20,41
18	28,18	32,76	30,04
24	43,92	38,50	30,58
30	30,10	34,47	6,32
36	25,91	34,16	1,48

Fuente: elaboración propia, basado en tablas de la 54 hasta la 58, apéndice 6.

Tabla 22. **Análisis de varianza de la concentración de la pulpa y la velocidad de agitación**

Factor	Observaciones	Suma	Promedio	Varianza
12 RPM	3	69,8463	23,2821	46,75104
18 RPM	3	90,97937	30,32646	5,303577
24 RPM	3	113,0019	37,66731	45,02681
30 RPM	3	70,89476	23,63159	229,5833
36 RPM	3	61,55574	20,51858	288,9078
25%	5	146,4748	29,29495	86,77929
30%	5	170,9802	34,19604	7,572144
50%	5	88,82315	17,76463	179,5335

Fuente: elaboración propia.

Tabla 23. **Fuente de variación de la concentración de la pulpa y velocidad de agitación**

Fuente de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F calculado	F tabulada
Velocidad de agitación	575,995	4	143,9987	2,217306	3,837853
Concentración	711,6001	2	355,8001	5,478643	4,45897
Error	519,5448	8	64,94311		
Total	1807,14	14			

Fuente: elaboración propia.

Para este estadístico hay cinco velocidades de agitación y cada una se evalúa a tres concentraciones de pulpa.

Para la concentración de la pulpa el F calculado es mayor que la F de tabla, lo que indica que existe diferencia significativa entre las medias de las muestras, esto significa que es una fuente significativa de variación y representa la mayor influencia en el estudio. El caso opuesto se presenta en la velocidad de agitación donde el F calculado es menor que el F tabulado.

Con base en los datos promedio de la eficiencia del espesador se construyó la siguiente tabla:

Tabla 24. **Eficiencia del espesador para cada concentración de la pulpa y la velocidad de agitación**

Velocidad de agitación (RPM)	Concentración de la pulpa (%)		
	25%	30%	50%
12	69,35	73,56	76,83
18	70,25	78,30	74,38
24	71,05	73,21	64,66
30	64,54	53,40	58,84
36	51,73	49,98	50,12

Fuente: elaboración propia, basado en tablas de la 59 hasta la 63, apéndice 6.

Tabla 25. **Análisis de varianza de la concentración de la pulpa y la velocidad de agitación**

Factor	Observaciones	Suma	Promedio	Varianza
12 RPM	3	219,7466	73,24887	14,08446
18 RPM	3	222,9248	74,30827	16,19986
24 RPM	3	208,9159	69,63863	19,77046
30 RPM	3	176,7829	58,92762	31,02188
36 RPM	3	151,831	50,61034	0,950742
25%	5	326,923	65,3846	64,64844
30%	5	328,4422	65,68844	168,8513
50%	5	324,836	64,9672	121,841

Fuente: elaboración propia.

Tabla 26. **Fuente de variación de la concentración de la pulpa y velocidad de agitación**

Fuente de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F calculada	F tabulada
Velocidad	1258,619	4	314,6549	15,46752	3,837853
Concentración	1,311201	2	0,655601	0,032227	4,458970
Error	162,7436	8	20,34295		
Total	1422,674	14			

Fuente: elaboración propia.

Para este estadístico hay cinco velocidades de agitación y cada una se evalúa a tres concentraciones de pulpa.

Para la velocidad de agitación el F calculado es mayor que la F de tabla, lo que indica que existe diferencia significativa entre las medias de las muestras, es una fuente significativa de variación y representa la mayor influencia en el estudio. El caso opuesto se presenta en la concentración de la pulpa donde el F calculado es menor que el F tabulado.

Apéndice 5. **Datos originales**

Tabla 27. **Volumen consumido EDTA para muestras del lote 204 en mina Caquipec**

Punto	Masa (g)	V EDTA (mL)	Temperatura (°C)	Factor
A	0,0530	3,76	26	0,305307
B	0,0540	3,37	26	0,305307
C	0,0541	3,84	26	0,305307
D	0,0524	3,92	26	0,305307
E	0,0536	4,10	26	0,305307
F	0,0531	4,05	26	0,305307
G	0,0532	3,33	26	0,305307
H	0,0532	2,95	26	0,305307
I	0,0520	3,66	26	0,305307

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 28. **Masa en el fondo y rebalse del espesador para 12 RPM para la muestra 204 de la mina Caquipec, utilizando concentración de pulpa de 25%, 30% y 50%**

	12 RPM								
	25%			30%			50%		
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4	MUESTRA 5	MUESTRA 6	MUESTRA 7	MUESTRA 8	MUESTRA 9
Masa de muestra (g)	2 724	2 720	2 722	2 721	2 721	2 721	2 721	2 721	2 721
pH	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Temperatura (°C)	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Zinc inicial (%)	21,66	21,66	21,66	19,05	19,05	19,05	21,67	21,67	21,67
Masa en el rebalse (g)	653	658	662	648	658	652	540	536	538
Masa en el fondo (g)	1 888	1 880	1 895	2 004	2 000	2 001	2 090	2 092	2 090

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 29. **Masa en el fondo y rebalse del espesador para 18 RPM para la muestra 204 de la mina Caquipec, utilizando concentración de pulpa de 25%, 30% y 50%**

	18 RPM								
	25%			30%			50%		
	MUESTRA 10	MUESTRA 11	MUESTRA 12	MUESTRA 13	MUESTRA 14	MUESTRA 15	MUESTRA 16	MUESTRA 17	MUESTRA 18
Masa de muestra (g)	2 720	2 721	2 720	2 722	2 721	2 722	2 721	2 721	2 723
pH	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Temperatura (°C)	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Zinc inicial (%)	21,67	21,67	21,67	21,67	21,67	21,67	22,84	22,84	22,84
Masa en el rebalse (g)	1 300	1 312	1 311	1 290	1 287	1 287	1 200	1 204	1 201
Masa en el fondo (g)	1 910	1 915	1 908	2 130	2 132	2 131	2 025	2 026	2 022

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 30. **Masa en el fondo y rebalse del espesador para 24 RPM para la muestra 204 de la mina Caquipec, utilizando concentración de pulpa de 25%, 30% y 50%**

	24 RPM								
	25%			30%			50%		
	MUESTRA 19	MUESTRA 20	MUESTRA 21	MUESTRA 22	MUESTRA 23	MUESTRA 24	MUESTRA 25	MUESTRA 26	MUESTRA 27
Masa de muestra (g)	2 720	2 720	2 720	2 722	2 720	2 720	2 720	2 720	2 720
pH	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Temperatura (°C)	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Zinc inicial (%)	22,84	22,84	22,84	23,35	23,35	23,35	23,29	23,29	23,29
Masa en el rebalse (g)	393	398	396	380	377	380	445	462	455
Masa en el fondo (g)	1 930	1 935	1 933	1 990	1 994	1 991	1 760	1 752	1 764

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 31. **Masa en el fondo y rebalse del espesador para 30 RPM para la muestra 204 de la mina Caquipec, utilizando concentración de pulpa de 25%, 30% y 50%**

	30 RPM								
	25%			30%			50%		
	MUESTRA 28	MUESTRA 29	MUESTRA 30	MUESTRA 31	MUESTRA 32	MUESTRA 33	MUESTRA 34	MUESTRA 35	MUESTRA 36
Masa de muestra (g)	2 718	2 722	2 721	2 720	2 720	2 721	2 720	2 722	2 722
pH	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Temperatura (°C)	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Zinc inicial (%)	23,29	23,29	23,29	23,29	23,29	23,29	19,11	19,11	19,11
Masa en el rebalse (g)	1 300	1 312	1 311	1 290	1 287	1 287	1 200	1 204	1 201
Masa en el fondo (g)	1 765	1 750	1 752	1 452	1 455	1 451	1 600	1 602	1 602

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 32. **Masa en el fondo y rebalse del espesador para 36 RPM para la muestra 204 de la mina Caquipec, utilizando concentración de pulpa de 25%, 30% y 50%**

	36 RPM								
	25%			30%			50%		
	MUESTRA 37	MUESTRA 38	MUESTRA 39	MUESTRA 40	MUESTRA 41	MUESTRA 42	MUESTRA 43	MUESTRA 44	MUESTRA 45
Masa de muestra (g)	2 721	2 722	2 722	2 720	2 720	2 720	2 722	2 721	2 721
pH	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Temperatura (°C)	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Zinc inicial (%)	19,11	19,11	19,11	16,93	16,93	16,93	21,49	21,49	21,49
Masa en el rebalse (g)	1 300	1 312	1 311	1 290	1 287	1 287	1 200	1 204	1 201
Masa en el fondo (g)	1 414	1 400	1 410	1 354	1 360	1 364	1 366	1 362	1 364

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 33. **Volumen consumido EDTA para muestra del fondo del espesador a 12 RPM, utilizando concentración de pulpa 25%, 30% y 50%**

	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (mL)	Temperatura (°C)	Factor
MUESTRA 1	25	0,0533	4,00	26	0,305307
MUESTRA 2		0,0520	3,91	26	0,305307
MUESTRA 3		0,0540	4,05	26	0,305307
MUESTRA 4	30	0,0544	3,7	26	0,305307
MUESTRA 5		0,0530	3,6	26	0,305307
MUESTRA 6		0,0536	3,64	26	0,305307
MUESTRA 7	50	0,0544	4,09	26	0,305307
MUESTRA 8		0,0532	4,01	26	0,305307
MUESTRA 9		0,0561	4,24	26	0,305307

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 34. **Volumen consumido EDTA para muestra del rebalse del espesador a 12 RPM, utilizando concentración de pulpa 25%, 30% y 50%**

	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (mL)	Temperatura (°C)	Factor
MUESTRA 1	25	0,0543	3,35	26	0,305307
MUESTRA 2		0,0521	3,26	26	0,305307
MUESTRA 3		0,0533	3,3	26	0,305307
MUESTRA 4	30	0,0560	2,73	26	0,305307
MUESTRA 5		0,0530	2,58	26	0,305307
MUESTRA 6		0,0535	2,58	26	0,305307
MUESTRA 7	50	0,0532	3,24	26	0,305307
MUESTRA 8		0,0530	3,22	26	0,305307
MUESTRA 9		0,0544	3,32	26	0,305307

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 35. **Volumen consumido EDTA para muestra del fondo del espesador a 18 RPM, utilizando concentración de pulpa 25%, 30% y 50%**

	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (mL)	Temperatura (°C)	Factor
MUESTRA 10	25	0,0534	4,22	26	0,305307
MUESTRA 11		0,0553	4,49	26	0,305307
MUESTRA 12		0,0524	4,18	26	0,305307
MUESTRA 13	30	0,0533	4,10	26	0,305307
MUESTRA 14		0,0538	4,20	26	0,305307
MUESTRA 15		0,0521	4,00	26	0,305307
MUESTRA 16	50	0,0544	4,30	26	0,305307
MUESTRA 17		0,0523	4,15	26	0,305307
MUESTRA 18		0,0552	4,30	26	0,305307

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 36. **Volumen consumido EDTA para muestra del rebalse del espesador a 18 RPM, utilizando concentración de pulpa 25%, 30% y 50%**

	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (mL)	Temperatura (°C)	Factor
MUESTRA 10	25	0,0532	3,14	26	0,305307
MUESTRA 11		0,0538	3,30	26	0,305307
MUESTRA 12		0,053	3,16	26	0,305307
MUESTRA 13	30	0,0524	2,80	26	0,305307
MUESTRA 14		0,0531	2,90	26	0,305307
MUESTRA 15		0,0543	2,93	26	0,305307
MUESTRA 16	50	0,0529	3,00	26	0,305307
MUESTRA 17		0,0535	2,98	26	0,305307
MUESTRA 18		0,0549	3,10	26	0,305307

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 37. **Volumen consumido EDTA para muestra del fondo del espesador a 24 RPM, utilizando concentración de pulpa 25%, 30% y 50%**

	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (mL)	Temperatura (°C)	Factor
MUESTRA 19	25	0,0534	4,84	26	0,305307
MUESTRA 20		0,0562	5,10	26	0,305307
MUESTRA 21		0,0524	4,75	26	0,305307
MUESTRA 22	30	0,0524	4,86	26	0,305307
MUESTRA 23		0,0536	4,98	26	0,305307
MUESTRA 24		0,0533	4,94	26	0,305307
MUESTRA 25	50	0,0544	5,05	26	0,305307
MUESTRA 26		0,0536	4,97	26	0,305307
MUESTRA 27		0,0533	4,96	26	0,305307

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 38. **Volumen consumido EDTA para muestra del rebalse del espesador a 24 RPM, utilizando concentración de pulpa 25%, 30% y 50%**

	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (mL)	Temperatura (°C)	Factor
MUESTRA 19	25	0,0544	3,14	26	0,305307
MUESTRA 20		0,0516	2,99	26	0,305307
MUESTRA 21		0,0533	3,08	26	0,305307
MUESTRA 22	30	0,0522	3,32	26	0,305307
MUESTRA 23		0,0533	3,37	26	0,305307
MUESTRA 24		0,0527	3,33	26	0,305307
MUESTRA 25	50	0,0564	3,92	26	0,305307
MUESTRA 26		0,0522	3,64	26	0,305307
MUESTRA 27		0,0526	3,65	26	0,305307

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 39. **Volumen consumido EDTA para muestra del fondo del espesador a 30 RPM, utilizando concentración de pulpa 25%, 30% y 50%**

	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (mL)	Temperatura (°C)	Factor
MUESTRA 28	25	0,0529	4,38	26	0,305307
MUESTRA 29		0,0533	4,40	26	0,305307
MUESTRA 30		0,053	4,48	26	0,305307
MUESTRA 31	30	0,0534	4,10	26	0,305307
MUESTRA 32		0,0544	4,12	26	0,305307
MUESTRA 33		0,054	4,12	26	0,305307
MUESTRA 34	50	0,0531	4,10	26	0,305307
MUESTRA 35		0,0522	4,02	26	0,305307
MUESTRA 36		0,0544	4,20	26	0,305307

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 40. **Volumen consumido EDTA para muestra del rebalse del espesador a 30 RPM, utilizando concentración de pulpa 25%, 30% y 50%**

	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (mL)	Temperatura (°C)	Factor
MUESTRA 28	25	0,0345	2,1	26	0,305307
MUESTRA 29		0,0351	2,12	26	0,305307
MUESTRA 30		0,0344	2,1	26	0,305307
MUESTRA 31	30	0,0539	2,7	26	0,305307
MUESTRA 32		0,0536	2,65	26	0,305307
MUESTRA 33		0,0544	2,73	26	0,305307
MUESTRA 34	50	0,0532	3,85	26	0,305307
MUESTRA 35		0,0541	3,9	26	0,305307
MUESTRA 36		0,0553	4,01	26	0,305307

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 41. **Volumen consumido EDTA para muestra del fondo del espesador a 36 RPM, utilizando concentración de pulpa 25%, 30% y 50%**

	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (mL)	Temperatura (°C)	Factor
MUESTRA 37	25	0,0543	4,04	26	0,305307
MUESTRA 38		0,056	4,19	26	0,305307
MUESTRA 39		0,0523	3,9	26	0,305307
MUESTRA 40	30	0,0524	3,5	26	0,305307
MUESTRA 41		0,0562	3,73	26	0,305307
MUESTRA 42		0,0533	3,55	26	0,305307
MUESTRA 43	50	0,0543	4,22	26	0,305307
MUESTRA 44		0,0522	4,04	26	0,305307
MUESTRA 45		0,0533	4,13	26	0,305307

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Tabla 42. **Volumen consumido EDTA para muestra del rebalse del espesador a 36 RPM, utilizando concentración de pulpa 25%, 30% y 50%**

	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (mL)	Temperatura (°C)	Factor
MUESTRA 37	25	0,053	3,08	26	0,305307
MUESTRA 38		0,0562	3,30	26	0,305307
MUESTRA 39		0,0542	3,16	26	0,305307
MUESTRA 40	30	0,0512	2,44	26	0,305307
MUESTRA 41		0,0535	2,56	26	0,305307
MUESTRA 42		0,0544	2,58	26	0,305307
MUESTRA 43	50	0,0523	4,00	26	0,305307
MUESTRA 44		0,0543	4,16	26	0,305307
MUESTRA 45		0,0525	4,01	26	0,305307

Fuente: elaboración propia, basado en datos de mina Caquipec.

Apéndice 6. **Datos calculados**

Tabla 43. **Determinación de zinc para muestras del lote 204**

Punto	Masa (g)	V EDTA (mL)	Factor	Zinc (%)
A	0,0530	3,76	0,305307	21,66
B	0,0540	3,37	0,305307	19,05
C	0,0541	3,84	0,305307	21,67
D	0,0524	3,92	0,305307	22,84
E	0,0536	4,10	0,305307	23,35
F	0,0531	4,05	0,305307	23,29
G	0,0532	3,33	0,305307	19,11
H	0,0532	2,95	0,305307	16,93
I	0,0520	3,66	0,305307	21,49

Fuente: elaboración propia, basado en ecuación 1, apéndice 3.

Tabla 44. **Determinación porcentual de zinc promedio para mineral en el fondo del espesador operado a 12 RPM**

Número de muestra	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (ml)	Factor	% Zinc	% Zinc promedio
1	25	0,0533	4,00	0,305307	22,91	22,92
2		0,0520	3,91	0,305307	22,96	
3		0,0540	4,05	0,305307	22,90	
4	30	0,0544	3,70	0,305307	20,77	20,75
5		0,0530	3,60	0,305307	20,74	
6		0,0536	3,64	0,305307	20,73	
7	50	0,0544	4,09	0,305307	22,95	23,01
8		0,0532	4,01	0,305307	23,01	
9		0,0561	4,24	0,305307	23,07	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 1 y 2, apéndice 3.

Tabla 45. **Determinación porcentual de zinc promedio para mineral en el rebalse del espesador operado a 12 RPM**

Número de muestra	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (ml)	Factor	Zinc (%)	Zinc promedio (%)
1	25	0,0543	3,35	0,305307	18,84	18,95
2		0,0521	3,26	0,305307	19,10	
3		0,0533	3,30	0,305307	18,90	
4	30	0,0560	2,73	0,305307	14,88	14,82
5		0,0530	2,58	0,305307	14,86	
6		0,0535	2,58	0,305307	14,72	
7	50	0,0532	3,24	0,305307	18,59	18,59
8		0,0530	3,22	0,305307	18,55	
9		0,0544	3,32	0,305307	18,63	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 1 y 2, apéndice 3.

Tabla 46. **Determinación porcentual de zinc promedio para mineral en el fondo del espesador operado a 18 RPM**

Número de muestra	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (ml)	Factor	Zinc (%)	Zinc promedio (%)
10	25	0,0534	4,22	0,305307	24,13	24,42
11		0,0553	4,49	0,305307	24,79	
12		0,0524	4,18	0,305307	24,35	
13	30	0,0533	4,10	0,305307	23,49	23,59
14		0,0538	4,20	0,305307	23,83	
15		0,0521	4,00	0,305307	23,44	
16	50	0,0544	4,30	0,305307	24,13	24,05
17		0,0523	4,15	0,305307	24,23	
18		0,0552	4,30	0,305307	23,78	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 1 y 2, apéndice 3.

Tabla 47. **Determinación porcentual de zinc promedio para mineral en el rebalse del espesador operado a 18 RPM**

Número de muestra	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (ml)	Factor	Zinc (%)	Zinc promedio (%)
10	25	0,0532	3,14	0,305307	18,02	18,32
11		0,0538	3,30	0,305307	18,73	
12		0,0530	3,16	0,305307	18,20	
13	30	0,0524	2,80	0,305307	16,31	16,49
14		0,0531	2,90	0,305307	16,67	
15		0,0543	2,93	0,305307	16,47	
16	50	0,0529	3,00	0,305307	17,31	17,19
17		0,0535	2,98	0,305307	17,01	
18		0,0549	3,10	0,305307	17,24	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 1 y 2, apéndice 3.

Tabla 48. **Determinación porcentual de zinc promedio para mineral en el fondo del espesador operado a 24 RPM**

Número de muestra	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (ml)	Factor	Zinc (%)	Zinc promedio (%)
19	25	0,0534	4,84	0,305307	27,67	27,68
20		0,0562	5,10	0,305307	27,71	
21		0,0524	4,75	0,305307	27,68	
22	30	0,0524	4,86	0,305307	28,32	28,33
23		0,0536	4,98	0,305307	28,37	
24		0,0533	4,94	0,305307	28,30	
25	50	0,0544	5,05	0,305307	28,34	28,35
26		0,0536	4,97	0,305307	28,31	
27		0,0533	4,96	0,305307	28,41	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 1 y 2, apéndice 3.

Tabla 49. **Determinación porcentual de zinc promedio para mineral en el rebalse del espesador operado a 24 RPM**

Número de muestra	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (ml)	Factor	Zinc (%)	Zinc promedio (%)
19	25	0,0544	3,14	0,305307	17,62	17,65
20		0,0516	2,99	0,305307	17,69	
21		0,0533	3,08	0,305307	17,64	
22	30	0,0522	3,32	0,305307	19,42	19,34
23		0,0533	3,37	0,305307	19,30	
24		0,0527	3,33	0,305307	19,29	
25	50	0,0564	3,92	0,305307	21,22	21,23
26		0,0522	3,64	0,305307	21,29	
27		0,0526	3,65	0,305307	21,19	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 1 y 2, apéndice 3.

Tabla 50. **Determinación porcentual de zinc promedio para mineral en el fondo del espesador operado a 30 RPM**

Número de muestra	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (ml)	Factor	Zinc (%)	Zinc promedio (%)
28	25	0,0529	4,38	0,305307	25,28	25,43
29		0,0533	4,40	0,305307	25,20	
30		0,0530	4,48	0,305307	25,81	
31	30	0,0534	4,10	0,305307	23,44	23,29
32		0,0544	4,12	0,305307	23,12	
33		0,0540	4,12	0,305307	23,29	
34	50	0,0531	4,10	0,305307	23,57	23,55
35		0,0522	4,02	0,305307	23,51	
36		0,0544	4,20	0,305307	23,57	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 1 y 2, apéndice 3.

Tabla 51. **Determinación porcentual de zinc promedio para mineral en el rebalse del espesador operado a 30 RPM**

Número de muestra	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (ml)	Factor	Zinc (%)	Zinc promedio (%)
28	25	0,0345	2,10	0,305307	18,58	18,55
29		0,0351	2,12	0,305307	18,44	
30		0,0344	2,10	0,305307	18,64	
31	30	0,0539	2,70	0,305307	15,29	15,24
32		0,0536	2,65	0,305307	15,09	
33		0,0544	2,73	0,305307	15,32	
34	50	0,0532	3,85	0,305307	22,09	22,08
35		0,0541	3,90	0,305307	22,01	
36		0,0553	4,01	0,305307	22,14	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 1 y 2, apéndice 3.

Tabla 52. **Determinación porcentual de zinc promedio para mineral en el fondo del espesador operado a 36 RPM**

Número de muestra	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (ml)	Factor	Zinc (%)	Zinc promedio (%)
37	25	0,0543	4,04	0,305307	22,72	22,78
38		0,0560	4,19	0,305307	22,84	
39		0,0523	3,90	0,305307	22,77	
40	30	0,0524	3,50	0,305307	20,39	20,33
41		0,0562	3,73	0,305307	20,26	
42		0,0533	3,55	0,305307	20,33	
43	50	0,0543	4,22	0,305307	23,73	23,67
44		0,0522	4,04	0,305307	23,63	
45		0,0533	4,13	0,305307	23,66	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 1 y 2, apéndice 3.

Tabla 53. **Determinación porcentual de zinc promedio para mineral en el rebalse del espesador operado a 36 RPM**

Número de muestra	Concentración pulpa (%peso/peso)	Masa (g)	V EDTA (ml)	Factor	Zinc (%)	Zinc promedio (%)
37	25	0,0530	3,08	0,305307	17,74	17,82
38		0,0562	3,30	0,305307	17,93	
39		0,0542	3,16	0,305307	17,80	
40	30	0,0512	2,44	0,305307	14,55	14,55
41		0,0535	2,56	0,305307	14,61	
42		0,0544	2,58	0,305307	14,48	
43	50	0,0523	4,00	0,305307	23,35	23,35
44		0,0543	4,16	0,305307	23,39	
45		0,0525	4,01	0,305307	23,32	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 1 y 2, apéndice 3.

Tabla 54. **Determinación de la eficiencia en el aumento de zinc en el espesador operado a 12 RPM**

Muestra	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	% Zinc fondo	% Zinc rebalse	% Zinc inicial	Eficiencia	Eficiencia promedio
1	25	22,91	18,84	21,66	18,82	18,35
2		22,96	19,10	21,66	17,79	
3		22,90	18,90	21,66	18,45	
4	30	20,77	14,88	19,05	30,87	31,09
5		20,74	14,86	19,05	30,84	
6		20,73	14,72	19,05	31,55	
7	50	22,95	18,59	21,67	20,12	20,41
8		23,01	18,55	21,67	20,60	
9		23,07	18,63	21,67	20,50	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 2 y 3, apéndice 3.

Tabla 55. **Determinación de la eficiencia en el aumento de zinc en el espesador operado a 18 RPM**

Muestra	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	% Zinc fondo	% Zinc rebalse	% Zinc inicial	Eficiencia	Eficiencia promedio
10	25	24,13	18,02	21,67	28,18	28,18
11		24,79	18,73	21,67	27,97	
12		24,35	18,20	21,67	28,39	
13	30	23,49	16,31	21,67	33,09	32,76
14		23,83	16,67	21,67	33,04	
15		23,44	16,47	21,67	32,15	
16	50	24,13	17,31	22,84	29,85	30,04
17		24,23	17,01	22,84	31,61	
18		23,78	17,24	22,84	28,65	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 2 y 3, apéndice 3.

Tabla 56. **Determinación de la eficiencia en el aumento de zinc en el espesador operado a 24 RPM**

Muestra	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	% Zinc fondo	% Zinc rebalse	% Zinc inicial	Eficiencia	Eficiencia promedio
19	25	27,67	17,62	22,84	44,00	43,92
20		27,71	17,69	22,84	43,85	
21		27,68	17,64	22,84	43,93	
22	30	28,32	19,42	23,35	38,11	38,50
23		28,37	19,30	23,35	38,81	
24		28,30	19,29	23,35	38,57	
25	50	28,34	21,22	23,29	30,58	30,58
26		28,31	21,29	23,29	30,14	
27		28,41	21,19	23,29	31,02	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 2 y 3, apéndice 3.

Tabla 57. **Determinación de la eficiencia en el aumento de zinc en el espesador operado a 30 RPM**

Muestra	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	% Zinc fondo	% Zinc rebalse	% Zinc inicial	Eficiencia	Eficiencia promedio
28	25	25,28	18,58	22,84	29,31	30,10
29		25,20	18,44	22,84	29,61	
30		25,81	18,64	22,84	31,39	
31	30	23,44	15,29	23,35	34,89	34,47
32		23,12	15,09	23,35	34,38	
33		23,29	15,32	23,35	34,14	
34	50	23,57	22,09	23,29	6,35	6,32
35		23,51	22,01	23,29	6,45	
36		23,57	22,14	23,29	6,15	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 2 y 3, apéndice 3.

Tabla 58. **Determinación de la eficiencia en el aumento de zinc en el espesador operado a 36 RPM**

Muestra	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	% Zinc fondo	% Zinc rebalse	% Zinc inicial	Eficiencia	Eficiencia promedio
37	25	22,72	17,74	19,11	26,02	25,91
38		22,84	17,93	19,11	25,73	
39		22,77	17,80	19,11	25,99	
40	30	20,39	14,55	16,93	34,51	34,16
41		20,26	14,61	16,93	33,40	
42		20,33	14,48	16,93	34,58	
43	50	23,73	23,35	21,49	1,75	1,48
44		23,63	23,39	21,49	1,11	
45		23,66	23,32	21,49	1,57	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 2 y 3, apéndice 3.

Tabla 59. **Determinación de la eficiencia del espesador operado a 12 RPM**

Muestra	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	Eficiencia	Eficiencia promedio
1	25	69,31	69,35
2		69,12	
3		69,62	
4	30	73,65	73,56
5		73,50	
6		73,54	
7	50	76,81	76,83
8		76,88	
9		76,81	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 2 y 4, apéndice 3.

Tabla 60. **Determinación de la eficiencia del espesador operado a 18 RPM**

Muestra	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	Eficiencia	Eficiencia promedio
10	25	70,22	70,25
11		70,38	
12		70,15	
13	30	78,25	78,30
14		78,35	
15		78,29	
16	50	74,42	74,38
17		74,46	
18		74,26	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 2 y 4, apéndice 3.

Tabla 61. **Determinación de la eficiencia del espesador operado a 24 RPM**

Muestra	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	Eficiencia	Eficiencia promedio
19	25	70,96	71,05
20		71,14	
21		71,07	
22	30	73,11	73,21
23		73,31	
24		73,20	
25	50	64,71	64,66
26		64,41	
27		64,85	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 2 y 4, apéndice 3.

Tabla 62. **Determinación de la eficiencia del espesador operado a 30 RPM**

Muestra	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	Eficiencia	Eficiencia promedio
28	25	64,94	64,54
29		64,29	
30		64,39	
31	30	53,38	53,40
32		53,49	
33		53,33	
34	50	58,82	58,84
35		58,85	
36		58,85	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 2 y 4, apéndice 3.

Tabla 63. **Determinación de la eficiencia del espesador operado a 36 RPM**

Muestra	Concentración de la pulpa (%peso/peso)	Eficiencia	Eficiencia promedio
37	25	51,97	51,73
38		51,43	
39		51,80	
40	30	49,78	49,98
41		50,00	
42		50,15	
43	50	50,18	50,12
44		50,06	
45		50,13	

Fuente: elaboración propia, basado en ecuaciones 2 y 4, apéndice 3.