



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

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEDIMENTADOR CIRCULAR A ESCALA
PILOTO PARA ESPESAMIENTO DE LODOS RESIDUALES DE UN PROCESO DE
FABRICACIÓN DE $ZnSO_4$, EN LA PLANTA DE FERTILIZANTES DE LA EMPRESA
REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S. A.**

Walter René Mejía Ajcucún

Asesorado por el Ing. Sergio Alejandro Recinos

Guatemala, enero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEDIMENTADOR CIRCULAR A ESCALA
PILOTO PARA ESPESAMIENTO DE LODOS RESIDUALES DE UN PROCESO DE
FABRICACIÓN DE $ZnSO_4$, EN LA PLANTA DE FERTILIZANTES DE LA EMPRESA
REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S. A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

WALTER RENÉ MEJÍA AJCUCÚN

ASESORADO POR EL ING. SERGIO ALEJANDRO RECINOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ENERO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

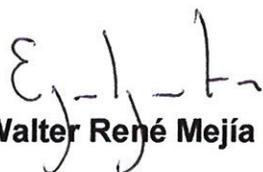
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Ordóñez
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Alvarez Mejía
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEDIMENTADOR CIRCULAR A ESCALA PILOTO PARA ESPESAMIENTO DE LODOS RESIDUALES DE UN PROCESO DE FABRICACIÓN DE $ZnSO_4$, EN LA PLANTA DE FERTILIZANTES DE LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S. A.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 11 de mayo de 2015.


Walter René Mejía Ajcucún



Guatemala, 27 de julio de 2016.
Ref.EPS.D.300.07.16.

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Wong Davi.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEDIMENTADOR CIRCULAR A ESCALA PILOTO PARA ESPESAMIENTO DE LODOS RESIDUALES DE UN PROCESO DE FABRICACIÓN DE ZnSO₄, EN LA PLANTA DE FERTILIZANTES DE LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S. A."** que fue desarrollado por el estudiante universitario Walter René Mejía Ajcucún, quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Sergio Alejandro Recinos.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor-Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Cristina del Rosario Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS

CdRCdP/ra



Guatemala, 05 de septiembre de 2016

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

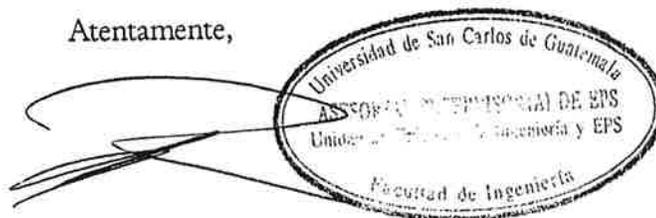
Estimado Ingeniero Wong Davi,

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E. P. S.), del estudiante universitario Walter René Mejía Ajcucún de la carrera de Ingeniería Química con carné No. 2006-11203, procedí a revisar el informe final, cuyo título es "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEDIMENTADOR CIRCULAR A ESCALA PILOTO PARA ESPESAMIENTO DE LODOS RESIDUALES DE UN PROCESO DE FABRICACIÓN DE $ZnSO_4$, EN LA PLANTA DE FERTILIZANTES DE LA EMPRES REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S. A."

En tal virtud, LO DOY POR APROBADO, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

The image shows a handwritten signature in black ink, which is somewhat stylized and overlaps with an official stamp. The stamp is oval-shaped and contains the following text: "Universidad de San Carlos de Guatemala" at the top, "ASESOR TÉCNICO-SUPERVISOR DE EPS" in the middle, "Unidad de Ingeniería y EPS" below that, and "Facultad de Ingeniería" at the bottom.

Ing. Sergio Alejandro Recinos
Asesor Técnico-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Química



Guatemala, 26 de septiembre de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.053.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **077-2015** 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
-Modalidad Ejercicio Profesional Supervisado-**

Solicitado por el estudiante universitario: **Walter René Mejía Ajcucún.**
Identificado con número de carné: **2006-11203.**
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:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEDIMENTADOR CIRCULAR A ESCALA PILOTO
PARA ESPESAMIENTO DE LODOS RESIDUALES DE UN PROCESO DE
FABRICACIÓN DE $ZnSO_4$, EN LA PLANTA DE FERTILIZANTES DE LA EMPRESA
REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S.A.**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Sergio Alejandro Recinos.**

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

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


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



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.072.2016

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 Ejercicio Profesional Supervisado (**EPS final**) del estudiante **WALTER RENÉ MEJÍA AJCUCÚN** titulado: **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEDIMENTADOR CIRCULAR A ESCALA PILOTO PARA ESPESAMIENTO DE LODOS RESIDUALES DE UN PROCESO DE FABRICACIÓN DE ZnSO₄, EN LA PLANTA DE FERTILIZANTES DE LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S.A."** Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Dav
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, noviembre de 2016

Cc: Archivo
CSWD/ale



Universidad de San Carlos
de Guatemala

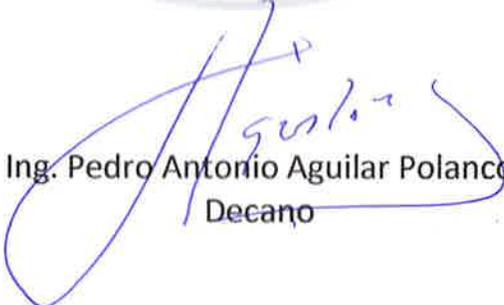


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 022.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEDIMENTADOR CIRCULAR A ESCALA PILOTO PARA ESPESAMIENTO DE LODOS RESIDUALES DE UN PROCESO DE FABRICACIÓN DE $ZnSO_4$, EN LA PLANTA DE FERTILIZANTES DE LA EMPRESA REPRESENTACIONES QUÍMICAS, S. A.**, presentado por el estudiante universitario: **Walter René Mejía Ajcucún**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, enero de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Mi familia

Fidencio Mejía y Rosario Ajcucún, padres dedicados a fomentar las nobles costumbres en el hogar, responsables de integrar a la sociedad, a cinco hermanos y a mí, personas útiles para con ellos y para su comunidad. Papá, mamá, cada uno a su manera ha depositado lo mejor de sí en este hijo que los ama.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios que me proporcionó los recursos necesarios para desarrollar y culminar mis estudios superiores.
Facultad de Ingeniería	Sus aulas me brindaron los conocimientos para optar al título de ingeniero químico en el grado académico de licenciado.
Ing. Jorge Ávalos	En usted encontré una persona entusiasta que patrocinó la realización de mi Ejercicio Profesional Supervisado.
Ing. Carlos Antonio	Guía invaluable en la construcción y realización del diseño experimental del presente trabajo.
Ing. Sergio Recinos	Su asesoría en la concepción, desarrollo y finalización de este proyecto fue indispensable.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
Hipótesis	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. ANTECEDENTES	1
1.1 Teoría de Kynch (1952)	1
1.2 Aportación propuesta por Font (1988, 1989, 1990, 1991)	2
1.3 Otros estudios relacionados con la sedimentación	2
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Sedimentación	5
2.2 Tipos de sedimentación	7
2.2.1 Sedimentación discreta	7
2.2.2 Sedimentación con floculación	8
2.2.3 Sedimentación por zonas	8
2.3 Teoría de la sedimentación discreta.....	9
2.4 Teoría de sedimentación con floculación	12
2.5 Teoría de la sedimentación por zonas.....	15
2.6 Coagulación	17
2.7 Floculación	18
2.8 Cálculo del área superficial del sedimentador.....	19
2.9 Medidas en laboratorio	19

2.10	Determinación del área mínima requerida para conseguir la clarificación de los lodos.....	21
2.11	Determinación del área mínima requerida para conseguir el espesamiento del lodo.....	22
2.11.1	Método de Yoshioka & Dick	22
2.12	Factores de sedimentación.....	25
2.12.1	Calidad del agua.....	25
2.12.2	Condiciones hidráulicas.....	27
2.12.3	Factores externos	28
2.13	Parámetros que se consideran para diseñar un tanque de sedimentación.....	29
2.13.1	Tiempo de retención.....	29
2.13.2	Carga superficial o velocidad ascensorial	30
2.13.3	Velocidad de arrastre	30
2.14	Sedimentador.....	30
2.14.1	Componentes	31
2.14.2	Criterios de diseño.....	31
2.14.3	Materiales de construcción.....	33
2.15	Escalonamiento	33
2.15.1	Escala laboratorio y planta piloto	33
3.	DISEÑO EXPERIMENTAL	37
3.1	Variables	37
3.1.1	Variables independientes	40
3.1.2	Variables dependientes	40
3.2	Delimitación del campo de estudio.....	41
3.3	Recurso humano disponible	42
3.4	Recursos materiales disponibles (equipo, material de vidrio, reactivos)	43
3.4.1	Materia prima y reactivos	43

3.4.2	Material de vidrio	44
3.4.3	Equipo	45
3.4.4	Determinación de velocidad de sedimentación	45
3.4.5	Diseño de equipo	45
3.5	Técnica cuantitativa	46
3.5.1	Diseño general	46
3.6	Recolección y ordenamiento de la información	47
3.7	Tabulación, orden y procesamiento de la información	47
3.7.1	Recolección de la muestra	48
3.7.2	Análisis fisicoquímico de la muestra	48
3.7.3	Dimensionamiento del sedimentador	57
3.8	Tabla de tabulación de datos	60
3.9	Análisis estadístico	64
3.9.1	Media aritmética	64
3.9.2	Análisis de variabilidad	65
4.	RESULTADOS	67
4.1	Características físicas y químicas de la suspensión proveniente del proceso de elaboración de ZnSO ₄	67
4.2	Correlación de los datos correspondientes a la velocidad de sedimentación en función de la concentración	68
4.3	Diseño del sedimentador circular con las dimensiones determinadas según pruebas de laboratorio	69
4.4	Construcción del equipo con base en el diseño	71
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	73
	CONCLUSIONES	79
	RECOMENDACIONES	81
	BIBLIOGRAFÍA	83
	APÉNDICE	85
	ANEXOS	109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Zonas de asentamiento de la pulpa alimentada.....	7
2.	Modelo de un tanque de sedimentación con floculante	13
3.	Columna de sedimentación de laboratorio	14
4.	Sedimentación por zonas	16
5.	Curva de sedimentación	20
6.	Procedimiento gráfico para determinar G_T	23
7.	Tipos de corriente debida al agua fría o caliente	26
8.	Configuraciones de clarificadores circulares y patrones de flujo	32
9.	Diagrama de flujo de procesos	46
10.	Velocidad de sedimentación en función de la concentración de los lodos	68
11.	Diseño final del sedimentador circular.....	70
12.	Vista frontal del equipo construido	71
13.	Vista aérea del equipo construido	72

TABLAS

I.	Clasificación de pulpas de sedimentación.....	5
II.	Definición operacional de las variables para el análisis químico de las propiedades mineralógicas de los lodos residuales y diseño de equipo	38
III.	Concentraciones iniciales preparadas.....	60
IV.	Determinación cualitativa del olor.....	60

V.	Determinación cualitativa del color	61
VI.	Humedad e insolubles de la suspensión	61
VII.	Método de análisis de lodos residuales	61
VIII.	Diferencial de altura con respecto del tiempo de sedimentación de las muestras	62
IX.	Velocidad de sedimentación en función de la concentración	62
X.	Caudal de sólido en función de la concentración.....	63
XI.	Comparación del área del clarificado y el área del espesado.....	63
XII.	Dimensionamiento del sedimentador	63
XIII.	Cotización del equipo	64
XIV.	Caracterización física de la muestra recolectada.....	67
XV.	Análisis químico de la muestra recolectada	67
XVI.	Comparación del área industrial de clarificado y área industrial de espesado	69
XVII.	Valores de diseño del sedimentador circular a escala piloto	69
XVIII.	Cotización del equipo y mano de obra	71

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
g	Aceleración de la gravedad
A	Área de paso
\dot{Q}	Caudal
cm³	Centímetros cúbicos
S	Desviación estándar
°C	Grado Celsius
L	Litros
\bar{X}	Media aritmética
m	Metro
mg	Miligramo
mm	Milímetro
N	Número de corridas
n	Número de datos
pH	Potencial de hidrógeno
X_i	Valor de cada corrida
S²	Varianza de la muestra
v	Velocidad de aproximación del fluido hacia la reja
V	Velocidad de flujo a través del espacio entre barras

GLOSARIO

Agente lixiviante	Sustancia química que tiene la propiedad de disolver selectivamente uno o más elementos presentes en una roca o mineral.
Agua regia	Mezcla de tres partes de ácido clorhídrico y una parte de ácido nítrico.
Caudal del afluente	Velocidad a la que se transporta una sustancia de una línea de proceso al equipo sedimentador y se expresa en términos de volumen/tiempo.
Densidad aparente	Peso (W) de un objeto o material dividido por su volumen exterior (V_e) menos el volumen de sus poros abiertos (V_p).
Elutriación	Es una operación de clasificación de partículas por medio de una corriente ascendente de un fluido, generalmente agua o aire. Es un proceso inverso a la sedimentación por gravedad.
Espesamiento	Procedimiento de eliminación del agua presente en una pulpa mediante el asentamiento de las partículas sólidas y decantación del líquido, en tanques cilíndricos especiales denominados sedimentadores.

Estratificación	Proceso de arreglo de las rocas sedimentarias, originado por algún cambio en la naturaleza de los materiales que están siendo depositados o en las condiciones del ambiente de sedimentación.
Hidrociclón	Equipo usado para clasificación, en el cual el material fluye dentro de un ciclón (contenedor cuya parte inferior termina en forma de cono) bajo aceleración provocada por la presión hidrostática, a través de un conducto - inyector tangencial.
Lixiviación	Proceso en el cual se retira uno o varios solutos de un sólido mediante la utilización de un disolvente líquido.
Muestreo	Es un proceso selectivo de separación, realizado sobre una porción dada de material (yacimiento, lote original o muestra previa) con el objeto de reducir su volumen, pero mantener sus características globales, físicas, químicas o mineralógicas con el fin de determinar las propiedades o composición del material original.
Pulpa	Mezcla de mineral molido o pulverizado con agua o una solución acuosa.

RESUMEN

En el presente proyecto se diseñó y construyó un equipo de sedimentación gravitacional tipo circular a escala piloto que sirvió para el espesamiento de lodos residuales de un proceso de fabricación de $ZnSO_4$ de la planta Representaciones Químicas, S. A. La suspensión fue recolectada en la parte final del proceso, específicamente en el tercer lavado del mineral.

La muestra se condujo al laboratorio para determinar sus propiedades fisicoquímicas, obteniendo como datos relevantes de diseño la concentración de sólidos iniciales y el porcentaje de humedad.

Se prepararon ocho suspensiones con concentraciones de sólidos iniciales diferentes, comenzando desde 5%p/p hasta 20%p/p; a todas estas suspensiones se les adicionó floculante, y con cada una se realizó el método de tubo largo o ensayo de sedimentación de laboratorio para determinar su velocidad de sedimentación. La concentración de los lodos se estableció como la variable independiente, y la velocidad de sedimentación, se tomó como la variable dependiente, considerada como el factor que es observado y medido para determinar el efecto de la variable independiente.

Partiendo de la condición de que el tamaño del equipo se limita a una escala piloto, se propuso una relación de escalamiento lineal de 4, es decir, se trabajó con la cuarta parte del valor total del caudal en el afluente.

Con las curvas de velocidad de sedimentación trazadas, se procedió a calcular el área mínima superficial de clarificación. Posteriormente, se trazó la

curva de flujo en discontinuo (método de Yoshioka & Dick), gráfico de G_B en función de X_i , y se determinó el área mínima superficial de espesado. Se comparó el área de clarificado y espesado, se eligió la mayor de estas dos áreas como área de diseño. Con base en este resultado, se determinó el área y el diámetro del sedimentador, y con el tiempo de residencia, se estableció la altura necesaria.

El material utilizado para la construcción del cuerpo del equipo fue la fibra de vidrio. Este material es flexible, económico y no contamina las muestras por trabajar. El costo total de construcción, incluyendo el pago de la mano de obra, fue de Q13, 545.00 y se construyó con la ayuda de tres trabajadores en un tiempo de tres semanas aproximadamente

OBJETIVOS

General

Diseñar y construir un sedimentador circular a escala piloto para espesar lodos residuales de un proceso de fabricación de ZnSO_4 en una planta de fertilizantes.

Específicos

1. Evaluar el comportamiento de una variable implicada en el dimensionamiento de un sedimentador circular a escala laboratorio.
2. Diseñar un sedimentador circular con las dimensiones determinadas según las pruebas de laboratorio.
3. Construir un sedimentador circular de acuerdo con el diseño elaborado.
4. Caracterizar los lodos residuales de un proceso de ZnSO_4 a partir del Zn mineral.

Hipótesis

Hipótesis científica

Incrementar el número de partículas en los lodos residuales, disminuye la velocidad de descenso de cada partícula por separado, por lo que las

suspensiones que poseen una alta concentración, presentan disminuciones en la velocidad de sedimentación de las partículas.

Hipótesis estadística

Hipótesis nula:

A menor concentración inicial en los lodos residuales, disminuye la velocidad de sedimentación de partículas.

Hipótesis alterna:

A mayor concentración inicial en los lodos residuales, disminuye la velocidad de sedimentación de partículas.

INTRODUCCIÓN

La empresa guatemalteca de productos fertilizantes, Representaciones Químicas, S. A. planta Palín, ha evolucionado gracias a la incorporación de equipos industriales que ofrecen mejoras en los procesos de fabricación de productos.

El área de investigación y desarrollo dio a conocer la necesidad de construir un equipo que espese los lodos residuales obtenidos de un proceso de fabricación de $ZnSO_4$ a partir de mineral de Zn. El espesamiento se lleva a cabo eliminando el contenido de humedad de los lodos, empleando un método físico gravimétrico.

Esta investigación describe el fundamento teórico para construir un sedimentador circular a escala piloto con la finalidad de ayudar a los accionistas de la planta a diseñar un proceso de espesamiento de lodos residuales y evidencia nuevas áreas de aplicación de los sedimentadores, pues estos se emplean mayormente en el tratamiento de aguas o en la industria azucarera. Son usados en menor porcentaje en otras tareas, como ejemplo, en el espesamiento de lodos o minerales residuales de un proceso de fabricación de fertilizante.

El diseño del equipo comprende una etapa de recopilación y estudio de información relacionada con la teoría de sedimentación, operación unitaria que consiste en la separación por la acción de la gravedad de las fases sólida y líquida de una suspensión diluida para obtener una suspensión concentrada y un líquido claro. Dependiendo del producto de interés, se puede emplear un

clarificador o un sedimentador. Ambos operan bajo el mismo principio, la terminología sólo hace distinción de los resultados esperados.

Se prefiere espesar los lodos residuales del proceso de ZnSO_4 , empleando un sedimentador tipo circular debido a que satisface las condiciones del proceso de sedimentación mucho mejor que un equipo rectangular.

1. ANTECEDENTES

Es común que las industrias de fertilizantes utilicen operaciones físicas de separación y concentración para los materiales que extraen, con el fin de obtener productos valiosos y desechar los no deseados.

Son diversos los trabajos que se han llevado a cabo en materia de sedimentación gravitacional, desde estudios que permiten determinar la velocidad de sedimentación de partículas aisladas hasta investigaciones que permiten correlacionar estos resultados con los de partículas que sedimentan en bloques.

1.1 Teoría de Kynch (1952)

Kynch (1952) formuló una teoría para justificar la evolución de la sedimentación de sólidos incompresibles, o sea en aquellos casos cuando las partículas que entran en contacto unas con otras no sedimentan y, por tanto, la suspensión alcanza la concentración máxima, que es igual a la crítica. La teoría está basada en las siguientes hipótesis:

- La concentración es uniforme en una capa horizontal.
- Los efectos de pared son despreciables.
- No hay diferencia en la velocidad de sedimentación de las partículas.
- La velocidad de sedimentación depende únicamente de la concentración de los sólidos.
- La concentración inicial es uniforme al comienzo del experimento.

- En el fondo de la columna se forma una infinidad de capas de concentración intermedia entre la inicial y la máxima que se puede alcanzar, cuando las partículas entran en contacto unas con otras.
- La velocidad de sedimentación tiende hacia cero cuando la concentración se aproxima a su límite superior.

1.2 Aportación propuesta por Font (1988, 1989, 1990, 1991)

Font (1988) considera que algunas características se elevan tangencialmente desde el sedimento. En el análisis se asume la teoría de Kynch en la zona de no compresión, y considera que los sedimentos son más o menos compresibles, de forma que siguiendo un desarrollo similar al de Tiller, y admitiendo los razonamientos de Fitch, llega a deducir una ecuación que puede aplicarse directamente para determinar la concentración de sólidos en la zona III. En la zona de no compresión el fluido circula hacia arriba entre los agregados o flóculos, los cuales no interactúan entre sí, por tanto no transmiten presión. En la zona de compresión los flóculos se unen para formar una estructura de red porosa, en donde el peso de las capas superiores obliga al líquido a circular hacia arriba a través de los canales formados. El sedimento se comporta como un medio poroso, cuya permeabilidad disminuye conforme se avanza hacia el fondo.

1.3 Otros estudios relacionados con la sedimentación

De los estudios en los que se describe el paso de las partículas aisladas, destaca el de Alonso (1984) en el cual se determinaron fórmulas directas para estimar la velocidad de sedimentación para partículas regulares e irregulares (se logró la deducción de fórmulas para partículas elipsoidales, ortotrópicas, isométricas, irregulares naturales e irregulares molidas).

Con el objetivo de examinar experimentalmente el efecto de la concentración de partículas suspendidas sobre la velocidad de sedimentación y encontrar un método satisfactorio para correlacionar los resultados, Richardson y Zaki (1954) realizaron un estudio de la sedimentación y de la fluidización sólido-líquido con partículas esféricas, obteniendo una ecuación empírica que se emplea generalmente para relacionar la velocidad de una suspensión (V_c), con la velocidad de sedimentación de una partícula (V_t) y la porosidad del lecho (ϵ), denominada ecuación de Richardson y Zaki:

$$V_c = V_t * \epsilon^n$$

[Ecuación No. 1]

Donde

n = es el valor de la pendiente de la recta que obtuvieron Richardson y Zaki en sus investigaciones

Por otra parte, Alayon (1996) estudió la influencia de la concentración en la velocidad de sedimentación y determinó que con un incremento de la misma en la suspensión, disminuye la velocidad de sedimentación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Sedimentación

La sedimentación es la separación parcial de las partículas sólidas suspendidas en un líquido, mediante asentamiento por gravedad. Este campo se puede dividir entre las dos operaciones funcionales de espesamiento y clarificación. El objetivo principal del espesamiento es incrementar la concentración de los sólidos en suspensión en la corriente de alimentación, en tanto que el de la clarificación es eliminar una cantidad relativamente pequeña de partículas suspendidas y obtener un efluente claro. Esas dos funciones son similares y ocurren en forma simultánea y la terminología solo hace distinción entre los resultados deseados del proceso primario. Por lo general, los mecanismos de espesamiento están diseñados para los requerimientos de trabajo más pesados impuestos por una gran cantidad de pulpa relativamente concentrada, en tanto que, casi siempre, los clarificadores incluyen aspectos que aseguran esencialmente la eliminación completa de los sólidos en suspensión, como, por ejemplo, mayor profundidad, provisiones especiales para la coagulación o floculación de la suspensión de alimentación y una longitud mayor del vertedero de sobreflujo. Los clarificadores manejan pulpas de la clase 1 y algunas de la clase 2, mientras que los espesadores reciben algunas pulpas de la clase 2 y todas las de la clase 3 y la 4.

Tabla I. **Clasificación de pulpas de sedimentación**

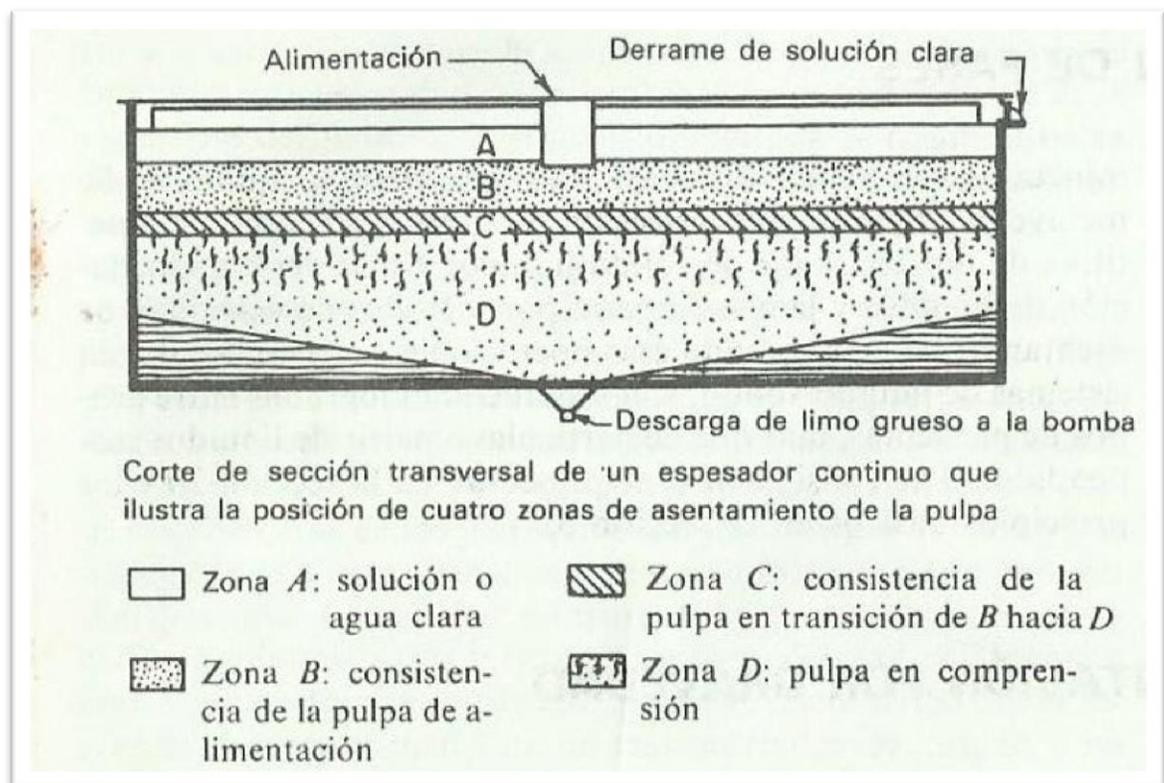
Descripción de la pulpa	Descripción de la sedimentación inicial	Ejemplo	Métodos para determinar el área unitaria	Métodos para determinar la altura de la zona de compresión
Diluida, de clase 1; asentamiento independiente de partículas	Las partículas o los grumos se asientan independientemente. No hay línea definida de asentamiento. La velocidad de asentamiento depende primordialmente del tamaño de las partículas o los grumos.	Agua turbia y desechos comerciales. Limo.	Tubo largo	Coe y Clevenger, Roberts
Intermedia, clase 2; asentamiento colectivo o en masa	Zona superior de asentamiento independiente de partículas. Zona inferior de asentamiento colectivo. Línea de separación no muy definida.	Pulpas químicas y metalúrgicas. Aguas de alcantarillado. Polvos de combustión.	Tubo largo, Coe y Clevenger, Kynch (Talmage y Fitch)	Coe y Clevenger, Roberts
Concentrada, clase 3; asentamiento colectivo o en masa	Línea definida de asentamiento. La velocidad de asentamiento disminuye al aumentar la concentración de sólidos. Velocidad de asentamiento retrasado por interferencia de las partículas o los grumos.	Pulpas químicas y metalúrgicas. Lodo activado.	Coe y Clevenger, Kynch (Talmage y Fitch)	Coe y Clevenger, Roberts
Compacta, clase 4; asentamiento compacto	Grupos o partículas en asentamiento de contacto íntimo, debido a la compresión.	Todas las pulpas por sedimentación llegan a esto.	Coe y Clevenger	Coe y Clevenger, Roberts

Fuente: GREEN, DON W., PERRY, ROBERT H. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8th Edition. p. 253.

Los tipos de sedimentación que se encuentran en la tecnología de un proceso se ven considerablemente afectados no solo por los factores obvios –el tamaño de partícula, la viscosidad del líquido, las densidades de la solución y el sólido- sino también por las características de las partículas en el precipitado. Estas propiedades, así como los requerimientos del proceso, ayudan a determinar tanto el tipo de equipo que logre los objetivos deseados en forma

más eficaz como los métodos de prueba por utilizar para la selección del equipo.

Figura 1. **Zonas de asentamiento de la pulpa alimentada**



Fuente: GREEN, DON W., PERRY, ROBERT H. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8th Edition. p. 255.

2.2 Tipos de sedimentación

Pueden considerarse tres tipos de mecanismos o procesos de sedimentación, dependiendo de la naturaleza de los sólidos presentes en suspensión.

2.2.1 Sedimentación discreta

Las partículas que se depositan mantienen su individualidad, o sea, no se someten a un proceso de coalescencia con otras partículas. En este caso, las propiedades físicas de las partículas (tamaño, forma, peso específico) no cambian durante el proceso. Este tipo de sedimentación ocurre en una suspensión con baja concentración de sólidos. Las partículas sedimentan como entidades individuales y no existe interacción sustancial con las partículas vecinas. Situación en que se presenta: eliminación de las arenas del agua residual.

2.2.2 Sedimentación con floculación

Se refiere a una suspensión bastante diluida de partículas que se agregan o floculan durante el proceso de sedimentación. Al unirse, las partículas aumentan de masa y sedimentan a mayor velocidad. La aglomeración de las partículas va acompañada de cambios en la densidad y en la velocidad de sedimentación o precipitación. La sedimentación que se lleva a cabo en los clarificadores o sedimentadores primarios es un ejemplo de este proceso. Situación en que se presenta: Eliminación de una fracción de los sólidos en suspensión del agua residual bruta en los tanques de sedimentación primaria, y en la zona superior de los decantadores secundarios. También elimina los flóculos químicos de los tanques de sedimentación.

2.2.3 Sedimentación por zonas

Se refiere a suspensiones de concentración intermedia, en las que las fuerzas entre partículas son suficientes para entorpecer la sedimentación de las partículas vecinas. Las partículas tienden a permanecer en posiciones relativas fijas, y la masa de partículas sedimenta como una unidad. Se desarrolla una

interfase sólido-líquido en la parte superior de la masa que sedimenta. Las partículas forman una especie de manta que sedimenta como una masa total presentando una interfase distinta con la fase líquida. Dentro del sedimentador se desarrollan varias zonas, caracterizadas por diferente concentración de sólidos y, por lo tanto, diferente velocidad de sedimentación. Presenta velocidades de sedimentación menores que en la sedimentación libre. Situación en que se presenta: en los tanques de sedimentación secundaria empleados en las instalaciones de tratamiento biológico. En la sedimentación de los flóculos de alúmina en los procesos de tratamientos de agua.

Dependiendo de cómo se realice la operación, la sedimentación puede clasificarse en los siguientes tipos:

- **Sedimentación intermitente:** el flujo volumétrico total de materia fuera del sistema es nulo, transcurre en régimen no estacionario. Este tipo de sedimentación es la que tiene lugar en una probeta de laboratorio, donde la suspensión se deja reposar.
- **Sedimentación continua:** la suspensión diluida se alimenta continuamente y se separa en un líquido claro y una segunda suspensión de mayor concentración. Transcurre en régimen estacionario.

2.3 Teoría de la sedimentación discreta

El fundamento para la sedimentación de partículas discretas es la ley de Newton, que se basa en la suposición de que las partículas son esféricas con diámetros homogéneos. Cuando una partícula se sedimenta, va acelerándose hasta que las fuerzas que provocan la sedimentación, en particular el peso efectivo de la partícula, se equilibran con las resistencias o fuerzas de fricción

ofrecidas por el líquido. Cuando se llega a este equilibrio, la partícula alcanza una velocidad de sedimentación constante, denominada velocidad final de sedimentación de la partícula.

Si se considera que una partícula que ha alcanzado su velocidad final, puede escribirse el equilibrio de fuerzas correspondiente. La fuerza que provoca la sedimentación, en este caso el peso efectivo de la partícula, es la diferencia entre su peso y el empuje hidrostático:

$$F_s = v\rho_s g - v\rho_L g = (\rho_s - \rho_L)gv$$

[Ecuación No. 2]

Donde:

F_s = peso efectivo de la partícula

ρ_s = densidad de la partícula

ρ_L = densidad del líquido

g = aceleración de la gravedad

v = volumen de la partícula, $1/6\pi d^3$, donde "d" es el diámetro de la partícula esférica

La fuerza de resistencia que trata de impedir la sedimentación:

$$F_D = C_D A(\rho_L V^2/2)$$

[Ecuación No. 3]

Donde:

F_D = es la fuerza de resistencia

C_D = es el coeficiente de fricción

A = es el área proyectada de la partícula, $A=1/4\pi d^2$

V = es la velocidad relativa entre la partícula y el fluido

Para las condiciones que definen la velocidad final de sedimentación, $F_S = F_D$, con lo cual las ecuaciones anteriores dan:

$$(\rho_s - \rho_L)gv = C_D A(\rho_L V_s^2 / 2)$$

[Ecuación No. 4]

Donde:

$V = V_s$ = Velocidad de sedimentación

Se sustituye $V = 1/6\pi d^3$, $A = 1/4\pi d^2$, y se resuelve esta ecuación para la velocidad final:

$$V_s = \left[\frac{4}{3} \left(\frac{g}{C_D} \right) \frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L} d \right]^{\frac{1}{2}};$$

[Ecuación No. 5]

Muchos problemas de sedimentación en los tratamientos de aguas residuales se presentan en la zona de Stokes. Sustituyendo $C_D = 24/N_R = 24(\mu_L/d)(V_s)(\rho)$ en la ecuación no. 4 y simplificando, se obtiene la Ley de Stokes:

$$V_s = \left(\frac{1}{18} \right) \frac{\rho_s - \rho_L}{\eta_L} g d^2$$

[Ecuación No. 6]

Donde:

V_s = Velocidad de sedimentación de la partícula

ρ_s = densidad de la partícula

ρ_L = densidad del líquido

η_L = Viscosidad del líquido

d = diámetro de la partícula

Acorde con lo visto, las condiciones que deben cumplirse para que sea legítimo utilizar esta expresión son las siguientes:

- Velocidad de la esfera constante.
- Líquido infinito, en reposo en el infinito.
- Número de Reynolds pequeño ($Re < 0.5$)

2.4 Teoría de sedimentación con floculación

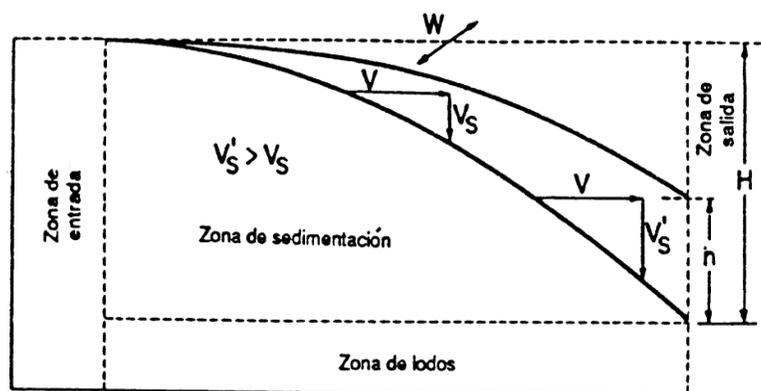
Se denominan suspensiones coloidales (o coloides) a los sistemas físico-químicos estables formados por dos fases: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa (en menor proporción) en forma de partículas, por lo general sólidas. La teoría de la estabilidad de los coloides se conoce como la teoría de la doble capa eléctrica, debido a cómo se modela la superficie intermedia entre la partícula coloidal y el seno del líquido. La primera teoría sobre la doble capa eléctrica la propuso Helmholtz en 1879, y fue modificada, posteriormente, por varios investigadores como Gouy, Chapman y Stern. Parte de la base es que las cargas superficiales de la partícula coloidal atraen iones de carga opuesta, estableciéndose un estado de carga neutra entre la partícula y su alrededor inmediato.

En esta zona de carga neutra, el continuo movimiento de las moléculas de agua impone la existencia de una capa difusa de cargas eléctricas que se extienden hacia el seno del agua. Aparecen así varias zonas que se denominarán:

- Capa superficial del coloide (carga negativa), donde existe un potencial eléctrico denominado Potencial de Nernst.
- Capa de Stern, constituida por cargas de signo positivo, atraídas fuertemente por la superficie coloidal, donde el potencial eléctrico se denomina potencial de Stern.
- Capa difusa de Gouy-Chapman, constituida por el resto de iones móviles, hasta la superficie neutra del líquido.

La sedimentación con floculación tiene lugar cuando la velocidad de sedimentación de las partículas aumenta, debido a efectos de coalescencia con otras partículas. Un diagrama de sedimentación con floculación es el que se muestra en la figura 2. Las trayectorias de sedimentación de las partículas tienen forma curva, en lugar de las líneas rectas que se producen en la sedimentación de partículas discretas.

Figura 2. **Modelo de un tanque de sedimentación con floculante**

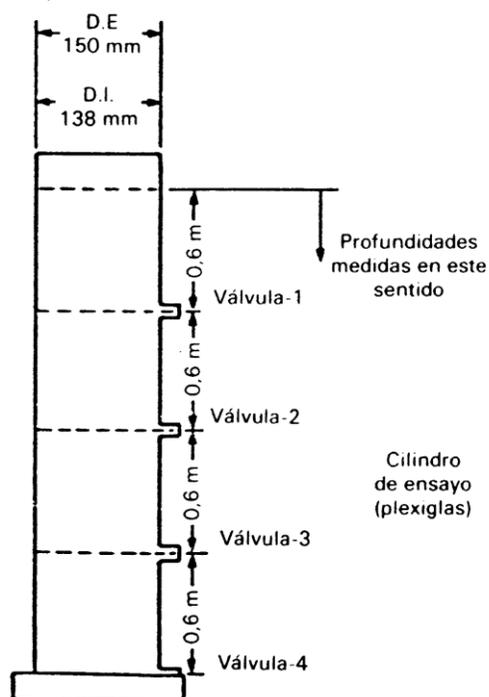


Fuente: R. S. Ramalho, *Tratamiento de aguas*. p. 95.

Los criterios de diseño para sistemas en los que se hace una sedimentación con floculación se establecen a través de ensayos de

sedimentación en laboratorio. En la figura 2 se muestra una columna típica de sedimentación de laboratorio. La concentración de sólidos en suspensión se mantiene uniforme en la columna, al principio de los ensayos, por medio de un agitador portátil. La altura de la columna es aproximadamente la misma que la del tanque de sedimentación que se pretende diseñar. La temperatura se mantiene constante durante los ensayos. Con fines prácticos se puede disponer de una columna de sedimentación (figura 3) de unos 2.4 metros de altura, disponiendo de aberturas para muestreo a profundidades de 0.6, 1.2, 1.8 y 2.4 metros. Los datos obtenidos en dichos puntos se utilizan para determinar la velocidad de sedimentación y su relación con el tiempo de retención.

Figura 3. **Columna de sedimentación de laboratorio**



Fuente: Maldonado. R. S. Ramalho, *Tratamiento de aguas*. p. 103.

Etapa 1. Rellenar la columna con el agua residual, manteniendo una concentración uniforme de sólidos en suspensión a lo largo de la misma. Para mantener la muestra homogénea, debe usarse un agitador portátil.

Etapa 2. Quitar el agitador del cilindro o columna. En cada una de las aberturas de muestreo, establecer la concentración de sólidos en suspensión en momentos determinados.

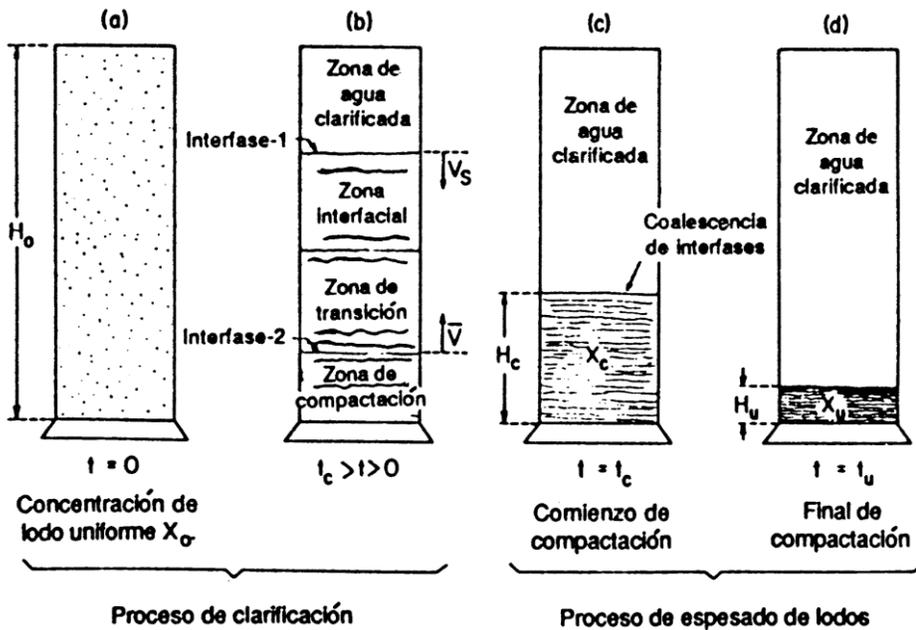
2.5 Teoría de la sedimentación por zonas

La sedimentación por zonas se presenta en clarificadores o sedimentadores con lodos coagulados químicamente, o activos con concentraciones que exceden los 500 mg/L. La capa de lodos presenta varias zonas perfectamente diferenciadas. Cada zona se caracteriza por una concentración específica en lodos y por una velocidad de sedimentación determinada. Se estudia lo que ocurre cuando una suspensión que tiene una concentración en lodos uniforme x_0 (mg/l) se coloca en un cilindro de sedimentación (figura 4).

Los lodos comienzan a precipitarse, estableciéndose una interfase (interfase 1) entre la superficie de la capa de sólidos que están sedimentándose y el líquido clarificado que se presenta en la parte superior. La zona inferior del líquido clarificado es lo que se denomina zona interfacial. La concentración de lodos en esta zona es uniforme, precipitándose todo ello como una capa de materia a velocidad constante (V_s). Simultáneamente a la formación de la interfase 1 y de la zona interfacial, empieza una compactación de los sólidos en suspensión en el fondo del cilindro (zona de compactación). En esta zona la concentración de sólidos en suspensión es también uniforme, y la interfase que bordea esta zona (interfase 2) avanza en el cilindro con una velocidad constante (\bar{V}).

Entre la zona interfacial y la zona de compactación hay una zona de transición. En la misma, la velocidad de sedimentación de los sólidos disminuye debido al incremento de la viscosidad y de la densidad de la suspensión. En esta misma zona, el lodo cambia gradualmente de concentración entre la correspondiente a la zona interfacial a la de la zona de compactación.

Figura 4. Sedimentación por zonas



Fuente: R. S. Ramalho, *Tratamiento de aguas residuales*. p. 110.

Si se consideran las interfases 1 y 2, se puede obtener la figura 4b. La interfase 1 se mueve hacia abajo con una velocidad constante V_s , mientras que la interfase 2 se mueve hacia arriba con una velocidad constante \bar{V} . Eventualmente, las zonas de compactación e interfacial pueden llegar a encontrarse en un momento crítico (t_c), y la zona de transición desaparece (figura 4c). En este momento, el lodo sedimentado tiene una concentración uniforme x_c , que se denomina concentración crítica. Empieza la compactación y

el lodo comienza a espesarse, alcanzando eventualmente la concentración final x_u (figura 4d). La velocidad de sedimentación en el momento t_c corresponde a un valor V_c , dado por la pendiente de la tangente a la curva de sedimentación en el punto C, tal y como se indica en la figura 4, donde $V_c < V_s$. El procedimiento para diseñar clarificadores que operen en estas condiciones de sedimentación por zonas es el siguiente:

- Calcular el área de la superficie mínima que se requiere para conseguir la clarificación del lodo.
- Calcular el área de la superficie mínima requerida para conseguir el espesamiento de los lodos y alcanzar las concentraciones deseadas.
- Considerar la mayor de estas dos áreas como área de diseño para el clarificador.

2.6 Coagulación

Se denomina coagulación al proceso de desestabilización y posterior agregación de partículas en suspensión coloidal presentes en el agua, para potenciar la etapa de decantación o espesado en la que esas partículas deben separarse del agua. La desestabilización se consigue neutralizando sus cargas eléctricas, con lo que dejan de actuar las fuerzas de repulsión, su potencial Zeta se anula y los coloides tienden a agregarse por acción de masas.

El objetivo de la coagulación es cambiar las propiedades de los elementos insolubles, de modo que sean más fácilmente separables. Como es mucho más sencillo separar partículas grandes y pesadas que partículas ligeras y de poca superficie específica, el proceso de coagulación tenderá a agrupar partículas pequeñas en otras mayores y, por tanto, más sólidas, que se denominan flóculos, para así separarlas más fácilmente.

Los tamaños de partícula que podemos encontrar son los siguientes:

- Partículas que están en forma de suspensión, de tamaño $>10^{-7}$ m
- Las que forman solución coloidal, de tamaño entre 10^{-7} y 10^{-9} m
- Aquellas que forman una verdadera solución, de tamaño $<10^{-9}$ m

De esta manera, la coagulación consigue que el sistema sea inestable con el resultado final de la agregación de partículas.

Este proceso se centra en aquellas partículas cuyos tamaños oscilan entre 10^{-4} y 10^{-9} m (partículas en suspensión y soluciones coloidales), no separables por decantación (gravedad) o por filtración.

2.7 Floculación

La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microfloculos y después en los floculos más grandes que tienden a depositarse en el fondo de los recipientes construidos para este fin, denominados decantadores. El proceso de floculación es precedido por el de coagulación, por eso suele hablarse de procesos de coagulación - floculación. La coagulación es la desestabilización de las partículas coloidales causadas por la adición de un reactivo químico (coagulante) que, neutralizando las cargas electrostáticas, hace que las partículas tiendan a unirse entre sí.

En el proceso de floculación es importante conseguir la formación del floculo de mayor peso y cohesión posible ya que estas características facilitan su eliminación. En general, algunos de los siguientes medios favorecen el engrosamiento y, consecuentemente, la sedimentabilidad del floculo:

- Una coagulación previa tan perfecta como sea posible.
- Un aumento de la cantidad de flóculos en el agua. Así, conviene poner el agua en contacto con los precipitados ya formados por el tratamiento anterior (recirculación de fangos, lecho de fangos, etc.), tratando de conseguir la mayor concentración posible.
- Una agitación lenta y homogénea del conjunto con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas coloidales descargadas eléctricamente se encuentren con un flóculo.
- El empleo de ciertos productos llamados floculantes.

2.8 Cálculo del área superficial del sedimentador

El procedimiento para diseñar sedimentadores que operen en condiciones de sedimentación por zonas es el siguiente:

- Calcular el área de la superficie mínima que se requiere para conseguir la clarificación del lodo.
- Calcular el área de la superficie mínima requerida para conseguir el espesamiento de los lodos y alcanzar las concentraciones deseadas.
- Considerar la mayor de estas dos áreas como área de diseño para el sedimentador.

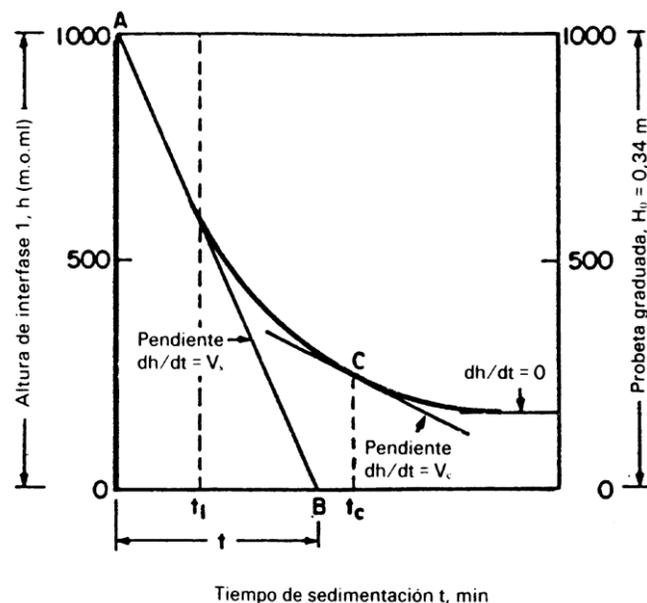
2.9 Medidas en laboratorio

Para obtener los parámetros necesarios para el diseño del sedimentador, puede llevarse a cabo un ensayo de sedimentación en el laboratorio, para el vertido considerado, usándose probetas graduadas de 1000 ml (la probeta graduada normalizada tiene una altura de 34 cm). La probeta se llena con el vertido por estudiar. Al comienzo del experimento ($t=0$), la concentración del

vertido es uniforme dentro del cilindro. La altura de la interfase 1 se va registrando a intervalos de tiempo seleccionados. Es importante remover la suspensión con agitadores y a una velocidad de 5 rph. Esta agitación simula la acción de los rastrillos mecánicos utilizados para la separación de los lodos y evita la estratificación de los mismos.

La figura 5 muestra que a partir del comienzo del experimento hasta el tiempo t_1 , la interfase 1 cae con una velocidad constante V_s dada por la pendiente de la tangente, que esencialmente coincide con la curva de sedimentación de $t=0$ a $t=t_1$. Después de $t=t_1$, esta velocidad disminuye apreciablemente. En el momento $t=t_c$, la velocidad es V_c que viene dada por la pendiente de la tangente en el punto C. En el tiempo t_c empieza la compactación y la velocidad se reduce hasta hacerse prácticamente 0, en cuyo caso la tangente se hace paralela a las abscisas.

Figura 5. Curva de sedimentación



Fuente: R. S. Ramalho, *Tratamiento de aguas*. p. 130

La velocidad de sedimentación por zonas (VSZ) corresponde a la velocidad a la cual las partículas en suspensión se sedimentan antes de alcanzar la concentración crítica x_c , y viene dada por la pendiente de la tangente AB en la figura 5:

$$V_s = \overline{OA}/\overline{OB} = H_o/t$$

[Ecuación No. 7]

Las determinaciones de laboratorio de la velocidad de sedimentación zonal deberían repetirse con lodos de diferentes concentraciones iniciales x_o (mg/L) de sólidos en suspensión. Esto pondría a disposición una familia de curvas de posible utilidad. Los valores de V_i (VSZ) se obtienen sin más que dibujar las tangentes de la sección inicial de cada una de estas curvas, y utilizando la ecuación 6.

2.10 Determinación del área mínima requerida para conseguir la clarificación de los lodos

El área mínima requerida A_c para la clarificación depende de la velocidad V_s para la cual las partículas en suspensión se sedimentan antes de alcanzar la concentración crítica interfacial x_c . En condiciones de caudal constante, la velocidad del agua sobre el vertedero no debe exceder de V_s si se quiere obtener la clarificación. Esto se deriva directamente del concepto básico de tanque de sedimentación ideal.

En consecuencia:

$$A_c = Q_e/V_s$$

[Ecuación No. 8]

Donde:

Q_e = caudal, $m^3/hora$

V_s = velocidad en la zona de sedimentación por zonas, m/min

A_c = área mínima requerida para la clarificación, m^2

El valor de la velocidad en la zona de sedimentación V_s viene determinado por la curva que corresponde a una concentración de sólidos x_o en el afluente. El valor de t se lee directamente de la abscisa (punto B). V_s se calcula entonces a partir de la ecuación 6 y A_c se puede obtener de la ecuación 7.

2.11 Determinación del área mínima requerida para conseguir el espesamiento del lodo

2.11.1 Método de Yoshioka & Dick

El hecho de que el área de la sección del clarificador pueda calcularse para asegurar que se consigue una clarificación, en la forma descrita en el apartado anterior, no significa que se alcanza la deseada concentración en sólidos en el lodo de salida, x_u . De hecho, el área de la sección requerida para el espesamiento es normalmente mayor que la requerida para la clarificación.

El procedimiento gráfico desarrollado por Yoshioka & Dick para la determinación de la sección mínima requerida para el espesamiento está basado en ciertas consideraciones. En primer lugar hay que considerar que los ensayos de sedimentación llevados a cabo en laboratorio no corresponden a un funcionamiento en continuo. La capacidad del clarificador para arrastrar los sólidos a su parte inferior, con una concentración x_i , por gravedad, en un funcionamiento discontinuo, viene dada por:

$$G_B = X_i * V_i$$

[Ecuación No. 9]

Donde:

G_B = caudal de sólido ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)

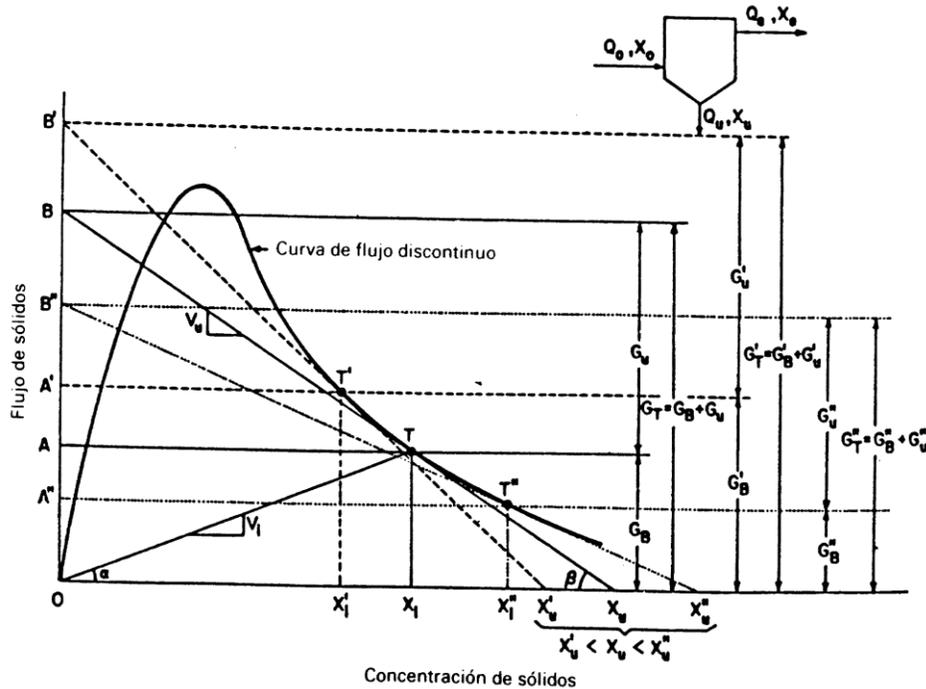
X_i = concentración de sólidos en el lodo (mg/l), lo que requiere dividir por el factor 1000, para obtener valores de kg/m^3

V_i = velocidad de sedimentación en la zona para una concentración X_i (m/min).

Hay que multiplicar por 1440 para pasar a $\text{m}/\text{día}$

A partir de la ecuación 8 puede obtenerse la curva de flujo discontinuo. La figura 6 representa una curva típica G_B en función de X_i .

Figura 6. Procedimiento gráfico para determinar G_T



Fuente: R. S. Ramalho, *Tratamiento de aguas*. p. 135.

Al considerar la curva de flujo discontinuo de la figura 6, se supone que x_u es la concentración deseada de sólidos en los lodos por extraer, especificada por el diseñador. Señalar este valor en las abscisas de la figura 6. La construcción gráfica que corresponde a este valor x_u es la indicada en la figura 6 por las líneas de trazo continuo (———). Desde x_u trazar una tangente a la curva de flujo discontinuo tal y como se indica. T es el punto de tangencia. La intersección de esta tangente con las ordenadas permite establecer la distancia OB, que corresponde al caudal de sólidos límite que puede permitirse para obtener la concentración en los lodos extraídos x_u .

En resumen, el procedimiento gráfico para determinar la sección mínima A_t , que se requiere para el espesamiento, debe ser el siguiente:

Paso 1. Construir la curva de flujo de circulación de sólidos en discontinuo, a partir de la ecuación 8 utilizando el VSZ (V_i) obtenido de los ensayos de laboratorio en discontinuo para diferentes concentraciones de sólidos X.

Paso 2. A partir del valor específico de la concentración de los lodos extraídos, x_u , en la abscisa, trazar una tangente a la curva de flujo discontinuo. La intersección de esta tangente con el eje de ordenadas dará el flujo total de sólidos G_T .

Paso 3. El área mínima que se requiere para el espesamiento se puede obtener de la ecuación:

$$A_t = \frac{M}{G_T} = \frac{Q_o * X_o}{G_T}$$

[Ecuación No. 10]

Donde:

Q_0 = el caudal del afluente

X_0 = la concentración de sólidos en el afluente

Luego de determinar el área mínima necesaria para clarificar y sedimentar, se elige la mayor. Se calcula el diámetro con base en el área elegida para obtener el primer dato de dimensionamiento del sedimentador. La altura del sedimentador no se calcula con algún procedimiento específico, pues no es condicionante para el diseño, pero según el *Manual del ingeniero químico*, en los clarificadores y sedimentadores, la altura oscila desde 15% a 25% del diámetro.

Para el cálculo del área industrial se multiplicará el mayor valor de A_i obtenido por un coeficiente que varía entre 1.2 y 1.4, es tomado normalmente el valor de 1.2.

2.12 Factores de sedimentación

La sedimentación de las partículas depende de los siguientes factores:

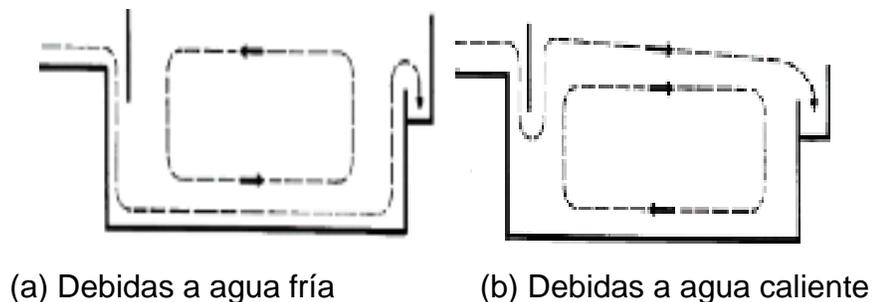
2.12.1 Calidad del agua

Las variaciones de concentración de materias en suspensión modifican, en primer lugar, la forma de sedimentación de las partículas (con caída libre o interferida), así como las propiedades de las partículas modifican la forma de depósito (sedimentación para partículas discretas y decantación para partículas floculentas). Adicionalmente, variaciones de concentración de partículas o de temperatura producen variaciones de densidad del agua y originan corrientes cinéticas o térmicas que, a su vez, generan cortocircuitos hidráulicos en las

unidades. Al entrar agua más fría al sedimentador, la masa de agua se desplaza por el fondo de este y produce el tipo de corriente indicada en la figura 7a.

En cambio, con agua más caliente se produce el fenómeno inverso que aparece indicado en la figura 8b. En el caso de variar la concentración, se producen corrientes por diferencias de densidad en las distintas masas de agua, que suelen crear fuerzas más importantes que las térmicas. Afortunadamente, la mayor concentración de partículas suele estar en el fondo, pero cualquier perturbación en el flujo, ya sea por temperatura, obstrucciones, alta velocidad de las paletas del floculador, etcétera, puede alterar el equilibrio y producir un flujo sinuoso o envolvente sobre sí mismo, muy diferente del teórico calculado, que es el que con frecuencia aparece en los sedimentadores horizontales, incluso en los bien diseñados.

Figura 7. Tipos de corriente debida al agua fría o caliente



Fuente: L. McCABE, Warren, C. SMITH, Julian, HARRIOT, Peter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. p. 148.

2.12.2 Condiciones hidráulicas

Los criterios y parámetros hidráulicos de diseño tienen gran influencia en la eficiencia de los sedimentadores o decantadores. A continuación se detallan los principales.

2.12.2.1 En la zona de sedimentación

En esta zona se debe tener un número de Reynolds lo más bajo posible y el número de Froude más elevado para tender a un flujo laminar y estabilizar el flujo. En esta zona las líneas de flujo no deben encontrarse con ningún tipo de obstrucciones que alteren su trayectoria. Adicionalmente, la presencia de flujo de pistón mejora el proceso y el flujo mezclado no lo favorece.

2.12.2.2 En la zona de entrada

La zona de entrada en un sedimentador es un conjunto de estructuras que debe permitir una distribución uniforme del flujo de agua hacia la zona de sedimentación. En una unidad de sedimentación convencional de flujo horizontal, esta distribución uniforme debe darse a todo lo ancho de la unidad y en profundidad. Las alteraciones del flujo en la zona de entrada deben evitarse y su presencia puede deberse a una velocidad excesiva del flujo en la entrada del sedimentador, o a que los orificios de ingreso sean muy grandes y el movimiento de las paletas del floculador sea tal que comunica demasiada energía al flujo. Al no haber disipación de esta energía en el tabique divisorio (caso de unidades convencionales de flujo horizontal), las masas de agua entran con diferente gradiente de velocidad, creando turbulencias que pueden extenderse dentro de la zona de sedimentación.

Similarmente, puede mencionarse como causa de corrientes cinéticas la distribución desigual del flujo en la entrada del sedimentador (orificios de distintos diámetros o algunos parcialmente obstruidos), la existencia de tabiques que dejan pasar el agua solamente por el fondo, vertederos, etcétera, lo que produce que adicionalmente modifiquen el tiempo de retención.

2.12.2.3 En la zona de salida

Esta zona se caracteriza por permitir una recolección uniforme de agua sedimentada a una velocidad tal que evite arrastrar flóculos en el efluente. Canaletas de pequeña longitud, mal ubicadas, mal niveladas o impropriadamente diseñadas producen cortocircuitos hidráulicos y zonas muertas que pueden inutilizar grandes áreas de los sedimentadores.

2.12.3 Factores externos

Paradójicamente, los factores externos al proceso de sedimentación (procesos previos a la sedimentación), prácticas operacionales y factores ambientales son los que tienen más influencia en la eficiencia de un sedimentador o decantador.

Buena o inadecuada coagulación y floculación ocasionan, respectivamente, altas o bajas eficiencias en los decantadores. Idéntico comentario cabe realizar acerca de la operación y el estado de la unidad, así como de los programas de mantenimiento existentes. A la vez, el viento, al soplar sobre la superficie de los sedimentadores, puede producir corrientes de suficiente intensidad como para inducir cambios en la dirección del flujo y alterar el precario equilibrio de las masas de agua. En unidades grandes el viento

puede crear oleajes de cierta magnitud, lo que interfiere el proceso o desequilibra la distribución del flujo en las canaletas de salida.

2.13 Parámetros que se consideran para diseñar un tanque de sedimentación

Los principales parámetros de diseño para los tanques de sedimentación son:

- Tiempo de retención
- Velocidad de arrastre
- Carga superficial
- Flujo en el tanque
- Área
- Profundidad
- Tiempo de llenado

El parámetro que define la sedimentación normalmente es la velocidad de arrastre. Además, el parámetro que establece las características del equipo es el tiempo de retención.

Algunos de los parámetros más importantes en el diseño de tanques de sedimentación son:

2.13.1 Tiempo de retención

Se define como el volumen del tanque de decantación dividido por el caudal.

2.13.2 Carga superficial o velocidad ascensorial

Se define como el caudal de agua por tratar dividido por la superficie del tanque de sedimentación.

2.13.3 Velocidad de arrastre

Es importante en las operaciones de sedimentación. Las fuerzas actuantes sobre las partículas sedimentadas son causadas por la fricción del agua que fluye sobre las mismas. En las redes de alcantarillado, es necesario mantener velocidades elevadas para que las partículas no sedimenten. En los tanques de sedimentación las velocidades horizontales se deben mantener a niveles bajos, de modo que las partículas no sean arrastradas desde el fondo del tanque.

2.14 Sedimentador

Los sedimentadores se utilizan, por lo general, con suspensiones con tamaño de partícula entre 0.05 mm y 0.2 mm, principalmente en las corrientes de procesos industriales y en los desperdicios industriales locales, y su propósito primario es producir una descarga con lodo más concentrados. Los sedimentadores son esencialmente idénticos a los clarificadores en lo que respecta a diseño y arreglo, salvo que utilizan un mecanismo de construcción más cargado y una cabeza de impulso con una capacidad de torque mayor. Estas diferencias se permiten porque en las aplicaciones de sedimentación la pulpa espesada tiene una concentración de sólidos en suspensión mucho mayor. Por consiguiente, el costo instalado de un sedimentador es de, aproximadamente, 5 a 10% superior al de un clarificador con un tanque de las mismas dimensiones.

2.14.1 Componentes

Esta unidad se puede dividir en cuatro partes o zonas.

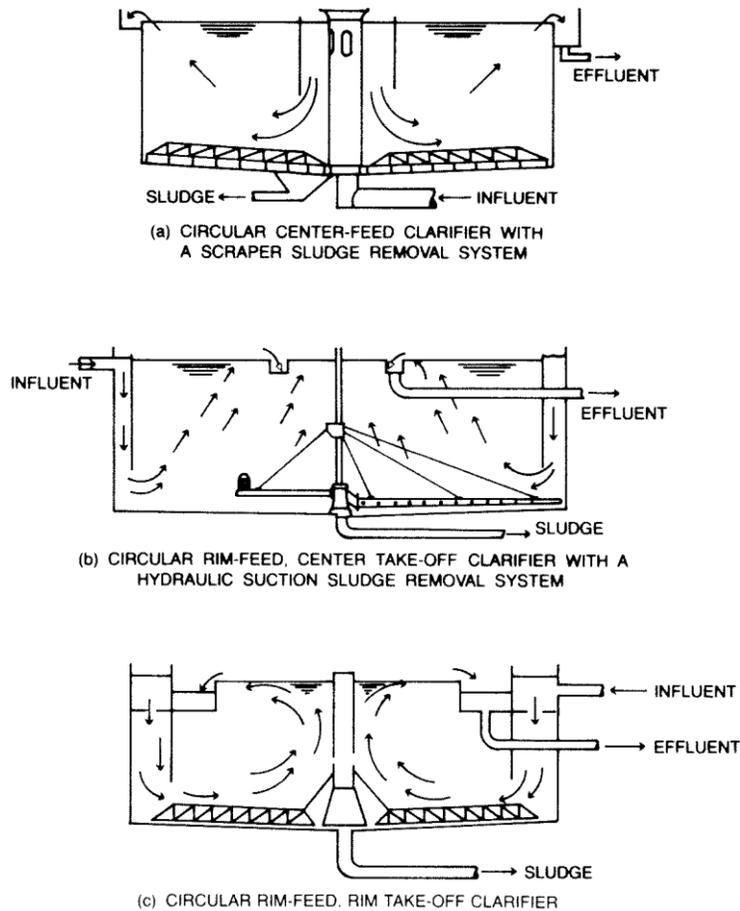
- Zona de entrada: estructura hidráulica de transición que permite una distribución uniforme del flujo dentro del sedimentador.
- Zona de sedimentación: consta de un canal con volumen, longitud y condiciones de flujo adecuados para que sedimenten las partículas. La dirección del flujo es horizontal y la velocidad es la misma en todos los puntos, flujo pistón.
- Zona de salida: constituida por un vertedero, canaletas o tubos con perforaciones que tienen la finalidad de recolectar el efluente sin perturbar la sedimentación de las partículas depositadas.
- Zona de recolección de lodos: constituida por una tolva con capacidad para depositar los lodos sedimentados, y una tubería y válvula para su evacuación periódica.

2.14.2 Criterios de diseño

- El período de diseño, teniendo en cuenta criterios económicos y técnicos, es de 8 a 16 años.
- El número de unidades mínimas en paralelo es de dos para efectos de mantenimiento.
- El período de operación es de 24 horas por día.

- El tiempo de retención será entre 1-6 horas.
- El fondo de la unidad debe tener una pendiente entre 5 a 10% para facilitar el deslizamiento del sedimento.

Figura 8. **Configuraciones de clarificadores circulares y patrones de flujo**



Fuente: PERRY, Robert H., GREEN, Don W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8th Edition. McGraw-Hill. 2008. p. 115.

2.14.3 Materiales de construcción

La materia prima para la construcción de sedimentadores circulares se puede revestir de acero al carbono. Un recubrimiento común especificado en los Estados Unidos de América es de alquitrán de hulla epóxico.

También se utiliza acero galvanizado. Este material tiene mayor aplicación en Europa. Una desventaja de este revestimiento es que puede ser rayado o dañado en el transporte y en la instalación. Sin embargo, si es instalado adecuadamente y protegido, ofrece una buena resistencia a la corrosión.

El uso de acero inoxidable ha aumentado en los últimos años para proporcionar un mecanismo de protección contra la corrosión adicional para sedimentadores circulares.

La fibra de vidrio y los plásticos también han aumentado en popularidad como materiales de construcción para tanques circulares. La fibra de vidrio se utiliza comúnmente para placas de presa y deflectores de espuma, también se utiliza ampliamente ahora para la construcción de deflectores de floculación. Las plataformas y pasarelas centrales de sedimentadores son a veces de fibra de vidrio. El aluminio también se utiliza en esta área.

2.15 Escalonamiento

2.15.1 Escala laboratorio y planta piloto

El término “escala laboratorio” se refiere a todo experimento o proceso que puede trabajarse y/o manipularse dentro de un laboratorio mientras que una planta piloto es una planta de proceso a escala reducida.

El fin que se persigue al diseñar, construir y operar una planta piloto es obtener información sobre un determinado proceso físico o químico, que permita determinar si el proceso es técnica y económicamente viable, así como establecer los parámetros de operación óptimos de dicho proceso para el posterior diseño y construcción de la planta a escala industrial. El término abarca un amplio rango de escalas, desde plantas a escala laboratorio hasta plantas a escala semi-industrial. Los avances tecnológicos en distintas áreas (electrónica, comunicaciones, micromecanizado, etc.) han hecho posible que hoy día se disponga de instrumentación y dispositivos adecuados para el diseño y construcción de plantas a escala muy reducida, plantas a microescala, capaces de operar en idénticas condiciones de presión y temperatura que las plantas industriales. Estos avances han conducido a que estas plantas a microescala, cuenten con sistemas de adquisición de datos, supervisión y control (sistemas SCADA) y puedan ser automatizadas, de manera que la producción experimental se multiplique y se reduzca así, considerablemente el tiempo necesario para el estudio y la optimización de un proceso físicoquímico concreto.

Una planta piloto debe ser mucho más flexible que una planta a escala industrial en cuanto al rango permisible de sus parámetros de operación o variables de proceso, ya que una planta industrial opera siempre en las mismas condiciones, mientras que una planta piloto, por el hecho de estar destinada a la investigación o estudio de un proceso, debe permitir trabajar en un amplio rango de valores de temperatura, presión, etc., de manera que puedan realizarse experimentos o ensayos con valores bien distintos de las variables de proceso y poder determinar, así, los valores óptimos.

El uso de plantas de proceso a escala piloto tiene como propósitos principales:

- Predecir el comportamiento de una planta a nivel industrial, operando la planta piloto a condiciones similares a las esperadas. En este caso los datos obtenidos serán la base para el diseño de la planta industrial.
- Estudiar el comportamiento de plantas industriales ya construidas, en donde la planta piloto es una réplica y estará sujeta a condiciones de operación previstas para la planta industrial. En este caso a la planta piloto se le llama modelo y tiene como función principal mostrar los efectos de los cambios en las condiciones de operación de manera más rápida y económica que si se realizaran en la planta original.

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1 Variables

Una variable es una propiedad, característica o atributo que es susceptible a asumir diferentes valores. Existen variables independientes, consideradas como las causas y variables dependientes, consideradas como el factor que es observado y medido para determinar el efecto de la variable independiente.

Se realizó la investigación y el estudio de la información pertinente, citando artículos científicos, trabajos de graduación de diversas universidades a nivel latinoamericano y europeo. Esta investigación dio la certeza para establecer la variable de entrada que se modificó para cuantificar el efecto sobre los resultados y la hipótesis; y la variable que se estableció como constante.

Tabla II. **Definición operacional de las variables para el análisis químico de las propiedades mineralógicas de los lodos residuales y diseño de equipo**

No.	Variable	Fórmula química/unidad de medida	Factor potencial de diseño		Factores perturbadores	
			Constante	Variable	Controlables	No controlables
Parámetros y reactivos involucrados en la determinación del análisis químico a los lodos residuales						
1	Concentración	[M]		x		x
2	Titulación	mL		x	x	
3	Volumen del analito	mL	x		x	
4	Ácido sulfosalicílico	HO-C ₆ H ₃ (COOH)-SO ₃ Hx2H ₂ O	x		x	
5	Difenilamina	C ₁₂ H ₁₁ N	x		x	
6	Naranja de xilenol	C ₃₁ H ₂₈ N ₂ Na ₄ O ₁₃ S	x		x	
7	Negro de eriocromo T	C ₂₀ H ₁₂ N ₃ O ₇ SNa	x		x	
8	Ferrocianuro de potasio	K ₄ [Fe(CN) ₆]x3H ₂ O	x		x	
9	3,3 - Dimetilnaftidina	C ₂₂ H ₂₀ N ₂	x		x	
10	Calcón	C ₂₀ H ₁₃ NaO ₅ SN ₂	x		x	
11	EDTA 0.1 M	C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₈		x	x	
12	Sulfato de zinc 0.1M	ZnSO ₄		x	x	
Determinación del contenido mineralógico de lodos residuales						
1	Hierro férrico	Fe ⁺³		x	x	
2	Zinc	Zn ⁺²		x	x	
3	Hierro ferroso	Fe ⁺²		x	x	
4	Aluminio	Al ⁺³		x	x	
5	Magnesio	Mg ⁺²		x	x	
6	Calcio	Ca ⁺²		x	x	
Nota: para los elementos zinc, hierro férrico, magnesio y calcio, determinar si se encuentran como sulfatos o como carbonatos. Para los elementos hierro férrico, ferroso y aluminio.						

Continuación de la tabla II.

Condiciones de la experimentación						
1	Concentración	[M]		X		X
2	Concentración final	[M]	X			X
3	Velocidad de sedimentación	m/min		X		X
4	Caudal de afluente	m ³	X			X
5	Caudal de efluente	m ³		X		X
6	Caudal de lodos espesados	m ³		X		X
7	Floculante	%	X		X	
8	Tiempo de residencia	min	X		X	
Diseño de equipo						
1	Diámetro	m		X		
2	Profundidad	m		X		
3	Altura de cono	m		X		
4	Capacidad de almacenamiento	m		X		
Materiales de construcción y equipo empleado						
1	Fibra de vidrio	-		X		
2	Variador de frecuencia	rpm		X		

Fuente: elaboración propia.

Dentro de los parámetros de la investigación la variable dependiente corresponde a la velocidad de sedimentación, y la variable independiente es la concentración inicial de sólidos.

3.1.1 Variables independientes

- **Concentración inicial de la suspensión**

- Suspensión de lodos

La concentración es la variable independiente en el experimento. Esta variable afecta directamente la velocidad de sedimentación.

- **Determinación del contenido mineralógico de los lodos**

- EDTA 0.1 M

El EDTA forma quelatos con casi todos los iones metálicos, siendo estas reacciones la base de diferentes métodos analíticos.

- Sulfato de zinc 0.1 M

El Zn^{+2} en solución titula el EDTA en exceso agregado intencionalmente en el método de determinación de Aluminio.

3.1.2 Variables dependientes

- Velocidad de sedimentación de las diferentes suspensiones

- **Vs**

La velocidad de sedimentación es dependiente de la concentración de la suspensión de lodos. Es la variable estudiada en el experimento.

- **Diseño del sedimentador para espesar los lodos residuales del proceso de fabricación de $ZnSO_4$**
 - **Diseño**

Etapa en la que se elabora el plano del equipo con las medidas pertinentes, calculadas para el funcionamiento del equipo en ciertas condiciones específicas iniciales.

3.2 Delimitación del campo de estudio

- **ÁREA:** consumo industrial, agroindustrial y tratamientos de agua.
- **INDUSTRIA:** agroindustrial
- **PROCESO:** diseño y construcción de un sedimentador circular a escala piloto para espesamiento de lodos residuales de un proceso de $ZnSO_4$ a partir del Zn mineral en una planta de fertilizantes.
- **ETAPA DE PROCESO:** evaluación a nivel laboratorio del diferencial de altura respecto del tiempo de sedimentación; velocidad de los lodos residuales de un proceso de fabricación de $ZnSO_4$ a partir del Zn mineral para diferentes concentraciones iniciales de la suspensión para determinar las dimensiones de un sedimentador
- **UBICACIÓN:** la suspensión de lodos residuales empleados en el proyecto es obtenida de la etapa final del proceso de fabricación de $ZnSO_4$ de la planta Representaciones Químicas, S. A. Las pruebas de sedimentación y el análisis fisicoquímico de las propiedades de los lodos

residuales se realizaron en el área del Laboratorio de análisis químico cuantitativo del departamento de control de calidad “REPRESENTACIONES QUIMICAS S. A.”, kilómetro 42.5, antigua carretera a Palín, Colonia San Benito, Palín, Escuintla, Guatemala, Centro América.

- **CLIMA:** el clima no es determinante para la manipulación de estos lodos una vez no se trabajen en condiciones extremas de calor o frío. El clima en la empresa es templado con una temperatura ambiental promedio de 25°C.

3.3 Recurso humano disponible

- **Investigador:** Walter René Mejía Ajcucún

Desarrolló el trabajo de investigación que incluyó la recolección de muestra, análisis y diseño del equipo. Es el responsable de la elaboración del informe de investigación.

- **Asesor:** Ing. Quím. Sergio Alejandro Recinos

Responsable de asesorar y supervisar el trabajo de investigación por medio de la observación y participación de ideas para la realización del ejercicio profesional supervisado.

- **Co-asesor:** Ing. Quím. Estuardo Morfin Sarceño

Responsable del asesoramiento directo del trabajo de investigación y conjuntamente proporcionó los recursos para el desarrollo de la investigación.

3.4 Recursos materiales disponibles (equipo, material de vidrio, reactivos)

Se escribe una lista de la materia prima, reactivos, cristalería y equipos empleados para la elaboración del proyecto.

3.4.1 Materia prima y reactivos

- Lodos residuales
- Agua
- Ácido sulfúrico
- Ácido clorhídrico
- Ácido nítrico
- Ácido acético
- Sulfato de zinc 0.1 M
- Solución buffer pH 10
- Acetato de sodio 1M
- Acetato de amonio al 10%
- Acetato de amonio
- Alcohol etílico
- Dicromato de potasio
- Ferricianuro potásico al 1%
- Fluoruro de amonio
- Hidróxido de potasio
- Hidróxido de sodio en lenteja indicador 3,3 dimetilnaftidina
- Indicador ácido sulfosalisílico
- Indicador negro de ericromo T
- Indicador calcón

- Indicador ditizona
- Indicador difenilamina
- Indicador naranja de xilenol
- Mezcla de ácido fosfórico – ácido sulfúrico
- Solución de sal disódica de EDTA 0.1 M
- Agua desmineralizada

3.4.2 Material de vidrio

- 1 vaso de precipitado de 100 mL
- 1 vaso de precipitado de 250 mL
- 1 vaso de precipitado de 500 mL
- 1 vaso de precipitado de 1000 mL
- 1 vaso de precipitado de 2000 mL
- 1 vaso de precipitado de 4000 mL
- 1 balón aforado de 250 mL
- 1 balón aforado de 500 mL
- 1 balón aforado de 1000 mL
- 1 vidrio de reloj
- 1 embudo
- 1 piseta
- 1 gotero
- Varillas de agitación
- 1 bureta de 10 ml
- 6 matraces de 250 mL
- 1 matraz de 500 mL
- 1 perilla de succión
- 1 pipeta serológica de 5 mL

- 1 pipeta serológica de 10 mL
- 1 pipeta volumétrica de 5 mL
- 1 pipeta volumétrica de 25 mL
- 1 probeta de 10 mL
- 1 probeta de 25 mL
- 1 probeta de 100 mL
- 1 crisol tipo “gooch”

3.4.3 Equipo

3.4.3.1 Equipo de laboratorio químico

- Soportes universales
- Plancha de calentamiento marca Coming, voltaje de 120 V
- Potenciómetro
- Mechero
- Balanza analítica marca Ohaus Adventurer, voltaje 8-15 V, máxima capacidad de 150 g, rango de precisión +- 0.001g

3.4.4 Determinación de velocidad de sedimentación

- Variador de frecuencia
- Cronómetro
- Papel milimetrado

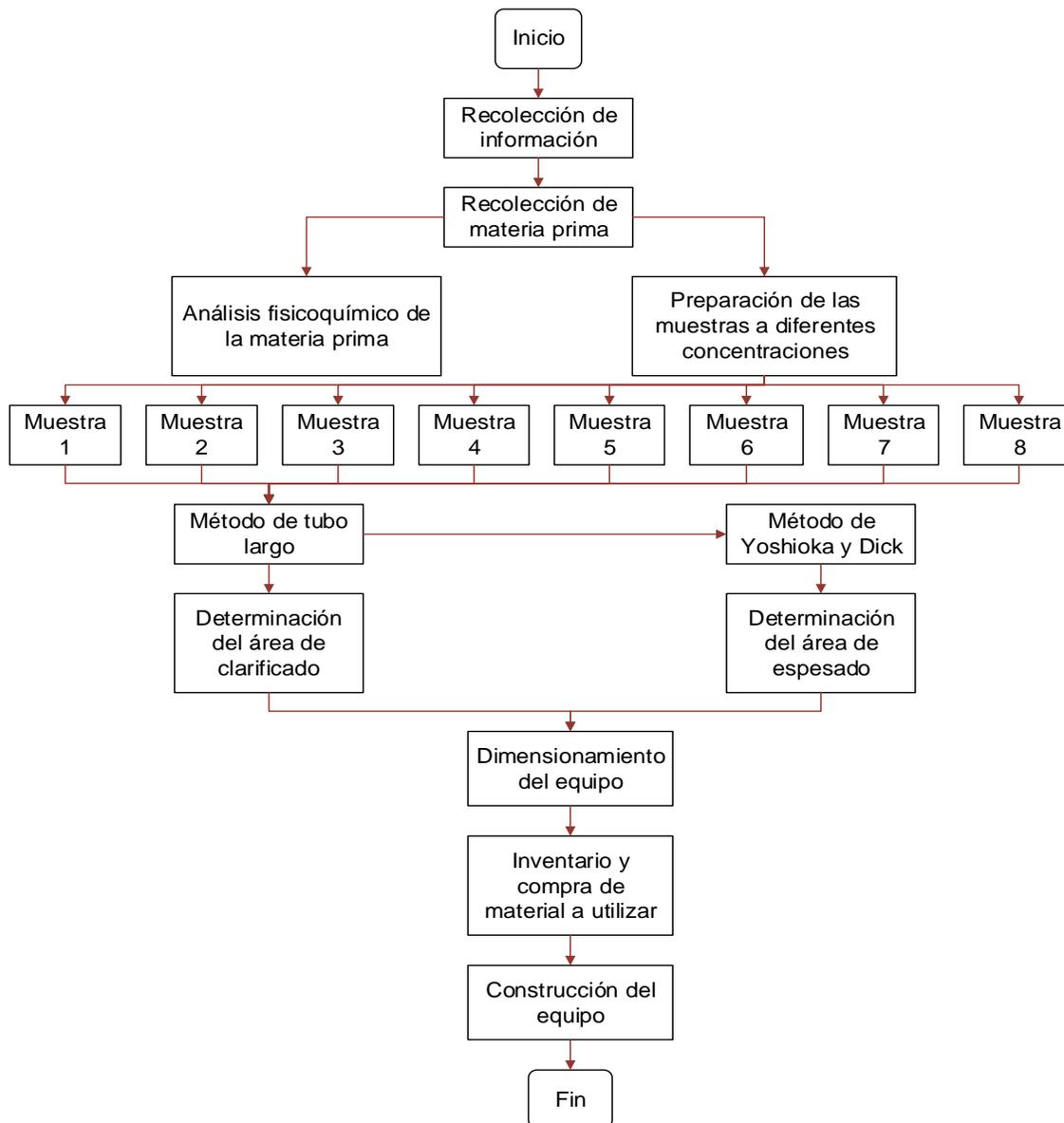
3.4.5 Diseño de equipo

- Computadora
- Autocad

3.5 Técnica cuantitativa

3.5.1 Diseño general

Figura 9. Diagrama de flujo de procesos



Fuente: elaboración propia.

3.6 Recolección y ordenamiento de la información

La suspensión tomada del proceso de producción de sulfato de zinc, es la parte residual, aparentemente inservible. La información consultada refiere que estos lodos pueden ser reutilizados para obtener sulfato férrico con el proceso adecuado y a ciertas condiciones iniciales, en donde un factor predominante para poder reducir costos de producción, es el contenido de humedad. La necesidad de espesar estos lodos surge, entonces, por optimizar estos materiales, hecho que se traduce en un aumento del margen de ganancia de la empresa.

Esta suspensión fue analizada y trabajada con el método del tubo largo y el método de Yoshioka & Dick para determinar el dimensionamiento del equipo necesario para espesar estos lodos.

3.7 Tabulación, orden y procesamiento de la información

La suspensión fue recolectada en la parte final del proceso de obtención de $ZnSO_4$ en solución, específicamente en el tercer lavado del mineral. La suspensión se bombea del contenedor hacia el recipiente colector de la muestra. Se agita el recipiente para homogeneizar la suspensión. La muestra se almacena en un recipiente de 2000 litros.

Posteriormente, se condujo esta muestra al laboratorio para determinar sus propiedades fisicoquímicas, entre ellas los elementos mineralógicos presentes, humedad, olor y color.

Se prepararon ocho suspensiones con concentraciones de sólidos iniciales diferentes, comenzando desde 5% p/p hasta 20% p/p, se les agregó

floculante, y con cada una se realizó el método de tubo largo o ensayo de sedimentación de laboratorio para determinar su velocidad de sedimentación. Con base en esta velocidad, se determina el área y el diámetro del sedimentador y con el tiempo de residencia, se determina la altura necesaria. Se devuelven las suspensiones al contenedor del tercer lavado.

Con las dimensiones del equipo establecidas, se procede a construir el sedimentador circular a escala piloto.

3.7.1 Recolección de la muestra

Se recolecta 1 garrafa de 20 litros de los lodos del contenedor que almacena la suspensión del tercer lavado. Se agita por un lapso de 30 minutos para homogeneizar la muestra y se conduce al área de laboratorio. Se etiqueta anotando los datos de procedencia y volumen.

3.7.2 Análisis fisicoquímico de la muestra

3.7.2.1 Análisis físico de la muestra

Las propiedades físicas de la suspensión que se consideran son el color y olor. Ambas propiedades son determinadas por la inspección visual y olfativa.

3.7.2.2 Análisis químico de la muestra

- **Determinación de humedad de la muestra**
 - Pesar 100 gramos de los lodos residuales y colocarlos en la mufla a una temperatura de 80° C por 3 horas.

- Pesar la muestra seca y anotar el valor obtenido.
- Determinar el porcentaje de humedad con base en la ecuación

$$\% \text{ Humedad} = \left[1 - \frac{\text{gramos de peso seco de muestra}}{\text{gramos de lodos residuales iniciales}} \right] * 100$$

[Ecuación No. 11]

- **Digestión de lodos residuales secos**

- Pesar cinco gramos de muestra de lodos residuales y colocarlos en un vaso de precipitado de 500 mL
- Agregar al vaso de precipitado 100 mL de agua regia y 300 mL de agua desmineralizada
- Calentar durante dos horas o hasta que la muestra se haya disuelto
- Filtrar la solución resultante y lavar el papel filtro con 25 mL de agua desmineralizada caliente por lo menos cinco veces o hasta que el pH de los lavados tenga un valor de 7

- **Determinación de insolubles**

- Colocar el papel filtro que contiene los insolubles, procedente de la digestión, en un crisol
- Colocar el crisol con el papel filtro en la mufla a una temperatura de 80° C por 3 horas
- Sacar el crisol de la mufla y dejar enfriar a temperatura ambiente y luego pesarlo
- Calcular el porcentaje de insolubles

$$\% \text{ Insolubles} = \frac{R}{W} * 100$$

[Ecuación No. 12]

Donde:

R = Diferencia del peso obtenido después de secar y el peso inicial del papel filtro

W = Peso de la muestra inicial de los lodos residuales

- **Preparación de la solución obtenida de la digestión**
 - Aforar la solución en un balón de 1000 mL con agua desmineralizada caliente
 - Enfriar a temperatura ambiente e inspeccionar que el aforo se encuentre en 1000 mL. Caso contrario, volver a aforar

- **Método de determinación de zinc y magnesio**
 - **Consumo para zinc y magnesio**
 - Tomar una alícuota de 25 mL de la solución aforada y verterla a un matraz
 - Agregar agua desmineralizada hasta completar 100 mL
 - Agregar 25 mL de solución buffer 10. Asegurarse que el pH sea 10, de lo contrario, agregar más solución buffer
 - Agregar una gota de indicador negro de eriocromo
 - Titular con EDTA 0.1 M hasta alcanzar un viraje de color violeta a azul celeste
 - Anotar el volumen consumido (Volumen “a”)

- **Consumo para Zinc**

- Tomar una alícuota de 25 mL de la solución aforada y verterla a un matraz
- Agregar agua desmineralizada hasta completar 100 mL
- Asegurarse que el pH se encuentre en 4.5, de lo contrario, agregar HCl o NaOH según corresponda
- Agregar 2 gotas de ferricianuro de potasio y una gota de 3,3-dimetilnaftidina
- Titular con EDTA 0.1 M hasta alcanzar un viraje de color rosado claro a transparente
- Anotar el volumen consumido (Volumen “b”)

- **Cálculo del contenido de magnesio**

$$\% Mg = \frac{Factor * (a - b) * [M_{EDTA}]}{m}$$

[Ecuación No. 13]

- **Cálculo del contenido de zinc**

$$\% Zn = \frac{Factor * (b) * [M_{EDTA}]}{m}$$

[Ecuación No. 14]

Donde:

Factor = Es el factor para determinar un elemento específico. Para el caso del Mg es 2.431 y para el Zn es 6.537

[M_{EDTA}] = Concentración de EDTA

m = Peso de la muestra contenida en la alícuota tomada

- **Método de determinación de calcio como CaCO₃**

- Tomar una alícuota de 25 mL de la solución aforada y verterla a un matraz
- Agregar agua desmineralizada hasta completar 100 mL
- Agregar una solución de NaOH, asegurándose que el pH sea 12
- Agregar 4 gotas de indicador calcón
- Titular con EDTA 0.1 M hasta alcanzar un viraje de color rojo vinoso a azul
- Anotar el volumen gastado, “a”
- Calcular el contenido de Calcio

$$\% Ca = \frac{Factor * a * [M_{EDTA}]}{m}$$

[Ecuación No. 15]

Donde:

Factor = es el factor para determinar un elemento específico. Para el caso del Ca es 4.008

[M_{EDTA}] = concentración de EDTA

m = peso de la muestra contenida en la alícuota tomada

- **Método de determinación de Ca como CaSO₄**

- Pesar una muestra de 1 gramo de lodos en un matraz de 250 mL.
- Agregar 100 mL de agua y 50 mL de buffer 10
- Agitar por 30 minutos
- Filtrar la suspensión y trasvasar la solución obtenida a un matraz de 250 mL

- Agregar 30 mL de EDTA 0.1 M
- Agitar por 20 minutos
- Dejar muestra en ebullición por 5 minutos
- Enfriar a temperatura ambiente y agregar indicador negro de ericromo
- Titular por retroceso con $ZnSO_4$ estandarizado 0.1M hasta que se observe un viraje de color azul a rojo vinoso
- Calcular el contenido de calcio utilizando la ecuación siguiente

$$\% Ca = \frac{Factor * (mL_{Edta\ agregados} - mL_{Edta\ detectados\ con\ ZnSO_4}) * [M_{EDTA}]}{m}$$

[Ecuación No. 16]

Donde:

Factor = es el factor para determinar un elemento específico. Para el caso del Ca es 4.008

$[M_{EDTA}]$ = concentración de EDTA

m = peso de la muestra contenida en la alícuota tomada

- **Método de determinación de aluminio**

- Tomar una alícuota de 25 mL de la solución aforada y verterla a un matraz
- Agregar agua desmineralizada hasta completar 100 mL
- Agregar una solución de NaOH o HCl según corresponda, asegurándose que el pH se encuentre en 1 o 2
- Agregar con una pipeta volumétrica 10 mL de EDTA 0.1 M y calentar a ebullición por 5 minutos
- Agregar 5 gotas de indicador ditizona

- Titular con solución $ZnSO_4$ 0.1 M hasta alcanzar un viraje de color azul a rojo vinoso
- Anotar el volumen gastado, “a”
- Calcular el contenido de aluminio

$$\% Al = \frac{Factor * (V_{EDTA} * [M_{EDTA}] - a * [M_{ZnSO_4}])}{m}$$

[Ecuación No. 17]

Donde:

Factor = es el factor para determinar un elemento específico. Para el caso del Al es 2.698

$[M_{EDTA}]$ = concentración de EDTA

$[M_{ZnSO_4}]$ = concentración de $ZnSO_4$

m = peso de la muestra contenida en la alícuota tomada

- **Método de determinación de hierro férrico**

- Pesar 0.5 gramos de la muestra y verterla en un matraz de 250 mL
- Agregar agua desmineralizada hasta completar 100 mL
- Llevar el pH a 2.5 ajustándolo con NaOH 0.5 N o HCl 0.5 N
- Agregar 1 gota de indicador ácido sulfosalicílico
- Titular con EDTA 0.1 M hasta alcanzar un viraje de color violeta a amarillo pálido
- Anotar el volumen gastado, “a”
- Calcular el contenido de hierro férrico

$$\% Fe^{+3} = \frac{Factor * a * [M_{EDTA}]}{m}$$

[Ecuación No. 18]

Donde:

Factor = factor para determinar un elemento específico. El de Fe^{+3} es 5.585

$[M_{EDTA}]$ = concentración de EDTA

m = peso de la muestra

- **Método de determinación de hierro ferroso**

- Pesar 0.5 gramos de la muestra y verterla en un matraz de 250 mL
- Agregar agua desmineralizada hasta completar 100 mL
- Agregar 25 mL de agua regia (mezcla de ácido fosfórico – ácido sulfúrico)
- Agregar 1 gota de difenilamina
- Titular con dicromato de potasio hasta alcanzar un color púrpura oscuro
- Anotar el volumen gastado, “a”
- Calcular el contenido de hierro ferroso

$$\% Fe^{+2} = \frac{Factor * a * [M_{K_2Cr_2O_7}]}{m}$$

[Ecuación No. 19]

Donde:

Factor = factor para determinar un elemento específico. El de Fe^{+2} es 5.585

$[M_{K_2Cr_2O_7}]$ = concentración de $K_2Cr_2O_7$

m = peso de la muestra

- **Determinación del contenido de óxido férrico**

$$\% Fe_2O_3 = \% Fe^{+3} * \frac{159.69}{55.85}$$

[Ecuación No. 20]

- **Determinación del contenido de óxido ferroso**

$$\% FeO = \% Fe^{+2} * \frac{71.844}{55.85}$$

[Ecuación No. 21]

- **Determinación del contenido de alúmina**

$$\% Al_2(SO_4)_3 = \% Al * \frac{101.96}{26.98}$$

[Ecuación No. 22]

- **Determinación del contenido de carbonato de magnesio**

$$\% MgCO_3 = \% Mg * \frac{84.3139}{24.31}$$

[Ecuación No. 23]

- **Determinación del contenido de carbonato de zinc**

$$\% ZnCO_3 = \% Zn * \frac{125.39}{65.38}$$

[Ecuación No. 24]

- **Determinación del contenido de carbonato de calcio**

$$\% CaCO_3 = \% Ca * \frac{100.08}{40.08}$$

[Ecuación No. 25]

- **Determinación del contenido de sulfato de calcio**

$$\% CaSO_4 = \% Ca_{yeso} * \frac{136.14}{40.08}$$

[Ecuación No. 26]

3.7.3 Dimensionamiento del sedimentador

A continuación se describe el procedimiento para dimensionar el sedimentador circular a escala piloto. Consta de las siguientes fases: preparación de las concentraciones iniciales; cálculo de la velocidad de sedimentación; cálculo del área, diámetro y altura, diseño final; materiales de construcción; costo y construcción del equipo.

3.7.3.1 Concentraciones iniciales

Se llena una garrafa de 20 litros con los lodos del contenedor que almacena la suspensión del tercer lavado. Se agitó por un lapso de 30 minutos para homogeneizar la muestra. Se prepararon ocho suspensiones con concentraciones de sólidos iniciales diferentes, comenzando desde 5% p/p hasta 20% p/p, a cada una se le agrega floculante.

3.7.3.2 Velocidad de sedimentación

Con cada suspensión de diferente concentración se realizó el método del tubo largo para determinar la velocidad de sedimentación para cada muestra, utilizando probetas de 250 mL con altura de 38 cm, diámetro de 2.54 cm. Las probetas se llenaron con las suspensiones, se agitaron y luego se dejaron sedimentar libremente, tomando la altura de la interfase líquido-sólido cada cinco minutos. Para medir las alturas de una forma exacta, se utilizó papel milimetrado que fue cuidadosamente colocado en las probetas. El control del tiempo se realizó con un cronómetro. Esto se realizó para construir las curvas de sedimentación.

3.7.3.3 Área, diámetro y altura

Luego de construir las curvas de velocidad de sedimentación para cada una de las ocho suspensiones, se procedió a calcular el área mínima industrial de clarificado utilizando el caudal inicial y el dato obtenido de la velocidad de sedimentación correspondiente a la concentración inicial de 5% p/p. Posteriormente, se trazó la curva de flujo en discontinuo (método de Yoshioka y Dick), gráfico de GB en función de X_i , utilizando las velocidades de sedimentación de las ocho suspensiones y el caudal de sólidos. Se señaló el valor de x_u en el eje de abscisas y se trazó una tangente a la curva. Esta tangente corta al eje de ordenadas, que es el valor correspondiente a GT. Con el valor de GT, el caudal inicial y la concentración inicial, se determinó el área de espesado industrial.

Se comparó el área de clarificado con la de espesado, se eligió la mayor de estas dos áreas como área de diseño. Se procedió a calcular el diámetro y la profundidad del sedimentador.

3.7.3.4 Diseño final

A partir los datos del diámetro y la profundidad, se determinó la altura del cono y la altura de la capacidad de almacenamiento del sedimentador. Estos datos conforman el diseño final del equipo.

3.7.3.5 Materiales de construcción

Se utilizó fibra de vidrio para construir el cuerpo del equipo porque es un material flexible, moldeable, barato y cuenta con la ventaja de no contaminar la suspensión por trabajar. Se emplearon dos remaches y una válvula de media vuelta para controlar el flujo de espesado. Tubos de PVC de ½ pulgada para drenar la parte clarificada. Vigas de acero para sostener el motor que da la rotación a la paleta. La velocidad de rotación será manipulada con el variador de frecuencia y una paleta de fibra de vidrio para mover la solución dentro del sedimentador.

3.7.3.6 Cotización y construcción del sedimentador

Se hizo la cotización de los materiales utilizados, incluyendo la mano de obra y se procedió a realizar la compra. Como paso final, se realiza la construcción del equipo sedimentador.

3.8 Tabla de tabulación de datos

Tabla III. **Concentraciones iniciales preparadas**

Muestra	Concentración (% p/p)
Muestra 1	% p/p ₁
Muestra 2	% p/p ₂
Muestra 3	% p/p ₃
Muestra 4	% p/p ₄
Muestra 5	% p/p ₅
Muestra 6	% p/p ₆
Muestra 7	% p/p ₇
Muestra 8	% p/p ₈

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Determinación cualitativa del olor**

Muestra	Olor
Muestra 1	Olor 1
Muestra 2	Olor 2
Muestra 3	Olor 3
Muestra 4	Olor 4
Muestra 5	Olor 5
Muestra 6	Olor 6
Muestra 7	Olor 7
Muestra 8	Olor 8

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Determinación cualitativa del color**

Muestra	Color
Muestra 1	Color 1
Muestra 2	Color 2
Muestra 3	Color 3
Muestra 4	Color 4
Muestra 5	Color 5
Muestra 6	Color 6
Muestra 7	Color 7
Muestra 8	Color 8

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Humedad e insolubles de la suspensión**

Suspensión inicial	
Parámetro	Porcentaje
Humedad	% Humedad
Insolubles	% Insolubles

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Método de análisis de lodos residuales**

Elemento	Muestra							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Fe ⁺²	% _{1,1}	% _{1,2}	% _{1,3}	% _{1,4}	% _{1,5}	% _{1,6}	% _{1,7}	% _{1,8}
Fe ⁺³	% _{2,1}	% _{2,2}	% _{2,3}	% _{2,4}	% _{2,5}	% _{2,6}	% _{2,7}	% _{2,8}
Al	% _{3,1}	% _{3,2}	% _{3,3}	% _{3,4}	% _{3,5}	% _{3,6}	% _{3,7}	% _{3,8}
Zn	% _{4,1}	% _{4,2}	% _{4,3}	% _{4,4}	% _{4,5}	% _{4,6}	% _{4,7}	% _{4,8}
Mg	% _{5,1}	% _{5,2}	% _{5,3}	% _{5,4}	% _{5,5}	% _{5,6}	% _{5,7}	% _{5,8}
Ca _{carbonato}	% _{6,1}	% _{6,2}	% _{6,3}	% _{6,4}	% _{6,5}	% _{6,6}	% _{6,7}	% _{6,8}
Ca _{y eso}	% _{7,1}	% _{7,2}	% _{7,3}	% _{7,4}	% _{7,5}	% _{7,6}	% _{7,7}	% _{7,8}

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Diferencial de altura con respecto del tiempo de sedimentación de las muestras**

Muestra											
1		2		3		4		N		8	
Altura	Tiempo										
$H_{1,1}$	$t_{1,1}$	$H_{1,2}$	$t_{1,2}$	$H_{1,3}$	$t_{1,3}$	$H_{1,4}$	$t_{1,4}$	$H_{1,n}$	$t_{1,4}$	$H_{1,8}$	$t_{1,8}$
$H_{2,1}$	$t_{2,1}$	$H_{2,2}$	$t_{2,2}$	$H_{2,3}$	$t_{2,3}$	$H_{2,4}$	$t_{2,4}$	$H_{2,n}$	$t_{2,4}$	$H_{2,8}$	$t_{2,8}$
$H_{3,1}$	$t_{3,1}$	$H_{3,2}$	$t_{3,2}$	$H_{3,3}$	$t_{3,3}$	$H_{3,4}$	$t_{3,4}$	$H_{3,n}$	$t_{3,4}$	$H_{3,8}$	$t_{3,8}$
$H_{4,1}$	$t_{4,1}$	$H_{4,2}$	$t_{4,2}$	$H_{4,3}$	$t_{4,3}$	$H_{4,4}$	$t_{4,4}$	$H_{4,n}$	$t_{4,4}$	$H_{4,8}$	$t_{4,8}$
$H_{5,1}$	$t_{5,1}$	$H_{5,2}$	$t_{5,2}$	$H_{5,3}$	$t_{5,3}$	$H_{5,4}$	$t_{5,4}$	$H_{5,n}$	$t_{5,4}$	$H_{5,8}$	$t_{5,8}$
$H_{6,1}$	$t_{6,1}$	$H_{6,2}$	$t_{6,2}$	$H_{6,3}$	$t_{6,3}$	$H_{6,4}$	$t_{6,4}$	$H_{6,n}$	$t_{6,4}$	$H_{6,8}$	$t_{6,8}$
$H_{7,1}$	$t_{7,1}$	$H_{7,2}$	$t_{7,2}$	$H_{7,3}$	$t_{7,3}$	$H_{7,4}$	$t_{7,4}$	$H_{7,n}$	$t_{7,4}$	$H_{7,8}$	$t_{7,8}$
$H_{m,n}$	$t_{m,n}$										

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Velocidad de sedimentación en función de la concentración**

Muestra	Concentración (% p/p)	Velocidad de sedimentación
Muestra 1	% p/p ₁	Vs ₁
Muestra 2	% p/p ₂	Vs ₂
Muestra 3	% p/p ₃	Vs ₃
Muestra 4	% p/p ₄	Vs ₄
Muestra 5	% p/p ₅	Vs ₅
Muestra 6	% p/p ₆	Vs ₆
Muestra 7	% p/p ₇	Vs ₇
Muestra 8	% p/p ₈	Vs ₈

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Caudal de sólido en función de la concentración**

Muestra	Concentración (% p/p)	Caudal de sólido
Muestra 1	% p/p ₁	GB ₁
Muestra 2	% p/p ₂	GB ₂
Muestra 3	% p/p ₃	GB ₃
Muestra 4	% p/p ₄	GB ₄
Muestra 5	% p/p ₅	GB ₅
Muestra 6	% p/p ₆	GB ₆
Muestra 7	% p/p ₇	GB ₇
Muestra 8	% p/p ₈	GB ₈

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Comparación del área del clarificado y el área del espesado**

Muestra inicial	
A _{clarificada}	A ₁
A _{espesado}	A ₂
Área seleccionada	Área mayor

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Dimensionamiento del sedimentador**

Sedimentador	Diámetro	Altura de sedimentación	Altura de cono	Altura debida a la capacidad de almacenamiento
	D	H	H _{cono}	H _{c-a}

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Cotización del equipo**

	Fibra de vidrio	Válvulas	Vigas	Tubo PVC	Variador de frecuencia
Área superficial total	m ²				
No. capas a agregar	X				
Costo de material	Q1	Q2	Q3		Q4
Costo de mano de obra					
Total	Q _T				

Fuente: elaboración propia.

3.9 Análisis estadístico

El cálculo estadístico utilizado en esta investigación, consistió en determinar la media aritmética y la varianza para aplicar la prueba F de Snedecor-Fisher para varianzas de dos muestras estándar. Con este dato, se determina la prueba de “t” de Student para aceptar o rechazar la hipótesis planteada.

3.9.1 Media aritmética

Para cada experimento se determinó el promedio o la media de los ocho datos pertenecientes a cada prueba, para comparar los valores entre ellos y encontrar el valor medio, determinando así los parámetros de diseño del equipo.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{N}$$

[Ecuación No. 27]

Donde:

\bar{X} = media aritmética

x_i = valor de cada corrida

N= número de corridas por tratamiento

3.9.2 Análisis de variabilidad

Se empleó un análisis estadístico de variabilidad para medir qué tan dispersos están los resultados alrededor del punto central. De esta forma se cuantificó la desviación de las pruebas alrededor de su media. Las estadísticas más importantes para medir la variabilidad de una muestra aleatoria son la varianza y la desviación estándar.

3.9.2.1 Varianza

Debido a que el rango no considera los valores intermedios de los datos, se calculó la varianza la cual considera la posición de cada observación en relación con la media de la muestra, proporcionando de esta manera una medida más significativa sobre el punto hasta el cual se dispersan las observaciones alrededor de su media. Así la varianza se define como:

Si X_1, X_2, \dots, X_n representa una muestra aleatoria de tamaño n , entonces la varianza de la muestra se define como la estadística.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}$$

[Ecuación No. 28]

Donde:

n = número de datos

X_i = cada valor

\bar{X} = media aritmética de los valores

S^2 = varianza de la muestra

3.9.2.2 Desviación estándar

La desviación estándar para una muestra representa medidas de dispersión alrededor de la media. Se denota con S y es la raíz cuadrada positiva de la varianza de la muestra.

4. RESULTADOS

4.1 Características físicas y químicas de la suspensión proveniente del proceso de elaboración de ZnSO₄

Tabla XIV. Caracterización física de la muestra recolectada

Parámetro	Valor
Olor	Inodoro
Color	Café
Temperatura	26 °C
Densidad (5% p/p)	1 101.484 Kg/m ³
Sólidos suspendidos	55074 mg/L

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Análisis químico de la muestra recolectada

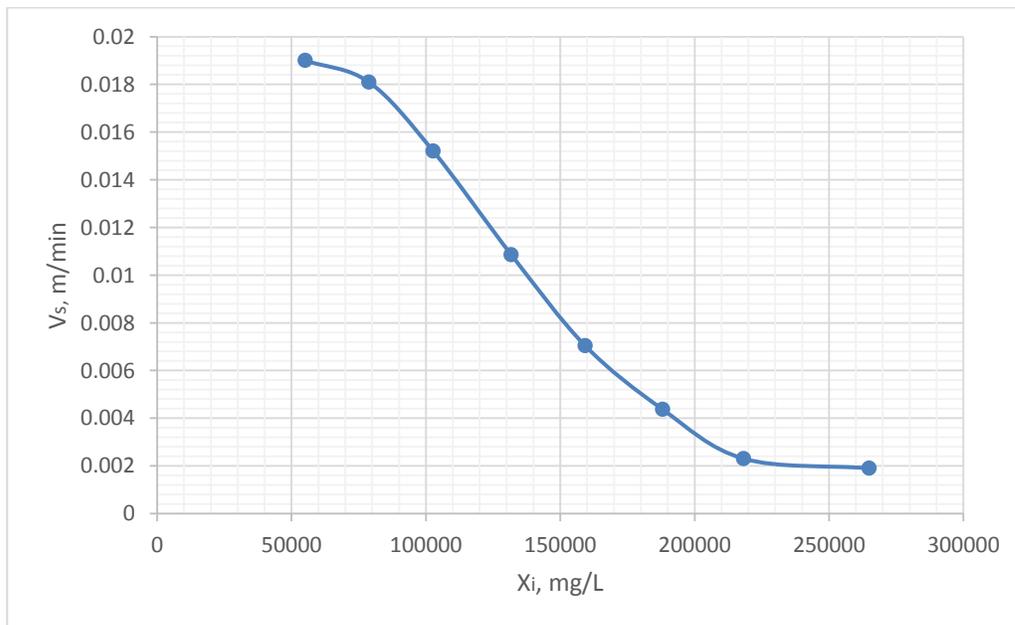
Compuesto	Valor (%)
Fe ₂ O ₃	1.92
FeO	0.04
Al ₂ O ₃	0
MgCO ₃	0.09
ZnCO ₃	0
CaCO ₃	0.86
CaSO ₄	0.16
Insolubles	1.93
Humedad	95
Porcentaje total	100

Fuente: elaboración propia.

4.2 Correlación de los datos correspondientes a la velocidad de sedimentación en función de la concentración

Se indica la correlación entre la velocidad de sedimentación, V_s , en función de la concentración, X_i . Los datos de V_s fueron obtenidos experimentalmente en el laboratorio para cada concentración establecida.

Figura 10. **Velocidad de sedimentación en función de la concentración de los lodos**



Fuente: elaboración propia.

4.3 Diseño del sedimentador circular con las dimensiones determinadas según pruebas de laboratorio

Se presentan las dimensiones determinadas del sedimentador circular calculadas con base en el método de tubo largo y el método de Yoshioka & Dick. Seguidamente se muestra el diseño del equipo.

Tabla XVI. **Comparación del área industrial de clarificado y área industrial de espesado**

Muestra inicial	
$A_{\text{clarificado}}$	0.49 m ²
A_{espesado}	0.26 m ²
Área seleccionada	0.49 m ²

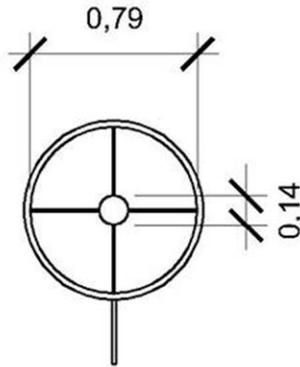
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Valores de diseño del sedimentador circular a escala piloto**

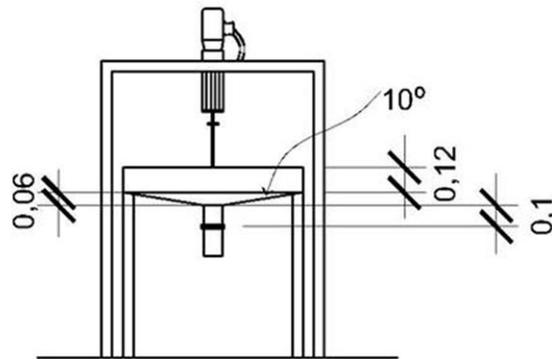
Parámetro	Unidad	Valor
Diámetro	Metros	0.79
Altura de sedimentación	Metros	0.12
Altura de cono	Metros	0.06
Altura debida a la capacidad de almacenamiento	Metros	0.10
Carga superficial	m ³ /d*m ²	27.36
Caudal del afluente	m ³ /día	14.33
Tiempo de retención	Minutos	6

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Diseño final del sedimentador circular**



Planta de Sedimentador



Elevación de Sedimentador

Fuente: elaboración propia con ayuda de la herramienta Autocad 2,010.

4.4 Construcción del equipo con base en el diseño

Tabla XVIII. Cotización del equipo y mano de obra

	Fibra de vidrio	Válvulas	Vigas	Tubo PVC	Variador de frecuencia
Área superficial total	0.55 m ²	1	1	1	1
No. capas a agregar	4				
Costo	Q1 020	Q30	Q650	Q5	Q5 000
Costo de mano de obra	Q6 840				
Costo total	Q13 545				

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Vista frontal del equipo construido



Fuente: Representaciones Químicas, S. A.

Figura 13. **Vista aérea del equipo construido**



Fuente: Representaciones Químicas, S. A.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Al sedimentador a escala industrial deberían ingresar 63,120.75 kg/día, al 5% p/p de contenido de sólidos provenientes del tercer lavado (Tabla XIV) y descargar la suspensión al 20% de sólidos. La densidad de la suspensión es 1.101,484 kg/día. El mineral residual contenido en la suspensión inicial recolectada no reporta zinc elemental en su composición, lo que era de esperarse (Tabla XV). El carbonato de zinc inicial fue convertido a sulfato de zinc en solución durante el proceso de lixiviación. Lo mismo ocurrió con una parte del óxido férrico, el óxido ferroso y el carbonato de magnesio; estos minerales fueron solubilizados en forma de sulfatos. Reaccionó una fracción de carbonato de calcio para formar sulfato de calcio sólido detectado por el método cuantitativo de yeso. Los insolubles presentes pueden ser silicatos. El motivo principal de realizar tres lavados a los lodos era para recuperar la mayor cantidad de sulfato de zinc en solución y, efectivamente, fue lo que sucedió, pues el agua equivalente al 95% de humedad inicial, tampoco reporta zinc elemental.

Para el experimento realizado, se utilizó la cuarta parte del flujo másico total de la suspensión del tercer lavado que equivale a trabajar con la cuarta parte del valor total del caudal en el afluente. La decisión de trabajar con la cuarta parte del valor del caudal se debe a que el proyecto contempló trabajar con una escala piloto.

El principio de similitud geométrica justifica el empleo de la reducción del caudal. Este principio considera dos cuerpos sólidos, provisto cada uno de tres ejes imaginarios en el espacio, que describe a ambos de igual forma en

todos los puntos, es decir, con puntos que se corresponden. Bajo este principio se puede establecer una relación de escalamiento lineal de 4, puesto que se desea trabajar la cuarta parte del caudal, debido a que este parámetro es relevante en el tamaño del equipo y al reducirlo, se reduce considerablemente el dimensionamiento. Sin embargo, se considera más exacto dimensionar el equipo modificando el caudal desde el afluente ya que de esta forma se obtiene un dato de área superficial de clarificado o espesado específico para el caudal trabajado, no es así cuando se aplica la relación de escalamiento lineal en el equipo dimensionado con el caudal original del proceso.

La variable evaluada en el dimensionamiento del sedimentador es la velocidad de sedimentación. En teoría, al aumentar la concentración de una suspensión, disminuye la velocidad. Se determinó la velocidad de sedimentación para cada concentración preparada de la muestra y se trazó una correlación entre V_s y X_i (Figura 10) y se obtuvo una curva decreciente en donde la concentración es el eje de las abscisas, y la velocidad de sedimentación, el eje de las ordenadas. Esta correlación inversamente proporcional corrobora la hipótesis científica planteada que dice que una alta concentración disminuye la velocidad de sedimentación de las suspensiones.

Se obtuvieron las curvas de sedimentación para las ocho concentraciones (Apéndice 1) en donde la concentración inicial es la correspondiente al 5% p/p según el análisis reportado en la tabla XV. Las condiciones de diseño requieren que la suspensión sea concentrada al 20% p/p.

Para realizar los cálculos de las áreas, se evaluó el diferencial de altura respecto del tiempo de sedimentación para las ocho muestras. Se determinó para cada concentración la velocidad de sedimentación empleando el método de tubo largo o de ensayos de sedimentación en laboratorio (Apéndice 1). Con

el valor de las concentraciones establecidas por las condiciones de diseño ($X_0=5\%$ p/p; $X_u=20\%$ p/p), se determinó que el área industrial de clarificación es de 0.49 m^2 . Este método supone que el agua clarificada no contiene sólidos en el afluente ($X_e=0$), es decir, el agua clarificada se encuentra libre de partículas de lodo.

Para el cálculo del área industrial de espesado se aplicó el método de Yoshioka & Dick (Apéndice 1). Como primer paso, se construyó la curva de flujo de circulación de sólidos en discontinuo, utilizando las velocidades de sedimentación zonal obtenidas de los ensayos de laboratorio en discontinuo en función de las concentraciones de sólidos, X_i . A partir del valor específico de la concentración de los lodos por extraer, X_u , en la abscisa, se trazó una tangente a la curva de circulación de sólidos. La intersección de esta tangente con el eje de ordenadas da el flujo total de sólidos, G_T . Con el flujo total de sólidos, el caudal inicial y la concentración inicial se procedió a determinar el área industrial de espesado, este valor es de 0.26 m^2 .

Luego de calcular las áreas de superficie mínimas de clarificado y espesado del equipo, se eligió la mayor, ya que la menor se circunscribe a esta área (tabla XVI). Con el área seleccionada, se procedió a dimensionar el equipo (tabla XVII) y elaborar su diseño final (Figura 11).

El área superficial seleccionada fue el área de clarificación, 0.49 m^2 (tabla XVI), pues esta es mayor que el área superficial de sedimentación (0.26 m^2). Regularmente los procesos de sedimentado ocupan más área superficial que los procesos de clarificado, a menos que la concentración final de los lodos espesados no sea mucho mayor respecto de la concentración inicial de los mismos.

En este caso, el área necesaria para clarificar el líquido de la concentración X_0 a X_e es mayor que el área necesaria para sedimentar los lodos de la concentración X_0 a X_u . El caudal del efluente clarificado se determina a partir del caudal inicial, la concentración final de los lodos y la concentración de sólidos en el clarificado, X_e , que se supone debe ser cero. Este caudal condiciona el caudal de salida de los lodos espesados e implícitamente, condiciona también su concentración final, que en este caso es de 20% p/p. Puede decirse, entonces, que el área superficial de clarificado satisface las condiciones de descarga de los lodos.

En el caso del área superficial de sedimentado sucede algo muy peculiar, en la figura 23 del apéndice 1, correspondiente a la curva de flujo discontinuo en función de la concentración de sólidos, se puede observar que el punto último (724.91 kg/m²*día) con concentración al 20% p/p reporta un caudal de sólidos en funcionamiento discontinuo parecido al punto anterior con concentración al 17% p/p (723.75 kg/m²*día). Tomando en cuenta que el caudal de sólidos indica la capacidad del sedimentador para arrastrar los sólidos a su parte inferior, con una concentración X_i , por gravedad, en un funcionamiento discontinuo, y sabiendo que el caudal de sólidos para las concentraciones de 17 y 20% p/p es muy parecido, puede concluirse que el equipo solo puede espesar los lodos residuales al 17% p/p.

Sin embargo, sigue sin responderse por qué el área superficial de clarificado es mayor que el área superficial de espesado. Para responder este punto, hay que tomar en cuenta que el volumen de agua que se extrae y se descarga sobre el vertedero durante el proceso de espesado que ocurre en un intervalo de tiempo " $t_u - t_c$ ", regularmente es mayor al volumen de clarificado, y es este primer volumen el que determina la superficie mínima requerida de espesamiento. Sin embargo, para este experimento particular, el volumen de

clarificado es mucho mayor al volumen de espesado, puesto que el volumen de agua que se descarga antes de alcanzar la velocidad crítica, corresponde a la mayor parte del volumen por separar. Lo anterior se debe a que la velocidad de sedimentación, que es mucho mayor a la velocidad crítica, permite que el agua se descargue a mayor velocidad por el clarificado que cuando se alcanza la velocidad final de sedimentado, en donde la velocidad del líquido que rebosa debe ser menor a la velocidad crítica si se desea producir el espesado esperado. Es por esta razón que el área de clarificado es mucho mayor que el área de sedimentado y es ésta la que se elige para dimensionar el equipo.

Con el dato del área industrial, se procede a calcular el diámetro del equipo (Tabla XVII). La profundidad depende del volumen que, a su vez, depende del tiempo de residencia, que es aproximadamente de 5-7 minutos. La elevación del cono del fondo tiene una inclinación de 10 grados con respecto de la horizontal y una altura de 6 cm. La altura considerada debida a la capacidad de almacenamiento es de 10 cm. Con estas medidas, se construyó el diseño final del equipo. Como observación, se recomienda que H, la altura del equipo, no sea demasiado baja ya que, de otra forma, la velocidad de paso aumentaría por encima de la velocidad de arrastre. El arrastre ocurre cuando la velocidad de paso es suficiente para hacer pasar a suspensión las partículas previamente depositadas.

El material utilizado para la construcción del sedimentador fue la fibra de vidrio (figuras 12 y 13). Este material posee la ventaja de ser flexible, moldeable, barato y no contamina la muestra por trabajar. Se aplicaron cuatro capas de este material para obtener la firmeza deseada en el equipo. En la parte de descarga de los lodos, se instaló una válvula de bola para controlar el flujo de espesado; en la parte de la salida del afluyente, se agregó un tubo de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada para drenar la parte clarificada. El motor se instaló sobre

una estructura hecha con vigas de acero para darle sostén y por dentro del sedimentador, se colocó una paleta de fibra de vidrio conectada al motor y este a su vez, al variador de frecuencia; esta paleta atraviesa el equipo para mover la suspensión y evitar que los lodos espesados se estratifiquen.

El costo total de construcción del equipo fue de Q13, 545.00, incluyendo mano de obra (Tabla XVIII) y se construyó en un tiempo de tres semanas, empleando tres personas.

La Tabla XXV indica los valores obtenidos de la prueba F de Snedecor-Fisher. Se comprueba que $F(\text{estadístico}) < F(\text{crítica})$, es decir, ambos métodos son igual de precisos. Este dato ayuda a elegir la “t” de *student* de dos muestras con varianzas iguales (tabla XXVI). Si se pretende determinar si un valor aumenta en relación al otro, se usa un contraste de una cola. Se comprueba que $t(\text{estadístico}) > t(\text{crítico})$, esto indica que la hipótesis nula se rechaza y la hipótesis alterna se toma como cierta.

CONCLUSIONES

1. Los lodos residuales del proceso de elaboración de $ZnSO_4$ se caracterizaron fisicoquímicamente, obteniendo como datos relevantes para el dimensionamiento del sedimentador circular a escala piloto, la concentración de sólidos, 5 % p/p, y el porcentaje de humedad, 95% p/p.
2. Con base en el principio de similaridad geométrica, se estableció un escalamiento lineal de 4, esto significa que se empleó la cuarta parte del flujo másico total de la suspensión del tercer lavado para determinar el caudal inicial en el afluente.
3. La variable evaluada en el dimensionamiento del sedimentador es la velocidad de sedimentación, V_s .
4. La correlación inversamente proporcional de la velocidad de sedimentación, V_s , en función de la concentración, X_i , tomó como cierta la hipótesis alterna y rechazó la hipótesis nula. A una alta concentración de sólidos iniciales, disminuye la velocidad de sedimentación de una suspensión.
5. El cálculo del área superficial de clarificación, 0.49 m^2 , se obtuvo por el método de tubo largo o de ensayos de sedimentación en laboratorio.
6. El cálculo del área superficial de espesado, 0.26 m^2 , se obtuvo por el método de Yoshioka & Dick.

7. El área superficial de espesado, en teoría, está calculada para espesar los lodos a una concentración límite de 17%.
8. Al comparar las dos áreas superficiales, se eligió el área mayor que corresponde al área de clarificación, 0.49 m^2 , para dimensionar y diseñar el sedimentador circular a escala piloto.
9. Los valores de diseño del sedimentador circular a escala piloto son: el diámetro, 79 cm; la altura de sedimentación, 12 cm; la altura del cono, 6 cm; la altura debida a la capacidad de almacenamiento, 10 cm; la carga superficial, $27.36 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}^2$; el caudal del afluente, $14.33 \text{ m}^3/\text{día}$ y el tiempo de retención, 6 minutos.
10. El material empleado para la construcción del sedimentador fue la fibra de vidrio por ser moldeable, barato y no contaminante de la suspensión de lodos residuales.
11. El costo total de construcción del equipo fue de Q13, 545.00, incluyendo mano de obra, y se construyó en un tiempo de tres semanas, empleando tres personas.

RECOMENDACIONES

1. Es recomendable para el dimensionamiento del sedimentador, determinar los parámetros de concentración, velocidad de sedimentación y caudal del afluente.
2. Se recomienda que los resultados obtenidos, especialmente al aplicar el método de ensayo de sedimentación en laboratorio y el método de Yoshioka & Dick, sean utilizados solamente para las condiciones de las cuales derivaron, ya que, para lodos de diferentes características de composición y operación, los resultados de las pruebas de sedimentación en laboratorio pueden no ser extrapolables. Se debe emplear un factor de seguridad apropiado (en este trabajo se empleó un factor de seguridad de 1.2).
3. Para poder evaluar la operación de sedimentación en condiciones óptimas, se recomienda contar con los dispositivos adecuados para medición de flujo, de esta manera, se podrán obtener y controlar fácilmente los parámetros de funcionamiento que se consideren pertinentes.
4. Se recomienda utilizar, indiferentemente, ya sea el método de Coe & Clevenger o el de ensayos de sedimentación de laboratorio, para calcular el área superficial de clarificación. Esto es permisible, aunque ambos métodos difieren un tanto en los resultados, los dos son formas aceptadas de calcular el área de clarificación.

5. Se recomienda que la altura del equipo, H , no sea demasiado baja ya que, de otra forma, la velocidad de paso aumentaría por encima de la velocidad de arrastre. El arrastre ocurre cuando la velocidad de paso es suficiente para hacer pasar a suspensión las partículas previamente depositadas

BIBLIOGRAFÍA

1. COULSON, J.M. & Richardson, J. F. *Chemical Engineering. Vol. II.* Pergamon Press. Oxford. 1978. 1050 p.
2. Clarifier Design Task Force of the Water Environment Federation.
Clarifier Design. WEF Manual of Practice No. FD-8.
Second Edition. McGraw-Hill. 2005. 250 p.
3. DARBY, R. *Chemical Engineering Fluid Mechanics*, 1996. 1450 p.
4. GREEN, Don W., PERRY, Robert H. *Perry's Chemical Engineers' Handbook.* 8th Edition. McGraw-Hill. 2008. 3,000 p.
5. METCALF & Eddy, Inc. *Wastewater Engineering: treatment and reuse.* McGraw-Hill Book Company, USA, 4th edition, 2003. 1300 p.
6. McCABE, Warren L., SMITH, Julian C., HARRIOT, Peter. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.* Cuarta Edición. McGraw-Hill. 1991. 1694 p.
7. RAMALHO, Rubens Sette. *Tratamiento de aguas residuales.* Primera edición en castellano. Editorial Reverte, S. A. 2003. 716 p.

APÉNDICE

Apéndice 1. Muestra de cálculo, datos originales y datos calculados del sedimentador circular

- **Datos originales de sedimentación por gravedad para el sedimentador circular**

Tabla 1. Resultado de la prueba de sedimentación intermitente de los lodos residuales de un proceso de fabricación de $ZnSO_4$ a diferentes concentraciones y con una altura de llenado de 38 cm. La altura de la interfase clara (m) se midió en función del tiempo (minutos).

Tiempo (min.)	Altura (m)							
	Muestra 5%	Muestra 7%	Muestra 9%	Muestra 11%	Muestra 13%	Muestra 15%	Muestra 17%	Muestra 20%
0	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
5	0.28	0.295	0.299	0.33	0.341	0.358	0.365	0.368
10	0.2	0.217	0.249	0.272	0.307	0.339	0.355	0.358
15	0.185	0.195	0.213	0.235	0.274	0.319	0.344	0.348
20	0.176	0.185	0.2	0.205	0.24	0.297	0.333	0.339
25	0.167	0.178	0.19	0.19	0.208	0.286	0.324	0.33
30	0.156	0.172	0.184	0.18	0.19	0.274	0.315	0.321
35	0.156	0.166	0.178	0.17	0.18	0.264	0.304	0.311
40	0.152	0.162	0.173	0.164	0.175	0.259	0.294	0.303
45	0.149	0.158	0.169	0.159	0.17	0.254	0.282	0.295
50	0.146	0.155	0.165	0.155	0.165	0.249	0.276	0.285
55	0.143	0.153	0.163	0.154	0.16	0.244	0.27	0.275
60	0.141	0.151	0.161	0.153	0.158	0.239	0.264	0.266
65	0.14	0.149	0.159	0.152	0.157	0.234	0.259	0.26
70	0.138	0.146	0.157	0.151	0.156	0.229	0.254	0.255
75	0.137	0.1445	0.155	0.151	0.155	0.224	0.246	0.25
80	0.136	0.144	0.153	0.151	0.155	0.219	0.239	0.245
85	0.135	0.143	0.152	0.15	0.155	0.215	0.234	0.24
90	0.134	0.142	0.151	0.15	0.154	0.212	0.23	0.235
95	0.133	0.141	0.15	0.15	0.154	0.21	0.225	0.234

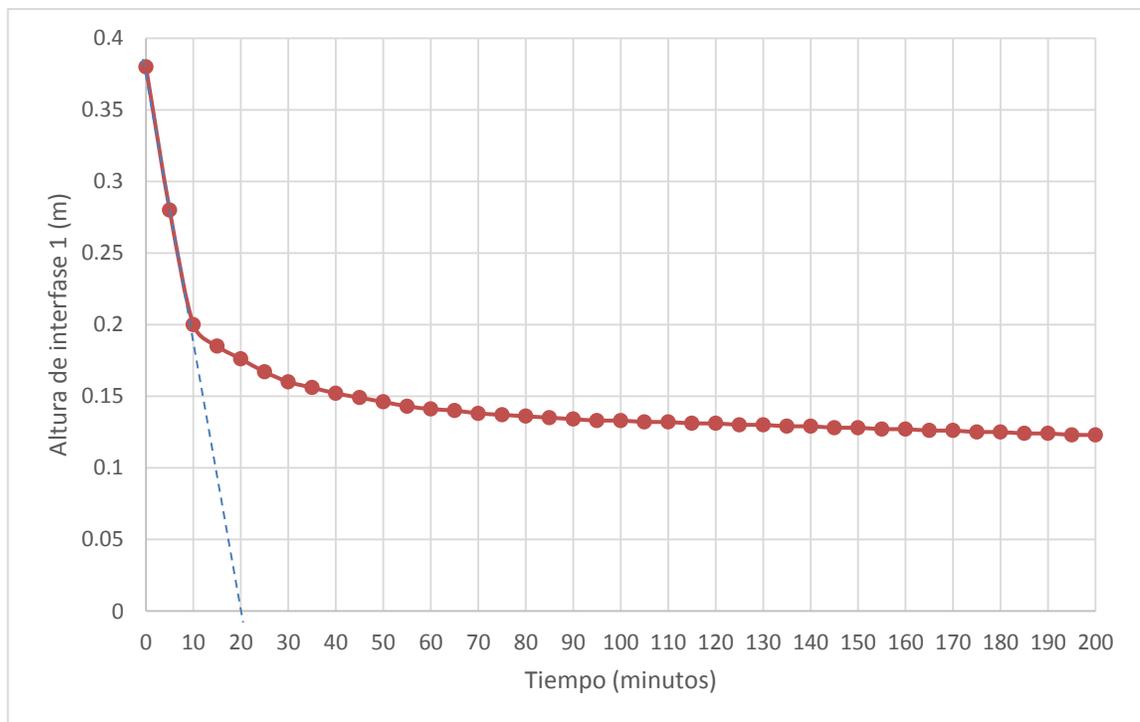
Continuación de la tabla 1.

100	0.133	0.141	0.149	0.15	0.154	0.209	0.22	0.233
105	0.132	0.14	0.148	0.15	0.154	0.208	0.217	0.232
110	0.132	0.139	0.147	0.15	0.153	0.206	0.214	0.231
115	0.131	0.138	0.146	0.15	0.153	0.206	0.211	0.231
120	0.131	0.138	0.145	0.15	0.153	0.206	0.211	0.231
125	0.13	0.137	0.144	0.15	0.153	0.205	0.21	0.231
130	13	0.137	0.144	0.15	0.153	0.205	0.21	0.231
135	0.129	0.136	0.143	0.149	0.153	0.205	0.21	0.231
140	0.129	0.136	0.143	0.149	0.152	0.204	0.21	0.231
145	0.128	0.136	0.143	0.149	0.152	0.204	0.21	0.231
150	0.128	0.136	0.143	0.149	0.152	0.204	0.21	0.231
155	0.127	0.135	0.143	0.149	0.152	0.204	0.21	0.231
160	0.127	0.135	0.142	0.149	0.152	0.204	0.21	0.231
165	0.126	0.134	0.142	0.149	0.152	0.203	0.21	0.231
170	0.126	0.134	0.142	0.149	0.152	0.203	0.21	0.231
175	0.125	0.133	0.141	0.149	0.152	0.203	0.21	0.231
180	0.125	0.133	0.141	0.149	0.152	0.203	0.21	0.231
185	0.124	0.133	0.141	0.149	0.152	0.203	0.21	0.231
190	0.124	0.132	0.14	0.148	0.151	0.203	0.21	0.231
195	0.123	0.131	0.139	0.148	0.151	0.203	0.21	0.231
200	0.123	0.131	0.139	0.148	0.151	0.203	0.21	0.231

Fuente: elaboración propia.

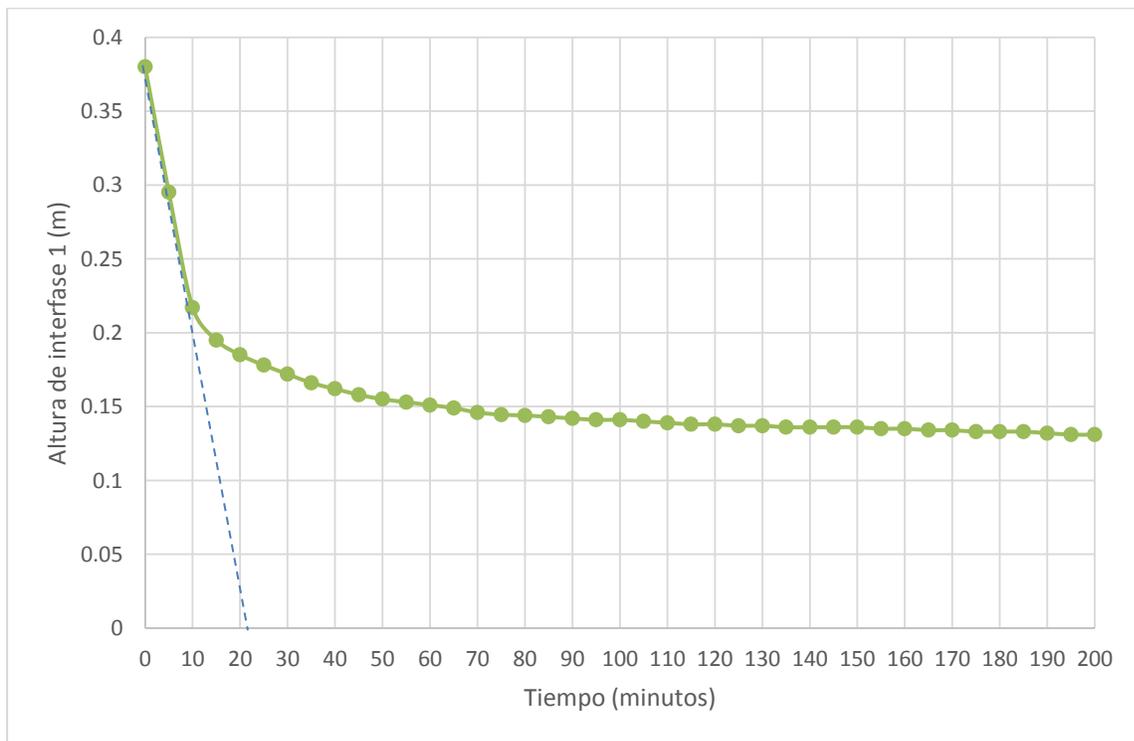
- **Figuras con base en los datos originales para los sedimentadores**

Figura 1. Sedimentación intermitente de los lodos residuales de un proceso de fabricación de $ZnSO_4$ para una concentración inicial de 5% p/p. Medición de la interfase clara (m) en función del tiempo (minutos). Determinación del tiempo de sedimentación $\theta = 20$ minutos.



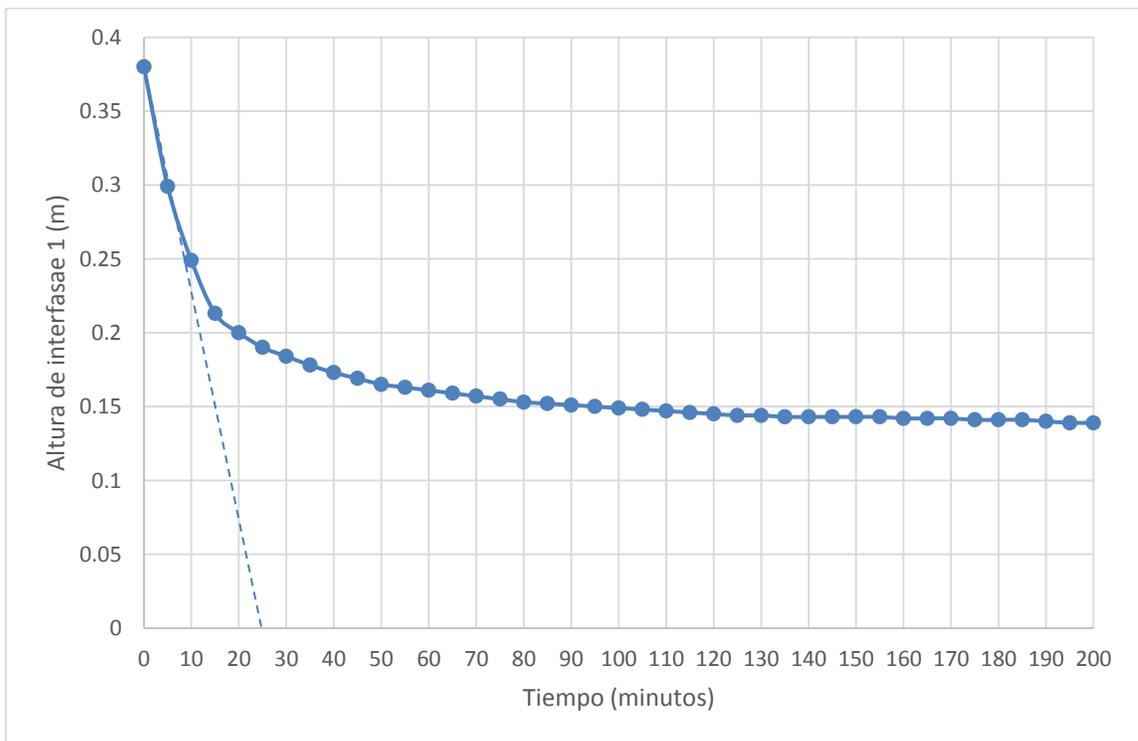
Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Sedimentación intermitente de los lodos residuales de un proceso de fabricación de $ZnSO_4$ para una concentración inicial de 7% p/p. Medición de la interfase clara (m) en función del tiempo (minutos). Determinación del tiempo de sedimentación $\theta = 21$ minutos.



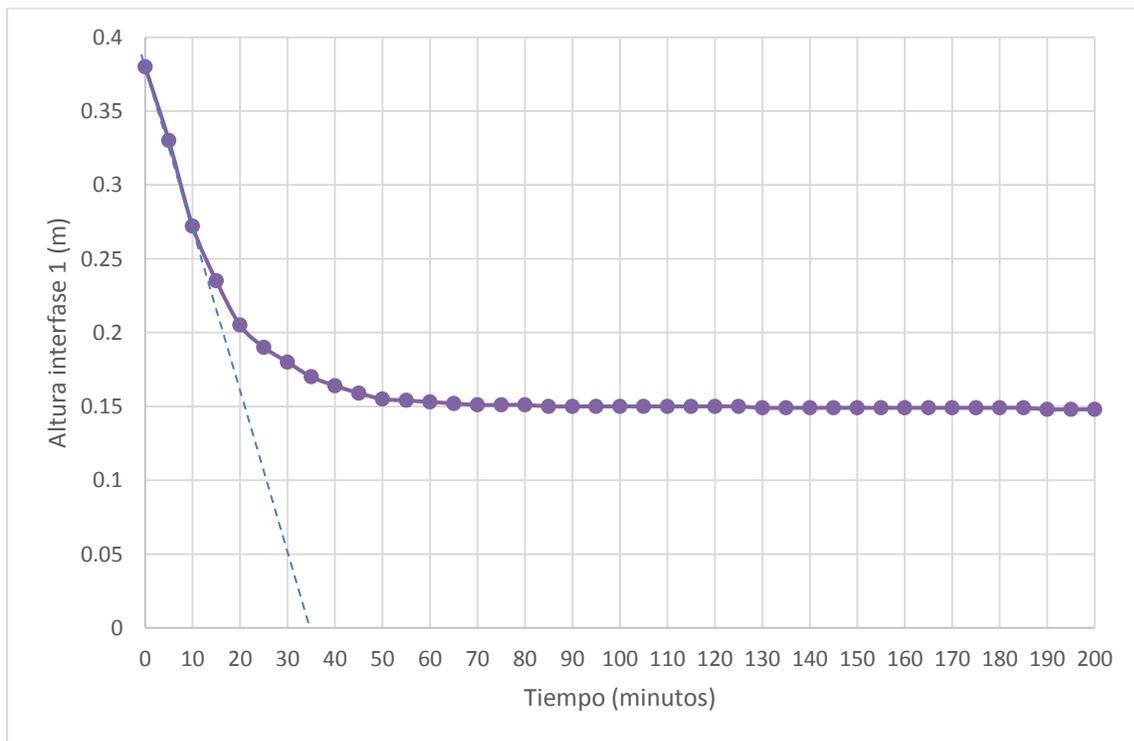
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Sedimentación intermitente de los lodos residuales de un proceso de fabricación de $ZnSO_4$ para una concentración inicial de 9% p/p. Medición de la interfase clara (m) en función del tiempo (minutos). Determinación del tiempo de sedimentación $\theta = 25$ minutos.



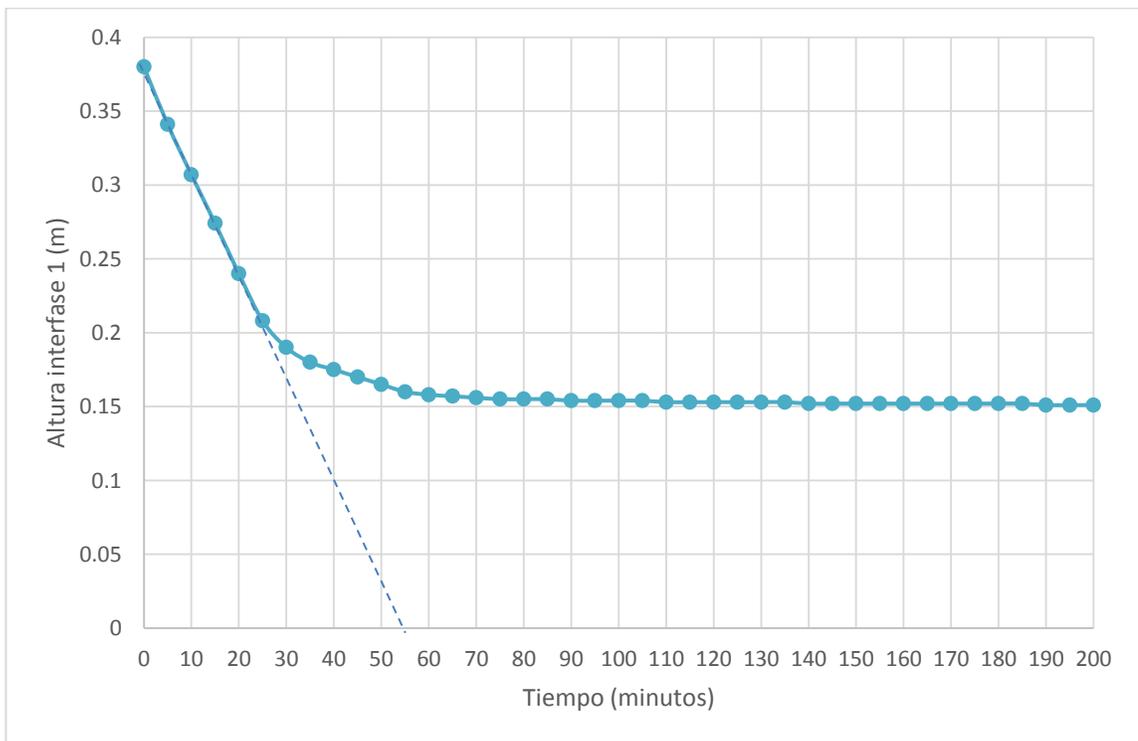
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Sedimentación intermitente de los lodos residuales de un proceso de fabricación de $ZnSO_4$ para una concentración inicial de 11% p/p. Medición de la interfase clara (m) en función del tiempo (minutos). Determinación del tiempo de sedimentación $\theta = 35$ minutos.



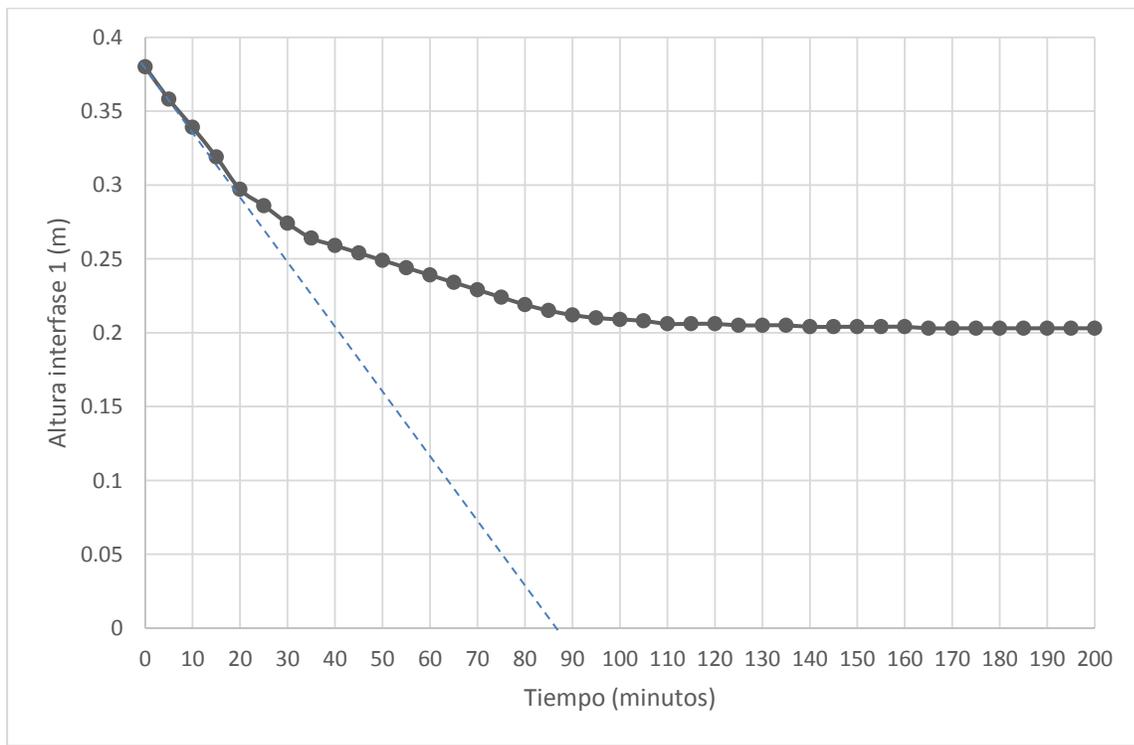
Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Sedimentación intermitente de los lodos residuales de un proceso de fabricación de $ZnSO_4$ para una concentración inicial de 13% p/p. Medición de la interfase clara (m) en función del tiempo (minutos). Determinación del tiempo de sedimentación $\theta = 55$ minutos.



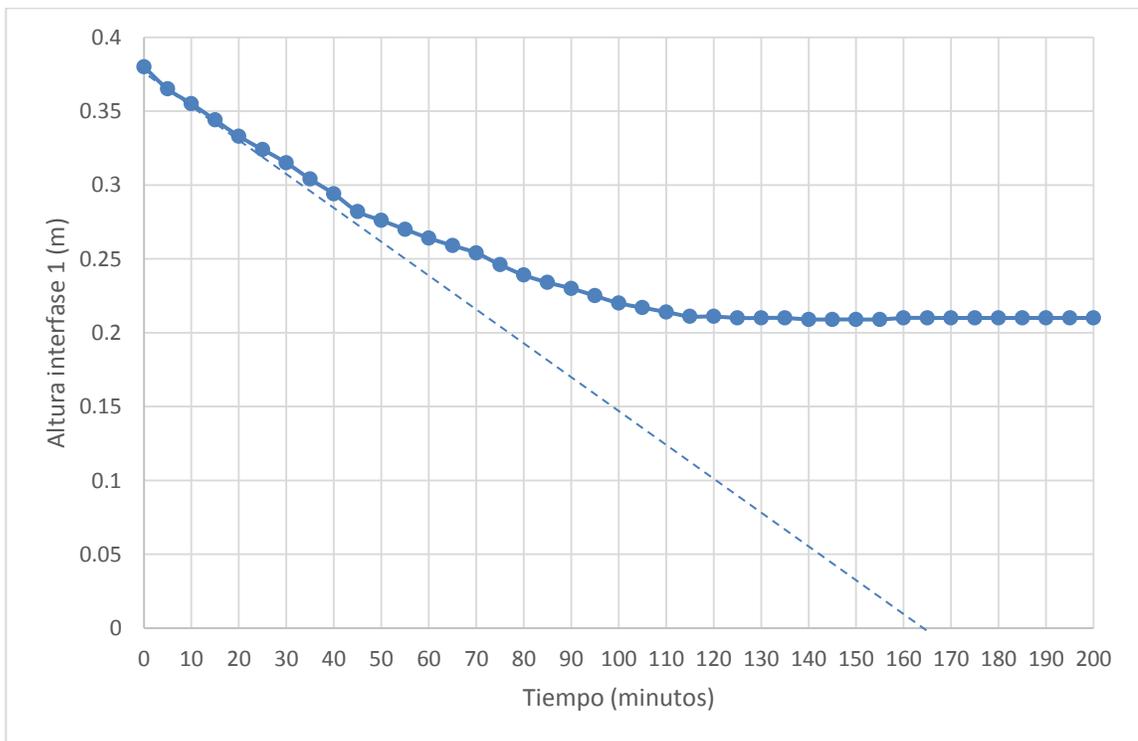
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Sedimentación intermitente de los lodos residuales de un proceso de fabricación de $ZnSO_4$ para una concentración inicial de 15% p/p. Medición de la interfase clara (m) en función del tiempo (minutos). Determinación del tiempo de sedimentación $\theta = 87$ minutos.



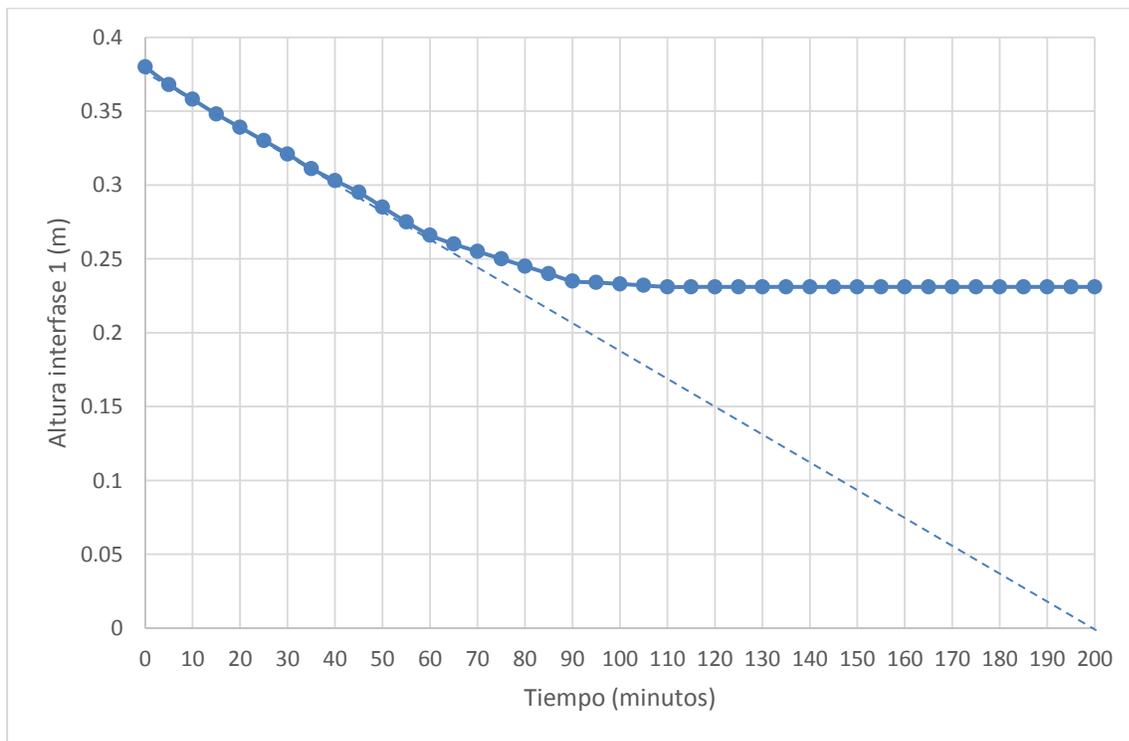
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Sedimentación intermitente de los lodos residuales de un proceso de fabricación de $ZnSO_4$ para una concentración inicial de 17% p/p. Medición de la interfase clara (m) en función del tiempo (minutos). Determinación del tiempo de sedimentación $\theta = 165$ minutos.



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Sedimentación intermitente de los lodos residuales de un proceso de fabricación de $ZnSO_4$ para una concentración inicial de 20% p/p. Medición de la interfase clara (m) en función del tiempo (minutos). Determinación del tiempo de sedimentación $\theta = 200$ minutos.



Fuente: elaboración propia.

- **Cálculo para el área mínima de clarificación del sedimentador a escala piloto de los lodos residuales de un proceso de fabricación de $ZnSO_4$**
 - **Planteamiento del problema**

Al sedimentador a escala industrial deberían de ingresar 63,120.75 kg/día al 5% p/p de contenido de sólidos y se requiere espesar la suspensión al 20% de sólidos. La densidad de la suspensión es 1.101,484 kg/día. Se determinará el área mínima de un sedimentador continuo a partir del método de Yoshioka.

Para el caso estudiado, se utilizará la cuarta parte del flujo másico de la suspensión inicial que es equivalente a trabajar con la cuarta parte del valor del caudal en el afluente. La decisión de trabajar con la cuarta parte del valor del caudal se debe a que el proyecto contempla trabajar con una escala piloto debido a que esta escala establece un camino más seguro hacia la certeza de invertir en la construcción de nuevas plantas industriales.

El principio de similaridad geométrica considera dos cuerpos sólidos provisto cada uno de tres ejes imaginarios en el espacio que los describen de igual forma en todos los puntos, es decir, puntos que se corresponden. Bajo este principio se puede establecer una relación de escalamiento lineal de 4 (puesto que se desea trabajar la cuarta parte del caudal) y dimensionar el sedimentador con estos nuevos valores. Sin embargo, el experimentador considera más exacto dimensionar el equipo modificando el caudal en el afluente puesto que de esta forma se obtiene un dato de área de clarificado o espesado específico para el caudal trabajado, no siendo así cuando se aplica la relación de escalamiento lineal.

- **Resolución del problema**

Sólidos en suspensión en el afluente:

$$x_o = 55.074,22 \text{ mg/L}$$

Sólidos en suspensión del caudal separado:

$$x_u = 264.949,2 \text{ mg/L}$$

Sólidos en suspensión que permanecen en el líquido clarificado:

$$x_e = 0 \text{ mg/L}$$

Caudal del afluente:

$$Q_o = \frac{\text{Sólidos húmedos}/4}{\rho_{SH}} = \frac{63.120,75 \frac{\text{kg}}{\text{día}}/4}{1.101,484 \text{ kg/m}^3} = 14.33 \text{ m}^3/\text{día}$$

[Ecuación No. 28]

Caudal del efluente:

$$Q_e = Q_o \frac{(X_u - X_o)}{(X_u - X_e)} = 14.33 \text{ m}^3/\text{día} * \frac{(264.949,2 - 55.074,22)}{(264.949,2 - 0)} = 11.35 \text{ m}^3/\text{día}$$

[Ecuación No. 29]

Caudal que sale del sedimentador

$$Q_u = Q_o - Q_e = 14.33 - 11.35 = 2.98 \text{ m}^3/\text{día}$$

[Ecuación No. 30]

Velocidad de sedimentación:

$$V_s = \frac{H_o}{t} = \frac{0.38 \text{ m}}{20 \text{ min}} = 0.019 \text{ m/min}$$

Se procede a calcular el área mínima del sedimentador para cada concentración inicial con la fórmula siguiente:

$$A_c = \frac{Q_e}{V_s} = \frac{11.35 \text{ m}^3/\text{día} * 1/1440 \text{ d/min}}{0.019 \text{ m/min}} = 0.41 \text{ m}^2$$

[Ecuación No. 31]

Para el cálculo del área industrial, se multiplica el valor de A_c obtenido por un coeficiente que varía entre 1.2 y 1.4, normalmente se toma el valor de 1.2.

$$A_{\text{industrial}} = A_c * 1.2 = 0.49 \text{ m}^2$$

[Ecuación No. 2]

Con el dato del área industrial, se procede a calcular el diámetro, el radio y la profundidad del sedimentador:

$$D = (4A/\pi)^{1/2} = (4 * 0.49 \text{ m}^2/\pi)^{1/2} = 0.79 \text{ m}$$

[Ecuación No. 33]

$$r = \frac{D}{2} = \frac{0.79}{2} = 0.395 \text{ m}$$

[Ecuación No. 34]

El tiempo de residencia, aproximadamente, es 5-7 minutos. Tomando el promedio y trabajando el dato en horas, da un valor de 0.1 horas, por tanto, el volumen es:

$$V = Q * t_r / 24 = (14.33 \text{ m}^3/\text{día} * 0.1 \text{ h}) / 24 = 0.060 \text{ m}^3$$

[Ecuación No. 35]

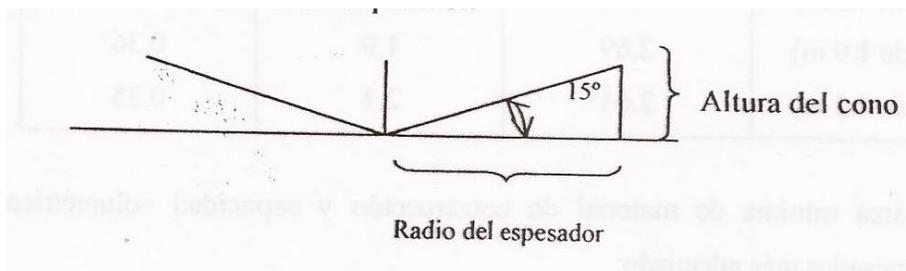
Con este volumen, la profundidad es:

$$H = V/A = 0.060 \text{ m}^3 / 0.49 \text{ m}^2 = 0.12 \text{ m}$$

[Ecuación No. 36]

La elevación del cono del fondo del sedimentador tendrá una inclinación de 10-15 grados respecto de la horizontal, por lo que la altura de esta parte es:

Figura 9. **Altura del cono del sedimentador**



Fuente: elaboración propia.

$$H_{cono} = r * \tan 10^\circ = 39.50cm * \tan 10^\circ = 6 cm$$

[Ecuación No. 37]

Además de la profundidad (altura) determinada por los cálculos que representa la zona de sedimentación, hay que considerar algunas provisiones para inventario y aspecto de diseño mecánico tales como:

- Espesamiento del fondo: 5-10 centímetros (equivalente a la altura del cono de 6 cm)
- Capacidad de almacenamiento: 10 centímetros

- **Cálculo para el área mínima de espesado del sedimentador a escala piloto de los lodos residuales de un proceso de fabricación de $ZnSO_4$**

- **Planteamiento del problema**

Se requiere determinar el área mínima de espesado de la suspensión con las condiciones iniciales descritas en el apartado anterior.

- **Resolución del problema**

Como primer paso, se determina la velocidad de sedimentación para cada una de las ocho suspensiones con diferentes concentraciones. Para ejemplificar, se procederá a trabajar con una concentración inicial de sólidos de 7% p/p.

Velocidad de sedimentación:

$$V_s = \frac{H_o}{t} = \frac{0.38 \text{ m}}{21 \text{ min}} = 0.018 \text{ m/min}$$

Como segundo paso, se traza la curva de flujo discontinuo, gráfico de GB en función de X_i , con cada uno de los datos calculados de G_B para las ocho concentraciones.

$$G_B = X_i * V_i = 78.810,01 \text{ mg/L} * 0.018 \text{ m/min} * 1.44 = 2.053,56 \text{ kg/m}^2 * \text{día}$$

[Ecuación No. 38]

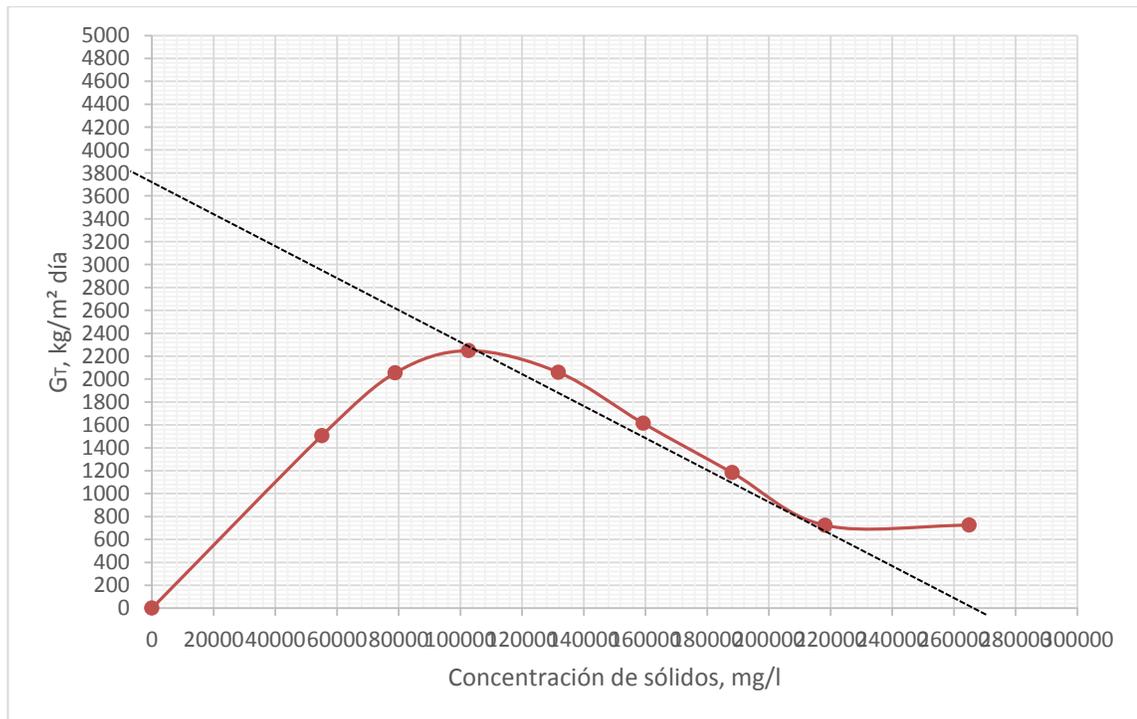
Tabla 2. Datos calculados de GB para las distintas concentraciones

Muestra	Concentración, mg/L	GB, kg/m ² *día
Muestra 5 % p/p	0	0
Muestra 7 % p/p	55,074.22	1,506.83
Muestra 9 % p/p	78,810.01	2,053.56
Muestra 11 % p/p	102,713	2,248.18
Muestra 13 % p/p	131,748.30	1,614.07
Muestra 15 % p/p	159,283.20	1,183.01
Muestra 17 % p/p	188,088	723.75
Muestra 20 % p/p	264,949.20	724.91

Fuente: elaboración propia.

Como tercer paso, señalar $X_u = 264.949,2 \text{ mg/L}$ en el eje de abscisas de la figura siguiente. Desde X_u trazar una tangente a la curva. Esta tangente corta al eje de ordenadas en $GT=3.700 \text{ kg}_{\text{sólidos}}/\text{m}^2 * \text{día}$.

Figura 10. Curva de flujo discontinuo en función de la concentración de sólidos



Fuente: elaboración propia.

Como paso último, calcular el área de espesado:

$$At = \frac{M}{G_T} = Q_o * \frac{X_o}{G_T} = 14.33 \frac{m^3}{día} * 55.074 \frac{kg}{m^3} / 3.700 \frac{kg}{m^2 * día} = 0.213 m^2$$

[Ecuación No. 39]

Para el cálculo del área industrial, se multiplica el valor de A_c obtenido por un coeficiente que varía entre 1.2 y 1.4, normalmente se toma el valor de 1.2.

$$H_{cono} = r * \tan 10^\circ = 39.50\text{cm} * \tan 10^\circ = 6 \text{ cm}$$

Además de la profundidad (altura) determinada por los cálculos que representa la zona de sedimentación, hay que considerar algunas provisiones para inventario y aspecto de diseño mecánico tales como:

- Espesamiento del fondo: 5-10 centímetros (equivalente a la altura del cono de 6 cm)
- Capacidad de almacenamiento: 10 centímetros

Al comparar las dos áreas, la del clarificado y la del espesado, se observa que el área mayor es la del clarificado, por tanto, se elige esta área para dimensionar el sedimentador.

Tabla 3. Comparación del área industrial de clarificado y área industrial de espesado

Muestra inicial	
A _{clarificado}	0.49 m ²
A _{espesado}	0.26 m ²
Área seleccionada	0.49 m ²

Fuente: elaboración propia.

Las dimensiones finales son las siguientes.

Tabla 4. Dimensionamiento del sedimentador circular a escala piloto

Sedimentador	Diámetro	Altura de sedimentación	Altura de cono	Altura debida a la capacidad de almacenamiento
	79 cm	12 cm	6 cm	10cm

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Muestra de cálculo, datos originales y datos calculados del análisis fisicoquímico de la suspensión empleada

- **Cálculo para análisis fisicoquímico de la suspensión**

Tabla 5. Datos experimentales de titulación de la suspensión

		Titulaciones						
		EDTA						K ₂ Cr ₂ O ₇
Muestra	Peso	Ca _{carbonato}	Ca _{yeso}	Zn	Fe ⁺³	Al	Mg	Fe ⁺²
Muestra 1	5.0149	0.43 mL		0 mL	0.60 mL	0 mL	0.05 mL	0.03 mL
	1.0023		0.12 mL					

Fuente: elaboración propia.

Cálculo del porcentaje de humedad de la muestra

$$\% \text{ Humedad} = \left[1 - \frac{2.5001 \text{ g}}{50.0012 \text{ g}} \right] * 100 = 95\%$$

Cálculo del porcentaje de insolubles

$$\% \text{ Insolubles} = \frac{0.0968}{5.0149 \text{ g}} * 100 = 1.93\%$$

Cálculo del porcentaje de Mg elemental

$$\% \text{ Mg} = \frac{2.431 * (0.05 \text{ mL} - 0 \text{ mL}) * [0.1001 \text{ M}]}{\frac{5.0149 \text{ g}}{250 \text{ mL}} * 25 \text{ mL}} = 0.03 \%$$

Cálculo del porcentaje de $MgCO_3$

$$\% MgCO_3 = 0.03 \% * \frac{84.3139}{24.31} = 0.09 \%$$

Cálculo del Ca elemental como $CaCO_3$

$$\% Ca = \frac{4.008 * (0.43 \text{ mL}) * [0.1001]}{\frac{5.0149 \text{ g}}{250 \text{ mL}} * 25 \text{ mL}} = 0.34\%$$

Cálculo del porcentaje de $CaCO_3$

$$\% CaCO_3 = 0.34 \% * \frac{100.08}{40.08} = 0.86 \%$$

Cálculo del Ca elemento como $CaSO_4$

$$\% Ca = \frac{4.008 * (0.12 \text{ mL}) * [0.1001]}{1.0023 \text{ g}} = 0.05\%$$

Cálculo del porcentaje de $CaSO_4$

$$\% CaSO_4 = 0.05 \% * \frac{136.14}{40.08} = 0.16 \%$$

Cálculo del porcentaje de Fe^{+3} elemental

$$\% Fe^{+3} = \frac{5.585 * (0.60 \text{ mL}) * [0.1001]}{\frac{5.0149 \text{ g}}{250 \text{ mL}} * 25 \text{ mL}} = 0.67\%$$

Cálculo del porcentaje de Fe_2O_3

$$\% Fe_2O_3 = 0.67 \% * \frac{159.69}{55.85} = 1.92 \%$$

Cálculo del porcentaje de Fe^{+2} elemental

$$\% Fe^{+2} = \frac{5.585 * (0.03 \text{ mL}) * [0.1003]}{\frac{5.0149 \text{ g}}{250 \text{ mL}} * 25 \text{ mL}} = 0.03\%$$

Cálculo del porcentaje de FeO

$$\% FeO = 0.03 \% * \frac{71.844}{55.85} = 0.04 \%$$

Tabla 6. Análisis químico de la muestra recolectada

Compuesto	Valor (%)
Fe_2O_3	1.92
FeO	0.04
Al_2O_3	0
$MgCO_3$	0.09
$ZnCO_3$	0
$CaCO_3$	0.86
$CaSO_4$	0.16
Insolubles	1.93
Humedad	95
Porcentaje total	100

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Análisis estadístico

Tabla 7. Prueba F para varianza de dos muestras

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	149862.6873	0.009845033
Varianza	5150603784	4.84956E-05
Observaciones	8	8
Grados de libertad	7	7
F	1.06208E+14	
P(F<=f) una cola	1.50858E-48	
Valor crítico para F (una cola)	3.78704354	

Fuente: elaboración propia.

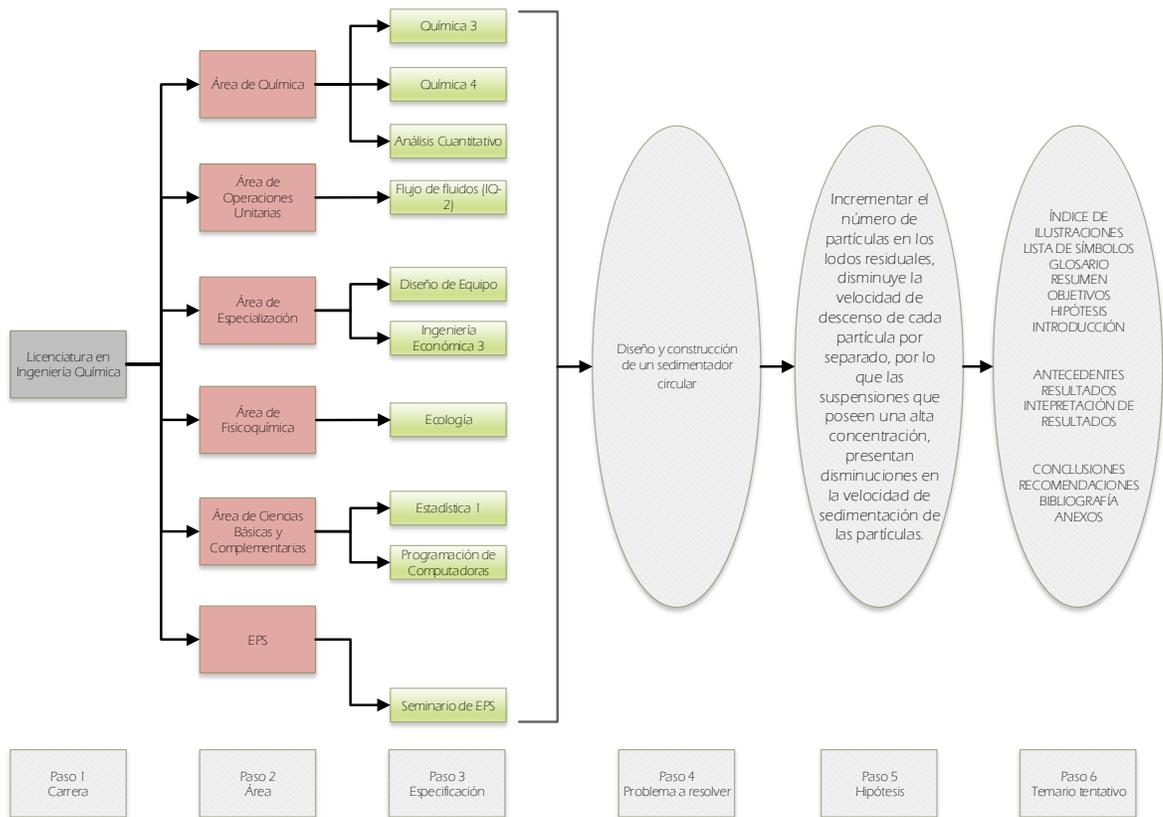
Tabla 8. Prueba “t” para dos muestras suponiendo varianzas iguales

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	149862.6873	0.009845033
Varianza	5150603784	4.84956E-05
Observaciones	8	8
Varianza agrupada	2575301892	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	14	
Estadístico t	5.90621714	
P(T<=t) una cola	1.9133E-05	
Valor crítico de t (una cola)	1.761310136	
P(T<=t) dos colas	3.8266E-05	
Valor crítico de t (dos colas)	2.144786688	

Fuente: elaboración propia.

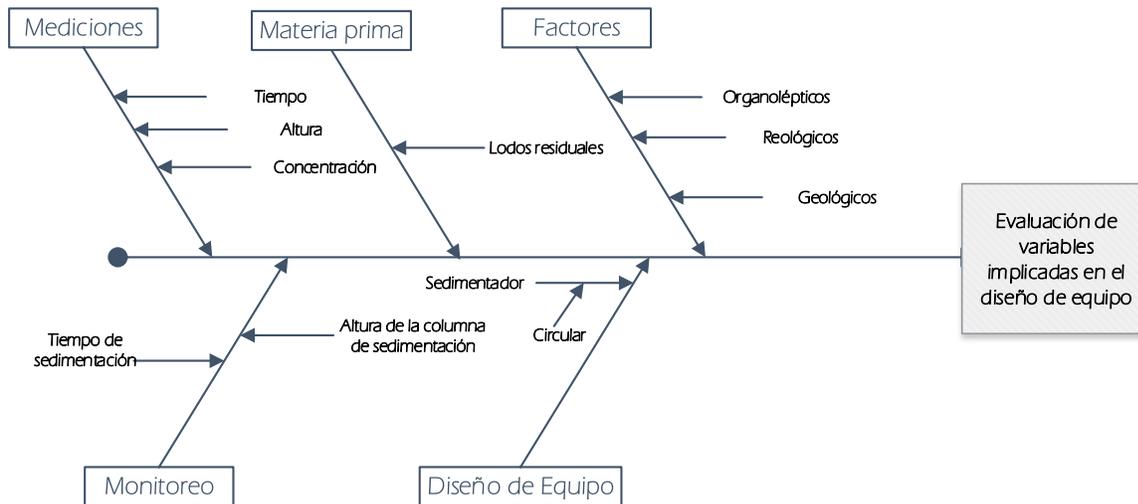
ANEXOS

Anexo 1. Tabla de requisitos académicos



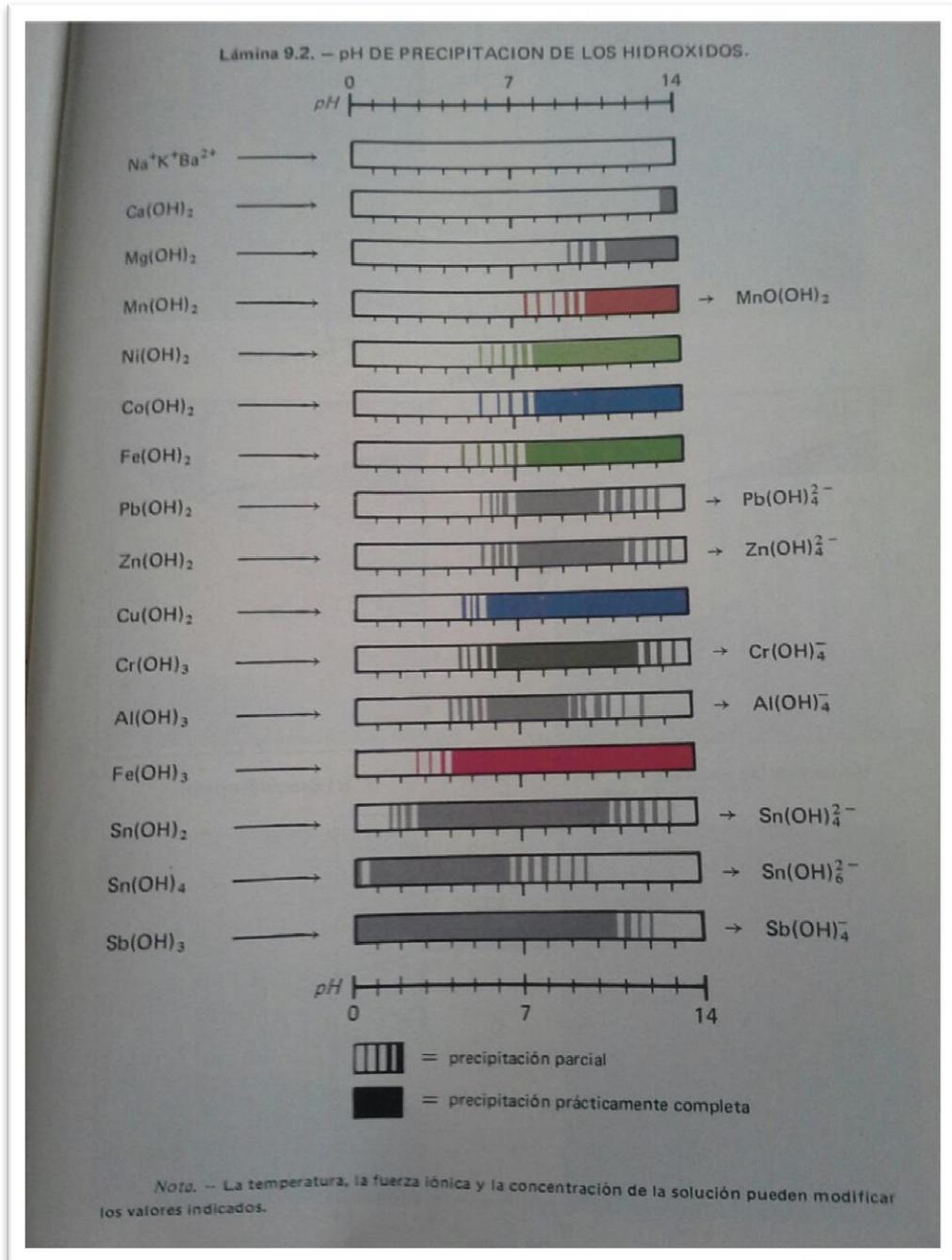
Fuente: elaboración propia.

Anexo 2. Diagrama de causa y efecto para determinar las variables en el diseño y construcción de un sedimentador circular a escala piloto



Fuente: Elaboración propia

Anexo 3. pH de precipitación de los hidróxidos



Fuente: Araneo, A., *Química analítica cualitativa*, McGraw Hill

